

Mira Petronijević¹, Marija Nefovska-Danilović², Marko Radišić³, Miloš Jočković⁴

ISTRAŽIVANJE DEJSTVA VIBRACIJA NA LJUDE I OBJEKTE U CILJU ODRŽIVOG RAZVOJA GRADOVA

Rezime:

U ovom radu dat je kratak prikaz nekih od najznačajnijih rezultata učesnika projekta TR36046: „Istraživanje dejstva vibracija na ljude i objekte u cilju održivog razvoja gradova“, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Opisan je način nastanka i prostiranja vibracija, kao i način procene dejstva vibracija na objekte i ljude sa osvrtom na nemačke i britanske standarde. Predstavljani su empirijski i numerički modeli za analizu vibracija od saobraćaja na osnovu izvršenih merenja.

Ključne reči: vibracije od saobraćaja, dejstvo na ljude i objekte, prostiranje talasa, numerički modeli

DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE CITIES: EFFECT OF TRAFFIC INDUCED VIBRATIONS ON BUILDINGS AND HUMANS

Summary:

This paper presents some of the most important results of the project TR36046: “Investigation of vibration effects on humans and buildings in the aim of the sustainable development of cities” financed by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia. The paper describes the vibrations generation and propagation as well as the estimation of the effects of vibrations on objects and people with a reference to German and British standards. Empirical and numerical models for the traffic induced vibrations analysis based on the performed measurements were presented.

Key words: traffic induced vibrations, effects on humans and buildings, wave propagation, numerical models

¹ Dr, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, pmira@grf.bg.ac.rs

² Dr, docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, marija@grf.bg.ac.rs

³ Istraživač – saradnik, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, mradisic@grf.bg.ac.rs

⁴ Asistent – student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, milosjockovic32@gmail.com

1. UVOD

Ubrzani razvoj gradova doveo je do porasta kako drumskog, tako i železničkog saobraćaja u njima. Sa druge strane, primena novih materijala dovela je do izgradnje visokih, fleksibilnih zgrada, koje su postale osetljivije na dejstvo vibracija od saobraćaja. Vibracije od saobraćaja su uglavnom niskofrekventni poremećaji malog intenziteta, koji ne izazivaju rušenje objekata, ali mogu izazvati sitna oštećenja, naročito istorijskih objekata. Pored toga, vibracije od saobraćaja mogu veoma nepovoljno uticati na ljude, kao i na funkcionisanje osetljive opreme u objektima.

Problem i istraživanje vibracija od saobraćaja postaju posebno aktuelni u poslednjih 30 godina u svetu. Kao rezultat tih istraživanja nastale su smernice i propisi kojima se definiše način merenja vibracija, postupci analize rezultata merenja, kao i metode procene dejstva vibracija na ljude, objekte i osetljivu opremu, [1-5]. Paralelno sa razvojem metodologije merenja vibracija od saobraćaja, razvijani su i različiti empirijski i numerički modeli za proračun vibracija od saobraćaja, [2], [6-13], imajući u vidu mehanizam nastanka vibracija (*izvor*), prostiranja vibracija kroz tlo (*put*) i prostiranje vibracija kroz objekat (*prijemnik*).

S obzirom na to da u Srbiji nije bilo sistematskog istraživanja problema dejstva vibracija od saobraćaja na objekte i ljude, osim pojedinačnih istraživanja, koja su, na prvom mestu, bila posvećena rešavanju nekog određenog slučaja [14-15], 2011. godine počinju istraživanja iz ove oblasti u okviru naučnog projekta TR36046: „Istraživanje dejstva vibracija na ljude i objekte u cilju održivog razvoja gradova“, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Cilj istraživanja bio je da se prouči postojeća međunarodna regulativa i da se na osnovu toga daju odgovarajuće smernice za merenje i analizu vibracija, kao i da se razviju sopstveni empirijski i numerički modeli za procenu dejstva vibracija u zgradama. Rezultati dugogodišnjeg rada na problemu vibracija od saobraćaja prikazani su u monografiji [16], koja predstavlja sublimaciju naučnih radova koje su autori monografije objavili u međunarodnim i domaćim časopisima. U ovom radu dat je prikaz nekih od najznačajnijih rezultata učesnika projekta.

