

PROJEKT NATO SfPS: OCENA POTRESNEGA OJAČENJA TAL IN RANLJIVOSTI STAVB V MAKEDONIJI, HRVAŠKI IN SLOVENIJI

NATO SfPS project: Assessment of seismic site amplification and building vulnerability in Macedonia, Croatia and Slovenia

Andrej Gosar* UDK 550.34:699.841

Povzetek Abstract

V projektu programa NATO Znanost za mir in varnost z naslovom Ocena potresnega ojačenja tal in ranljivosti stavb v Makedoniji, Hrvaški in Sloveniji (2005–2008) smo z metodo mikrotremorjev raziskovali vpliv lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in ranljivost stavb. Ta metoda omogoča določitev lastne frekvence mehkih sedimentov, ki so odloženi na skalni podlagi, in dveh glavnih frekvenc nihanja stavb. Na ta način lahko ugotovimo nevarnost resonance med tlemi in objekti, ki lahko ob potresu poveča poškodbe.

Metoda mikrotremorjev omogoča količinsko potresno mikrorajonizacijo urbanih območij.

V Sloveniji so raziskave potekale na območju Ljubljane, Bovške kotline in Ilirske Bistrice. V okviru projekta smo organizirali mednarodno delavnico

Povečanje potresne varnosti s povezovanjem inženirskih tehnologij in seizmoloških podatkov in izdali knjigo pri založbi Springer. Rezultati projekta bodo objavljeni v posebni številki revije *Bulletin of Earthquake Engineering*.

The NATO Science for Peace and Security program project entitled Assessment of seismic site amplification and building vulnerability in Macedonia, Croatia and Slovenia (2005–2008) aimed at investigating the effects of local geological structures on seismic ground motion and building vulnerability using the microtremor method. This method enables estimation of the fundamental frequency of soft sediments which are deposited on a rocky basement and the two main building frequencies. The danger of soil-structure resonance can be thus established, as this can enhance damage to buildings in the case of an earthquake. The microtremor method enables quantitative seismic microzonation of urban areas. In Slovenia investigations were carried out in Ljubljana, the Bovec basin and the Ilirska Bistrica region. As part of the project an international workshop The increasing seismic safety by combining engineering technologies and seismological data was organized and a book published by Springer publisher. The results of the project will be published in a special issue of the *Bulletin of Earthquake Engineering*.

Uvod

Sodelavci Urada za seizmologijo in geologijo Agencije RS za okolje (Barbara Šket Motnikar, Polona Zupančič, Andrej Gosar) in doktorand na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani Janez Rošar smo v letih 2005–2008 sodelovali v mednarodnem projektu

programa NATO Znanost za mir in varnost (*Science for Peace and Security* — SfPS) z naslovom Ocena potresnega ojačenja tal in ranljivosti stavb v Makedoniji, Hrvaški in Sloveniji (*Assessment of seismic site amplification and building vulnerability in Macedonia, Croatia and Slovenia*). Projekt je vodil prof. Marco Mucciarelli iz Italije ob sovedenju prof. Zorana Milutinovića iz Makedonije, prof. Marijana Heraka s Hrvaške in avtorja tega prispevka. V projektu so sodelovale naslednje institucije: univerza Bazilikata iz Potenze, univerza iz Siene, Inštitut za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo (IZIS) iz Skopja, univerza v Zagrebu in Urad za seizmologijo in geologijo Agencije RS za okolje iz Ljubljane. Projektni partnerji smo se dvakrat letno srečevali na dvodnevni

* izr. prof. dr., Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

delavnicah, kjer smo izmenjali izkušnje in izvedli tudi nekatere skupne meritve. Spletna stran projekta je dosegljiva na naslovu <http://nato.gfz.hr>.

