

Tračnička infrastruktura u potresom pogođenim područjima

Lakušić, Stjepan; Haladin, Ivo; Vranešić, Katarina

Source / Izvornik: **Građevinar, 2020, 72, 905 - 922**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

<https://doi.org/10.14256/JCE.2967.2020>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:828517>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-10**

Repository / Repozitorij:

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



Primljen / Received: 10.5.2020.

Ispravljen / Corrected: 21.9.2020.

Prihvaćen / Accepted: 25.9.2020.

Dostupno online / Available online: 10.11.2020.

Tračnička infrastruktura u potresom pogođenim područjima

Autori:



Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
stjepan.lakusic@grad.unizg.hr



Doc.dr.sc. **Ivo Haladin**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ivo.haladin@grad.unizg.hr



Katarina Vranešić, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
katarina.vranesic@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Stjepan Lakušić, Ivo Haladin, Katarina Vranešić

Tračnička infrastruktura u potresom pogođenim područjima

U slučaju djelovanja potresa na tračničku infrastrukturu, čak i male deformacije ili oštećenja kolosijeka mogu ugroziti sigurnost odvijanja tračničkog prometa. Oštećenja mogu biti prisutna na donjem odnosno gornjem ustroju kolosijeka, ali i na sustavu elektrifikacije te signalno sigurnosnim uređajima. Kod potresa jačeg intenziteta dolazi do oštećenja zastorne prizme koja za posljedicu imaju smanjenje bočnog i uzdužnog otpora kolosijeka. Djelovanje potresa stvara i opasnost od iskliznuća tračničkog vozila koje je u pokretu. Prometovanje tračničkih vozila također izaziva određene razine vibracija te je u ovom radu dan prikaz analize naknadnog djelovanja vibracija tračničkog prometa na građevine stradale u potresu 22. ožujka 2020. u Gradu Zagrebu.

Ključne riječi:

potres, tračnička infrastruktura, oštećenja, sigurnost prometa, vibracije, tramvaj

Research Paper

Stjepan Lakušić, Ivo Haladin, Katarina Vranešić

Railway infrastructure in earthquake affected areas

In the case of seismic impact on rail infrastructure, even small deformations or damage to track structure can compromise safe operation of rail traffic. Damage can affect track substructure or permanent way of the track, but also the electrification system and safety-signalling devices. Ballast prism will suffer damage in case of greater intensity earthquakes, resulting in the reduction of lateral and longitudinal resistance of track structure. Earthquake action may also cause derailment of moving rail vehicles. Operation of rail vehicles also causes certain levels of vibrations, and so an analysis of subsequent effects of rail traffic.

Key words:

earthquake, rail infrastructure, damage, traffic safety, vibrations, tram

Vorherige Mitteilung

Stjepan Lakušić, Ivo Haladin, Katarina Vranešić

Schieneninfrastruktur in erdbebengefährdeten Gebieten

Im Falle der Einwirkung eines Erdbebens auf die Schieneninfrastruktur können bereits kleine Verformungen oder Schäden am Gleis die Sicherheit des Schienenverkehrs gefährden. Schäden können am Bahnober- oder Bahnunterbau, aber auch am Elektrifizierungssystem und an den Vorrichtungen für Zugsicherung/Signalgebung auftreten. Bei Erdbeben höherer Intensität wird das Schotterprisma beschädigt, was zu einem verringerten seitlichen und längslaufenden Widerstand des Gleises führt. Durch die Auswirkungen des Erdbebens besteht auch die Gefahr des Entgleisens fahrender Schienenfahrzeuge. Schienenfahrzeuge verursachen während der Fahrt auch bestimmte Vibrationsniveaus, und diese Arbeit enthält eine Analyse der nachträglichen Auswirkungen von Vibrationen des Schienenverkehrs auf Gebäude, die durch das Erdbeben am 22. März 2020 in der Stadt Zagreb beschädigt wurden.

Schlüsselwörter:

Erdbeben, Schieneninfrastruktur, Schäden, Verkehrssicherheit, Vibration, Straßenbahn

1. Uvod

Potresno inženjerstvo interdisciplinarno je područje s ciljem projektiranja i analize konstrukcija spremnih odgovoriti na razorno djelovanje potresa. Primarni fokus potresnog inženjerstva jesu konstrukcije visokogradnje, no ništa manje važne nisu niti infrastrukturne građevine koje u seizmički aktivnim područjima također moraju biti dimenzionirane na potresno opterećenje. Tračnička infrastruktura odlikuje se vrlo velikom preciznošću izvedbe i strojarskim tolerancijama, te je samim time uslijed djelovanja potresa vrlo važno uočiti eventualne pomake i deformacije koji mogu ugroziti odvijanje prometa. Željeznički kolosijek zbog geometrijskih ograničenja, poglavito uzdužnog nagiba, vrlo se često nalazi na vijaduktu ili mostu koji čini integralni dio tračničke infrastrukture te također mora biti otporan na razorno djelovanje potresa kako bi se nakon djelovanja potresa u najkraćem mogućem roku uspostavilo prometovanje željezničkih vozila.

Promatramo li tračnički sustav kao izvor vibracija, također se treba upoznati s njegovim utjecajem na okolne građevine, posebice građevine već stradale uslijed potresnog djelovanja. Naime, tračnička infrastruktura u interakciji s često vrlo teškim tračničkim vozilima generira vibracije koje, ako nisu kontrolirane, također mogu izazvati učinak sličan potresu manjeg intenziteta. Stoga je nužno analizirati stanje tračničke infrastrukture i njenu sposobnost da apsorbira vibracije, te prijenos vibracija na okolne građevine.

1.1. Djelovanje potresa na željezničku infrastrukturu

Zabilježene frekvencije potresnih valova u rasponu su od 0,1 do 30 Hz, pri čemu valovi više frekvencije imaju veće akceleracije, ali relativno male amplitude, a valovi niže frekvencije imaju malu akceleraciju, ali više amplitude [1]. Kada je riječ o željezničkom prometu, podrhtavanje uzrokovano seizmičkim valovima može uzrokovati iskliznuće vlakova te izazvati oštećenje kolosiječne konstrukcije, uzrokovati likvefakciju tla i stvoriti klizišta. Željeznički je promet među najznačajnijim infrastrukturama u svim državama stoga je vrlo važno održati ga vitalnim i funkcionalnim. On mora biti brz, siguran, udoban i stabilan u bilo kakvim vremenskim uvjetima i prirodnim nepogodama. S obzirom na to da sigurno odvijanje prometa po željezničkim prugama prije svega ovisi o geometrijskim karakteristikama kolosijeka, poput širine i nadvišenja, iznimno je važno i nakon velikih prirodnih katastrofa kao što je potres zadržati početnu geometriju kolosijeka [2]. Oštećenja koja će nastati kod željezničkih konstrukcija uslijed djelovanja potresa direktno su vezana za vršnu akceleraciju tla. S obzirom na to da odgovor na seizmičku aktivnost i mehanizam oštećenja znatno variraju kod komponenata željezničke infrastrukture

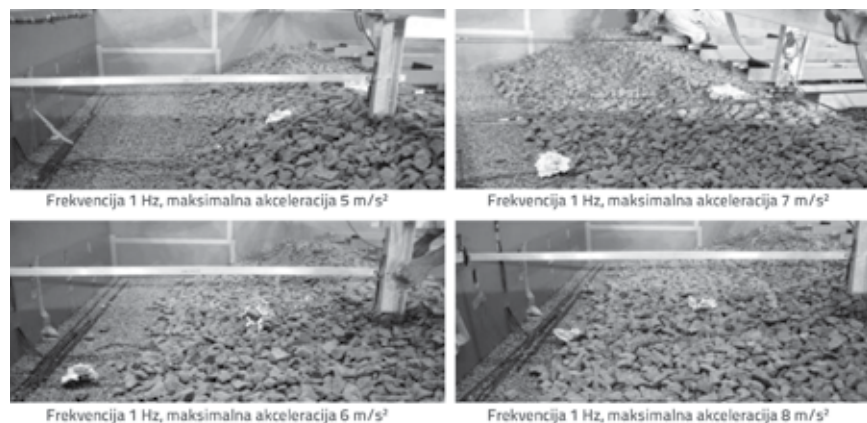
(nasipa, kolosijeka, mostova, stanica), razina oštećenja će se također izrazito razlikovati [3]. Osjetljivost željezničkog kolosijeka izravno je povezana sa svojstvima tla na kojemu se kolosijek nalazi [3]. Kada je riječ o seizmičkom djelovanju, nasipi predstavljaju znatno veću opasnost od usjeka, pri čemu je najvažniji parametar stabilnost pokosa nasipa [4]. Prirodna frekvencija željezničkog nasipa iznosi od 1 do 10 Hz. Usporedba s frekvencijom potresa koja može biti između 0,1 i 10 Hz, ovisno o potresu, pokazuje da širenje seizmičkog vala unutar ili oko željezničkog nasipa može izazvati rezonancu nasipa, što će se manifestirati pomacima u nasipu [4]. Uslijed djelovanja potresa vrlo česta pojava na cestovnim ili željezničkim nasipima je likvefakcija tla. Likvefakcija temeljnih slojeva može oštetiti sve konstrukcije koje se nalaze iznad njih, a željeznički kolosijeci su iznimno osjetljivi na takva oštećenja [5]. Kada je riječ o željezničkim nasipima, horizontalni pomak tla ne smije biti veći od 5 cm. Iznad ove vrijednosti javljaju se deformacije na površini kolosijeka [6]. Na slici 1. prikazani su primjeri oštećenja kolosijeka nakon slijeganja željezničkog nasipa zbog potresa u Tohaku, Japan 2011. godine.

S povećanjem vrijednosti akceleracije tla, povećava se uzdužno izvijanje kolosijeka. Kada je vrijednost akceleracije jednaka 2 m/s^2 , uzdužno je izvijanje jednako 0,07 mm. Ovaj je rast linearan te maksimalnu vrijednost doseže kod 10 m/s^2 , pri čemu izvijanje iznosi 0,35 mm. Može se vidjeti da je uzdužno izvijanje zanemarivo te ne uzrokuje probleme u prometovanju vlakova. Bočno izvijanje također raste s povećanjem vrijednosti akceleracije. Kod vrijednosti 2 m/s^2 , bočno je izvijanje jednako 20,35 mm, a kod 10 m/s^2 , bočno je izvijanje jednako 101,80 mm. Graničnu vrijednost bočno izvijanje poprima kod akceleracije tla od 4 m/s^2 te iznosi 40,70 mm, pri čemu promet više nije moguć [2].

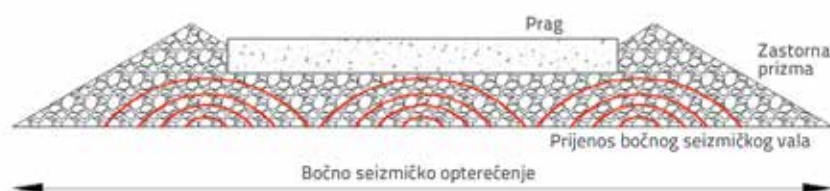
U ispitivanjima [8] i [9] analiziran je utjecaj potresnog opterećenja na zastornu prizmu, a ispitivanja su obavljena na potresnom stolu. Na slici 2. prikazan je oblik zastorne prizme nakon djelovanja akceleracija od 5 do 8 m/s^2 , kod frekvencije 1 Hz. Kod akceleracije 5 m/s^2 potresni stol, pragovi i zastorna prizma vibrirali su zajedno pa nikakve promjene na zastornoj prizmi nisu uočene. Kod 6 m/s^2 , uočene su određene promjene na bankinama zastorne prizme te na njezinom pokosu. Kod akceleracije od 7 i 8 m/s^2 , vidljive su značajne razlike između vibracija pragova i zastorne prizme, pri čemu se javljaju znatna oštećenja zastorne prizme na pokosu i bankinama. Bočni



Slika 1. Primjer propadanja nasipa nakon potresa te njegova rekonstrukcija [7]



Slika 2. Oštećenje zastorne prizme djelovanjem ubrzanja različitih vrijednosti [8]



Slika 3. Širenje bočnog seizmičkog vala kroz zastonu prizmu za vrijeme potresa [10]

Tablica 1. Sile na kontaktu prag-zastor kod različitog pomaka praga [10]

Pomak praga [mm]	Prije potresa [N]		Nakon potresa [N]	
	Maksimalna	Prosječna	Maksimalna	Prosječna
1	654,4	13,5	429,8	10,1
2	696,1	14,1	441,8	10,3
3	715,1	14,5	460,5	10,4
4	785,3	14,7	475,6	10,4
5	870,4	14,8	512,6	10,5
6	815,6	15,1	535,3	10,5
7	811	15,5	575,3	10,7
8	992,9	15,7	603,9	10,9
9	955	15,8	673,6	11,2
10	1010	16,1	785,3	11,4

otpor zastorne prizme smanjuje se s porastom maksimalne akceleracije. Kod akceleracije od 8 m/s^2 bočni je otpor smanjen za 15 %, a nikakvo smanjivanje nije uočeno kod akceleracija do 7 m/s^2 . Uočeno je da ne postoji značajna razlika u tendenciji smanjenja bočnog otpora zastorne prizme kod različitih frekvencija. Iz svega navedenoga, jasno je da oblik zastorne prizme te bočni otpor vrlo malo ovise o frekvencijama od 1 do 10 Hz. U uobičajenim jačinama potresa, do oštećenja zastorne prizme dolazi kod akceleracija 6 m/s^2 i više, a bočni se otpor počinje smanjivati kod akceleracija $7,5 \text{ m/s}^2$.