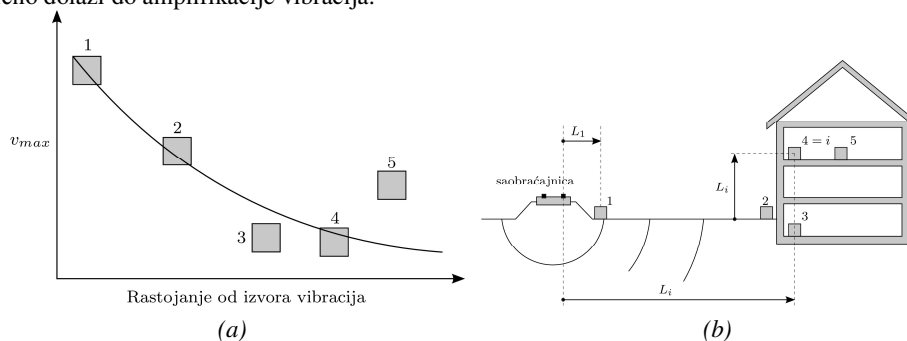
2. NASTANAK I PROSTIRANJE VIBRACIJA

Vibracije od saobraćaja nastaju kao rezultat delovanja dinamičkih i oscilatornih sila točkova drumskih ili šinskih vozila. Dinamičke sile nastaju usled udara koji se javljaju na kontaktu točka sa neravninama i drugim vrstama imperfekcija na površini puta, odnosno šine. Predominantne frekvencije vibracija koje se na ovaj način generišu u tlu zavise od dinamičkih karakteristika tla. Oscilatorne sile nastaju kao rezultat oscilovanja osovina točkova vozila. Vibracije koje se na taj način generišu imaju frekvencije koje zavise od načina vešanja, razmaka točkova, mase i brzine kretanja. Vibracije se zatim od izvora preko površine terena prenose kroz tlo putem površinskih – Rejljevih talasa, čije amplitude opadaju sa udalžavanjem od izvora vibracija. Najznačajniji faktori koji utiču na intenzitet vibracija su:

- tip vozila, način vešanja i brzina kretanja,
- stanje kolovoza,
- geološke karakteristike tla,
- rastojanje objekta od saobraćajnice,
- tip konstruktivnog sistema i međuspratne tavanice objekta,

- način fundiranja objekta.

Na Slici 1a) prikazana je zavisnost amplitude brzine vibracija od položaja merne tačke, [2]. Amplitude vibracija usled prostiranja kroz tlo opadaju od izvora (tačka 1) do spoljašnjeg zida objekta (tačka 2). Od tačke 2 do podruma ili fundamenta (tačka 3) obično dolazi do dodatne atenuacije vibracija, koje se zatim kroz vertikalne elemente objekta (stubove i zidove) prostiru do vrha (tačka 4). Vibracije se sa zidova prenose na međuspratne tavanice (tačka 5), pri čemu obično dolazi do amplifikacije vibracija.



Slika 1 – a) Način prostiranja vibracija od izvora do objekta, b) Raspored mernih mesta, [3]

3. MERENJE VIBRACIJA

Jedan od najvažnijih delova procesa procene i predviđanja vibracija od saobraćaja je njihovo merenje. Postupak merenja vibracija može se podeliti u 3 faze [6]:

- prikupljanje podataka, tj. merenje,
- priprema i ocena podataka za obradu,
- analiza merenja.

