

LOKÁLNE SPEKTRÁ SEIZMICKEJ ODOZVY PRE VYSOKÉ BUDOVY  
LOCAL SEISMIC RESPONSE SPECTRA OF HIGH BUILDINGS

**Abstract**

The aim of the paper is to present the results of the computations of the site seismic response spectra of the high buildings and to compare them with standard seismic response spectra. The value of the spectral acceleration of the site response spectra is considerable smaller by comparison with the standard one. Consequently, the application of the site response spectral acceleration values reduces the cost of the construction.

**Key words:** Local seismic response spectrum, accelerogram, spectral acceleration"

**Úvod**

V Bratislave v poslednom období piatich rokov prebehla a naďalej pokračuje rozsiahla výstavba vysokých budov, ako príklad možno uviesť Business centrum V, polyfunkčný objekt na Černyševského ulici, Kopčianskej ulici, bytové objekty na Jégého ulici, polyfunkčný objekt Lakeside Park, Landslide, Olympia. Za vysokú budovu sa v zmysle STN 73 0036 považuje budova, ktorá ma podlahu najvyššieho podlažia aspoň 20 m nad terénom. V súvislosti s výstavbou týchto vysokých budov vznikli požiadavky od statikov na výpočet lokálnych spektier seizmickej odozvy, nakoľko podľa uvedenej STN vo výpočte dynamickej odozvy konštrukcie sa používa spektrum seizmickej odozvy. Špecifikom týchto objektov je, že ich vlastná frekvencia je v oblasti 0.5 Hz – 1 Hz, teda podstatne nižšia v porovnaní s inými konštrukciami. Výpočet spektier seizmickej odozvy či už na voľnom povrchu terénu alebo v ľubovoľnej hĺbke sa v súčasnosti používa ako na Slovensku, tak v Európe i v USA (Browning et al., 2008; Leydeckera et al. 2008; Bakira et al., 2007; Abbas, 2006; Lee et al., 2003; Lindeburg, 2001; Lam and Wilson, 2001; Hori et al., 1999; Schmidt et al., 1989). Vypočítaný akcelerogram alebo spektrum seizmickej odozvy je vstupný údaj pre statika na výpočet seizmickej odozvy konštrukcie a prípade dynamickej interakcie konštrukcie s podložíom (Matsuzaki and Kibe, 1983; Gupta, 1992). Spektrá seizmickej odozvy možno aplikovať i pri hodnotení účinkov technickej seizmicity na budovy (Lednická et al., 2006).

**Výpočet dynamickej odozvy vysokých budov**

V zmysle STN 73 0036 čl.3.1.1 stavebné konštrukcie v oblastiach 7OMSK-64 a vyššieho, kam patrí i Bratislava, sa musia počítať a navrhnuť na seizmické zaťaženie. Vo výpočtoch sa používajú buď spektrá seizmickej odozvy (čl.4.3.2) alebo akcelerogramy (čl.4.3.3). V zmysle čl. 4.3.2.1 ak je pre oblasť alebo lokalitu stavby vypracované lokálne spektrum seizmickej odozvy, použije sa miesto normového návrhového spektra alebo ako jeho doplnok. Statik požaduje výpočet spektier seizmickej odozvy na povrchu terénu a pre hĺbku, v ktorej sa nachádza základová škára alebo piety pilót. V zmysle čl. 4.2.3.2.7 pri hĺbke základovej škáry väčšej ako 3 m možno vo výpočte uvažovať pokles zrýchlenia v základovej škáre oproti zrýchleniu na povrchu

---

<sup>1</sup> RNDr., CSc., Univerzita Komenského, Prírodovedecká fakulta, Mlynská dolina, Bratislava, Slovensko, viskup@nic.fns.uniba.sk

terénu, avšak pokles musí byť doložený výpočtom podľa geologického profilu. V zmysle čl.5.2.1.3.1 sa hodnota takto vypočítaného zrýchlenia použije vo výpočte seizmickej sily na stavebnú konštrukciu. Ako príklad takéhoto postupu je uvedený výpočet lokálnych spektier seizmickej odozvy pre budovu Olympia v Bratislave.