Qing Jing i dr. u svome su radu [10] metodom diskretnih elemenata simulirali utjecaj potresa na pragove i zastornu prizmu. Na slici 3. prikazano je širenje seizmičkog vala kroz

zastornu prizmu za vrijeme potresa. Tijekom potresa dolazi do pomicanja i premještanja materijala zastorne prizme, što rezultira slabim kontaktom između materijala te promjenom lanca sile. Smanjuje se i maksimalna te prosječna kontaktna sila, zbog čega dobro zbijena zastorna prizma postaje rastresita. Također, dolazi do promjena lanca sila u bankini zastorne prizme, klizanja materijala zastorne prizme i relativnih pomaka između praga i čestica zastorne prizme. S obzirom na to da su bankine izrazito bitne za održavanje stabilnosti kolosijeka, vrlo je važno zastornu prizmu dovesti u adekvatno stanje nakon potresnog opterećenja [10]. Dolazi do promjena na kontaktu materijala zastorne prizme i praga (tablica 1.).

Trenje između materijala zastorne prizme vrlo je važan parametar kada je riječ o bočnom otporu praga te o utjecaju vibracija. Ustanovljeno je da kod materijala zastorne prizme koji nisu oštrobridni te imaju manji koeficijent trenja, smanjivanje bočnog otpora rezultira i ugrožavanjem stabilnosti kolosijeka, jer su postignute vrijednosti bočnog otpora ispod graničnih vrijednosti propisanih standardima [10].

U radu [11] analizirano je djelovanje potresnog opterećenja na kolosijek, odnosno zastornu prizmu na dijelovima kolosijeka u pravcu i u krivinama. Nakon primijenjenog potresnog opterećenja, sila bočnog otpora smanjila se u oba uzorka – u slučaju kolosijeka u pravcu kod pomaka praga od 2 mm smanjila se za 37 % te je iznosila 5,3 kN, a kod kolosijeka u krivini za 24 % te je iznosila 6,2 kN. Kada je pomak praga iznosio više

od 4 mm, nije postojala razlika u sili bočnog otpora kod ta dva uzorka [11].

U radu [2] provedena je analiza djelovanja različitih vrijednosti vršne akceleracije tla na tračnice i pragove. Seizmičko djelovanje ima znatan utjecaj na aksijalne sile tračnice, koje rastu s porastom vrijednosti vršne akceleracije. Međutim i najveće vrijednosti sila su manje od dopuštenih vrijednosti za tračnicu 60 E1. Vrijednost sile smicanja raste s povećavanjem vrijednosti vršne akceleracije. I kod najvećih postignutih vrijednosti, sila i dalje nije veća od maksimalne sile od 200 kN za tračnicu 60 E1 [1]. Nadalje, moment savijanja tračnice također raste s povećavanjem vrijednosti akceleracije, ali najveće vrijednosti momenta i dalje su manje od dopuštenih 120 kNm za spomenuti

tip tračnice [2]. Najveća opasnost kada je riječ o tračnicama jest stvaranje velikih aksijalnih sila za vrijeme potresa. Izvijanje je jedan od najčešćih problema za vrijeme potresa koji onemogućavaju funkcionalnost kolosijeka. Ako su aksijalne sile veće od kritičkih sila tračnice, izvijanje će prouzročiti promjene u geometriji kolosijeka i odstupanju od njegove početne pozicije. Kritičnu je silu moguće izračunati pomoću izraza [2]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_e^2}$$

pri čemu je:

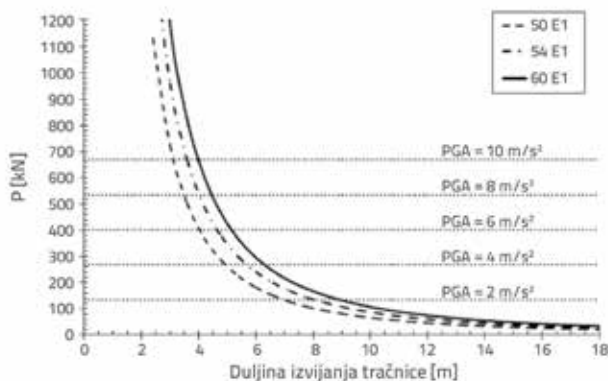
P_{cr} – kritična sila tračnice

E – modul elastičnosti tračnice

I – moment inercije tračnice

l_e – duljina izvijanja tračnice koja ovisi o geometrijskim karakteristikama i kvaliteti tračnice.

Na slici 4. prikazan je odnos kritičnih sila tračnice s obzirom na različite duljine izvijanja te za različite tipove tračnice (50 E1, 54 E1, 60 E1). Očito je da će, ako je duljina izvijanja manja od 3 m, aksijalne sile uzrokovane seizmičkom aktivnošću biti manje od kritičnih sila, čak i kod vršnog ubrzanja tla (eng. *Peak Ground Acceleration* – PGA) od 10 m/s² (1000 gal) te se izvijanje neće dogoditi. Ova vrijednost duljine izvijanja prisutna je kod kolosiječnih konstrukcija s dobro pritegnutim pričvrstnim priborom te velikim bočnim otporom. Također, duljina izvijanja može se ograničiti razmakom između pragova. Ako je duljina izvijanja veća od 9 m, izvijanje tračnica dogodit će se čak i kod vrijednosti vršne akceleracije od 2 m/s². Ovo je slučaj kod kolosijeka sa slabim pričvrstnim priborom te malom vrijednosti bočnog otpora. Za tračnice kojima je duljina izvijanja između 3 i 9 m, duljina izvijanja ovisi o tipu tračnice te o vrijednosti vršne akceleracije.



Slika 4. Kritične sile u tračnici s obzirom na duljinu izvijanja za različite vrijednosti PGA i različite tipove tračnica [2]

Sila na smicanje pragova raste s povećavanjem akceleracije, pri čemu najveća vrijednost iznosi 60 kN za akceleraciju 10 m/s², međutim vrijednost sile manja je od maksimalne dopuštene vrijednosti koja iznosi 150 kN. Također, s povećavanjem akceleracije raste i moment savijanja, ali i najveći moment koji

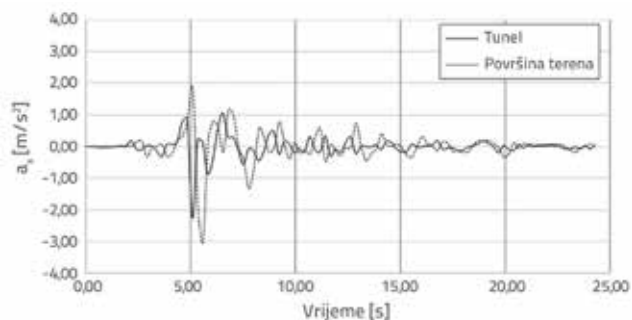
je prisutan kod akceleracije od 10 m/s² i iznosi 45 kNm manji je od maksimalnog dopuštenog momenta od 200 kNm. Ove vrijednosti pokazuju da bez obzira na jačinu seizmičke aktivnosti, pragovi neće imati nikakvih konstrukcijskih oštećenja [2].

Usljed potresa malih magnituda, signalno-sigurnosni uređaji imat će mala oštećenja koja se vrlo brzo mogu sanirati, međutim kod potresa s većim magnitudama može doći do lomova signala [12]. Nakon Gujurat potresa došlo je do oštećenja signalno-sigurnosnih uređaja, zbog čega se nakon potresa skretnicama moralo upravljati ručno, a brzine vlakova bile su znatno ograničene [13]. Usljed djelovanja potresa može doći i do naginjanja ili sloma stupova kontaktne mreže te potpunog prekida opskrbe strujom putem gornjeg voda, što je bio slučaj u velikom potresu u Japanu 2011. godine [14].

Velika oštećenja nakon potresnih djelovanja događaju se na signalnoj opremi. Oštećenje signalnih kabela i releja zabilježeno je u mnogim potresima u Japanu. Također, deformacije tla uzrokuju naginjanje stupova za telekomunikaciju te ispadanje kabela, a oštećenja ispravljačkih stanica i opreme može rezultirati prekidom električne energije [15].

1.2. Utjecaj potresa na tunelsku cijev podzemne željeznice

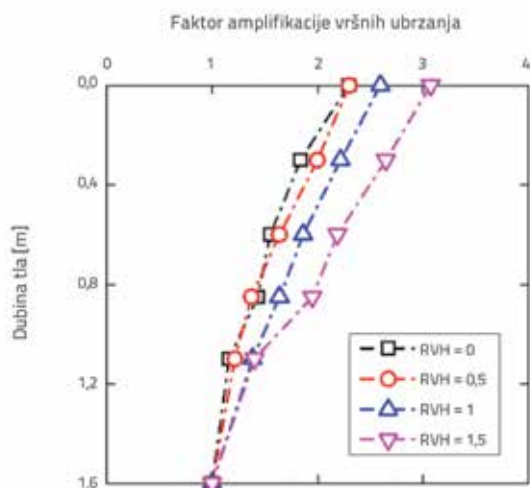
Analizom utjecaja akceleracije tla na tunele, koja je provedena u radu [16], ustanovljeno je da se velika oštećenja na tunelu događaju iznimno rijetko, u ekstremnim uvjetima te da nikakva oštećenja neće biti zabilježena kada je akceleracija tla manja od 1,86 m/s² i/ili brzina manja od 0,2 m/s. Neznatna do umjerena oštećenja događaju se kod akceleracije do 4,9 m/s² te brzine od 0,9 m/s. Umjerena do teška oštećenja zamijećena su kod akceleracije veće od 4,9 m/s². Singh M. i dr. [17] analizirali su utjecaj potresa jačine 6.8 stupnjeva po Richterovoj ljestvici i akceleracije tla 3,53 m/s² na tunel metroa promjera 6.26 m koji se nalazi na dubini od 16,87 m. Ustanovljeno je da su inducirane vrijednosti akceleracije na površini tla veće od akceleracija zabilježenih u tunelu (slika 5.) iz čega proizlazi da su tuneli znatno sigurniji nego građevine koje se nalaze na površini terena [17, 18].



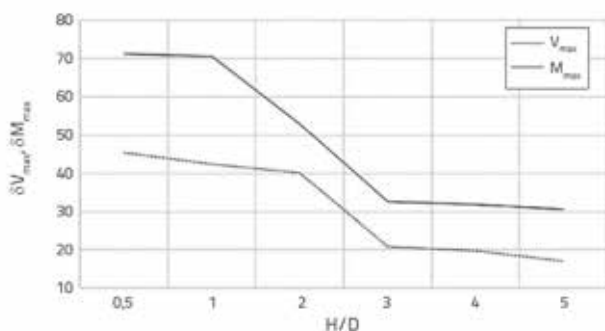
Slika 5. Horizontalne akceleracije na površini terena te na kruni tunela [17]

Naime, tlo oko podzemne konstrukcije djeluje kao svojevrsan prigušivač vibracija. Na slici 6. prikazan je odnos promjene

akceleracije s obzirom na dubinu tla, gdje je jasno vidljivo da se horizontalna akceleracija povećava sa smanjivanjem dubine tla, a na slici 7. je vidljivo da se s promjenom omjera dubine tunela i promjera tunela mijenja sila smicanja te moment savijanja.