Za merenje vibracija od saobraćaja najčešće se koriste akcelerometri kojima se mere ubrzanja, ili geofoni, kojima se mere brzine. Pri izboru mernog instrumenta treba voditi računa o njegovoj osetljivosti, odnosno frekventnom opsegu koji je moguće izmeriti tim instrumentom. Jedno merenje nije dovoljno da se dobije predstava o nivou vibracija. Zbog toga je potrebno vršiti merenja duži vremenski period. Merenje vibracija vrši se u propisanom broju tačaka, pri čemu je u svakoj tački potrebno meriti tri komponente vibracija: jednu vertikalnu i dve horizontalne (paralelno i upravno na pravac kretanja vozila). Vibracije je potrebno meriti u najmanje 5 tačaka, koje su prikazane na Slici 1b):

- tačka 1 - na tlu, neposredno uz saobraćajnicu,
- tačka 2 - na tlu, sa spoljašnje strane zida objekta koji je paralelan sa saobraćajnicom,
- tačka 3 - u podrumu objekta, sa unutrašnje strane zida koji je paralelan sa saobraćajnicom,
- tačka 4 - sa unutrašnje strane zida koji je paralelan sa saobraćajnicom,
- tačka 5 - na sredini međuspratne tavanice, na poslednjoj etaži objekta.

Obrada podataka prikupljenih merenjem podrazumeva transformaciju analognog u digitalni signal. Rezultat obrade rezultata merenja su vremenske istorije brzine ili ubrzanja, kao i odgovarajući spektri.

4. PROCENA DEJSTVA VIBRACIJA

U mnogim zemljama su u poslednjih 30 godina doneti propisi kojima se definiše način merenja, postupak analize i ocene dejstva vibracija na objekte, ljude i osetljivu opremu u objektima. U Srbiji ne postoji takav propis, pa se za procenu vibracija koristi neki od dostupnih međunarodnih standarda. U ovom poglavlju biće dat kratak pregled i analiza nemačkih (DIN 4150 i DIN 45669) i britanskih (BS 7385 i BS 6472) standarda. S obzirom na to da vertikalne vibracije imaju veće amplitude, kao i da nepovoljnije utiču na objekte i ljude u njima, za procenu dejstva vibracija na objekte i ljude najčešće je dovoljno meriti samo vertikalne komponente vibracija.

5.1 PROCENA DEJSTVA VIBRACIJA NA ZGRADE

Za procenu dejstva vibracija na zgrade različiti standardi definišu različite kriterijume, koji uzimaju u obzir magnitudu, frekvenciju i trajanje izmerenih vibracija, kao i tip zgrade. Britanski i nemački standardi koriste maksimalnu brzinu vibracija PPV (*peak particle velocity*) izmerenu u fundamentu objekta pri kratkotrajnom dejstvu vibracija, pri kojoj mogu nastati kozmetička oštećenja na objektu u zavisnosti od frekvencije i tipa konstrukcije. Granične vrednosti brzina prikazane su u tabelama 1 i 2.

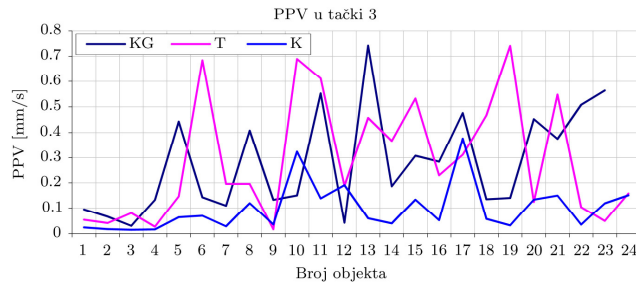
Na slici 2 prikazane su amplitude brzina vibracija merene u fundamentu 24 objekta duž buduće trase lakog metroa u Bulevaru kralja Aleksandra, usled kretanja tramvaja – T, kamiona – K i kamiona preko gumene prepreke – KG, [14]. Kod najvećeg broja objekata najveće amplitude vibracija izmerene su pri kretanju tramvaja, pri čemu nijedna od izmerenih vrednosti nije prešla dopuštenu vrednost za rezidencijalne zgrade prema navedenim standardima.

