

Analiza nelinearnog odziva tla na seizmičku pobudu na području grada Ivanca

Slukan, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:622564>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



Analiza nelinearnog odziva tla na seizmičku pobudu na području grada Ivanca

Slukan, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:622564>

Rights / Prava: [In copyright](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2020-10-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Ivan Slukan

ANALIZA NELINEARNOG ODZIVA TLA NA SEIZMIČKU POBUDU NA
PODRUČJU GRADA IVANCA

DIPLOMSKI RAD

Varaždin, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA NELINEARNOG ODZIVA TLA NA SEIZMIČKU POBUDU NA
PODRUČJU GRADA IVANCA

KANDIDAT:

IVAN SLUKAN

MENTOR:

doc. dr. sc. MARIO GAZDEK

Varaždin, 2018.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom
ANALIZA NELINEARNOG ODZIVA TLA NA SEIZMIČKU POBUDU NA
PODRUČJU GRADA IVANCA

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc. dr. sc. Maria Gazdeka.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 04.07.2018.

Ivan Slukan



Sažetak

Osim magnitude potresa i udaljenosti od epicentra potresa, na oštećenja nastala na nekoj lokaciji utječu i efekti lokalnog tla, pri čemu dolazi do amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine tla. Pri tom je važno razumjeti utjecaj lokalnih uvjeta tla na gibanja izazvana potresom, zbog mogućnosti pojave velikih oštećenja građevina, koja se često događaju u područjima mekih tala za vrijeme jakih podrhtavanja. Zato je važno procijeniti dinamički odziv tla u zoni podrhtavanja.

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja potresne ugroženosti grada Ivanca, koje je do sada provedeno upotrebom HVSR metode (Sanković, 2018). Tom se metodom određuje prirodna frekvencija i amplifikacija tla u prirodnom stanju, dok je u ovom radu upotrebom ekvivalentne linearne metode procijenjen odziv tla na seizmičku pobudu, odnosno na odabrana su ulazna gibanja jakih akceleracija.

Grad Ivanec je zanimljiv za provedbu ovog istraživanja jer su u njemu zastupljeni deblji mekši sedimenti u aluviju rijeke Bednje, čija se debljina postupno smanjuje prema planini Ivančici, čime se smanjuje dubina do osnovne stijene, pa se tako mogu dobiti različite karakteristike i različiti odzivi tla na seizmičku pobudu, na relativno malom području mjerenja.

Pomoću ekvivalentne linearne metode istraženo je područje grada i uža okolica, čime je dobivena amplifikacija sedimenata tla iznad osnovne stijene na 10 lokacija. Zaključno, izrađene su karte raspodjele amplifikacijskih faktora na određenim karakterističnim osnovnim frekvencijama građevina, koje su potom uspoređene s kartama raspodjele HVSR amplituda na istim frekvencijama.

KLJUČNE RIJEČI: ekvivalentna linearna metoda, HVSR, seizmički odziv tla, faktor amplifikacije

Abstract

In addition to earthquake magnitude and distance from the earthquake epicenter, local site effects also have an influence to damage on a specific location, resulting in amplification of seismic energy from the bedrock to the surface of the ground. Thereby it is important to understand the influence of local site effects on motions caused by the earthquake, due to the possibility of major damage to buildings, which often occur in soft soils during strong motions. It is therefore important to evaluate dynamic soil response in the threatened area.

This paper is a continuation of the research on earthquake vulnerability of Ivanec city, which has been implemented using HVSR method (Sanković, 2018). HVSR method determines the natural frequency and soil amplification in a natural state, whereas in this paper, using the equivalent linear method, the seismic response of the soil to the strong motions is assessed.

The city of Ivanec is interesting for the implementation of this research, because it contains thicker softer sediments in the alluvium of the Bednja river, whose thickness gradually decreases towards the mountain Ivančica, reducing the depth to the bedrock, so that different soil characteristics and different soil responses can be obtained, on a relatively small area of measurement.

Using the equivalent linear method, the area of the city and the surrounding area was examined and the result is the amplification of the soil sediments over the bedrock at 10 locations. In conclusion, maps of distribution of amplification factors on fundamental frequencies of characteristic structures are made, which are then compared to maps of HVSR amplitude distribution at the same frequencies.

KEYWORDS: Equivalent linear method, HVSR, seismic soil response, amplification factor

Sadržaj

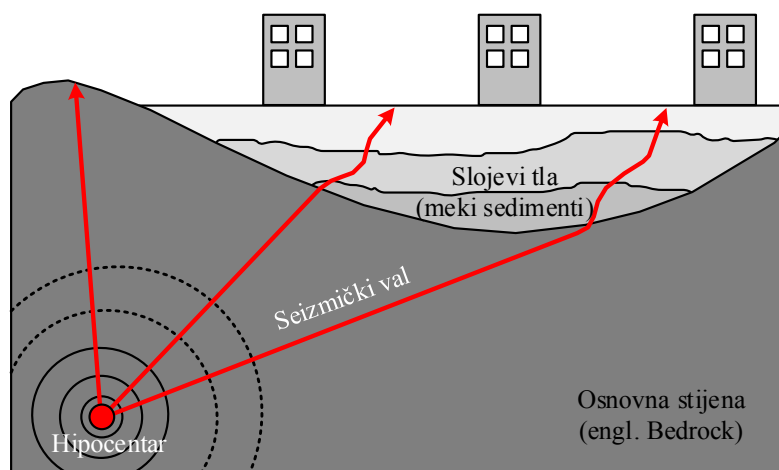
1. Uvod.....	1
1.1. Lokalni uvjeti tla i šteta od potresa	3
1.2. Dosadašnja istraživanja u gradu Ivancu	4
1.3. Cilj rada.....	5
2. Područje grada Ivanca	6
2.1. Geološka obilježja	6
2.2. Seizmološka obilježja.....	7
3. Ekvivalentna linearna analiza odziva tla.....	9
3.1. Spektar odziva.....	15
4. Rezultati mjerenja i diskusija	17
4.1. Ulazna gibanja.....	18
4.2. Ulazni modeli tla za analizu	18
4.3. Rezultati	20
5. Potencijalna opasnost rezonancije tlo-gradevina	33
6. Zaključak.....	39
Popis literature	
Popis slika	
Popis tablica	

1. Uvod

Posljedice potresa mogu biti gubitak ljudskih života, oštećenje i rušenje građevina (zgrada i mostova), kao i specijalnih objekata (nuklearne elektrane, velike brane, naftovodi, plinovodi, postrojenja kemijske industrije, itd.). Štete od potresa nastaju kao direktna posljedica dinamičkog odziva konstrukcije na gibanje tla. Pojave koje prate potres su požari, slijeganje terena, klizanje tla, likvefakcija pjeskovitog tla, lavine, poplave, visoki valovi i dr. U razvijenim državama je stupanj zaštite od potresa veći, a to se ogleda kroz dosljednu primjenu tehničkih rješenja za projektiranje i građenje objekata u seizmički aktivnim područjima (Meštrović, 2016).

Potres nastaje uglavnom na većim dubinama (desetak i više kilometara) zbog trenja po diskontinuitetima između tektonskih ploča u zemljinoj kori, koje se nalaze u razini tzv. osnovne stijene. Potresom se oslobađa pohranjena energija koja se širi u svim smjerovima iz hipocentra (izvora) u obliku seizmičkih valova (Murty i sur., 2012).

Problem seizmičkog prijenosa valova dijeli se na četiri dijela: izvor, geološki put kroz slojeve stijena, put kroz slojeve u blizini površine (tlo i stijene) te interakciju između plitkog tla i građevina (Slika 1.) (Kegyes-Brassai i Ray, 2015).



Slika 1. Prolazak seizmičke energije kroz geomedije.

Važno je razumjeti utjecaj lokalnih uvjeta tla na gibanja izazvana potresom, zbog mogućnosti pojave velikih oštećenja građevina, koja se često događaju u područjima mekih tala za vrijeme jakih podrhtavanja.

Prilikom potresa dolazi do amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine tla, pa na oštećenja prilikom potresa u velikoj mjeri utječu lokalni uvjeti tla. Primjer takvog utjecaja je potres iz 1985. u Meksiku magnitude $M_w = 8,3$, gdje je područje izgrađeno od mekih aluvijalnih sedimenata udaljeno 400 km od epicentra potresa pretrpjelo najveća oštećenja, dok se nekoliko kilometara dalje, na području izgrađenom od vulkanskih stijena potres jedva osjetio (Stanko i sur., 2017).

Jedan od glavnih izazova u području potresnog inženjerstva je procjena dinamičkog odziva tla u zoni podrhtavanja. Taj se problem obično odnosi na analizu odziva specifične lokacije ili studiju amplifikacije tla, što omogućava procjenu potencijala pojave likvefakcije, prvu fazu procjene stabilnosti kosina i nasipa, određivanje prirodnih frekvencija tla te procjenu spektra odziva za projektiranje i procjenu sigurnosti građevina.

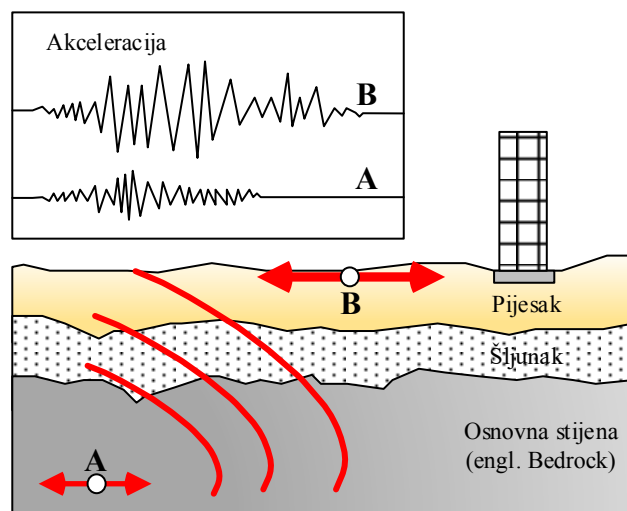
Za dinamičku analizu odziva tla postoje različite teorije, poput linearne, ekvivalentne linearne i nelinearne, od kojih svaka ima svoje prednosti i ograničenja (Hosseini i sur., 2010).

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja potresne ugroženosti grada Ivanca, koje je do sada provedeno upotrebom HVSR (engl. Horizontal to Vertical Spectral Ratio) metode (Sanković, 2018). U tom su radu provedena mjerenja mikrovibracija na 63 lokacije u samom gradu i široj okolici te su dobivene karte s prikazom osnovnih frekvencija tla, amplituda HVSR vrhova, debljina sedimenata i zaključno karte HVSR amplituda na određenim frekvencijama koje odgovaraju karakterističnim visinama građevina. Rezultati tog istraživanja su dali dinamičke karakteristike tla u prirodnom stanju, dok je u ovom radu procijenjen odziv tla za odabrana ulazna gibanja jakih akceleracija primjenom ekvivalentne linearne metode.

1.1. Lokalni uvjeti tla i šteta od potresa

Tijekom pojave dosadašnjih potresa, uočeno je da su posljedična gibanja u mekim tlima u pravilu znatno intenzivnija od gibanja u bliskim izdancima stijena, ovisno o lokalnim geološkim i topografskim uvjetima (Bardet, Ichii i Lin, 2000).

Ta se pojava pojačanja gibanja naziva amplifikacija tla, koja u teoriji predstavlja povećanje amplituda seizmičkih valova koji prolaze kroz meke slojeve tla u blizini površine. Amplitude se povećavaju zbog niske impedancije slojeva tla u blizini površine (impedancija se definira kao produkt gustoće određenog volumena tla i brzine širenja valova). U praksi, izraz amplifikacija tla predstavlja sve razlike promatranih parametara gibanja tla između dvije točke (primjerice A i B na Slici 2), bez obzira nastaju li one zbog razlika u impedanciji ili su posljedica nekih drugih stanja i uvjeta (Hosseini i sur., 2010).



Slika 2. Amplifikacija tla. Zapis akcelerograma ukazuje na manji intenzitet podrhtavanja u hipocentru potresa (A) i amplificirano podrhtavanje u mekom sloju na površini (B).

Utjecaj lokalnih uvjeta tla određuje se uz pretpostavku nelinearnih odnosa naprezanja i deformacija, a preko odnosa modula posmika i odgovarajućih posmičnih deformacija. Kako nelinearna amplifikacija ovisi o razini pobude, treba izračunati amplifikacijski faktor (AF) u ovisnosti o maksimalnoj akceleraciji na razini osnovne stijene. Amplifikacijski faktor se definira kao omjer spektra odziva na površini tla i spektra odziva na osnovnoj stijeni, kao funkcija perioda. Amplifikacijski faktor na površini definira se

za spektralni period 0,01 s, dok se maksimalni amplifikacijski faktor definira kao maksimalna amplifikacija ulaznog gibanja na osnovnom periodu tla.

Vršna akceleracija u razini površine terena se dobije iz poznate vršne akceleracije u razini osnovne stijene i poznatog sastava lokalnog tla. Stijenu ovdje treba shvatiti kao tlo koje ima brzinu posmičnih elastičnih valova, $v_{s,30} > 800$ m/s (prema EC8).

Potencijalno jak utjecaj lokalnih uvjeta tla je poznat već gotovo 200 godina. Oni su prepoznati 1981. u potresu u Japanu, 1906. u San Franciscu i 1933. u Long Beach-u. Prvo kvantitativno istraživanje amplifikacije sedimenata u južnoj Karolini proveo je Gutenberg 1957. Od tada su provedena mnoga druga istraživanja (Hosseini i sur., 2010).

1.2. Dosadašnja istraživanja u gradu Ivancu

U gradu Ivancu prethodno su provedena HVSR (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) mjerenja mikro seizmičkog nemira na 68 lokacija (Sanković, 2018). HVSR je neinvazivna geofizička metoda koja se najčešće koristi za seizmičko mikrozoniranje, odnosno za procjenu potresne ugroženosti na temelju osnovne frekvencije tla i amplifikacije. Pritom su dobivene karte HVSR amplituda s izdvojenim frekvencijama za karakteristične visine građevina s kojima se procjenjuje potencijal njihove potresne ugroženosti.

HVSR metoda pogodna je za procjenu osnovne frekvencije i amplifikacije za tzv. prirodno stanje bez potresne pobude. Ekvivalentna linearna (EQL) metoda koja se koristila za potrebe ovog diplomskog rada smatra se kao aproksimacija nelinearnog ponašanja tla uslijed potresne pobude. Pritom se radi numeričko modeliranje pomoću kojeg se može predvidjeti ponašanje tla prema seizmičkom hazardu uslijed jačih potresa. Analiza nelinearnog odziva tla predstavlja skup krivulja degradacija modula smicanja s jačim deformacijama kod mekih sedimenata poput pijeska ili šljunka.

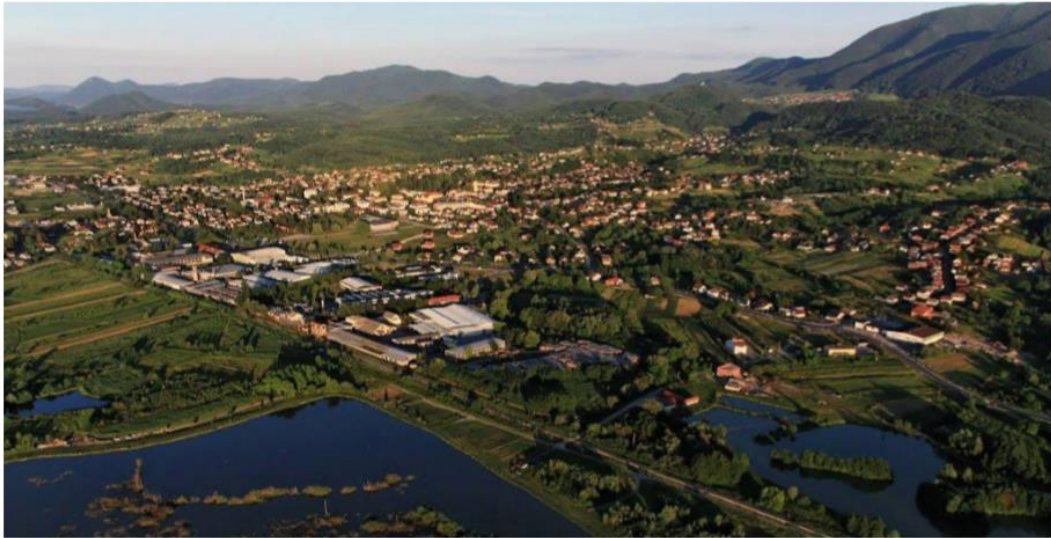
1.3. Cilj rada

Cilj rada je za odabrana ulazna gibanja (potresni scenariji) na 10 lokacija u gradu Ivancu i užoj okolini odrediti: i) vršnu akceleraciju na površini tla (engl. free field Peak Ground Amplification), ii) spektralnu akceleraciju na površini tla (S_a), iii) amplifikacijski faktor na površini tla (AF) te iv) maksimalni amplifikacijski faktor na osnovnom periodu tla.

Zaključno, rezultati će omogućiti izradu karata s prikazom amplifikacijskih faktora na određenim frekvencijama i uspoređivanje s kartama HVSR amplituda na istim frekvencijama. Usporedba pruža uvid u razlike stanja pri prirodnim uvjetima i uvjetima pri različitim seizmičkim pobudama.

2. Područje grada Ivanca

Grad Ivanec se nalazi u južnom dijelu mikroregije Gornje porječje rijeke Bednje, u zapadnom dijelu Varaždinske županije na sjeveru Hrvatske. Zauzima sjeverne padine središnjeg dijela Ivančice, pripadajuće pribrežje i dio doline rijeke Bednje (Slika 3.). Ivanec broji nešto više od 5000 stanovnika, a šire područje grada obuhvaća 29 naselja s još 10 000 stanovnika.



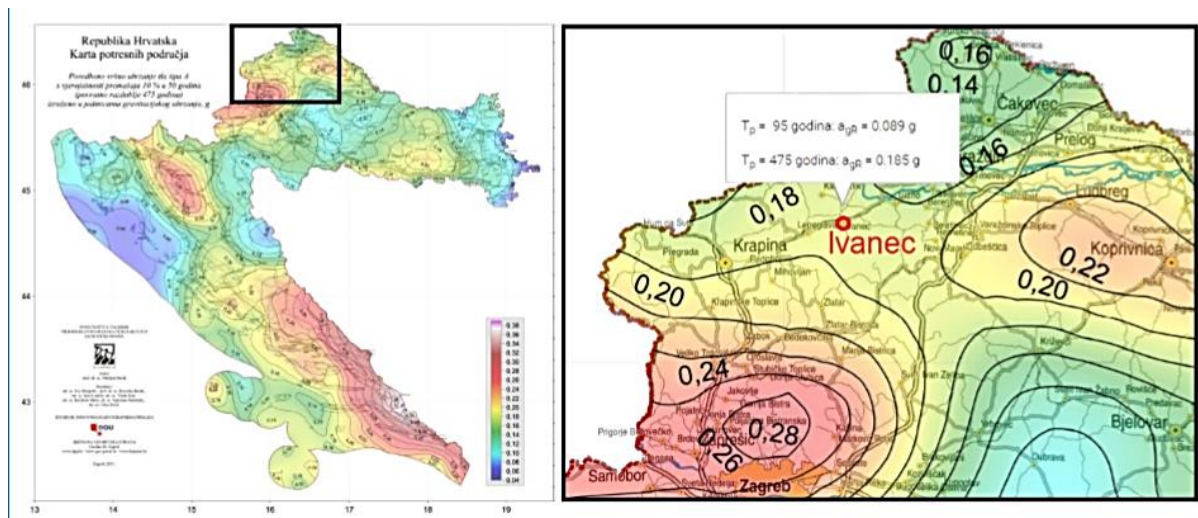
Slika 3. Grad Ivanec i okolica u podnožju Ivančice (Belcar, 2013).

2.1. Geološka obilježja

U geološkom smislu, Ivančica je horst ili timor, a tijelo tog masiva čine vapnenci i glineni škriljci pelezojske starosti na kojima se nalaze mezozojski (trijaski) vapnenci i dolomiti. Obodne strane i podnožje su izgrađene od tercijarnih slojeva, pretežno od oligocenskih pješčenjaka i lapora, miocenskih i litotamnijskih vapnenaca te pliocenskih pješčenjaka i lapora. Po padinama Ivančice te sedimente pokrivaju kvartarne diluvijalne glinovite naslage. Tektonski pokreti i pomaci su u geološkoj prošlosti bili intenzivni pa je zbog toga Ivančica ostala kao horst. Veliki rasjedi sa sjeverne i južne strane zasijecaju njeno tijelo, dok je brojni manji diskontinuiteti dodatno rasjedaju (Malez, 1952).

2.2. Seizmološka obilježja

U posljednjih 200 godina grad Ivanec je podrhtavao od nekoliko jačih potresa magnitude $M > 4$. Povijesno gledano, u zadnjih 500 godina područje Ivanečkog kraja podrhtavalo je i od nekoliko bliskih potresa magnitude $M > 6$. Gledano sa strane procjene seizmičkog hazarda Ivanečkog kraja, horizontalno vršno ubrzanja tla tipa A (agR) za povratna razdoblja od $T_p = 95$ i 475 godina izraženih u jedinicama gravitacijskog ubrzanja iznosi 0.089 g i 0.185 g, Slika 4.



Slika 4. Poredbeno vršno ubrzanje tla tipa s vjerojatnosti premašaja 10% u 50 godina za povratno razdoblje 475 godina izraženo u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g (<http://seizkarta.gfz.hr>).

Na području grada Ivanca, u krugu od 50 km, zabilježen je velik broj potresa različite jakosti u razdoblju od 1459. do 2016. godine. Područje Ivančica – Kalnik – Ludbreg – Koprivnica je doživjelo umjerenu seizmičnost s makroseizmičkom jakošću od 5.0 do 5.5 po Richteru. Epicentralna područja Varaždin – Ivančica – Kozjansko i danas pokazuju značajnu seizmičku aktivnost (Herak D. i sur., 2009.), te postoje samo vrlo dvojbeni podaci o povijesnim potresima ovih područja (primjerice: 1459. potres blizu Varaždina, $I_0 = IX$ °MCS, bio bi magnitude 6.74 po Richteru, potres nedaleko od Čakovca 1738. s magnitudom od $M = 6.02$ po Richteru te potres nedaleko od Zagreba s magnitudom $M = 6.18$ po Richteru. Ivanečki je kraj tijekom formiranja planine Ivančice u geološkoj prošlosti podrhtavao neusporedivo jače od najjačih potresa koji su registrirani primjerice u svibnju 1926. ($M = 4.94$) ili rujnu 1990. godine ($M = 5.0$) s epicentrom nedaleko od Zagreba (Kraš, 2016.).

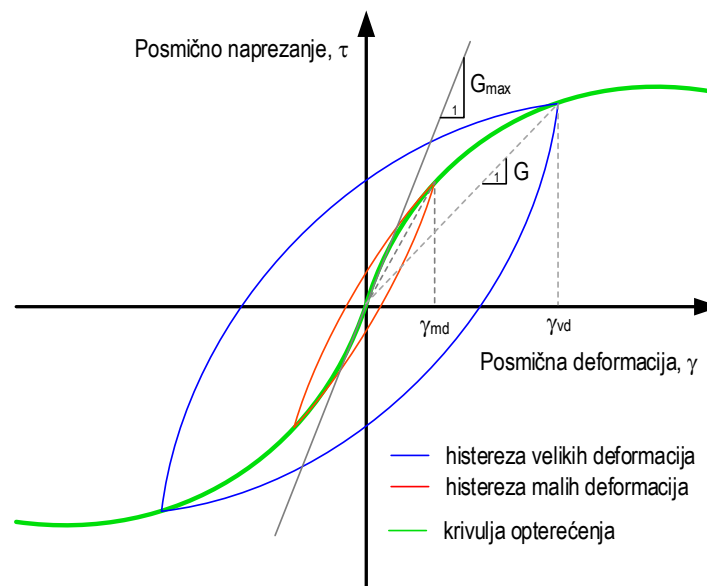
Za pojedine potrese koji su se dogodili u okolici grada Ivanca dostupne su i detaljnije informacije, a posebno su zanimljivi potresi koji su se dogodili 1938. i 1982. godine. O potresu 27. ožujka 1938. s epicentrom nedaleko od Koprivnice, postoji detaljan i slikovit opis njegove jačine i posljedica koje je uzrokovao na području Ivanca. Članak je objavljen u listu Varaždinske novosti. Opis potresa glasi: „*Ivanec i cijela okolica potresli su se u nedjelju u 12,28 sati od žestokog potresa zemlje. Bila su dva udara: jedan vertikalni u trajanju od 45 sekundi i jedan valoviti od tri sekunde. Potresu je prethodila mukla podzemna tutnjava, a smjer je bio od juga prema sjeveru. Potres je došao do nas iz bilogorskog područja. Potres se ponovio 4. travnja 1938. ali slabije jačine i trajanja 23 sek. Iste godine potresi su zahvatili Ivanec 11. i 12. listopada, kada je zabilježeno osam pomicanja tla. Uz podzemnu tutnjavu popucali zidovi i porušili se dimnjaci.*“ (Kraš, 2016). Takav opis daje dovoljno informacija o kretanju potresa na tom području, a one mogu poslužiti kod analiziranja ostalih potresa u okolici Ivanca.

Za područje Ivanca važan je bio i potres iz 16. ožujka 1982. godine s epicentrom ispod planine Ivančice. Magnituda potresa iznosila je $M = 4.5$. Uzrokovao je znatna oštećenja, posebice na zgradi Srednje škole Ivanec, koja je zahtijevala obnovu pa je pritom izgrađeni i novi dio škole. Nakon prvih obavijesti o posljedicama potresa, kako o epicentru tako i na rubovima njegovih amplituda, Regionalni zavod za zaštitu spomenika kulture u Zagrebu je već 18. ožujka uputio prvu ekipu na područja općine Ivanec, Novi Marof i Zlatar Bistrica. Oštećenja su se pojavila i 20 km od epicentra kod dvorca Trakošćan. Kula dvorca kao i pod drugog kata bili su oštećeni potresom. U svom istraživanju Stanko i drugi (2016) su potvrdili da je veći dio energije ovog potresa bio usmjeren duž aluvija korita rijeke Bednje od planine Ivančice prema dvorcu Trakošćan. U užem području Ivanca dogodila su se još tri značajnija potresa magnitude veće od 4 po Richteru i to potres 12. studenog 1836. magnitude $M = 5.66$ po Richteru, 29 svibnja 1905. magnitude $M = 4.66$ po Richteru te potres 11. lipnja 1973. magnitude $M = 4$ po Richteru. Podrhtavanje šireg područja oko Ivanca i ovdje pokazuje da unutrašnjost Zemlje nikad ne miruje.

3. Ekvivalentna linearna analiza odziva tla

Za procjenu amplifikacije seizmičkih valova, dinamički odziv tla se razmatra kao linearni za male deformacije. Kod velikih naprezanja i deformacija, rezultati laboratorijskih testiranja uzoraka tla pokazali su nelinearne veze koje predstavljaju nelinearni karakter odziva tla. Razina poprečne deformacije kod cikličkog opterećenja tla, kakvo se događa za vrijeme potresa, i broj ciklusa opterećenja su dva glavna parametra koji utječu na promjenu modula posmika i stupnja prigušenja u tlu. Kod malih deformacija gotovo da i nema degradacije, dok se ona povećava s povećanjem deformacija, čime se nelinearno mijenjaju modul posmika i stupanj prigušenja (Dobry and Vucetic, 1987).

Prvo nelinearno ponašanje tla pod cikličkim opterećenjem su proučavali Seed i Idriss (1969), koji su obavili brojne eksperimente kako bi uspostavili odnos između naprezanja i deformacija u različitim tipovima tla. Slika 5.



Slika 5. Histereza odnosa naprezanja i deformacija. Kod malih deformacija je modul posmika maksimalan.

Mnogi su autori pokušavali odrediti dokaze nelinearnosti vidljive na seizmološkim podacima, te procijeniti do koje razine utječu na jaka podrhtavanja u tlu (npr. Chin i Aki, 1991; Beresnev i sur., 1995; Beresnev i sur., 1998; Su i sur., 1998; Cultrera i sur., 1999). U tim studijama, nelinearni efekt uzrokuje redukcije amplituda valova u vremenskoj domeni i premještanje dominantnih frekvencija, te smanjenje vršnih vrijednosti u

frekvencijskoj domeni. To je zbog nelinearnog odziva materijala koji uzrokuje velike promjene u elastičnim svojstvima medija ovisno o amplitudama valova.

Parametarska istraživanja su pokazala da sekantni modul posmika, dubina osnovne stijene i vrsta tla imaju značajan utjecaj na rezultate analize odziva tla.

U ekvivalentnom linearnom pristupu koji su predložili Schnabel i sur. (1972) učinci nelinearnosti se aproksimiraju izvođenjem niza linearnih analiza u kojima se mijenjaju prosječni ili sekantni modul posmika i stupanj prigušenja, dok njihove vrijednosti ne budu u skladu s razinom deformacija izazvanih u tlu.

Ekvivalentna linearna metoda analize odziva tla (EQL) je numerička tehnika kojom se realno nelinearno dinamičko ponašanje tla aproksimira ekvivalentnim linearnim pristupom. Metoda izračunava gibanje u tlu iz ulaznog gibanja u osnovnoj stijeni, koristeći dinamička svojstva tla na lokaciji, radi predviđanja utjecaja lokalnih uvjeta tla na amplifikaciju seizmičkih gibanja. Jednodimenzionalnu EQL analizu odziva tla su 1968. predstavili Idriss i Seed, a implementirali su je Schnabel i sur. 1972. u računalnom programu SHAKE, te Hashash (2012) u programu DEEPSOIL.

EQL analiza odziva tla sastoji se od četiri koraka:

1. Definiranje geometrije slojeva tla i brzina posmičnih valova
2. Odabir odgovarajućih dinamičkih svojstava: modula posmika i krivulja prigušenja
3. Specifikacija ulaznog gibanja
4. Propagacija ulaznog gibanja kroz profil tla za procjenu gibanja u tlu i maksimalnih deformacija u svakom sloju.

Hashash (2012)

Ekvivalentno linearno modeliranje koristi odnose koji opisuju varijaciju modula posmika materijala (G) i histeretičkog stupnja prigušenja (ζ) s posmičnom deformacijom. Ti odnosi se nazivaju smanjenje modula posmika i krivulje prigušenja. Jedan od prvih računalnih programa koji se bavio tom tematikom bio je SHAKE, koji računa odziv u horizontalnom sustavu tlo-stijena izloženom prolaznim vertikalno propagirajućim posmičnim valovima. Program se bazira na višestrukim teorijama refleksije i nelinearnosti tla te se on smatra ekvivalentnom linearnom metodom. Osnovne pretpostavke koje se pritom koriste su:

1. Slojevi tla su horizontalni i pružaju se u beskonačnost (horizontalno neomeđeni)
2. Površina tla je ravna
3. Svaki sloj tla je kompletno definiran modulom posmika G i prigušenjem ξ kao funkcijom posmične deformacije γ , debljinom h i jediničnom težinom ρ . Vrijednosti G i ξ se obično određuju geotehničkim in-situ ispitivanjima (npr. Standard Penetration Test SPT, Cone Penetration Test CPT)
4. Ponašanje nelinearnog cikličkog materijala se aproksimira linearnim viskozno-elastičnim (Kelvin-Voigt) konstitutivnim modelom i implementira se ekvivalentnom linearnom metodom
5. Podrhtavanja uzrokovana potresom su prostorno jednoliki horizontalni posmični valovi koji propagiraju vertikalno.

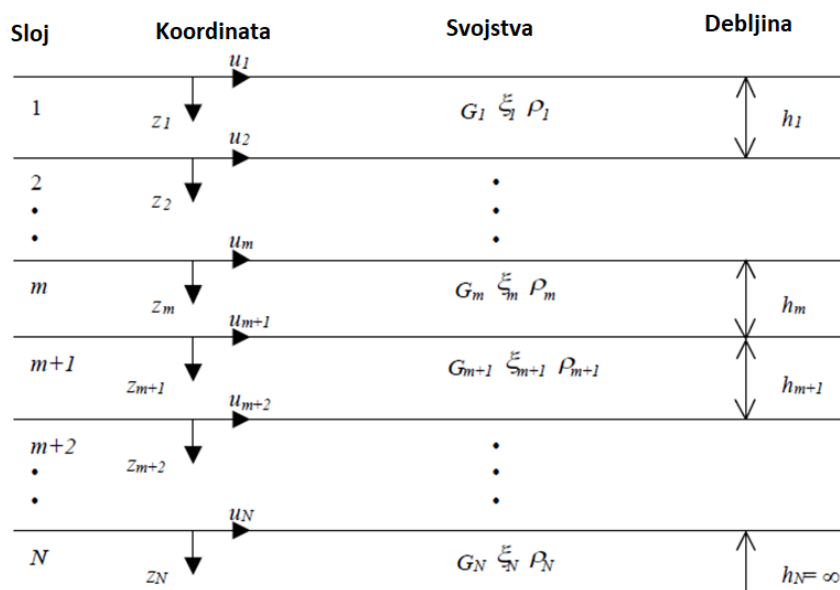
U ovom radu je korišten računalni program DEEPSOIL, razvijen 1998. godine, čijem su razvoju pridonijeli mnogi istraživači, a sam program koristi iste temeljne principe kao i SHAKE. Za provedbu ekvivalentne linearne metode koristi se iterativni postupak za odabir modula posmika i stupnja prigušenja tla. G/G_{max} i stupanj prigušenja (%) definiraju se kao funkcije posmične deformacije (Hashash i sur., 2015).

Za ilustraciju osnovnog principa u DEEPSOIL-u, razmatraju se jednoliki slojevi tla koji leže na elastičnom sloju stijene, te se oni pružaju u beskonačnost, Slika 6.

Za određivanje utjecaja lokalnog tla, potrebno je ustanoviti svojstva slojeva tla na lokaciji. Što se tiče geotehničkih istraživačkih radova za potrebe analize utjecaja lokalnog tla, potrebno je poznavati, ne samo raspored slojeva tla po dubini, već i neka njihova fizikalna svojstva od kojih je, za utjecaj lokalnog tla, potrebno poznavati brzine posmičnih elastičnih valova (v_s), za svaki sloj. Te brzine služe za proračun modula posmika, G_{max} (1), za male vrijednosti deformacija, prema izrazu:

$$G_{max} = \rho \cdot v_s^2 \quad (1)$$

Brzine posmičnih valova određuju se iz geofizičkih mjerenja, s površine i/ili u bušotinama. Od poznatijih metoda mjerenja s površine koriste se seizmička refrakcija, MASW (engl. Multichannel Analysis of Surface Waves) i SASW (engl. Spectral Analysis of Shear Waves), a u bušotinama se koriste down-hole i cross-hole metode.

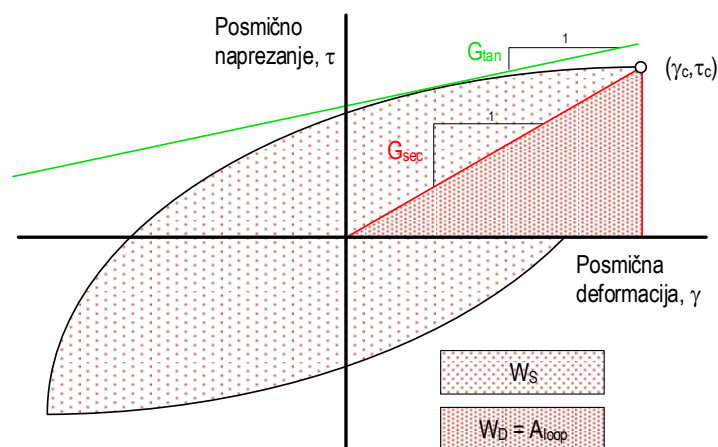


Slika 6. Jednodimenzionalni uslojeni sustav modela tla (Schnabel i sur., 1972).

Ekvivalentni linearni modul posmika G_{eq} uzima se kao sekantni posmični modul posmika G_{sec} ($G_{eq} \equiv G_{sec}$) koji ovisi o amplitudi (iznosu) posmične deformacije γ . G_{sec} (2) na krajevima simetričnih ciklusa iznosi:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2)$$

gdje su τ_c i γ_c amplitude posmičnog naprezanja i posmične deformacije. Nelinearni i histeretički odnosi naprezanja i deformacija tla se aproksimiraju tijekom cikličkih opterećenja kao što prikazuje Slika 7.



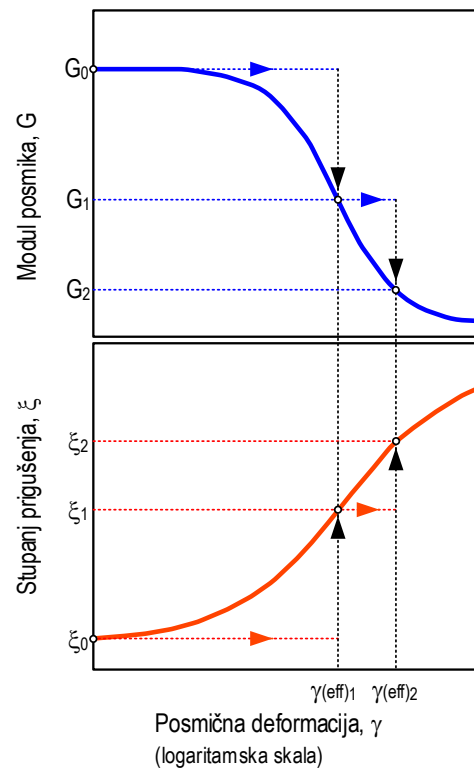
Slika 7. Ekvivalentni linearni model, histeretička krivulja (histereza) odnosa naprezanja i deformacija.

Ekvivalentni linearni stupanj prigušenja ξ je stupanj prigušenja koji u jednom ciklusu producira gubitak energije koji odgovara histeretičnoj $\tau - \gamma$ petlji nepovratnog ponašanja tla. Kritični stupanj prigušenja ξ (3) se može izraziti pomoću W_D i W_S (Kramer, 1996):

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{loop}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (3)$$

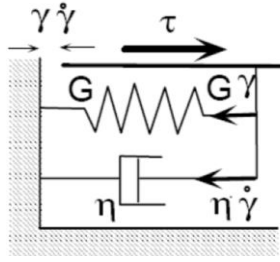
W_D i W_S predstavljaju energiju koja se disipira za vrijeme cijelog ciklusa opterećenja i maksimalnu energiju deformacije koja se pohranjuje u sustavu.

Slika 8. prikazuje varijacije modula posmika i stupnja prigušenja s obzirom na promjenu posmične deformacije. $G - \gamma$ i $\xi - \gamma$ krivulje predstavljaju specifična obilježja ponašanja tla koje je izloženo cikličkom opterećenju.



Slika 8. Iteracija modula posmika i stupnja prigušenja s posmičnom deformacijom u ekvivalentnoj linearnoj analizi.

Ekvivalentni linearni pristup se sastoji od modificiranog Kelvin-Voigtovog modela koji uzima u obzir neke vrste nelinearnosti tla. Slika 9. ilustrira taj model, pri čemu je G modul posmika, a η je viskoznost.



$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(t)}{\partial t}$$

Slika 9. Shematski prikaz odnosa naprezanja i deformacija koji se koristi u ekvivalentnom linearnom modelu (Kelvin-Voigtov model).

Za harmonijske valove, rješenja jednodimenzionalne jednadžbe gibanja za vertikalno propagirajuće posmične valove su pomaci $u(z,t)$ i odgovarajuća posmična naprezanja $t(z,t)$ koja se mogu odrediti iz izraza (4) i (5):

$$u(z, t) = E \cdot e^{i(\omega t + K^* z)} + F \cdot e^{i(\omega t - K^* z)} \quad (4)$$

$$\tau(z, t) = G^* \frac{\partial u}{\partial z} = (G + i\omega\eta) \frac{\partial u}{\partial z} = G(1 + 2i\xi) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5)$$

U tim je izrazima ω kružna frekvencija harmonijskog vala, a K^* je kompleksni valni broj definiran omjerom (6):

$$K^* = \frac{\omega}{v_s^*} \quad (6)$$

gdje je v_s^* kompleksna posmična brzina vala koja se može izraziti u kompleksnoj ravnini:

$$v_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{G(1+2i\xi)}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{G}{\rho}} (1 + i\xi) = v_s(1 + i\xi) \quad (7)$$

Kompatibilnost gibanja (8) na granici/kontaktu između slojeva m i $m+1$ i kontinuitet posmičnih naprezanja (9) omogućavaju izražavanje koeficijenata E i F jednadžbe:

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{iK_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-iK_m^* h_m} \quad (8)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{iK_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-iK_m^* h_m} \quad (9)$$

gdje je α_m^* (10) kompleksni stupanj prigušenja na granici između slojeva m i $m+1$:

$$\alpha_m^* = \frac{K_m^* G_m^*}{K_{m+1}^* G_m^*} = \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \quad (10)$$

Kao rezultat modeliranja dobiva se amplifikacijska funkcija A_{mn} (11) koja povezuje pomake na vrhu slojeva m i n:

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_m} \quad (11)$$

Glavni nedostatak linearne metode odnosi se na nemogućnost da se uzme u obzir utjecaj velike deformacije, koja se promatra eksperimentalno s obzirom na modul posmika i stupanj prigušenja. Stoga je u modeliranju najbolje primijeniti metodu iteracije i postaviti vrijednosti smicanja.

U ekvivalentnom linearnom pristupu modul posmika i stupanj prigušenja su funkcije amplituda posmične deformacije koje se određuju pomoću iteracija, tako da postanu odgovarajuće razini deformacije koja je izazvana u svakom sloju. Efektivna posmična deformacija (12) u ekvivalentnoj linearnoj analizi se tada računa kao:

$$\gamma_{eff} = R_y \gamma_{max} \quad (12)$$

gdje je γ_{max} maksimalna posmična deformacija u sloju, a R_y (13) faktor redukcije deformacije koji se često uzima kao:

$$R_y = \frac{M-1}{10} \quad (13)$$

gdje je M magnituda potresa.

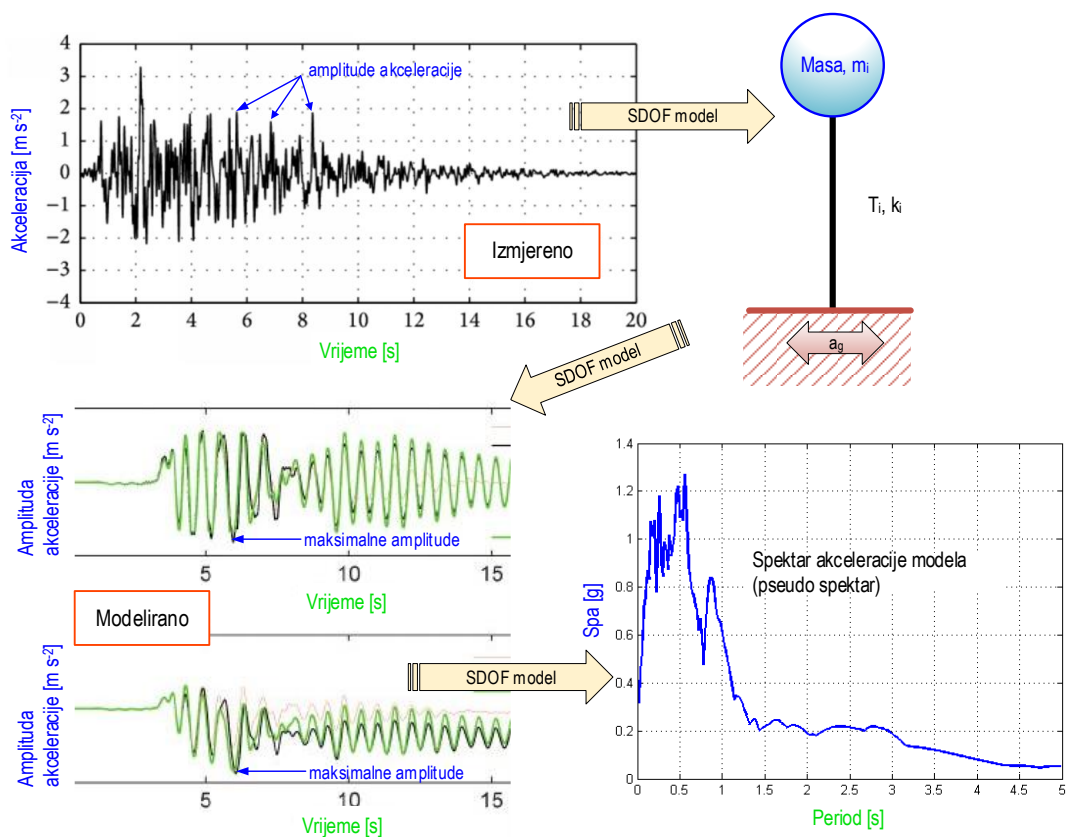
Ekvivalentna linearna metoda koristi linearna svojstva za svaki element modela. Svojstva ostaju konstantna kroz cijeli period podrhtavanja te se procjenjuju iz srednje razine dinamičkog gibanja (Hashash, 2012).

3.1. Spektar odziva

Za projektiranje i inženjersko vrednovanje zapisa potresa iskazanog u obliku toka akceleracije za vrijeme trajanja potresa koriste se spektri odziva (engl. Response Spectra).

Pod pojmom spektri odziva podrazumijevaju se spektri pomaka, brzine i ubrzanja. U praksi se najviše koriste spektri ubrzanja, a predočeni su u svom jednostavnom „zaglađenom“ obliku.

Spektar odziva (Spektralna akceleracija S_a , Slika 10.) prikazuje odziv tla modeliranog kao sustav s jednim stupnjem slobode i to za spektralne periode na kojima se može očekivati najveća akceleracija za određeno ulazno potresno gibanje. Radi se niz linearnih dinamičkih analiza iz kojih se izdvajaju samo maksimalni odzivi i to kao apsolutne vrijednosti. Spajanjem maksimalnih odziva dobiva se krivulja koja se naziva spektar odziva. Ulazno opterećenje je akcelerogram potresa. Rezultat proračuna je vremenski tok promjene promatrane veličine za koju se želi proračunati spektar odziva (Meštrović, 2016).



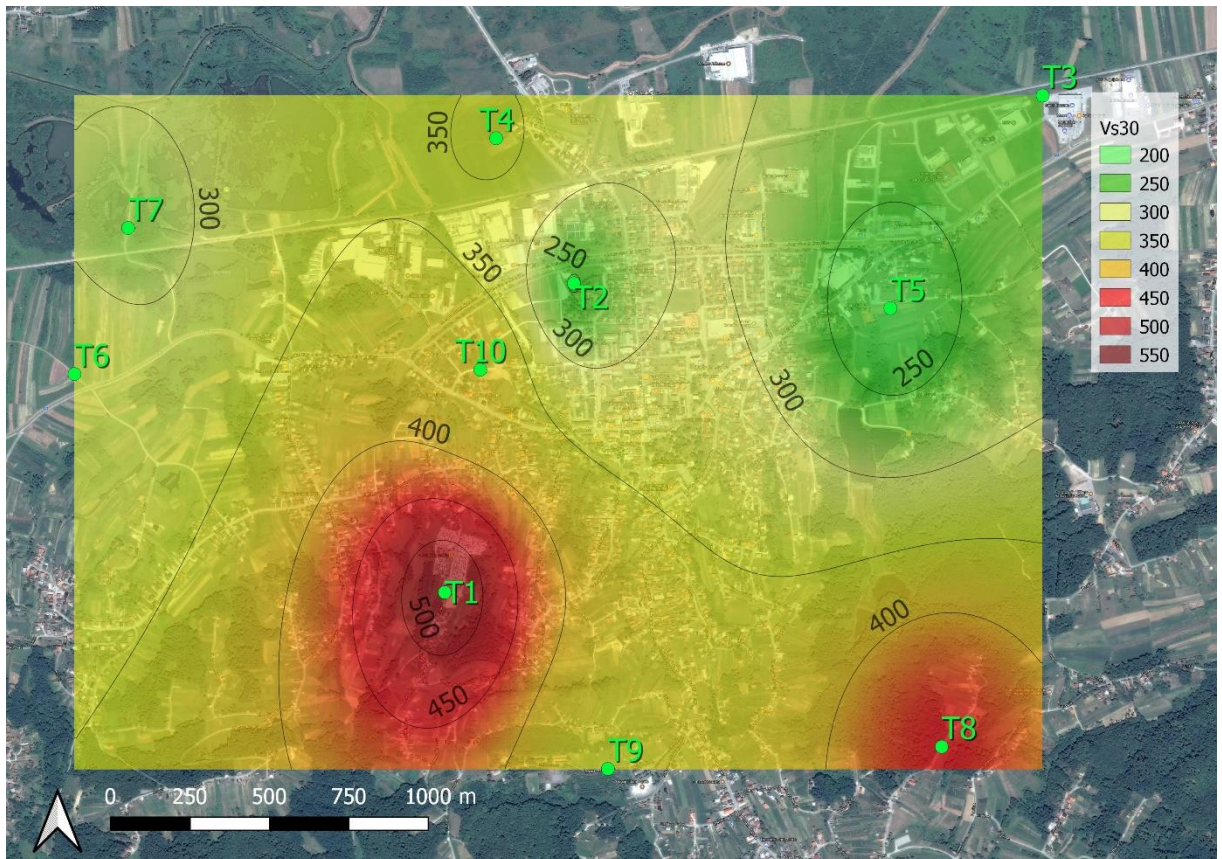
Slika 10. Postupak proračuna spektra odziva.

Postupak proračuna spektra odziva po koracima može se prikazati:

- i) Akcelerogram potresa →
- ii) Sustav s jednim stupnjem slobode (SDOF) →
- iii) Linearna dinamička analiza sustava → Određivanje perioda oscilacije T → Apsolutna vrijednost maksimalnog odziva →
- iv) Unos vrijednosti u spektralni dijagram (Meštrović, 2016).

4. Rezultati mjerenja i diskusija

Jedan od parametara lokalnih uvjeta tla potrebnih za EQL analizu je brzina posmičnih valova u tlu, pa su za potrebe ovog rada izvedena mjerenja MASW metodom (Park, 2018) na 10 lokacija u Gradu Ivancu i užoj okolici. Brzina $v_{s,30}$ je prosječna brzina posmičnih seizmičkih valova do dubine 30 m. Slika 11. prikazuje odabrane lokacije i dobivene rezultate.



Slika 11. Prikaz lokacija MASW mjerenja s raspodjelom brzina posmičnih valova.

4.1. Ulazna gibanja

Jednodimenzionalna EQL analiza upotrebom zabilježenih akceleracija jakih potresa, odnosno „Time Series“ (TS) se koristila u programu DEEPSOIL. Takav se pristup analizi naziva klasični pristup (npr. Hashash i sur., 2011).

Vremenski nizovi ulaznih akceleracija 22 jaka potresa, epicentralnih udaljenosti 10 – 30 km (Tablica 1.) skalirani su na dvije vrijednosti: 0,09g i 0,19g.

Tablica 1. Odabrana ulazna gibanja: akceleracije jakih potresa preuzeta iz PEER baze (<http://ngawest2.berkeley.edu>)

Nr	Record Sequence Number	EARTHQUAKE	YEAR	STATION	Vs,30 (m/s)	Mw	PGA (g)	Hyp. Depth (km)	Epic. Dist. (km)	Hyp. Dist. (km)
1	23	San Francisco-USA	1957	Golden Gate Park	874	5.28	0.0863	8	11.13	13.7
2	43	Lytle Creek-USA	1970	Cedar Springs, Allen Ranch	813	5.33	0.0429	8	18.87	20.5
3	72	San Fernando-USA	1971	Lake Hughes #4	822	6.61	0.1786	13	24.18	27.46
4	98	Hollister-USA-03	1974	Gilroy Array #1	1428	5.14	0.1053	6.11	11.08	12.66
5	146	Coyote Lake-USA	1979	Gilroy Array #1	1428	5.74	0.1059	9.6	12.56	14.9
6	643	Whittier Narrows-USA-01	1987	LA - Wonderland Ave	1223	5.99	0.0465	14.6	28.48	32.01
7	663	Whittier Narrows-USA-01	1987	Mt Wilson - CIT Seis Sta	822	5.99	0.1599	14.6	19.56	24.41
8	680	Whittier Narrows-USA-01	1987	Pasadena - CIT Kresge Lab	969	5.99	0.1034	14.6	13.85	20.12
9	715	Whittier Narrows-USA-02	1987	Mt Wilson - CIT Seis Sta	822	5.27	0.1500	13.3	18.75	22.98
10	765	Loma Prieta-USAA	1989	Gilroy Array #1	1428	6.93	0.4332	17.48	28.64	33.55
11	957	Northridge-USA-01	1994	Burbank - Howard Rd.	822	6.69	0.1427	17.5	23.18	29.05
12	1011	Northridge-USA-01	1994	LA - Wonderland Ave	1223	6.69	0.1408	17.5	18.99	25.82
13	1108	Kobe, Japan	1995	Kobe University	1043	6.9	0.2962	17.9	25.4	31.08
14	1165	Kocaeli, Turkey	1999	Izmit	811	7.51	0.1939	15	5.31	16.86
15	1645	Sierra Madre-USA	1991	Mt Wilson - CIT Seis Sta	822	5.61	0.2345	12	6.46	13.63
16	1696	Northridge-USA-06	1994	Burbank - Howard Rd.	822	5.28	0.0604	13.09	16.21	20.83
17	1709	Northridge-USA-06	1994	LA - Griffith Park Observatory	1016	5.28	0.0489	13.09	20.53	24.35
18	1715	Northridge-USA-06	1994	LA - Wonderland Ave	1223	5.28	0.0527	13.09	15.71	20.45
19	1943	Anza-USA-02	2001	Idyllwild - Keenwild Fire Sta.	845	4.92	0.0372	15.2	29.07	32.81
20	3548	Loma Prieta-USA	1989	Los Gatos - Lexington Dam	1070	6.93	0.4438	17.48	20.35	26.83
21	3718	Whittier Narrows-USA-02	1987	LA-Wonderland Ave	1223	5.27	0.0184	13.3	26.18	29.37
22	4312	Umbria-Italy-03	1984	Gubbio	922	5.6	0.050	9	17.08	19.31

Tumač: vs,30: prosječna brzina posmičnih seizmičkih valova do dubine 30 m, [m/s]

Mw: Magnituda potresa

PGA: vršna akceleracija (engl. Peak Ground Acceleration), [g]

Hyp. Depth: hipocentralna dubina, [km]

Epic. Dist: epicentralna udaljenost, [km]

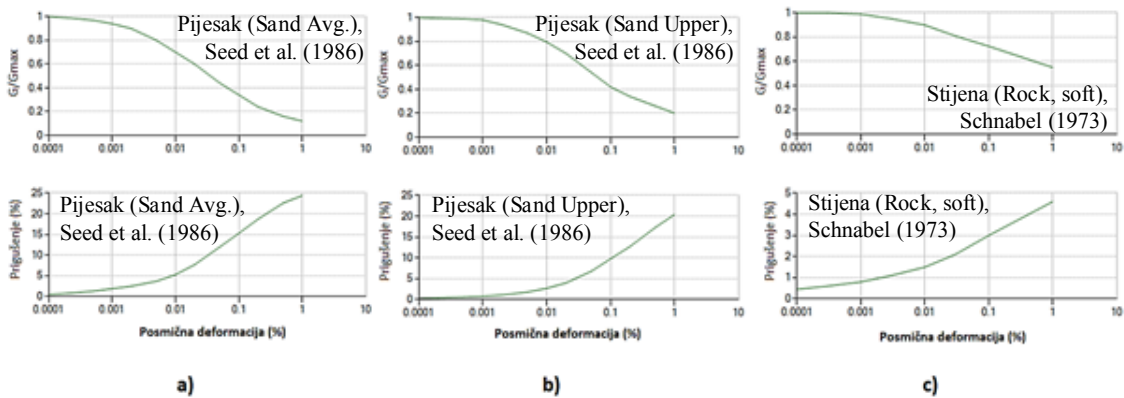
Hyp. Dist.: hipocentralna udaljenost, [km]

4.2. Ulazni modeli tla za analizu

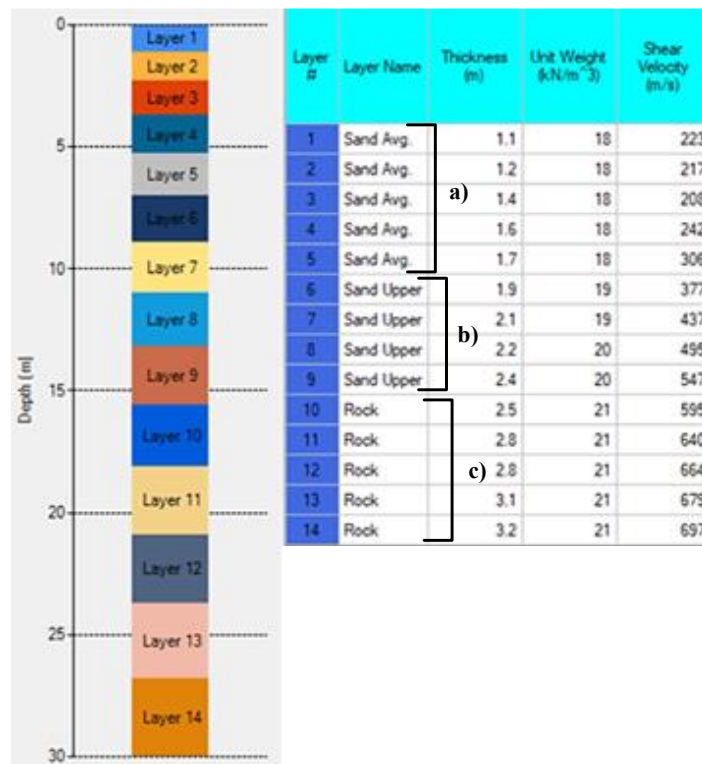
Prema geološkoj karti (Osnovna geološka karta OGK, L 33-69 Varaždin, Geološki zavod Zagreb, 1971-1978, autori: Šimunić, Pikija i Hećimović), tlo na istraživanom području se u najvišoj mjeri sastoji od pijesaka, glinovito-pjeskovitih siltova, šljunaka, pjeskovitih vapnenaca, pješčenjaka i tufova.

Za potrebe ovog rada izabran je jednostavan model tla koji se sastoji od pijesaka i stijena, te su odabrane sljedeće krivulje modula smicanja i prigušenja tla u ovisnosti o posmičnoj deformaciji, Slika 12. a), b) i c).

Ulazni profili tla određeni su iz MASW profila i HVSR mjerenja. Slika 13. prikazuje ulazni profil za lokaciju T1 izrađen u programu DEEPSOIL. Osnovna stijena definirana je prema Eurokodu 8, tlo kategorije A, gdje je $v_{s,30} = 800$ m/s, jedinična težina $\gamma = 24$ kN/m³ i stupanj prigušenja $D = 2\%$.



Slika 12. Krivulje modula posmika i prigušenja tla u ovisnosti o posmičnoj deformaciji.



Slika 13. Prikaz ulaznog profila tla za lokaciju T1 (slojevima su pridružene krivulje modula smicanja i prigušenja tla prikazane na Slici 13).

4.3. Rezultati

Slike 14. – 24. prikazuju rezultate jednodimenzionalne EQL analize na lokacijama mjerenja (T1 – T10) za određena ulazna gibanja. Na svakoj je lokaciji:

i) izmjerena brzina $v_{s,30}$

za ulazna skalirana gibanja od 0,09g i 0,19g određen-a je:

ii) vršna akceleracija PGA po dubini profila,

iii) spektar S_a ulaznog gibanja,

iv) spektar S_a odziva na površini i

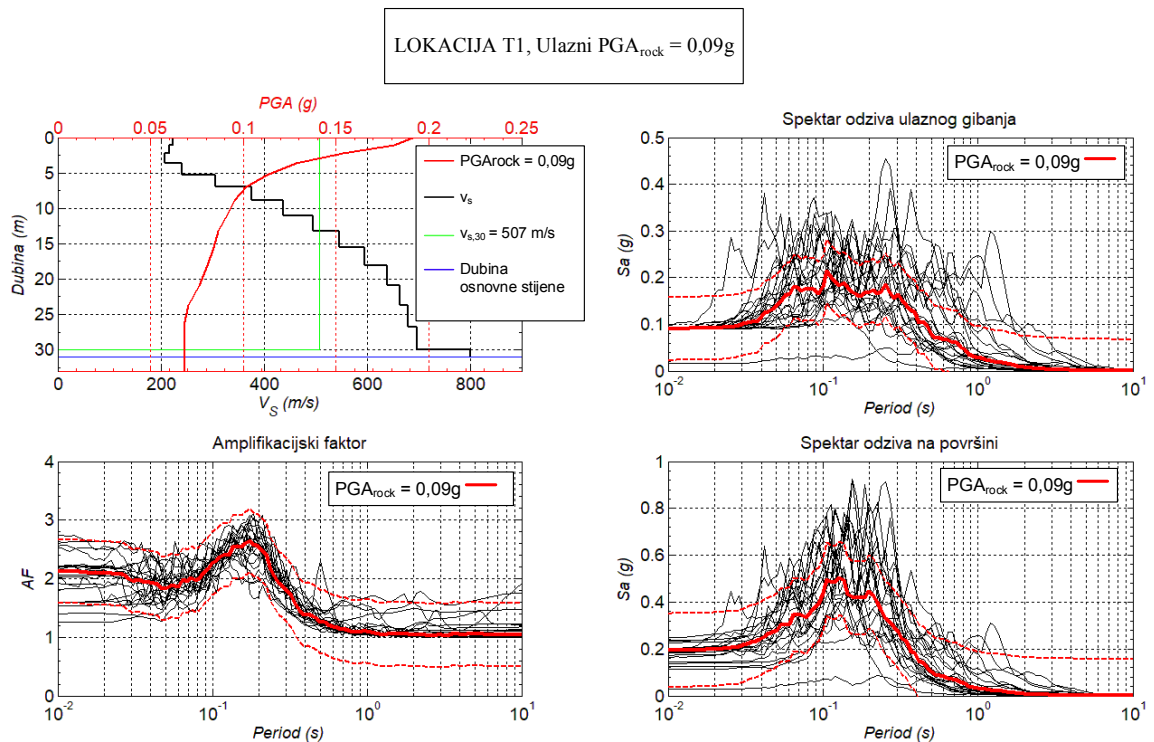
v) amplifikacijski faktor AF (14),

koji se definira kao omjer odziva na površini i odziva ulaznog gibanja u osnovnoj stijeni.

Crne linije na slikama spektara odziva i amplifikacijskog faktora označavaju prikaz svakog ulaznog gibanja zasebno, a crvena linija označava medijan (centralnu vrijednost). Na kartama su također ucrtane promjene $v_{s,30}$ brzina po dubini profila, kao i njihove srednje vrijednosti (zelene linije), te dubina osnovne stijene (plave linije).

$$AF = \frac{S_{a,površina}}{S_{a,rock}} \quad (14)$$

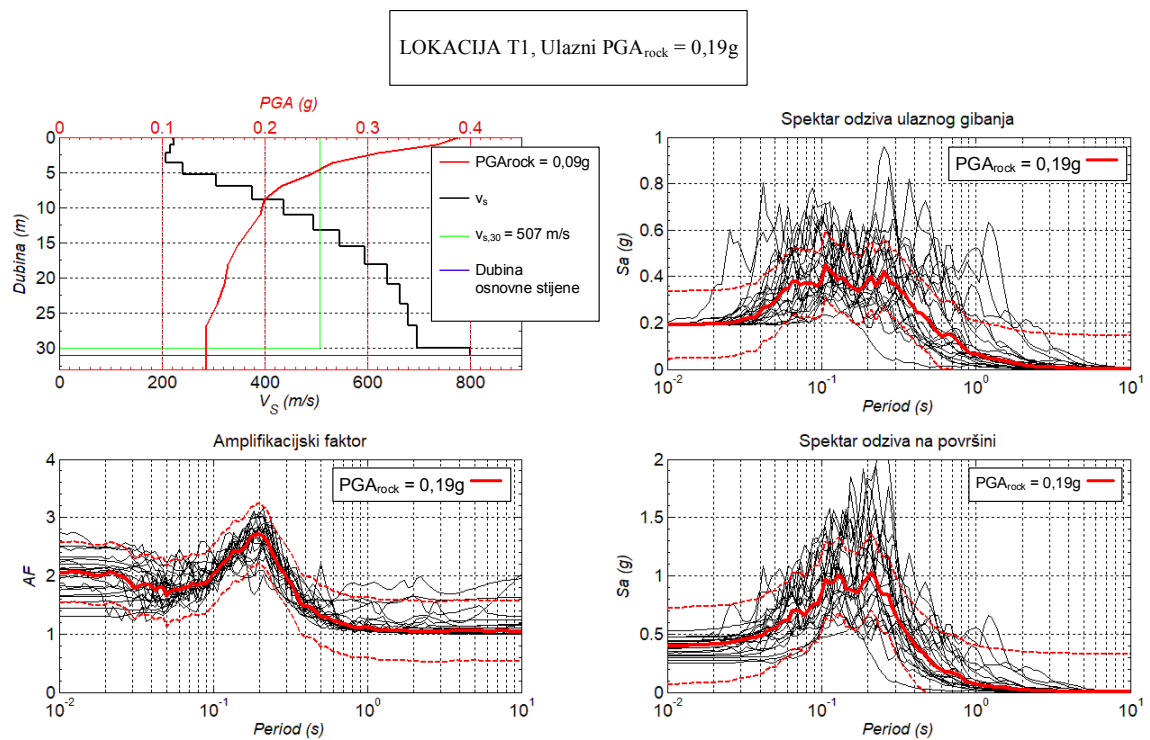
Amplifikacijski faktor je vrlo važan parametar u analizi odziva tla, jer se pomoću njega može uočiti nelinearan odziv tla, tj. veća degradacija tla kod jačih ulaznih gibanja, što rezultira manjim amplifikacijskim faktorima. Taj će se parametar također iskoristiti u sljedećem poglavlju, gdje će se amplifikacijski faktori na istraživanom području, koji predstavljaju odziv tla na seizmičku pobudu, usporediti s HVSR amplitudama (Sanković 2018) koje predstavljaju prirodno stanje tla.



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
507	0,09	0,191	0,194	2,125	0,174	2,648

Slika 14. Rezultati EQL analize za ulazno gibanje $PGA_{rock} = 0,09g$ na lokaciji T1.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).

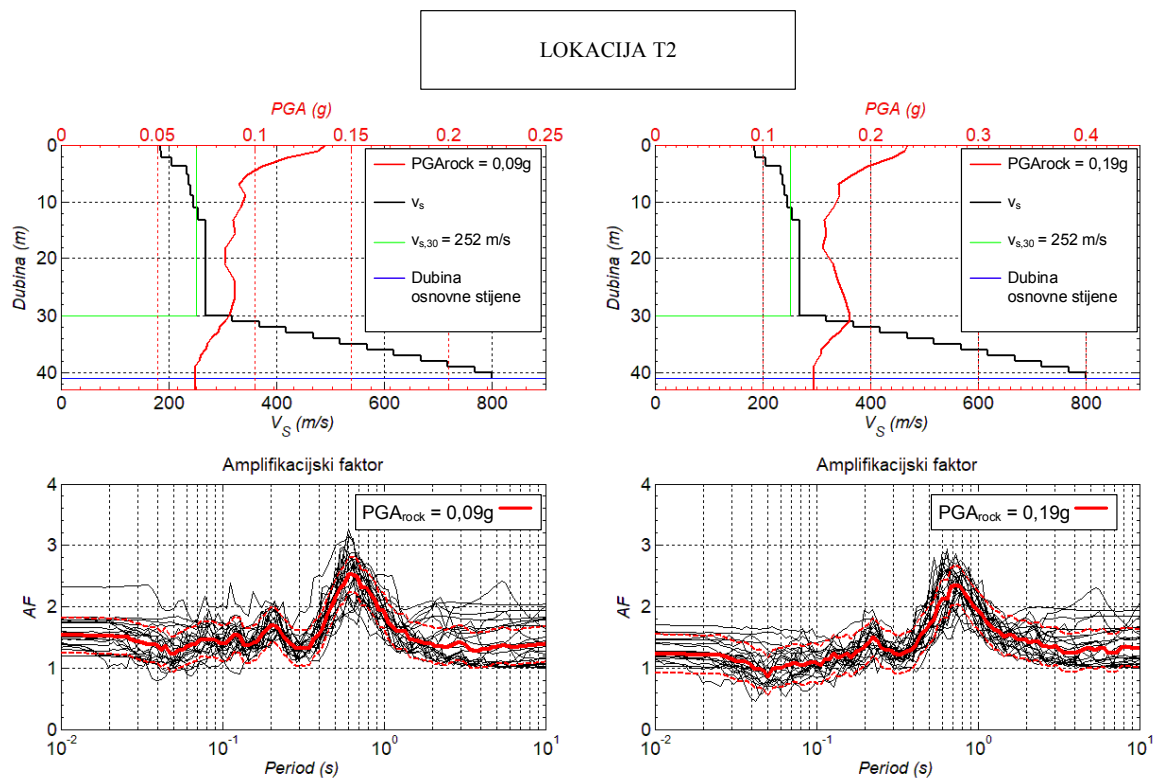


$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
507	0,19	0,389	0,395	2,047	0,197	2,729

Slika 15. Rezultati EQL analize za ulazno gibanje $PGA_{rock} = 0,19g$ na lokaciji T1.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).

Na lokaciji T1 (Slika 13. i Slika 14.) srednja brzina posmičnih valova do dubine 30 m $v_{s,30}$ iznosi 507 m/s, što ukazuje na pojavu krućih sedimenata. Površinski amplifikacijski faktor kod ulaznog gibanja 0,19g iznosi 2,047, dok je kod ulaznog gibanja 0,09g veći, tj. iznosi 2,125, jer s većim ulaznim gibanjem tlo jače degradira zbog svoje nelinearne prirode, pa to rezultira manjom amplifikacijom kod jačeg ulaznog gibanja. Takvo se ponašanje može primijetiti i na ostalim lokacijama istraživanja, osim na lokaciji T8 koja će biti zasebno objašnjena.

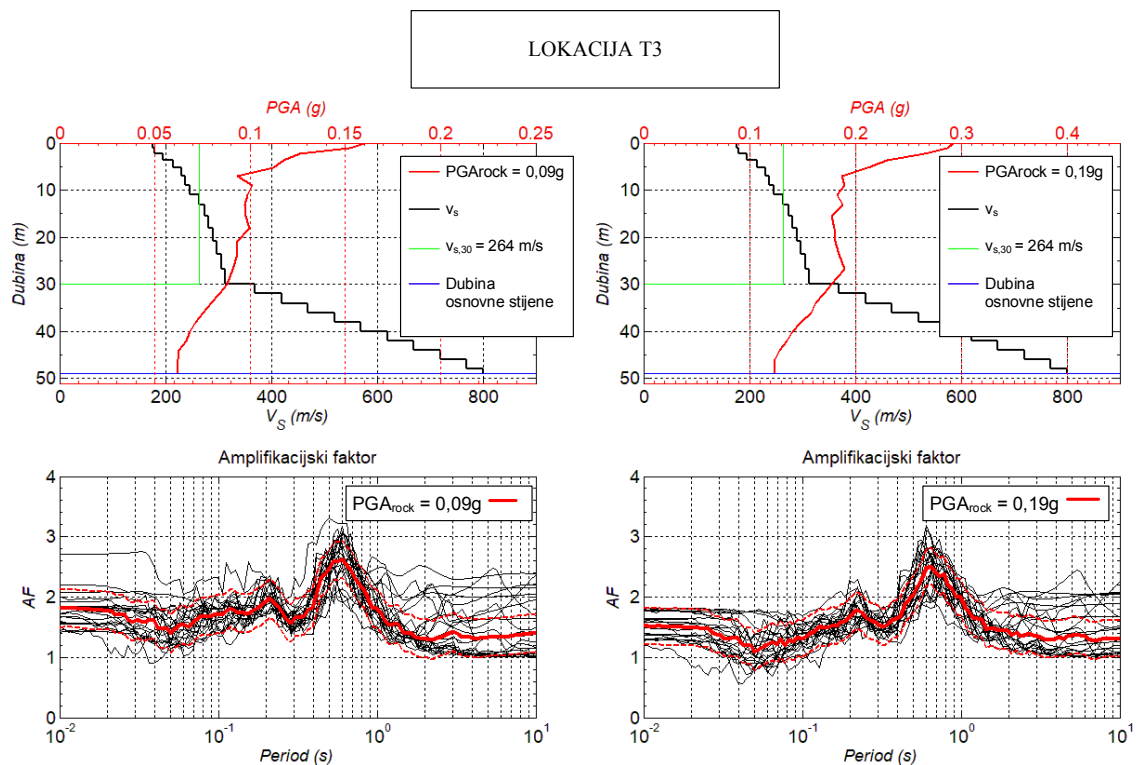


$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF _{max} na osnovnom periodu tla
252	0,09	0,136	0,137	1,535	0,643	2,529
	0,19	0,235	0,236	1,234	0,728	2,362

Slika 16. Rezultati EQL analize na lokaciji T2.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).

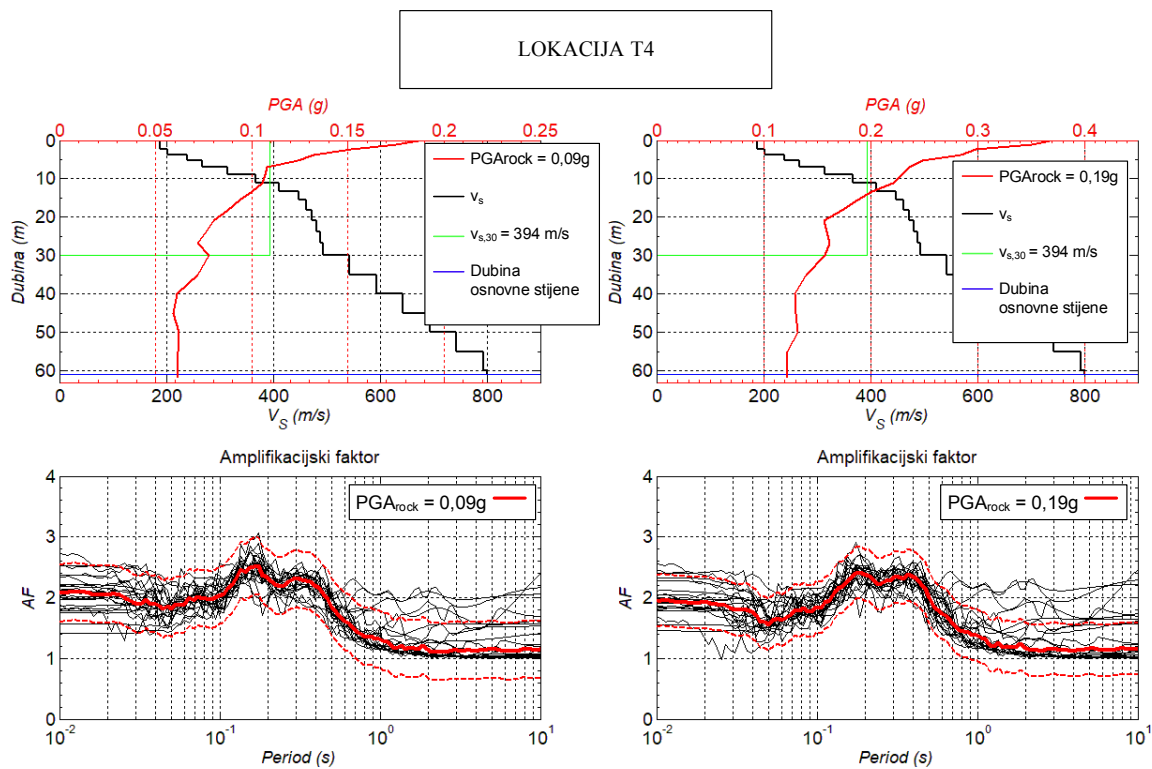
Na lokaciji T2 može se primijetiti ista pojava nelinearnosti kao i na prethodnoj lokaciji T1, Slika 15. No ovdje $v_{s,30}$ iznosi 252 m/s što je znatno manje nego na lokaciji T1 (507 m/s). To znači da se radi o mekšim sedimentima koji brže degradiraju kod jakih ulaznih gibanja, tj. njihove krivulje posmika i prigušenja će kod povećanja posmične deformacije brže padati nego kod tvrdih sedimenta. Konačno će to rezultirati manjim faktorima amplifikacije nego na lokaciji T1, jer tlo ne može primiti svu elastičnu energiju od potresa, pa pri tome dolazi do deamplifikacije.



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF _{max} na osnovnom periodu tla
264	0,09	0,160	0,161	1,812	0,604	2,634
	0,19	0,292	0,292	1,521	0,643	2,513

Slika 17. Rezultati EQL analize na lokaciji T3.

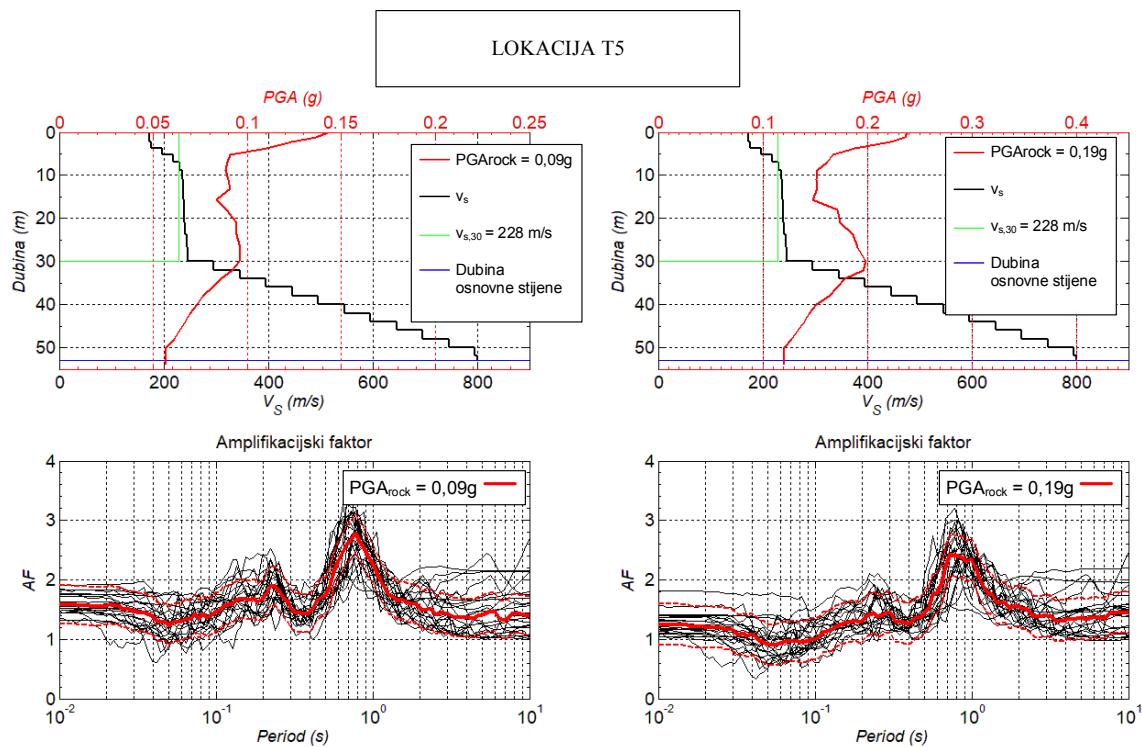
Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
394	0,09	0,187	0,189	2,071	0,174	2,527
	0,19	0,368	0,373	1,946	0,186	2,416

Slika 18. Rezultati EQL analize na lokaciji T4.

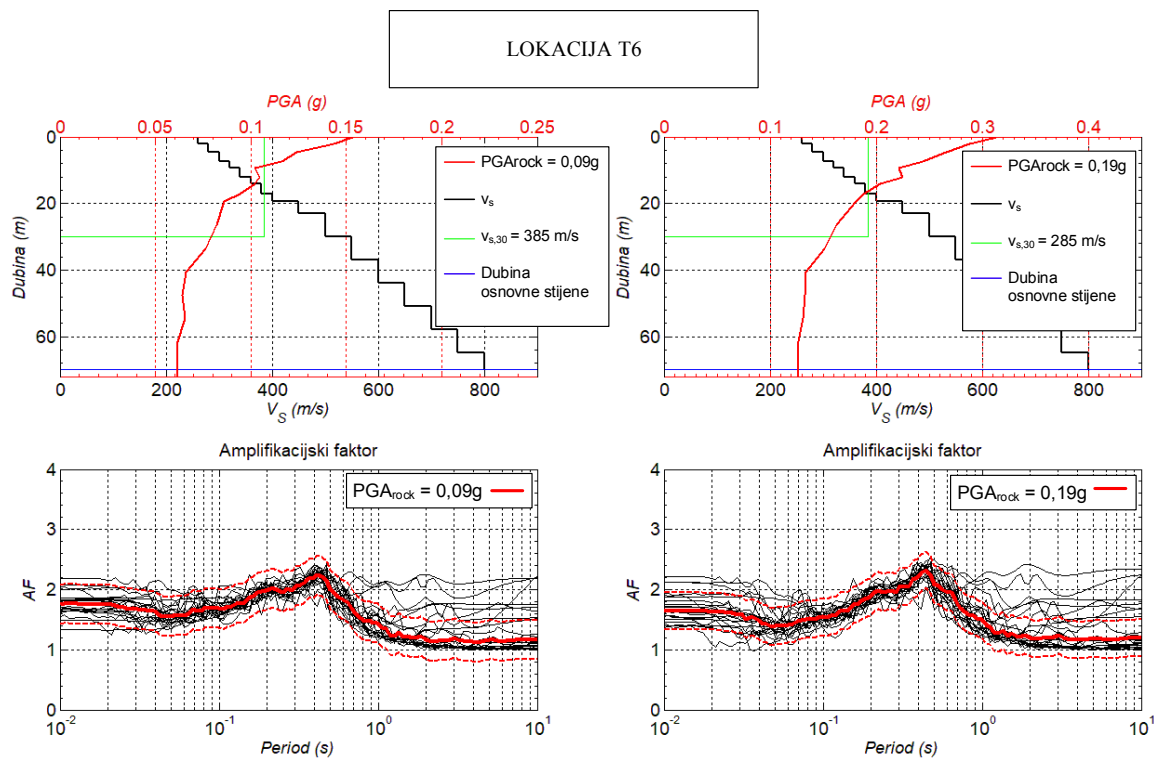
Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
228	0,09	0,143	0,143	1,585	0,775	2,788
	0,19	0,238	0,238	1,250	0,728	2,428

Slika 19. Rezultati EQL analize na lokaciji T5.

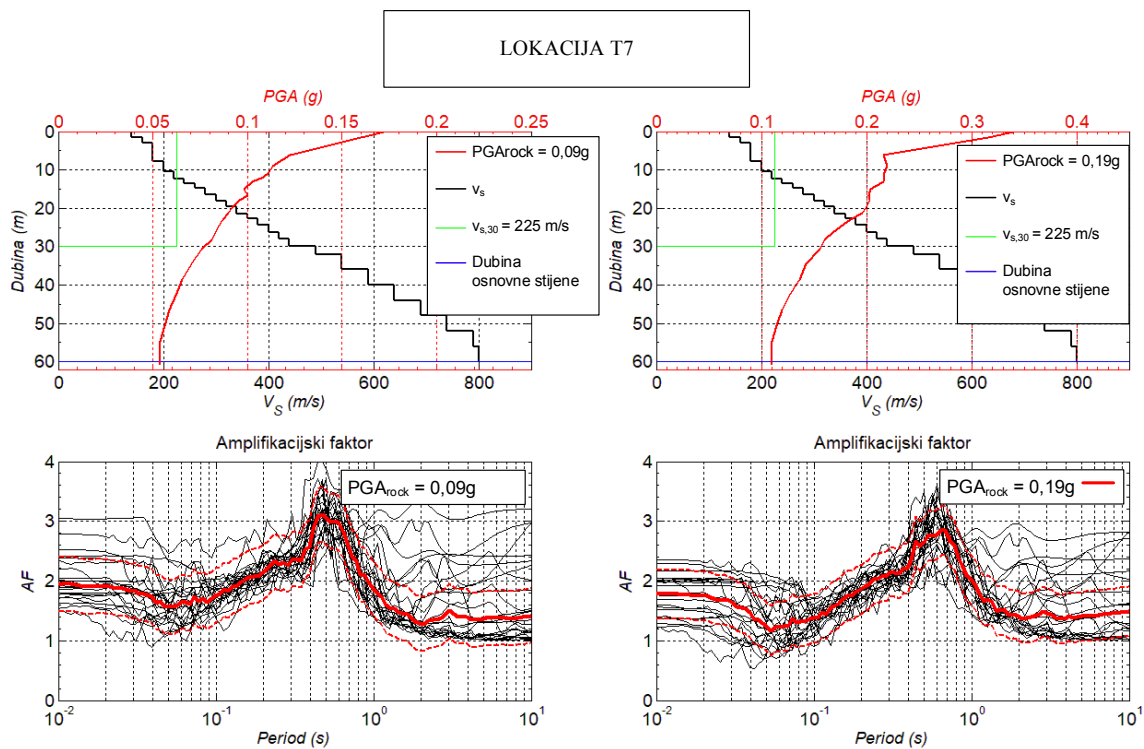
Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF _{max} na osnovnom periodu tla
385	0,09	0,153	0,155	1,757	0,416	2,247
	0,19	0,314	0,317	1,648	0,443	2,331

Slika 20. Rezultati EQL analize na lokaciji T6.

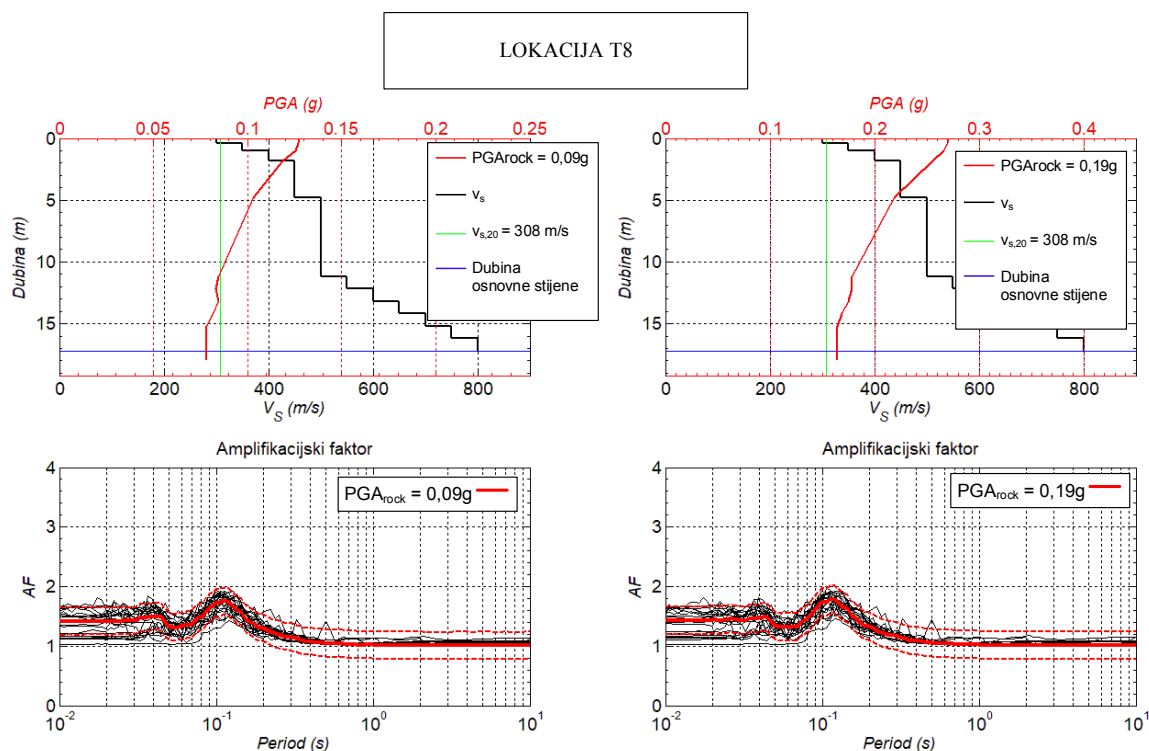
Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
225	0,09	0,172	0,173	1,944	0,471	3,118
	0,19	0,340	0,340	1,781	0,643	2,845

Slika 21. Rezultati EQL analize na lokaciji T7.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).

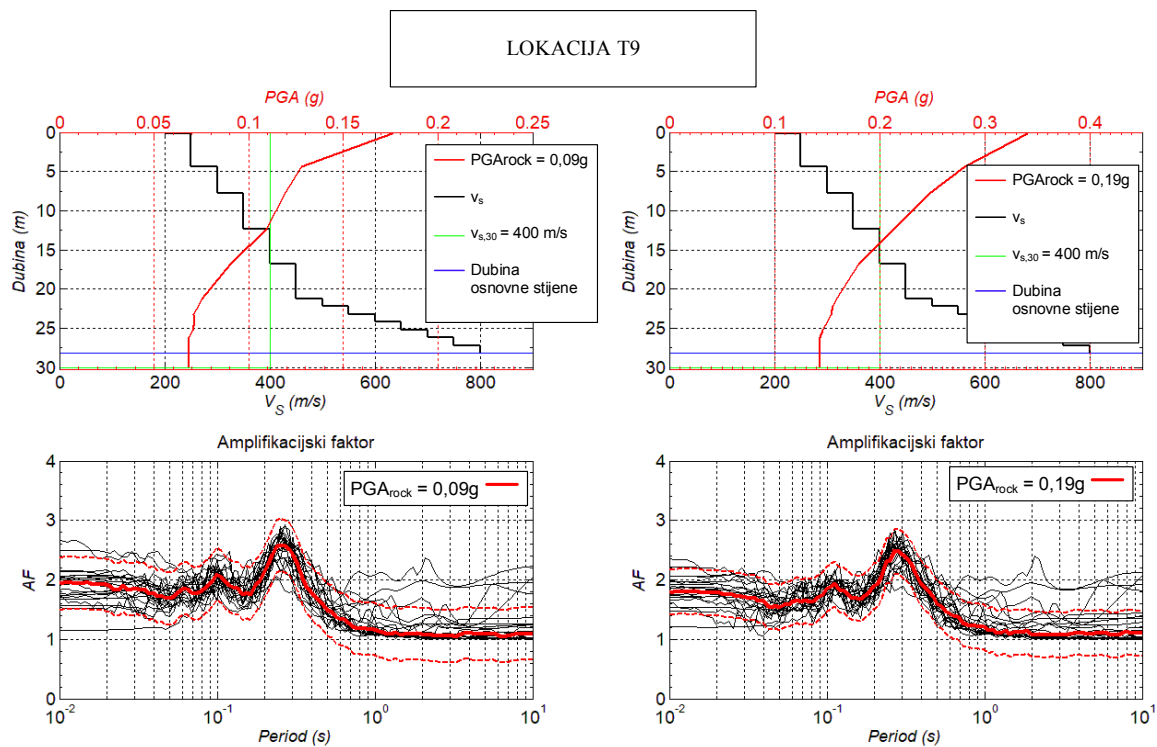


$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski $S_a(0,01\text{ s})$ (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
450	0,09	0,128	0,129	1,417	0,113	1,762
	0,19	0,271	0,274	1,422	0,113	1,778

Slika 22. Rezultati EQL analize na lokaciji T8.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).

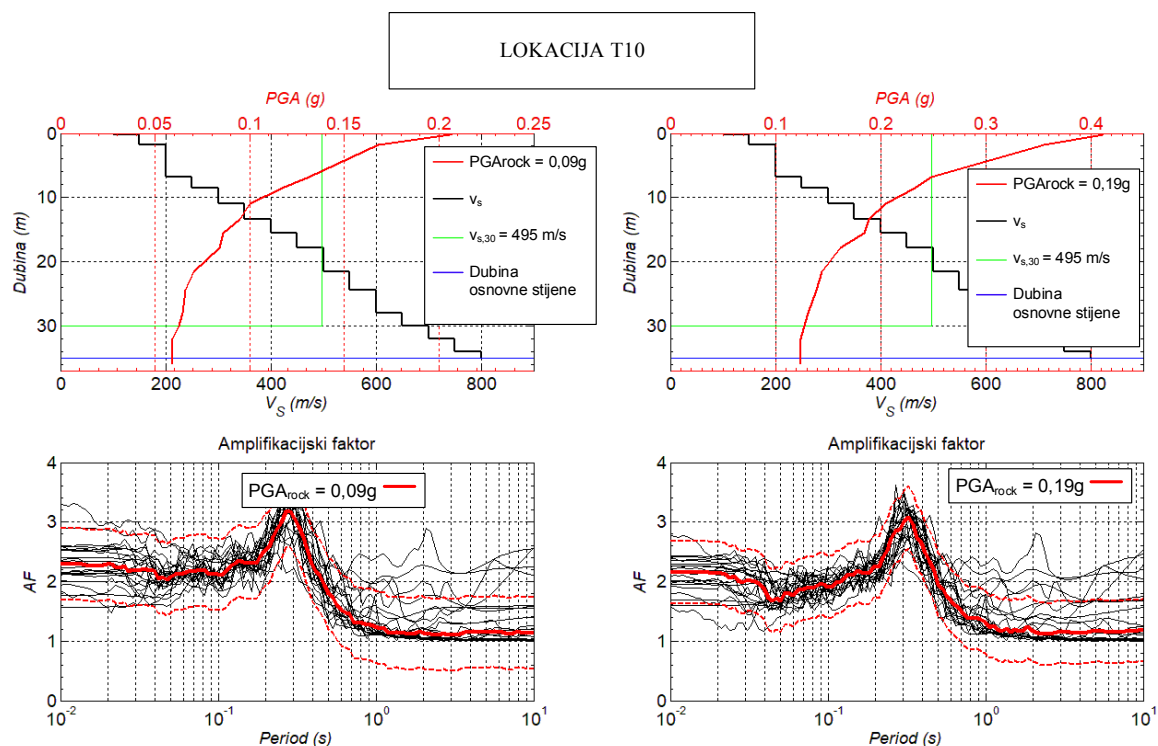
Na lokaciji T8 (Slika 21.) može se uočiti ujednačen amplifikacijski faktor kod oba ulazna gibanja, što znači da je tlo tvrđe te nema nelinearnih efekata.



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
400	0,09	0,176	0,177	1,937	0,253	2,589
	0,19	0,341	0,345	1,786	0,269	2,487

Slika 23. Rezultati EQL analize na lokaciji T9.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).



$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski S_a (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
495	0,09	0,207	0,208	2,291	0,269	3,173
	0,19	0,412	0,413	2,157	0,325	3,079

Slika 24. Rezultati EQL analize na lokaciji T10.

Raspodjela PGA po dubini profila (gore lijevo); Spektar odziva ulaznog gibanja (gore desno); Spektar odziva na površini (dolje desno); Amplifikacijski faktor (dolje lijevo).

Tablica 2. sadrži prikaz rezultata EQL analize na svim lokacijama sa svim ulaznim gibanjima. Kod mekšeg tla, odnosno kada su brzine $v_{s,30}$ manje (npr. lokacija T2, Slika 15.), dolazi do izražaja nelinearno ponašanje tla s jačim deformacijama kod jakih potresa, te se amplifikacijski faktor smanjuje zbog degradacije samog tla. Kod tvrđeg tla, odnosno kada su brzine $v_{s,30}$ veće (npr. lokacija T1, Slike 14. i 15.) ti su efekti mali ili zanemarivi. Amplifikacijski faktor $AF < 1$ označava nelinearne efekte, tj. deamplifikaciju.

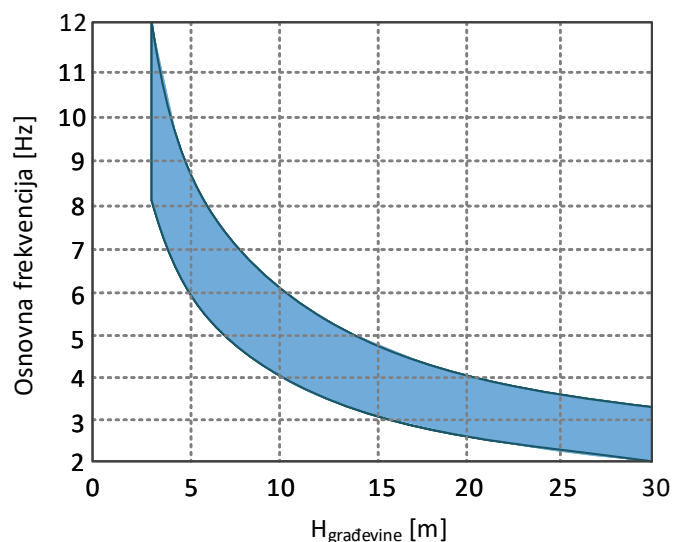
Tablica 2. Rezultati EQL analize svih lokacija sa svim ulaznim gibanjima.

Lokacija	$V_{s,30}$ (m/s)	Ulazni PGA_{rock} (g)	Površinski PGA (g)	Površinski Sa (0,01 s) (g)	Površinski AF (0,01 s)	T_{per} (s)	AF_{max} na osnovnom periodu tla
T1	507	0,09	0,191	0,194	2,125	0,174	2,648
		0,19	0,389	0,395	2,047	0,197	2,729
T2	252	0,09	0,136	0,137	1,535	0,643	2,529
		0,19	0,235	0,236	1,234	0,728	2,362
T3	264	0,09	0,160	0,161	1,812	0,604	2,634
		0,19	0,292	0,292	1,521	0,643	2,513
T4	394	0,09	0,187	0,189	2,071	0,174	2,527
		0,19	0,368	0,373	1,946	0,186	2,416
T5	228	0,09	0,143	0,143	1,585	0,775	2,788
		0,19	0,238	0,238	1,250	0,728	2,428
T6	385	0,09	0,153	0,155	1,757	0,416	2,247
		0,19	0,314	0,317	1,648	0,443	2,331
T7	225	0,09	0,172	0,173	1,944	0,471	3,118
		0,19	0,340	0,340	1,781	0,643	2,845
T8	450	0,09	0,128	0,129	1,417	0,113	1,762
		0,19	0,271	0,274	1,422	0,113	1,778
T9	400	0,09	0,176	0,177	1,937	0,253	2,589
		0,19	0,341	0,345	1,786	0,269	2,487
T10	495	0,09	0,207	0,208	2,291	0,269	3,173
		0,19	0,412	0,413	2,157	0,325	3,079

5. Potencijalna opasnost rezonancije tlo-građevina

Ugroženost neke građevine za vrijeme potresa procjenjuje se prema potencijalu pojave rezonancije tlo-građevina. Potencijal pojave štete je veći ukoliko je vlastita frekvencija građevine bliska vlastitoj frekvenciji tla.

Slika 25. prikazuje raspon osnovnih frekvencija građevine tipične konstrukcije s obzirom na njenu visinu. Osnovna frekvencija zgrade od 2 kata je približno 8 Hz. Takvih je kuća u gradu i okolici Ivanca najviše stradalo u potresima 1973. i 1982. godine, upravo zbog pojave rezonancije građevina – tlo. Nešto niže frekvencije od oko 6 Hz svojstvene su za zgrade od 3 ili 4 kata. I takve su zgrade također pretrpjele oštećenja u spomenutim potresima. Objekti visine 10 – 15 m imaju osnovne frekvencije 4 – 5 Hz, a zgrade visoke 30 m (približno 10 katova) imaju frekvenciju od oko 2,5 Hz.



Slika 25. Raspon osnovnih frekvencija građevine tipične konstrukcije s obzirom na njenu visinu (Magnon, 2013).

Kao završni dio rada dana je usporedba raspodjele HVSR amplituda (Slika 26.: Sanković, 2018) s raspodjelom amplifikacijskih faktora određenih u ovom radu (Slika 27. i Slika 28.) na frekvencijama 2,5 Hz, 4Hz, 6 Hz i 8 Hz.

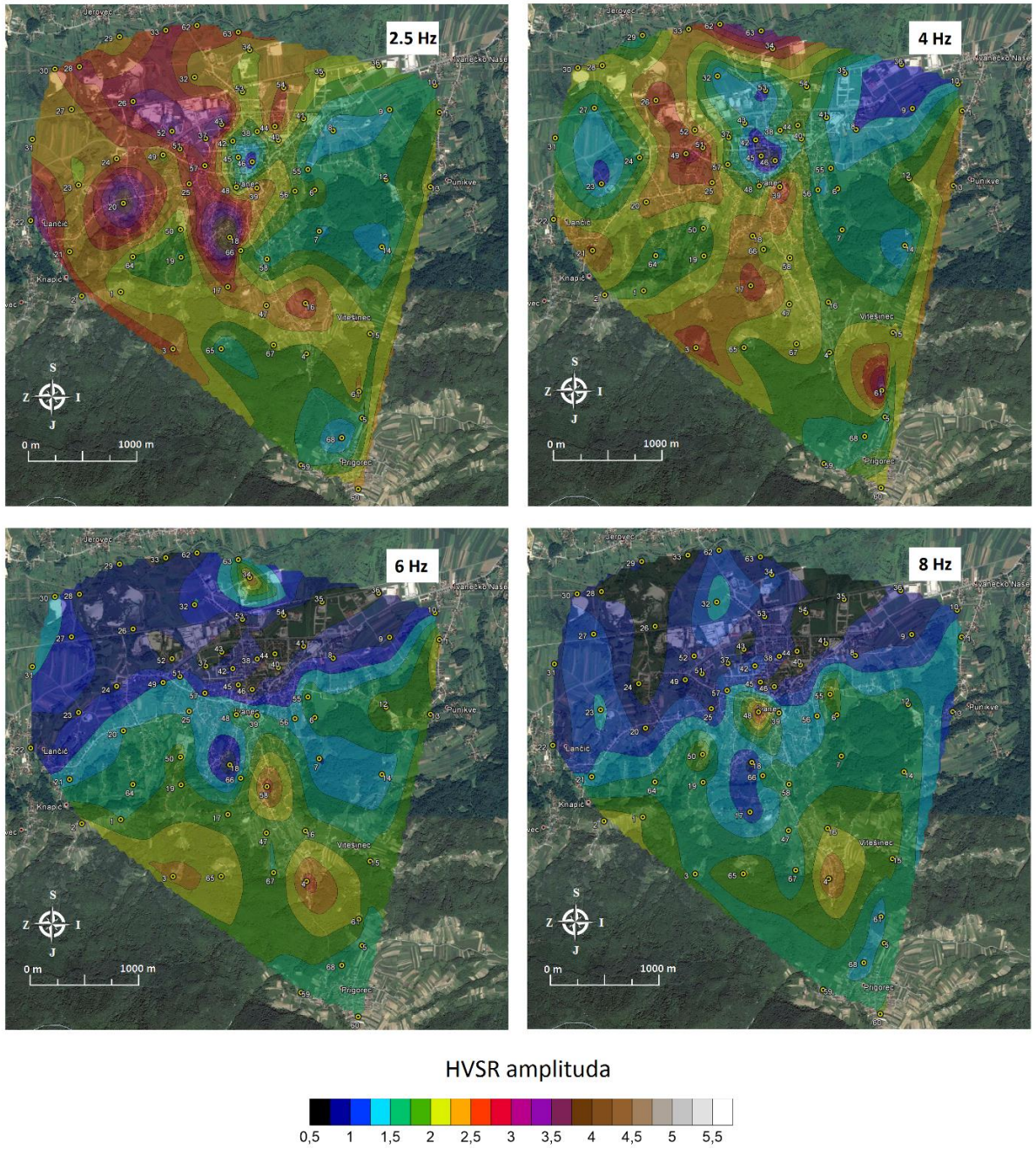
Budući da su HVSR amplitude dane na karakterističnim frekvencijama, amplifikacijski faktori su također prikazani na karakterističnim frekvencijama. Sa Slika 13. – 23. očitani su amplifikacijski faktori na periodima 0,4 s, 0,25 s, 0,167 s i 0,125 s, koji odgovaraju frekvencijama od 2,5 Hz, 4 Hz, 6 Hz i 8 Hz.

Radi lakše usporedbe HVSR amplituda i amplifikacijskih faktora AF, u Tablici 3 je prikazano 10 (od 68) lokacija mjerenja HVSR amplituda koje odgovaraju lokacijama određivanja amplifikacijskih faktora.

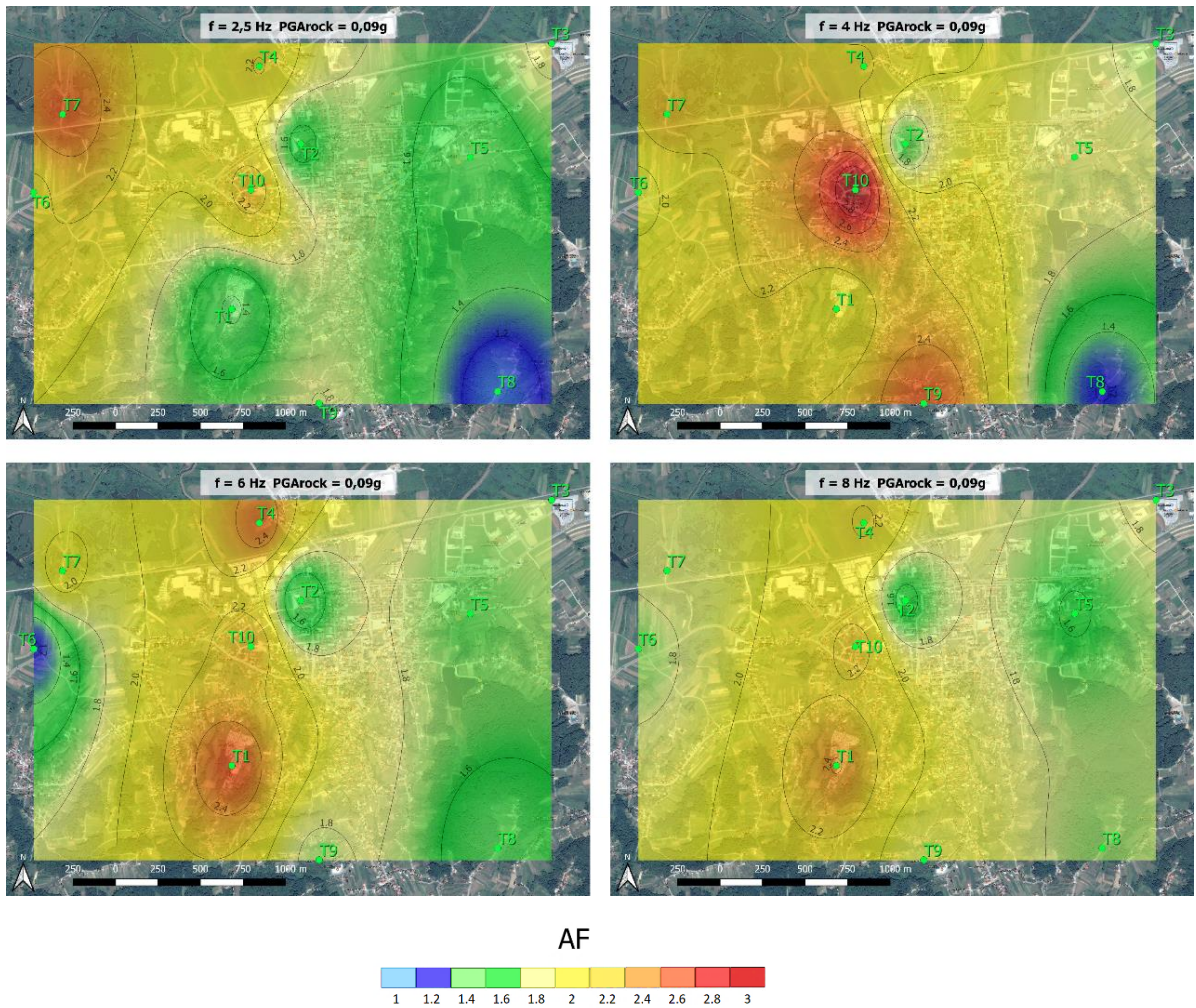
Tablica 3. Lokacije određivanja AF koje odgovaraju lokacijama HVSR mjerenja.