Slika 6. Faktor amplifikacije vršnih ubrzanja tla pod različitim omjerima horizontalnih i vertikalnih vršnih ubrzanja (eng. *Ration of Vertical to Horizontal peak ground acceleration – RVH*) [19]

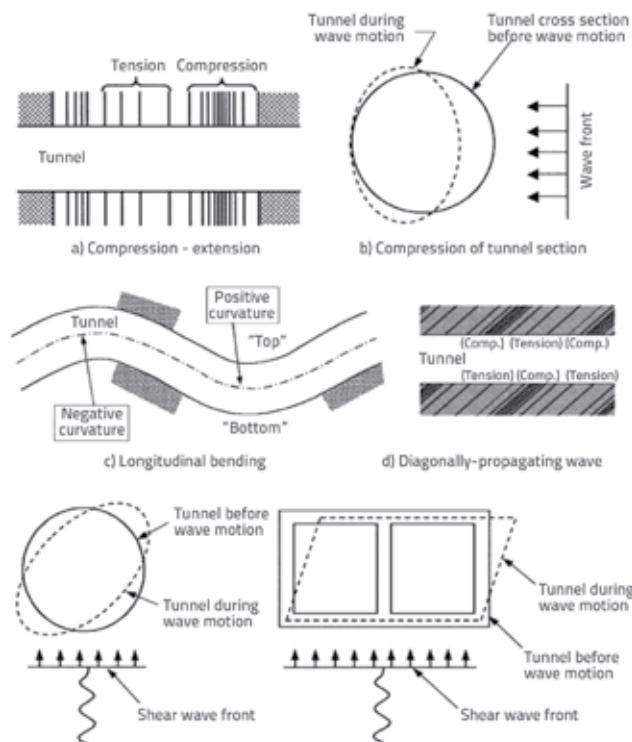


Slika 7. Utjecaj omjera dubine i promjera tunela na silu smicanja i moment savijanja [17]

U radu [18] ustanovljeno je da se zamijećena oštećenja podzemnih konstrukcija smanjuju s povećavanjem dubine te da su podzemne konstrukcije koje se nalaze u zemljanom materijalu oštećenije od konstrukcija u čvrstoj stijeni. Od iznimne je važnosti i trajanje vrlo jakih potresnih podrhtavanja koja mogu izazvati slom uslijed zamora te velike deformacije.

Istraživanja su pokazala da u reagiranju tunelske cijevi na potres važnu ulogu ima reakcija okolnog tla, a ne sama svojstva tunela. Prema [18, 20], tri tipa deformacija nastaju kao reakcija podzemne konstrukcije na seizmičku aktivnost (slika 8): aksijalno skupljanje i istezanje, longitudinalno savijanje te smicanje. Aksijalne deformacije u tunelu nastaju zbog komponente seizmičkog vala koji stvara pokrete paralelne s osi tunela te uzrokuju naizmjenično skupljanje i istezanje. Deformacije savijanja uzrokuje komponenta seizmičkog vala

koja uzrokuje gibanje čestica okomito na longitudinalnu os tunela. Deformacije smicanja nastaju kada se valovi smicanja šire prema tunelskoj osi i uzrokuju distorziju poprečnog presjeka tunelske cijevi.



Slika 8. Primjeri deformacije tunela uslijed potresnog djelovanja [18]

Tajvanski je metro dao upute kako reagirati s obzirom na jačinu potresa [21]. Ako je potres slabiji od 2 stupnja po Richteru te nikakva oštećenja nisu zamijećena, promet se može i dalje nesmetano odvijati. Ako jakost potresa iznosi između 2 i 3 stupnja po Richteru, promet će se odvijati brzinom 40 km/h dok se ne obavi pregled kolosijeka. Kod potresa jačine 4 ili 5 stupnja po Richteru te akceleracije tla manje od 1 m/s², vozilo će smanjenom brzinom nastaviti do prve stanice kako bi se osigurala evakuacija putnika, a kod potresa jačih od 5 m/s² i akceleracije tla veće od 1 m/s², osoblje će izaći iz vlaka te provesti pregled kolosijeka, nakon čega će vlak vrlo malom brzinom krenuti prema sljedećoj stanici kako bi se putnici evakuirali. Nakon toga vožnja će biti obustavljena dok se ne provede kontrola cjelokupne mreže.

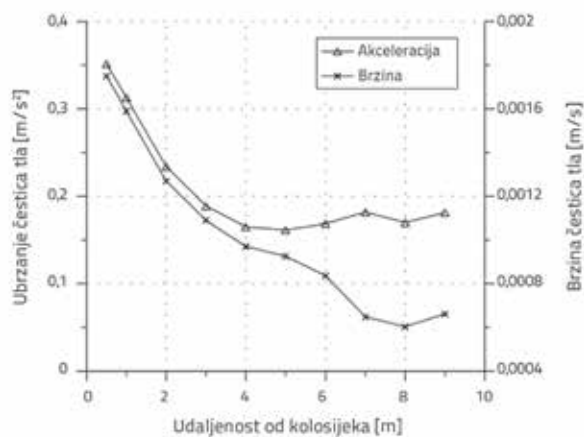
2. Utjecaj vibracija tračničkih vozila na građevine oštećene u potresu

2.1. Širenje vibracija od kolosijeka do okolnih građevine

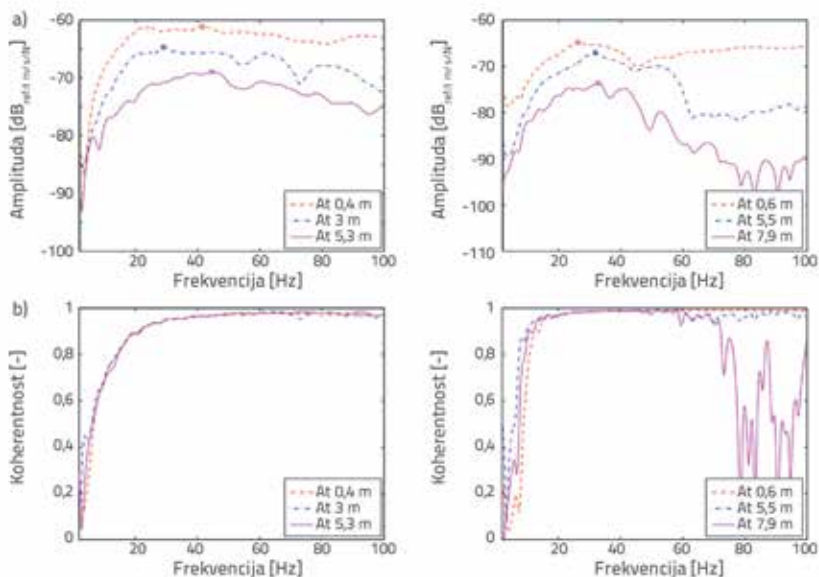
Iako su vibracije koje nastaju od prometa vrlo malih amplituda, mogu imati negativan utjecaj na povijesne zidane građevine zbog velikog broja cikličnog opterećenja. Budući da zidane građevine

nisu otporne na vlačna naprezanja, uslijed djelovanja vibracija javlja se oštećenje žbuke te odvajanje zidanih elemenata, što može rezultirati postupnim smanjivanjem otpornosti cijele konstrukcije. Konstrukcije kod kojih postoji problem sa slijevanjem temelja ili konstrukcije koje su bile izložene vibracijama potresa iznimno su ugrožene ako su nakon toga izložene vibracijama od prometa [22]. U radu [23] je ustanovljeno da vibracije uzrokovane prometom ne uzrokuju vidljiva oštećenja na zidovima, međutim uzrokuju proširenje oštećenja (pukotina) na zidovima koji su već bili oštećeni. Te vibracije izazivaju nevidljive promjene na zidovima zgrada, kao što je mikroskopsko mrvljenje žbuke te posljedično omekšavanje i dezintegracija zida, što rezultira promjenama u dinamičkim svojstvima zidova te tlačnim i bočnim deformacijama. Osim toga, ustanovljeno je da se vidljive promjene u karakteristikama zidova događaju nakon što su konstrukcije izložene nekoliko desetina tisuća ciklusa vibracija, a to pokazuje da je amplituda i trajanje vibracija vrlo važan parametar [23]. Kao posljedica mikropukotina žbuke te dezintegracije zidova, vibracije uslijed prometa uzrokuju redukciju duktilnosti, što smanjuje kapacitet disipacije energije i može dovesti do smanjivanje seizmičke otpornosti građevine [23].

Prijenosom vibracija od izvora kroz okolno tlo do prijarnika (temelja građevine) javlja se određeni gubitak energije vibracija, pri čemu se prolaskom vibracija kroz pragove njihova vrijednost smanjuje na 90 % početne vrijednosti. Međutim, kada se valovi šire kroz tlo, njihovo je slabljenje znatno sporije, a povećava se s udaljenošću, pri čemu vibracije na prijarniku mogu biti manje za 2 do 15 dB [24, 25]. Na slici 9. prikazano je smanjenje vibracija s povećavanjem udaljenosti.



Slika 9. Smanjenje vibracija s povećavanjem udaljenosti od kolosijeka [25]



Slika 10. Funkcije mobilnosti prijenosa, frekvencija i koherentnost: a) kolosijek sa zastornom prizmom, b) kolosijek na čvrstoj podlozi [26]

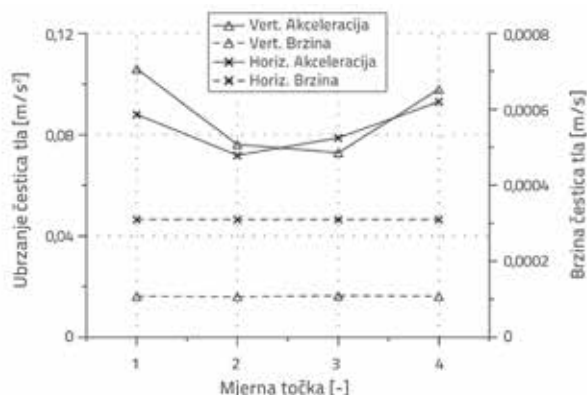
U radu [26] provedeno je mjerenje vibracija uzrokovanih prolaskom tračničkog vozila na različitim udaljenostima od kolosijeka, pri čemu je jedan senzor postavljen na kolosijek, a drugi na temelj zgrade. Ispitivanja su provedena na nekoliko lokacija na kolosijecima sa zastornom prizmom te na kolosijecima na čvrstoj podlozi. Analizom rezultata ustanovljeno je da se razina vibracija od izvora do prijarnika smanjila za gotovo 10 dB, pri čemu kolosijeci na čvrstoj podlozi pokazuju bolje rezultate nego klasična kolosiječna konstrukcija sa zastornom prizmom, dok je analizom brzine čestica ustanovljeno da se brzina smanjuje s udaljenošću na gotovo svim mjernim mjestima (slika 10.).

2.2. Širenje vibracija na više etaže građevine

Vibracije se s temelja šire na konstrukciju, izazivajući podrhtavanje zidova, stropova i podova. Količina vibracija koja će se prenijeti na građevinu ovisi o spoju između tla i temelja građevine. Smanjivanje razine vibracija događa se upravo kada valovi iz tla ulaze u temelj građevine. Vibracije temeljnih ploča koje su u cijelosti u kontaktu s tlom bit će slične kao i vibracije tla. U tom slučaju gubitak na spoju između tla i temelja bit će 0 dB za frekvencije koje su niže od rezonantne frekvencije ploče. Gubitak na spoju između tla i temelja za lagane konstrukcije također će iznositi 0 dB, kao i kod građevina na kamenoj podlozi. Ovisno o frekvenciji i tipu temelja, gubitak na spoju varira od 2 do 15 dB [27].

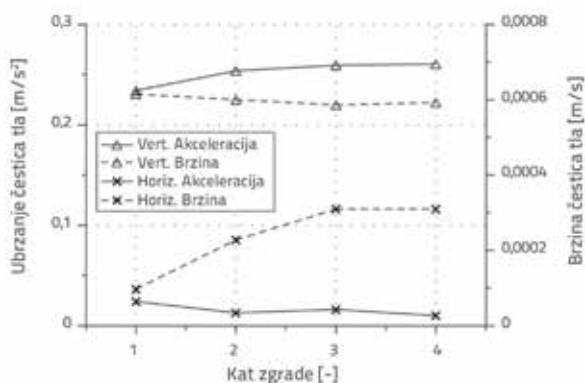
U radu [25] provedena je numerička simulacija vibracija na temeljnim pločama te na katovima građevina. Na temeljnoj su ploči vibracije analizirane na četiri mjerna mjesta, a zabilježene su vrijednosti prikazane na slici 11. Vidljivo je da su horizontalne vibracije gotovo jednake na svim mjernim mjestima, dok vertikalne vibracije na rubovima poprimaju znatno veće

vrijednosti. Na temelje građevina prenose se jedino male frekvencije vibracija [28].