### **Polyfunkčný objekt Olympia Bratislava**

Miestom realizácie zámeru postavenia vysokej budovy Olympie má byť pozemok v lokalite Bratislava - Ružinov, územný obvod Bratislava II, súradnice GPS uvedenej lokality sú 17O08'40"E, 48O09'19"N.

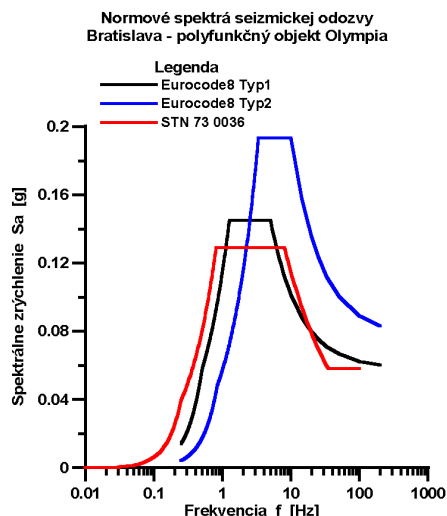
Účelom navrhovaného zámeru je výstavba polyfunkčného komplexu (výška 39 nadzemných podlaží), v rámci ktorého sa uvažuje s vytvorením 265 bytových jednotiek pre 818 obyvateľov (s celkovou úžitkovou plochou 34 9270 m<sup>2</sup>), administratívnych priestorov (s celkovou úžitkovou plochou 14 782 m<sup>2</sup>), plôch pre obchodné prevádzky a služby (s navrhovanou úžitkovou plochou 14 955 m<sup>2</sup>). Pre funkčné využitie hodnotenej činnosti sú navrhované parkovacie stojiská v podzemnej trojpodlažnej garáži.

Objednávateľ prác MODULINVEST s.r.o. Bratislava poskytol údaje vrtoz vykonaných v rámci prieskumu pre uvedenú lokalitu a kompletnú geologickú správu z inžiniersko-geologického prieskumu (Šikula, 2007), využité boli tiež dostupné údaje o seizmických a fyzikálnych vlastnostiach zemín (Müller et al., 1985).

### **Normové spektrá seizmickej odozvy**

V zmysle STN 73 0036 „Seizmické zaťaženie stavieb“, majú pre lokalitu Polyfunkčný objekt Olympia Bratislava vplyv 3 zdrojové oblasti seizmického rizika: Pernek – seizmická oblasť 3, základné seizmické zrýchlenie  $a_r = 0.06g$ , Wien - Wiener Neustadt – seizmická oblasť 2, základné seizmické zrýchlenie  $a_r = 0.1g$ , Komárno – seizmická oblasť 1, základné seizmické zrýchlenie  $a_r = 0.15g$ .

V správe z inžiniersko-geologického prieskumu sa okrem iného uvádza, že vo všetkých vrtoch v uvedenej lokalite sa nachádzajú íly so strednou až vysokou plasticitou, napríklad vo vrte OL-19, hlbokom 50 metrov, sa vysokoplastické íly nachádzajú v hĺbke 31.10 – 50.00. Vo všetkých ďalších vrtoch v jeho okolí sa nachádzajú íly hlavne vo väčších hĺbkach. V zmysle STN 73 0036 čl. 4.3.1 podložie v lokalite Bratislava - Polyfunkčný objekt Olympia bolo zaradené do kategórie D. Následne podľa STN 73 0036 čl. 4.3.2.2 bolo vypočítané normové návrhové spektrum seizmickej odozvy. Tak isto bolo vypočítané spektrum pružnej horizontálnej seizmickej odozvy podľa Eurocode 8 typu 1 a typu 2 (čl.3.2.2.2), všetky 3 spektrá sú uvedené na Obr.1



**Obr.1** Normové spektrá seizmickej odozvy pre lokalitu Bratislava Olympia.

### Lokálne spektrá seizmickej odozvy

Na základe požiadaviek odberateľa prác boli vypočítané lokálne spektrá seizmickej odozvy ako pre voľný povrch terénu, tak i pre hĺbku 16m pod povrchom terénu, na úrovni základovej dosky pre štandardný útlm 5%. Hĺbku 16m stanovil statik, ide o hĺbku základovej dosky, nad ňou sa nachádzajú 3 podlažia garáží.

