

Raziskave vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in ranljivosti objektov z mikrotremorji

Study of the effects of local geological structure on seismic ground motion and building vulnerability with microtremors

Andrej GOSAR^{1,2}

¹Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, SI-1000 Ljubljana
e-mail: andrej.gosar@gov.si

²Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana

Ključne besede: mikrotremorji, ambientne vibracije, metoda spektralnih razmerij (HVSR), mikrorajonizacija, ojačanje potresnega nihanja tal, potresna ranljivost objektov

Key words: microtremors, ambient vibrations, spectral ratio method (HVSR), microzonation, seismic ground motion amplification, seismic building vulnerability

Izvleček

Primeri številnih potresov v zadnjih desetletjih so pokazali, da je bil vpliv lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal pogosto podcenjen. Med metodami za ocenjevanje tovrstnih vplivov so se zelo uveljavili mikrotremorji. Metoda temelji na meritvah treslajev naravnega in umetnega izvora. Spektralno razmerje med njihovim zapisom na horizontalni in vertikalni komponenti podaja lastno frekvenco sedimentov, ki so odloženi na skalni podlagi. Z meritvami v zgradbah pa ocenjujemo osnovne frekvence nihanja in tako določimo območje povečane ranljivosti objektov. S primerjanjem kart lastne frekvence sedimentov in meritev v zgradbah naredimo kvantitativno mikrorajonizacijo urbanih območij in določimo območja, kjer obstaja nevarnost resonance med tlemi in objekti. V Sloveniji izvajamo raziskave z mikrotremorji v okviru projekta NATO Znanost za mir. Z meritvami v mreži točk 200 m x 200 m poteka izdelava nove mikrorajonizacije območja Ljubljane. V Bovški kotlini smo z meritvami mikrotremorjev ugotovili, da so nekatere hude poškodbe objektov ob potresih 1998 in 2004 posledica resonančnih učinkov med tlemi in objekti. Na območju Ilirske Bistrice se je prav tako pokazalo, da se večina objektov poškodovanih ob potresih nahaja v frekvenčnem območju nihanja tal, ki se ujema s frekvenčnim območjem največje ranljivosti objektov.

Abstract

Examples of several earthquakes in last decades have shown that the influence of local geological structure (site effects) on seismic ground motion was often underestimated; the effects of the earthquake were therefore greater than expected. Especially dangerous is the situation when both the fundamental frequency of sediments and of structures are similar and a resonance occurs. Among the other methods for assessing the effects of local geology the use of microtremors achieved a recognition in the last decade. The method is based on measurements of ambient vibration of natural and artificial origin with three-component sensor. Spectral ratio between the records on horizontal and vertical component yield fundamental frequency of soft sediments deposited over hard bedrock. By measurements inside buildings the main building frequency in longitudinal and transverse direction and consequently the range of increased vulnerability is determined. By comparison of the fundamental frequency map of sediments and measurements inside buildings, we can perform quantitative microzonation of urbane areas and identify areas where the danger of soil-structure resonance exists. In Slovenia microtremors investigations are carried out in the frame of a NATO Science for peace project. By measurements in a very dense grid of 200 m x 200 m a new microzonation of Ljubljana will be performed. In the Bovec basin, where the site effects were very prominent during 1998 and 2004 damaging earthquakes, we found out that relative high damage to some buildings were caused by soil-structure resonance effects. In Ilirska Bistrica, which is one of the most seismically active regions in Slovenia, we also established that most of the buildings damaged during stronger earthquakes are located in areas characterised by the fundamental frequency of soil which coincide with the range of the main building frequencies.

Uvod

V zadnjih dveh desetletjih je seizmologija močno napredovala pri razumevanju vpliva lokalne geološke zgradbe na nihanje tal in na učinke potresov. Temu so botrovali nekateri potresi pri katerih so bili lokalni učinki zelo izraziti, predvsem pa razvoj novih metod za njihovo vrednotenje. Najbolj znan je primer potresa leta 1985 magnitude 8,1, ki je katastrofalno prizadel Mexico City (10.000 mrtvih, 6 milijard dolarjev škode), čeprav je bilo žarišče potresa ob tihomorski obali Mehike oddaljeno od mesta kar 400 km (Reiter, 1990). Do posebej močnega ojačanja nihanja tal v območju frekvenc, ki so rušilne za visoke (5 do 15 nadstropne) zgradbe je prišlo le v predelu mesta, ki je zgrajen na sedimentih izsušenega jezera. Učinki potresa le nekaj kilometrov stran, kjer so tla iz magmatskih kamnin pa so bili zanemarljivi. Podobno je potres magnitude 7,1 leta 1908 na Siciliji porušil kar 95 % zgradb v Messini (več kot 82.000 mrtvih), medtem ko so bile zgradbe zgrajene na trdni skali le malo poškodovane.

Tudi pri obeh potresih v Posočju leta 1998 in 2004 lahko velike razlike v poškodbah objektov na območju Bovca, Kala-Koritnice, Čezsoče, Drežnice in Drežniških Raven pripišemo le delno različni kvaliteti gradnje in zato različni potresni odpornosti objektov, precej večji pa je bil domnevno vpliv ojačanja potresnih valov v sedimentih, oziroma resonanci med tlemi in objekti. To so potrdile tudi raziskave opravljene po obeh potresih (Gosar et al., 2001; Gosar, 2007).

Regionalne (državne) karte potresne nevarnosti zaradi velikega merila ne morejo upoštevati vplivov lokalne geološke zgradbe, zato je na njih veličina (intenziteta ali pospešek), ki opredeljuje potresno nevarnost, ocenjena za trdno geološko podlago (skalo). Lokalne vplive pa kažejo karte potresne mikrorajonizacije, ki na območjih z mehkejšimi sedimenti na površju (na takih je zgrajena večina naselij), dopolnjujejo karto potresne nevarnosti (Reiter, 1990). Za posebne objekte (šole, bolnice, elektrarne itd.), katerih porušitev ali poškodba bi imela hude posledice, pa je pred gradnjo potrebno opraviti posebne študije. Metode mikrorajonizacije so se v zadnjih petdesetih letih precej spreminjale od kvalitativnih do vedno bolj kvantitativnih (Pitilakis, 2004). Dolgo časa so mislili, da zadostuje podrobna geološka karta, s pomočjo katere

ločimo sedimente glede na njihovo trdoto in če je mogoče tudi debelino ter ocenimo t.i. prirastek seizmične stopnje, ki pove za koliko bo intenziteta na neki lokaciji večja kot na primerjalnih skalnih tleh. Sledile so metode, ki so uporabljale vsaj en količinski podatek. Navadno je bila to hitrost širjenja strižnega valovanja v vrhnjih nekaj desetih metrih, kar so določili z razmeroma dragimi seizmičnimi meritvami. Primeri številnih potresov pa so pokazali, da učinki niso odvisni le od lastnosti tal v katerih je objekt temeljen ali v zgornji plasti debeline nekaj deset metrov, ampak da pogosto na nihanje tal vpliva celoten paket sedimentov do skalne podlage. Temu spoznanju je sledil razvoj številnih kvantitativnih metod vrednotenja vpliva lokalne geološke zgradbe.