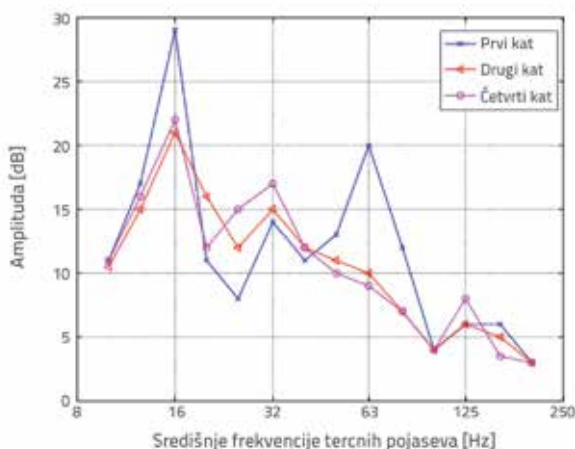


Slika 11. Vertikalne i horizontalne maksimalne akceleracije i brzine na četiri mjerna mjesta temeljne ploče [25]

Horizontalna brzina čestica se znatno povećava širenjem vibracija prema vrhu građevine, a vertikalna brzina te horizontalna i vertikalna akceleracija gotovo su konstantne (slika 12.) [25].



Slika 12. Vertikalne i horizontalne maksimalne brzine i akceleracije vibracija na različitim katovima građevina [25]



Slika 13. Funkcija prijenosa vibracija snimljenih prilikom prolaska tračničkog vozila [26]

U radu [26] analizirane su vibracije od tramvajskog prometa na katovima zgrada, a rezultati su prikazani na slici 13. Može se uočiti da je karakteristična rezonancija zgrada za sve katove iznosila 16 Hz, a za prvi kat 63 Hz. Također, na frekvencijama većim od 63 Hz razina vibracija značajno se smanjuje.

Najveće štete koje nastaju na građevinama, a čiji je izvor ljudski faktor, frekventijskog su raspona od 1 Hz do 150 Hz, dok prirodne katastrofe kao što je potres su raspona od 0.1 Hz do 30 Hz. Aktualna europska norma vezana za mjerenje i ocjenu utjecaja vibracija na građevine sugerira za vibracije izazvane prometom raspon frekvencija od 1 do 100 Hz, amplitude od 1 do 200 μm , brzinu vibracija 0,2 do 50 mm/s te akceleracije od 0,02 do 1 m/s^2 [29]. Konkretno od tračničkog prometa očekuju se razine brzine vibracija prikazane u tablici 2.

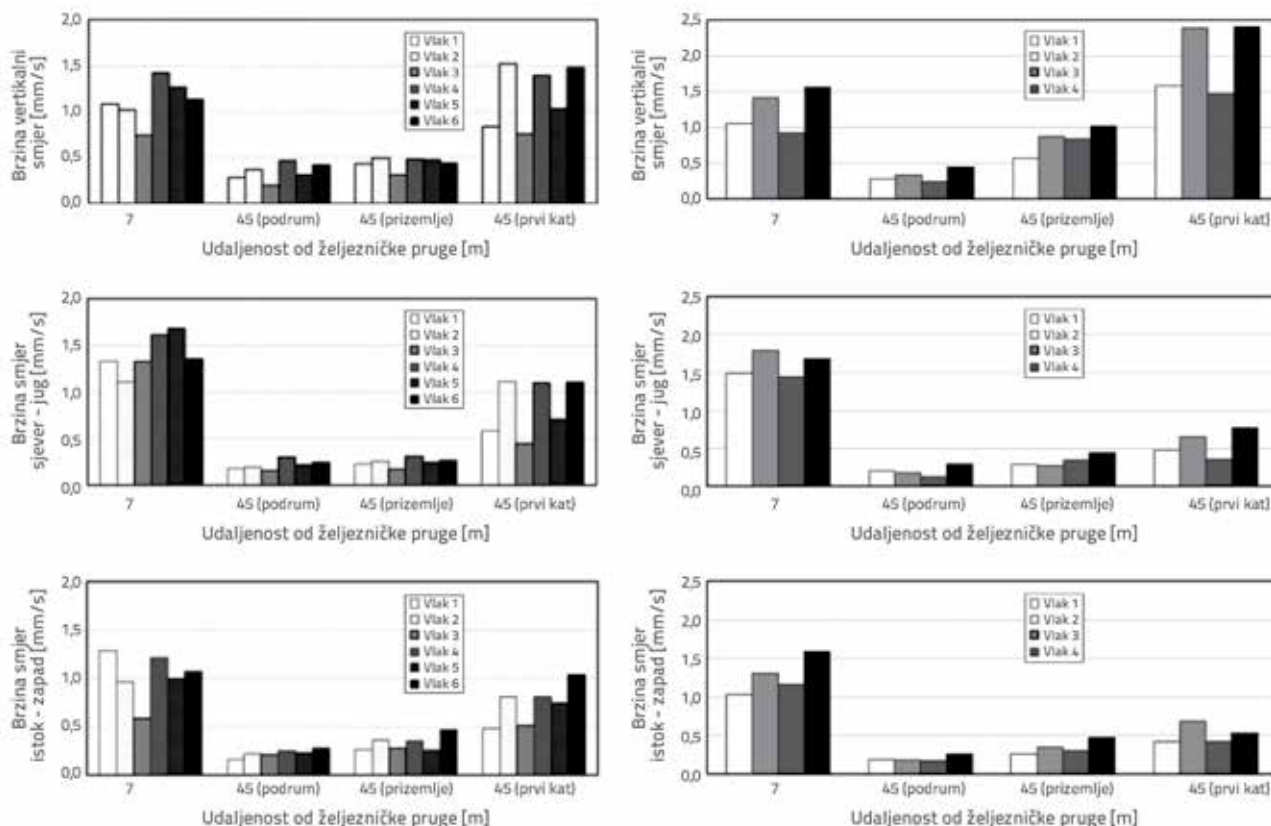
Tablica 2. Amplitude vibracija izazvane željezničkim prometom na razini temelja konstrukcije [29]

Raspon frekvencija [Hz]	Amplituda [mm/s]	Udaljenost kolosijeka od fasade
35	1,5 do 2,0	10 – 20 m
8 – 50	2,0 do 3,0	
60	2,0	
10	0,5	
51	1,9	
20	2,2	
90 do 110	2,5	

U radu [27] ustanovljeno je da raspon frekvencija zabilježenih na građevinama prilikom prolaska vozila iznosi od 10 do 250 Hz, a vršne su vibracije zabilježene kod frekvencija od 20 do 40 Hz.

Prema [30] najgora oštećenja dogodit će se na zgradama čija je udaljenost od osi kolosijeka manja od 7 m, a na udaljenosti većoj od 25 metara utjecaj na zgrade bit će zanemariv [24]. Prema dosadašnjim istraživanjima pokazano je kako je vrlo mala vjerojatnost da će vibracije manje od 50 mm/s izazvati strukturna oštećenja na građevini, a gotovo nikakva oštećenja neće nastati kod vibracija manjih od 25 mm/s, međutim ovaj je kriterij stroži kada je riječ o povijesnim i starim zgradama [28].

U radu [31] provedena je analiza utjecaja vibracija na zgradu u blizini željezničke pruge. Zgrada je izgrađena 1936. godine i sastoji se od tri kata, a zidovi su zidani od opeke. Vibracije su mjerene u tri okomita smjera na izvoru te na zgradi, i to posebno na nosivim zidovima (slika 14.a) te posebno na međukatnim konstrukcijama (slika 14.b). Ustanovljeno je da se brzina čestica smanjuje s vrijednostima od 1 do 1,5 mm/s kod željezničkog kolosijeka na ispod 0,5 mm/s u podrumu zgrade. Također, vertikalne komponente vibracija na međukatnim konstrukcijama veće su nego na nosivim zidovima. Maksimalne vibracije zabilježene na prvom katu na međukatnoj konstrukciji bile su 1,6 puta veće nego na nosivim zidovima i iznosile su 2,41 mm/s. Prema DIN-u 1999, maksimalne vibracije kod kojih se neće pojaviti oštećenja na povijesnim ili osjetljivim građevinama iznose 2,5 mm/s.



Slika 14. Prijenos vibracija od kolosijeka do zgrada: a) mjereno na izvoru i na nosivim zidovima zgrade; b) mjereno na izvoru i na međukatnim konstrukcijama [31]

Ustanovljeno je da su frekvencije koje uzrokuju vibracije željezničkog vozila u rasponu od 5 do 40 Hz, a česti prolasci vlakova uzrokuju ciklično opterećenje zgrade, što može uzrokovati zamor određenog konstrukcijskog elementa zgrade kada se u obzir uzme vrlo mala vlačna ili tlačna

čvrstoća zidanih građevina. Ustanovljeno je da vibracije koje nastaju od tračničkog vozila mogu uzrokovati oštećenja na povijesnim i osjetljivim građevinama [31]. Najveće dopuštene brzine impulzivnih vibracija na temelje zgrade prikazane su u tablici 3. [32].

Tablica 3. Najveće dopuštene brzine impulzivnih vibracija u mm/s na prizemlju zgrade (NP2074:1983) [32]

Konstrukcija	Temeljno tlo		
	Rastresito nekoherentno ili mekano koherentno tlo (c < 1000 m/s)	Kompaktno nekoherentno ili čvrsto koherentno tlo (1000 m/s < c < 2000 m/s)	Jako čvrsto koherentno tlo (c > 2000 m/s)
Osjetljive građevine	1,75 – 2,5	3,5-5	7-10
Standardne zidane građevine	3,5-5	7-10	14-20
Armiranobetonske građevine	10,5-12,5	21-30	42-60

Tablica 4. Predložene granične vrijednosti efektivnih brzina kontinuiranih vibracija [32]

Tip zgrade	Trajanje vibracija	
	< 1 sat/dan	> 1 sat/dan
Osjetljive (spomenici i ostale povijesne zgrade, bolnice, stare kuće, spremnici vode, zidani dimnjaci itd.)	1	0,7
Standardne (zidane zgrade u dobrom stanju, stare industrijske zgrade i sl.)	2	1,8
Armiranobetonske (armiranobetonske zgrade, novije industrijske zgrade i sl.)	5	5

Tablica 5. Granične vrijednosti brzine vibracija u mm/s prema DIN 4150 te UNI 9916 za osjetljive građevine [32]

	Od 1 do 10 Hz	Od 10 do 50 Hz	> 50 Hz	Globalno
Konstruktivska oštećenja uzrokovana vibracijama kratkog trajanja	3 ^a	3 (10 Hz) do 8 (50 Hz) ^a	8 (50 Hz) do 10 (100 Hz i više) ^a	8 ^b
Konstruktivska oštećenja inducirana trajnim vibracijama	-	-	-	2,5 ^c

^a temelji, ^b visoke lokacije, ^c cijela konstrukcija

Kod kontinuiranih vibracija predložene maksimalne vrijednosti vibracija ovise o tipu građevine i prikazane su u tablici 4., a maksimalne vrijednosti vibracija koje predlaže DIN 4150 te UNI 9916 za osjetljive zgrade prikazane su u tablici 5.

