Seizmičko pojačanje klizišta Kostanjek

Špoljar, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:086979

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Jurica Špoljar

SEIZMIČKO POJAČANJE KLIZIŠTA KOSTANJEK

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Jurica Špoljar

Diplomski rad

Seizmičko pojačanje klizišta Kostanjek

Voditelj diplomskog rada: mr. sc. Ivica Sović

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Zahvaljujem mr. sc. Ivici Soviću na svim konstruktivnim savjetima prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Snježani Mihalić Arbanas te dr. sc. Martinu Krkaču s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta što su mi ustupili podatke s opservatorija Kostanjek i omogućili izradu ovog rada. Zahvaljujem i Katarini Zailac te svojim roditeljima na bezuvjetnoj podršci.

Sažetak

Ovaj rad pruža uvid u seizmičko pojačanje na području klizišta Kostanjek. Dane su osnovne informacije o zapisima ubrzanja prikupljenih u bušotinama u sklopu opservatorija za nadziranje klizišta Kostanjek. Prikazana je usporedba dviju standardnih metoda procjene seizmičke amplifikacije (HVSR, standardni omjer spektara). Analizirana su četiri potresa te zapisi noćnog mikroseizmičkog nemira. Na temelju analize doneseni su zaključci o frekvencijama i faktorima stratigrafske amplifikacije.

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 Teorijska pozadina **3**

2.1 Amplifikacijski spektar 3

2.2 HVSR (*Horizontal-to-vertical spectral ratio*) 8

2.3 Spektralna analiza 9

2.3.1 Spektar periodičkih funkcija 9

2.3.2 Spektar neperiodičkih funkcija 12

3 Lokacija, podaci i mjerni postav **14**

3.1 Lokacija 14

3.2 Mjerni postav 15

3.3 Podaci 16

3.3.1 Problemi s podacima 17

4 Metode **19**

4.1 HVSR metoda (*Horizontal-to-vertical spectral ratio*) 19

4.2 Standardni omjer spektara (*Standard spectral ratio*, SSR) 20

5 Rezultati **21**

5.1 Analiza potresa 21

5.1.1 Potres na dan 31. siječnja 2015. 21

5.1.2 Potres na dan 15. rujna 2015. 27

5.1.3 Potres na dan 1. studenog 2015. 31

5.1.4 Potres na dan 9. travnja 2016. 36

5.2 Utjecaj slojeva između dva i dvadeset metara na vertikalnu komponentu gibanja 40

5.3 Utjecaj slojeva između dva i dvadeset metara na horizontalne komponente gibanja. 43

5.4 Analiza mikroseizmičkog nemira 45

6 Zaključak **47**

1 Uvod

Zasad prognoza točnog vremena, mjesta i jačine potresa koji će se dogoditi nije moguća. Seizmolozi mogu predvidjeti kakve bi efekte potres mogao imati na određenom mjestu. Jedna od važnijih informacija koja se može pružiti jest ona o amplifikacije gibanja tla zbog slojevitosti na lokaciji. Poznavanje amplifikacije te frekvencije na kojoj je ona izraženija može biti od presudne važnosti prilikom projektiranja građevina. Tada se mogu primijeniti sve nužne mjere kako bi se izbjegla katastrofa u slučaju potresa.

Vrlo se rano došlo do spoznaje kako se brzina i amplituda seizmičkog vala mijenjaju ovisno o sredstvu kroz koje on prolazi. Autori su se bavili problemom pobude u površinskim slojevima još 30-ih godina 20. stoljeća (Sezawa, 1930.).

Godine 1969. Tsai daje teoretski opis utjecaja lokalne geologije (stratigrafije podzemlja) na površinska gibanja, a godinu dana kasnije Borcherdt (1970.) uvodi metodu standardnog omjera spektara te na taj način na temelju zapisa potresa i eksplozija dolazi do informacije o frekvenciji i faktoru amplifikacije na području San Francisca. Ova metoda zahtijeva referentnu postaju koja mora biti izolirana od utjecaja lokalne geologije. To znači da mora biti na osnovnoj stijeni te imati dobar omjer signala i šuma. Takav uvjet teško je zadovoljiti, naročito u gusto naseljenom području.

Navedeni problem riješio je Nakamura 1989. godine kad je razvio HVSR (eng. *horizontal-to-vertical spectral ratio*) metodu za određivanje amplifikacije samo na temelju analize mikroseizmičkog nemira, bez referentne postaje. HVSR metoda pokreće revoluciju u analizi efekata amplifikacije te se ubrzo počinje primjenjivati u različitim situacijama. Najveća prednost ove metode je efikasna procjena frekvencije na kojoj će se pojaviti efekti seizmičkog pojačanja neovisno o ulaznim parametrima. Metoda je gotovo nezavisna o izvoru pobude te daje rezultate i za potrese i za mikroseizmički nemir.

Cilj ovog rada jest izračunati efekte amplifikacije koristeći zapise instrumenata postavljenih u bušotinama na klizištu Kostanjek. Instrumenti se nalaze u bušotinama na tri različite dubine, od čega je jedan na razini osnovne stijene te je korišten kao referentni instrument u metodi standardnog spektralnog omjera. Osim ove metode računata je amplifikacija i HVSR metodom te su uspoređivani rezultati.

Rad je podijeljen u šest poglavlja. Drugo poglavlje pruža teorijski uvod u fizikalne procese koji dovode do pojave stratigrafske amplifikacije te matematičke metode korištene za dobivanje rezultata u ovom radu.

Treće poglavlje opisuje lokaciju klizišta Kostanjek. Pruža kratak uvid u razloge osnivanja opservatorija za kontinuirana promatranja klizišta. Opisani su mjerni instrumenti postavljeni u sklopu opservatorija i podaci korišteni u ovom radu.

U četvrtom poglavlju su objašnjene metode standardnog omjera spektara i HVSR metoda. Opisan je odabir referentnog instrumenta te način analize mikroseizmičkog nemira.

U petom poglavlju prikazani su rezultati analize zapisa potresa te mikroseizmičkog nemira. Uspoređeni su rezultati različitih metoda za određivanje amplifikacije. Dodatno je naglašen efekt amplifikacije uzrokovan slojevima neposredno ispod površine (do 20 metara dubine).

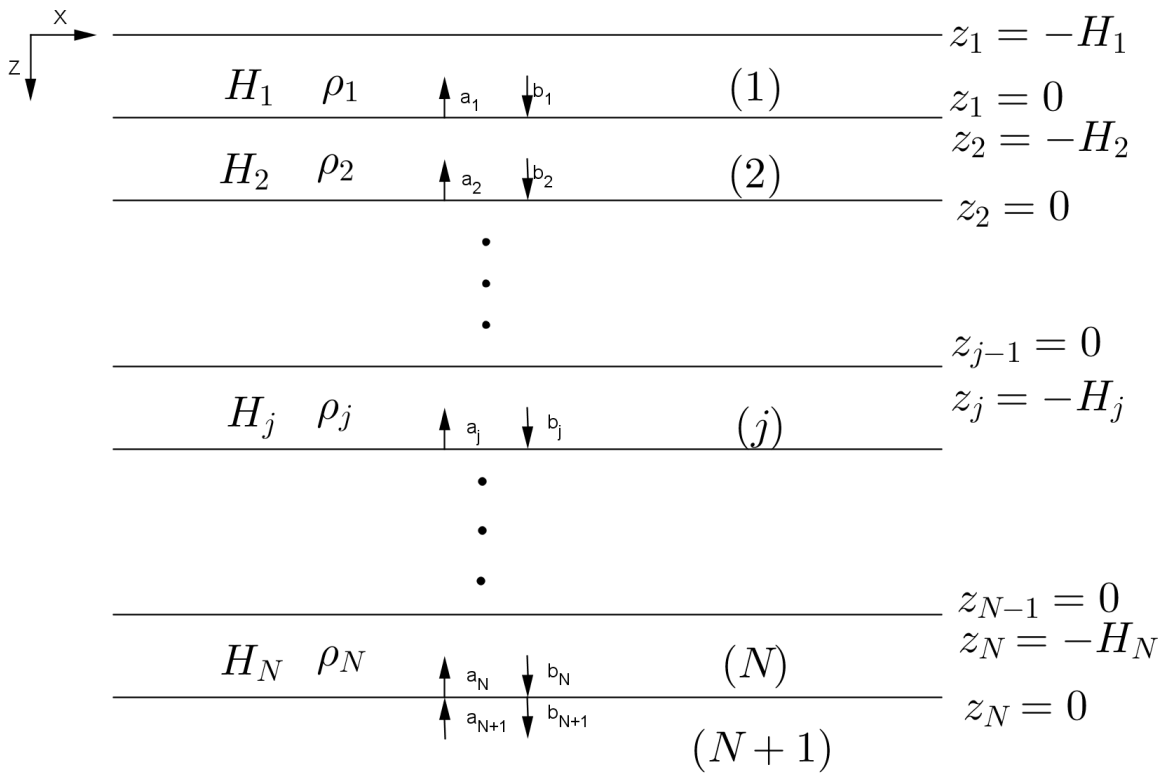
U posljednjem, šestom poglavlju, izneseni su zaključci doneseni na temelju dobivenih rezultata.

2 Teorijska pozadina

2.1 Amplifikacijski spektar

Poznato je da kod slabije zbijenih materijala u površinskim slojevima dolazi do seizmičkog pojačanja (stratigrafske amplifikacije) gibanja. Ta pojava rezultat je konstruktivne interferencije uzrokovane geometrijom slojeva, ali i promjenom fizikalnih svojstava slojeva. Tako val koji prelazi iz gušćeg (bržeg) u rastresitije (sporije) sredstvo, povećava elastičnu potencijalnu energiju nauštrb kinetičke energije. Rezultat toga je smanjena brzina propagacije vala, ali veća amplituda titraja.

Teorijsko objašnjenje stratigrafske amplifikacije objavio je Tsai 1969. godine. Klizište Kostanjek se može prikazati kao niz slojeva manje brzine iznad poluprostora (Vrsaljko i sur., 2011.). Neka takvo sredstvo ima N slojeva iznad poluprostora. Granice slojeva su horizontalne, a svaki sloj je definiran gustoćom ρ_i, brzinom rasprostiranja valova c_i i debljinom H_i. Na slici 1 prikazan je model stratificiranog sredstva iznad poluprostora.



Slika 1: Model slojevitog sredstva iznad poluprostora.

Promatra se upad SH-vala odozdo iz poluprostora. U svakom sloju definirane su

amplitude upadnog (a_i) i reflektiranog (b_i) vala. Upadni val definiran je kao:

$$v\Big(t+\frac{z_{N+1}}{c_{N+1}}\Big)=a_{N+1}e^{i\omega\left(t+\frac{z_N}{c_N}\right)}, \tag{1}$$

gdje je c_{N+1} brzina u poluprostoru, z_{N+1} dubina poluprostora, a_{N+1} amplituda vala u poluprostoru te ω kružna frekvencija upadnog vala. Val je u j-tom sloju dan superpozicijom dvaju valova: vala koji nailazi iz poluprostora (u $-z$ smjeru) i vala reflektiranog od slobodne površine (u $+z$ smjeru). Valna jednadžba za val u j-tom sloju glasi:

$$\frac{\partial^2 v_j(z_j,t)}{\partial t^2}=c_j^2(\omega)\frac{\partial^2 v_j(z_j,t)}{\partial z_j^2}, \tag{2}$$

te je rješenje za pomak dano sa:

$$v_j(z_j,t)=a_j e^{i(\omega t+z_j k_j)}+b_j e^{i(\omega t-z_j k_j)}, \tag{3}$$

pri čemu je $k_j=\omega/c_j$ valni broj. Kako bi se došlo do amplitude vala, potrebno je iskoristiti rubne uvjete. Rubni uvjet za napetost na slobodnoj površini ($z_1=-H_1$) daje:

$$\begin{aligned} p_{zy,1}\Big|_{z_1=H_1}&=0,\\ \mu_1\frac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}z_1}&=0, \end{aligned} \tag{4}$$

gdje je $p_{zy,1}$ napetost na površini, a μ_1 pripadni koeficijent smicanja. Tada je uz notaciju $s_j=k_jH_j$ za $j=1,...,N$

$$b_1=a_1e^{-2is_1}. \tag{5}$$

Na granicama između slojeva svi pomaci su nužno kontinuirani:

$$\begin{aligned} v_j&=v_{j+1},\\ a_je^{i(\omega t+k_jz_j)}+b_je^{i(\omega t-k_jz_j)}&=a_{j+1}e^{i(\omega t+k_{j+1}z_{j+1})}+b_{j+1}e^{i(\omega t-k_{j+1}z_{j+1})}. \end{aligned} \tag{6}$$

Za granicu između slojeva j i $j+1$ vrijedi $z_j=0$ i $z_{j+1}=-H_{j+1}$ te se dobije:

$$a_j+b_j=a_{j+1}e^{-is_{j+1}}+b_{j+1}e^{is_{j+1}}. \tag{7}$$

Kontinuiranost vrijedi za pomake, ali i za napetosti :

$$\begin{aligned} p_{zy,j-1}\Big|_{z_{j-1}=0}&=p_{zy,j}\Big|_{z_j=-H_j}\\ \mu_{j-i}\Big[k_{j-i}a_{j-i}e^{i(\omega t+s_{j-i})}-k_{j-i}b_{j-1}e^{i(\omega t-s_{j-1})}\Big]&=\mu_j\Big[k_ja_je^{i(\omega t+s_j)}-k_jb_je^{i(\omega t-s_j)}\Big]. \end{aligned} \tag{8}$$

Uz definicije za valni broj $k_j = \omega/c_j$ i modul smicanja $\mu_j = \rho_j c_j^2$ slijedi:

$$\frac{\rho_{j-1}c_{j-1}}{\rho_j c_j}(a_{j-1} - b_{j-1}) = a_j e^{-is_j} - b_j e^{is_j}. \tag{9}$$

Prvi član u jednadžbi (9) je po definiciji relativna seizmička impedancija:

$$\alpha_{j-1}(a_{j-1} - b_{j-1}) = a_j e^{-is_j} - b_j e^{is_j}. \tag{10}$$

Oduzimanjem izraza (7) i (10) i njihovim zbrajanjem te zapisivanjem u matričnom obiku dolazi se do izraza:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} =& \frac{1}{2}\begin{bmatrix} (1+\alpha_{j-1})e^{is_j} & (1-\alpha_{j-1})e^{is_j} \\ (1-\alpha_{j-1})e^{is_j} & (1+\alpha_{j-1})e^{is_j} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix} \\ =& \frac{1}{2}\begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1+\alpha_{j-1} & 1-\alpha_{j-1} \\ 1-\alpha_{j-1} & 1+\alpha_{j-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix}.\end{aligned} \tag{11}$$

Ovdje se može iskoristi pokrata u obliku:

$$\begin{aligned} S_j &= \begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix}, \\ T_{j-1} &= \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1+\alpha_{j-1} & 1-\alpha_{j-1} \\ 1-\alpha_{j-1} & 1+\alpha_{j-1} \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{12}$$

te se dobiva konačna relacija koja povezuje j-ti i $(j-1)$-vi sloj:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = S_j T_{j-1}\begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Primjenom rubnih uvjeta na vrhu poluprostora ($z_N = 0$) dobije se

$$\begin{aligned} a_N + b_N &= a_{N+1} + b_{N+1}, \\ \alpha_N(a_N - b_N) &= a_{N+1} - b_{N+1}, \\ \begin{bmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} &= T_N \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{14}$$

Relacija (13) je rekurzivna pa se njenom iteracijom može doći do izraza koji povezuje j-ti

sloj s površinskim slojem:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = S_j T_{j-1} S_{j-1} T_{j-2} ... S_2 T_1 \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Ako se iskoriste relacije za amplitude upadnog i reflektiranog vala (a_1, b_1), matrica iz prethodne jednadžbe može se zapisati kao:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} S_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} S_j T_{j-1} S_{j-1} T_{j-2} ... S_2 T_1 S_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Napiše li se umnožak parova $T_j S_j$ kao:

$$\Big[\prod_{k=1}^{j-1} T_k S_k\Big] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_j + iY_j \\ X'_j + iY'_j \end{bmatrix}, \tag{18}$$

pri čemu članovi označeni crticom odgovaraju reflektiranom valu, izraz (17) prelazi u:

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} S_j \begin{bmatrix} X_j + iY_j \\ X'_j + iY'_j \end{bmatrix}. \tag{19}$$

Iskoriste li se rubni uvjeti na ovoj jednadžbi dobiva se konačan oblik:

$$\begin{bmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} = T_N \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix} = T_N a_1 e^{-is_1} S_N \begin{bmatrix} X_N + iY_N \\ X'_N + iY'_N \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} \begin{bmatrix} X_{N+1} + iY_{N+1} \\ X'_{N+1} + iY'_{N+1} \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Jednadžba (20) daje izravnu vezu amplituda valova u prvom sloju i poluprostoru. Iz ovog se može izraziti amplituda upadnog vala na površini sredstva samo preko amplitude upadnog vala u poluprostoru:

$$a_1 = \frac{e^{is_1}}{X_{N+1} + iY_{N+1}} a_{N+1}. \tag{21}$$

Kako bi se definirao amplifikacijski spektar potrebno je odrediti pomake na površini u slučaju kad postoji stratifikacija i u slučaju kada se ispod slobodne površine nalazi poluprostor.