Tabela 1 – Granične vrednosti vibracija za kozmetička oštećenja zgrada prema BS 7385:2

Tip zgrade	PPV (mm/s)		
	Frekvencija (Hz)		
	4-15	15-40	> 40
AB zgrade, industrijske i masivne komercijalne zgrade	50	50	50
Nearmirane zgrade, rezidencijalne ili lake komercijalne zgrade	15-20	20-15	50

Tabela 2 – Granične vrednosti vibracija za kozmetička oštećenja zgrada prema DIN 4050-3

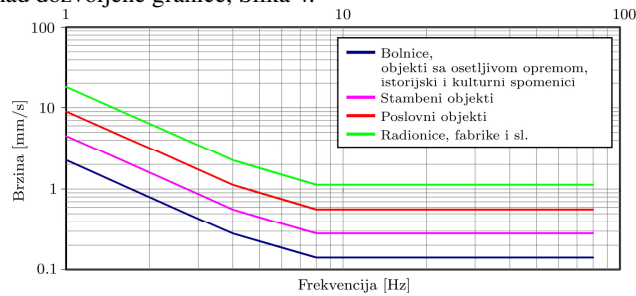
Tip zgrade	PPV (mm/s)		
	Frekvencija (Hz)		
	<10	10-50	50-100
Komercijalne i industrijske zgrade	20	20-40	40-50
Rezidencijalne i sl. zgrade	5	5-15	15-20
Ostale zgrade osetljive na vibracije	3	3-8	8-10



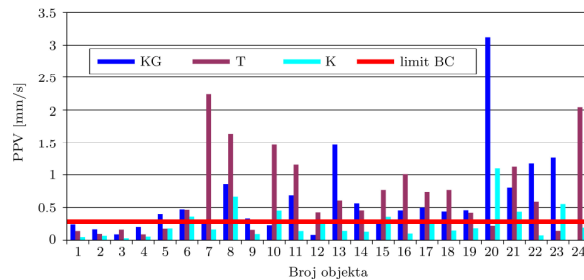
Slika 2 – PPV (mm/s) izmerene u fundametu objekata usled kretanja tramvaja – T, kamiona – K i kamiona preko gumene prepreke KG

5.1 PROCENA DEJSTVA VIBRACIJA NA LJUDE

Na Slici 3 prikazane su dopuštene amplitude brzina vertikalnih vibracija u zavisnosti od tipa objekta i frekvencije, prema BS 6472. Ovaj standard je iskorišćen da se proceni dejstvo vibracija na ljude u objektima duž buduće trase lakog metroa u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu, izmerene u tačkama na sredini ploče na poslednjoj etaži objekata usled kretanja tramvaja – T, kamiona – K i kamiona preko gumene prepreke – KG. Na osnovu sprovedenih merenja može se zaključiti da su ljudi u zgradama duž Bulevara kralja Aleksandra izloženi vibracijama od saobraćaja iznad dozvoljene granice, Slika 4.



Slika 3 – Dozvoljene amplitude vertikalnih vibracija, PPV (mm/s) prema BS 6472:1992



Slika 4 – PPV (mm/s) za vertikalne vibracije na ploči poslednje etaže, usled kretanja tramvaja (T), kamiona (K) i kamiona preko gumene prepreke (KG)

5. EMPIRIJSKI I NUMERIČKI MODELI

Modeli za procenu vibracija zgrada od saobraćaja mogu da se podele u dve osnovne grupe: empirijski i numerički modeli.

5.1 EMPIRIJSKI MODELI

Empirijski modeli se koriste za procenu vibracija u budućim ili u postojećim objektima usled očekivanog saobraćaja. Gruba i brza procena maksimalne brzine vibracija vrši se tako što se izmerena maksimalna brzina vibracija množi empirijski dobijenim koeficijentima. Sigurniji empirijski model zasniva se transfer funkcijama koje su dobijene merenjima vibracija u karakterističnim tačkama u tlu i na objektu, Slika 1b. Transfer funkcije služe za predviđanje vibracija u toj, ili sličnoj zgradi usled očekivanog saobraćaja. Polje primene transfer funkcija ograničeno je na lokaciju sa istim ili sličnim uslovima tla. Opšti zaključak je da realna procena vibracija nije moguća, jer zavisi od mnogo faktora, ali se u oblasti niskih frekvencija mogu dobiti zadovoljavajući rezultati.