Vo výpočte lokálnych spektier seizmickej odozvy sa postupovalo v zmysle č.4.3.2.1. Ich výpočet sa vykonal z vypočítaných akcelerogramov na voľnom povrchu terénu a v hĺbke 16m pod povrchom terénu., výpočet akcelerogramov sa vykonal v zmysle STN 73 0036 čl.4.3.3.

Výpočet bol vykonaný programom SHAKE98, (Bardet et al., 1998), ktorý je modifikácia programu SHAKE91 (Idriss and Sun, 1992) a ten je modifikáciou SHAKE (Schnabel, et al., 1972). Program SHAKE je výpočtový program, ktorý analyzuje chovanie sa horizontálne zvrstvených vrstiev počas pôsobenia seizmického zaťaženia používajúc ekvivalentnú lineárnu metódu. Tento nám dostupný program SHAKE je stále najrozšírenejší program v seizmickom inžinierstve používaný aj v súčasnosti na analýzu nielen na Slovensku, ale i v Európe, USA a Kanade (Di Fiore and Bruno 2007; Socco et al. 2007; Cramer 2006; Massa 2006; Chouinard 2004; Rathje and Stokoe 2004; Rosset et al., 2003; Girsang Ch. H. 2001; E. M., Saffarini 2000; Nunziata et al., 1999). Pracuje vo frekvenčnej oblasti a používa iteratívnu metódu, ktorá berie do úvahy nelineárne chovanie zemín.

Na výpočet akcelerogramov na voľnom povrchu terénu a v hĺbke 16 m boli použité vstupné akcelerogramy Anza 1980/02/25, Cape Mendocino 1992/04/25, Morgan Hill 1984/04/24, Lytle Creek 1970/09/12 zaznamenané na skalnom podloží, ich priebeh je na Obr.2. Výber akcelerogramov bol zvolený v zmysle čl.4.3.3.3 STN 73 0036 tak, aby zodpovedali seizmogénnym vlastnostiam zdroja, normované boli na hodnotu zrýchlenia 0.043g vypočítanú pre kategóriu podlažia A (skalné podlažie) v danej lokalite výstavby konštrukcie Olympia. Z dvoch horizontálnych zložiek sa vždy vyberala tá, ktorá mala vyššiu hodnotu zrýchlenia. To, ktorá horizontálna zložka sa vybrala, nie je

relevantné, nakoľko Fourierove spektrum oboch je rovnaké a i tak sa pôvodná zložka akceleroqramu normovala na hodnotu 0.43g.

Výsledné lokálne spektrum seizmickej odozvy bolo stanovené ako obálka lokálnych spektier pre jednotlivé akceleroqramy (obr. 3-5).

Na základe výpočtov možno konštatovať (Viskup, 2008), že pre seizmické ohrozenie lokality Bratislava - polyfunkčný objekt Olympia, má najväčší význam zdrojová oblasť seizmického rizika Wien - Wiener Neustadt. Návrhové zrýchlenie, ktoré treba uvažovať vo výpočtoch je  $a_g = 0.0645g$ , kategória podložia je D, maximálna hodnota spektrálneho zrýchlenia je  $S_a(\max) = 0.129 g$ , špičková hodnota seizmického pohybu na povrchu terénu voľného poľa je  $d_g = 0.145125 m = 14.5125 cm$ .

### **Záver**

V porovnaní s lokálnymi spektrami z iných lokalít pre iné konštrukcie možno konštatovať, že v prípade vysokej 39 podlažnej budovy Olympia v Bratislave sú hodnoty lokálneho spektrálneho zrýchlenia značne nižšie v porovnaní s normovými hodnotami. Ku podobným údajom sme dospeli aj v prípade ďalších vysokých budov v Bratislave - Business centrum V, polyfunkčný objekt na Černyševského ulici, Kopčianskej ulici, bytové objekty na Jégého ulici, polyfunkčný objekt Lakeside Park, polyfunkčný objekt Landslide. Nie je to tak vždy, že lokálne spektrá sú nižšie v porovnaní s normovými, napríklad v prípade cyklotrónu v Bratislave (Viskup and Janotka, 2002) alebo vodného diela Gabčíkovo (Viskup, 2003) lokálne spektrá boli viac menej tie isté ako normové.