Ako se iskoristi (3) uz $z_1 = -H_1$ u kombinaciji s (21) te ako se za kompleksni broj

koristi formulacija (Bronštejn i sur., 2004.)

$$\begin{aligned} a+ib &= re^{i\varphi}, \\ r &= \sqrt{a^2+b^2}, \\ \varphi &= \arctan\left(\frac{b}{a}\right), \end{aligned} \tag{22}$$

dobiva se pomak na slobodnoj površini iznad stratificiranog sredstva uzrokovan trajnom harmonijskom pobudom:

$$v_1 = \frac{2a_{N+1}}{\sqrt{X_{N+1}^2+Y_{N+1}^2}} e^{i\left(\omega t - \arctan\left(\frac{Y_{N+1}}{X_{N+1}}\right)\right)}. \tag{23}$$

Kako se amplituda vala u poluprostoru ispod slojevitog sredstva obično ne zna, može se zamisliti da je poluprostor odmah ispod slobodne površine. Tada je pomak slobodne površine identičan pomaku u poluprostoru. Da bi se konstruirala takva situacija, prvi sloj mora biti beskonačno tanak i gustoće $\rho = 0$. Tada se iz (18) uz $s_1 = 0$ i α_1, dobiva $X_2 = X_2' = 1$ i $Y_2 = Y_2' = 0$. Prema tome je pomak na površini, oblika :

$$v_1 = 2a_2 e^{i(\omega t - \arctan\left(\frac{Y_2}{X_2}\right))} = 2a_2 e^{i\omega t}. \tag{24}$$

Slobodna se površina iznad poluprostora giba dvostruko većom amplitudom od amplitude vala u poluprostoru. Ovakav rezultat posljedica je konstruktivne interferencije između upadnog i reflektiranog vala. Ovi izrazi omogućuju definiranje amplifikacijskog spektra AMP koji govori o tome koliko će puta biti veća amplituda na površini od one u poluprostoru:

$$AMP(\omega) = \frac{1}{\sqrt{X_{N+1}^2+Y_{N+1}^2}}. \tag{25}$$

Iz izraza (20) te izraza (25) vidljivo je da je za račun amplifikacijskog spektra potrebno poznavanje parametara poluprostora, ali i slojeva iznad njega. Treba poznavati brzinu, gustoću i debljinu svakog sloja barem do razine osnovne stijene koja najčešće dobro aproksimira poluprostor. Ti su podaci rijetko dostupni, pa su za račun amplifikacije (ili određivanja amplifikacijskog spektra) predložene drugačije metode.

2.2 HVSR (*Horizontal-to-vertical spectral ratio*)

Najčešće korištena metoda je HVSR (eng. *Horizontal-to-vertical spectral ratio*) metoda. Metodu je predložio Nakamura (1989.) te se široko koristi u seizmologiji za određivanje rezonantnih frekvencija. Metoda se zasniva na činjenici da se usporedbom spektara horizontalne i vertikalne komponente gibanja može odrediti frekvencija na kojoj dolazi do amplifikacije. Tako se, prema Nakamuri, može iz amplitudnih spektara na površini i u poluprostoru (osnovnoj stijeni) odrediti efekti izvora A_S

$$A_S = \frac{V_S}{V_B}, \tag{26}$$

gdje je V_S spektar vertikalne komponente na površini, a V_B spektar vertikalne komponente na razini osnovne stijene.

Lokalni efekti, S_E, mogu se definirati kao omjer spektara horizontalnih komponenata na površini i poluprostoru

$$S_E = \frac{H_S}{H_B}, \tag{27}$$

pri čemu je H_S spektar horizontalne komponente na površini, a H_B spektar horizontalne komponente na razini osnovne stijene.

Da bi se efekti izvora uklonili iz lokalnih efekata definira se S_M kao omjer lokalnih efekata i efekata izvora

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{H_S}{V_S} = HVSR, \tag{28}$$

pri čemu se koristi eksperimentalna činjenica da je gibanje u vertikalnom i horizontalnom smjeru na razini osnovne stijene u prosjeku jednako.

Veza između HVSR-a i AMP-a dolazi iz promatranja amplifikacijskih spektara S (AMP_S) i P (AMP_P) valova (Herak, 2008.). Ako je riječ o vertikalnom upadu vala na granicu slojeva, AMP_S predstavlja horizontalnu amplifikaciju, a AMP_P vertikalnu te se iz njih može izračunati HVSR:

$$HVSR = \frac{AMP_S}{AMP_P}. \tag{29}$$

Da bi ovakva formulacija bila zadovoljena, ponovno se pretpostavlja da je na razini poluprostora gibanje u horizontalnom smjeru u prosjeku jednako onome u vertikalnom. Kada su slojevi ispod površine takvi da je brzina P-valova znatno veća od brzine S-valova, AMP_P je približno jedan na svim frekvencijama. Tada se amplifikacijski spektar AMP_S može izjednačiti s dobivenim HVSR-om.

2.3 Spektralna analiza

2.3.1 Spektar periodičkih funkcija

Svaka periodička funkcija može se zapisati zbrojem trigonometrijskih funkcija (Buttkus, 2000.). Neka je $x(t)$ periodička funkcija vremena s periodom T, tada je možemo zapisati kao :

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi f_1 n t). \tag{30}$$

Koeficijenti a_n i b_n su Fourierovi koeficijenti dok se ovakav zapis $x(t)$ naziva Fourierov red, pri čemu je

$$f_1 = \frac{1}{T}$$

osnovna frekvencija funkcije $x(t)$.
Do koeficijenata a_n i b_n dolazimo tako da izraz (30) izračunamo za neki n:

$$x_n(t) = \frac{a_0}{2} + a_n \cos(2\pi f_1 n t) + b_n \sin(2\pi f_1 n t). \tag{31}$$

Da bismo odredili koeficijent a_n, izraz (31) se pomnoži s $\cos(2\pi f_1 m t)$ te integrira po periodu:

$$\begin{aligned} \int_0^T x(t)\cos(2\pi f_1 m t)dt = &\int_0^T \frac{a_0}{2}\cos(2\pi f_1 m t)dt + \\ &+ \int_0^T a_n \cos(2\pi f_1 n t)\cos(2\pi f_1 m t)dt \\ &+ \int_0^T b_n \cos(2\pi f_1 m t)\sin(2\pi f_1 n t)dt. \end{aligned} \tag{32}$$

Prvi član s desne strane je jednak nuli zbog periodičnosti funkcije kosinus, dok je zadnji član jednak nuli zbog međuodnosa kosinusa i sinusa. Za jedini preostali član s desne strane vrijedi :

$$\int_0^T a_n \cos(2\pi f_1 n t)\cos(2\pi f_1 m t)dt = a_n \frac{T}{2}\delta_{n,m}, \tag{33}$$

pri čemu je $\delta_{n,m}$ Kronecker delta i vrijedi:

$$\delta_{n,m} = \begin{cases} 1 & \text{za } n = m \\ 0 & \text{za } n \neq m. \end{cases}$$

S obzirom da je $\delta \neq 0$ za $m = n$ možemo umjesto indeksa m pisati n te dobivamo:

$$\begin{aligned} \int_0^T x(t)\cos(2\pi f_1 nt) &= \frac{1}{2}a_n T \\ a_n &= \frac{2}{T}\int_0^T \cos(2\pi f_1 nt)dt \qquad n = 0,1,2.. \end{aligned} \tag{34}$$

Analogno vrijedi i za b_n :

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T \sin(2\pi f_1 nt)dt \qquad n = 1,2... \tag{35}$$

Iz jednadžbe (34) vidimo da je

$$\frac{a_o}{2} = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)dt,$$

odnosno srednja vrijednost funkcije $x(t)$ na jednom periodu.

Fourierov red može se zapisati i u kompleksnoj reprezentaciji tako da se iskoriste izrazi:

$$\begin{aligned} \cos(2\pi f_1 nt) &= \frac{1}{2}\left(e^{2i\pi f_1 nt} + e^{-2i\pi f_1 nt}\right), \\ \sin(2\pi f_1 nt) &= \frac{1}{2i}\left(e^{2i\pi f_1 nt} + e^{-2i\pi f_1 nt}\right), \end{aligned} \tag{36}$$

pa izraz (30) prelazi u

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n + ib_n)e^{2\pi i f_1 nt} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n + ib_n)e^{-2i\pi f_1 nt}. \tag{37}$$

Uvedu li se negativni indeksi, vrijedi:

$$\begin{aligned} a_{-n} &= a_n, \\ b_{-n} &= -b_n. \end{aligned} \tag{38}$$

Zbog parnosti funkcije kosinus, odnosno neparnosti funkcije sinus, dobije se kompleksan zapis Fourierovog reda

$$x(t) = \frac{1}{2}\sum_{-\infty}^{\infty}(a_n - ib_n)e^{2\pi i n f_1 t}. \tag{39}$$

Neka je:

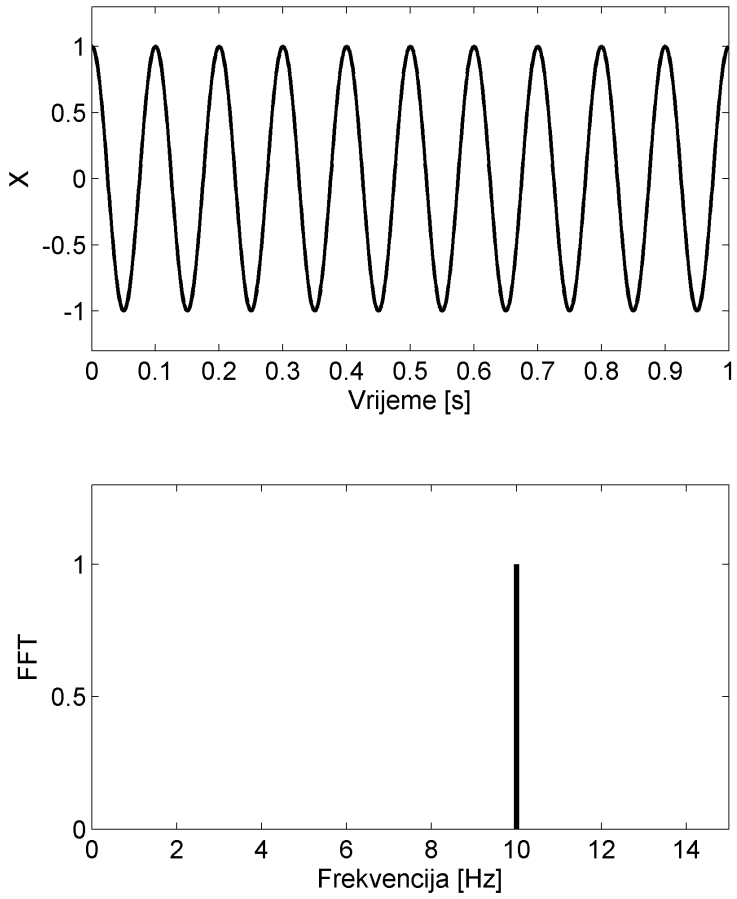
$$X_n = \frac{1}{2}(a_n - ib_n). \tag{40}$$

Ako se u gornji izraz uvrste Fourierovi koeficijenti iz (34) i (35) dobije se

$$X_n = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)e^{-2\pi i f_1 nt}\,\mathrm{d}t\,, \qquad n = 0,\pm 1,\pm 2,\pm 3... \tag{41}$$

U ovakvoj reprezentaciji X_n predstavlja diskretni spektar funkcije $x(t)$. S obzirom da je

n cijeli broj, spektralne linije nalazit će se na višekratnicima frekvencije f_1. Određivanje diskretnog spektra moguće je samo za periodičke funkcije. Na slici 2 prikazan je kosinusni signal frekvencije $f = 10\,\mathrm{Hz}$ te spektar takvog signala. Spektar ovakvog signala je diskretna spektralna linija na frekvenciji signala.



Slika 2: Kosinusni signal i njegov spektar.

2.3.2 Spektar neperiodičkih funkcija

Određivanje diskretnog spektra neperiodičke funkcije nije moguć. Za takve funkcije računa se kontinuirani spektar na intervalu na kojem za funkciju $x(t)$ postoji:

$$\lim_{d\to\infty}\int_{-d}^{d}|x(t)|dt, \qquad x(t)\in[-d,d], \tag{42}$$

pri čemu je $2d = 1/f_1$. Tada se za neki t_0 može pisati :

$$x(t_0) = \frac{1}{2d}\int_{-d}^{d} x(t)\,\mathrm{d}t + \sum_{n=1}^{\infty}\int_{-d}^{d} x(t)cos[2\pi n f_1(t_0-t)]\,\mathrm{d}t\,. \tag{43}$$

Zbog (42) vrijedi:

$$\lim_{d\to\infty}\left(\frac{1}{2d}\int_{-d}^{d} x(t)dt\right) = 0, \tag{44}$$

te prvi član iz (43) iščezava. Označi li se $nf_1 = f$, te se suma po n pretvori u integral po $\mathrm{d}f$ i iskoriste adicijske formule za kosinus, dobije se:

$$x(t) = \int_0^{\infty}[a(f)\cos(2\pi f t_0) + b(f)\sin(2\pi f t_0)]\,\mathrm{d}f\,, \tag{45}$$

gdje su:

$$\begin{aligned} a(f) &= 2\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\cos(2\pi f t)\,\mathrm{d}t\,,\\ b(f) &= 2\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\sin(2\pi f t)\,\mathrm{d}t\,. \end{aligned} \tag{46}$$

Zapis koji je dobiven naziva se Fourierov integral. Kao i Fourierov red i integral ima kompleksni oblik.