Glavni cilj projekta je bil omogočiti partnerjem raziskave z moderno opremo za meritve seizmičnega nemira (mikrotremorjev) in njihovo analizo za določitev dinamičnega odziva sedimentov in objektov. Uporabljena je bila metoda spektralnega razmerja vodoravnih in navpične komponente zapisa mikrotremorjev (*horizontal to vertical spectral ratio* – HVSR), ki se je v zadnjem desetletju v svetu zelo razširila. Njena glavna prednost je, da omogoča opredelitev lastne frekvence mehkejših sedimentov, ki ležijo na trši skalni podlagi, ne da bi poznali njihovo debelino in hitrost strižnega seizmičnega valovanja (Bard, 1999; Gosar 2007b). Manj pa se je doslej metoda mikrotremorjev uporabljala pri meritvah v stavbah, kjer daje podatke o osnovnih frekvencah nihanja v vzdolžni in prečni smeri. Projekt je zato pomembno prispeval k razvoju metodologije meritev v stavbah in njihove analize. S primerjavo meritev na prostem površju in v stavbah lahko ugotovimo nevarnost resonance med tlemi in objekti, ki pogosto prispeva k povečanju poškodb ob potresu. To omogoča količinsko potresno mikrorajonizacijo urbanih območij. Raziskave so bile usmerjene predvsem v večja urbana območja sodelujočih držav (Skopje, Zagreb, Ljubljana), ki so vsa na območjih s sorazmerno veliko potresno nevarnostjo, in na nekatera druga območja, ki so jih v preteklosti prizadeli potresi (Bitola, Ston, Zgornje Posočje). Z meritvami v gostih mrežah točk na prostem površju smo izdelali karte lastne frekvence sedimentov in dopolnili obstoječe karte potresnih mikrorajonizacij. S sistematičnimi meritvami v stavbah smo opredelili parametre odnosa med višino stavbe in osnovno frekvenco nihanja (Mucciarelli in drugi, 2009) in ugotovili kje obstaja nevarnost resonance med tlemi in objekti.

Na začetku projekta smo izvedli javni razpis za nakup ustrezne merilne opreme. Na podlagi preskušanj smo se odločili za trikomponentne seizmografe Tromino italijanskega proizvajalca Micromed. Ti seizmografi so bili razviti posebej za meritve mikrotremorjev. Odlikuje jih majhna teža (1,1 kg) in izvedba, pri kateri so vsi deli (senzor, registrator, sprejemnik GPS in napajanje) združeni v skupnem ohišju. Na ta način se izognemo motnjam, ki jih pogosto povzročajo kabli, ki sicer povezujejo posamezne dele sistema.

Raziskave v Sloveniji

V Sloveniji smo v okviru projekta izvedli raziskave na treh območjih, za katere je značilna povečana potresna nevarnost in pričakovan znoten vpliv mehkejših sedimentov na potresno nihanje tal, in sicer na območju Ljubljane, v Bovški kotlini in na območju Ilirske Bistrice.

Najobsežnejše raziskave so potekale na območju Ljubljane, kjer so obstoječe karte potresne mikrorajonizacije zaradi nezadostnih geofizikalnih raziskav in podatkov vrtnanja precej pomanjkljive. Zato smo izvedli 1223 meritev mikrotremorjev na 45 km² velikem območju v 200 m gosti mreži točk in izdelali karto lastne frekvence. Amplitude vrhov spektralnega razmerja so pokazale, da je razlika seizmične impedance med sedimenti in skalno podlago znatno večja v južnem delu Ljubljane, za katerega so značilni mehki jezerski sedimenti Ljubljanskega barja in kjer lahko pričakujemo večje ojačenje potresnega valovanja kakor v severnem delu mesta, ki leži na peščeno-prodnih nanosih. Meritve smo izvedli tudi v 122 izbranih stavbah različne višine in določili glavne vzdolžne in prečne frekvence nihanja. Osredotočili smo se na pomembnejše javne objekte, kakor so šole, zdravstveni in študentski domovi, poleg



Slika 1. Udeleženci delavnice NATO Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data pred Centrom za napredne akademske študije v Dubrovniku

Figure 1. Participants at the NATO workshop Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data in front of the Centre for Advanced Academic Studies in Dubrovnik

tega pa tudi na značilne stolpnice in družinske hiše. Za 12 stavb smo neposredno ugotovili, da obstoja nevarnost resonance med tlemi in objekti (Gosar in drugi, 2009). Z rezultati smo seznanili Oddelek za zaščito, reševanje in civilno obrambo Mestne občine Ljubljane, za katerega izvajamo skupaj z Zavodom za gradbeništvo tudi podrobnejšo analizo potresne ranljivosti stavb v Ljubljani.

Ker se je v južnem delu Ljubljane pokazalo, da je soodvisnost lastne frekvence in debeline sedimentov dobra, smo na Ljubljanskem barju dodatno izvedli meritve mikrotremorjev na lokacijah 74 vrtin, ki so dosegle skalno podlago, in opredelili parametre eksponentne odvisnosti lastne frekvence od debeline. To odvisnost smo potem uporabili za kartiranje debeline sedimentov v 16 km dolgem profilu preko celotnega Ljubljanskega barja, za katerega je značilna zmerna topografija skalne podlage in globina od 20 do 180 m (Gosar in Lenart, 2009). Rezultati so pokazali, da je metoda mikrotremorjev lahko uspešna dopolnilna metoda za ugotavljanje debeline sedimentov.