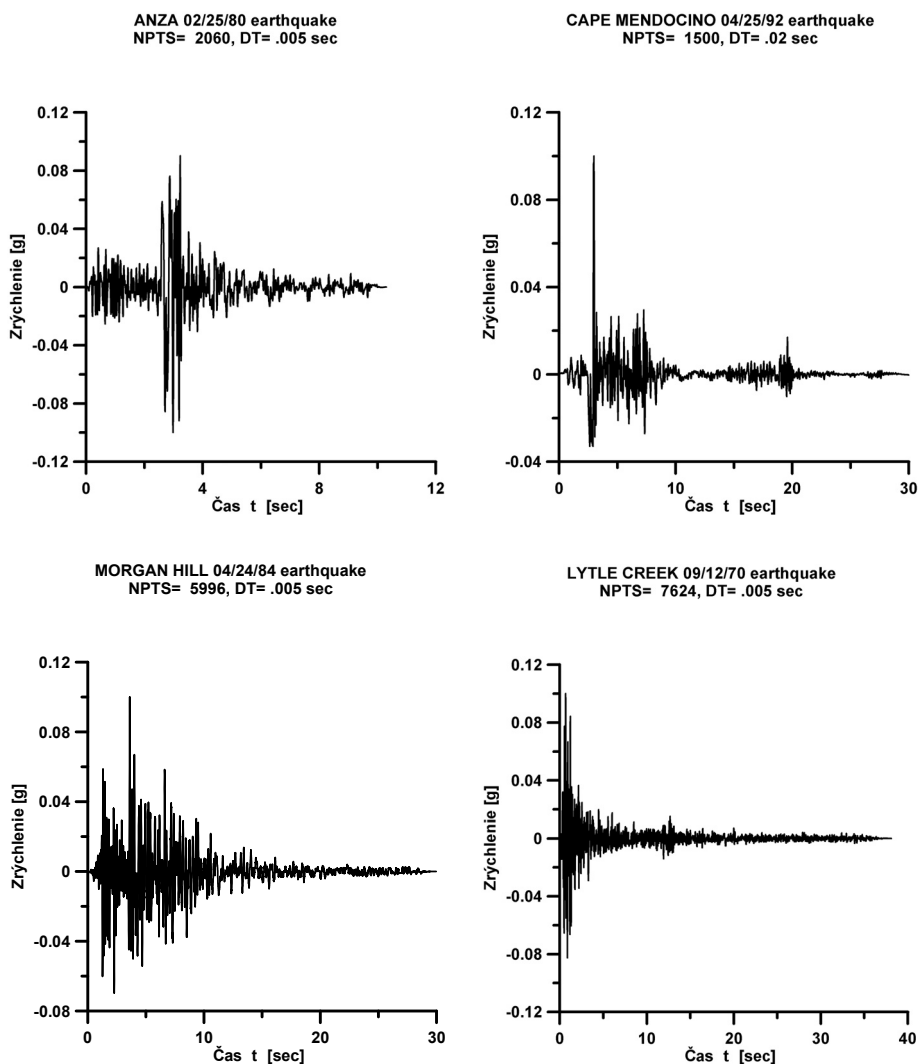
To, či lokálne spektrálne zrýchlenie je vyššie či ni nižšie v porovnaní s normovým závisí od vlastnej frekvencie konštrukcie (Viskup, 2004). Aj v prípade lokality, kde je výstavba vysokej budovy Olympie, pre frekvencie vyššie ako 4 Hz sú hodnoty lokálneho spektrálneho zrýchlenia vyššie v porovnaní s normovými.

Na základe uskutočnených výpočtov možno konštatovať, že použitie lokálnych spektier seizmickej hodnoty v prípade vysokých budov v Bratislave viedlo k zníženiu nákladov na výstavbu konštrukcie a pri zachovaní ich seizmickej bezpečnosti.