U Beogradu su 2006. godine sprovedena obimna merenja vibracija od gradskog saobraćaja u zgradama duž linije budućeg lakog metroa. Merenja su izvršena na 52 izabrana objekta, od strane Geofizičkog instituta NIS-a, aparaturom I/O System One, prema strogo utvrđenom protokolu. Pet trokomponentnih geofona omogućili su merenje brzine vibracija u tri ortogonalna pravca: paralelno sa kolovozom, upravno na kolovoz i vertikalno. Merenja u pet karakterističnih tačaka sprovedena su za sledeće slučajeve opterećenja:

- ambijentalne vibracije,
- vibracije od kamiona težina 14 t koji se kreće brzinom 50 km/h,
- vibracije od kamiona težina 14 t koji se kreće brzinom 50 km/h preko prepreke od gume,
- zglobni autobus ili tramvaj ukoliko se objekat nalazi uz tramvajске šine.

Detaljan opis merenja i analiza dobijenih vrednosti su prikazani u studiji Građevinskog fakulteta u Beogradu [14]. Za potrebe analize izvršenih merenja, formirana je baza podataka koja sadrži sve relevantne podatke o zgradama na kojima je izvršeno merenje, mernim mestima, prolasku vozila, kao i zapise brzina vibracija. Tokom analize uočena je pravilnost u ponašanju zgrada, pa su sve zgrade svrstane po visini u tri tipa:

- niske (do 3 sprata),
- srednje (4-10 spratova),
- visoke (preko 10 spratova),

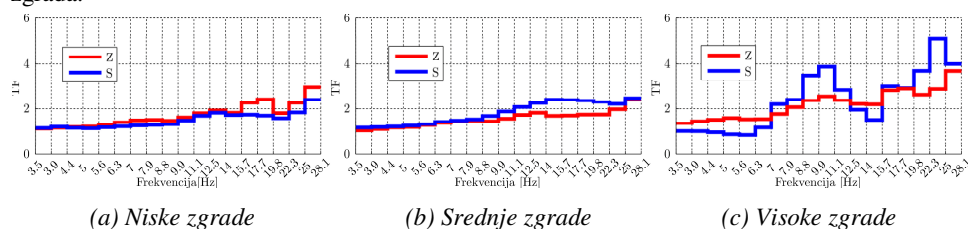
a prema konstruktivnom sistemu u dve grupe:

- zgrade sa stubovima (skeletalni sistem) i
- zgrade sa zidnim platnima.

Sračunate su transfer funkcije između zapisa brzine u sredini ploče na poslednjoj etaži zgrade i zapisa brzine u fundamentu zgrade. Da bi se dobila transfer funkcija (TF), potrebno je izmerene brzine u tačkama i i j transformisati iz vremenskog u frekventni domen. TF za događaj k definisana je odnosom *cross-power spectra* brzine u tačkama i i j , $S_{ij}^k(\omega)$, i *power spectra* brzine u tački i , $S_{ii}^k(\omega)$, [9]:

$$TF^k(\omega) = \frac{S_{ij}^k(\omega)}{S_{ii}^k(\omega)}$$

Korišćenjem programskog jezika MATLAB, napravljen je program za proračun transfer funkcija TF^k . Na osnovu preporuke iz literature [17], transfer funkcije su predstavljene u 1/3-skomban octave band-u. Dobile transfer funkcije grupisane su prema visini zgrade i prema konstruktivnom sistemu zgrade. Prosečna transfer funkcija za jedan tip objekta i tip konstrukcije dobijena je kao srednja vrednost svih transfer funkcija određenih za taj tip zgrade. Tako dobijene transfer funkcije prikazane su na Slici 5. Opšti zaključak je da se vibracije amplifikuju prolaskom kroz konstrukciju. Najmanji faktor amplifikacije (1,1) javlja se u niskim zgradama, pri niskofrekventnim pobudama, bez obzira na konstruktivni sistem. Faktor amplifikacije dostiže maksimalnu vrednost od 5,2 u visokim zgradama skeletnog sistema, pri visokofrekventnim pobudama. Zidna platna imaju povoljniji uticaj kod srednjih i visokih zgrada nego kod niskih zgrada.