Metode vrednotenja vpliva lokalne geološke zgradbe na nihanje tal ob potresu

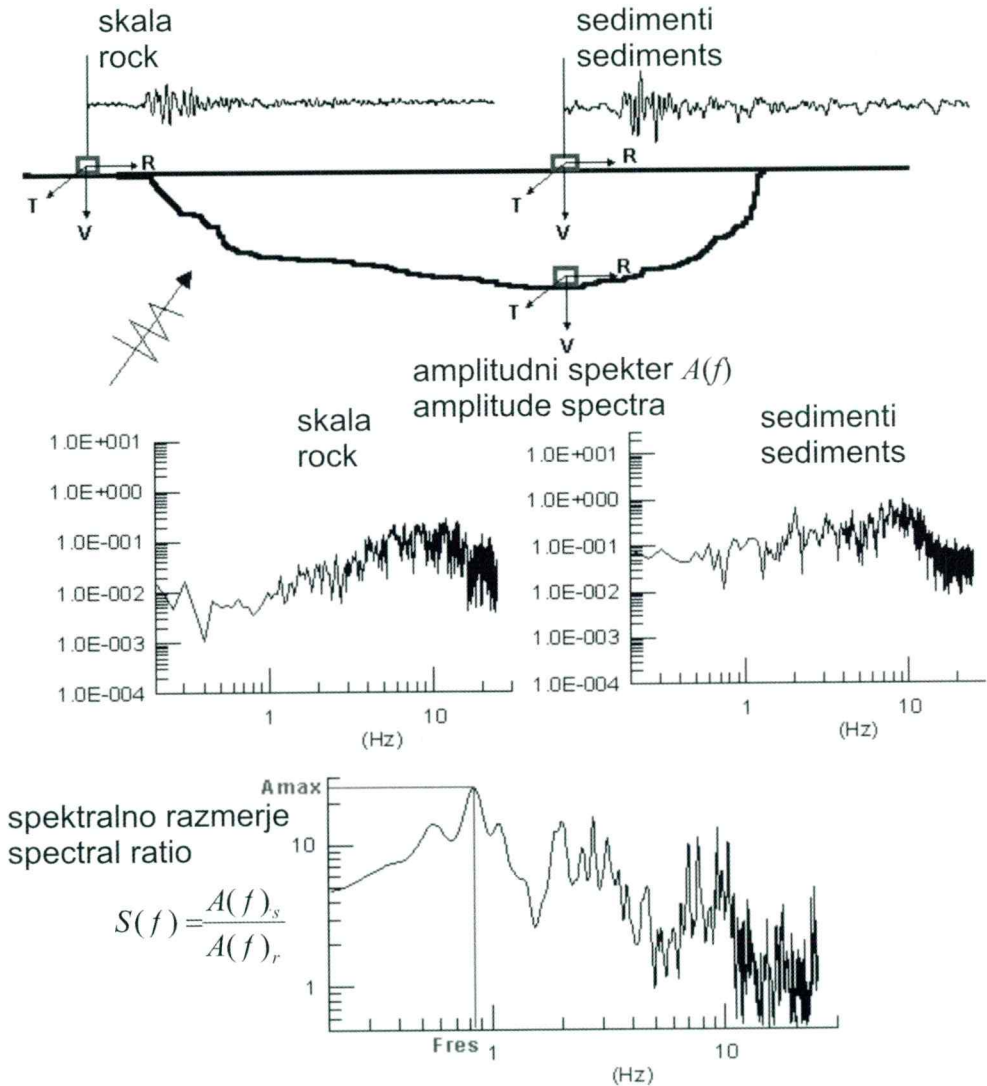
Kakšno bo nihanje tal v neki točki na površju zaradi potresa je odvisno a) od žariščnih lastnosti potresa (magnituda; žariščni mehanizem, ki pove kako potresna energija seva iz žarišča potresa), b) od regionalne geološke zgradbe, ki jo potresni valovi prepotujejo in c) od vplivov lokalne geološke zgradbe oziroma mehkejših sedimentov, ki ležijo na skalni podlagi (Pitilakis, 2004). Ko se potresno valovanje približuje površju in prehaja iz trših kamnin v mehkejše sedimente, se amplituda (premik, hitrost ali pospešek) nihanja spremeni v odvisnosti od razlike v akustični impedanci (zmnožek hitrosti valovanja in gostote) in se poveča v mehkejših, manj gostih sedimentih. Poleg tega pa prihaja na mejah kamnin z večjo razliko v akustični impedanci tudi do nastanka površinskih valov ter do ujetja valovanja v površinski plasti. Zato so amplitude in trajanje nihanja tal v dolinah in kotlinah, zapolnjenih s sedimenti, znatno večje kot na skali na njihovem obrobju (Kramer, 1996).

Metoda referenčne točke

Najboljše podatke o tem, za koliko je nihanje tal na sedimentih močnejše kot na skali, lahko dobimo, če postavimo en seizmograf na skalo v bližini roba kotline ali doline (referenčna točka), enega ali več seizmografov pa na različne lokacije na sedimentih (slika 1) in čakamo, da se zgodi potres, ki pa mora biti dovolj oddaljen, da lahko vpliv