Neka je $C(f)$:

$$C(f) = \frac{1}{2}[a(f) - ib(f)], \tag{47}$$

tada se može zapisati:

$$\begin{aligned} C(f) &= X(f)e^{-i\Theta(f)},\\ X(f) &= \sqrt{a^2(f)+b^2(f)},\\ \Theta(f) &= \arctan\left(\frac{b(f)}{a(f)}\right). \end{aligned} \tag{48}$$

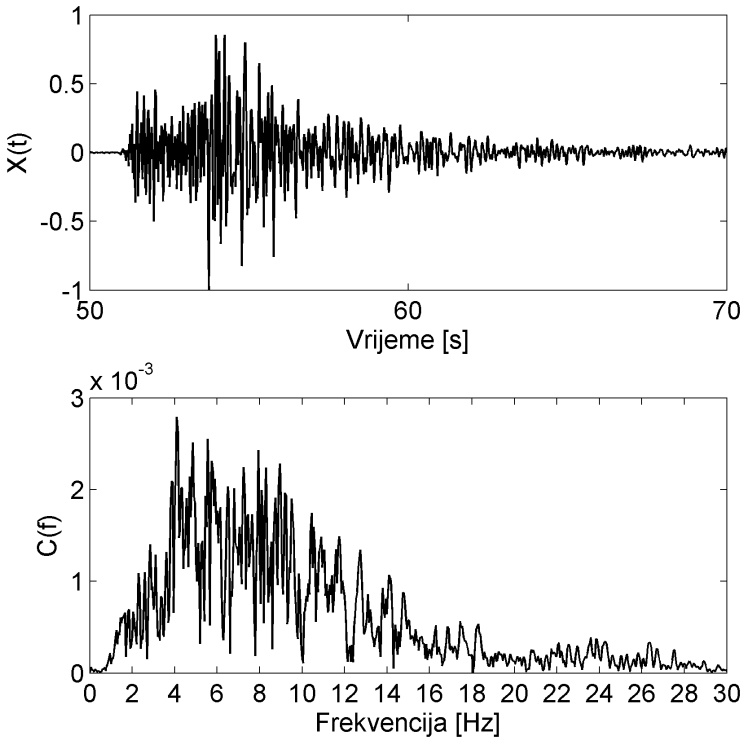
Koristeći definicije koeficijenata $a(f)$ i $b(f)$ iz (46) može se izračunati $C(f)$:

$$C(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi i f t}\,\mathrm{d}t\,. \tag{49}$$

$C(f)$ naziva se Fourierov transform, a koristi se za određivanje spektara neperiodičnih funkcija.

Za seizmogram se može računati samo kontinuirani spektar, odnosno Fourierov transform. Na slici prikazan je signal potresa na dan 31. siječnja 2015. te njegov spektar.

Za razliku od diskretnog spektra kod kojeg postoje spektralne linije, kod neperiodičkih signala javljaju se sve frekvencije te se linije šire u kontinuiranu funkciju. Frekvencija na kojoj spektar ima najveći iznos odgovara frekvenciji titraja u signalu koji ima najveću amplitudu.



Slika 3: Seizmogram i spektar seizmograma za potres od 31. siječnja 2015. godine.

3 Lokacija, podaci i mjerni postav

3.1 Lokacija

Klizište Kostanjek reaktivirano je klizište na području zapadnog dijela grada Zagreba. Do aktiviranja klizišta došlo je zbog gubitka stabilnosti na nekoliko blažih i strmijih padina iznad površinskog rudnika lapora.

Sredinom 60-ih godina 20. stoljeća povećava se potreba za cementom te se proširuje rudnik lapora iznad tvornice cementa u Podsusedu. Za potrebe rudnika korišten je eksploziv što je potaknulo klizanje. Najranija površinska istraživanja klizišta započeta su 1966. godine. Budući da nisu dala dobre rezultate, s vremenom započinju sve opsežnija istraživanja.

Aktivno klizište obuhvaća površinu od oko $1\,\mathrm{km}^2$. Zbog opasnosti od uništavanja stambenih objekata ukazala se potreba za preciznijim i opsežnijim kontinuiranim nadziranjem klizišta.

Godine 2013. pokrenut je projekt u sklopu hrvatsko - japanske suradnje vezane uz nadgledanje klizišta (Mihalić Arbanas i sur., 2013.). U okviru projekta su djelatnici Rudarsko-naftno-geološkog fakulteta postavili opservatorij na klizištu Kostanjek.

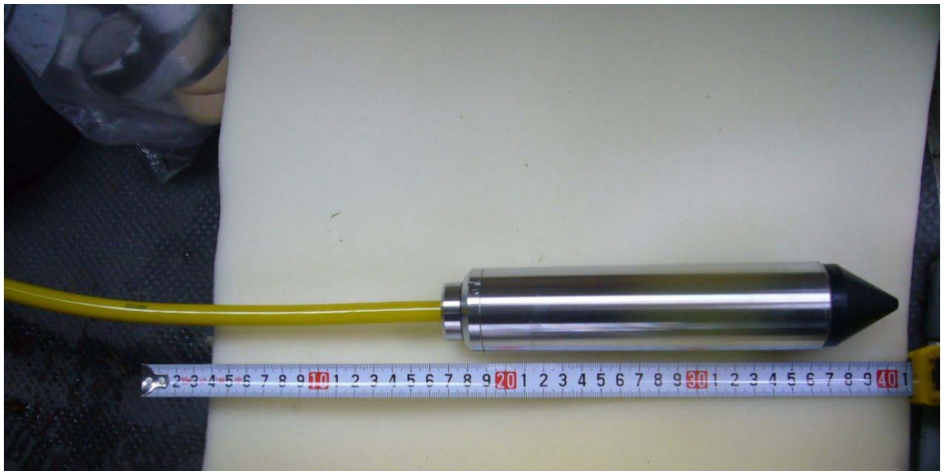


Slika 4: Lokacija klizišta Kostanjek, površina aktivnog klizišta te lokacija opservatorija za praćenje klizišta.

3.2 Mjerni postav

U sklopu opservatorija postavljena su tri tipa instrumenata: senzori za mjerenje pomaka tla, instrumenti za hidrogeološka mjerenja te akcelerometri. U ovom radu korišteni su podaci prikupljeni trima akcelerometrima smještenima u središnjem dijelu klizišta. Akcelerometri se nalaze u tri bušotine na dubinama od 2 m, 20 m i 90 m.

Korišteni su *ColibrysSF1500S*, trokomponentni akcelerometri prilagođeni za rad u bušotini, te je vršeno kontinuirano mjerenje.



Slika 5: Instrument spreman za spuštanje u bušotinu.[1]

[1] Preuzeto iz prezentacije Matsunami i Ikawa (2011.).

3.3 Podaci

Podaci akcelerometara prikupljeni su u digitalnom obliku u *SEGY* formatu. Frekvencija uzorkovanja je 125 Hz, a bilježe se tri komponente (dvije horizontalne i jedna vertikalna). Podaci se bilježe u minutne datoteke. Za analizu su odabrana četiri potresa čiji su parametri dani u tablici 1. Epicentralne udaljenosti su navedene u odnosu na opservatorij. Podaci o potresima su preuzeti iz Hrvatskog kataloga potresa (Arhiv Geofizičkog odsjeka, PMF).

Tablica 1: Parametri potresa korištenih u analizi.

Datum	Vrijeme (UTC)	Geografska širina (°)	Geografska dužina (°)	Epicentralna udaljenost (km)	Lokalna magnituda (M_L)	Dubina hipocentra (km)
31. 1. 2015.	21:22	45,893 N	15,997 E	13,6	2,8	12,9
15. 9. 2015.	18:41	45,831 N	16,014 E	12,2	2,6	9,9
1. 11. 2015.	07:52	45,868 N	15,531 E	25,8	4,2	10,1
9. 4. 2016.	13:02	45,929 N	15,603 E	20,7	3,6	9,6

Slika 6 prikazuje lokacije epicentara potresa korištenih za analizu u odnosu na opservatorij.



Slika 6: Lokacije epicentara u odnosu na opservatorij.

3.3.1 Problemi s podacima

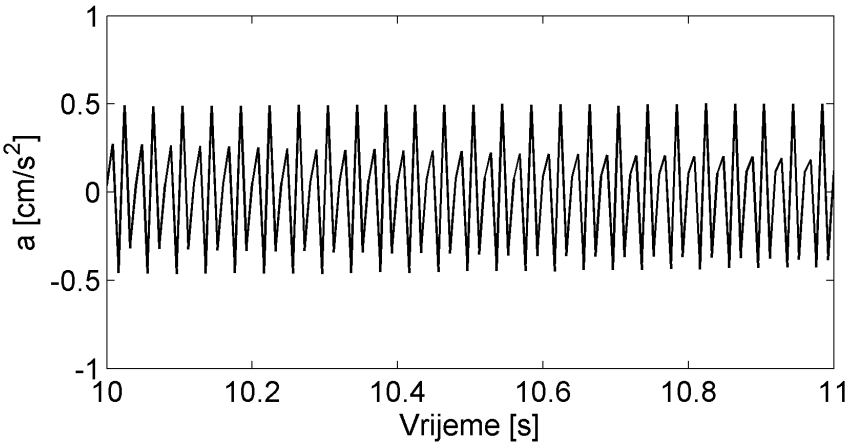
Prilikom analize zapisa pojavilo se nekoliko tehničkih problema. Prvi problem je nedostatak oznaka u zaglavlju datoteka koje bi pružile informaciju o kojoj se komponenti zapisa radi. Navedeni problem riješen je usporedbom akcelerograma koje izdvaja računalo za prikupljanje podataka i podataka korištenih za analizu. Usporedbom amplituda, određen je redoslijed kojim se zapisuju podaci. S obzirom da nisam imao potpunu kontrolu nad instrumentima, nema podatka o orijentaciji horizontalnih osi, te one nisu vezane uz geografsko usmjerenje već su im pridjeljene oznake x i y.

Drugi problem koji je prisutan je smetnja frekvencije 50 Hz na zapisima s dubine 90 m. Uzrok tomu je vjerojatno transformacijsko postrojenje koje se nalazi stotinjak metara zračne udaljenosti od opservatorija. Na slici 7 prikazano je postrojenje koje bi moglo biti uzrok spomenutog šuma. Slika 8 prikazuje kako izgleda zapis uz šum na 90 metara, dok slika 9 prikazuje isti vremenski period za instrument na dva metra dubine. Valja obratiti pozornost na amplitudu koja je znatno veća na slici 8.

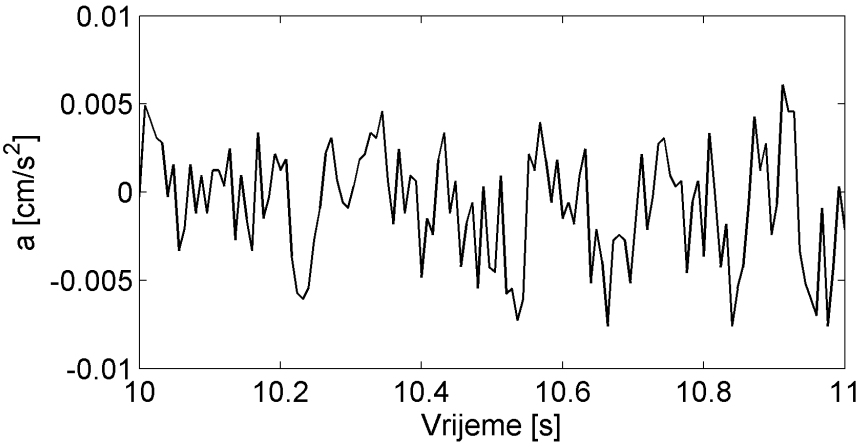
S obzirom da točna konstanta instrumenata nije poznata, amplitude akceleracije određene su vizualnom usporedbom rezultata koje daje računalo za prikupljanje podataka i amplitude koje je moguće dobiti iz podataka.



Slika 7: Transformacijsko postrojenje nedaleko od opservatorija.



Slika 8: Zapis koji prikazuje šum od 50 Hz zabilježen na instrumentu postavljenom na 90 metara dubine.



Slika 9: Zapis koji prikazuje isti vremenski trenutak kao i na slici 8. Vidljivo je da nema nekog umjetnog šuma.

4 Metode

4.1 HVSR metoda (*Horizontal-to-vertical spectral ratio*)

HVSR metoda (Nakamura, 1989.) koristi se za procjenu frekvencije na kojoj dolazi do pojave amplifikacije, ali se amplituda ne smije smatrati faktorom amplifikacije. Do danas nije uspostavljen konsenzus oko postupka kojim bi se takav omjer trebao dobiti (Mucciarelli i Gallipoli, 2001.). Tako je moguće koristiti zapise mikroseizmičkog nemira, ali i jače pobude (potres; Sato i sur., 2004.). Nije definirano na koji način je potrebno dobiti spektar, koristi li se filtre ili *tapering*. Kada se odrede spektri horizontalne i vertikalne komponente, oni se podijele te se dobije HVSR. Ako se određuje na duljem vremenskom nizu, preporuča se usrednjavanje.

U ovom radu prilikom analize noćnih zapisa mikroseizmičkog nemira korišteno je 16 minutnih zapisa počevši od jedan sat nakon ponoći. Iz zapisa su uklonjeni trendovi. Svaki minutni zapis tretiran je Hannovim prozorom te je izračunat spektar pomoću FFT algoritma (*Fast Fourier Transform*). Dobiveni spektri zaglađeni su kliznim srednjakom duljine prozora od 20 podataka (na duljini zapisa od 7500 podataka). Zatim se za horizontalnu komponentu računa kvadratna sredina (eng. *root mean square*, RMS) između x i y komponente.

$$H = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}}.$$

Za dobivene spektre računa se omjer spektara horizontalne komponente i vertikalne komponente te se za svih šesnaest omjera računa geometrijski srednjak.

Prilikom računanja HVSR-a za potrese korišten je dio zapisa koji počinje nailaskom S-faze i traje 8 s, jer sadrži najviše energije (Wen i sur., 1995.). Iz zapisa su uklonjeni trendovi. Izračunat je spektar te je izglađen kliznim srednjakom od 5 podataka. Kao i za noćne zapise, određen je RMS za horizontalnu komponentu. Na kraju su izračunati odgovarajući omjeri.

4.2 Standardni omjer spektara (*Standard spectral ratio*, SSR)

SSR metoda (Borcherdt, 1970.; Borcherdt & Gibbs, 1976.), za razliku od HVSR-a, omogućava određivanje faktora amplifikacije. Da bi se pojačanje dobiveno ovom metodom smatralo valjanim (Bordoni i sur., 2010.), potrebno je imati dva akcelerometra. Jedan instrument je referentna postaja, a za drugi se određuje seizmička amplifikacije. Referentni instrument mora biti izoliran od lokalnih efekata tla, odnosno trebao bi se nalaziti na čvrstoj, po mogućnosti osnovnoj, stijeni.

Osim toga, udaljenost između referentnog instrumenta i instrumenta za koji se određuje amplifikacija mora biti višestruko manja od epicentralne udaljenosti u odnosu na referentni instrument. Da bi se metoda mogla provesti omjer signala i šuma mora biti veći od dva.

Za određivanje standardnih spektralnih omjera u ovom radu spektri su dobiveni na način opisan u prethodnom poglavlju. Kao referentni instrument uzet je instrument koji se nalazi na dubini od 90 m s obzirom da zadovoljava zahtjeve za račun SSR-a, te su određivani omjeri za instrumente na dubini dva i 20 metara. Jedini problem su smetnje koje se pojavljuju na toj dubini opisane u poglavlju *Problemi s podacima*. S obzirom da je šum točno frekvencije 50 Hz, njegov utjecaj je zanemariv, budući se gledaju spektri na manjim frekvencijama.

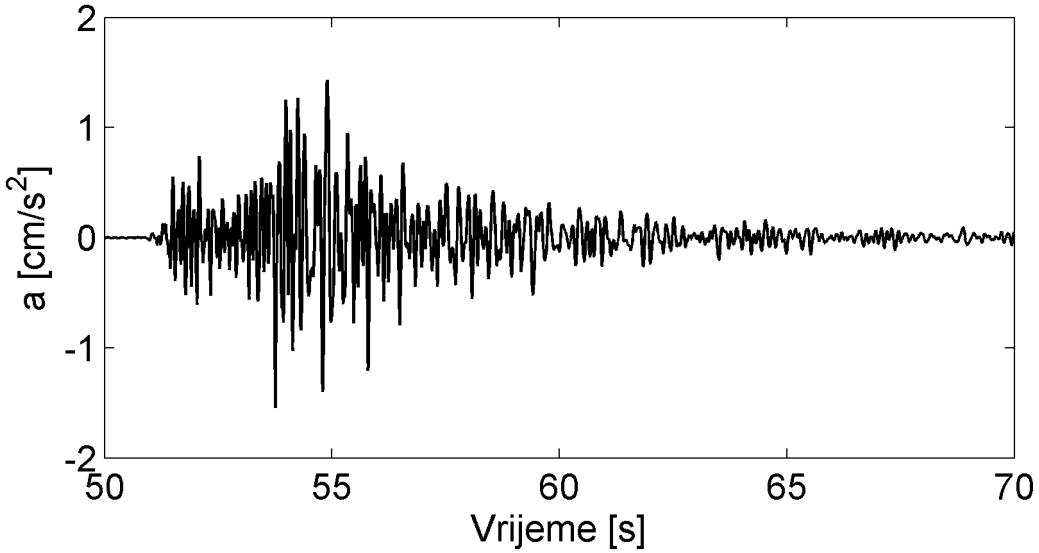
5 Rezultati

U ovom dijelu rada prikazani su rezultati dobiveni analizom četiriju zapisa potresa te četiri seta mjerenja mikroseizmičkog nemira. Za analizu su korištene dvije metode: HVSR i SSR. Na temelju dobivenih omjera spektara, procijenjena je frekvencija na kojoj je moguće očekivati izraženiju amplifikaciju te faktor amplifikacije na temelju SSR metode. Svaki od četiri seta mjerenja mikroseizmičkog nemira odgovara noćnom zapisu na dan kada je zabilježen potres. Svi rezultati prikazani su za frekvencije između 0.8 i 15 Hz jer više frekvencije nisu od interesa (Hanks, 1982.).

5.1 Analiza potresa

5.1.1 Potres na dan 31. siječnja 2015.

Na dan 31. siječnja 2015. godine zabilježen je potres s epicentrom na Medvednici, 13 km sjeveroistočno od klizišta Kostanjek. Potres je zabilježen na sve tri komponente svih triju instrumenata postavljenih na klizištu Kostanjek. Slika 10 prikazuje zapis potresa filtriran niskopropusnim filtrom do 12 Hz kako bi se uklonio šum. Na temelju x komponente zapisa na dva metra određeno je nastupno vrijeme S-faze.



Slika 10: Zapis potresa dana 31. siječnja 2015. godine na dva metra dubine, x komponenta. Maksimalna zabilježena akceleracija iznosi $a_{max} = 1{,}54\,\mathrm{cm\,s^{-2}}$.

Amplituda potresa je procijenjena, budući da iz podataka o instrumentu te iz zaglavlja *SEGY* datoteka nije bilo moguće odrediti karakteristiku instrumenta i mjerne jedinice. Za

procjenu je korišten podatak koji se automatski dobiva na računalu opservatorija na klizištu Kostanjek.

Slike 11a, 11b i 11c prikazuju standardni omjer spektara horizontalnih komponenata i vertikalnih komponenata u odnosu na referentni instrument te HVSR. Svi omjeri su određeni za instrument na dubini dva metra dok je referentno mjerenje za standardne omjere spektara ono na 90 metara. Prikazane su obje horizontalne komponente te srednja komponenta dobivena prema jednadžbi za referentnu horizontalnu komponentu.

Prvo što se može zamijetiti na slikama je da postoji amplifikacija na svim frekvencijama što je očekivano, budući da se uspoređuju mjerenja na stijeni i ona u plitkim rastresitim slojevima. SSR metoda daje najveće pojačanje za y komponentu i to prilikom usporedbe s y komponentom referetnog akcelerometra. Za taj slučaj amplifikacija je za faktor 10 (slika 11a).

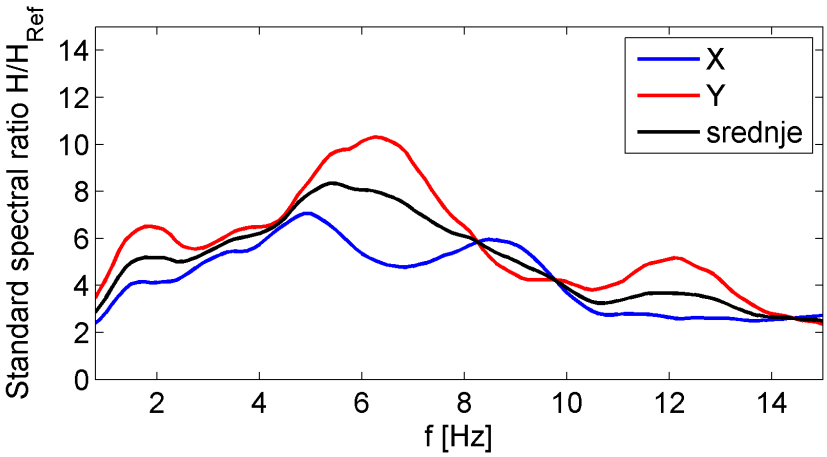
U tablici 2 prikazane su frekvencije na kojima se nalaze prvi i drugi maksimum. Za mjerenja na dva metra vidljivo je da je amplifikacija izraženija u y smjeru te se maksimumi ostvaruju na nešto višim frekvencijama. Za x komponentu kod usporedbe horizontalnih komponenata, vidljiva je promjena u amplifikaciji, ali kod usporedbe horizontalne i vertikalne komponente amplifikacija je gotovo neovisna o frekvenciji (slika 11b).

Tablica 2: Frekvencije maksimuma amplifikacije za mjerenja na dva metra.

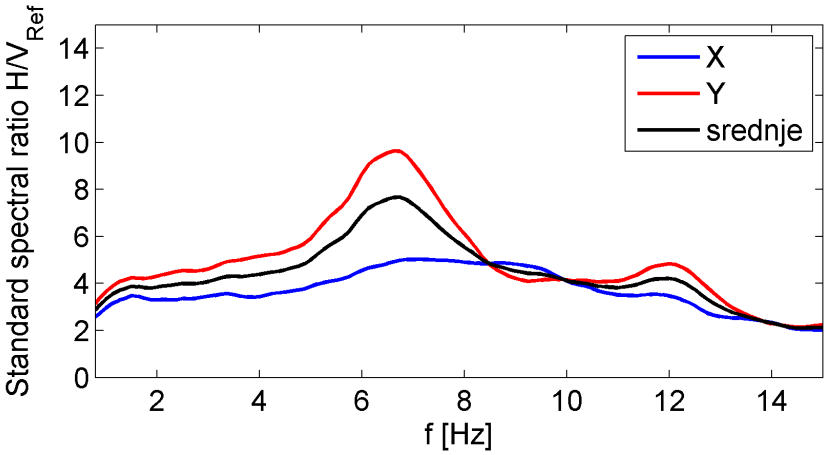
	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
Metoda	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	4,87	6,24	5,37	/	12,11	11,74
SSR H/V	/	6,62	6,74	/	11,99	11,99
HVSR	5,25	6,24	5,99	11,49	12,11	11,89

Podaci u prethodnoj tablici pokazuju da je amplifikacija najjača oko 6 Hz, dok se sekundarni maksimum pojavljuje na oko 12 Hz što bi se moglo protumačiti kao viši mod.

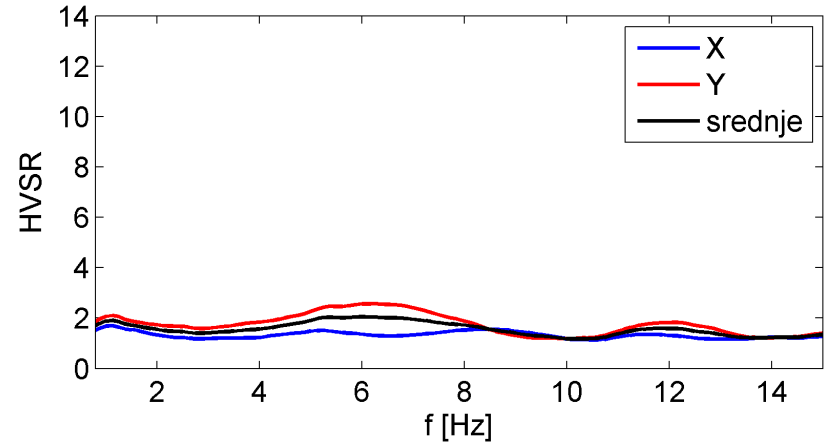
Jedan od zanimljivijih efekata je vidljiv između $8,5$Hz i 10 Hz gdje dolazi do promjene u odnosu x i y komponente. Amplifikacija x komponente je na tom dijelu veća od amplifikacije na y komponenti. Taj efekt vidljiv je u rezultatima svih triju metoda i mogao bi upućivati na određene strukture u podzemlju koje pogoduju oscilacijama u x smjeru na danim frekvencijama.



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



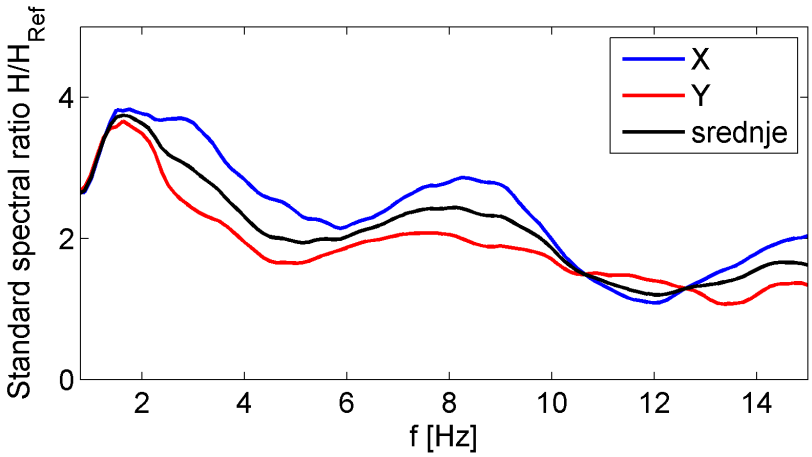
(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 11: Rezultati za potres 31. siječnja 2015. na dubini dva metra.

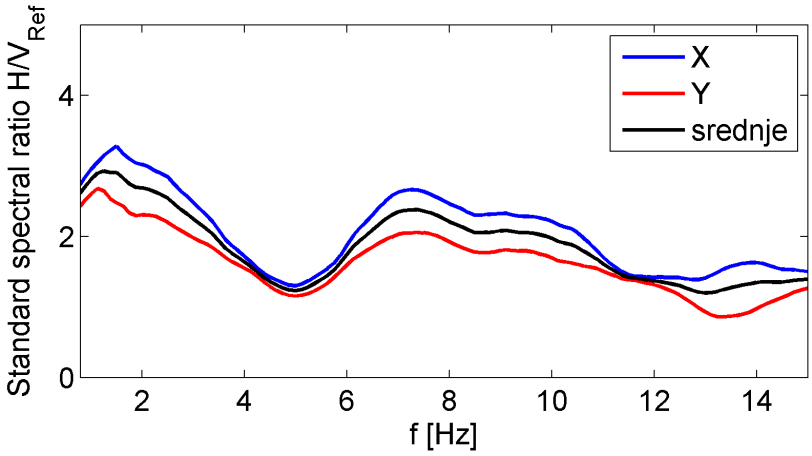
Slike 12a, 12b i 12c prikazuju standardne omjere te HVSR za isti potres, ali za instrument na dubini od 20 metara.

Prvo što se može primjetiti za omjere na dubini od 20 metara je veće pojačanje za *x* komponentu. Također, amplituda HVSR-a bliža je amplitudi SSR-a nego što je to slučaj na

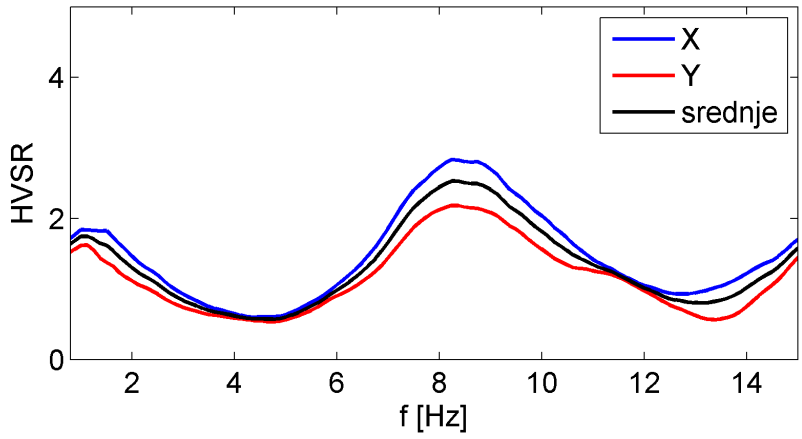
dva metra dubine. Dominantni efekti amplifikacije javljaju se na dvije frekvencije. Iz slika 12a i 12b je vidljivo da je prvi maksimum na nižim frekvencijama nego u slučaju mjerenja na dva metra. Na 20 metara dubine dolazi do promjene iznosa amplifikacije *x* i *y* komponente tako da pojačanje *x* komponente slabi nakon frekvencije 10,61 Hz, dok pojačanje *y* komponente raste. Takav trend se nastavlja do frekvencije 12,61 Hz kada se pojačanje *y* komponente ponovo smanjuje, a ono *x* komponente raste (slika 12a).



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 12: Rezultati za potres 31. siječnja 2015. na dubini 20 metara.