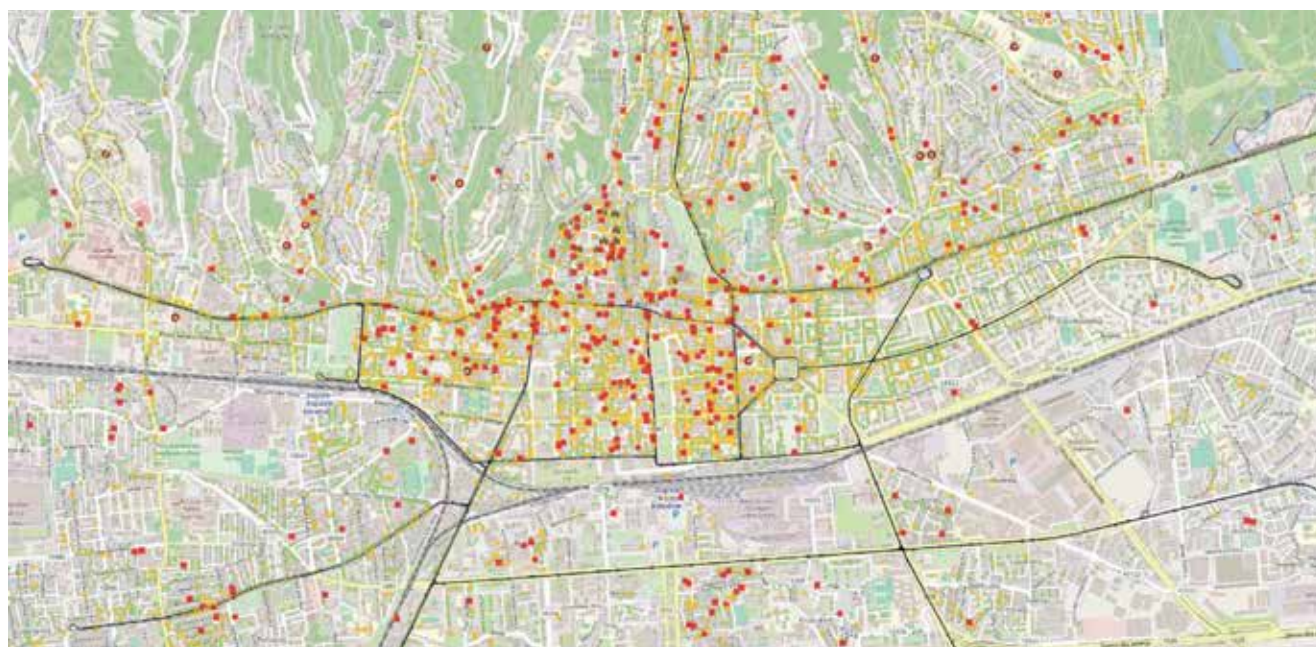
3. Analiza tramvajskog sustava u gradu Zagrebu nakon djelovanja potresa

Uslijed potresa od 5,5 stupnjeva po Richteru koji je 22. ožujka 2020. pogodio grad Zagreb, značajno su stradale višekratne zidane zgrade na širem gradskom području, a osobito u staroj gradskoj jezgri. Stručnjaci potresnog inženjerstva ovakav, pa i jači potres su predviđali i upozoravali upravo na ranjivost zidanih građevina u tom području [33]. Vrlo važna značajka stare gradske jezgre jest ta da je integrirana u sustav javnog gradskog prijevoza tramvajskom mrežom koja se rasprostire dvjema trasama u smjeru pružanja istok-zapad: od Črnomerca do Dubrave (duž Ilice, Jurišićeve, Vlaške i Maksimirske ulice) te od Zapadnog kolodvora do Borongaja (duž Jukićeve, Vodnikove, Branimirove, Mislavove i Zvonimirove ulice), te poveznica u smjeru sjever-jug: Savskom i Frankopanskom ulicom, Praškom ulicom, Draškovićevom ulicom (veza do Mihaljevca i Dolja) te Šubićevom ulicom, slika 15. Iz ove dispozicije mreže očito je da tramvajski kolosijek prolazi samom gradskom jezgrom, uskim ulicama, te vrlo blizu okolnih građevina.

Na slici 15. uočava se kako tramvajski kolosijek u užem gradskom središtu prolazi područjem s velikim brojem trajno neuporabljivih (crveno) i privremeno neuporabljivih (žuto) građevina. Neposredno nakon potresa pokrenute su aktivnosti procjene stradanja tramvajске infrastrukture uslijed djelovanja potresa, te analize utjecaja uspostave tramvajskog prometa na potresom oštećene građevine. Od kritične infrastrukture koja je nastradala u potresu te zahtijeva detaljniju provjeru identificirani su prihvatni kontaktne mreže koji se nalaze na pročeljima zgrada u užem središtu grada te tramvajski kolosijek čije stanje izravno utječe na širenje vibracija na okolne, potresom oštećene, građevine. Neposredno nakon potresa preliminarnim uvidima uočena su oštećenja na građevinama izazvana izravno potresnim djelovanjem (zgrade, postrojenja), te posredno, uslijed pada materijala s oštećenih građevina na tračničku infrastrukturu (kontaktne mreže i tramvajski kolosijek).

3.1. Analiza prihvata kontaktne mreže na pročeljima zgrada stradalima u potresu

Tramvajska vozila u gradu Zagrebu napaja sustav kontaktne mreže napona 700 V istosmjerne struje. Kontaktni vodič pozicioniran je na visini od 4,5 do 5,5 m od gornjeg ruba tračnica, te +/- 30 cm poprečno u odnosu na os kolosijeka. Pozicija



Slika 15. Mreža tramvajskog kolosijeka te oštećenost zgrada uslijed potresa na temelju inicijalnog pregleda



Slika 16. Prihvati kontaktne mreže: a) Ukrasna rozeta, b) Ploča sa 4 sidrena vijka, c) Kuka na sidrenom vijku, d) Prihvat više zatega na jednom pričvrstnom mjestu

kontaktnog vodiča osigurava se sustavom ovješnja kontaktne mreže, što je u Zagrebu izvedeno na dva načina – ovješnjem na stupove kontaktne mreže (oko 75 %) te ovješnjem na pročelja fasada (oko 25 %) [34]. Prihvati na pročelja fasada u trenutačnoj situaciji nakon potresa najdelikatnija su skupina prihвата zbog više razloga:

- radi se o starim prihvati (neki stariji i od 50 godina)
- izvedeni su na pročeljima fasada, koja su upitne čvrstoće i stanja zida
- stradavanja zidova u potresu
- stradavanja kontaktne mreže u potresu (zbog pada građe s krovova).

Na temelju zahtjeva za provjeru stanja kontaktne mreže u svrhu sigurnog uspostavljanja prometovanja tramvajskih vozila Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu proveo je ocjenjivanje stanja prihвата tramvajске kontaktne mreže koja je sidrena na pročelja zgrada. Na temelju pregleda baze razvijene u sklopu Studije tramvajskog prometa grada Zagreba, Elaborat II [34], utvrđen je broj od 912 prihвата kontaktne mreže na pročeljima fasada. Tri su osnovna načina sidrenja na fasade:

- ukrasne rozete (vertikalne i horizontalne orijentacije) – uglavljene su u fasadu pomoću četiri konusna samozatezna vijka (slika 16.a)
- pločasti prihvat – sidreni pomoću četiri konusna samozatezna vijka na ploču koja s prednje strane ima prihvat za zatege (slika 16.b)
- kuke (duže i kraće) – uglavljene su u fasadu jednim samozateznim konusnim klinom (slika 16.c).

Na pojedinim sidrenim mjestima nalazi se više zatega, osobito u područjima tramvajskih križanja (slika 16.d). Uzroci stradavanja prihвата kontaktne mreže mogu se podijeliti kako slijedi:

- Uzorci uslijed pada s krovova ili uslijed oštećenja kranskim dizalicama za vrijeme obavljanja radova na sanaciji građevina. Na takvim mjestima došlo je do čupanja ili sloma kontaktne žice, zatega, rozeta i slično, pa je važno provjeriti sva susjedna sidrišta koja nisu stradala izravno od pada materijala s krova ali su sigurno pretrpjela znatno veće opterećenje od nominalno predviđenog.

- Uzorci uslijed gubitka mehaničke otpornosti i stabilnosti zida izazvane potresnim djelovanjem. To su mjesta na fasadama koja su napukla, gdje je došlo do značajnijih oštećenja zida i postoji opasnost od čupanja klinova ili rozeta.

U sklopu kontrole prihвата kontaktne mreže predviđena su dva stupnja pregleda: stupanj 1 – vizualni pregled mjesta prihвата kontaktne mreže, stupanj 2 – ispitivanje potencijalno nesigurnih mjesta prihвата kontaktne mreže.

Vizualnim pregledom ustanovljena su potencijalno nesigurna mjesta prihвата kontaktne mreže (slika 17.) te su navedeni podaci evidentirani u GIS bazi.



Slika 17. Primjer potencijalno nesigurnog mjesta

Na osnovi drugog stupnja provjere, potencijalno nesigurna mjesta podvrgnuta su jednostavnom vlačnom testu koji se provodi kontroliranim nanošenjem opterećenja preko

sustava kolature opterećujući sidreno mjesto silom od približno 500 N u smjeru uzdužne zatege, slika 18. Elementi opreme za nanošenje opterećenja i mjerenje sile prihvaćeni su za izolator uzdužne zatege gdje se kontinuirano preko doze mjeri sila.



Slika 18. Sustav za mjerenje i očitavanje sile (N)

Provjerom svih prihvaćanja kontaktne mreže sidrenih na pročelja građevina, izdane su preporuke za sanaciju pojedinih prihvaćanja kako bi se osigurala njihova stabilnost te nesmetano i sigurno odvijanje tramvajskog prometa.

3.2. Utjecaj tramvajskog prometa na potresom oštećene građevine

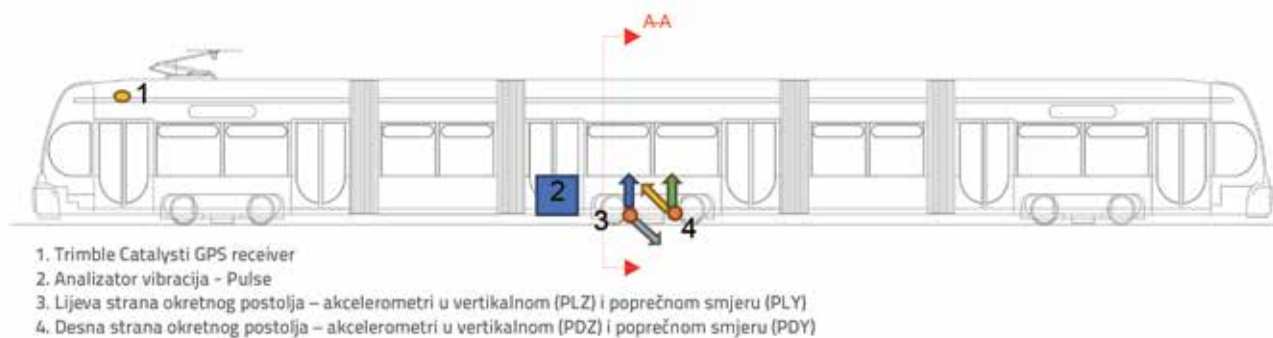
S obzirom na karakter tramvajskog prijevoza, nepravilnosti na tramvajskom kolosijeku, tramvajska vozila mogu uzrokovati povišene razine vibracija koje se šire u okoliš, a u užim gradskim središtima i na građevine u neposrednoj blizini kolosijeka. Prema [30], najveća oštećenja dogodit će se na zgradama čija je udaljenost od osi kolosijeka manja od 7 m, a na udaljenosti većoj od 25 metara utjecaj na zgrade je zanemarljiv [24]. Analizom tramvajске mreže u širem središtu grada Zagreba, ustanovljeno je kako je 35 % kolosijeka najmanje od 7 m udaljen od pročelja zgrada, 38 % kolosijeka 7 do 15 m od fasada, 12 % kolosijeka više od 15 do 25 m od fasada, a 15 % kolosijeka udaljen je više od 25 m od fasade zgrada. S obzirom na blizinu izvora vibracija, moguće je definirati određene zone rizika gdje bi eventualne vibracije od tramvajskog prometa mogle utjecati na zgrade stradale u potresu. Primjer takve analize vidljiv je na slici 19. Slika pokazuje, na temelju brze procjene Ureda za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba i na temelju udaljenosti osi kolosijeka od pročelja građevina gdje se nalaze određene zone tramvajskih koridora s većim ili manjim rizikom od utjecaja vibracija na oštećene građevine, tablica 6.