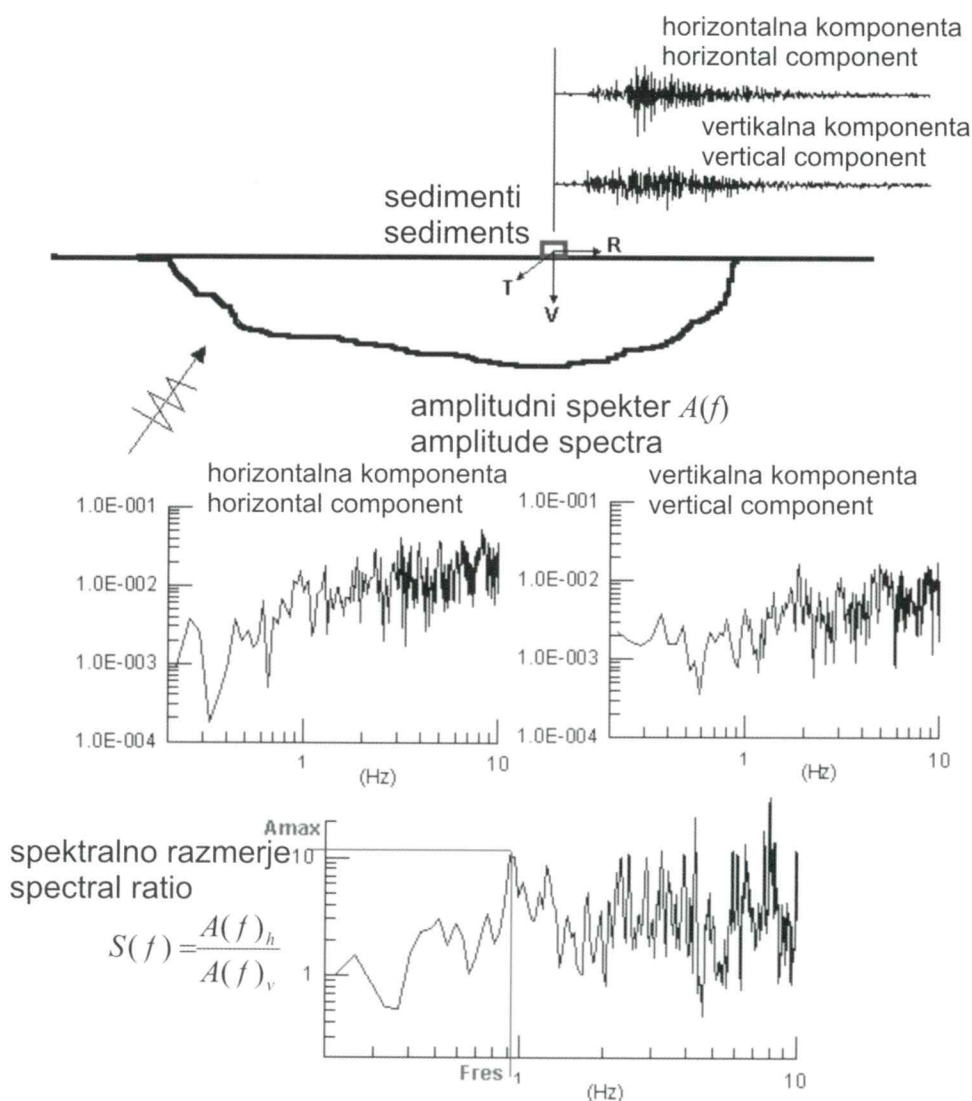
žarišča in regionalne poti zanemarimo (Borcherd, 1970). S primerjavo zapisov na sedimentih in na skali oziroma z izračunom razmerja njihovih amplitudnih spektrov dobimo zelo dobre podatke za koliko nihajo tla močnejše na sedimentih pri različnih frekvencah. Če imamo na raziskovanem območju vrtno, ki sega skozi sedimente do skalne podlage, lahko namestimo poseben seizmometer na njenem dnu in primerjamo zapis potresa s površine s tistim iz vrtnine (sli-

ka 2). Kljub temu, da daje metoda referenčne točke zelo dobre podatke, ima nekaj večjih pomanjkljivosti (Pitilakis, 2004). Prva je, da moramo na območjih, kjer je malo potresov postaviti seizmografe za zelo dolgo časa in potem čakati, da se bo zgodil primeren potres. Druga je, da navadno nimamo na voljo dovolj velikega števila seizmografov, ki bi jih lahko postavili na različne lokacije in je število točk, kjer lahko meritve izvedemo navadno precej omejeno. Tretja pomanjklji-



Slika 1. Metoda referenčne točke, pri kateri primerjamo zapis potresa v kotlini zapolnjeni s sedimenti z zapisom na skali na obrobju ali v podlagi sedimentov (Pitilakis, 2004).

Fig. 1. Reference point method is based on comparison of seismogram recorded within the sedimentary basin with the one recorded at outcropping rock site or at the bedrock of sediments.



Slika 2. Metoda spektralnega razmerja med zapisom potresa na horizontalni in vertikalni komponenti na eni sami potresni opazovalnici, ki je postavljena na sedimentih (Pitilakis, 2004).

Fig. 2. Method of spectral ratio between horizontal to vertical component of an earthquake recorded at single seismological station laying on sediments.

vost pa je, da je pogosto težko najti dobro referenčno lokacijo, kjer ne bi bilo nobenih lokalnih vplivov (preperina na površini, vpliv topografije).

Metoda spektralnega razmerja

Če ni na voljo ustrezne referenčne točke, se lahko temu problemu izognemo z uporabo metode spektralnega razmerja med horizontalno in vertikalno komponento se-

izmičnega zapisa na eni sami točki (Lermo & Chavez-Garcia, 1993). Osnovna predpostavka te metode je, da je na območjih, kjer so plasti vodoravne, na vertikalni komponenti seizmičnega zapisa ne zaznamo nobenega vpliva lokalne geološke zgradbe, ki pa je prisoten na obeh horizontalnih komponentah (slika 2).

Skupna pomanjkljivost obeh metod je, da moramo v območjih z zmerno seizmičnostjo, kot je tudi Slovenija, navadno čakati

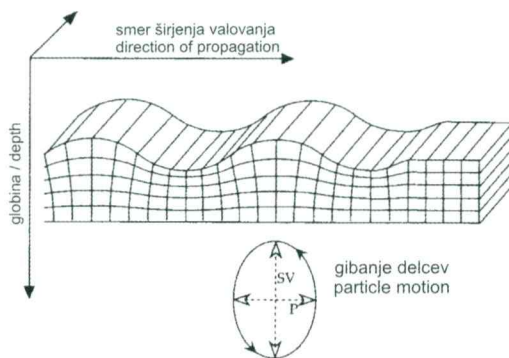
precej dolgo, da dobimo primeren zapis potresa za analizo. Zato so se v zadnjih dveh desetletjih pojavile tudi druge metode, med katerimi se je najbolj uveljavila metoda mikrotremorjev.