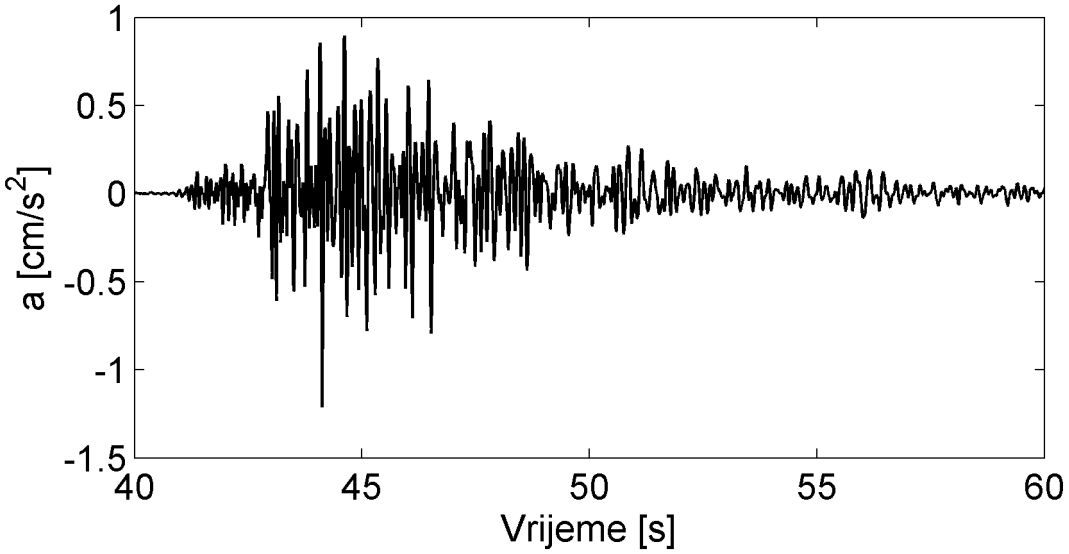
U tablici 3 dane su točne vrijednosti frekvencija na kojima se pojavljuju maksimumi amplifikacije. Ponovna pojava dva maksimuma ukazuje na više modove.

Tablica 3: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

Metoda	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	1,84	1,62	1,62	8,24	7,62	8,12
SSR H/V	1,5	1,12	1,5	7,24	7,37	7,37
HVSR	0,99	1,12	1,00	8,24	8,37	8,24

5.1.2 Potres na dan 15. rujna 2015.

Na dan 15. rujna 2015. zabilježen je potres s epicentrom 12,2 km istočno od klizišta Kostanjek. Epicentralna udaljenost od opservatorija ovog potresa najmanja je u ovom setu odabranih potresa. Kao i za prethodni potres, zabilježen je na sve tri dubine. Na slici 13 prikazana je x komponenta zapisa na dubini od dva metra na temelju koje je određeno nastupno vrijeme S-faze.

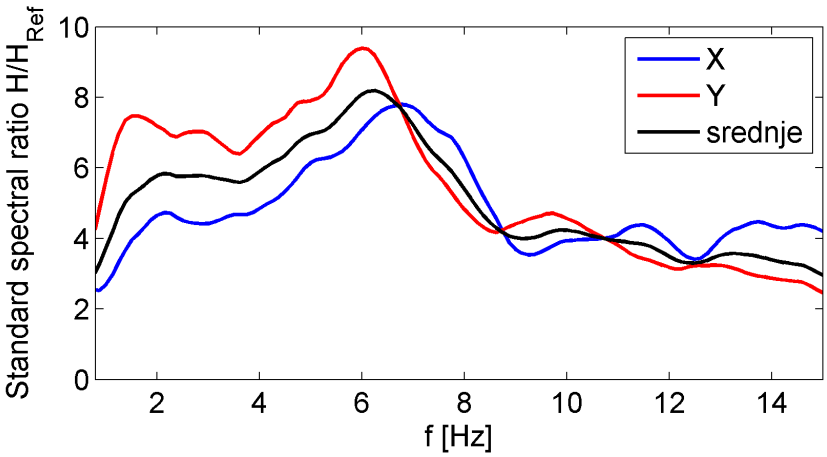


Slika 13: Zapis potresa dana 15. rujna 2015. na dva metra dubine, x komponenta. Maksimalna zabilježena akceleracija iznosi $a_{max} = 1{,}21\,\mathrm{cm\,s^{-2}}$.

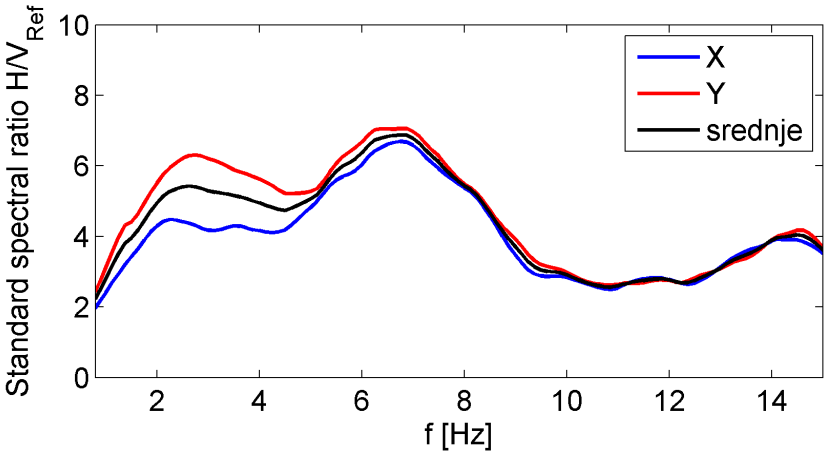
Slike 14a, 14b i 14c prikazuju standardne omjere za horizontalne i za vertikalnu komponentu te HVSR za potres od 15. rujna. Prikazani omjeri računati su iz zapisa na dva metra dubine.

Iz slike 14 se vidi da graf amplifikacije ima maksimume na dvije frekvencije. Amplifikacija je dominantna u y smjeru za sve tri metode. Za razliku od prethodnog potresa, ovdje je vidljiva višestruka izmjena dominantne amplifikacije između x i y komponente. Ovaj efekt vidljiv je samo iz omjera horizontalnih komponenata (slika14a). U tablici 4 su prikazane frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi.

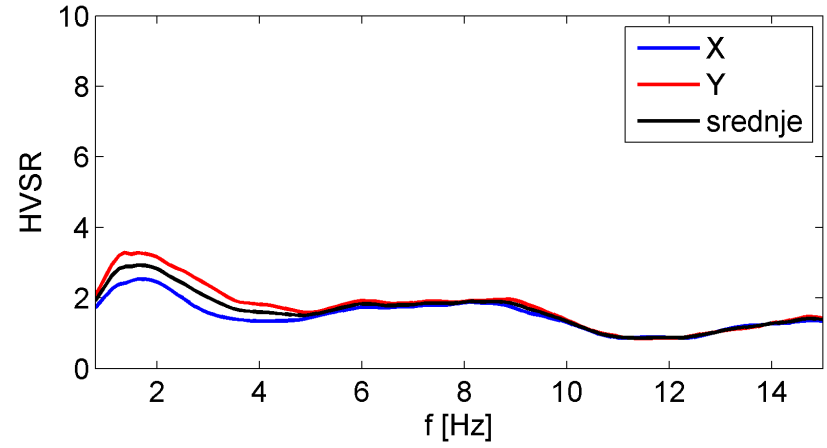
HVSR metoda daje samo jedan maksimum koji je na frekvencijama nižim nego kod SSR metode. Maksimuma na višim frekvencijama nema već je amplifikacija podjednaka u pojasu frekvencija između 6 i 9 Hz. Kao i kod prvog potresa, amplituda HVSR-a znatno je manja od amplituda dobivenih za SSR. SSR metoda daje najveće pojačanje za y komponentu kod usporedbe horizontalnih komponenata, a pojačanje je devet puta.



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 14: Rezultati za potres 15. rujna 2015. na dubini dva metra.

Tablica 4: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

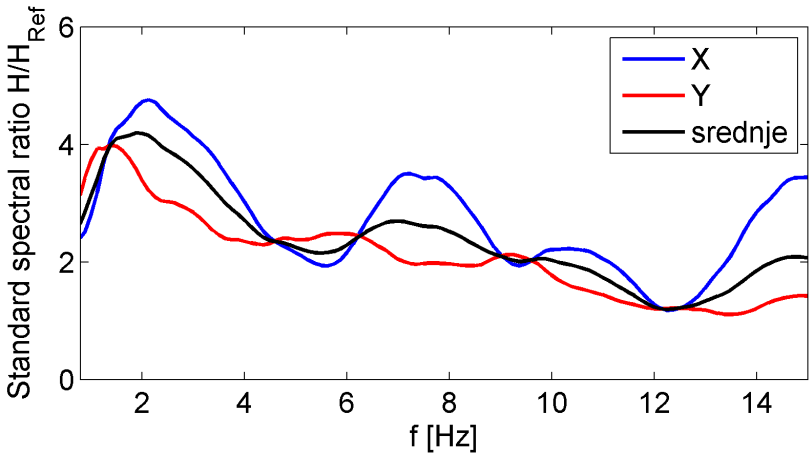
	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
Metoda	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	2,12	1,5	2,12	6,74	6,00	6,24
SSR H/V	2,25	2,75	2,62	6,74	6,4	6,74
HVSR	1,6	1,37	1,75	/	/	/

Slike 15a, 15b i 15c prikazuju rezultate SSR i HVSR metode za instrument na 20 metara dubine. Kao i kod prethodnog potresa, ponovo je dominantano pojačanje amplitude za x komponentu. Veće pojačanje y komponente u odnosu na x komponentu ponovno se javlja na više kraćih intervala. Y komponenta ima samo jedno područje jače amplifikacije, dok x komponenta ima dva lokalna maksimuma. Kao i u prethodnom slučaju, amplituda HVSR-a manja je od one SSR-a. SSR daje amplifikaciju od 4,5 - 5 za obje komponente na području oko 2 Hz. U tablici 5 dane su frekvencije na kojima se pojavljuju maksimalne vrijednosti omjera.

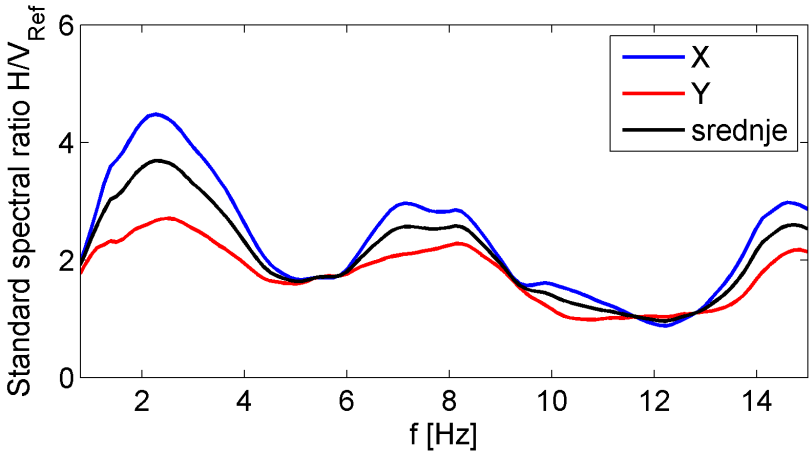
Tablica 5: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
Metoda	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	2,12	1,37	2,00	7,24	/	7,00
SSR H/V	2,25	2,5	2,25	7,12	8,12	7,12
HVSR	1,6	1,37	1,75	8,12	8,24	8,12

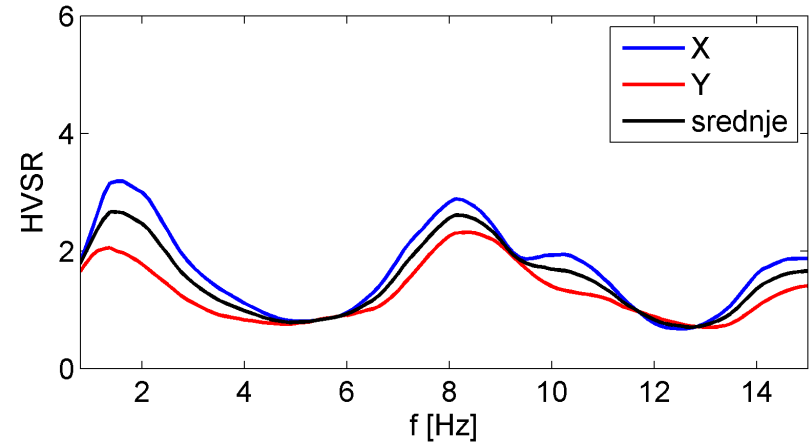
Iz podataka u tablici vidljivo je da HVSR za prvi maksimum daje nešto niže frekvencije od SSR-a dok su za drugi maksimum one malo više kod HVSR-a. Usporede li se ovi podaci s onima dobivenima za prvi potres, vidljivo je slaganje uz manja odstupanja.



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



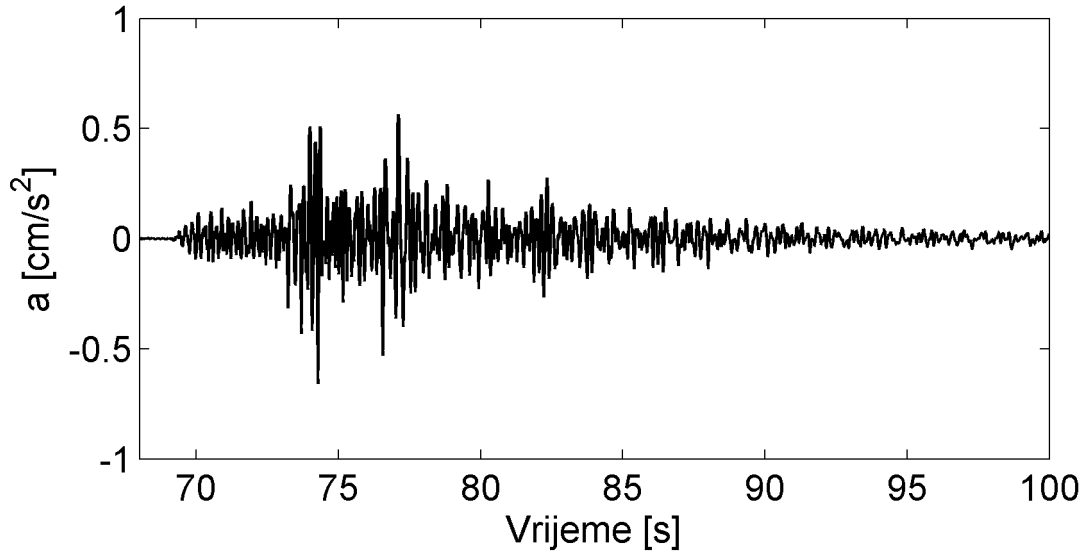
(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 15: Rezultati za potres 15. rujna 2015. na dubini 20 metara.

5.1.3 Potres na dan 1. studenog 2015.

Na dan 1. studenog 2015. zabilježen je potres s epicentrom u Sloveniji kod Novog Mesta, 25,8 km zapadno od klizišta Kostanjek. Ovo je bio najjači potres, magnitude $M_L = 4,2$ od svih obrađenih potresa u ovom radu. Na slici 16 prikazana je x komponenta zapisa potresa na dubini od dva metra. Ovaj zapis korišten je za određivanje početka S-faze.

Iako je ovaj potres najveće lokalne magnitude, zabilježena akceleracija je upola manja od one za potrese s epicentrima u okolici Zagreba.



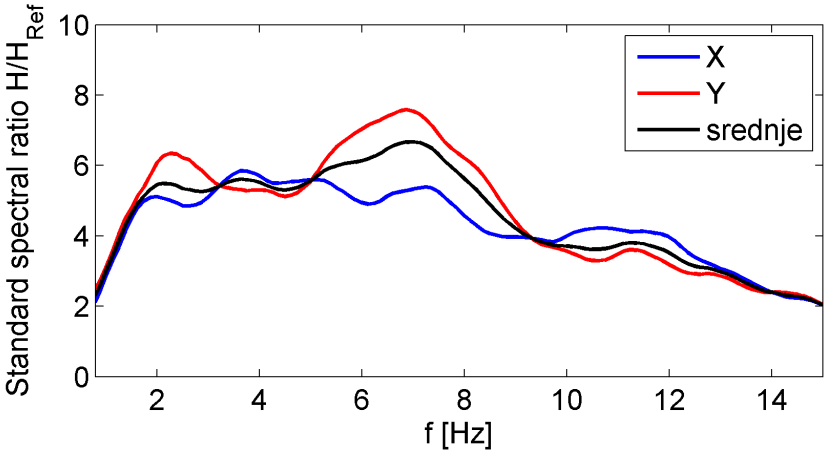
Slika 16: Zapis potresa dana 1. studenog 2015. na dva metra dubine, x komponenta. Maksimalna zabilježena akceleracija iznosi $a_{max} = 0{,}66\,\mathrm{cm\,s^{-2}}$.

Slike 17a, 17b i 17c prikazuju standardne omjere za horizontalne i za vertikalnu komponentu te HVSR za potres od 1. studenog. Kao i kod prethodnih potresa, amplifikacija y komponente je dominantnija u odnosu na x komponentu. Za ovaj potres se prvi puta javlja promjena odnosa amplifikacija x i y komponente na dubini od dva metra na frekvenciji od približno 4 Hz, te se ponavlja i na višim frekvencijama, između 9 i 14 Hz. Na slici 17b ponovo se vidi viši mod na frekvenciji blizu 12 Hz. Tablica 6 prikazuje frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi određenih komponenata.

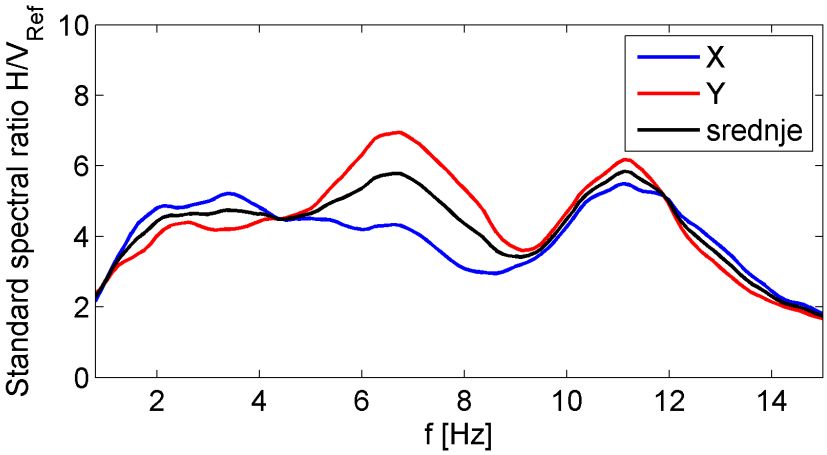
Tablica 6: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
Metoda	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	2,12	1,37	2,00	7,24	/	7,00
SSR H/V	2,25	2,5	2,25	7,12	8,12	7,12
HVSR	1,6	1,37	1,75	8,12	8,24	8,12

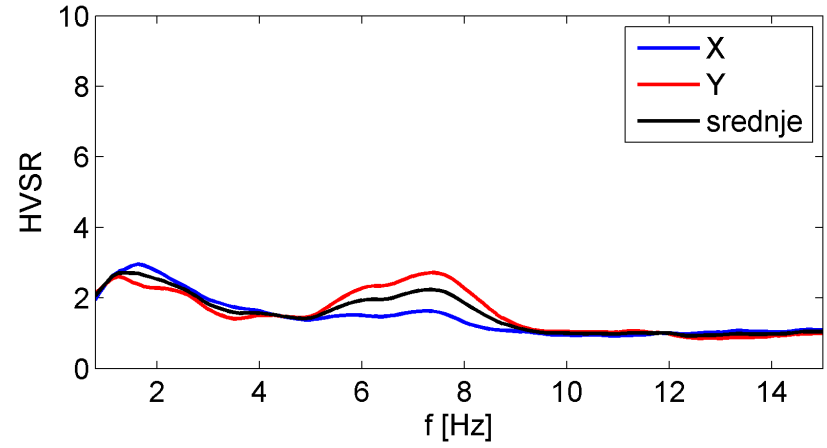
Za podatke iz ove tablice valja napomenuti da se maksimumi x i y komponente ne poklapaju kod SSR-a horizontalnih komponenti. Iako je trend usporediv, amplituda x komponente na frekvencijama koje odgovaraju maksimumu y komponente nije veća od amplituda na manjim frekvencijama.



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



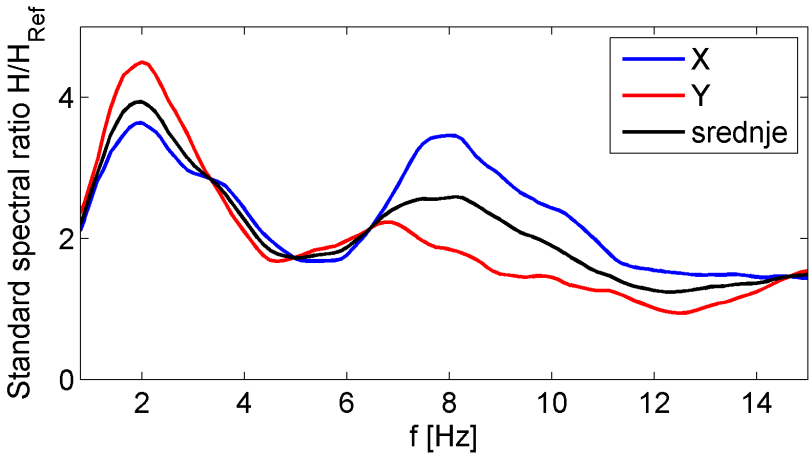
(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



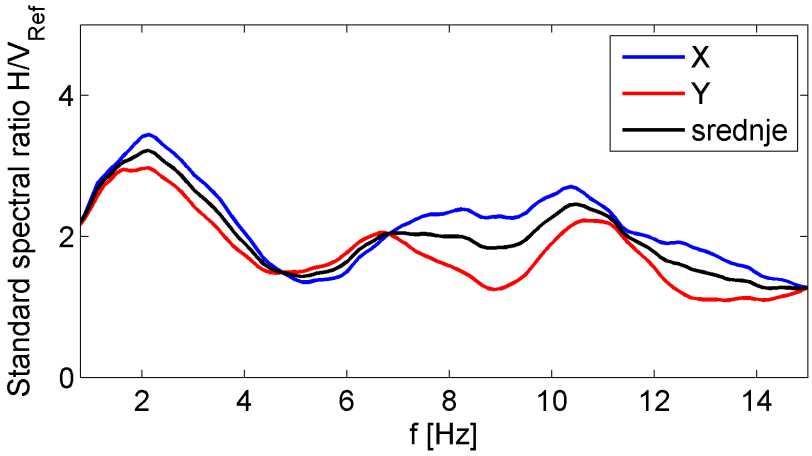
(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 17: Rezultati za potres 1. studenog 2015. na dubini dva metra.

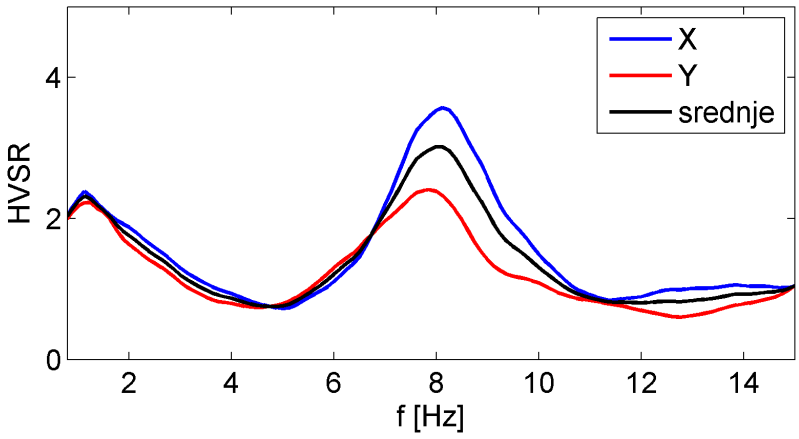
Na slikama 18a, 18b i 18c prikazani su standardni omjere za horizontalnu i za vertikalnu komponentu te HVSR za potres 1. studenog za instrument na dubini od 20 metara. SSR horizontalnih komponenata za ovaj potres karakterizira maksimum na 2 Hz za obje komponente te samo jedan izraženi maksimumom x komponente u blizini 8 Hz. Taj maksimum je vidljiv i kod HVSR-a, ali izostaje kod SSR-a vertikalnih komponenata. Tablica 8 prikazuje vrijednosti frekvencija na kojima se pojavljuju maksimumi za sve tri metode.



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 18: Rezultati za potres 1. studenog 2015. na dubini 20 metara.

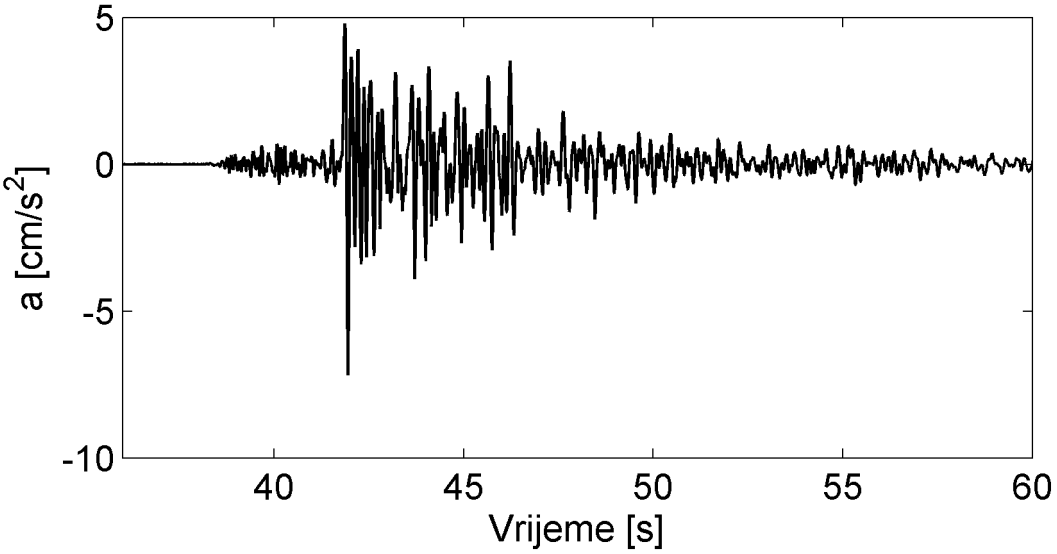
Tablica 7: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
Metoda	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	2,00	2,00	2,00	8,00	/	8,12
SSR H/V	2,12	2,12	2,12	10,36	10,61	10,49
HVSR	1,12	1,25	1,12	8,12	7,87	8,00

Za ovaj potres je karakteristično iznimno dobro poklapanje prvog maksimuma svih triju medoda, ali i složeniji odnos komponenata na višim frekvencijama. Najveća amplifikacija dobivena je za SSR horizontalne komponente i to za *x* komponentu i iznosi 4,5.

5.1.4 Potres na dan 9. travnja 2016.

Dana 9. travnja 2016. zabilježen je potres s epicentrom nedaleko od Brežica (Slovenija), 20,7 km sjeverozapadno od opservatorija. Ovaj potres magnitude $M_L = 3,6$ drugi je po jačini koji se koristi za analizu u ovom radu. Na slici 19 prikazana je x komponenta zapisa s instrumenta na dva metra. Za ovaj potres, maksimalna akceleracija je iznimno velika u usporedbi s ostalim potresima.

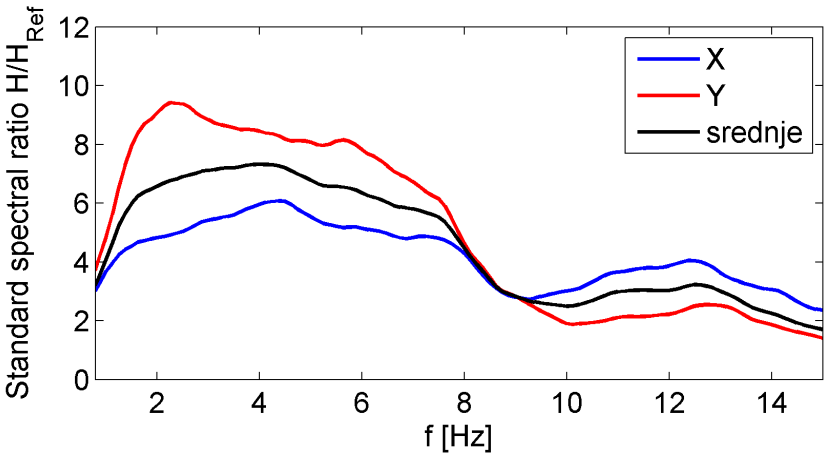


Slika 19: Zapis potresa dana 9. travnja 2016. na dva metra dubine, x komponenta. Maksimalna zabilježena akceleracija iznosi $a_{max} = 7,18\,\mathrm{cm\,s^{-2}}$.

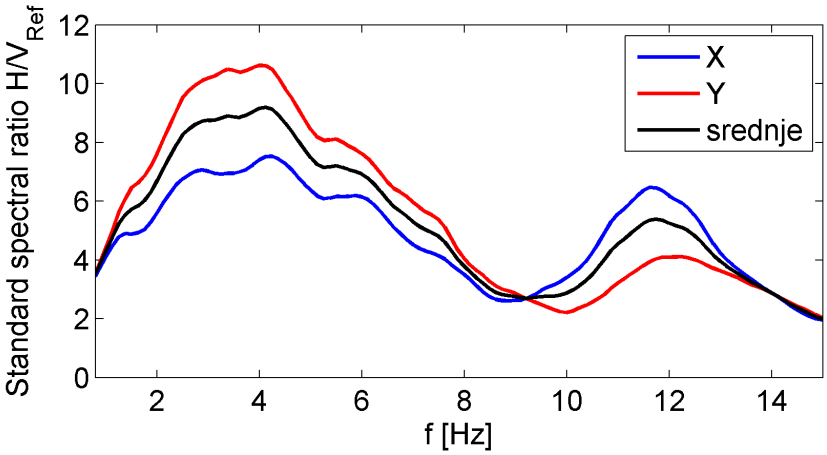
Slike 20a, 20b i 20c kao i kod prethodnih potresa prikazuju sve tri metode za instrument na dva metra dubine. Za razliku od ostalih potresa, kod ovog nema izraženih maksimuma na pojedinim niskim frekvencijama već je amplifikacija jednaka na određenom intervalu.

Tablica 8: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

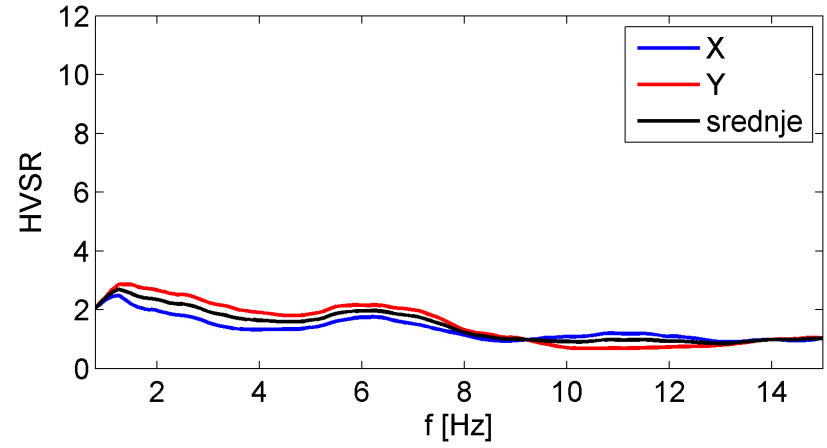
	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
Metoda	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	4,37	2,25	4,00	12,36	12,74	12,49
SSR H/V	4,25	4,00	4,12	11,61	12,24	11,74
HVSR	1,25	1,25	1,25	/	/	/



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.

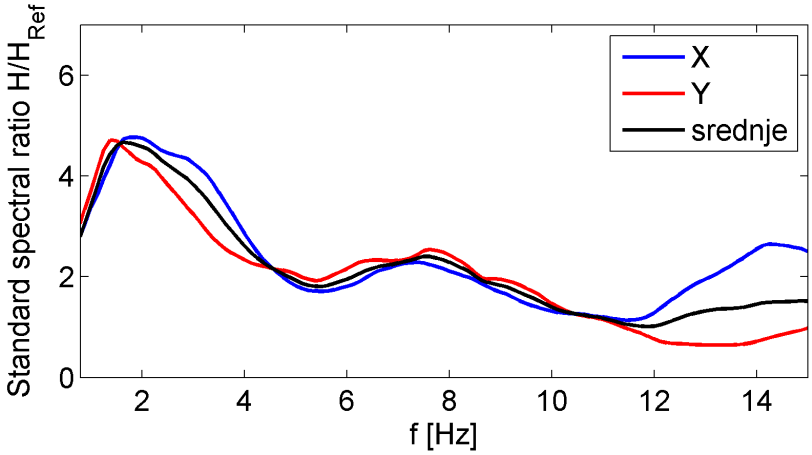


(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

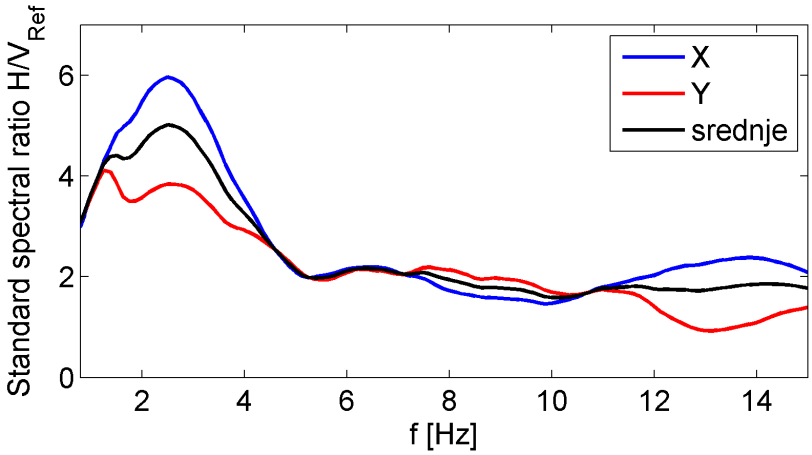
Slika 20: Rezultati za potres 9. travnja 2016. na dubini dva metra.

Rezultati za instrument na 20 metara dubine prikazani su na slikama 21a, 21b i 21c. Za ovaj potres zabilježena je najveća amplifikacija na 20 metara dubine. *X* komponenta ubrzanja je na frekvenciji od približno 3 Hz pojačana šest puta. Na *y* komponenti nije dobiveno značajnije pojačanje (u odnosu na ostale potrese). Kod SSR metode pojavljuje se

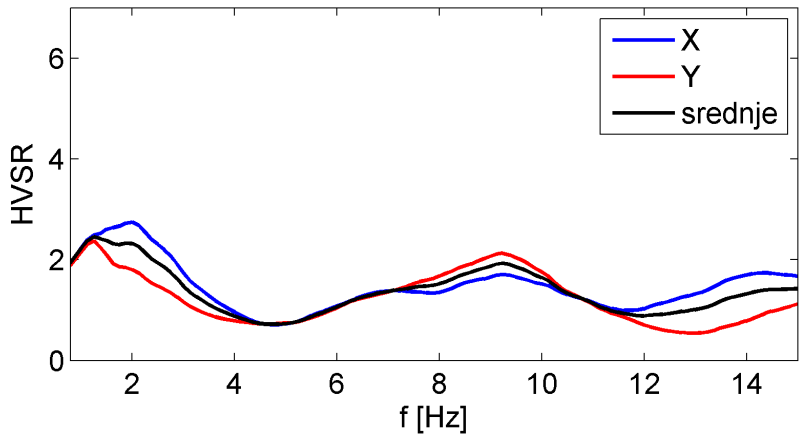
samo jedan značajan maksimum, dok se kod HVSR-a pojavljuju dva međusobno usporediva maksimuma. Razlika između amplituda HVSR-a i SSR-a na 20 metara dubine veća je nego što je kod preostala tri potresa.



(a) SSR horizontalnih komponenata zapisa potresa.



(b) SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata zapisa potresa.



(c) HVSR pojedinih horizontalnih komponenata te srednje komponente.

Slika 21: Rezultati za potres 9. travnja 2016. na dubini 20 metara.

Tablica 9: Frekvencije na kojima se pojavljuju maksimumi omjera.

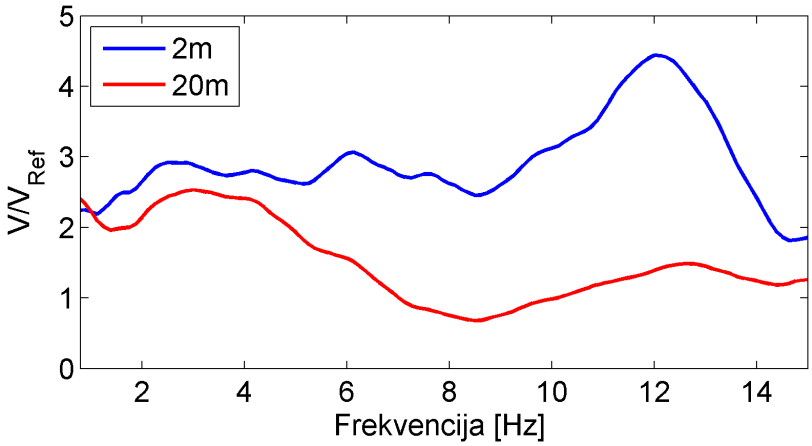
Metoda	Prvi maksimum			Drugi maksimum		
	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{srednje}$ (Hz)
SSR H/H	1,87	1,37	1,62	/	/	/
SSR H/V	2,5	1,25	2,5	/	/	/
HVSR	2,00	1,25	1,25	9,24	9,24	9,24

5.2 Utjecaj slojeva između dva i dvadeset metara na vertikalnu komponentu gibanja

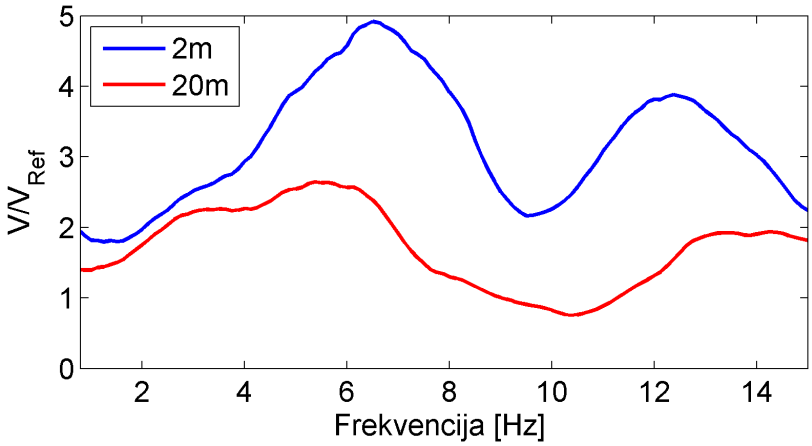
Kao što je vidljivo iz rezultata prikazanih u prethodnom poglavlju, HVSR metoda za sve četiri pobude na dva metra dubine daje rezultate koji se ne slažu s onima dobivenim za SSR metodu. Usporedbom rezultata dobivenih za instrument na 20 metara dubine vidljiva je puno veća sličnost. Kao uzrok tome nameće se utjecaj slojeva na dubinama između dva i 20 metara.

Kako bi se uočila promjena vertikalne komponente gibanja, potrebno je pogledati standardni omjer spektara vertikalnih komponenti uzevši kao referentni instrument onaj na 90 metara dubine. Idealna bi bila izravna usporedba komponenata na dva i 20 metara, ali instrument na 20 metara ne zadovoljava uvjete za referentni instrument.

Slike 22 i 23 prikazuju rezultate za SSR metodu primijenjenu na vertikalne komponente gibanja na dva i 20 metara dubine. Vidi se da je signal na dva metra dubine jače amplificiran od onog na 20 metara. Za slojeve između 20 i 90 metara dubine karakteristična je amplifikacija na frekvencijama oko 4 Hz i 12Hz, ali je ona iznosom relativno mala (do maksimalno faktora 2). Slojevi do dva metra dubine pokazuju znatno veću amplifikaciju (do faktora 5). Razlika između standardnih omjera spektara na dva i 20 metara dubine vjerojatna je posljedica dodatne amplifikacije slojeva između ta dva instrumenta.

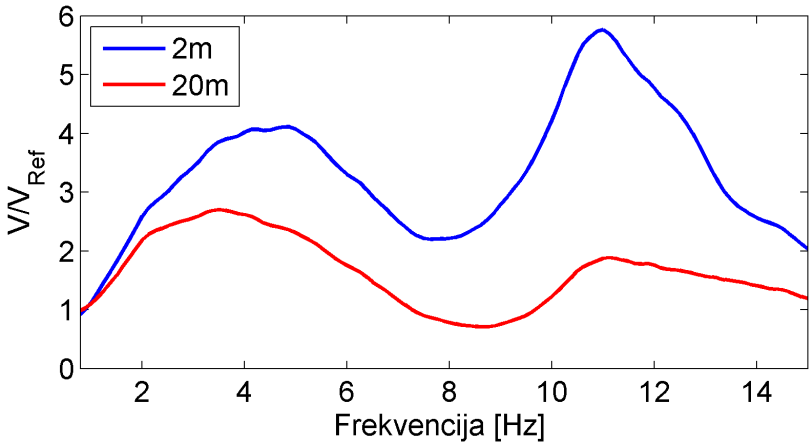


(a) SSR vertikalne komponenata zapisa potresa.

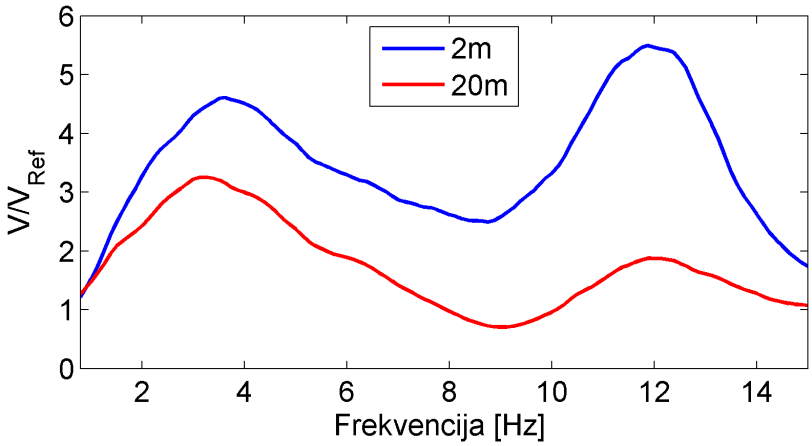


(b) SSR vertikalne komponenata zapisa potresa.

Slika 22: Usporedba vertikalnih komponenata na dva i 20 metara s onom na 90. Slika a prikazuje amplifikaciju za potres 31. siječnja, a slika b za potres 15. rujna.



(a) SSR vertikalne komponenata zapisa potresa.



(b) SSR vertikalne komponenata zapisa potresa.

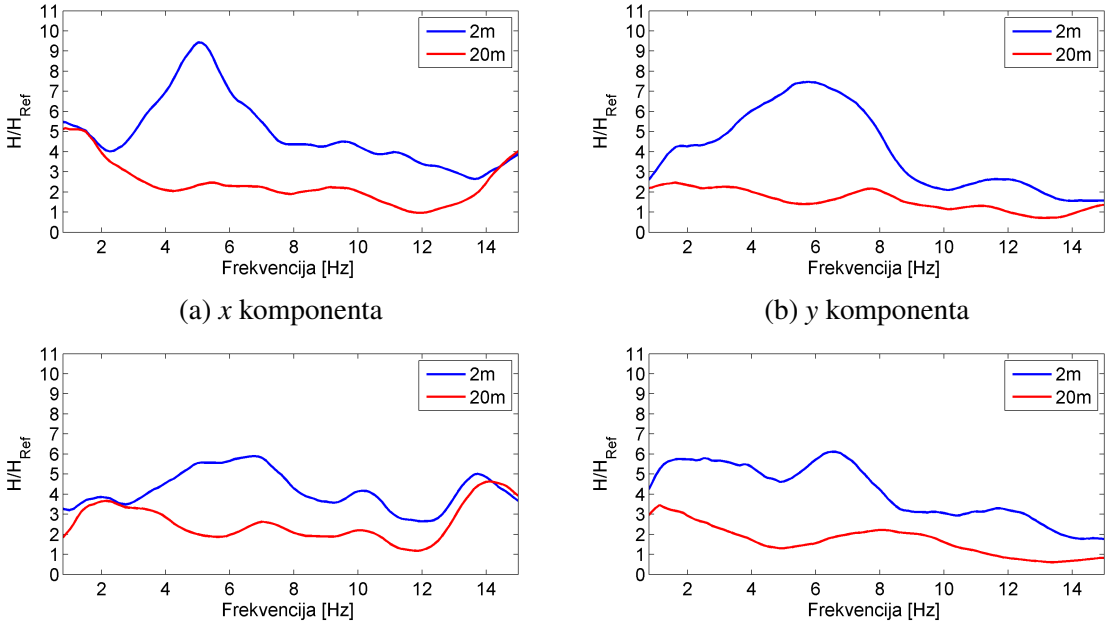
Slika 23: Usporedba vertikalnih komponenata na dva i 20 metara s onom na 90. Slika a prikazuje amplifikaciju za potres 1. studenog, a slika b za potres 9. travnja.

Ovakvi rezultati dobrim dijelom objašnjavaju razliku između rezultata HVSR metode i SSR metode za usporedbu horizontalnih i vertikalnih komponenata dobivenih u prethodnom poglavlju. Također, jasno se može vidjeti zašto su rezultati HVSR metode na 20 metara sličniji rezultatima SSR metoda.

