

Procjena amplifikacije gibanja tla uslijed Zagrebačkog ML5.5 potresa (2020.) ekvivalentno-linearnom metodom

Uglešić, Jakov Stanislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:934672>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Jakov Stanislav Uglešić

Procjena amplifikacije gibanja tla uslijed
Zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa (2020.)
ekvivalentno-linearnom metodom

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Jakov Stanislav Uglešić

Diplomski rad

**Procjena amplifikacije gibanja tla uslijed
Zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa (2020.)
ekvivalentno-linearnom metodom**

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Suvoditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Davor Stanko

Zagreb, 2021.

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Snježani Markušić i mentoru doc. dr. sc. Davoru Stanko na ukazanom povjerenju, strpljenju i podršci pri pisanju diplomskog rada. Hvala timu iz *Terra Compacta d.o.o.* i Boži Padovanu na posuđenoj opremi potrebnoj za MASW mjerenja i na ustupljenim podacima bušotine na Zavrtnici. Veliko hvala obitelji i prijateljima te najljepšoj djevojci Luciji na savjetima i pomnom lektoriranju.

Sažetak

Zagrebački potres 2020. lokalne magnitude $M_L = 5.5$ uzrokovao je veliku štetu u gradu Zagrebu i okolnom području. Najviše su bile pogođene stare zgrade (izgrađene prije 1963.) i zgrade kulturno povijesne baštine. U diplomskom radu napravljena je seizmička analiza odziva tla za scenarij zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa 2020. na realnim profilima tla, koji su dobiveni pomoću podataka iz seizmičke i geološke mikrozonacije dijela grada Zagreba te uz pomoć dodatnih mjerenja dobivenih višekanalnom analizom površinskih valova na tri profila. 1D ekvivalentno-linearna analiza odziva tla napravljena je za dva slučaja, 1.) slučaj u kojem se svi profili tla nalaze u epicentru (tj. da su 1 km od epicentra) i 2.) slučaj u kojemu su uzete epicentralne udaljenosti svih profila (tj. ulazna gibanja stijene su atenuirana s udaljenošću). Izračunate vrijednosti korištene su za izradu interpoliranog 2D profila koji pokazuje promjenu vršne akceleracije tla po dubini, a samim time i amplifikaciju seizmičkoga gibanja uslijed rasprostiranja kroz različite slojeve tla. Profil se proteže od epicentra zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa do akcelerometarskih stanica QUHS i QARH. Rezultati diplomskog rada uspoređeni su s empirijskim podacima i rezultatima iz sličnih istraživanja. Procijenjeno je da amplifikacijski faktor iznosi oko 2 za scenariji zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa, a procijenjene vrijednosti vršne akceleracije tla su 0.35 g u epicentralnom području i 0.20 g na udaljenosti od 12 km od epicentra. Rad doprinosi boljem razumijevanju posljedica zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa, ukazuje na važnost utjecaja lokalnih uvjeta tla na nastanak štete te značaj mikrozonacije i seizmičke analize odziva tla pri protupotresnoj gradnji.

Ključne riječi: zagrebački $M_L 5.5$ potres 2020., analiza odziva tla, amplifikacija potresnog gibanja, ekvivalent-linearna analiza, seizmička mikrozonacija.

Estimation of ground motion amplification of the Zagreb M_L 5.5 earthquake (2020) using equivalent-linear method

Abstract

The 22 March 2020 Zagreb earthquake of local magnitude $M_L = 5.5$ has caused great damage in the city of Zagreb and in the local area. The most affected were old buildings (built before 1963) and cultural heritage buildings. Therefore, the thesis presents seismic site response analysis for the Zagreb M_L 5.5 earthquake scenario that was calculated on realistic soil profiles, which are based on data from seismic and geological microzonation of the part of the city of Zagreb area and from additional measurements with Multichannel analysis of surface waves on three soil profiles. 1D equivalent linear site response analysis was done for two cases, 1.) case in which all soil profiles are in epicenter area (1 km from epicenter) and 2.) case in which epicentral distance was taken into account (input rock motions are attenuated with distance). These calculated values were used to construct an interpolated 2D profile showing the variation of peak ground acceleration with depth, and thus the amplification of seismic motion due to spreading through different soil layers. The profile extends from the epicenter of the Zagreb M_L 5.5 earthquake to the accelerometer stations QUHS and QARH. Furthermore, obtained results were compared with empirical values and with results from similar research. The amplification factor is estimated to be about 2 for the scenarios of the Zagreb M_L 5.5 earthquake, and the estimated values of peak ground acceleration are 0.35 g in the epicentral area and 0.20 g at a distance of 12 km from the epicenter. The paper contributes to a better understanding of the consequences of the Zagreb M_L 5.5 earthquake, it shows the importance of local soil conditions on the damage extent and the importance of microzonation and seismic soil response analysis for building earthquake-resistant structures.

Keywords: Zagreb M_L 5.5 earthquake 2020, site response analysis, amplification of seismic motion, equivalent-linear analysis, seismic microzonation.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Zagrebački potres 22. ožujka 2020	2
2.1. Šteta uzrokovana potresom	3
2.2. Preliminarna procjena amplifikacije seizmičkog gibanja zagrebačkog potresa	4
3. Seizmička mikrozonacija	7
3.1. Određivanje seizmičkog hazarda	8
3.1.1. Regionalna seizmičnost	8
3.1.2. Atenuacija	9
3.1.3. Lokalni uvjeti tla	9
3.2. Seizmička i geološka mikrozonacija dijela grada Zagreba	10
4. Ekvivalent-linearne metoda (EQL) odziva tla	15
4.1. Ekvivalent-linearne model tla	16
4.2. Analiza odziva tla temeljena na jednodimenzionalnoj teoriji propagacije seizmičkih valova	18
5. EQL modeliranje	21
5.1. Određivanje lokacije i parametra 1D profila	21
5.2. Ulazna gibanja osnove stijene	25
5.3. Odabir krivulja prigušenja i modula smicanja tla	28
5.4. Primjer 1-D ekvivalent linearne metode	29
6. Rezultati	32
7. Diskusija	42
8. Zaključak	44
Literatura	45
Popis kratica	50
Dodatak A	51
Dodatak B MASW mjerenja	52

1. Uvod

Grad Zagreb, glavni grad Hrvatske, 22. ožujka 2020. u 05:24 UTC pogodio je potres lokalne magnitude $M_L=5.5$. Potres je uzrokovao veliku materijalnu štetu te je ostavio velike socijalno-ekonomske posljedice. Štetu koju je uzrokovao zagrebački $M_L5.5$ potres puno je veća nego što bi se očekivalo od potresa te magnitude. Sanacija štete i posljedica potresa pokrenuta je vrlo brzo te su u kratkom roku napravljena opsežna multidisciplinarna istraživanja (npr. Markušić i sur. 2020, Atalić i sur. 2021). Rezultati rada Markušić i sur. (2020) ukazivali su na nastanak rezonancije između tla i konstrukcija zgrada, a dobiveni amplifikacijski faktor iznosio je od 1.3 do 1.8, što je zajedno doprinijelo nastanku velike štete.