Metoda mikrotremorjev

Z izrazom mikrotremorji označujemo stalno šibko tresenje tal ali seizmični nemir, ki je naravnega ali umetnega izvora. Naravne vibracije povzročajo morski valovi, ki bujajo ob obalo, reke, slapovi in veter, umetne pa predvsem industrija in promet. Čeprav so že prej domnevali, da so lastnosti mikrotremorjev povezane z lokalno geološko zgradbo, sta šele Nogoshi in Igarasi (1971) predlagala metodo, pri kateri iz spektralnega razmerja med horizontalno in vertikalno komponento zapisa mikrotremorjev določimo lastno frekvenco sedimentov. Kljub temu se metoda v praksi ni uveljavila do leta 1989, ko je Nakamura (1989) objavil članek, zaradi katerega nekateri imenujejo to metodo po njem. Metoda mikrotremorjev je v osnovi enaka zgoraj opisani metodi spektralnega razmerja, le da namesto podatkov potresa uporabimo kar seizmični nemir, kar bistveno poveča mersko učinkovitost, saj lahko v kratkem času izvedemo meritve na velikem številu lokacij, kar prej ni bilo mogoče (Bard, 1999). Kljub nekaterim kritikam, se je zato metoda v zadnjih petnajstih letih v praksi zelo uveljavila in ji večina danes priznava uspešnost. Zanimivo je, da teoretično ozadje te metode še vedno ni povsem pojasnjeno in obstojata vsaj dve različni razlagi povezave spektralnega razmerja horizontalne in vertikalne komponente mikrotremorjev z lastno frekvenco sedimentov. Prav to in pa dejstvo, da dolgo ni bilo enotnega pristopa k izvedbi meritev in njihovi obdelavi, pa so bili glavni argument kritikov te metode (Mucciarelli & Gallipoli, 2001). Ko pa so v okviru Evropskega projekta SESAME zelo podrobno raziskali vse okoliščine uporabe mikrotremorjev ter izdelali smernice za pravilno izvedbo, obdelavo in vrednotenje meritev (SESAME, 2004) ter zaradi očitnih prednosti tovrstnih raziskav, je bilo njenih nasprotnikov vedno manj.

Teoretično ozadje spektralnega razmerja mikrotremorjev

Razlaga Nogoshija in Igarasija (1971) temelji na predpostavki, da sestavljajo mi-



Slika 3. Rayleighjevi potresni valovi so glavna komponenta mikrotremorjev. Delci krožijo po eliptični poti v navpični ravnini.

Fig. 3. Rayleigh seismic waves are main component of microtremors. The particle motion is elliptical in a vertical plane.

krotremorje v veliki meri površinski seizmični valovi in sicer predvsem Rayleighjevi valovi. Za te valove je značilno precej zapleteno nihanje delcev tal, ki opisujejo eliptično pot v navpični ravnini (slika 3). V seizmologiji so površinski valovi zelo pomembni, ker imajo večje amplitude od sicer hitrejših prostorskih valov ter zato ob potresu povzročijo največ škode. Iz predpostavke Nogoshija in Igarasija (Bard, 1999) sledi:

- spektralno razmerje horizontalne in vertikalne komponente (H/V) odraža predvsem eliptičnost Rayleighjevih valov, ki prevladujejo v vertikalni komponenti zapisa,
- eliptičnost je odvisna od frekvence valovanja in v primeru, da je kontrast v akustični impedanci med plastjo sedimentov na površini in skalno podlago velik, pokaže H/V izrazit vrh pri lastni frekvenci plasti sedimentov,
- do vrha v H/V razmerju pride zaradi tega, ker je smer v kateri krožijo delci pri Rayleighjevem valovanju odvisna od frekvence. Pri nizkih frekvencah je nasprotna smeri širjenja valovanja, pri visokih frekvencah pa enaka smeri širjenja. V ozkem vmesnem območju, ki ustreza lastni frekvenci sedimentne plasti pa nihanje delcev v vertikalni smeri izgine, kar se odrazi v izrazitem vrhu v H/V razmerju.

Razlaga Nakamure (1989; 2000) pa temelji na predpostavki, da se v mehki plasti sedimentov vpliv površinskih valov tako zmanjša, da ga lahko zanemarimo in je zato

spektralno razmerje H/V odvisno le od prostorskih, predvsem horizontalno polariziranih strižnih (SH) valov, ki se ujamejo v površinski plasti in zato registrirajo predvsem na horizontalnih komponentah, na vertikalni komponenti po skoraj nič. Spektralno razmerje H/V tako neposredno pomeni prenosno funkcijo sedimentov za S-valove.

V kasnejših modelnih raziskavah so se precej ukvarjali z deležem površinskih in prostorskih seizmičnih valov v spektralnem razmerju H/V in dali prednost razlagi z Rayleighjevimi valovi (Bonneyfoy-Claudet et al., 2006).

Raziskave z mikrotremorji

Meritve

Za meritve mikrotremorjev lahko uporabljamo običajne širokopasovne trikomponentne senzore in seizmografe, ki jih sicer uporabljamo v seizmologiji za registracijo potresov. Izkazalo pa se je, da so kabli s katerimi povežemo senzor, seizmograf in vir napajanja pogosto vir mehanskih in električnih motenj. Dodatna težava je v dolgem času, ki ga po premikanju ali prevozu potrebujejo seizmološki senzori, da se umirijo in so pripravljeni za meritve. Zato so razvili posebne seizmografe za meritve mikrotremorjev (slika 4) pri katerih so vsi elementi: elektrodinamični senzor, registrator in napajalne baterije integrirani v skupno ohišje.



Slika 4. Seizmograf za meritve mikrotremorjev Tromino.

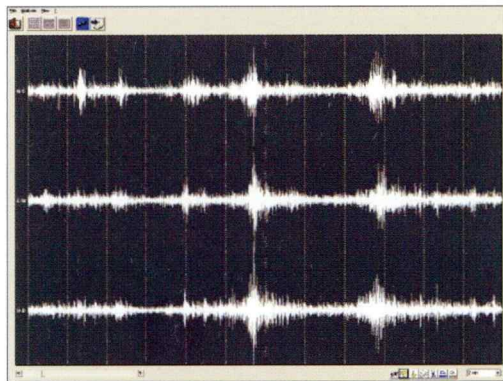
Fig. 4. Seismograph Tromino for measurements of microtremors.

Težav s povezovalnimi kabli zato ni, zaradi majhne teže (1,1 kg) pa je celotna naprava tudi lahko prenosljiva. Pri svojih raziskavah uporabljamo šest seizmografov Tromino (Micromed, 2005).

Zelo pomemben je dober stik senzorja s tlemi in njegov horizontalni položaj. Zato ima Tromino konice, ki jih privijemo v dno ohišja in pa libelo. Za določitev položaja in sinhronizacijo notranje ure ima vgrajen GPS sprejemnik. Meritev na posamezni točki traja navadno 20 minut, kar omogoča analizo podatkov do frekvence okoli 0,5 Hz, kar je tudi spodnja meja za vgrajen senzor. Če želimo izdelati karto lastne frekvence sedimentov, je priporočljivo izvajati meritve v mreži z gostoto 200–250 m. Pri meritvah se moramo izogibati močnejšemu vetru, dežju, bližini rek, industrijskim obratom in prometnejšim cestam, ki vnašajo preveč nezaželenih tresljajev (SESAME, 2004). Zato se izogibamo tudi gozdu in posameznim drevesom, ker se nihanje dreves v vetru preko korenin prenaša v tla.