Na temelju ovih rezultata može se zaključiti da je amplifikacija vertikalne komponente prevelika za kvalitetnu analizu HVSR metodom koristeći potrese kao pobudu. Kao što je opisano u prvom poglavlju, da bi se HVSR mogao promatrati kao amplifikacijski spektar, odnosno kako bi se iz njega mogli povlačiti zaključci, amplifikacijski spektar vertikalne komponente trebao bi biti približno jedan na svim frekvencijama, što za ove primjere nije zadovoljeno.

5.3 Utjecaj slojeva između dva i dvadeset metara na horizontalne komponente gibanja.

Ako se zajedno pogledaju rezultati SSR metoda za instrumente na dva i 20 metara, može se opisati utjecaj koji na upadne valove imaju slojevi između ta dva instrumenta. Slika 24 i slika 25 prikazuju upravo to. Iz ovih slika može se zaključiti kako slojevi između dva i 20 metara najjače djeluju na konačnu amplifikaciju na površini. Amplifikacija zbog slojeva na dubinama između 90 i 20 metara je manja te skoro neovisni o frekvenciji.



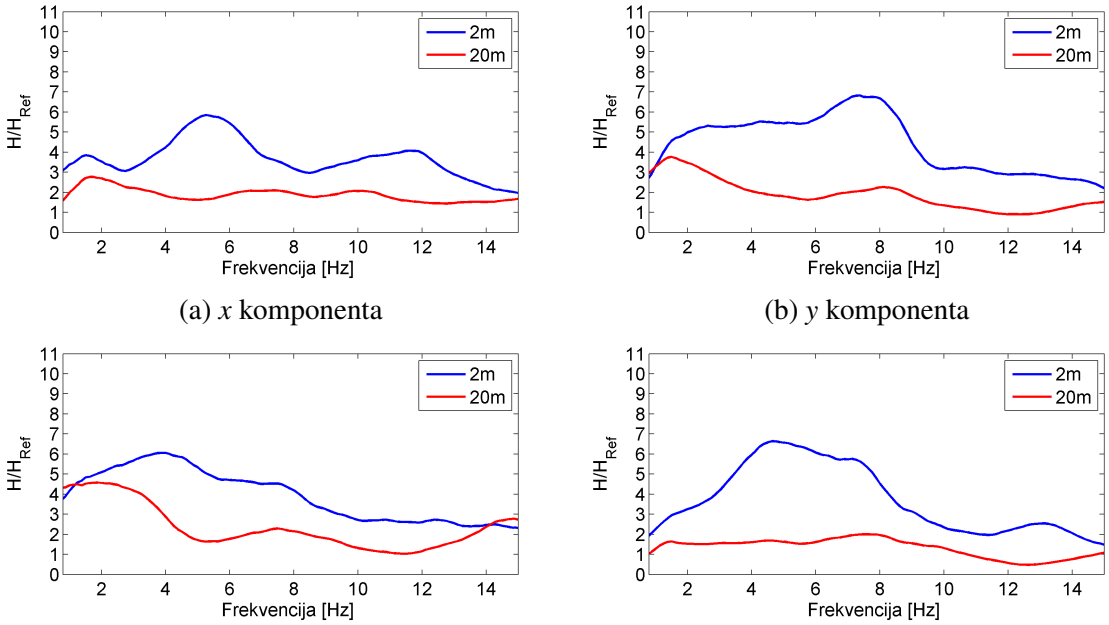
(a) *x* komponenta

(b) *y* komponenta

(c) *x* komponenta.

(d) *y* komponenta.

Slika 24: Usporedba horizontalnih komponenata na dva i dvadeset metara s referentnim intrumentom na 90 metara. Slike a, b prikazuju rezultate za potres 31. siječnja, a slike c, d za potres 15. rujna. Lijeve slike prikazuju *x* komponente, a desne *y* komponente zapisa.



(a) *x* komponenta

(b) *y* komponenta

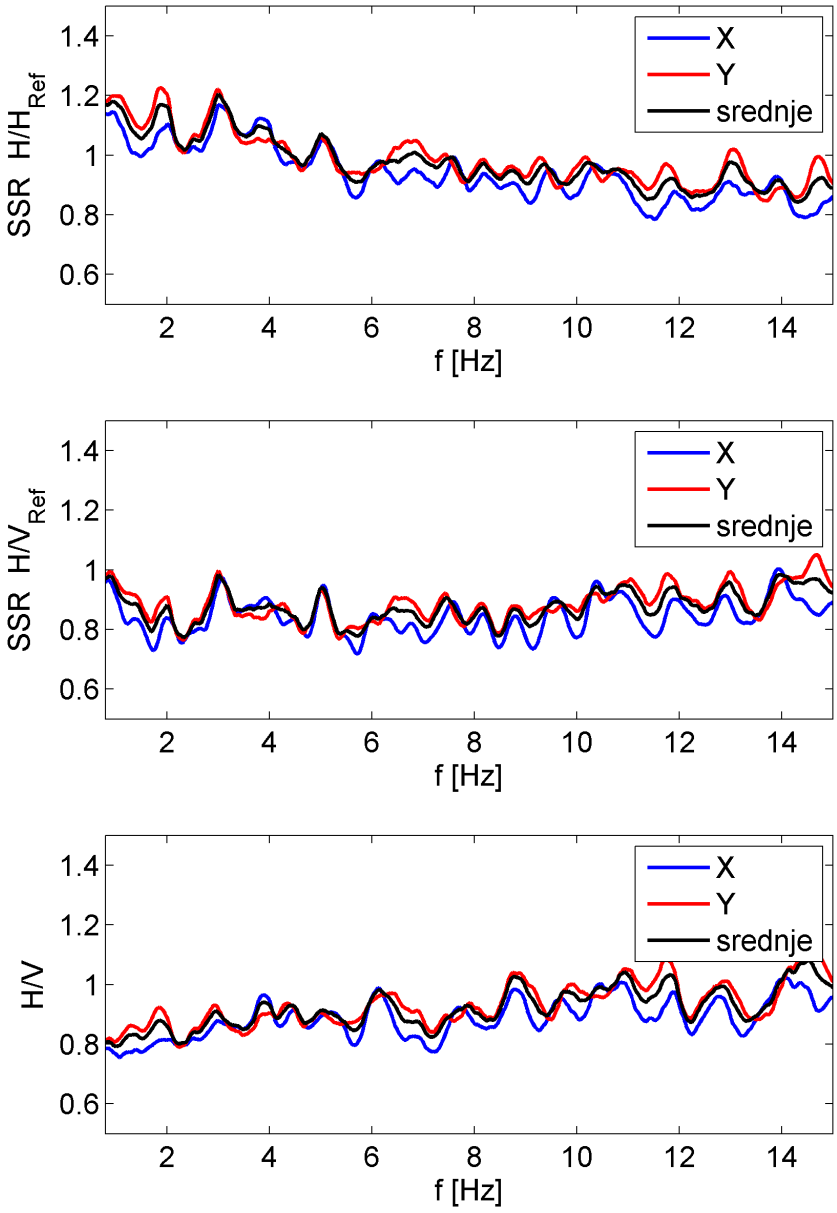
(c) *x* komponenta.

(d) *y* komponenta.

Slika 25: Usporedba horizontalnih komponenata na dva i dvadeset metara s referentim intrumentom na 90 metara. Slike a, b prikazuju rezultate za potres 1. studenog, a slike c, d za potres 9. travnja. Lijeve slike prikazuju *x* komponente, a desne *y* komponente zapisa.

5.4 Analiza mikroseizmičkog nemira

Analizom mikroseizmičkog nemira, prema postupku objašnjenom u poglavlju 4, računati su omjeri spektara koji su prikazani na slici 26. Kao što se vidi, niti jedna metoda ne ukazuje na pojavu amplifikacije. Vidljivo je da su amplitude na određenim frekvencijama manje od jedan, što bi upućivalo na prigušenje na tim frekvencijama. To nikako nije u skladu s rezultatima iz prethodnih poglavlja.



Slika 26: SSR horizontalnih i vertikalnih komponenata, te HVSR zapisa potresa za instrument na dva metra dubine.

Slični rezultati su dobiveni i za instrument na 20 metara te za sva četiri seta podataka. Kao što je opisano u Mucciarelli & Gallipoli (2001.), najvjerojatniji razlog takvih rezultata je problem zapisivanja mikroseizmičkog nemira koristeći akcelerometre. Kako bi se kvalitetno zapisao nemir, potrebno je koristiti velosimetre ili seizmografe.

6 Zaključak

Cilj ovog rada bila je usporedba dviju metoda za računanje stratigrafske amplifikacije korištenjem podataka zabilježenih na opservatoriju Kostanjek.

Na temelju analize četiriju zapisa potresa došlo se do zaključka da na klizištu Kostanjek postoji seizmička amplifikacija. U pravilu, postoji amplifikacija svih frekvencija barem za faktor dva u odnosu na referentni instrument, ali to nije neočekivano s obzirom na geologiju lokacije. Uočena je i znatno veća amplifikacija na određenim frekvencijama što može biti poslijedica rezonantnih efekata slojeva. Metode standardnog omjera spektara za sve analizirane zapise potresa daju frekvencije od približno 6 Hz kao dominantne frekvencije za pojavu amplifikacije. Također kod tri od četiri potresa zabilježeni su i izraženi sekundarni maksimumi na nešto višoj frekvenciji, oko 12 Hz. Odnos ovih dviju frekvencija mogao bi upućivati na pobuđivanje višeg moda. Faktor pojačanja na frekvenciji oko 6 Hz doseže iznos 10.

Osim dominantnih pojava pojačanja na frekvencijama oko 6 Hz, zapisi potresa od 15. rujna upućuju na pojavu amplifikacije i na nižim frekvencijama (oko 2 Hz). Također, potres od 9. travnja pokazuje iznimno jaku amplifikaciju za sve frekvencije između 2 i 6 Hz što nije zabilježeno kod ostalih potresa.

Uz analizu seizmičkog pojačanja na dubini od dva metra, provedena je i analiza pojačanja na dvadeset metara. Time je određen utjecaj slojeva od 20 do 90 metara, ali je dobivena i informacija o izravnom utjecaju slojeva između dva i 20 metara. Amplifikacija na dubini od 20 metara iznosom je manja od one na površini te je izraženija na nižim frekvencijama.

Uz metodu standardnog omjera spektara (SSR) provedena je i HVSR metoda. Ova metoda je u usporedbi sa SSR metodom davala manje iznose pojačanja signala (iako se oni ne smiju uzimati kao faktor pojačanja). Što se samih frekvencija tiče, one su bile u skladu s rezultatima SSR metode. Usporedbom amplifikacije vertikalne komponente na dva i 20 metara dubine došlo se do zaključka kako je amplifikacija vertikalne komponente na dva metra prevelika za uspješnu primjenu HVSR metode. Zaključeno je da je ta dodatna amplifikacija vertikalne komponente uzrok smanjene amplitude HVSR-a.

Usporedba horizontalnih komponenata gibanja na dva i dvadeset metara dovodi do zaključka da su slojevi između površine i 20 metara dubine glavni uzrok amplifikacije na površini. Slojevi od 90 do 20 metara dubine pokazuju nižu razinu pojačanja.

Analiza mikroseizmičkog nemira pokazala se neuspješnom za obje promatrane dubine. Obje metode dale su podjednake rezultate koji nisu usporedivi s onima dobivenim iz zapisa potresa. Na temelju toga došlo se do zaključka da su uzrok tome instrumenti koji nisu adekvatni za mjerenje nemira. Rezultati su pokazivali deamplifikaciju na frekvencijama za koje se prije odredila značajna amplifikacija te su kao takvi kontradiktorni i ne bi se trebali gledati kao relevantni.

S obzirom da je klizište Kostanjek velike površine te iznimno kompleksne geologije ovi zaključci ne mogu se primjenjivati na područje cijelog klizišta već na uže područje samog opservatorija. S obzirom da se na slici 4 vidi da su u neposrednoj blizini opservatorija stambeni objekti podaci o seizmičkom pojačanju klizišta mogli bi biti izuzetno važni.

Ovaj rad je prva sustavna obrada seizmičkih podataka prikupljenih na klizištu Kostanjek te kao takav može poslužiti kao polazište za daljnju obradu ovih podataka. S obzirom na dugi niz podatka iz tri bušotine raznih dubina prikupljenih na opservatoriju moguće je provesti i druga istraživanja.

Literatura

[1] Borcherdt, R.D., Effects of Local Geology on Ground Motion Near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 60, No. 1 (1970), str. 29-61.

[2] Borcherdt, 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. *Bulettin of the Seismological Society of America*. Vol. 66, No.2 (1976), str. 467-500

[3] Bordoni, P., Di Guilio, G., Haines, A.J., Cara, F., Milana, G., Rovelli, A., Issues in Choosing the References to Use for Spectral Ratios from Observations and Modeling at Cavola Landslide in Northern Italy. *Bulettin of the Seismological Society of America*. Vol. 100, No. 4. (2010), str. 1578-1613, doi:10.1785/0120090116

[4] Bronštejn, I.N., Semendjajev, K.A., Musiol, K., Mülig, H. *Matematički priručnik*. 4. izdanje. Zagreb, Golden marketing- Tehnička knjiga, 2004.

[5] Buttkus, B. *Spectral Analysis and Filter Theory in Aplied Geophysics*. Softcore reprint of the hardcover 1st edition, Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2000.

[6] Hanks, T.C., f_{max}. *Bulettin of the Seismological Society of America*. Vol. 72, No. 6 (1982), str. 1867-1879

[7] Herak, M. ModelHVSR - A Matlab Tool to Model Horizontal-to-vertical Spetral Ratio of Ambient Noise. *Computers & Geosciences* Vol 34 (2008), str. 1514-1526.

[8] Matsunami, K., Ikawa, T. *Continuous Seismic Monitoring System at Kostanjek Landslide Area*, prezentacija, 2011.

[9] Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž., Krkač, M. TXT-tool 2.385-1.2 A comprehensive landslide monitoring system: The Kostanjek landslide, Croatia. ICL landslide teaching tool. ICL (2013), str. 158-168, Kyoto, Japan.

[10] Mucciarelli, M., Gallipoli M.R., A Critical Review of 10 Years of Microtremor HVSR Technique. *Bollettimo di Geofisica Teorica ed Applicata*. Vol 42. (2001), No. 3-4, str. 255-266

[11] Nakamura, Y., A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute* Vol. 30 (1989) No. 1, str.25-33

[12] Sato, T., Nakamura, Y., Saita, J. Evaluation of the Amplification Characteristics of Subsurface using Microtremor and Strong motion - the Studies at Mexico City. *13th*

World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004, paper No. 862

[13] Sezawa, K., Possibility of the Free-oscillations of the Surface-layer excited by the Seismic-waves *The Imperial University of Tokyo Earthquake Research Institute Bulletin*. Eighth book No. 1, (1930), str.1-11

[14] Tsai, N.C.: Influence of Local Geology on Earthquake Ground Motion. Doktorski rad. California Institute of Technology, 1969

[15] Vrsaljko, D., Mihalić, S., Bošnjak, M., Krkač, M.: Lithostratigraphical Investigations of the Kostanjek Landslide Wider Area: Review of Existing Data and Planned Activities. *2nd Project Workshop on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods*. Rijeka, Hrvatska, 15.-17. 2011.

[16] Wen, K.L., Beresnev, I.A., Yeh, Y.T. Investigation of Non-Linear Site Amplification at Two Downhole Strong Ground Motion Arrays in Taiwan. *Earthquake Engineering ang Structural Dynamics*. Vol. 24,(1995), str. 313-324