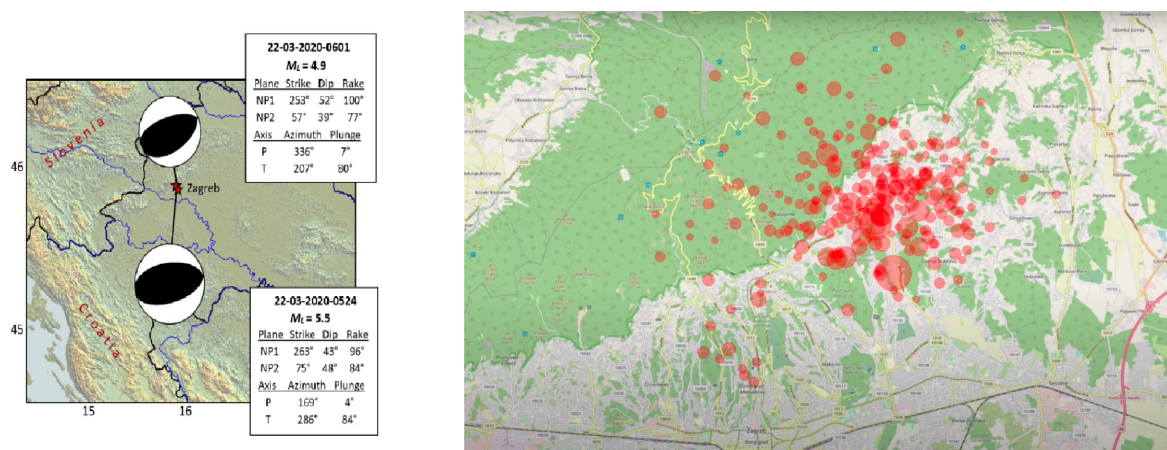
Na području grada Zagreba napravljena su brojna istraživanja koja su pokušala procijeniti utjecaj lokalnih efekta tla na potresno gibanje (npr. Lokmer i sur. 2002, Herak i sur. 2007, Veinović i Domitrović 2007). Napravljena je i opsežna seizmička i geološka mikrozonacija Podsljemenske zone (HGI 2019). Lokmer i sur. (2002) pokazali su da se u Zagrebu može očekivati amplifikacijski faktor do 3.5 i da do najznačajnije amplifikacije potresnog gibanja dolazi na niskim frekvencijama, do 2 Hz, dok su Herak i sur. (2007) koristeći omjer vertikalnog i horizontalnog spektra napravili kartu dinamičkog amplifikacijskog faktora. Pri seizmičkoj i geološkoj mikrozonaciji dijela grada Zagreba (HGI 2019) napravljena su detaljna geofizička i geotehnička istraživanja koja su dala detaljan uvid na lokalne uvijete tla u Podsljemenskoj zoni.

Cilj i motivacija za pisanje diplomskog rada je računanje seizmičkog odziva tla na profilu koji se proteže kroz grad Zagreb te usporedba dobivenih rezultata s rezultatima iz sličnih istraživanja (npr. Lokmer i sur. 2002, Herak i sur. 2007, Veinović i Domitrović 2007) i usporedba sa zapisima zagrebačkog $M_L5.5$ potresa zabilježenim na akcelerometarskim stanicama QUHS (ured za hitne situacije) i QARH (zgrada Prve Gimnazije) (Prevolnik i sur. 2021). Analiza seizmičkog odziva tla napravljena je na realnim profilima tla, a za analizu korištena je ekvivalentno-linearna metoda u programu *DEEPSOIL v7*. (Hashash i sur. 2016). Realni profili tla dobiveni su koristeći podatke iz seizmološke i geološke mikrozonacije (HGI 2019), a na području izvan zone mikrozonacije napravljena su dodatna mjerenja višekanalnom analizom površinskih valova. Odabrano je deset profila tla na kojima je napravljena 1D EQL analiza seizmičkog odziva tla. Profili tla protežu se od epicentra zagrebačkog $M_L5.5$ potresa do akcelerometarskih stanica QUHS i QARH. Odabrano je deset ulaznih gibanja, pet lokalnih potresa i pet potresa iz Sjedinjenih Američkih Država za analizu seizmičkog odziva tla. Izabrana su ulazna gibanja koja su približne magnitude kao zagrebački $M_L5.5$ potres. Analiza je napravljena za dva slučaja, 1.) slučaj kad su svi profili promatrani kao da su u epicentralnom području, tj. kao da su 1 km od epicentra i 2.) slučaj kad su za svaki profil ulazna gibanja atenuirana s udaljenošću. Ulazna gibanja skalirana su na vrijednosti atenuacijske relacije iz rada Markušić i sur. (2002). Prikazani su rezultati spektra odziva i amplifikacijskog faktora na površini te je prikazan 2D interpolirani profil promjene vršne akceleracije tla s dubinom.

2. Zagrebački potres 22. ožujka 2020

Rano ujutro 22. ožujka 2020. u 05:24 UTC, grad Zagreb pogodio je potres lokalne magnitude $M_L=5.5$. Epicentar potresa bio je 7 km sjeverno od centra Zagreba, u blizini mjesta Markuševac i Čučurje, hipocentar se nalazio na dubini od 10 km. Potres se osjetio po cijeloj Hrvatskoj s maksimalnim intenzitetom od VII – VIII° po MSK ljestvici. Drugi najsnažniji potres u ovoj seriji potresa, magnitude $M_L=4.9$, dogodio se isti dan u 06:01 UTC. U periodu od 24h od glavnog udara u okolici Zagreba se dogodilo 57 potresa magnitude veće ili jednake 2.0. Šteta uzrokovana glavnim potresom 22. ožujka 2020. puno je veća nego što bi se očekivala od potresa te magnitude, stoga su u kratkom periodu nakon potresa provedena opsežna multidisciplinarna istraživanja (npr. Markušić i sur. 2020, Atalić i sur. 2021).