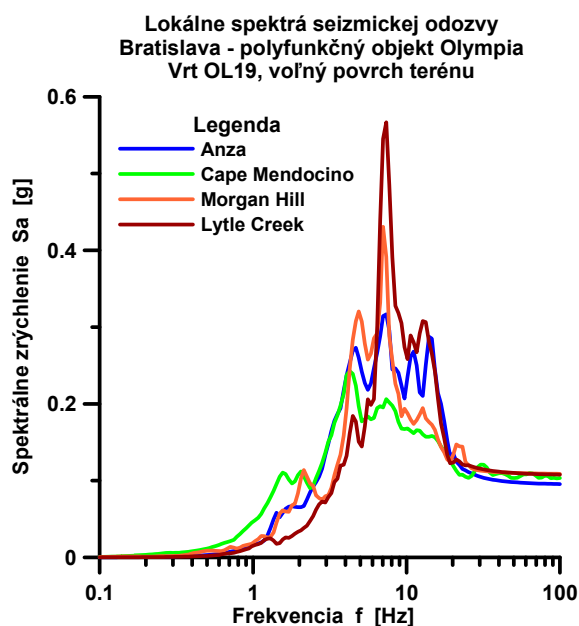
Vzhľadom na odlišné geologické pomery v iných častiach Slovenska zatiaľ nemožno zovšeobecniť toto tvrdenie aj pre iné lokality na Slovensku.

### *Podakovanie*

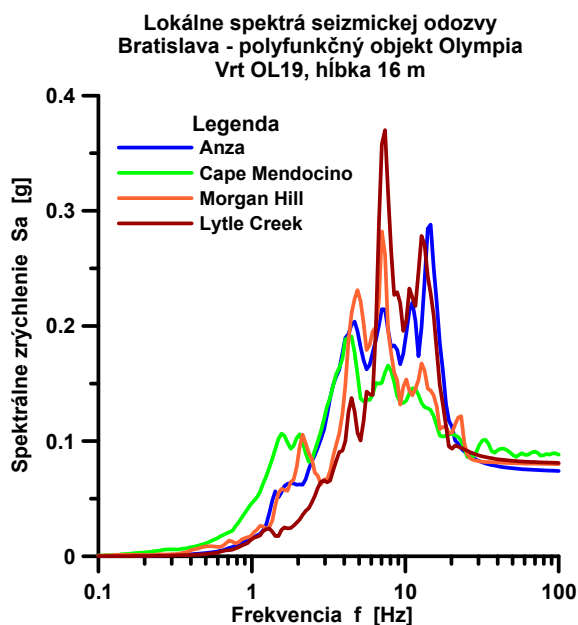
*Tento článok vznikol vďaka podpore výskumu v rámci projektu Kvalita života – zdravie, výživa a vzdelávanie“ a grantovej agentúry VEGA pri riešení projektu 1/1030/04.*



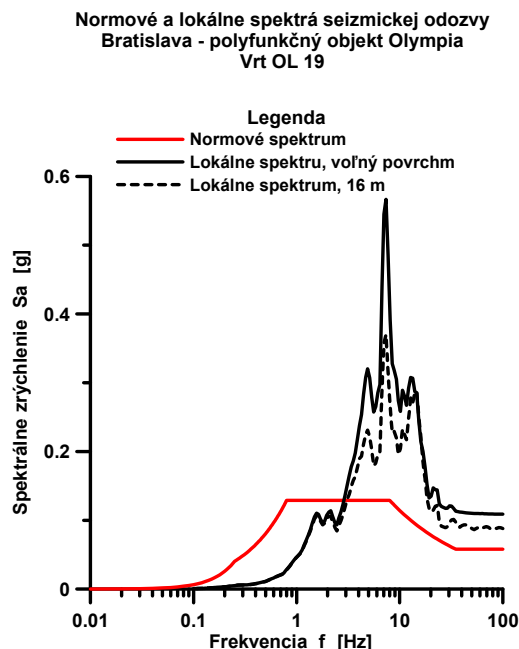
**Obr.2** Vstupné akceleroqramy pre výpočet lokálnych spektier seizmickej odozvy. Z dvoch horizontálnych zložiek je uvedená vždy zložka o vyššej maximálnej hodnote zrýchlenia.



**Obr. 3** Lokálne spektrá seizmickej odozvy pre lokalitu Bratislava - polyfunkčný objekt Olympia, voľný povrch terénu.



**Obr. 4** Lokálne spektrá seizmickej odozvy pre lokalitu Bratislava: - polyfunkčný objekt Olympia, hĺbka 16 m pod povrchom terénu.



**Obr. 5** Normové a lokálne spektrá seizmickej odozvy pre lokalitu Bratislava: - polyfunkčný objekt Olympia, pre voľný povrch terénu.

## Literatúra

- [1] STN 73 0036. Seizmické zaťaženie stavebných konštrukcií. Slovenská technická norma. Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, Bratislava, 1997, 68 str.
- [2] EUROCODE8. Design provisions for earthquake resistance. Part 1. General rules, seismic actions and rules for buildings. British-Adopted European Standard / 08-Apr-2005 / 232 p.
- [3] Abbas, A.M. (2006): Critical seismic load inputs for simple inelastic structures. Journal of Sound and Vibration, Vol. 296, Iss.s 4-5, p. 949-967
- [4] Bakira, P.G., De Roeck, G., Degrandeb, G. and Wong, K.K.F. (2007): Site dependent response spectra analysis of the characteristics of the strong ground motion due to the 1999 Duzce earthquake in Turkey. Engineering Structures, Vol. 29, Iss. 8, , p. 1939-1956.
- [5] Bardet, J.P., Lin, C.H. and Idriss, I.M. (1998): SHAKE98. A computer proram for linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California, 41 pp.
- [6] Browning, J.A., Warden, B., Matamorosa, A. and Lepagec, A. (2008): Global and local seismic next term drift estimates for RC frames. Engineering Structures, Vol. 30, Iss. 5, p. 1262-1271.

- [7] Chouinard, L., Rosset, P., De la Puente, A., Madriz, R., Mitchell, D. and Adams, J. (2004): Seismic hazard analysis for Montreal. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004, Paper No. 7010, 12 pp.
- [8] Cramer, Ch. H. (2006): Quantifying the Uncertainty in Site Amplification Modeling and Its Effects on Site-Specific Seismic-Hazard Estimation in the Upper Mississippi Embayment and Adjacent Areas. Bull. Seismol. Soc. Am., 96, p. 2008-2020.
- [9] Di Fiore, V. and Bruno, P.P. (2007): Seismic site effect:: SV waves Phase shift in visco-elastic non linear media , L' Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, GNGTS, Convegni precedenti, Tema 2 - Sismologia per la pianificazione territoriale e la progettazione, Sessione 2.2 - Caratterizzazione sismica del territorio , p. 331 – 336.
- [10] Girsang, Ch. H. (2001): A numerical investigation of the seismic response of the aggregate pier foundation system. Virgin. Polyt. Inst. and State Univ. , 278 pp.
- [11] Gupta, A. K. (1992): Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures, CRN Press, INC, 192 pp.
- [12] Hori, T., Kuramoto, H., Koshika, N., Okuzono, T. and Takayama, M. (1999): Seismic Evaluation of Buildings by Acceleration Response Spectrum at Engineering Bedrock. (Part 8). Conversion to Single Degree of Freedom (Research Results on High-rise Buildings). Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan., Architectural Institute of Japan. B-2. Structures 2. Journal Code:L2505A, p. 1139-1140
- [13] Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1992): User's Manual for SHAKE91. A computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits. Department of Civil&Environmental Engineering, University of California, 64 pp.
- [14] Lam, N. T., Wilson, J. L. (2001): Earthquake response spectrum models for Australia. roceedings of the Annual Seminar for the Australian Earthquake Engineering Society, 2001, Canberra, p. 8-0 - 8-5
- [15] Lednická, M., Luňáčková, B., Kaláb, Z., Hrubešová, E. and Kořínek1R. (2006): Contribution to evaluation of technical seismicity effect on buildings - case study. Earth Sci. Res. J. Vol. 10, No. 1 (Jun. 2006), p. 7-14
- [16] Lee, W. H. K., Jennings, P. and Kanamori, H. (2003): International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. IAEE, Academic Press, 1200 p.
- [17] Leydecker, G. , Schmitt, T., Busche, H. and Schaefer, T. (2008): Seismo-engineering parameters for sites of interim storages for spent nuclear fuel at German nuclear power plants. Soil Dynam Earthq Eng., Vol. 28, Iss. 9, p. 754-762
- [18] Lindeburg, M. R. (2001): Seismic Design of Building Structures: A Professional's Introduction to Earthquake Forces and Design Details, Professional Publications (CA), 262 pp.
- [19] Massa, M. , Ferretti, G. , Stupazzini, M. and Cauzzi, C. (2006): Evaluation of Site Amplification Effects in Ripabottini (Molise, Italy). Geoph. Res. Abstr., Vol. 8, 09888.
- [20] Matsuzaki, Y. and Kibe, S. (1983): Shock and Seismic Response Spectra in Design Problems. The Shock and Vibration Digest, Vol. 15, No. 10, p. 3-10.



- [21] Müller, K., Okál, M. a Hofrichterová, L. (1985): Základy hornické geofyziky. SNTL - Alfa, Praha, 220 str.
- [22] Nunziata, C., Mele, R., Natale, M. and Marrara, F. (1999): Realistic Modelling of Seismic input for Megacities and large Urban Areas. UNESCO-IGCP Project 414, Yearly report 1999, Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Università "Federico II" Napoli, Italy, 3 pp.
- [23] Rathje, E. M. and Stokoe, K. H. (2004): The integrated surface and borehole, geotechnical array needs for deep nonlinear soil response. International Workshop for Site Selection, Installation, and Operation of Geotechnical Strong-Motion Arrays. 7 pp.
- [24] Rosset, P., De la Puente, A., Chouinard, L. and Mitchell, D. (2003): Seismic risk mitigation for the Montreal Urban Community. Evaluation of soil amplification; development and applications”, 91th Journées Luxembourgeoise de Géodynamique, Walferdange, Luxembourg. October 6-8, 2003, 8 pp
- [25] Saffarini, H. S. (2000): Ground motion characteristics of the November 1995 Aqaba earthquake. Engi. Structures, Vol. 22, Iss. 4, p. 343-351
- [26] Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, B. H. (1972): SHAKE. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. College of Engineering, University of California, 88 pp.
- [27] Schmidt, H. G., Schwarz, J. and Wuttke, F. (1989): Site response studies for low seismicity regions of Central Europe: research strategies in support of code development. Soil Dynam Earthq Eng., Vol. 17, Iss.s 7-8, p. 459-464
- [28] Socco, L.V., Boiero, D., Foti, S. and Comina, C. (2007): Implicazioni della non Unicità della Soluzione nelle Prove per Onde Superficiali per lo Studio della Risposta Sismica Locale. L' Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, GNGTS, Convegni precedenti, Tema 2 - Sismologia per la pianificazione territoriale e la progettazione, Sessione 2.2 - Caratterizzazione sismica del territorio , p. 323 - 326
- [29] Šíkula, G.: (2007): Bratislava: polyfunkčný objekt Olympia Záverečná správa z podrobného inžinierskogeologického prieskumu, Ekogeos, Bratislava, 52 s.
- [30] Viskup, J. a Janotka, V. (2002): Bratislava – SMÚ. Seizmický posudok na cyklotrónové centrum. SEISCOMP, SEISING, Bratislava, 10 str.
- [31] Viskup, J. (2003): Spektrá seizmickej odozvy pre lokalitu Gabčíkovo. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební, Roč. 3, č. 2, str. 253-258.
- [32] Viskup, J. (2004): Metodika stanovenie parametrov seizmického pohybu pre výpočet seizmického zaťaženia .In: Staticko-konštrukčné a stavebno-fyzikálne problémy stavebných konštrukcií. - Košice : Tech. Univ. Košice, s. 101-104
- [33] Viskup, J.(2008): Bratislava - polyfunkčný objekt Olympia. Normové a lokálne spektrá seizmickej odozvy. Seizmický posudok. SEISCOMP, Bratislava, 24 str.