Tablica 6. Ocjene rizika utjecaja vibracija tramvajskog kolosijeka na zgrade stradale u potresu

Ocjena rizika	Oštećenost zgrada	Udaljenost od osi kolosijeka
1	N (neuporabljive)	< 7 m, 7 – 15 m, 15-25 m
2	N (neuporabljive)	> 25 m
3	PN (privremeno neuporabljive)	< 7 m, 7-15 m
4	PN (privremeno neuporabljive)	15-25 m, > 25 m
5	U (uporabljive)	< 7 m, 7-15 m, 15-25 m, >25 m



Slika 19. Analiza tramvajске mreže s obzirom na udaljenost kolosijeka i oštećenost zgrada u potresu



Slika 20. Pozicije akcelometara na tramvaju TMK 2200

Analiza utjecaja vibracija od tramvajskog prometa na potresom oštećene građevine vrlo je kompleksan inženjerski zadatak jer zahtijeva interdisciplinarni pristup niza stručnjaka (statičara, projekatana, geotehničara, eksperata za kolosiječne konstrukcije te eksperata za analizu vibracija) kako bi se utvrdio utjecaj relativno male pobude (vibracije pri prolasku tramvajskog vozila u određenim presjecima je i veća od 60 vozila u 1 h) na potresom oštećene građevine. Glavna pretpostavka jest ta da razina vibracija koju proizvode tračnička vozila neće izazvati oštećenja na nosivim elementima građevina. Međutim, pojedini elementi konstrukcije (kao što su dimnjaci, zabatni zidovi, ornamenti, vijenci i sl.) koji su uslijed potresa znatno oštećeni, bez adekvatne sanacije mogli bi se dodatno oštetiti uslijed relativno male pobude koju proizvode tračnička vozila te se na taj način i ugroziti sigurnost stanara i ostalih građana. Osim toga, kako je navedeno u [23], uslijed dugotrajne izloženosti vibracijama od prometa, može doći do mrvljenja žbuke, dezintegracije ziđa te širenja pukotina inicijalno nastalih od potresnog djelovanja. Zbog toga su započele detaljne analize vibracija prouzročenih prometovanjem tramvajskih vozila i kako te vibracije utječu na potresom oštećene građevine. To uključuje dvije cjeline: određivanje vibracija na izvoru – tramvajskom kolosijeku te određivanje utjecaja vibracija na pojedine karakteristične građevine.

3.2.1. Analiza vibracija na tramvajskom kolosijeku prilikom prolaska tramvajskog vozila

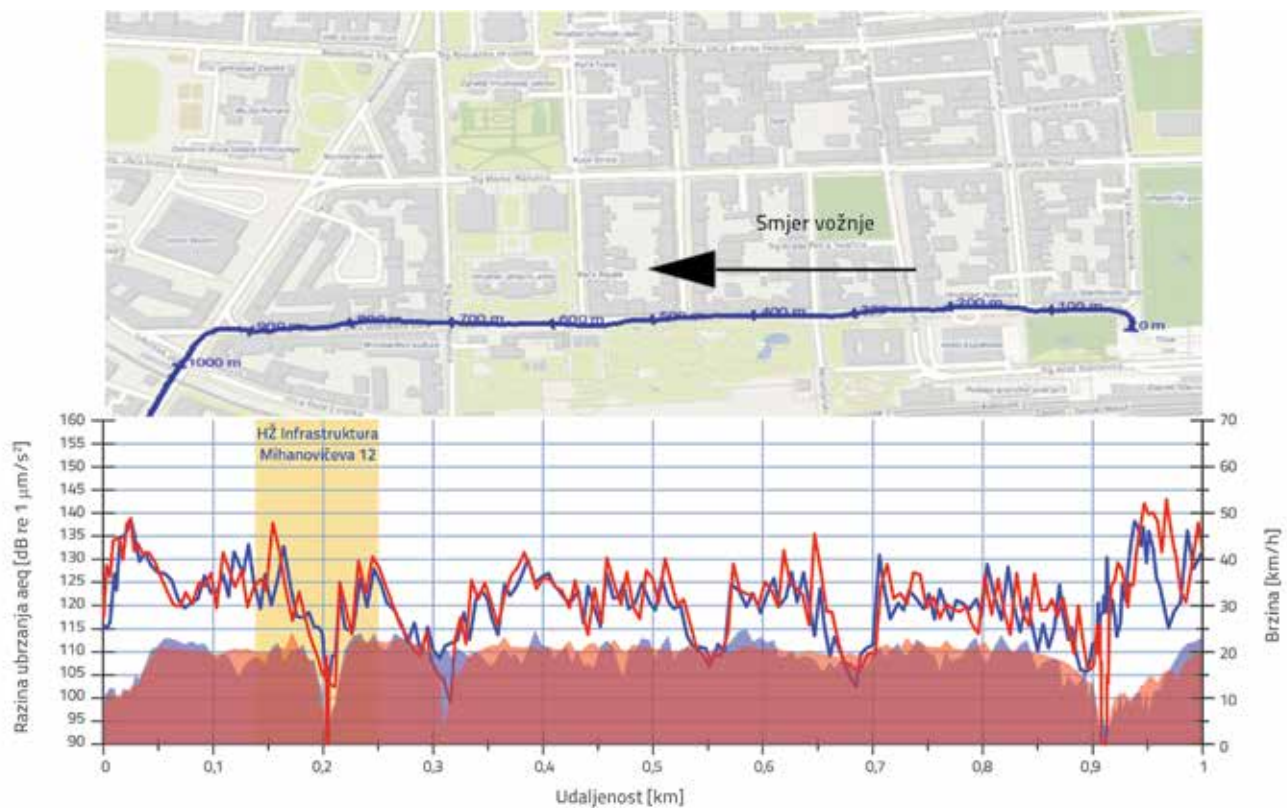
Vibracije tramvajskog vozila izmjerene su uslijed kretanja tramvaja analiziranim dionicama tramvajskih kolosijeka. Ovakvo ispitivanje daje detaljan uvid u dinamiku kretanja tramvajskog vozila po postojećoj kolosiječnoj infrastrukturi, upućuje na nepravilnosti na kolosijeku, sigurnost prometovanja vozila i udobnost vožnje [35]. Mjerenja su na svim dionicama provedena netom prije ponovnog uspostavljanja prometovanja (obustavljenog uslijed epidemije COVID-a a kasnije zbog posljedica potresa). Za provedbu mjerenja korišteno je tramvajsko vozilo tipa TMK 2200. Za potrebe usporedbe razina vibracija na kolosijeku zabilježenih prije potresa (u sklopu Studije razvoja tramvajskog prometa grada Zagreba – Elaborat I. [36])

trebalo je ponoviti istovjetan pokus te na jednak način postaviti mjernu opremu za mjerenje vibracija. U tu svrhu korišten je i mjerni postav jednak onome u Studiji, slika 20. Prijenosno računalo i višekanalni analizator vibracija smješteni su u putnički prostor u blizini drugog (srednjeg) okretnog postolja te su instalirana četiri akcelometra na srednje okretne postolje vozila. Na okretnom postolju vozila postavljena su dva jednoosna akcelometra u blizini prednjeg lijevog kotača, a pozicije su odabrane tako da se omogući analiza utjecaja neravnosti lijeve i desne tračnice te zavora tračnica, slika 21. Uz sustav za prikupljanje podataka o vibracijama, korišten je precizni GPS prijamnik smješten na krovu vozila, za georeferenciranje mjernih podataka te videokamera visoke razlučivosti u upravljačnici za vizualni pregled i koordinaciju signala.



Slika 21. Pozicija akcelometara na voznom postolju prilikom mjerenja

Izmjerene vibracije analizirane su u rasponu frekvencija od 0,5 Hz do 3000 Hz. Analiza je provedena za sve tramvajske kolosijeke kojima je uspostavljen tramvajski promet u širem središtu grada Zagreba. Analiza utjecaja vibracija tramvajskog vozila na okolne građevine izvedena je u rasponu frekvencija od 0,5 do 31,5 Hz zbog detekcije štetnog utjecaja na građevine pobuda nižih frekvencija. Rezultati su prikazani kao usrednjene razine ubrzanja L_a [dB] u vremenskim intervalima od 1 sekunde. Razina od 120 dB tako predstavlja ubrzanje od 1 m/s^2 . Također, na indikativnim dijagramima izražene su maksimalne vrijednosti vibracija od četiri spomenuta akcelometra, slika 22.



Slika 22. Vibracije prilikom prolaska vozila dionicom Glavni kolodvor – Mihanovičeva – Vodnikova – Savska cesta (2018. godina plavo, 2020. godina crveno), s naznačenim prolaskom ispred zgrade HŽ Infrastrukture

Na temelju analize vibracija na tramvajskom vozilu koje prometuje ujednačenom brzinom od 20 km/h mogu se uočiti mjesta povišene razine vibracija uspoređujući sa stanjem vibracija iz 2018. godine, to jest mogu se uočiti moguća nova oštećenja, odnosno oštećenja nastala uslijed potresa.

3.2.2. Analiza utjecaja vibracija od tramvajskog prometa na potresom stradale građevine

Utjecaj vibracija tramvajskog prometa na potresom stradale građevine dugotrajan je proces zbog niskih razina vibracija koje ne uzrokuju trenutačna oštećenja. Tek akumulirano djelovanje velikog broja ponovljenog djelovanja vibracija može utjecati na zidane građevine kakve su uglavnom oštećene u potresu u gradu Zagrebu, a kako je dokumentirano u [24]. Stoga je u svrhu dugotrajnog monitoringa na građevinama stradalim u potresu obavljeno inicijalno ispitivanje utjecaja vibracija od tramvajskog prometa na građevine. Ispitivanje je provedeno na upravnoj zgradi HŽ Infrastrukture, Mihanovičeva 12, izgrađene 1903. godine, slika 23. Zgrada je u potresu pretrpjela znatna oštećenja glavnog stubišta te pregradnog i nosivog zida na višim etažama. Osim toga, zgrada se nalazi u neposrednoj blizini tramvajskog kolosijeka koji prolazi Mihanovičevom ulicom i pri tome je os bližeg kolosijeka udaljena od pročelja zgrade samo 5 m.

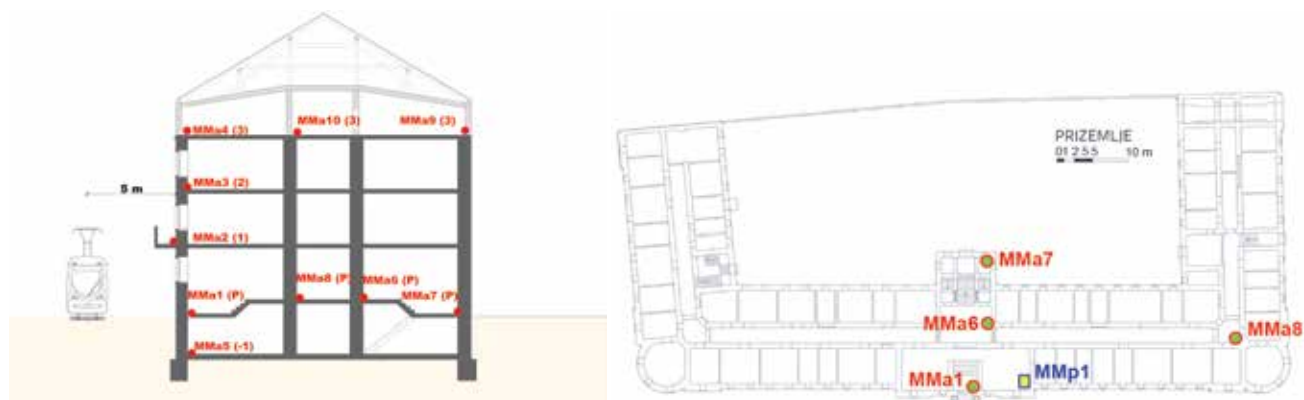


Slika 23. Prolazak tramvaja ispred upravne zgrade HŽ Infrastrukture

Mjerna konfiguracija sastojala se od 10 mjernih mjesta vibracija (troosni akcelerometri) te 5 mjernih mjesta širine pukotina (ekstenzometri), slika 24.



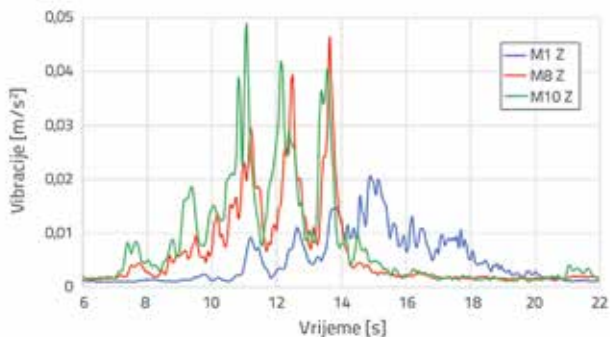
Slika 24. Ugrađeni troosni akcelerometar za mjerenje ubrzanja te ekstenzometar za mjerenje pukotina



Slika 25. Raspored mjernih mjesta u poprečnom presjeku zgrade (lijevo), te u tlocrtu etaže prizemlje (desno)

Na mjernim lokacijama izmjereni su prolasci svih tipova tramvaja, ali i naknadni potresi različitog intenziteta. Analiza podataka o vibracijama i pomacima zabilježena tijekom prolaska tramvajskih vozila temelji se na normama vezanim za utjecaj vibracija na građevine, dosadašnja iskustva u svijetu te usporedbom sa spektrom pobude naknadnih potresa koji su zabilježeni. Na slici 25. prikazan je raspored mjernih mjesta u poprečnom presjeku zgrade u Mihanovićevoj 12 te tlocrtni raspored na etaži prizemlje.