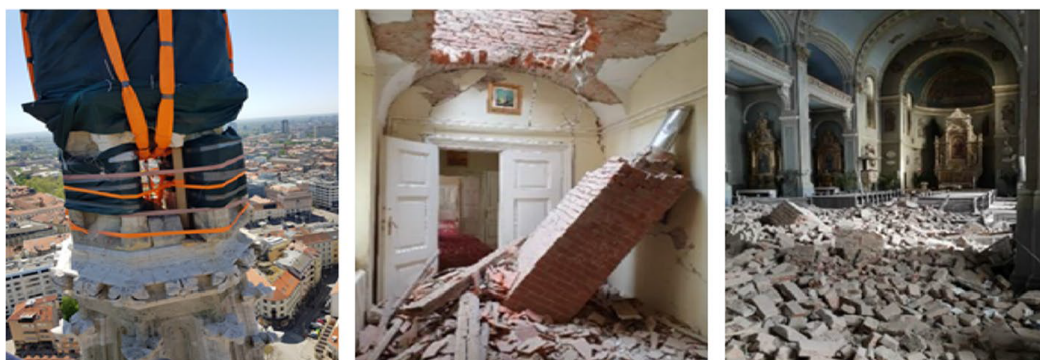
Na temelju analize podataka zabilježenih u Hrvatskoj i svijetu izračunati su žarišni mehanizmi (slika 2.1). Žarišni mehanizam glavnog potresa pokazuje da se on dogodio na reversnom rasjedu, kojemu ravnina rasjeda pada pod kutom od $\delta=43^\circ$ prema jugo-jugoistoku ili pod kutom $\delta=48^\circ$ prema sjever-sjeverozapadu. Os najvećeg tlaka (P) je bila horizontalna u smjeru jug-jugoistok↔sjever-sjeverozapad, dok je os najveće napetosti (T) bila gotovo vertikalna. Vremenska i prostorna analiza serije potresa koja se dogodila 22. ožujka 2020. u Zagrebu, ukazuje da su se glavni i prvi naknadni udar dogodili u podzemlju planine Medvednice duž slijepog reversnog rasjeda kojemu rasjedna ravnina pada prema jugoistoku (Markušić i sur. 2020). U prvih pola sata koseizmičke pukotine širile su se po rasjednoj plohi u smjeru sjeverozapada. Većina naknadnih potresa koji su zabilježeni u prvih 24 sata imali su hipocentre na superponiranom sekundarnom rasjedu pružanja istok-zapad s nagibom prema jugu. Drugi naknadni potresi dogodili su se na neidentificiranim rasjedima koji najvjerojatnije tvore kompleksni sustav rasjeda.



Slika 2.1. Žarišni mehanizmi Zagrebačkih potresa 22. ožujka 2020 u 05:24 UTC i u 06:01 UTC. Žarišne sfere prikazane su u stereografskoj projekciji (lijevo) (Markušić i sur. 2020). Karta epicentara potresa u zagrebačkom području u razdoblju od 22.03.2020. do 14.04.2020. (desno) (Seizmološka služba, 2020).

2.1. Šteta uzrokovana potresom

Potres je najviše pogodio centar Zagreba te su početne informacije ukazivale na znatnu štetu. Veliku štetu pretrpjele su građevine kulturno povijesne baštine neprocjenjive vrijednosti u povijesnom centru grada. Među građevinama kulturno povijesne baštine, najveću štetu su pretrpjele stare crkve, od kojih je 30 uvršteno u spomenike kulture. Stambene zgrade pretrpjele su veliku štetu u potresu, čak dvije trećine ukupne ekonomske štete pretrpjele su stambene zgrade. Oštećene su i brojne javne zgrade; bolnice, škole, sveučilišne zgrade, zgrada parlamenta, muzeji te mnoge druge građevine (Atalić i sur. 2021).



Slika 2.2. Šteta nastala na kulturno povijesnoj baštini (autori: Filip Foretić, Josip Atalić and Ivan Ćurić; Atalić i sur. 2021).

U staroj gradskoj jezgri većina građevina su zidane zgrade visoke od tri do pet katova, građene od vremena Austro-Ugarske monarhije do 1920. Zgrade takvog tipa su pretrpjele vrlo veliku štetu ili su bile uništene, sveukupno je stradalo 26 197 građevina od kojih je 1900 bilo neuseljivo. Prije 1920. zidane zgrade su se gradile s drvenim međukatnim konstrukcijama, a nakon 1920. se grade armirano betonske međukatne konstrukcije. Nakon 1945. dolazi do novog napretka, u gradnji se u obzir počelo uzimati i potresno opterećenje. Koristila se jednostavna metoda horizontalne sile na vrhu zgrade, ali se uzimalo samo 10% relevantnog vršnog ubrzanja tla (engl. *peak ground acceleration*, PGA). Kao rezultat potresa magnitude 6.9 u Skoplju 1963. slijedi napredak u protupotresnoj izgradnji te je izdan *Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za izgradnju u seizmičkim područjima* (SFRJ 1964). Pravilnik je zahtijevao da sve zidane zgrade budu izgrađene s vertikalnim i horizontalnim serklažima, ali to ne pruža dovoljnu otpornost zgrade na potres pa se 1981. godine izdaje *Pravilnik o Tehničkim Normativima za Izgradnju Objekata Visokogradnje u Seizmičkim Područjima* (SFRJ 1981). Između 1964. i 1998. razmatrano je od 30% do 50% relevantnog PGA pri protupotresnoj izgradnji, a između 1998. i 2013. razmatrano je od 70% do 80% relevantnog PGA.