Slika 5.- Transfer funkcije između tačaka 5 i 3 za niske, srednje i visoke zgrade sa Z-zidnim platnima i S-stubovima

Na osnovu ovako dobijenih transfer funkcija može se izvršiti procena vibracija u sredini ploče poslednje etaže za određeni tip zgrade. Na osnovu maksimalne brzine vibracija izmerene u temelju zgrade može se proceniti osetljivost ljudi na vibracije određene frekvencije primenom DIN ili BS standarda.

S obzirom na to da se ovakvi empirijski modeli mogu koristiti samo za lokacije sa istim ili sličnim uslovima, za predviđanje vibracija u objektima usled kretanja drumskih vozila se sve više koriste analitički i numerički modeli u frekventnom ili u vremenskom domenu.

5.1 NUMERIČKI MODELI

Numerički modeli za predviđanje vibracija zgrada usled dejstva saobraćaja treba da obuhvataju sve tri faze generisanja vibracija: nastanak vibracija, prenošenje vibracija od izvora do objekta i prenošenje vibracija kroz objekat od temelja do posmatrane tačke. Prema načinu analize sve metode se mogu svrstati u dve velike grupe: direktna metoda i metoda podstruktura. U direktnoj metodi se ceo sistem tlo-konstrukcija posmatraju zajedno, dok se u metodi podstruktura one razmatraju odvojeno. U svakoj od tih metoda moguće je primeniti numeričku analizu u vremenskom ili frekventnom domenu.

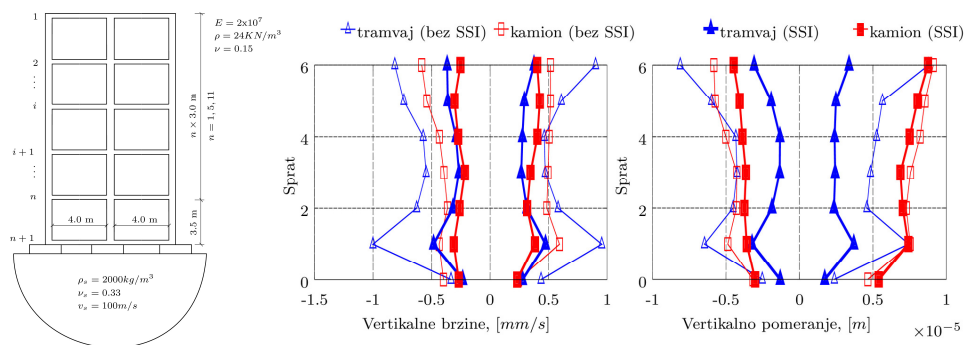
U zavisnosti od stepena tačnosti matematičkog modela, numerički modeli se dele na jednostavne i detaljne. Detaljni numerički modeli u jednom koraku obuhvataju sve tri pomenute faze generisanja vibracija. Ovi modeli su dosta složeni i zahtevaju veliko znanje onih koji ih primenjuju, kao i znatan utrošak vremena i rada. Koriste se za predviđanje vibracija objekata od velikog značaja, kao što su objekti sa osetljivom opremom, bolnice, rezidencijalni objekti koji su izloženi uticaju brzih vozova i sl. Jednostavni numerički modeli uglavnom služe za utvrđivanje da li su u posmatranoj zgradi vibracije u granicama dopuštenih. Baziraju se na teoriji

prostiranja talasa kroz elemente konstrukcije, pri čemu se uticaj tla uzima na pojednostavljen način, primenom metode podstruktura.

U okviru ovog poglavlja biće prikazan numerički model za procenu vibracija ravnih okvirnih konstrukcija, koji se bazira na dinamičkoj analizi u frekventnom domenu primenom metode spektralnih elemenata i metode integralne transformacije.