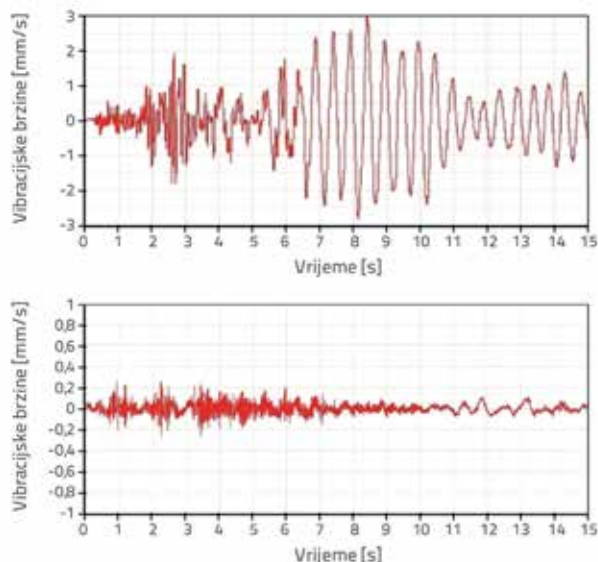
Preliminarnim istraživanjima uočene su određene razlike u zabilježenim vibracijama pri prolascima tramvajskih vozila na pojedinim lokacijama unutar zgrade, gdje je zanimljivo istaknuti kako su najviše razine vibracija zabilježene na mjestima MMA8 i MMA10 koja se nalaze na istočnom uglu zgrade, slika 26. Na spomenutoj lokaciji (križanje s Gajevom ulicom) također su zabilježene povećane razine vibracija prilikom mjerenja vibracija u tramvajskom vozilu, slika 26.



Slika 26. Izmjerene razine vibracija u vertikalnom smjeru pri prolasku tramvaja tipa TMK2200 na mjernim mjestima MMA1, MMA8 te MMA10

Osim vibracija prilikom prolaska tramvaja, tijekom ispitivanja su zabilježene i vibracije koje su nastale kao posljedica naknadnih podrhtavanja tla. Naime, tada su zabilježeni potresi magnituda 3,0, 2,2, 1,9, 1,5, 1,4 te 1,0 po Richterovoj ljestvici, pa se i njihov utjecaj na promatranu građevinu također analizira. Razumijevanje utjecaja manjih naknadnih potresa, također će omogućiti direktnu usporedbu s učinkom prolaska tramvajskih vozila. Preliminarne analize rezultata potresa magnituda 3,0 prema Richteru, upućuju

na znatno veći utjecaj naknadnih potresa na građevinu od onih pri prolasku tramvajskih vozila, naročito zbog frekvencijskog sadržaja potresne pobude. Naime, pri djelovanju naknadnih potresa, pobuda konstrukcije najizraženija je u niskofrekvencijskom području (0,5 do 20 Hz) pa takve akceleracije uspijevaju izazvati reakcija konstrukcije koja nakon inicijalne potresne pobude pokazuje karakterističan odziv na vlastitim frekvencijama od 2 do 4 Hz. Tijekom mjerenja vibracija uslijed prolaska tramvaja, desio se potres jačine 3 stupnja po Richteru te se u radu daje usporedba vibracijskih brzina djelovanja potresa i prolaska tramvaja. Vibracijske brzine prilikom djelovanja potresa 3 stupnja po Richteru dosežu vrijednosti od 3 mm/s. Pobuda pri prolasku tramvaja pak izaziva akceleracije znatno viših frekvencija, u rasponu od 20 do 50 Hz te znatno manje vibracijske brzine (do 0,2 mm/s), slika 27. Time se preliminarno može uočiti znatno manji utjecaj prolaska tramvajskih vozila na promatranu građevinu u odnosu na naknadna podrhtavanja tla izazvana potresima. Za detaljnije zaključke potrebna je pobliža analiza svih tipova tramvajskih vozila, različitih zabilježenih potresa te praćenje dugotrajnog učinka ponavljajuće pobude tramvajskih vozila.



Slika 27. Usporedba vibracijskih brzina uslijed potresa 3,0 stupnja po Richteru (gore) i pri prolasku tramvajskog vozila TMK2200 (dolje) na lokaciji MM3, smjer Y (poprečno na os kolosijeka)

Paralelno s mjerenjem vibracija analizira se i rad pukotina nastalih uslijed potresa kako bi se ustanovio učinak prolaska tramvajskih vozila i naknadnih potresa na moguće širenje postojećih pukotina. Rad pukotina bit će moguće pouzdano ocijeniti tek na temelju rezultata dugotrajnog monitoringa.

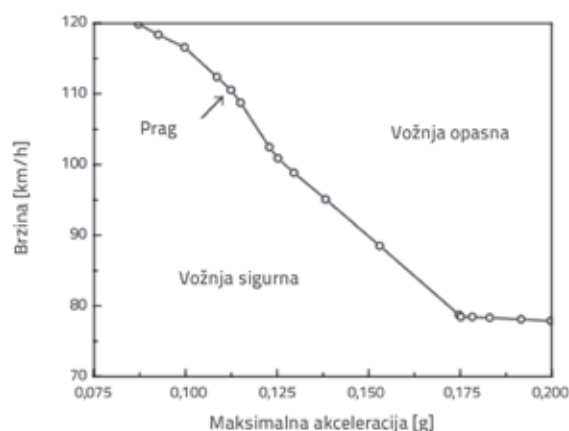
4. Rasprava

Kod snažnih potresa velika oštećenja javit će se na donjem stroju kolosijeka – nasipima, usjecima, mostovima, propustima, što rezultira i iznimno velikim degradacijama gornjeg stroja, a po kolosijeku se promet više neće moći uspostaviti bez izrazito opsežnih mjera sanacija. S druge strane, kod potresa koji neće uzrokovati degradacije donjeg stroja, potrebno je obaviti kontrolu gornjeg stroja kolosijeka (zastorne prizme, tračnica, pragova, pričvrstnog pribora) kako bi se detektirala potencijalna oštećenja nastala uslijed djelovanja potresa. Da bi se definirao utjecaj potresa na elemente gornjeg stroja, iznimno je važno poznavati geometriju kolosijeka. Ako je geometrija kolosijeka na graničnim vrijednostima, djelovanje potresnog opterećenja može povećati bočne sile u pravcu i krivini te rezultirati iskliznućem vozila, što će dodatno prouzročiti oštećenje elemenata gornjeg stroja. Prilikom prolaska vozila kroz krivinu te većeg opterećenja vanjske ili unutarnje tračnice (ovisno o brzini prolaska vozila i nadvišenju tračnice), potresno opterećenje može izazvati prevrtanje vozila s unutarnje ili vanjske strane krivine. Najvjerodostojnija analiza djelovanja potresnog opterećenja na kvalitetu kolosijeka bila bi moguća ako se otkrije veza između potresa i kvalitete kolosijeka, odnosno rizika od izvijanja kolosijeka te iskliznuća vozila s tračnica.

U područjima s učestalim potresnim aktivnostima iznimno je važno poboljšati seizmičko ponašanje konstrukcija za vrijeme djelovanja potresa. Jedan od načina za sprječavanje deformacija i pomaka uzrokovanih potresom jest korištenje alternativnih agregata u kombinaciji s materijalom zastorne prizme ili posteljice [37]. navedenom radu provedena je analiza potresne aktivnosti na različitim uzorcima željezničkih nasipa. Ispitivanje je provedeno na potresnom stolu, a ispitivana su tri uzorka, pri čemu je jedan uzorak klasična željeznička konstrukcija sa zastornom prizmom, gdje je zastorna prizma postavljena na čvrsto tlo, odnosno posteljicu. U drugom je uzorku 20 % materijala posteljice zamijenjen agregatom dobivenim preradom automobilskih guma (eng. *tire-derived aggregates*). Kod trećeg uzorka načinjeno je 70 % posteljice

od agregata ekspanzirane gline, 20 % od agregata dobivenog preradom automobilskih guma te 10 % od čvrstog tla. Iz rezultata se može zaključiti: ako se zamijeni materijal posteljice agregatom koji se dobije preradom automobilskih guma te ekspanziranom glinom, tada se može smanjiti utjecaj potresa na kolosiječnu konstrukciju.

Djelovanje potresa može prouzročiti penjanje vijenca kotača vozila na tračnicu i iskliznuće vozila [38]. Takvo iskliznuće se događa kada na kotač vozila djeluju velike bočne sile, a vertikalne kontaktne sile su reducirane [38]. Sigurnost vožnje u takvom je slučaju određena omjerom bočne i vertikalne kontaktne sile. Granične vrijednosti tog omjera prema Europskim tehničkim specifikacijama za interoperabilnost (TSI) iznosi 0,8. U radu [38] analizirana je sigurnost kretanje vlaka za vrijeme trajanja potresa pomoću metode konačnih elemenata. Faktor iskliznuća povećava se s povećavanjem brzine. Kada brzina vlaka iznosi 90 km/h, faktor iskliznuća kod maksimalne akceleracije od 19,62 m/s² (2 g) premašuje dopuštenu vrijednost od 0,8. U radu je ustanovljeno da vlak brzinom 70 km/h sigurno može prolaziti čak i kod maksimalnih vrijednosti akceleracije tla. Kritična brzina vlaka s obzirom na akceleraciju tla prikazana je na slici 28.



Slika 28. Kritična brzina vlaka s obzirom na maksimalnu akceleraciju tla [38]

Analizom kretanja tla znanstvenici su ustanovili da se prilikom potresa P valovi, odnosno primarni valovi koji uzrokuju preliminarna podrhtavanja, kreću znatno brže od S valova (sekundarnih) čije širenje rezultira oštećenjima koja nastaju od potresa [39]. Na temelju ovih spoznaja razvijani su sustavi upozoravanja i zaustavljanja željezničkog prometa u slučaju

Tablica 7. Područje ugroženo djelovanjem potresa različitih magnituda

Magnituda potresa po Richteru	Razina odgovora	Kalifornija i Baja Kalifornija	Ostatak Sjeverne Amerike
0,0 do 4,99	1		
5,0 do 5,99	2	80 km	160 km
6,0 do 6,99	3	160 km	320 km
	2	240 km	480 km
≥ 7,0	3	Prema uputama, ali ne manje nego kod 6,00 do 6,99	
	2	Prema uputama, ali ne manje nego kod 6,00 do 6,99	

potresa koji na temelju P valova detektiraju parametre potresa poput amplitude, udaljenosti epicentra i hipocentra potresa [40]. Nakon detektiranja valova automatski se prekida napajanje iz ispravljačkih stanica prema tračničkim vozilima i aktivira se sustav kočenja u slučaju nužde kod svih vozila na pruzi. Vozila se zaustavljaju prije nadolaska S valova, čime se smanjuje mogućnost iskliznuća vlaka s tračnica. Pomoću tog sustava, koji je ugrađen na sjeveroistočnoj obali Japana, zabilježeni su P valove kod potresa koji je 2011. pogodio Japan. Nakon detekcije P valova poslan je signal za zaustavljanje vlakova pa je zaustavljeno 27 vlakova tijekom vrlo velikih brzina koji su se u tom trenutku nalazili na trasi. Odmah nakon toga Japan je pogodio razoran potres magnitude 8,9, a niti jedan od vlakova nije iskliznuo iz tračnica [39].

Primjenu sustava detektiranja potresa, magnitude i epicentra predlaže i American Railway Engineering and Maintenance-of-Way-Association u Manual for Railway Engineering [41] kako bi se na vrijeme mogla poslati uputa za smanjivanje brzine vlakova. Nakon potresa potrebno je provesti kontrolu kolosijeka, konstrukcija, signalnih i komunikacijskih uređaja unutar radijusa određenoga s obzirom na jačinu potresa (tablica 7.). U tablici 7. reakcije na potresna djelovanja podijeljena su u tri razine [41]:

- treba smanjiti maksimalnu brzinu kretanja vlaka, a potreba za daljnjim provjerama kolosijeka razmotrit će se naknadno
- svi vlakovi unutar utvrđene udaljenosti od epicentra vozit će smanjenom brzinom dok se ne provede kontrola kolosijeka i ne odredi nova prikladna brzina
- svi vlakovi na prugama unutar utvrđene udaljenosti od epicentra potresa moraju se zaustaviti. Promet se ne smije nastaviti sve dok se ne provede kontrola kolosijeka te definira brzina vožnje.