Pregledi građevina nakon potresa utvrdili su da su građevine izgrađene nakon 1963. pretrpjele manju štetu nego građevine izgrađene prije 1920. ili čak 1940. Kako bi se procijenila otpornost građevina na potres, korisno je promatrati klasifikacije temeljene na stupnju štete (engl. *damage grades*, DG). Takva klasifikacija je podijeljena na pet stupnjeva, stupanj 1 (DG 1) ukazuje na zanemarivu do neznatnu štetu, stupanj 2

(DG 2) označava umjerenu štetu, stupanj 3 (DG 3) ukazuje na značajnu do ozbiljnu štetu, stupanj 4 (DG 4) ukazuje na vrlo ozbiljnu štetu te stupanj 5 (DG5) označava uništene građevine. Ovakav način klasifikacije daje uvid o intenzitetu potresa i pruža detaljan opis nastalih oštećenja ističući specifične građevinske strukture ili elemente. Pri promatranju stupnja štete u odnosu na razdoblje gradnje opažena je dramatična razlika, zidane zgrade bez dodatnih ojačanja imale su nekoliko puta veću štetu u odnosu na armirano betonske građevine i zidane zgrade sa serklažama (vrlo velika šteta DG4 i DG5 nasuprot zanemarivoj do laganoj šteti DG1 i DG2).

2.2. Preliminarna procjena amplifikacije seizmičkog gibanja za grebačkog potresa

Gibanje tla na nekoj lokaciji ovisi o kompleksnom sustavu: karakteristikama izvora, atenuaciji seizmičkih valova kao i o lokalnim uvjetima tla (npr. Kramer 1996, Panzera i sur. 2013). Najvažniji faktori koji utječu na razinu potresnog gibanja su magnituda potresa i epicentralna udaljenost. Lokalni uvjeti tla, treći bitni čimbenik za gibanje tla, također ima značajan utjecaj i ne smije ga se zanemariti. Geološke karakteristike, geometrijska raspodjela slojeva tla i lokalna topografija mogu modificirati karakteristike valnog polja poput amplitude, frekvencije i vremena trajanja gibanja tla. Dolazi do efekta amplifikacije ili deamplifikacije gibanja tla na površini na svim frekvencijama ili periodima u odnosu na gibanje osnovne stijene (Kramer 1996). Jaki utjecaj lokalnih uvjeta tla, kao i raspodjela štete s obzirom na lokalne uvjete tla, primijećene su za vrijeme brojnih seizmičkih događaja (npr. Assimaki i sur. 2005, Asimaki i Jeong 2013, Herak i sur. 2010 i Stur 1871). Lokalni odzivi tla mogu se promatrati u dva smisla, linearnom i nelinearnom. Kod linearnog odziva tla amplifikacija je proporcionalna ulaznom gibanju tla i vrsti lokalnog tla, dok kod nelinearnog odziva meka tla djeluju kao snažan prigušivač seizmičke energije pri velikim gibanjima tla što može dovesti do deamplifikacije i značajne promjene frekvencije gibanja tla (Beresnev i Wen 1996).

Prvo znanstveno objašnjenje opaženog učinka lokalne amplifikacije i različite raspodjele štete zbog utjecaja lokalne geologije dao je Stur (1871). On je analizirao posljedice potresa u Klani (Hrvatska) i predstavio je detaljno izvješće o izgradnji zgrada pogođenih potresom te izvješće o povezanosti raspodjele štete u odnosu na lokalne uvjete tla. Glavni potres u toj seriji potresa se dogodio 1. ožujka 1870., a procijenjeni intenzitet tog potresa je $I_{max}=VIII^{\circ}$ po MSK ljestvici. Herak i sur. (2018) predstavili su makroseizmičko istraživanje te serije potresa i izmjerili su omjer horizontalnog i vertikalnog spektra (engl. *horizontal-to-vertical spectral ratio*, HVSR) na šest lokacija. Rezultate HVSR mjerenja iskorištena su za procjenu odziva tla na potres pa su dobiveni podaci uspoređeni s opaženim rezultatima iz Stur (1871). Izmjereni podaci slagali su se s opaženim podacima lokalnog gibanja tla kod Klane i Studene.

Lokmer i sur. (2002) koristili su sintetičke zapise potresa da bi izračunali amplifikaciju seizmičkog gibanja na profilu koji prolazi kroz Zagreb. Sintetički seizmogrami u radu izračunati su hibridnom metodom koja se provodi u dva koraka: modalna sumacija i modeliranje konačnih razlika. Tehnika modalne sumacije primijenjena je na 1D profilu dugom 6.5 km koji se nalazi na osnovnoj stijeni. Taj profil predstavlja prosječni put od izvora do lokalnog tla. Hipocentar potresa postavljen je na dubinu od 5 km a sintetički seizmogrami izračunati su za frekvencije do 6 Hz. Numerička metoda konač-

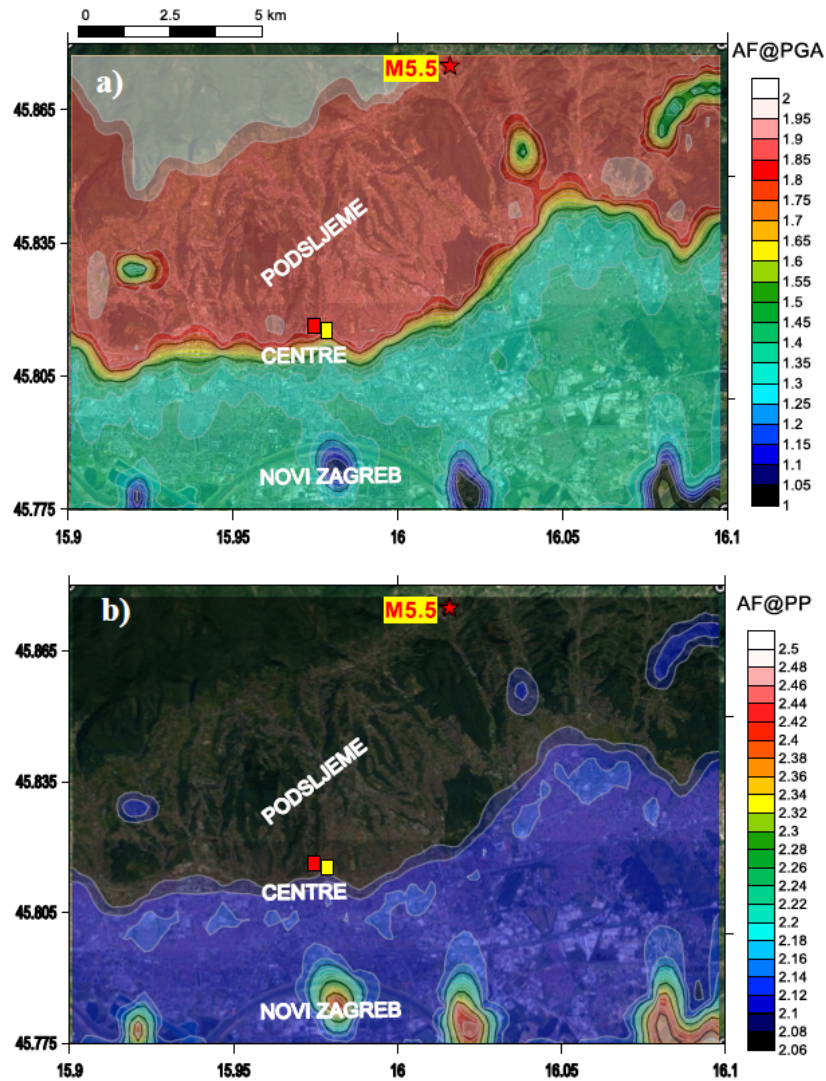
nih elemenata iskorištena je da bi se izračunala propagacija izračunatih seizmograma kroz 2D lateralno promjenjivog modela tla. Lokmer i sur. (2002) izračunali su da amplifikacijski faktor iznosi i do 3.5 te da do najveće amplifikacije dolazi na frekvencijama manjima od 2 Hz.