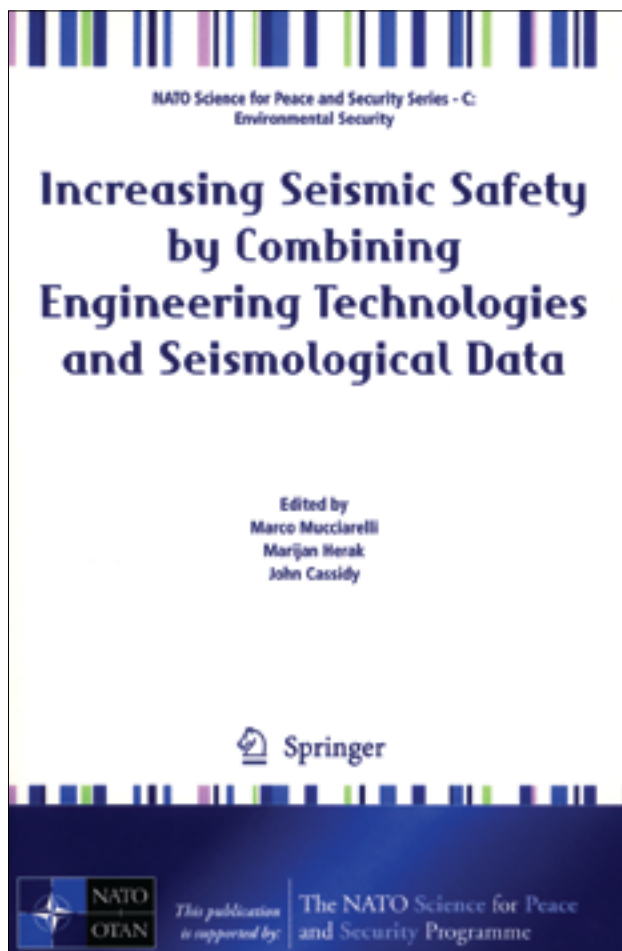
V Bovški kotlini smo izvedli meritve na 124 točkah prostega površja in v petindvajsetih izbranih stavbah.

Izdelana karta lastne frekvence sedimentov je pokazala, da je na več kakor 60 odstotkih raziskanega ozemlja lastna frekvenca med 6 in 12 Hz, meritve v prevladujoči vrsti hiš pa, da sta njihova vzdolžna in prečna frekvenca med 7 in 11 Hz. To kaže, da je nevarnost resonance med tlemi in objekti velika in lahko pojasni razmeroma velike poškodbe objektov ob potresih leta 1998 in 2004 glede na magnitudo in oddaljenost potresa (Gosar, 2007a; Gosar, 2008b). Raziskave smo dopolnili z analizami zapisov popotresov na začasnih potresnih opazovalnicah, postavljenih po glavnem potresu 12. julija 2004 (Gosar, 2008a). Raziskave v Bovški kotlini je poleg projekta NATO sofinanciral tudi projekt programa Interreg IIB Alpski prostor z naslovom SISMOVALP – Potresna nevarnost v alpskih dolinah.

Ker je ilirskobistriško območje med potresno najdejavnejšimi v Sloveniji in ker je večji del Ilirske Bistrice zgrajen na mehkejših kvartarnih sedimentih, smo izvedli raziskave z mikrotremorji tudi na tem območju. Na prostem površju smo opravili meritve na 134 točkah, dodatno pa še v desetih stavbah. Odkrili smo tri neposredne primere nevarnosti resonance med tlemi in objekti in ugotovili, da je ta posebej velika v severnem delu mesta, kjer se območji lastne frekvence sedimentov in stavb prekrivata (Gosar in Martinec, 2009). Ugotovitve se dobro ujemajo s porazdelitvijo poškodb stavb, ki jih je povzročil potres 22. maja 1995 ($M=4.7$, $I_{max}=VI$ EMS-98), za katerega so bili na voljo podrobni podatki popisa poškodb.

Delavnica NATO Advanced Research Workshop

Projektne partnerji smo septembra 2007 v Dubrovniku organizirali delavnico NATO Advanced Research Workshop z naslovom Povečanje potresne varnosti s povezovanjem inženirskih tehnologij in seizmoloških podatkov (*Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data*). Delavnica je potekala v Centru za napredne akademske študije (*Centre for Advanced Academic Studies*) univerze v Zagrebu, ki je nudil odlične pogoje za delo. Na delavnico smo povabili 30 vodilnih svetovnih strokovnjakov (slika 1) s področja raziskav vplivov lokalne geološke zgradbe na učinke potresov in raziskav ranljivosti objektov. Med drugimi se je delavnice udeležil Yutaka Nakamura iz Japonske, ki velja za enega začetnikov metode spektralnih razmerij vodoravnih in navpične komponente mikrotremorjev. Njegov članek (Nakamura, 1989) je eden največkrat citiranih člankov s področja mikrotremorjev, čeprav je bil objavljen v malo razširjeni japonski reviji. Delavnice se je udeležil tudi Pierre-Yves Bard iz univerze v Grenoblu, ki je pomembno prispeval k uveljavitvi metode mikrotremorjev v Evropi (Bard, 1999) in je vodil evropski projekt petega okvirnega programa SESAME, ki je bistveno prispeval k vzpostavitvi enotnih standardov pri meritvah, obdelavi in vrednotenju podatkov mikrotremorjev (SESAME, 2004).