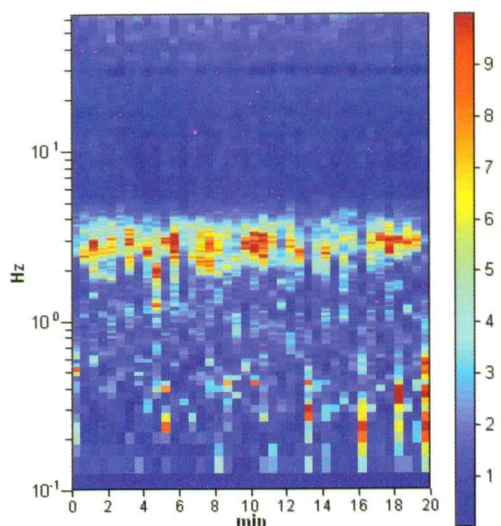
Obdelava podatkov

Zapise seizmičnega nemira (slika 5) najprej vizualno pregledamo in opredelimo območja posameznih močnejših motenj, ko je na primer mimo peljal tovornjak ali podobno. Celoten 20 minut dolg zapis razdelimo v 40 oken, dolgih po 30 sekund, in izločimo tista okna, kjer so močnejše kratkotrajnejše motnje. S Fourierjevo transformacijo izra-



Slika 5. Seizmični zapis mikrotremorjev na dveh vodoravnih (N–S in E–W) in vertikalni (U–D) komponenti.

Fig. 5. Seismic record of microtremors on two horizontal (N–S in E–W) and vertical (U–D) component.



Slika 6. Barvno kodirano razmerje horizontalne in vertikalne komponente za 30 s dolge odseke seizmičnega zapisa.

Fig. 6. Colour coded plot of horizontal to vertical spectral ratios for 30 s long windows of seismic record.

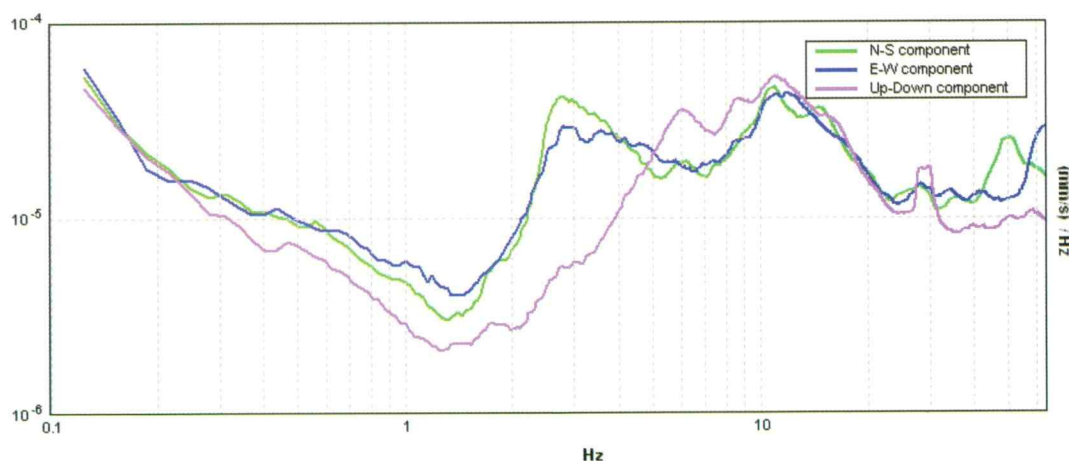
čunamo nato za vsa okna amplitudne spektre za vsako komponento posebej. Razmerje geometrijskega povprečja obeh horizontalnih komponent in vertikalne komponente prikažemo na diagramu, kjer so za vseh 40 oken z različnimi barvami prikazana amplituda razmerja v odvisnosti od frekvence (slika 6). Tu lahko iz obdelave izločimo odseke z močnejšimi motnjami, ki se kažejo kot visoke

amplitude (na sliki 6 so to posamezni pasovi visokih amplitud (rdeče) pod 1 Hz). Nato izračunamo povprečne amplitudne spektre za vse tri komponente (slika 7), ki pokažejo, da je amplituda mikrotremorjev na vertikalni komponenti v frekvenčnem območju med 1,5 in 4,5 Hz znatno manjša kot na obeh horizontalnih komponentah. Zato se na povprečnem spektralnem razmerju med horizontalnima in vertikalnima komponentama (HVSr – horizontal to vertical spectral ratio) v tem območju pokaže izrazit vrh (2,8 Hz na sliki 8). Frekvenca pri kateri ima krivulja vrh, ustreza lastni frekvenci paketa sedimentov do prve izrazite geološke meje oziroma do izrazitega kontrasta v akustični impedanci kamnine. Amplituda tega vrha je odvisna predvsem od impedančnega kontrasta in ne podaja faktorja ojačanja. Primerjava meritev z metodo referenčne točke je pokazala, da je vršna amplituda spektralnega razmerja mikrotremorjev v splošnem manjša od dejanskega ojačanja potresnih valov in lahko torej predstavlja le grobo oceno njegove spodnje meje (SESAME, 2004).

Z metodo spektralnega razmera mikrotremorjev lahko torej opredelimo predvsem lastno frekvenco sedimentov, torej pri kateri frekvenci bo prišlo do ojačanja potresnih valov.

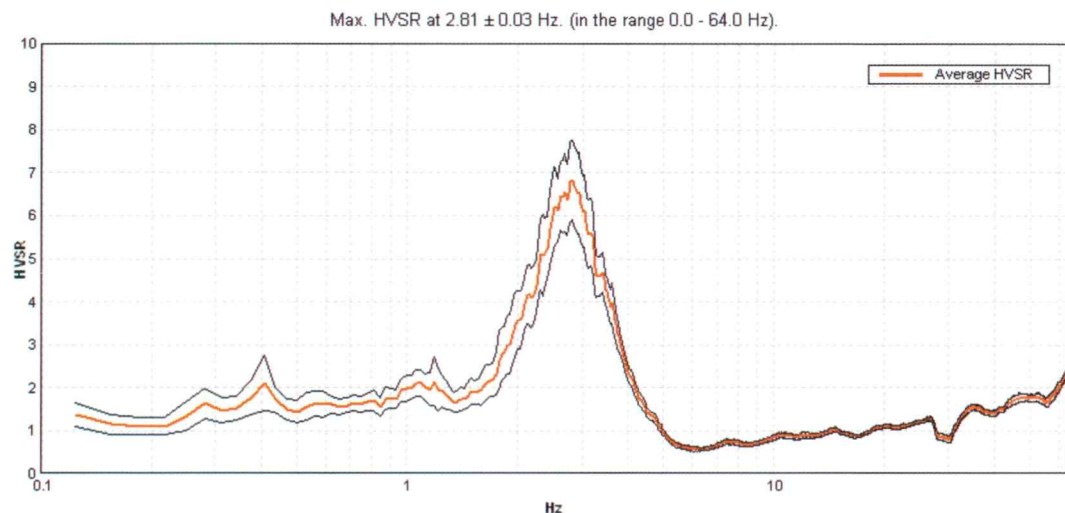
Meritve v zgradbah

Različno visoke zgradbe imajo različno lastno frekvenco nihanja. Poleg višine (šte-



Slika 7. Krivulje amplitudnih spektrov, na katerih se jasno vidi razlika med horizontalnima in vertikalno komponento.