Markušić i sur. (2020) pokušali su procijeniti efekt amplifikacije tla koji se dogodio za vrijeme zagrebačkog potresa te su rezultate pokušali usporediti sa štetom nastalom u potresu. Za određivanje amplifikacije tla koristili su parametar prosječne brzine posmičnih valova do dubine 30m ($V_{S_{30}}$), koji je određen prema topografskim podacima (Wald i Allen 2007). Koristili su nelinearni model amplifikacije tla (Stanko 2018), kojil se temelji na parametru $V_{S_{30}}$ i intenzitetu ulaznog gibanja osnovne stijene ($PGA_{stijene}$). Na temelju dobro poznatih svojstva teorije slučajne vibracije (engl. *random vibration theory*, RVT) i teorije seizmičkih izvora (Boore 2003) izračunate su vrijednosti $PGA_{stijene}$ za zagrebački potres magnitude 5.5 (iz Fourierovog spektara amplitude (engl. *Fourier amplitude spectrum*, FAS)). U radu su uzete male epicentralne udaljenosti od 1 do 5 km, a ciljane vrijednosti za $PGA_{stijene}$ bile su između 0.159-0.158 g. Uz pomoć tih rezultata te koristeći model Stanko (2018), odredili su srednju vrijednost amplifikacije tla i ± 1 standardnu devijaciju za vrijednosti $V_{S_{30}}$ definirane u Eurokodu 8 (tablica A2). Kako je navedeno u Hassani i Atkinson (2018), profili tla s relativno plitkim površinskim naslagama iznad čvrste stijene, tj. s velikim kontrastom impedancije, mogu uzrokovati snažnu rezonanciju. Ovakav profil tla je karakterističan za Podsljemensku zonu Zagreba (Padovan i sur. 2021). Dominantni period/frekvencija gibanja tla kao i osnovni period/frekvencija tla su ključni pri nastanku rezonancije s konstrukcijom građevine za vrijeme potresa. Bitno je poznavati vlastitu frekvenciju građevina da bi se povećala stabilnost zgrade i smanjila šteta nastala rezonancijom, ako se osnovni period/frekvencija tla i konstrukcije zgrade podudaraju, zgrada prolazi kroz najveće moguće oscilacije i trpi najveću štetu (Dowrick 2009). Na zagrebačkom području gledajući karakterizaciju tla po $V_{S_{30}}$ dominiraju tipovi tla B (Podsljeme) i C (centar Zagreba i Novi Zagreb). To odgovara amplifikaciji tla između perioda 0.1-0.5 s (2-10 Hz) i 0.4-0.9 s (1.1-2.5 Hz). U usporedbi s relacijom koja povezuje visinu građevine i vlastiti period konstrukcije te građevine $T=0.016H$ iz Gallipoli i sur. (2010), takvi periodi tla odgovaraju obiteljskim kućama, zgradama od tri do četiri kata (B) i zgradama od četiri do petnaest katova (C).

Obiteljske kuće, obično jednokatnice, s malim osnovnim periodom konstrukcije $T < 0.2$ s (Dowrick 2009), uglavnom su građene nakon 1963. godine kao omeđene zidane zgrade. Međutim, nastala šteta je puno veća nego što je trebala biti te se ne može pripisati niti PGA niti slaganju perioda konstrukcije s periodom potresa. Uspostavljeno je da teže oštećene zgrade nisu bile kvalitetno građene, bile su krte i nisu bile izgrađene odgovarajućim materijalom ili su imale slabe temelje. U epicentralnom području bile su prisutne zgrade s velikim oštećenjima koje su bile izgrađene poslije 1963. po pravilima protupotresne gradnje te se nastala šteta ne može pripisati lošoj gradnji. Zbog toga pri određivanju utjecaja potresa u ovom području bitno je jasno definirati stanje i način izgradnje građevina da bi se mogli pravilno odrediti uzroci nastanka oštećenja (Markušić i sur. 2020).

Slika 2.3 prikazuje rezultate Markušić i sur. (2020), dvije karte amplifikacije PGA na površini. Kartu amplifikacijskog faktora na površini i kartu amplifikacijskog faktora na osnovnom periodu tla za ulazno gibanje Zagrebačkog potresa M5.5. Pri razmatranju

ulaznog gibanja uzeta je atenuacijska relacija koja ovisi o frekvenciji, $Q_c(f) = 78f_c^{0.69}$ (Dasović 2015) i parametar $\kappa_0 = 0.028$ s, koji odgovara atenuaciji blizu izvora. Amplifikacijski faktor (engl. *Amplification factor*, AF) PGA na površini iznosi 1.6-1.8 za Podsljemensku zonu, za centar grada iznosi otprilike 1.4-1.6 te iznosi 1.3 za Novi zagreb gdje se nalaze aluvijalni nanosi Save.