Za potrebe proračuna i analize uticaja vibracija od saobraćaja napisan je računarski program u programskom jeziku MATLAB. Uticaj vibracija usled saobraćaja analiziran je na primeru tri dvobrodna, armiranobetonska (AB) okvira sa 2, 6 i 12 spratova kako bi se utvrdio uticaj vibracija od saobraćaja na AB zgrade različite spratnosti. Razmatrana su dva granična slučaja oslanjanja. U prvom slučaju su stubovi uklješteni, pa uticaj dinamičke inetrakcije tla i konstrukcije (SSI) nije uzet u obzir, za razliku od drugog slučaja gde su stubovi okvira fundirani na krutim, kvadratnim temeljima bez mase, dimenzija 2x2 m, koji leže na elastičnom, homogenom poluprostoru. Uticaj interakcije tla i konstrukcije menja dinamičke karakteristike razmatranih okvira, što je naročito izraženo kod vertikalnih vibracija, s obzirom da je odnos vertikalne krutosti okvira i vertikalne krutosti tla mnogo veći nego u slučaju horizontalnih vibracija. Razmatrani okviri izloženi su dejstvu vibracija izazvanih saobraćajem u ulici Bulevar kralja Aleksandra u Beogradu, [14]. Najveće vibracije izazvalo je kretanje tramvaja i kamiona preko gumene prepreke. Zbog toga su ova dva izvora vibracija od saobraćaja korišćena u proračunu dejstva vibracija na okvire različite spratnosti. Okviri su izloženi horizontalnim i vertikalnim pomeranjima osnove, koja su sračunata iz brzina vibracija izmerenih u osnovi objekta prilikom kretanja tramvaja i kamiona.

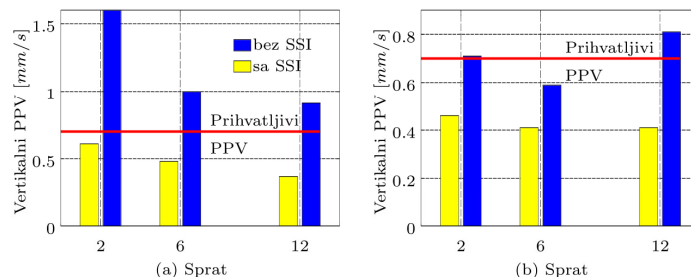
Kako bi se izvršila procena dejstva vibracija na ljude, iz dobijenih pomeranja sračunate su brzine vertikalnih vibracija. Anvelope brzina i pomeranja šestospratnog okvira u vertikalnom pravcu, su i merodavne za procenu dejstva vibracija, prikazane su na Slici 6.



Slika 6 – Anvelope vertikalnih brzina i pomeranja šestospratnog okvira

Tramvaj izaziva veće brzine pomeranja u vertikalnom pravcu uklještenih okvira nego kamion, pošto svojstvene frekvencije vertikalnih vibracija okvira padaju u zonu predominantnih frekvencija vertikalnih brzina tla od kretanja tramvaja. Interakcija tla i konstrukcije smanjuje i brzine i i pomeranja, s tim da je kod kamiona to smanjenje manje izraženo. Na smanjenje pomeranja i brzina tačaka konstrukcije koja sadejstvuje sa tlom u odnosu na kruto uklještenu konstrukciju, pored fleksibilnosti tla utiče i prigušenje u tlu (radijacijsko i materijalno). Može se reći da se tlo ponaša kao viskozni prigušivač.

Procena uticaja vibracija od saobraćaja na ljude izvršena je prema britanskom standardu BS: 6472, [4]. Na Slici 7 prikazane su maksimalne horizontalne i vertikalne brzine vibracija PPV (*peak particle velocity*) za razmatrane okvire.



Slika 7 – PPV za vertikalne vibracije usled (a) tramvaja, (b) kamiona

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja prikaz nekih od najznačajnijih rezultata učesnika projekta TR36046: „Istraživanje dejstva vibracija na ljude i objekte u cilju održivog razvoja gradova“, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. U radu su predstavljeni empirijski model za predviđanje vibracija od saobraćaja u zgradama različite spratnosti u Beogradu i numerički model za procenu vibracija ravnih okvirnih konstrukcija usled dejstva saobraćaja.

Empirijski model zasnovan je na proračunu transfer funkcija čiji je zadatak da pokažu nivo atenuacije ili amplifikacije vibracija od saobraćaja u zgradama duž linije budućeg lakog metroa u Beogradu. Na osnovu analize izvršenih merenja zaključeno je da je nivo vibracija u zgradama sa zidnim platnima manji od nivoa vibracija u zgradama skeletnog sistema. Razlike između nivoa vibracija su više izražene u slučaju zgrada srednje i visoke spratnosti.