Slika 2. Naslovnica knjige *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data*

Figure 2. Cover page of the book *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data*

V začetku leta 2009 je pri ugledni mednarodni založbi Springer izšla knjiga (slika 2) z naslovom *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data* (Mucciarelli in drugi, 2009) s prispevki večine predavateljev na tej delavnici. Knjiga, ki obsega 24 poglavij in 382 strani, obravnava različne vidike uporabe metode mikrotremorjev in drugih seizmoloških metod od raziskav teoretičnega ozadja do sistematičnih analiz vpliva pogojev meritev na rezultate. Poseben poudarek je na raziskavah ranljivosti objektov, kjer metoda mikrotremorjev še ni tako uveljavljena kakor pri raziskavah na prostem površju. V knjigi sem avtor tega prispevka napisal poglavje o naših izkušnjah z metodo mikrotremorjev pri raziskavah resonance med tlemi in objekti v Bovški kotlini, ki smo jih opravili po potresih v Zgornjem Posočju leta 1998 in 2004.

Sklepne misli

Sodelovanje v projektu nam je omogočilo, da se vključimo v raziskave s sodobnimi metodami ocenjevanja vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in ranljivosti objektov. Iz sredstev projekta smo pridobili šest posebnih seizmografov za meritve mikrotremorjev in ustrezno programsko opremo za njihovo analizo. Izvedli smo sistematične raziskave na treh območjih v Sloveniji, za katere je značilna povečana potresna nevarnost in znaten vpliv mehkejših sedimentov na potresno nihanje tal. V okviru projekta so bile na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani izdelane tri diplomske naloge, v pripravi pa je tudi ena doktorska disertacija. V letu 2009 bo izšla posebna številka znanstvene revije *Bulletin of Earthquake Engineering*, v kateri bo devet člankov z rezultati raziskav, doseženih v okviru projekta. Z uradnim zaključkom projekta v letu 2008 se sodelovanje s projektnimi partnerji ni končalo, saj načrtujemo poleg raziskav, ki se bodo nadaljevale v posameznih državah, tudi nove skupne raziskave.

Viri in literatura

1. Bard, P. Y., 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? V: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatami, T. (ur.): The effects of surface geology on seismic motion. Balkema, 1251–1279.

2. Gosar, A., 2007a. 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.
3. Gosar, A., 2007b. Raziskave vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in ranljivosti objektov z mikrotremorji. *Geologija*, 50/1, 65–76.
4. Gosar, A., 2008a. Site effects study in a shallow glaciofluvial basin using H/V spectral ratios from ambient noise and earthquake data; the case of Bovec basin (NW Slovenia). *Journal of Earthquake Engineering*, 12, 17–35.
5. Gosar, A., 2008b. Raziskave resonance med tlemi in stavbami v Bovški kotlini z metodo mikrotremorjev. *Ujma*, 22, 17–178.
6. Gosar, A., Martinec, M., 2009. Microtremor HVSR study of site effects in the Ilirska Bistrica town area (S. Slovenia). *Journal of Earthquake Engineering*, 13, 50–67.
7. Gosar, A., Rošar J., Šket-Motnikar, B., Zupančič, P., 2009. Microtremor study of site effects and soil-structure resonance in the city of Ljubljana (central Slovenia). *Bulletin of Earthquake Engineering* (v tisku).
8. Gosar, A., Lenart, A., 2009. Mapping the thickness of sediments using microtremors in the Ljubljana Moor basin (Slovenia). *Bulletin of Earthquake Engineering* (v tisku).
9. Mucciarelli, M., Herak, M., Cassidy, J. (ur.), 2009. *Increasing seismic safety by combining engineering technologies and seismological data*. Springer, NATO science for peace and security series C. Environmental security, 382 str.
10. Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R., Šket-Motnikar, B., Zupančič, P., Gosar, A., Prevolnik, S., Herak, M., Stipčević, J., Herak, D., Milutinović, Z., Olumceva, T., 2009. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* (v tisku).
11. 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.
12. SESAME, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation, 62 str., http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf