

Primljen / Received: 11.2.2013.
 Ispravljen / Corrected: 12.5.2013.
 Prihvaćen / Accepted: 28.6.2013.

Dostupno online / Available online: 10.9.2013.

Procjena obilježja odziva tla mjenjenjem mikropodrhtavanja

Autori:



Prof.dr.sc. **Askar J. Choobbasti**, dipl.ing.građ.
 Babol University of Technology
 Department of Civil Engineering
 Babol, Mazandaran, Iran
asskar@nit.ac.ir



Mr.sc. **Sadegh Rezaei**, dipl.ing.građ.
 Babol University of Technology
 Department of Civil Engineering
 Babol, Mazandaran, Iran
S_Rezaei1366@yahoo.com



Doc.dr.sc. **Farzad Farrokhzad**, dipl.ing.građ.
 Mazandaran Institute of Technology
 Department of Civil Engineering
 Babol, Mazandaran, Iran
FarzadFarrokhzad@yahoo.com

Stručni rad

Askar J. Choobbasti, Sadegh Rezaei, Farzad Farrokhzad

Procjena obilježja odziva tla mjenjenjem mikropodrhtavanja

Omjeri spektra horizontalne i vertikalne komponente nemira kod mikropodrhtavanja posljednja se dva desetljeća često rabe pri istraživanjima uvjeta tla. Izravna procjena uvjeta sedimenata tla i mala cijena mjerenja osnovne su prednosti spomenute metode. U ovom članku analizira se metoda procjene odziva tla na osnovi mjerenja mikropodrhtavanja. Kako bi se procijenila točnost mjerenja i opravdanost njihove primjene pri procjeni uvjeta tla, preliminarno je modeliran odziv tla rabeći numeričke metode. Rezultati dokazuju da su omjeri spektra horizontalne i vertikalne komponente nemira kod podrhtavanja prihvatljiva metoda za procjenu uvjeta tla proučavanog područja.

Ključne riječi:

uvjeti tla, mikropodrhtavanja, H/V spektralni omjer, rezonantna frekvencija, faktor amplifikacije

Professional paper

Askar J. Choobbasti, Sadegh Rezaei, Farzad Farrokhzad

Evaluation of site response characteristics using microtremors

In the two last decades the microtremor H/V spectral ratio method has been widely used for site effect studies. Straightforward estimate of the site effect of sediments and low-cost measurements are the main advantages of mentioned method. In this research the use of microtremor measurements in estimation of site response have been investigated. In order to assessing the accuracy of the measurements and its application in site effect evaluation, a preliminary site response modeling was carried out using the numerical methods. The results showed that the H/V spectral ratio approach provides an acceptable means of site effect evaluation in study area.

Key words:

Site effect, Microtremor, H/V spectral ratio, resonance frequency, amplification factor

Fachbericht

Askar J. Choobbasti, Sadegh Rezaei, Farzad Farrokhzad

Ermittlung von Eigenschaften der Bodenantwort mittels Mikrobeben

In den letzten zwei Jahrzehnten ist das auf dem H/V Spektralverhältnis von Mikrobeben beruhende Verfahren weitreichend für Studien von Standorteinflüssen angewandt worden. Eine anschauliche Einschätzung der Standorteinflüsse von Sedimenten und kostengünstige Messungen sind die wesentlichen Vorteile dieser Methode. In dieser Arbeit ist die Anwendung der Messungen von Mikrobeben für die Bewertung der Bodenantwort untersucht worden. Anhand vorläufiger Modellierung der Bodenantwort mittels numerischer Methoden ist die Genauigkeit der Messungen für die Bestimmung von Standorteinflüssen erforscht worden. Die Resultate haben gezeigt, dass die auf dem H/V Spektralverhältnis beruhende Vorgehensweise für das gegebene Gebiet geeignet ist.

Schlüsselwörter:

Standorteinfluss, Mikrobeben, H/V Spektralverhältnis, Resonanzfrequenz, Amplifikationsfaktor

1. Uvod

Tijekom potresa seizmički se valovi od izvora brzo šire Zemljinom korom. Kad valovi stignu do površine, uzrokuju podrhtavanje čije trajanje možemo mjeriti u sekundama ili minutama, prema [1]. Različiti aluviji različitog sastava tijekom potresa različito se i ponašaju. Usto, sastav aluvija u različitim potresima može imati različit odziv. Poznato je da, osim magnitude potresa i udaljenosti lokaliteta od rasjeda, na podrhtavanje tla na nekom području tijekom potresa znatno utječu i lokalni geološki uvjeti, koje nazivamo uvjetima tla.

Postoje različite metode procjene odziva tla, a dijelimo ih u dvije opće skupine: a) teoretske i numeričke metode te b) metode na terenu.

Teoretske i numeričke metode proučavaju uvjete tla uz pomoć matematičkih jednadžbi na temelju podataka s bušotina i dinamičkih određenja tla. Terenske se metode koriste promatranjem i određenjima potresa, mjerenja pri eksplozijama i mjerenjima mikropodrhtavanja. Pritom je najbolje zabilježiti snažno podrhtavanje tla uzrokovano većim potresom na promatranom lokalitetu. No to se u Babolu u Iranu (lokalitet koji se ovdje analizira) ne događa često, pa nije praktično rabiti tu metodu pri analizi odziva tla. Karakteristike tla proučavanog područja možemo odrediti i uz pomoć opsežnih seizmičkih refleksija i refrakcija, spektralne analize površinskih valova (SASW - spectral analysis of surface waves), višekanalne analize površinskih valova (MASW - multichannel analysis of surface waves) ili metode kontinuiranog površinskog vala (CSWS - continuous generation of surface waves), mjerenjima niz bušotinu (*down-hole*), uz bušotinu (*up-hole*) i u dvije bušotine (*cross-hole*) te geotehničkim ispitivanjima. Moramo napomenuti da nam takva terenska ispitivanja ne bi pomogla pri izravnom određenju odziva tla, ali bi nam mogla poslužiti kao polazište za teoretske i numeričke metode. Takva su ispitivanja izuzetno skupa i zahtijevaju mnogo vremena. Mjerenja mikropodrhtavanja najraširenija su metoda određenja odziva tla u svijetu, osobito u urbanim područjima [2]. Mjerenja mikropodrhtavanja relativno su jeftin i jednostavan alat koji nam pomaže odrediti dva parametra ključna za istraživanje odziva tla, frekvenciju i faktor amplifikacije [3, 4, 5].

Babol je jedan od najvećih gradova na sjeveru Irana (u pokrajini Mazandaran). Izgrađen je na aluvijima, a pokrajina u kojoj se nalazi vrlo je seizmički aktivna. Stoga su nužna sveobuhvatna ispitivanja koja će nam pomoći smanjiti štetu i broj ljudskih žrtava u potresima. U ispitivanjima za određenje rezonantne frekvencije i faktora amplifikacije vibracija tla na proučavanom području primjenjena je Nakamura metoda (omjer spektra horizontalne i vertikalne komponente nemira kod podrhtavanja). Preliminarno je modeliran i odziv tla uz pomoć programa za izradu jednodimenzionalnog odziva tla *SHAKE*. Prikazane su frekvencije tla dobivene modeliranjem, koje su zatim uspoređene s onima dobivenima mjerenjem

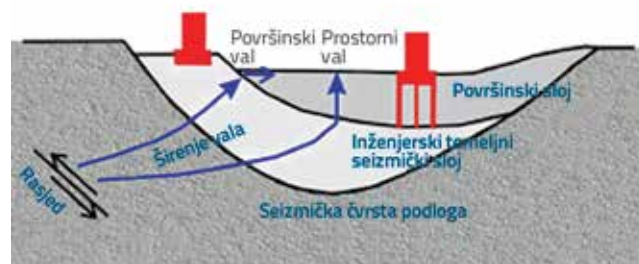
mikropodrhtavanja. U radu su obrađeni podaci iz petnaest stanica za praćenje mikropodrhtavanja te geotehnički podaci sa šest bušotina.

2. Uvjeti tla

Procjena uvjeta tla određenih geološkim i topološkim karakteristikama mjesta postala je standardni uvjet izrade mikrozona i procjene kvalitete lokacija za gradnju važnih građevina [6]. Utjecaj geoloških i geotehničkih karakteristika tla nekog područja na intenzitet podrhtavanja, razmjere štete uzrokovane potresom i opće karakteristike seizmičkog vala (poput amplitude, frekvencije i trajanja jačih podrhtavanja) poznat je već dulje vrijeme [1]. Posebno je važno to što valove određenih frekvencija mogu znatno pojačati debeli slojevi nekonsolidiranih naslaga blizu površinskog sloja [7]. Pojačanje vala uslijed karakteristika tla često kompenzira meki površinski sloj koji zarobi seizmičku energiju zbog razlika u impedanciji između mekog površinskog sloja i čvrste podloge dubljih slojeva [8].

Posljednjih desetljeća uvjeti i stanje tla uzrokovali su ozbiljne štete tijekom potresa u Michoacanu u Meksiku 1985., u Kalamati u Grčkoj 1989., u Lomprieti u Kaliforniji, SAD, 1989., u Roodbar-Manjilu u Iranu 1990., u Kocaeliju i Duzceu u Turskoj 1999. [9], u Chi-Chiju u Tajvanu 1999., u Bamu u Iranu 2003. i u Wenchuanu u Kini 2008.

Karakteristike tla mogu pojačati podrhtavanje tijekom potresa. Meko i slabo povezano tlo može se tresti jače od kamenog tla iako su jednako udaljeni od epicentra potresa. Pojačavanje podrhtavanja zbog karakteristika tla (poput topografskih obilježja, rezonancije podrhtavanja i sl.) (slika 1.) može znatno povećati štetu uzrokovanu potresom [1]. Na seizmičko podrhtavanje tla na bilo kojem području utječe vrsta tla te regije. Mlađi i mekši slojevi pojačavaju podrhtavanje tla za razliku od starijih slojeva ili čvrste podloge [8].



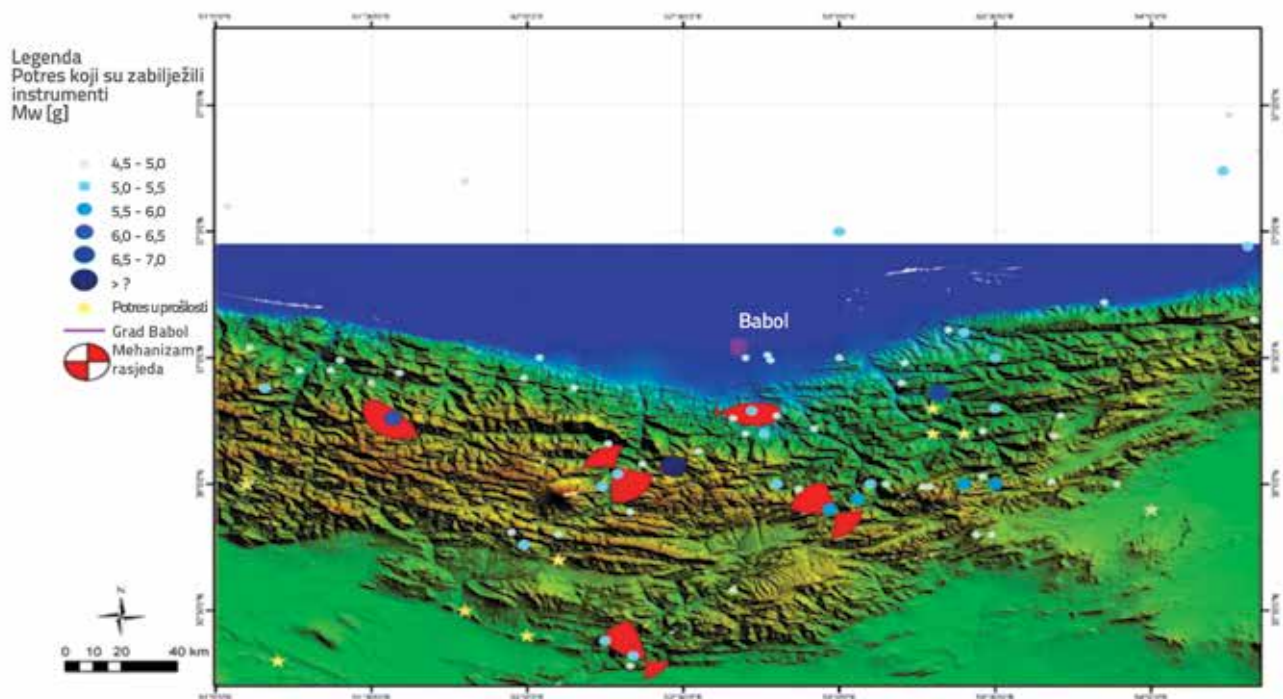
Slika 1. Dubinski presjek na kojem se vide mekši slojevi na mjestu gdje se pojačava podrhtavanje tla

3. Obilježja seizmičnosti na području Babola

Društvene zajednice i infrastruktura Irana nažalost su razvijene na prostorima gdje su katastrofe česte, poput grada Babola. Stanovništvo tih zajednica sve je brojnije, pa je nužno točno procijeniti rizik od prirodnih opasnosti. Babol se nalazi

Tablica 1. Popis razornih potresa u Babolu i oko njega koje su zabilježili instrumenti kroz povijest

Lokacija	Godina	Izvor	Intenzitet	Magnituda
Amol	1809.	20 km zapadno od Babola	IX	6,5
Talar rood	1935.	35 km jugoistočno od Babola	VII	5,7
Chahar dange	1935.	60 km jugoistočno od Babola	VIII	6,3
Band pey	1957.	10 km zapadno od Babola	IX	6,8
Babol	1971.	Babol	VI	5,2
Kojoor	2004.	60 km sjeverozapadno od Babola	VIII	6,3
Marzi kola	2012.	Babol	VI	5



Slika 2. Lokacije i magnitude potresa te rasjedi u blizini Babola i njihovi mehanizmi

ispred planine Alborz, na tektonski aktivnom području između Kaspijskog jezera i Iranske visoravni. Tektonske značajke planine Alborz određuju rubni uvjeti nastali zbog primicanja Arabije i Euroazije koje je vjerojatno počelo tijekom krede. Na području oko Babola često se događaju potresi. U tablici 1. prikazane su lokacije, godine, magnituda i intenziteti tih potresa.

Postoje povijesni pokazatelji da su potresi na tom području česti. Prvi zabilježeni veliki potres intenziteta IX ondje se dogodio 1809. Potres u Amolu odnio je brojne živote u Amolu i Babolu i osjetio se na širokom području. Potres u Talarroodu 1935. uzrokovao je umjereno podrhtavanje, a osjetili su ga na udaljenosti od 190 km. Potres u Chahardangeu 1935. uzrokovao je rušenje drvenih kuća u Sariju, Babolu i Amolu. Potres u Bandpeyju 1957. uzrokovao je snažna podrhtavanja tla i odnio 1500 života u Babolu te oštetio nekoliko mjesta. Potres u Babolu 1971. uzrokovao je umjereno podrhtavanje tla i ubio jednu osobu u Babolu. Potres u **Kojooru** 2004. ubio

je 35 ljudi u pokrajini Mazandaran, a u potresu u **Marzi kola** 2012. poginula je jedna osoba u Babolu. Slika 2. prikazuje lokacije i magnitude potresa te rasjede u blizini Babola i njihove mehanizme.

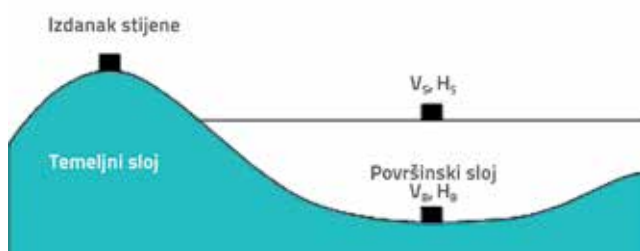
4. Metodologija

Inženjersku primjenu mikropodrhavanja prvi su zagovarali Kanai i Takana, [10]. U Japanu postoji duga tradicija proučavanja rezonantne frekvencije nekog područja na temelju praćenja mikropodrhavanja [3, 10, 11, 12]. Dodajmo da su mikropodrhavanja poslužila za procjenu odziva tla i u brojnim drugim regijama, primjerice u Meksiku [6, 13], Španjolskoj [14], SAD-u [4, 12, 15, 16], Francuskoj [17], Portugalu [18] i Indiji [19, 20, 8].

Kako je prije napomenuto, jedan od najpopularnijih postupaka za procjenu uvjeta tla na područjima niske seizmike jest mjerenje mikropodrhavanja [19, 3]. Pregledom

literature ustanovljeno je da je Nakamura metoda (omjeri spektra horizontalne i vertikalne komponente nemira kod podrhtavanja) primjenjena u nekoliko prilika. Tom je metodom dokazano da utjecaj izvora može biti minimiziran normiranjem horizontalne spektralne amplitude s vertikalnom [21]. Nakamura je metoda opisana u nekoliko radova i temelji se na sljedećim pretpostavkama o osnovnim obilježjima mikropodrhtavanja:

- mikropodrhtavanja sastoje se od nekoliko valova, no ponajprije od Rayleighevih valova koji se šire mekim površinskim slojem iznad tvrde podloge,
- postoje četiri Fourierove spektralne amplitude: horizontalna i vertikalna komponenta kretanja na površini i na dnu sloja (V_s, H_s, V_B, H_B) (slika 3.),
- utjecaj Rayleighevih valova na kretanje šuma vidljiv je u vertikalnom spektru na površini (V_s), ali nije i na dnu sloja (V_B),
- meki sloj ne pojačava vertikalnu komponentu mikropodrhtavanja,
- utjecaj Rayleighevih valova na mikropodrhtavanja jednak je za vertikalnu i horizontalnu komponentu,
- za velik raspon frekvencija (0,2–20 Hz), spektralni omjer horizontalne i vertikalne komponente gibanja na dnu sloja blizu je jedinične vrijednosti.



Slika 3. Ilustracija jednostavnog modela za interpretaciju omjera spektra horizontalne i vertikalne komponente mikropodrhtavanja kako ga je definirao Nakamura

Obično se prijenosne funkcije površinskih slojeva mogu izraziti omjerom:

$$S_T = H_s / H_B \quad (1)$$

gdje je H_s horizontalna komponenta kretanja u površinskom sloju, a H_B horizontalna komponenta kretanja na dnu sloja. No s obzirom na velik utjecaj širenja Rayleigheva vala na ambijentalni šum, nužno je ispraviti omjer (1) kako bi se mjerenjem mikropodrhtavanja procijenila prijenosna funkcija. Pretpostavimo li da površinski slojevi ne pojačavaju vertikalno podrhtavanje, omjer E_{RW} , koji opisuje utjecaj Rayleigheva vala na vertikalno kretanje, definira se pomoću izraza (2):

$$E_{RW} = V_s / V_B \quad (2)$$

Ako se pretpostavi da je utjecaj Rayleigheva vala jednak za vertikalnu i horizontalnu komponentu, može se izmijeniti određenje spektralnih omjera i opisati ga izrazom (3):

$$S_M = S_T / E_{RW} = (H_s / H_B) / (V_s / V_B) \quad (3)$$

Naposlijetku, ako se pretpostavi da je za sve promatrane frekvencije

$$H_B / V_B = 1 \quad (4)$$

procjena funkcije prijenosa može se izraziti spektralnim omjerom horizontalne i vertikalne komponente kretanja na površini pomoću izraza (5):

$$S_M = H_s / V_s \quad (5)$$

(U nastavku će taj omjer biti izražen kao H/V , bez indeksa) Brojna teoretska i eksperimentalna istraživanja dokazala su da se na temelju ovako dobivenog spektralnog omjera može odrediti osnovna frekvencija tla [3, 17, 18, 21].

5. Prikupljanje podataka i analiza

Kako bi se izmjerilo mikropodrhtavanje u zapadnom dijelu Babola, interesno je područje podijeljeno na segmente od $700 \times 700 \text{ m}^2$ i u svakom je segmentu postavljena mjerna stanica. Slika 4. prikazuje podjelu terena, lokacije stanica za praćenje mikropodrhtavanja i geotehničke bušotine. Stanice za praćenje mikropodrhtavanja označene su bijelim kvadratima, a geotehničke bušotine žutim strelicama.



Slika 4. Lokacije stanica za praćenje mikropodrhtavanja i geotehničkih bušotina



Slika 5. Praćenje mikropodrtavanja i uređaj rabljen pri njegovu mjerenju

Oprema za praćenje mikropodrtavanja sastojala se od pretvornika brzine s GPS-om, pojačala, analogno-digitalnog pretvarača i prijenosnog računala. Mucciarelli [21] je predložio da se pri prikupljanju podataka o mikropodrtavanjima treba oslanjati na seizmograf, ne na akcelerometar. Takvo je mišljenje temeljito na ispitivanju koje je proveo uz pomoć akcelerometra *Kinometrics FBA 23* i seizmografa *Lennartz 3-D Lite* i *Mark L4C-3D*. Dokazao je da su rezultati dobiveni uz pomoć akcelerometra bitno drukčiji od onih dobivenih uz pomoć seizmografa, osobito kad je riječ o niskim frekvencijama (<1 Hz).

Senzori brzine imaju vlastiti period od dvije sekunde. Tri senzora postavljena su za svako mjerenje, dva vodoravno pod pravim kutom i jedan okomito. Bolji je signal dobiven uz pomoć pojačala koje je povećalo vlastiti period na pet sekunda, filtriralo neželjene frekvencije i pojačalo signale. Za digitalizaciju podataka korišten je trokanaalni, 24-bitni analogno-digitalni (A/D) pretvarač. Za nadgledanje procesa prikupljanja podataka korišteno je prijenosno računalo za prikupljanje podataka. U njemu su pohranjivani prikupljeni podaci te je provedena preliminarna analiza podataka na terenu (slika 5.).

Mikropodrtavanja na proučavanom području mjerena su 2011. i 2012. godine. Vrijeme je bilo mirno, bez snažnijih vjetrova i kiša. Mjesta na kojima su provedena mjerenja bila su što bliže geotehničkim bušotinama, no izbjegavana su mjesta s gustim prometom, okna, temelji i druge podzemne konstrukcije. Svi eksperimentalni uvjeti ispitivanja kreirani su u skladu sa smjernicama europskog istraživačkog projekta *SESAME* [23, 24].

U sklopu europskog istraživačkog projekta *SESAME* (*Procjena uvjeta tla na temelju ambijentalne pobude*) temeljito je istražena uporaba ambijentalnih vibracija u svrhu tumačenja uvjeta određenog tla. Preporučene smjernice za tehniku spektralnog omjera H/V određene su nakon sveobuhvatne i detaljne analize koju su sudionici projekta *SESAME* provodili tijekom tri godine (2001.-2004.). S obzirom na sve to, smjernice

objedinjuju najnovija saznanja vezana za metodu i njezinu primjenu, a temelje se na dogovoru velikog broja sudionika u ispitivanjima. One su sinteza brojnih prikupljenih podataka i izrađene su na temelju njihove analize i tumačenja.

Kako bi se smanjila mogućnost utjecaja lokalnih šumova na istraživanje (poput šumova industrijskih postrojenja), ispitivanja su provedena noću, između 22 i 03 sata. U ovom ispitivanju sustav za prikupljanje podataka je neprekidno radio oko 15 minuta. Sustav uključuje i GPS, kako bi se točno odredio zemljopisni položaj svake točke mjerenja (slika 5.).

Prvi korak obrade pretvaranje je podataka iz binarnih u ASCII. Za takvu je obradu korišten program *Geopsy* i *J-SESAME*. Vrijeme snimanja u svakoj je stanici podijeljeno na prozore od 25 sekunda, odnosno 2500 uzoraka po prozoru. Svaki je prozor podvrgnut temeljnim ispravcima zbog anomalija i obrađen Hanningovim prozorom, a pojasni opseg od 0,2 Hz do 20 Hz filtriran je [25]. Izračunani su amplitudni Fourierovi spektri za svaki odabrani prozor te su zaglađeni. Nakon toga dvije su horizontalne komponente sjedinjene po načelu geometrijske sredine [20]. Nakamurin [3] spektralni omjer H/V primijenjen je na svaki prozor te je dobivena konačna dominantna frekvencija osrednjavanjem spektralnog omjera H/V prema izrazu (6):

$$H_{avg}(f) / V = \left(\sqrt{N^2(f) + E^2(f) / 2} \right) / V \quad (6)$$

gdje su N, E i V Fourierovi spektri za smjerove sjever-jug, istok-zapad i prema gore.

Prije bilo kakvog preuzimanja podataka ili njihova tumačenja mora se potvrditi pouzdanost H/V krivulje. Pouzdanost podrazumijeva stabilnost, odnosno jamči da je konkretna H/V krivulja dobivena na temelju odabranih snimaka reprezentativna za H/V krivulje koje bi se dobile na temelju snimaka s drugim ambijentalnim vibracijama i/ili uz neki drugi razumni izbor prozora.

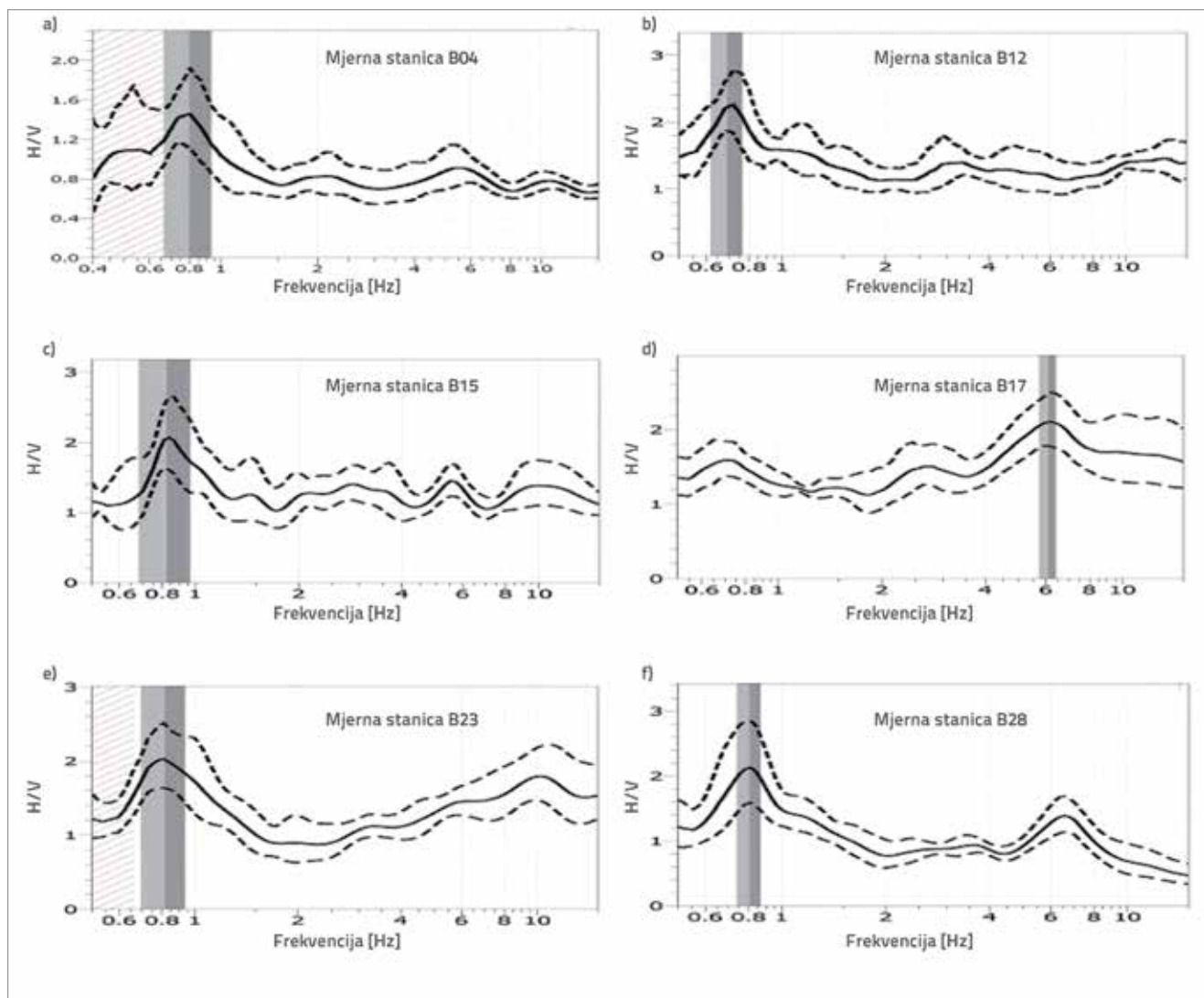
Stabilnost vrha H/V krivulje provjerena je provodeći tri ispitivanja na svakoj lokaciji mjerenja, što je rezultiralo

odabirom istih rezonantnih vrhova krivulje na svakoj lokaciji, ali u drugo vrijeme. Tijekom obrade podataka provedeni su i testovi osjetljivosti na odabranom vremenskom prozoru koji su dokazali slabu ovisnost vremenskog prozora, a time i veliku stabilnost. U tu svrhu moraju biti zadovoljeni određeni uvjeti:

- a) Da bi vrh krivulje bio mjerodavan, skupina *SESAME* preporučuje ispunjenje uvjeta $f_0 > 10/l_w$ (l_w - duljina prozora) kako bi za svaku frekvenciju u području interesa bilo najmanje 10 ciklusa po prozoru.
- b) Potrebno je mnogo prozora i ciklusa: Skupina *SESAME* preporučuje da pri automatskom odabiru prozora s unaprijed određenim parametrima ukupni broj značajnih ciklusa $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ bude veći od 200 (n_w - broj odabranih prozora za prosječnu H/V krivulju): To, primjerice, znači da ćemo za vrh krivulje pri 1 Hz imati bar 20 prozora od 10 sekunda, a za vrh pri 0,5 Hz bar 10 prozora od 40 sekunda.
- c) razina raspršivanja među prozorima mora biti prihvatljivo niska. Pojava vrijednosti koje bitno odstupaju

od standardnih često znači da su ambijentalne vibracije izrazito nestacionarne i da prolaze kroz neku vrstu poremećaja, što može znatno utjecati na fizikalna obilježja frekvencije vrha H/V krivulje. Stoga se preporučuje da $\sigma_A(f)$ bude manje od faktora 2 (za $f_0 > 0,5$ Hz) ili faktora 3 (za $f_0 < 0,5$ Hz) za raspon frekvencija jednak barem ($0,5 f_0$ i $2f_0$), pri čemu je $\sigma_A(f)$ standardna derivacija H/V amplitude.

Prema tome ako određena skupina parametara za obradu podataka ne daje željene rezultate kad je riječ o stabilnosti, skupina *SESAME* preporučuje ponovnu obradu podataka s drugim parametrima. Kako ispunjavanje gore navedenih uvjeta a), b) i c) katkad podrazumijeva suprotno podešavanje nekih parametara, u određenim slučajevima te uvjete neće biti moguće zadovoljiti. U tom je slučaju najsigurnije ponoviti mjerenja na lokaciji tijekom duljega razdoblja i/ili u



Slika 6. Ucertani omjeri H/V s ±1 SD iz mjerne stanice za praćenje mikropodrtavanja

Tablica 2. Rezultati iz svih mjernih stanica za praćenje mikropodrtavanja

Naziv mjerne stanice	A_0	$f_{(peak)}$	Kriteriji za pouzdanost H/V krivulje		
			$f_0 > 10 I_w$	$n_c > 200$	$\sigma f(0,5f,2f) < 2$
B04	1,4	0,86	DA	DA	DA
B05	2,2	0,92	DA	DA	DA
B06	2,7	0,92	DA	DA	DA
B10	2,1	1,32	DA	DA	DA
B11	3,2	6,80	DA	DA	DA
B12	2,1	0,67	DA	DA	DA
B15	2,1	0,83	DA	DA	DA
B17	2,1	6,10	DA	DA	DA
B18	3,0	8,10	DA	DA	DA
B22	1,7	0,76	DA	DA	DA
B23	2,0	0,80	DA	DA	DA
B24	3,5	0,86	DA	DA	DA
B28	2,1	0,80	DA	DA	DA
B29	1,7	7,00	DA	DA	DA
B30	2,9	6,70	DA	DA	DA

strože kontroliranim eksperimentalnim uvjetima. Usto, moramo biti oprezni ako se vrijednosti amplitude H/V krivulje znatno razlikuju od 1 (npr. ako su veće od 10 ili manje od 0,1) u širokom rasponu frekvencija. U tom su slučaju mjerenja vjerojatno pogrešna (primjerice zbog neispravnosti senzora ili sustava snimanja ili snažnih i umjetno stvorenih ambijentalnih vibracija u neposrednoj blizini) i treba ih ponoviti. Pritom valja obvezno najprije provjeriti prvotne snimke vremenske domene [24, 2].

Spektralni omjeri H/V za odabrane prozore izračunani su za 15 ispitanih lokacija. Slika 6. prikazuje spektralne omjere H/V za mjerne stanice B04, B12, B15, B17, B23 i B28. U tim su stanicama prikupljeni i podaci s geotehničkih bušotina. Tablica 2. prikazuje analizu rezultata iz svih stanica za praćenje mikropodrtavanja. U tablici je $f_{(peak)}$ frekvencija pri vrhu krivulje, a A_0 faktor amplifikacije. Zadnja tri stupca odnose se na razinu pouzdanosti rezultata koju preporučuje europski istraživački projekt *SESAME*.

6. Modeliranje tla

Kako bi se potvrdili rezultati eksperimentalnih mjerenja, osnovne frekvencije dobivene mjerenjem mikropodrtavanja uspoređene su s rezultatima jednodimenzionalne numeričke simulacije. Pomoću programa *SHAKE 2000* proračunan je odziv u sustavu homogenih viskoelastičnih slojeva beskonačnog horizontalnog pružanja pod djelovanjem posmičnog vala koji se širi vertikalno. Program se temelji na kontinuiranom rješenju jednadžbe vala, prema [26] prilagođenom primjeni na tranzijentna gibanja uz pomoć algoritma brze Fourierove transformacije [27]. Problem nelinearnosti modula posmika

i prigušenja riješen je uporabom ekvivalentnih linearnih svojstava tla, prema [28, 29] te iterativne metode. Na taj su način dobivene vrijednosti za modul i prigušenje koje su kompatibilne s efektivnim deformacijama unutar svakog sloja [30].

Tablica 3. Mehanička svojstva tla na bušotini BH06

Oznaka bušotine	Dubina [m]	USCS (sustav jedinstvene klasifikacije tla)	Jedinična težina tla [g/cm ³]	SPT broj (broj standardnih penetracijskih testova)
BH06	3	CH	1,85	7
	7	CL	1,82	10
	11,6	ML	1,91	15
	14,7	CH	1,86	16
	29,3	CL	1,89	23

Tablica 4. Najviše frekvencije i faktor amplifikacije izračunani u programu *SHAKE 2000*

Oznaka bušotine	Stanica za praćenje mikropodrtavanja u blizini bušotine	A_0	$f_{(peak)}$
BH08	B04	1,13	0,74
BH36	B12	1,97	0,58
BH06	B15	1,65	0,65
BH28	B17	2,30	3,80
BH02	B23	1,85	0,67
BH05	B28	1,75	0,85

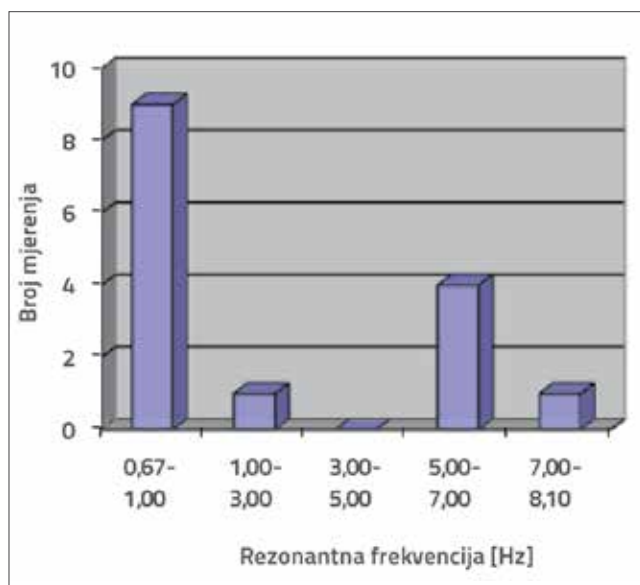
Na temelju geotehničkih podataka za svaku lokaciju te sintezom podataka s bušotina koje su pronađene u bazi podataka o potpovršinskim slojevima tla u Babolu uspjeli su se odrediti stupovi tla karakteristični za svaku lokaciju. U tablici 3. prikazani su podaci za bušotinu BH06.

Na temelju konfiguracije tla izračunana je osnovna frekvencija i faktor amplifikacije za svaku lokaciju uz pomoć numeričkog koda *SHAKE 2000*. Rezultati takve analize sa šest bušotina prikazani su u tablici 4.

7. Rezultati i diskusija

7.1. Rezultati mjerenja mikropodrhtavanja

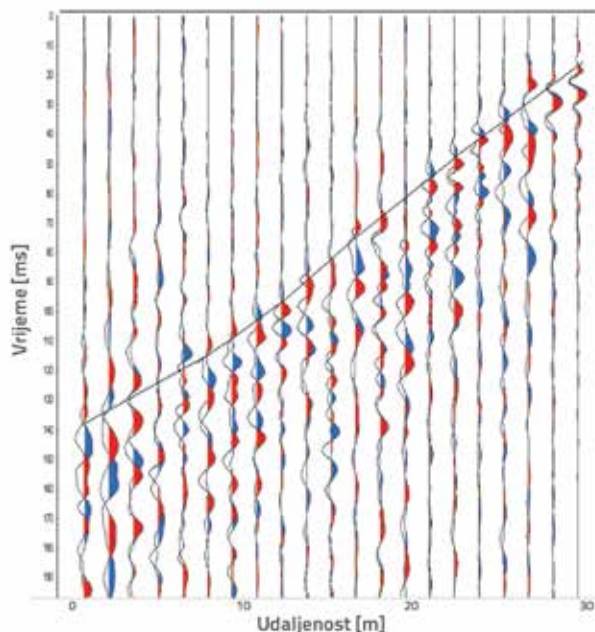
Spektralni omjer H/V za odabrane prozore izračunan je za 15 promatranih lokaliteta (slike 6.a do 6.f). Jasan vrh H/V krivulje (slike 6.a, 6.b, 6.c i 6.e) smatra se pokazateljem da postoje razlike impedancija između površinskog sloja i čvrste podloge dubljih slojeva, a visoke vrijednosti vrhova krivulje obično upućuju na veliku razliku između brzina, pa pretpostavljamo da će to pojačati podrhtavanje tla [24]. Slika 6.f prikazuje dva rezonantna vrha koja upućuju na postojanje dviju značajnih razlika impedancija, a slika 6.d prikazuje krivulju širokog vrha ili *plato* tip krivulje, što može upućivati na postojanje podzemne kosine na dodiru mekih i tvrdih slojeva [24, 2]. Analizom je dobiveno da je rezonantna frekvencija $f_{(peak)}$ u rasponu od 0,67 do 8,10 Hz unutar proučavanog područja. Većina lokaliteta ima niske vrijednosti rezonantne frekvencije $f_{(peak)}$ (manje od 1 Hz u približno 60% slučajeva) (slika 7.). Niske vrijednosti upozoravaju na deblje sedimente tla. No na pojedinim su mjestima vrijednosti rezonantne frekvencije $f_{(peak)}$ visoke (do 8,10 Hz). Parolai i sur. [31] iznijeli su tezu da je rezonantna frekvencija niža na dijelovima gdje je temeljni sloj dublji, a viša ondje gdje je plići.



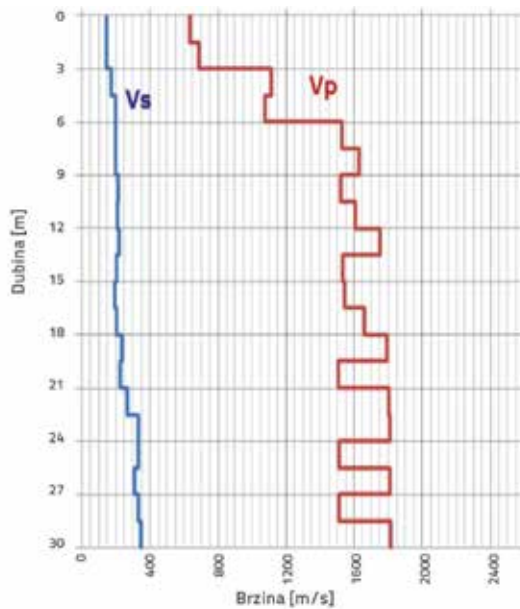
Slika 7. Odnos broja mjerenja i vrijednosti najviše frekvencije

7.2. Usporedba podataka prikupljenih mjerenjima mikropodrhtavanja i modeliranjem tla

Uglavnom je prihvaćeno da su krivulje spektralnog omjera H/V neovisne o funkciji izvora pobude, no usko povezane s geološkim sastavom lokalnog tla [32]. S obzirom na to, moguće je izraditi teoretsku H/V krivulju na temelju poznatog (ograničenog) geološkog sastava tla [33]. Jednodimenzionalna simulacija dobar je postupak za procjenu odziva tla uvjetovanog lokalnom geologijom. Podaci o geotehničkom sastavu promatranog područja dobiveni su na tri načina: a)



Slika 8. Snimka brzine posmičnog vala na bušotini BH06



Slika 9. Brzina posmičnog vala na bušotini BH06

prikupljanjem podataka s bušotina koji otkrivaju debljinu i vrstu tla, b) prikupljanjem podataka nakon standardnih penetracijskih testova koji su zatim integrirani kako bi se odredili mogući raspon brzina S-vala i gustoća slojeva te c) daljnjom provjerom profila brzina S-vala ispitivanjem niz bušotinu.

Geološki sastav i obilježja određeni na temelju te tri različite metode sažeti su i pridruženi odgovarajućim vrijednostima S-vala. U skladu s gore navedenim opisima, na slici 8. prikazan je primjer zapisa posmičnog vala iz bušotine BH06, a na slici 9. prikazani su rezultati analize tih zapisa (brzina posmičnog vala na svim dubinama). Iz tablice 5. može se zaključiti da su rezultati ispitivanja niz bušotinu i vrijednosti koje navode Ishihara i Ansal [34] unutar istog raspona, što je dokaz točnosti ispitivanja niz bušotinu.

Tablica 5. Vrijednosti brzine posmičnog vala dobivene ispitivanjima niz bušotinu BH06 i vrijednosti koje se navode u [34]

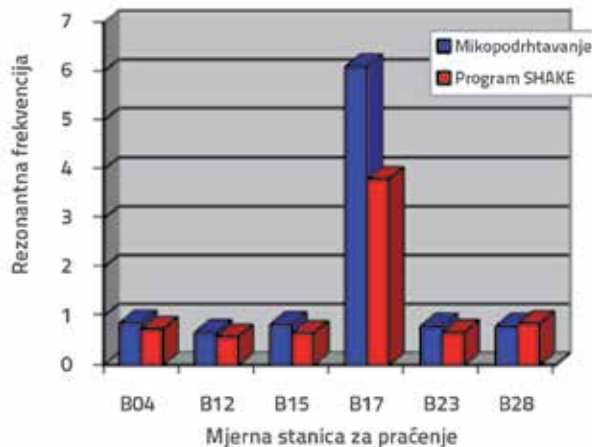
Oznaka bušotine	Dubina [m]	V_s [m/s]	
		Ispitivanja niz bušotinu	Ishihara & Ansal, [34]
BH06	3	169,8	<200
	7	200,8	200-300
	11,6	208,6	200-300
	14,7	212,7	200-300
	29,3	345,5	300-500

Tablica 5. prikazuje rezonantne frekvencije koje su dobivene proračunom pomoću programa *SHAKE*, a na slici 10. te su frekvencije uspoređene s osnovnom frekvencijom mikropodrtavanja. Faktor amplifikacije koji je dobiven proračunom prikazan je u tablici 4., a na slici 11. uspoređen je s faktorom amplifikacije mikropodrtavanja.

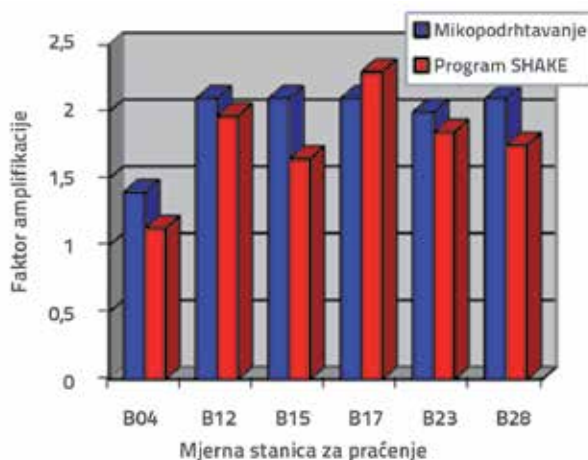
Slike 10. i 11. dokazuju da se rezonantne frekvencije dobivene uporabom dviju metoda ne razlikuju odviše, iako je pojačanje dobiveno na temelju omjera H/V u pravilu više od onoga dobivenog numeričkim modeliranjem. Usporedbom rezonantnih frekvencija zaključujemo da su rezultati vrlo pouzdani za tri stanice, pouzdani za dvije i nepouzđani za jednu stanicu. Stanica B17 odudara od ostalih možda zbog toga što geotehnički sastav te bušotine upućuje na bitne promjene nagiba potpovršinskih slojeva tla. U ovom je slučaju nužna trodimenzionalna analiza.

Općom procjenom zaključuje se da je u svim stanicama, osim stanice 28, frekvencija dobivena praćenjem mikropodrtavanja nešto viša od one iz numeričke simulacije. Usporedba faktora amplifikacije dobivenih uz pomoć te dvije metode jasno pokazuje da je faktor amplifikacije dobiven promatranjem mikropodrtavanja viši od onoga iz numeričke simulacije, no rezultati u nekim stanicama ne odstupaju previše. Rezultati su u skladu s rezultatima ispitivanja Boura i sur. [17]. Može se zaključiti da nelinearni uvjeti obično smanjuju faktor

amplifikacije efektivnog ubrzanja tla te se dominantne frekvencije blago pomiču prema spektru niskih frekvencija. Pri malim ubrzanjima ($PGA < 0,3g$) određivanje osnovne frekvencije uz pretpostavku linearnosti ili nelinearnosti ne razlikuju se pretjerano.



Slika 10. Usporedba najviših frekvencija proučavanog područja

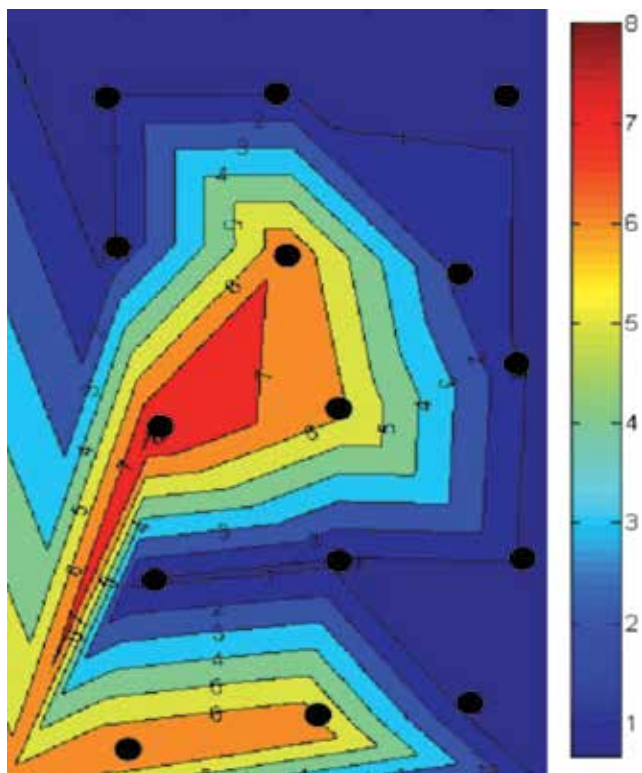


Slika 11. Usporedba faktora amplifikacije proučavanog područja

8. Karte rezonantne frekvencije i faktora amplifikacije

Svaka postavljena stanica omogućuje da se procijeni rezonantna frekvencija i pojačanje. Kako bi se prikazala prostorna razdioba rezonantnih frekvencija u bazenu Babola, izvršena je interpolacija između stanica za praćenje mikropodrtavanja. Slika 12. prikazuje rezonantne frekvencije u bazenu Babola u rasponu od 0,67 Hz do 8,10 Hz. Veći dio proučavanog područja ima nižu rezonantnu frekvenciju, u rasponu od 0,67 Hz do 0,92 Hz. U središtu su vrijednosti rezonantnih frekvencije veće. Povećanje frekvencija sa zapada prema središtu te smanjenje od središta prema istoku odraz je promjena aluvijalnih naslaga u tim smjerovima.

Slika 13. prikazuje faktor amplifikacije u bazenu Babola koji je u rasponu od 1,4 do 3,5. Veći dio područja ima nizak

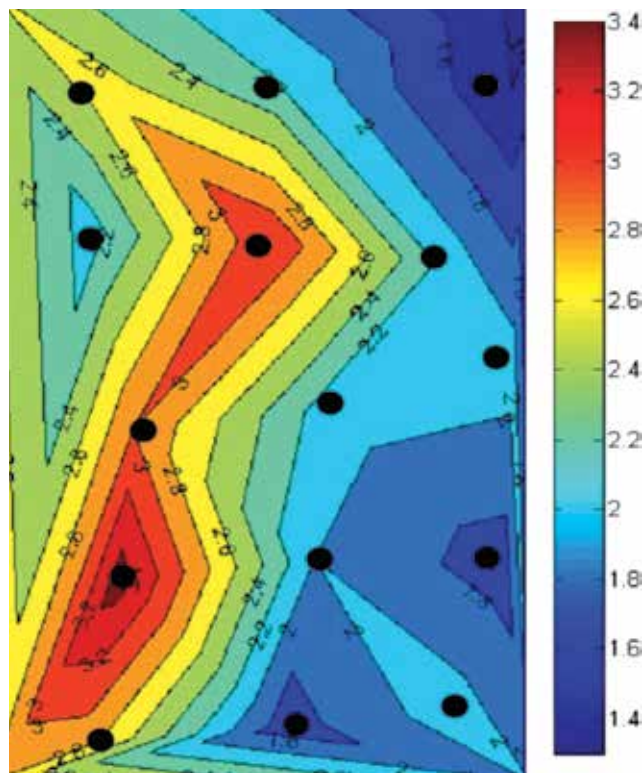


Slika 12. Karta najviše frekvencije

faktor amplifikacije, u rasponu od 1,4 do 2,2. Istočni dio ima niži faktor amplifikacije. Postoje određeni dijelovi na kojima je faktor amplifikacije veći (do 3,5), a nalaze se u središnjem, zapadnom i jugozapadnom dijelu proučavanog područja.

9. Zaključak

Babol je grad izgrađen na debelim mekim sedimentima, što bi moglo značajno pojačati podrhtavanje tla tijekom potresa. Uvjeti tla u gradu nisu analizirani, te je zbog toga važno provesti detaljna ispitivanja odziva tla oko Babola u svrhu procjene seizmičke opasnosti. U ovom su članku prikazani rezultati ispitivanja frekvencije tla i pojačanja u čvorovima na mreži od 700 m unutar područja oko Babola površine 3,5 km x 2,1 km. Prikupljeni podaci pokazuju da se osnovna frekvencija mijenja unutar malog prostora u Babolu. Niz mjerenja mikropodrhtavanja na ispitivanom području otkrila su frekvenciju tla u rasponu od 0,67 do 8,10 Hz. Središnji dio proučavanog područja ima visoke rezonantne frekvencije.



Slika 13. Karta pojačanja najviše frekvencije

Rezonantne frekvencije se povećavaju od zapada prema središtu i smanjuju od središta prema istoku, što je odraz promjena aluvijalnih naslaga u tim smjerovima. Analizom podataka utvrđeno je da faktor amplifikacije u bazenu Babola varira u rasponu od 1,4 do 3,5. Veći dio bazena ima nizak faktor amplifikacije, od 1,4 to 2,2. Frekvencije tla procijenjene su i na temelju preliminarnog jednodimenzionalnog modeliranja tla u programu *SHAKE*. Najviša frekvencija tla dobivena na temelju modeliranja programom *SHAKE* bila je 3,8 Hz, dok su mjerenjem mikropodrhtavanja dobivene frekvencije od 6,10 Hz. U većini slučajeva rezultati dobiveni primjenom tih dviju metoda nisu mnogo odstupali, no u nekoliko slučajeva frekvencije *dobivene proračunom* i one dobivene mjerenjem mikropodrhtavanja bitno su se razlikovale. Razlog odstupanja može biti primjena jednodimenzionalne analize, a ne trodimenzionalne na prostoru gdje se u potpovršinskom sloju nalaze velike kosine. Konačno, na temelju rezultata i unatoč manjim razlikama u amplitudama, zaključuje se da je praćenje mikropodrhtavanja izuzetno korisna metoda pri procjeni odziva tla kad je riječ o osnovnoj frekvenciji.

LITERATURA

- [1] Kramer, S.: Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, 1996.
- [2] Fnais, M.S., Abdelrahman, K., Al-Amri, A.M.: Microtremor measurements in Yanbu city of Western Saudi Arabia: A tool for seismic microzonation. *Journal of King Saud University*, 22, 97-110, 2010.
- [3] Nakamura, Y.: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report of RTRI*, 30, 25-33, 1989.
- [4] Field, E. H., Jacob, K. H.: The Theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophysic Research Letters*, 20-24, 2925-2928, 1993.
- [5] Bard, P. Y.: Lecture Notes on Seismology, Seismic Hazard Assessment and Risk Mitigation. International Training Course, Potsdam, 160, 2000.
- [6] Lermo, J., Chavez-Garcia, F. J.: Site effect evaluation using spectral ratio with only one station. *Bulletin of Seismological Society of America*, 83, 1574-1594, 1993.
- [7] Borchardt, R. D., Gibbs, J. F.: Effects of local geological conditions in the San Francisco bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, 66, 467-500, 1976.
- [8] Purnachandra Rao, N., Ravi Kumar, M., Seshunarayana, T., Shukla, A.K., Suresh, G., Pandey, Y., Dharma Raju, R., Pimprikar, S. D., Chandra Das, Kalpna Gahalaut, Mishra, P. S., Harsh Gupta.: Site amplification studies towards seismic microzonation in Jabalpur urban area, central India. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1247-1258, 2011.
- [9] İlerisoy, Z.Y., Soyuluk, A.: Impact of Shallow Earthquakes on the Sehzade Mehmet Mosque, *GRADEVINAR* 64 (2012) 9, 735-740.
- [10] Kanai, K., Takana, T.: On microtremors. VIII. *Bulletin Earthquake Research institute*, 39, 97-114.
- [11] Kanai, K., Osada, K., Yoshizawa, S.: Observational study of earthquake motion in the depth of the ground. *Bulletin earthquake research Institute Tokyo*, 32, 361-370, 1954.
- [12] Akamatsu, J.: Seismic amplification by soil deposits inferred from vibrational characteristics of microseisms. *Bulletin Disaster prevent research institute Kyoto university*, 34, 105-127, 1984.
- [13] Kobayashi, H., Seo, K., Midorikawa, S.: Estimated strong ground motions in the Mexico city due to Michoacan, Mexico earthquake of September 19, 1985 Based on the Characteristics of microtremor. *The graduate school of Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology*, 34-68, 1986.
- [14] Morales, J., Ibanez, J., Vidal, F., De Miguel, F., Alguacil, G., Posadas, A.: Qc Site dependence in the Granada Basin (Southern Spain). *Bulletin Seismological Society Of America*, 80, 278-285, 1991.
- [15] Seo, K., Samano, T., Yamanaka, H., Hao, X., Koyama, S., Takeuchi, M., Fujioka, K., Kishino, Y., Kawano, K., Asano, K., Nakajima, N., Murai, M., Mualchin, L., Hisada, Y.: Microtremor measurements in the San Francisco bay area, 4th International Conference On Seismic Zonation, 3, 417-424, 1991 .
- [16] Dravinski, M., Yamanaka, H., Nakajima, Y., Kagami, H., Keshavamurthy, R., Masaki, K.: Observation of long period microtremors in San Francisco metropolitan area. 4th International Conference On Seismic Zonation, 3, 401-407, 1991.
- [17] Bour, M., Fouissac, D., Dominique, P., Martin, C.: On the use of microtremor recordings in seismic microzonation, soil dynamic and earthquake engineering, 17, 465-474, 1998.
- [18] Teves-Costa, P., Matias, L., Bard, P. Y.: Seismic behavior estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 15, 201-209, 1996.
- [19] Mukhopadhyay, S., Bormann, P.: Low cost seismic microzonation using microtremor data: an example from Delhi, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 271-280, 2004.
- [20] Yanger Walling, M., Mohanty, W.K., Nath, S.K., Mitra, S., John, A.: Microtremor survey in Talchir, India to ascertain its basin characteristics in terms of predominant frequency by Nakmaura's ratio technique, *Engineering Geology*, 106, 123-132, 2009.
- [21] Tuladhar, R.: Seismic Microzonation of the Greater Bangkok with Microtremor Observations, thesis for degree of Master of Engineering, Asian Institute of Technology, School of Civil Engineering, 2002.
- [22] Mucciarelli, M.: Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach. *Journal of Earthquake Engineering*, 2, 625-638, 1998.
- [23] SESAME: Site Effects using Ambient Excitations. <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>, 2003.
- [24] SESAME Project: Site Effects using Ambient excitations. <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>, 2004.
- [25] Castro, R. R., Anderson, J. G., Singh, S. K.: Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Gurrero, Mexico, subduction zone. *Bulletin of Seismological Society of America*, 80, 1481-1503, 1990.
- [26] Kanai, K.: Relation between the nature of surface layer and the amplitude of earthquake motions, *Bulletin Tokyo Earthquake Research Institute*, 1951.
- [27] Cooley, J.W., Tukey, J.W.: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math Computer*, 19, 297-301, 1965.
- [28] Idriss, I. M., Seed, H. B.: Seismic Response of Horizontal Soil Layers. *Journal of soil mechanics and foundations division*, 54, 83-118, 1968.
- [29] Seed, H. B., Idriss, I. M.: Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley, December, 1970.
- [30] Ordonez, G.L.: A computer program for 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems, University of California, Berkeley, 2011.
- [31] Parolai, S., Bormann, P., & Milkereit, C.: New relationships between Vs thickness of sediments, and resonance frequency calculated by H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 2521-2526, 2002.
- [32] Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P.Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., & Savvaidis, A.: Site effect and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece). Comparison of different approaches, *Bulletin of Seismological Society of America*, 86, 1692-1703, 1996.
- [33] Harutoonian, P., Chapman, B., Leo, C. J., Liyanapathirana, S.: Characterisation of an urban site by ambient noise HVSR method: resonance frequencies and site amplifications. *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 199, 1152-1161, 2010.
- [34] Ishihara, K., Ansal, A. M.: Dynamic behavior of soils, amplification and soil-structure interaction. Final report for working group D., UNDP/UNESCO project on earthquake reduction in the Balkan region, 1982.