Fig. 7. Amplitude spectral curves clearly shows the difference between horizontal and the vertical components.



Slika 8. Povprečna krivulja spektralnega razmerja horizontalne in vertikalne komponente z 95 % intervalom zaupanja. Izrazit vrh podaja lastno frekvenco sedimentov.

Fig. 8. Average spectral ratio of horizontal to vertical component with 95 % confidence interval. Prominent peak gives the fundamental frequency of sediments.

vila nadstropij) pa na to vpliva tudi vrsta gradnje (opeka, armiran beton itd.) in oblika zgradbe. Ocena lastnih frekvenc objekta v različnih smereh nihanja pa ni preprosta niti za objekte za katere imamo dobro dokumentacijo (n. pr. Kreslin et al., 2006). Metoda mikrotremorjev se je v zadnjih letih zato uveljavila tudi pri ocenjevanju lastnih frekvenc nihanja objektov v vzdolžni in prečni smeri (Gallipoli et al., 2004). Skupaj z meritvami na prostem površju v bližini stavbe, s katerimi ugotovimo lastno frekvenco sedimentov lahko tako na dokaj preprost način ugotovimo ali obstoja nevarnost resonance med tlemi in objektom.

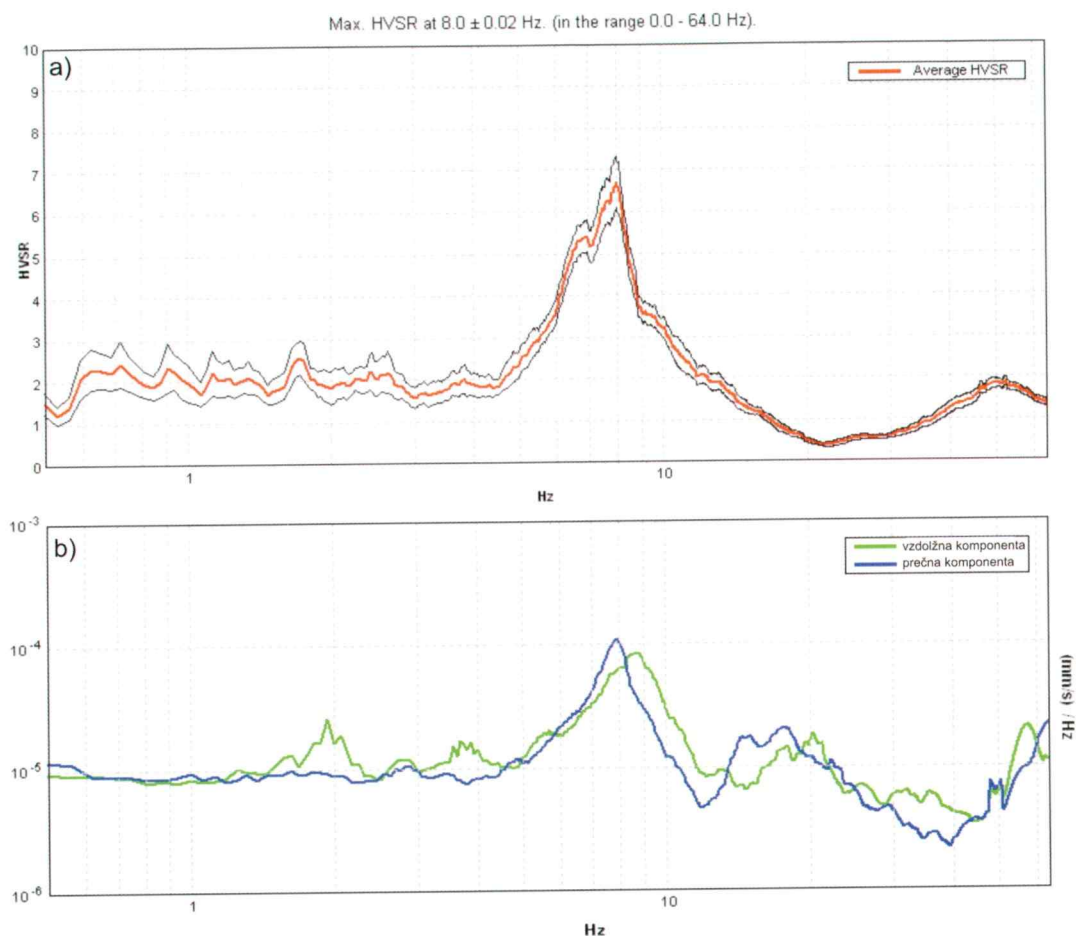
Meritve v zgradbah izvedemo v vsaki etaži posebej. Za oceno osnovne frekvence nihanja lahko uporabimo kar amplitudni spekter ali pa razmerje spektrov zapisov iz višjih nadstropij proti tistemu iz pritličja ali kleti. Primer amplitudnega spektra dvanadstropne hiše je na sliki 9b. Oba vrhova jasno odražata vzdolžno (8,5 Hz) in prečno (7,8 Hz) osnovno frekvenco objekta. Meritve na prostem površju so pokazale izrazit vrh v spektralnem razmerju pri 8 Hz in amplitudo 6,5 (slika 9a). Zaradi bližine vseh treh vrhov je nevarnost resonance med tlemi in objektom torej precejšnja. Raziskave v Bovški kotlini so pokazale (Gosar, 2007), da lahko precejšen del močnejših poškodb ob potresih 1998 in 2004 pripišemo prav resonanci med tlemi in objektom.

V Italiji je bilo opravljenih nekaj meritev mikrotremorjev v objektih, ki jih je kasneje prizadel močan potres. S ponovnimi meritvami v poškodovanih zgradbah so ugotovili premik osnovnih frekvenc nihanja zgradbe proti nižjim vrednostim, kar je posledica strukturnih poškodb (Gallipoli et al., 2004). Eden od namenov sistematičnih meritev mikrotremorjev v zgradbah je torej tudi pridobiti referenčne podatke, ki jih bomo v primeru močnejšega potresa lahko primerjali z meritvami v objektih, ki jih bo poškodoval potres.

Raziskave v Sloveniji

Raziskave z mikrotremorji izvajamo v Sloveniji v okviru mednarodnega projekta NATO Znanost za mir (Science for Peace): *Assessment of seismic site amplification and seismic building vulnerability in Macedonia, Croatia and Slovenia*. V projektu sodelujejo: iz Italije Univerza iz Bazilikate (Potenza) in Univerza iz Siene, iz Makedonije skopski Inštitut za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo, iz Hrvaške Univerza v Zagrebu ter iz Slovenije Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo.