Numerički model za analizu vibracija od saobraćaja na okvirne konstrukcije sa i bez interakcije sa tlom se bazira na analizi u frekventnom domenu. Prikazani su rezultati dobijeni za 6-spratni ram. Zaključeno je da uzimanje interakcije tla i objekta povoljno utiče, jer smanjuje vibracije od saobraćaja u konstrukciji. Tlo se ponaša kao viskozni prigušivač, zbog čega numerički model koji uzima u obzir interakciju sa tlom daje manje vrednosti pomeranja i brzina materijalnih tačaka konstrukcije. Prihvatljive brzine vibracija konstrukcije PPV prema britanskom standardu BS: 6472 dobijaju se samo ukoliko se uzme u obzir interakcija tla i objekta.

LITERATURA

- [1] Bachmann H.: Vibration problems in structures: Practical guidelines, Basel-Boston-Berlin: Birkhaeuser Verlag, 1995.
- [2] Kuppelwieser H., Ziegler A.: A tool for predicting vibration and structure-borne noise immissions caused by railways, Journal of Sound and Vibration, 193, 1996, 261-267.
- [3] DIN 4150-1:2001: Structural vibration, Part 1: Predicting vibration parameters, German institution for standard, Berlin, 2001.
- [4] BS 7385:1993: Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part 2: Guide to damage levels from ground borne vibration, British standard institution, London, 1993.

- [5] ISO 4866:2010: Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures, International standard organization, London, 2010.
- [6] Bahrekazemi M.: Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.
- [7] With C., Bahrekazemi M., Bodare A.: Validation of an empirical model for prediction of train-induced ground vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, 2006, 983–990.
- [8] Watts G. R.: Traffic Induced Vibrations in Buildings, tech. rep. Research Report 246, Crowthorne, Berkshire, UK: Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, 1990.
- [9] Verbraken H., Lombaert G., Degrande G.: Experimental and numerical prediction of railway induced vibration, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics and Engineering)* 13, 2012, 802–813.
- [10] Shen Haw J.: Finite element investigation of traffic induced vibrations, *Journal of Sound and Vibration* 321, 2009, 837–853.
- [11] Pyl L., Degrande G., Clouteau D.: Validation of a source–receiver model for road traffic induced vibrations in buildings. I: Source model, *Journal of Engineering Mechanics* 130, 2004, 1377–1393.
- [12] Pyl L., Degrande G., Clouteau D.: Validation of a source–receiver model for road traffic induced vibrations in buildings. II: Receiver model, *Journal of Engineering Mechanics* 130, 2004, 1394–1406.
- [13] Auers L.: Building response due to ground vibration—simple prediction model based on experience with detailed models and measurements, *Journal of Acoustic and Vibration* 15, 2010, 101–112.
- [14] Petronijević M., Nefovska-Danilović M.: Studija „Geodinamička analiza osetljivosti objekata na dejstvo postojećih vibracija prema postojećim standardima i procena njihove osetljivosti na dejstvo lakog metroa“, Beograd, Srbija: GEOZAVOD i Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006.
- [15] Brčić S., Petronijević M., Mišković Z., Nefovska-Danilović M.: Studija “Analiza prenošenja vibracija nastalih usled kretanja vozova kroz železničku stanicu „Beograd-Centar” u Prokopu na postojeću konstrukciju iznad perona na koti 105”, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.
- [16] Petronijević M.: Vibracije od saobraćaja: nastanak, merenje, predviđanje i procena njihovog dejstva na objekte i ljude, monografija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Akademska misao, Beograd, 2017.
- [17] M. Petronijević, M. Radišić, M. Nefovska-Danilović, Đ. Ladinović, R. Okuka, i I. Džolev, „Prediction of Traffic Induced Building Vibrations Using Transfer Functions“, u 15th International Symposium of MASE, Struga, FYROM, 2013, str. ST-20F.