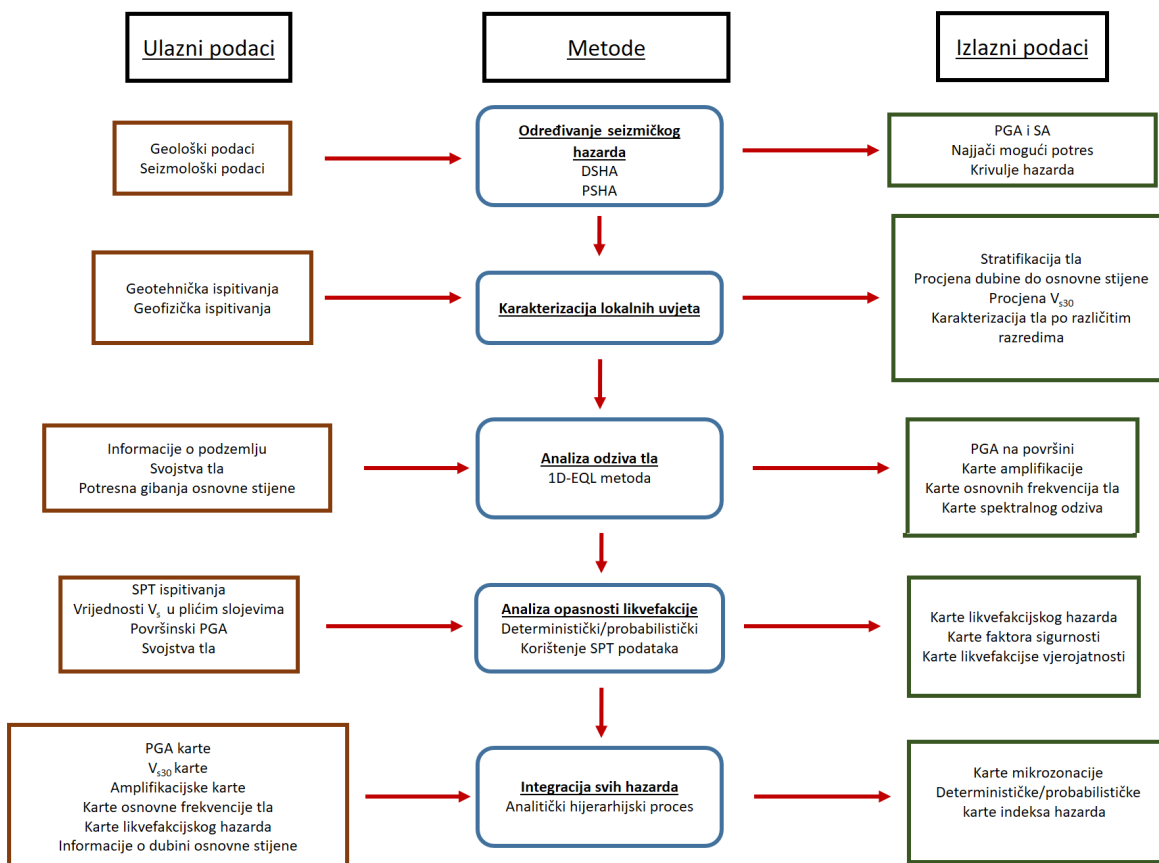
Slika 2.3. a) Karta amplifikacije PGA na površini za ulazno gibanje zagrebačkog potresa M5.5 b) Kartu amplifikacijskog faktora na osnovnom periodu tla za ulazno gibanje zagrebačkog potresa M5.5 (Markušić i sur. 2020).

3. Seizmička mikrozonacija

Seizmička mikrozonacija je postupak podjele potresno osjetljivih područja na zone s obzirom na njihova geološka i geofizička obilježja. Karte seizmičke mikrozonacije daju korisne ulazne podatke za projektiranje novih građevina, kao i za obnavljanje i ojačavanje postojećih građevina, stoga je mikrozonacija koristan alat pri izradi urbanizacijskih planova. Karte makroseizmičkog hazarda daju informacije o PGA na osnovnoj stijeni te ne uzimaju u obzir lokalne efekte tla, koji mogu imati značajan utjecaj na potresno gibanje. Potresi u Meksiku (1985.), Loma Prieta (Kalifornija, 1989.) i Bhuj (Indija, 2001.) klasični su primjeri gdje su lokalni uvjeti tla uzrokovali velike štete (Kramer 1996 i Narayan i Sharma (2004)). Pri seizmičkoj mikrozonaciji vrše se razna geofizička i geotehnička ispitivanja da bi se utvrdili lokalni uvjeti tla i da bi se odredile zone koje su homogene po seizmološkim i geološkim značajkama.

Seizmički hazard kod lokalnih uvjeta tla odnosi se na odziv tla na potresno gibanje, aktiviranje klizišta i pojavu likvefakcije. Svaka od ovih pojava je specifična pa se za procjenu svake koriste različite metode. Još ne postoji formalizirani standardni pristup u procjeni tih pojava, a najveći napredak napravili su ISSMGE (1999). Svaka od tih pojava je prema ISSMGE (1999) podijeljena na tri razine zonacije. Razine zonacije razlikuju se po kvaliteti i kvantiteti ulaznih podataka, prva razina je najjednostavnija, a treća je najopsežnija i najdetaljnija (tablica A1). Na slici 3.1 prikazan je dijagram toka seizmičke mikrozonacije kako je predstavljen u radu James i sur. (2013).

Prvi korak mikrozonacije sa slike 3.1 je određivanje karti seizmičkog hazarda. Pri izradi karata seizmičkog hazarda koriste se geološki podaci (podaci o aktivnim rasjedima) i seizmološki podaci (katalog potresa). Drugi korak mikrozonacije je određivanje lokalnih uvjeta tla pomoću geoloških (geološke karte, bušotine) i geotehničkih (V_S , Laméove konstante, gustoća pojedinih slojeva tla) podataka. Treći korak mikrozonacije po James i sur. (2013) je seizmološka analiza odziva tla za koju je potrebno napraviti dodatna laboratorijska mjerenja (krivulje prigušenja i modula smicanja) o svojstvima tla te je potrebno imati seizmogramе prijašnjih potresa (po mogućnosti s promatranog područja). Četvrti korak mikrozonacije je analiza opasnosti od pojave likvefakcije za koju je potrebno napraviti dodatna laboratorijska mjerenja (čvrstoća materijala pri cikličkom naprezanju) i dodatna mjerenja penetracijskim testovima. Zadnji, peti korak mikrozonacije je integracija svih dobivenih podataka u karte mikrozonacije i karte indeksa hazarda. Iz priloženog se jasno vidi da je pri mikrozonaciji potrebna suradnja između puno različitih zanimanja pa je multidisciplinarnost nužna kako bi se mikrozonacija napravila uspješno.



Slika 3.1. Dijagram toka koji prikazuje korake seizmičke mikrozonacije, prema James i sur. (2013).

3.1. Određivanje seizmičkog hazarda

Procjena odziva tla na potresno gibanje prvi je korak u seizmičkoj mikrozonaciji i ovisi o: regionalnoj seizmičnosti, atenuaciji i lokalnim uvjetima tla. Kako navodi Kramer (1996) najvažniji od tih faktora su lokalni uvjeti tla.

3.1.1. Regionalna seizmičnost

Za procjenu regionalne seizmičnosti koriste se geološki i seizmološki podaci. Geološki podaci koji se koriste su karte aktivnih rasjeda koje su dostupne za većinu područja. Seizmološki podaci prikupljaju se iz kataloga povijesnih i instrumentalno zabilježenih potresa, npr. kako je podijeljeno u Hrvatskom katalogu potresa: povijesni (događaji prije 1908.) te instrumentalni (poslije 1908.) (Herak i sur. 1996). Postoje dva pristupa ocjenjivanja seizmičnosti: deterministički (engl. *Deterministic Seismic Hazard Analysis*, DSHA) i probabilistički pristup (engl. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, PSHA). Deterministički pristup se temelji na jednom odabranom scenariju potresa i definiranoj vjerojatnosti premašenja gibanja tla. Probabilistički pristup obuhvaća sve potresne scenarije i sve vjerojatnosti gibanja tla te računa vjerojatnost pojave potresa tijekom nekog vremenskog razdoblja. Probabilistički pristup se može smatrati kao suma svih determinističkih scenarija s nekom konačnom vjerojatnosti pojave, u ovom

kontekstu deterministički pristup koji se fokusira na samo jedan scenarij, osigurava da su svi scenariji realni (McGuire 2001).

3.1.2. Atenuacija

Atenuacija je gubljenje energije seizmičkih valova pri propagaciji kroz Zemlju. Za određivanje seizmičkog hazarda najčešće se koriste empirijske atenuacijske relacije (engl. *Ground motion prediction equations*, GMPE). GMPE relacije mogu se temeljiti na intenzitetu, PGA, vršnoj brzini tla (engl. *peak ground velocity*, PGV), spektralnoj akceleraciji (engl. *spectral acceleration*, SA) ili dr. Relacije koje se temelje na intenzitetu razvijaju se pomoću izoseista povijesnih potresa. Instrumentalno mjereni intenziteti poput PGA i PGV pouzdaniji su načini mjerenja razine gibanja tla nego seizmička skala intenziteta. GMPE su tipično logaritamske relacije koje ovise o epicentralnoj udaljenosti i magnitudi potresa, a temelje se na PGA ili SA (Finn i sur. 2004). Pouzdanost GMPE relacija ovisi o kvaliteti i kvantiteti podataka te o rasponu magnituda i epicentralnih udaljenosti korištenih u analizi. U diplomskom radu koristile su se atenuacijske relacije temeljene na PGA iz radova Herak i sur. (2001) i Markušić i sur. (2002). Pokazalo se da atenuacijska relacija iz rada Herak i sur. (2001) daje prevelike vrijednosti za PGA, pa se koristi samo atenuacijska relacija iz rada Markušić i sur. (2002). Najvjerojatniji razlog premašivanja kod Herak i sur. (2001) relacije je zbog pretpostavke da se sve seizmološke stanice korištene u analizi nalaze na čvrstom tlu ili stijeni, dok se u radu Markušić i sur. (2002) uzimaju u obzir i lokalni uvjeti tla.

$$\log(a_{max}^{hor}) = -1.461 + 0.326M_L - 1.086\log(\sqrt{D^2 + 10.2^2}) + 0.308P \quad (3.1.)$$

Izraz 3.1. prikazuje atenuacijsku relaciju za maksimalnu horizontalnu akceleraciju iz rada Markušić i sur. (2002), gdje je D epicentralna udaljenost, M_L je lokalna magnituda, a P je jednak nuli za srednju vrijednost te je jednak jedan za 84 percentila vrijednosti od $\log(a_{max,h})$. Standardne pogreške koeficijenata su: $c_1 = -1.461 \pm 0.188$, $c_2 = 0.326 \pm 0.035$, $c_3 = -1.086 \pm 0.092$ i $c_4 = 10.2 \pm 4.5$ km.

3.1.3. Lokalni uvjeti tla

Jednom kada se odrede karakteristike mogućeg potresa na osnovnoj stijeni potrebno je odrediti karakteristike gibanja tla na površini, a prema James i sur. (2013) to je drugi korak seizmičke mikrozonacije. Odziv tla na ulazno gibanje osnovne stijene ovisit će o lokalnim geološkim i geotehničkim uvjetima tla. Procjena lokalnih uvjeta tla ovisi o razmjeru zonacije, tj. ovisi o razredu mikrozonacije.

I razred uključuje evaluaciju utjecaja lokalnih uvjeta tla pomoću postojećih informacija. Mogu se koristiti informacije o distribuciji štete nastale prijašnjim potresima, tj. izrađuju se karte izoseista. Također mogu se koristiti i geološke karte, postoje empirijske relacije koje povezuju površinsku geologiju i seizmički intenzitet.