V okviru projekta bo po enotni metodologiji izdelana podrobna seizmična rajonizacija urbanih območij v različnih državah, ki bo opredelila tako lastno frekvenco sedi-



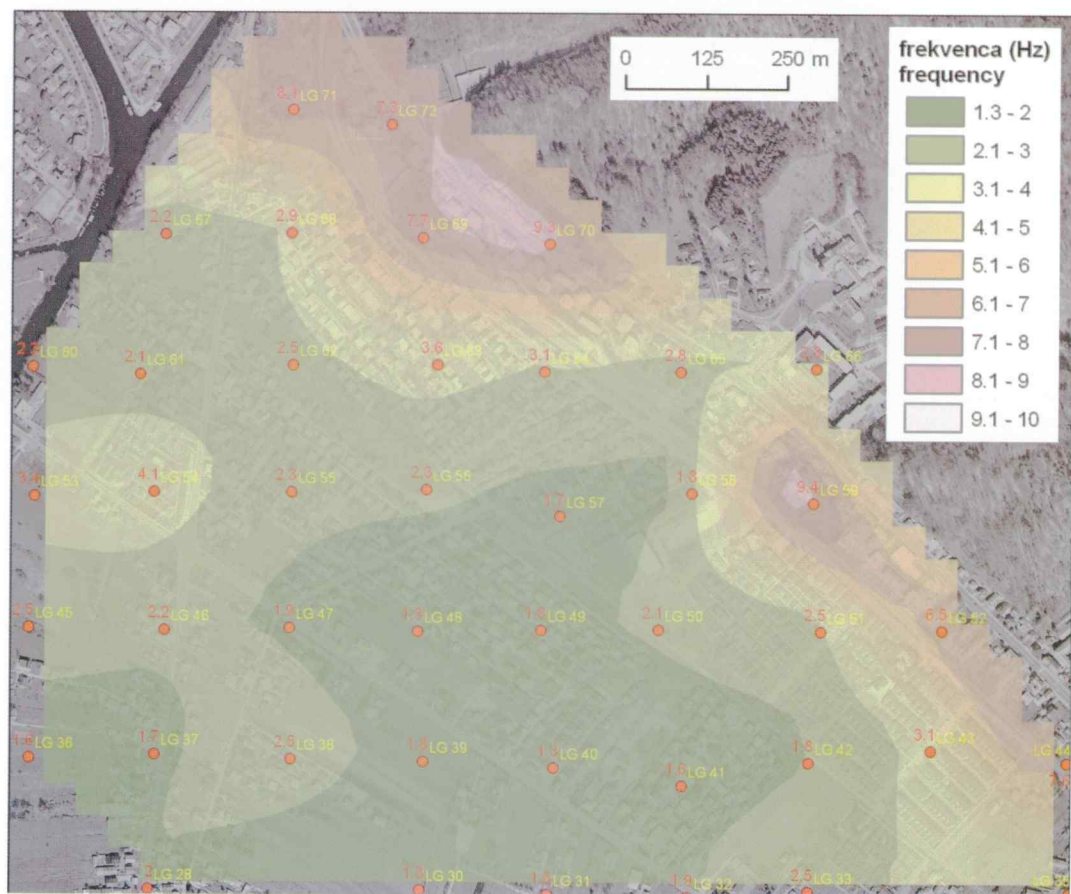
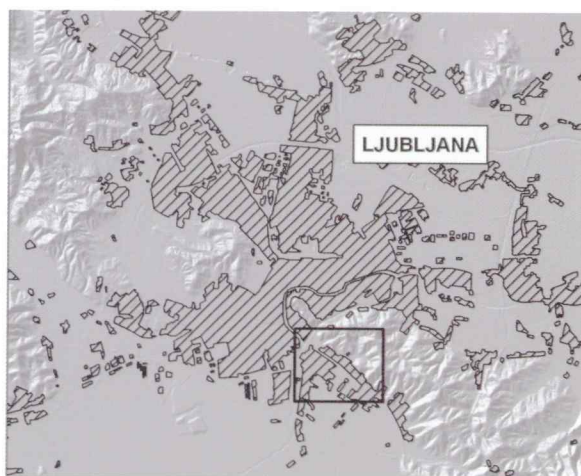
Slika 9. Primerjava spektralnega razmerja meritev na prostem površju (a) in amplitudnega spektra meritev v zgradbi (b), ki zaradi podobnih vrednosti vrhov kaže na nevarnost resonance med sedimenti in objektom.

Fig. 9. Comparison between spectral ratio for free-field measurements (a) and amplitude spectra for measurements in building (b). Since all peaks occur at similar values, is the danger of resonance between sediments and structure considerable.

mentov kakor tudi izbranih objektov in tako omogočila določitev nevarnih območij resonance med tlemi in objekti, ki lahko znatno poveča poškodbe ob potresu. V Sloveniji so raziskave usmerjene na tri območja s povečano potresno nevarnostjo in sicer Ljubljano, Bovško kotlino in Ilirsko Bistrico.

Na območju Mestne občine Ljubljana potekajo najboljše raziskave, saj bodo meritve izvedene na več kot 1100 točkah v mreži gostote 200 m x 200 m ter v več kot 150 zgradbah (Zupančič et al., 2006). Do začetka leta 2007 je bila narejena izmera na več kot 700 točkah na prostem površju (celotni južni in zahodni del Ljubljane) in v okoli 100 zgradbah. Cilj je izdelava nove

karte potresne mikrorajonizacije, opredelitev območij z nevarnostjo resonance med tlemi in objekti ter pridobitev obsežne baze podatkov meritev v zgradbah. Prejšnja karta potresne mikrorajonizacije Ljubljane je bila izdelana v začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja (Lapajne, 1970) po danes zastareli metodologiji seizmičnih prirastkov (Medvedev, 1965) na podlagi seizmičnih refrakcijskih meritev hitrosti P-valov. Kasneje je bila izdelana še mikrorajonizacija po standardu Eurocode 8, ki določa danes uveljavljene faktorje za različne vrste tal (Zupančič et al., 2004). Kar pa pri tem ni bilo novih terenskih raziskav, je karta namenjena le za uporabo v



Slika 10. Karta lastne frekvence sedimentov za območje Galjevice v južnem delu Ljubljane, ki kaže dobro korelacijo med debelino sedimentov, ki narašča proti jugozahodu in zmanjševanjem frekvenca v isti smeri.