Ako potresno djelovanje ne prouzroči oštećenja tračničke infrastrukture i promet je i dalje moguć, prije ponovnog uspostavljanja prometa iznimno je važno provesti analizu utjecaja vibracija vozila na građevine koje se nalaze u blizini kolosijeka, a oštećene su djelovanjem potresa. Naime, vibracije nastale od tračničkih vozila šire se kao potresni valovi, pri čemu se najviše (67 %) prenosi u obliku površinskih R valova [24, 27] koji mogu prouzročiti dodatna oštećenja na građevinama.

Prilikom potresa u gradu Zagrebu magnitude 5,5 prema Richteru, željeznička infrastruktura nije pretrpjela veća oštećenja. Značajnu štetu pretrpjele su povijesne građevine u širem središtu grada te posredno i tramvajska infrastruktura koja se nalazi u blizini stradalih zgrada (što zbog pada dijelova konstrukcije, što zbog teške građevinske mehanizacije korištene u hitnoj sanaciji građevina). Iz prethodnih istraživanja utvrđeno je kako vibracije izazvane prometom mogu utjecati na klasične zidane građevine [23]. Stoga je predmet daljnjeg istraživanja utjecaj učinka prometnog opterećenja na razinu

oštećenja građevina zbog djelovanja potresa, a predmet daljnjeg promatranja je djelovanje ponovno uspostavljenog tramvajskog prometa na potresom oštećene građevine.

5. Zaključak

Nakon potresnog djelovanja potrebno je pregledati željezničku infrastrukturu kako bi se utvrdila moguća nastala oštećenja. U brojnim su smjernicama definirane mjere koje treba poduzeti na željezničkoj infrastrukturi s obzirom na udaljenost od epicentra potresa i na jačinu potresa. Tijekom jakih potresa oštećenja nastaju na donjem ustroju, pa je potrebno obnoviti cjelokupnu kolosiječnu konstrukciju. S druge strane, kod slabijih potresa potrebno je provesti kontrolu gornjeg ustroja kolosijeka kako bi se utvrdila oštećenja. Mnogi su znanstvenici u svojim istraživanjima analizirali ponašanje elemenata gornjeg ustroja kolosijeka uslijed djelovanja potresnog opterećenja. Ustanovljeno je da do oštećenja zastorne prizme dolazi pri akceleraciji tla od 6 m/s^2 i više, a bočni se otpor počinje smanjivati pri akceleraciji $7,5 \text{ m/s}^2$. Kada je riječ o tračnicama, najveću opasnost predstavlja stvaranje velikih aksijalnih sila za vrijeme potresa. Ako su aksijalne sile veće od kritičkih sila tračnice, izvijanje će uzrokovati promjene u geometriji kolosijeka i odstupanju od njegove početne pozicije. S druge strane, bez obzira na jačinu seizmičke aktivnosti, na pragovima neće nastati nikakva konstrukcijska oštećenja. Ako se prilikom pregleda ustanovi da nije došlo ni do kakvih oštećenja tračničke infrastrukture uslijed djelovanja potresa, prije ponovnog puštanja tračničkog prometa potrebno je provesti analizu utjecaja vibracija uslijed prolaska tračničkog vozila na obližnje građevine. Naime, potrebno je s iznimnom pozornošću analizirati utjecaj vibracija tračničkog prometa na građevine koje su oštećene uslijed djelovanja potresa. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu u suradnji s tvrtkama Končar Institut za elektrotehniku d.o.o. i Veski d.o.o. provodi detaljne analize takvog utjecaja kroz dugotrajan monitoring na karakterističnim građevinama u gradu Zagrebu u blizini tramvajskog kolosijeka. Analizom rezultata dugotrajnog monitoringa bit će moguće ocijeniti akumulirane učinke frekventnog tramvajskog prometa na okolne građevine.

Zahvala

Inicijalno ispitivanje utjecaja vibracija od tramvajskog prometa na građevine stradale u potresu 22. ožujka 2020. u Gradu Zagrebu provedeno je od strane Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na upravnoj zgradi HŽ Infrastrukture d.d. koju je vlasnik ustupio za ovu svrhu, dok su prikupljanje i analiza podataka provedeni u suradnji s tvrtkama Končar - Institut za elektrotehniku d.d. te Veski d.o.o. Navedenim tvrtkama se ovim putem zahvaljujemo na suradnji.

LITERATURA

- [1] Gobo, K.: Potresi, Geološki hazadi, 2018.
- [2] Esmaeili, M., Noghabi, H.H.: Investigating seismic behavior of ballasted railway track in earthquake excitation using finite-element model in three-dimensional space, *Journal of Transportation Engineering*, 139 (2013) 7, pp. 697–708 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000535).
- [3] Lai, T., Nasser, A., Yin, Y., Katiyar, V., Turel, M.: Modeling Railway Damage due to Shake, Liquefaction and Tsunami for the 2011 Tohoku Earthquake, Sixth China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, May 28-June 1, 2013, Chengdu, China, <https://doi.org/10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2011.07.016>
- [4] Vecchiato, S., Rascol, E., Zwanenburg, W.: Earthquake protection for high-speed rail traffic: risky business? WIT Transactions on the Built Environment, 108 (2009), pp. 507–516, <https://doi.org/10.2495/SAFE090471>
- [5] Idriss, I.M.: Liquefaction of soils during earthquakes, in NATO Advanced Study Institutes Series, Series C: Mathematical and Physical Sciences, 92 (1982), pp. 507–530.
- [6] Alamanis, N.: Failure of Slopes and Embankments Under Static and Seismic Loading, *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 35 (2017) 1 pp. 95–126
- [7] Koseki, J., Koda, M., Matsuo, S., Takasaki, H., Fujiwara, T.: Damage to railway earth structures and foundations caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soils and Foundations*, 52 (2012) 5, pp. 872–889, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.009>
- [8] Kumakura, T., Ishii, H., Konishi, T.: Seismic Assessment of Ballasted Tracks in Large-Scale Earthquakes, *JR East Technical Review*, 17 (2010), pp. 25–28.
- [9] Nakamura, T., Sekine, E.: Assessment of Aseismic Performance of Ballasted Track Track with Large-scale Shaking Table Tests, *Quarterly Report of RTRI*, 52 (2011) 3, pp. 156–162.
- [10] Jing, G.Q., Luo, Q., Wang, Z., Yin, C.: Micro-analysis lateral ballast resistance of seismic characteristics, *Journal of Vibroengineering*, 16 (2014) 1, pp. 533–544.
- [11] Nakamura, T., Momoya, Y., Nomura, K., Yoshihiko, Y.: Shaking Table Test using Full-Scale Model for Lateral Resistance Force of Ballasted Tracks during Earthquake, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, pp. 1100–1107, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.156>
- [12] Byers, W.G.: Railroad lifeline damage in earthquakes, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.
- [13] Eiding, J. M.: Gujarat (Kutch) India M7.7 earthquake of January 26, 2001 and Napa M5.2 earthquake of September 3, 2000, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph, 2002.
- [14] Kazama, M., Noda, T.: Damage statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage), *Soils and Foundations*, 52 (2012) 5, pp. 780–792, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.003>
- [15] Shuqiao, L., Zuoqin, G.: Chapter 1 : Railway Engineering
- [16] Dowding, C.H., Rozen, A.: Damage to Rock Tunnels for Earthquake Shaking, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104 (1978), pp. 175–191.
- [17] Singh, M., Viladkar, M.N., Samadhiya, N.K.: Seismic response of metro underground tunnels, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11 (2017) 2, pp. 175–185, <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1201881>
- [18] Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., I-Chiang Yao, J.: Seismic design and analysis of underground structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (2001) 4, pp. 247–293
- [19] Zhang, Z., Bilotta, E., Yuan, Y., Yu, H., Zhao, H.: Experimental assessment of the effect of vertical earthquake motion on underground metro station, *Applied Sciences*, 23 (2019) 9, pp. 1–22, <https://doi.org/10.3390/app9235182>
- [20] Pescara, M., Gaspari, G.M., Repetto, L.: Design of underground structures under seismic conditions: a long deep tunnel and a metro tunnel, *Colloquium on seismic design of tunnels*, Zurich, 2011.
- [21] Taipei Rapid Transit Corporation Metro Service: https://english.metro.taipei/News_Content.aspx?n=034BD8E0AB821D47&s=4219288E4B1B3A11, Pristupljeno: 08.06.2020.
- [22] Erkal, A.: Transmission of Traffic-induced Vibrations on and around the Minaret of Little Hagia Sophia, *International Journal of Architectural Heritage*, 11 (2017) 3, pp. 349–362, <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1230657>
- [23] Tomažević, M., Žnidarič, A., Klemenc, I., Lavrič, I.: The influence of traffic induced vibrations on seismic resistance of historic stone masonry buildings, 12th European Conference on Earthquake Engineering, 2002.
- [24] Lakušić, S., Ahac, M.: Vibracije od željezničkog prometa, *Gospodarenje prometnom infrastrukturom*, Dani prometnica, pp. 373–418, 2009.
- [25] Ribes-Llario, F., Marzal, S., Zamorano, C., Real, J.: Numerical Modelling of Building Vibrations due to Railway Traffic: Analysis of the Mitigation Capacity of a Wave Barrier, *Shock and Vibration*, 2017., <https://doi.org/10.1155/2017/4813274>
- [26] Kouroussis, G., Mouzakis, H.P., Vogiatzis, K.E.: Structural impact response for assessing railway vibration induced on buildings, *Mechanics&Industry*, 18 (2017) 8, <https://doi.org/10.1051/meca/2017043>
- [27] Sanayei, M., Maurya, P., Moore, J.A.: Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways, *Engineering Structures*, 53 (2013), pp. 102–111, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.038>
- [28] Bahrekazemi, M.: Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction, Division of Soil and Rock Mechanics, doktorska disertacija, Stockholm 2004.
- [29] HRN ISO 4866:2018 Mehaničke vibracije i udari -- Vibracije upetih konstrukcija -- Smjernice za mjerenje vibracija i procjenu njihovih utjecaja na konstrukcije (ISO 4866:2010), 2018.
- [30] Kouroussis, G., Florentin, J., Conti, C., Verlinden, O., Connolly, D.P.: Building vibrations induced by railways: An analysis of commonly used evaluation standards", 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing, China 2014. pp.375–382.
- [31] Erkal, A., Kocagöz, M.Z.: Interaction of Vibrations of Road and Rail Traffic with Buildings and Surrounding Environment, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34 (2020) 3, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001442](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001442)

- [32] Built Heritage: Monitoring Conservation Management, Springer (eds.: Toniolo, L., Boriani, M., Guidi, G.), 2015.
- [33] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjericama za budućnost, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 10, pp. 923-947, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2732.2019>
- [34] Lakušić, S. i ostali: Studija razvoja tramvajskog prometa grada Zagreba - Elaborat 2: Analiza stanja kontaktne mreže, 2019.
- [35] Haladin, I., Lakušić, S., Bogut, M.: Pregled i analiza metoda za ocjenu udobnosti vožnje na tramvajskim kolosijecima, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 10, pp. 901-921, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2731.2019>
- [36] Lakušić, S. i ostali: Studija razvoja tramvajskog prometa grada Zagreba - Elaborat 1: Analiza stanja tramvajskog kolosijeka, Zagreb, 2019.
- [37] Sadrinezhad, A., Tehrani, F.M., Jeevanlal, B.: Shake Table Test of Railway Embankment Consisting of TDA and LECA, Geo-Congress 2019 GSP 308, 2019.
- [38] Yang, X., Wang, H., Jin, X.: Numerical Analysis of a Train-Bridge System Subjected to Earthquake and Running Safety Evaluation of Moving Train, Shock and Vibration, 3 (2016), <https://doi.org/10.1155/2016/9027054>
- [39] Case Study 4 - An Earthquake Early Warning for Japanese Bullet Trains, UNISDR Scientific and Technical Advisory Group Report 2013
- [40] Nakamura, Y.: On-site alarm - The Effective Earthquake Early Warning, Fifth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2008, Tokyo, Japan
- [41] AREMA American Railway Engineering and Maintenance-of-way-Association: Chapter 9 seismic design for railway structures, 2018.