AF	HVSR amplitude
T1	50
T2	43
T3	36
T4	32
T5	8
T6	31
T7	27
T8	14
T9	17
T10	51

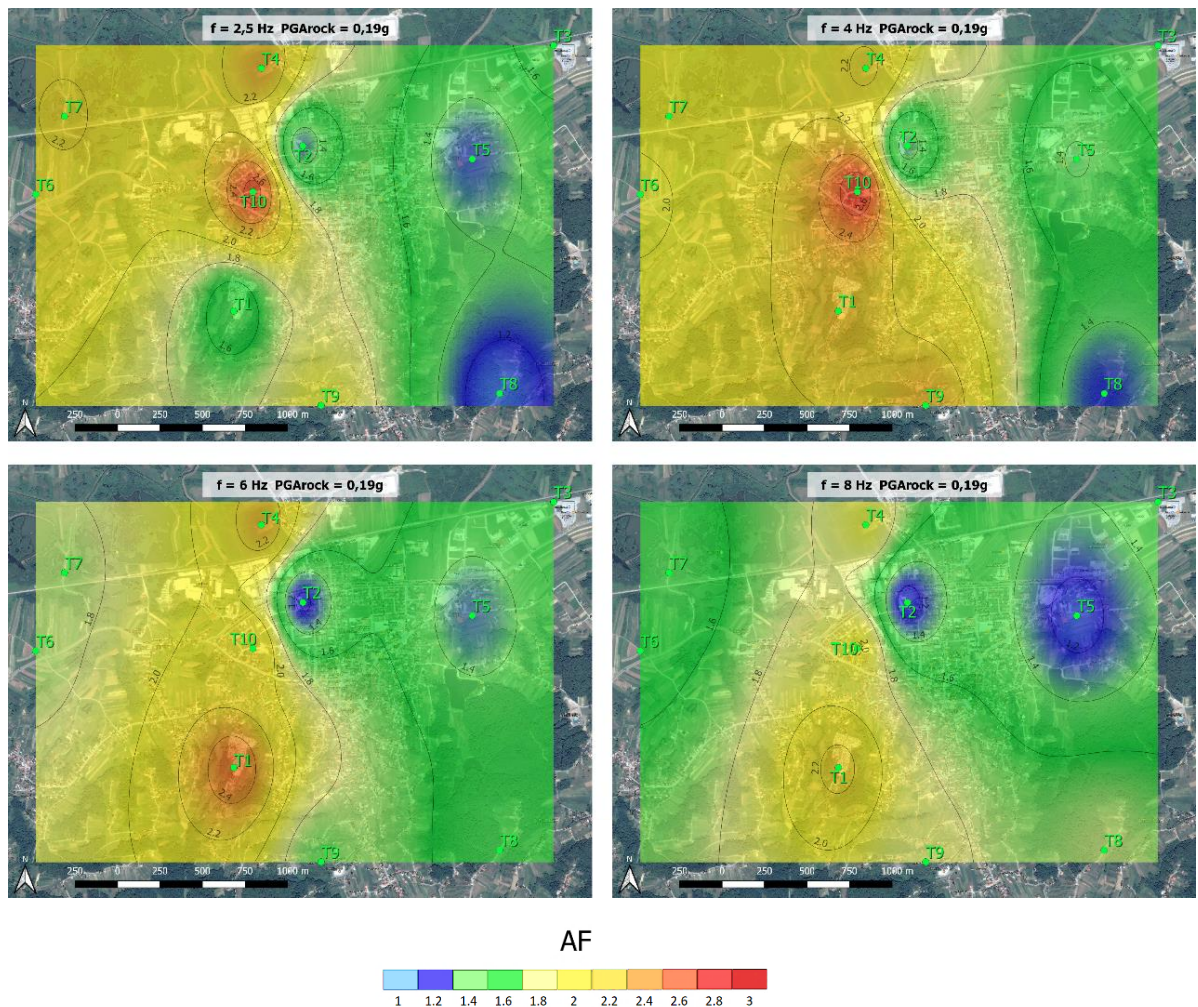
Zbog usporedbe gustoća točaka na kojima se određuju amplifikacijski faktori treba odgovarati gustoći točaka mjerenja HVSR amplituda, no već se i s ovim brojem lokacija mogu uočiti jasne sličnosti raspodjele HVSR amplituda s raspodjelom amplifikacijskih faktora na odgovarajućim frekvencijama.



Slika 26. Raspodjela HVSR amplituda na karakterističnim frekvencijama građevina (Sanković, 2018).



Slika 27. Raspodjela amplifikacijskog faktora (AF) na karakterističnim frekvencijama građevina za ulazno gibanje $\text{PGARock} = 0,09\text{g}$.



Slika 28. Raspodjela amplifikacijskog faktora (AF) na karakterističnim frekvencijama građevina za ulazno gibanje $\text{PGA}_{\text{rock}} = 0,19\text{g}$.

Kod frekvencije 2,5 Hz vidljivo je smanjenje HVSr amplituda kao i amplifikacijskih faktora od sjeverozapada prema jugoistoku. To znači da bi gradnja građevina od desetak katova bila najsigurnija oko lokacija T1 i T2 u gradu i u okolici istočno od grada, oko lokacija T5 i T8. Gradnja takvih objekata ne preporučuje se oko lokacije T7.

Eventualni potres najviše bi pogodio objekte visine 10 – 15 m, čija se osnovna frekvencija kreće oko 4 Hz. Na toj frekvenciji visoke vrijednosti HVSr amplituda i amplifikacijskih faktora su zastupljene na vrlo velikoj površini istražnog područja, pogotovo na lokacijama T9 i T10 gdje su najveće. Takve bi objekte bilo najsigurnije graditi oko lokacije T8 prema planini Ivančici i oko lokacije T2 u samom gradu.

Kada se promatra frekvencija 6 Hz, što je svojstveno za zgrade od 3 – 4 kata, mogu se uočiti razlike između HVSR i EQL metoda. Dok HVSR amplitude pokazuju vrlo male vrijednosti na cijelom području mjerenja, na kartama amplifikacijskih faktora se mogu uočiti veće vrijednosti oko lokacija T1 i T4. HVSR metoda daje amplitude koje su proizvod mekih sedimenata iznad osnovne stijene izraženo na osnovnom periodu tla (frekvenciji), dok EQL metoda daje nelinearno ponašanje tla uslijed određenih potresnih scenarija. Smatra se nedostatkom HVSR metode činjenica da se amplitude određuju samo za osnovnu (prirodnu) frekvenciju, ali se ne mogu odrediti za neke druge, u seizmičkom događaju moguće, frekvencije.

Ista se razlika može uočiti i na kartama frekvencije 8 Hz. Ponovo su HVSR amplitude vrlo male na cijelom području mjerenja, a amplifikacijski faktori su veći oko lokacije T1 (veće su i HVSR amplitude, ali ne u tolikoj mjeri).

Iz karata mikrozonacijskog seizmičkog hazarda koje su rezultat ovog rada, mogu se dobiti informacije važne za protupotresnu gradnju novih, seizmički ojačanih građevina, za visinu i tip građevina, ojačavanje postojećih građevina i slično. Sve u cilju sprečavanja šteta koje prijete pojavom potresa te očuvanja života i zdravlja ljudi.

6. Zaključak

Ekvivalentnom linearnom metodom se nelinearno ponašanje mekih tala uslijed jakih potresa aproksimira izvođenjem niza linearnih analiza u kojima se mijenjaju prosječni ili sekantni modul posmika i stupanj prigušenja, dok njihove vrijednosti ne budu u skladu s razinom deformacija izazvanih u tlu. Tom je metodom provedeno istraživanje na 10 lokacija na području grada Ivanca i njegove uže okolice, te su dobivene različite vrijednosti amplifikacije tla zbog sadržaja različitih geomorfoloških oblika na istraživanom području.

Pomoću računalnog programa DEEPSOIL, izrađen je profil tla svake lokacije na temelju MASW mjerenja i postojeće geološke karte. Osnovna stijena definirana je prema Eurokodu 8, a kao ulazna gibanja korišteni su zapisi 22 jaka potresa, čija su gibanja skalirana na 0,09g i 0,19g. Slike 13. – 23. i Tablica 2 prikazuju rezultate analize.

Izmjerene brzine poprečnih valova $v_{s,30}$ kreću se u rasponu od 230 m/s (mekši sedimenti) do 510 m/s (tvrđi sedimenti). Kod prisutnosti mekših sedimenata u aluviju rijeke Bednje i sjevernijem dijelu grada (manji $v_{s,30}$) mogu se uočiti veće amplifikacije (npr. T10: površinski PGA = 0,412g; površinski Sa = 0,413 g; površinski AF = 2,291). S druge strane, u području koje vodi prema planini Ivančici izmjerene su veće $v_{s,30}$ vrijednosti (tvrđi sedimenti), pa je na tom području i manja amplifikacija (npr. T8: površinski PGA = 0,128g; površinski Sa = 0,129 g; površinski AF = 1,417).

Zaključno, dane su karte usporedbe rezultata HVSR metode s rezultatima EQL metode. HVSR daje procjenu stanja tla u mirovanju, a EQL metoda se koristi za modeliranje ponašanja tla uslijed potresnog gibanja, čime se dobije spektar amplifikacijskih faktora za protupotresnu gradnju ovisno o određenim periodima, odnosno frekvencijama. Raspodjele HVSR amplituda i amplifikacijskih faktora su dane za osnovne frekvencije karakterističnih građevina koje iznose 2,5 Hz za deseterokatnice, 4 Hz za zgrade 5 – 6 katova, 6 Hz za zgrade 3 – 4 kata i 8 Hz za dvokatnice. Na tim se kartama mogu uočiti sličnosti kod 2,5 Hz i 4 Hz, gdje veći iznosi HVSR amplituda odgovaraju većim iznosima amplifikacijskih faktora. Razlika se može vidjeti kod frekvencija 6 Hz i 8 Hz, gdje su HVSR amplitude na cijelom mjerenom području niske, dok je EQL metodom detektirana zona ugroze (veći amplifikacijski faktori) oko lokacije T1. No, za bolju usporedbu metoda i preciznije rezultate, gustoća točaka EQL mjerenja trebala bi biti barem odgovarajuća

gustoći točaka HVSR mjerenja, jer se također i na kartama HVSR amplituda vide osjetljivije lokacije u zonama koje nisu istraživane EQL metodom. Treba uzeti u obzir i nedostatak HVSR metode u usporedbi s EQL metodom, jer HVSR metoda daje amplitude koje su rezultat mekih sedimenata tla iznad osnovne stijene izraženo na osnovnom periodu (ili frekvenciji) tla, dok EQL metoda daje linearno ponašanje tla uslijed određenih potresnih scenarija.

Karte amplifikacijskih faktora po određenim frekvencijama karakterističnih građevina dobivene ovim radom mogu se koristiti za protupotresno projektiranje novih seizmički ojačanih građevina na području grada Ivanca i njegovoj užoj okolici, kao i za ojačavanje postojećih objekata. Takvim se projektiranjem može spriječiti pojava rezonancije tlograđevina na osnovnim periodima građevina, odnosno tla, te na ostalim periodima koji pokazuju izražene amplifikacijske faktore. Osnovni je cilj sprečavanje eventualnih materijalnih šteta i smanjenje opasnosti po ljudsko zdravlje i živote, koje prijete pojavom potresa.

Popis literature

- Bardet, J., Ichii, K. and Lin, C. (2000). *EEERA A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits*. Los Angeles: University of Southern California, Department of Civil Engineering.
- Dobry, R. and Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. *Proceedings of the international symposium on geotechnical engineering of soft soils*, 2, pp. 51-87.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A. and Park, D. (2015). *DEEPSOIL 6.0, User Manual*, 116 p.
- Herak, D., Herak, M. i Tomljenović, B. (2009). Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. *Tectonophysics*, 465(1 – 4), pp. 212 – 220.
- Kegyes-Brassai, O. and Ray, R. (2015). Comparison of the 1D response analysis results of typical Hungarian soil types and the EC8 spectra based on a case study of seismic risk analysis in Győr. *Earthquake Resistant Engineering Structures X*, 152, pp. 111-122.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.
- Kraš, M. (2016.). Ivanečka bibliografija. Geološki postanak ivanečkog kraja. Dost. na: <http://www.ivaneckabibliografija.com/sites/default/files/knjiga/html/poglavlje01.html> [Pristupljeno 30. 3. 2017].
- Malez, M. (1952). *Minerali i stijene Ivančice*. 4th ed. Naše planine, pp. 7-8.
- Meštrović, D. (2016). *Potresno inženjerstvo*. Zagreb: Građevinski fakultet.
- Mir Mohammad Hosseini, S., Asadolahi Pajouh, M. and Mir Mohammad Hosseini, F. (2010). The Limitations of Equivalent Linear Site Response Analysis Considering Soil Nonlinearity Properties. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 5(14), pp. 1-11.
- Murty, C., Goswami, R., Vijayanarayanan, A. and Mehta, V. (2012). *Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings*. Gujarat: Gujarat State Disaster Management Authority, Government of Gujarat.

Park, C. (2018). *What is MASW?* Masw.com. Dost. na:
<http://www.masw.com/WhatisMASW.html> [Pristupljeno 3 Jun. 2018].

Sanković, V. (2018). Procjena potresne ugroženosti grada Ivanca mjerenjem mikroseizmičkog nemira. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S. i Gazdek, M. (2016). Seismic response and vulnerability of historical Trakošćan Castle, Croatia using HVSR method. *Environmental Earth Sciences*, 75(5).

Stanko, D., Strelec, S., Gazdek, M., Filipović, A. and Kaniški, N. (2017). Procjena odziva tla mjerenjem mikroseizmičkog nemira u gradu Varaždinu. *Časopis inženjerstva okoliša*.

Popis slika

Slika 1. Prolazak seizmičke energije kroz geomedije.....	1
Slika 2. Amplifikacija tla. Zapis akcelerograma ukazuje na manji intenzitet podrhtavanja u hipocentru potresa (A) i amplificirano podrhtavanje u mekom sloju na površini (B).....	3
Slika 3. Grad Ivanec i okolica u podnožju Ivančice (Belcar, 2013).	6
Slika 4. Poredbeno vršno ubrzanje tla tipa s vjerojatnosti premašaja 10% u 50 godina za povratno razdoblje 475 godina izraženo u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g (http://seizkarta.gfz.hr).....	7
Slika 5. Histereza odnosa naprezanja i deformacija. Kod malih deformacija je modul posmika maksimalan.....	9
Slika 6. Jednodimenzionalni uslojeni sustav modela tla (Schnabel i sur., 1972).	12
Slika 7. Ekvivalentni linearni model, histeretička krivulja (histereza) odnosa naprezanja i deformacija.	12
Slika 8. Iteracija modula posmika i stupnja prigušenja s posmičnom deformacijom u ekvivalentnoj linearnoj analizi.	13
Slika 9. Shematski prikaz odnosa naprezanja i deformacija koji se koristi u ekvivalentnom linearnom modelu (Kelvin-Voigtov model).	14
Slika 10. Postupak proračuna spektra odziva.	16
Slika 11. Prikaz lokacija MASW mjerenja s raspodjelom brzina posmičnih valova.	17
Slika 12. Krivulje modula posmika i prigušenja tla u ovisnosti o posmičnoj deformaciji.	19
Slika 13. Prikaz ulaznog profila tla za lokaciju T1 (slojevima su pridružene krivulje modula smicanja i prigušenja tla prikazane na Slici 13).	19
Slika 14. Rezultati EQL analize za ulazno gibanje PGARock = 0,09g na lokaciji T1.	21
Slika 15. Rezultati EQL analize za ulazno gibanje PGARock = 0,19g na lokaciji T1.	22
Slika 16. Rezultati EQL analize na lokaciji T2.	23
Slika 17. Rezultati EQL analize na lokaciji T3.	24
Slika 18. Rezultati EQL analize na lokaciji T4.	25
Slika 19. Rezultati EQL analize na lokaciji T5.	26
Slika 20. Rezultati EQL analize na lokaciji T6.	27
Slika 21. Rezultati EQL analize na lokaciji T7.	28
Slika 22. Rezultati EQL analize na lokaciji T8.	29
Slika 23. Rezultati EQL analize na lokaciji T9.	30
Slika 24. Rezultati EQL analize na lokaciji T10.	31
Slika 25. Raspon osnovnih frekvencija građevine tipične konstrukcije s obzirom na njenu visinu (Magnon, 2013).....	33
Slika 26. Raspodjela HVSR amplituda na karakterističnim frekvencijama građevina (Sanković, 2018).....	35
Slika 27. Raspodjela amplifikacijskog faktora (AF) na karakterističnim frekvencijama građevina za ulazno gibanje PGARock = 0,09g.	36
Slika 28. Raspodjela amplifikacijskog faktora (AF) na karakterističnim frekvencijama građevina za ulazno gibanje PGARock = 0,19g.	37

Popis tablica

Tablica 1. Odabrana ulazna gibanja jakih akceleracija iz PEER baze (http://ngawest2.berkeley.edu)	18
Tablica 2. Rezultati EQL analize svih lokacija sa svim ulaznim gibanjima.....	32
Tablica 3. Lokacije određivanja AF koje odgovaraju lokacijama HVSR amplituda	34