Fig. 10. Map of fundamental frequency of sediments for Galjevice in the southern part of Ljubljana. There is a good correlation between thickness of sediments which increases towards the south-west and decrease of frequency in the same direction.

civilni zaščiti, ne pa tudi za projektiranje. Del karte lastne frekvence izdelan na podlagi mikrotremorjev za območje Galjevice je prikazan na sliki 10 (Lenart, 2006). Na karti prikazano nižanje lastne frekvence od 9,4 Hz do 1,3 Hz odraža povečevanje debeline sedimentov Ljubljanskega barja od Golovca, kjer permokarbonska podlaga izdaja, proti jugozahodu do globine 35 m, kar je ugotovljeno z geofizikalnimi raziskavami in vrtnjem.

Potresa 1998 in 2004 v zgornjem Posočju sta povzročila v Bovški kotlini poškodbe na številnih objektih, ki pa so bile razporejene zelo neenakomerno. Tega ne moremo razložiti le z različno potresno odpornostjo objektov, saj so bile ponekod novejša hiša, ki so praviloma grajene po boljših (novejših) predpisih potresno odporne gradnje bolj poškodovane od starejših. Zato lahko del precejšnjih razlik v učinkih potresa pripišemo predvsem vplivom lokalne geološke zgradbe. Preliminarne raziskave z mikrotremorji in modeliranjem na podlagi podatkov geofizikalnih raziskav po potresu 1998 so potrdile da je na nekaterih območjih verjetnost resonance med tlemi in objekti velika (Gosar et al., 2001). Zato smo raziskave nadaljevali v okviru NATO projekta in izmerili 124 točk na prostem površju v celotni Bovški kotlini ter 25 objektov (Gosar, 2007). Izdelana karta lastne frekvence sedimentov je pokazala, da leži več kot 60 % ozemlja v območju med 6 in 12 Hz, meritve v dvonadstropnih hišah, ki prevladujejo na tem območju pa, da sta njihova vzdolžna in prečna lastna frekvenca v območju med 7 in 11 Hz. To kaže, da je nevarnost resonance med tlemi in objekti velika in lahko pojasni nekatere razmeroma velike poškodbe objektov glede na magnitudo in oddaljenost potresa.

Raziskave potekajo tudi na območju Ilirske Bistrice, ki sodi med potresno najdejavnejša območja v Sloveniji. Najmočnejši potres v prejšnjem stoletju je bil leta 1956 z magnitudo 5,1 in največjimi učinki VII. stopnje po evropski potresni lestvici (EMS). V Ilirski Bistrici je bilo poškodovanih kar 60 % objektov, od tega 30 % huje. Močan je bil tudi potres leta 1995 (magnituda 4,4 in največji učinki VI. stopnje po EMS). Zadnji močnejši potres je bil 24. aprila 2005 z magnitudo 3,9 in največjo intenziteto V. stopnje po EMS (Vidrih & Godec, 2006). Ker leži velik del Ilirske Bistrice in sosednjih vasi na kvartarnih sedimentih, so tudi tu vplivi lokalnih tal na učinke potresa znatni. Zato

smo opravili meritve mikrotremorjev na 134 točkah in izdelali karto lastne frekvence ter jo primerjali z razporeditvijo poškodovanih objektov ob potresih 1995 in 2005. Primerjava je pokazala, da se večina poškodovanih objektov nahaja v frekvenčnem območju nihanja tal, ki se ujema z frekvenčnim območjem največje ranljivosti objektov.

Zahvala

Raziskave potekajo s finančno podporo projekta NATO Znanost za mir: *Assessment of seismic site amplification and seismic building vulnerability in Macedonia, Croatia and Slovenia*. Zahvaljujem se sodelavcem pri projektu: Barbari Šket Motnikar in Poloni Zupančič iz Urada za seizmologijo in Janezu Rošerju iz Naravoslovnotehniške fakultete.

Literatura

- Bard, P.Y. 1999: Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? V: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatani, T. (ur.): The effects of surface geology on seismic motion. Balkema, 1251–1279.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Ohrnberger, M. & Wathelet, M. 2006: Robustness of the H/V ratio peak frequency to estimate 1D resonance frequency. 3rd symp. on effects of surface geology on seismic motion, 361–370.
- Borcherdt, R.D. 1970: Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay. Bull. Seism. Soc. Am., 60/1, 29–61.
- Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Castro, R.R., Mochavesi, G. & Contri, P. 2004. Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors. Soil Dyn. and Earthq. Eng., 24, 487–495.
- Gosar, A., Stopar, R., Car, M. & Mucciarelli, M. 2001: The earthquake on 12 April, 1998 in Krn mountains (Slovenia): ground motion amplification study using microtremors and modelling based on geophysical data. – J. of Applied Geoph., 47/2, 153–167.
- Gosar, A. 2007: Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. – Engineering Geology, 91, 178–193.
- Kramer, S. L. 1996: Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, 653 str.
- Kreslin, M., Dolšek, M. & Fajfar, P. 2006: Matematično modeliranje in analiza armiranobetonske stavbe po EC8. – Gradbeni vestnik, 55, 141–152.
- Lapajne, J. 1970: Seizmična mokraronizacija Ljubljane, geofizikalne raziskave, Neobjavljeno poročilo. Geol. zav. Ljubljana, 16. str.
- Lenart, A. 2006: Merjenje seizmičnega nemira na Galjevici v Ljubljani za oceno ojačenja

nihanja tal ob potresu. Seminarska naloga, NTF, 12. str.

Lermo, J. & Chavez-Garcia, F.J. 1993: Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. – *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83/5, 1574–1594.

Medvedev, S. V. 1965: Inženjerska seizmologija. Građevinska knjiga, 268 str., Beograd.

Micromed 2005: Tromino, portable seismic noise acquisition system. User's manual, 102 pp.

Mucciarelli, M. & Gallipoli, M.R. 2001: A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. – *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 42, 255–266.

Nakamura, Y. 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Q. R. Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 25–33.

Nakamura, Y. 2000: Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12WCEE, Auckland.

Nogoshi, M. & Igarashi, T. 1971: On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). – *Jour. Seism. Soc. Japan*, 24, 26–40.

Pitilakis, K. 2004: Site effects. V: Ansal, A. (ur.): Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation. 139–197.

Reiter, L. 1990: Earthquake hazard analysis. Columbia University Press, 254 str.

SESAME 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation, 62 pp., http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf

Vidrih, R. & Godec, M. 2006: Potresi na Ilirskobistriškem. – *Ujma*, 20, 73–85.

Zupančič, P., Šket-Motnikar, B., Gosar, A. & Prosen, T. 2004: Karta potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana. Potresi v letu 2002, 32–54.

Zupančič, P., Šket-Motnikar, B. & Gosar, A. 2006: Ambient vibration measurements in Ljubljana, Slovenia. 1st Europ. Conf. Earth. Eng. and Seism., Geneve, 461–462.