II razred zahtjeva dodatna geotehnička i geofizička ispitivanja. Idealno bi bilo kad bi se geotehnička i geofizička ispitivanja napravila do dubine osnovne stijene. Pod geotehnička istraživanja se ubraja bušenje istražnih bušotina iz kojih se mogu uzimati uzorci za laboratorijska ispitivanja. Neka od geotehničkih *in-situ* ispitivanja su standardni penetracijski test (engl. *Standard Penetration Test*, SPT) koji se koristi za nekohezivna i relativno čvrsta tla i penetracijski test šiljkom (engl. *Cone Penetration Test*, CPT)

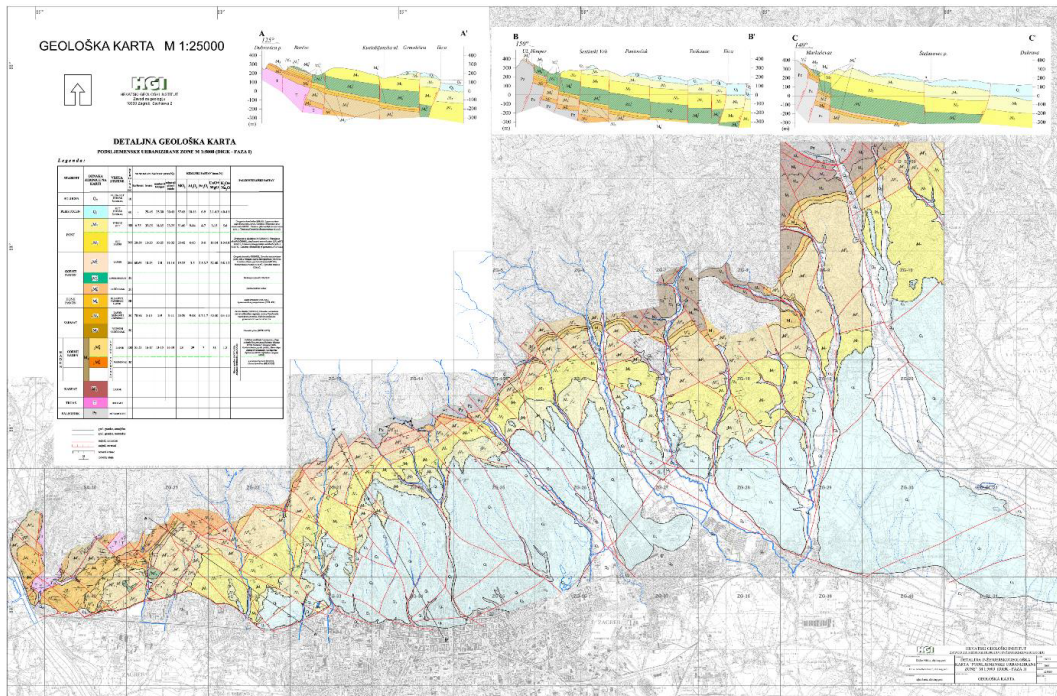
koji se koristi za meka tla. Od geofizičkih ispitivanja najčešće se koriste: seizmička refrakcija, višekanalna analiza površinskih valova (engl. *Multichannel Analysis of Surface Waves*, MASW), *Down-hole* mjerenja, *Cross-hole* mjerenja, električna tomografija i mjerenje seizmičkog mikrotremora.

III razred zonacije (po James i sur. (2013) treći korak seizmičke mikrozonacije) obuhvaća analize odziva tla poput jednodimenzionalne ekvivalent linearne (engl. *Equivalent linear*, EQL) ili nelinearne analize te 2D i 3D analize. Za analize odziva tla EQL metodom koja se koristi u diplomskom radu, potrebno je poznavati stratigrafiju tla, brzine posmičnih valova, gustoće tla te krivulje prigušenja i modula smicanja.

3.2. Seizmička i geološka mikrozonacija dijela grada Zagreba

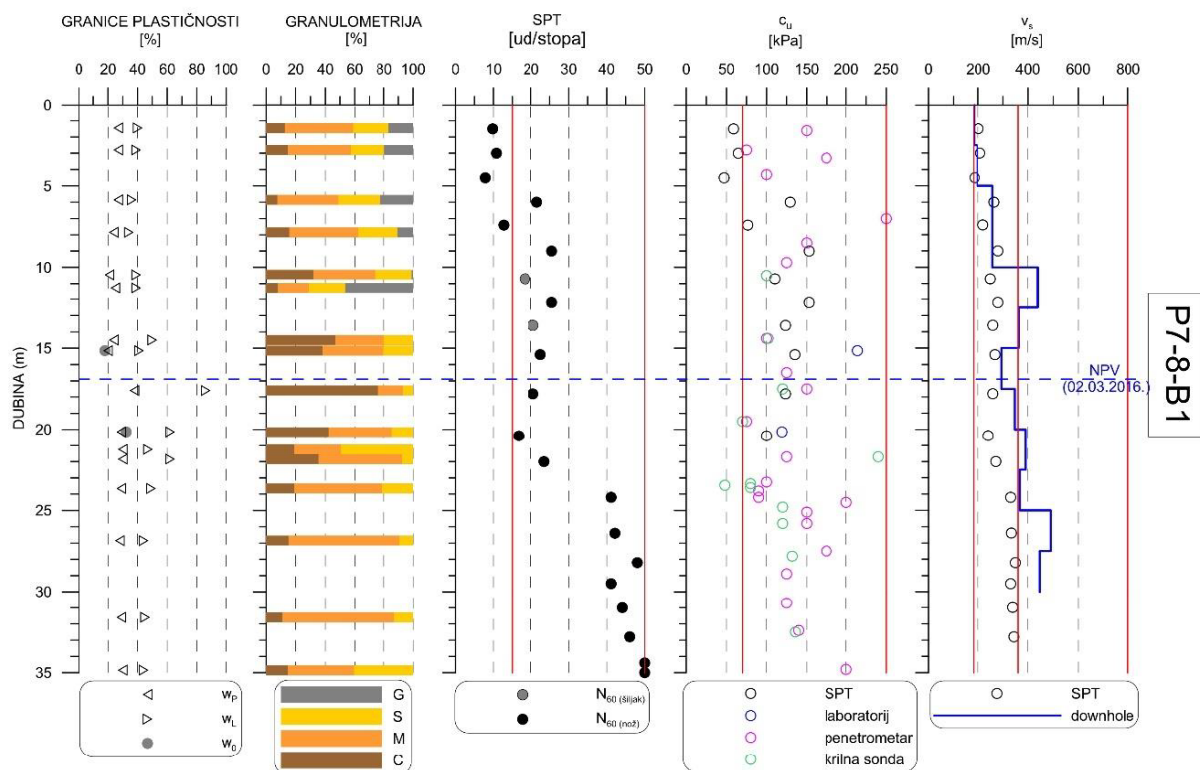
Zagreb je glavni grad Hrvatske s više od 800 000 stanovnika neravnomjerno raspoređenih na otprilike 640 km². Gustoća naseljenosti najveća je na aluvijalnoj ravnici rijeke Save i na južnim padinama planine Medvednice. Da bi se umanjili rizici od nastanka štete i gubitka života od prirodnih hazarda Gradsko poglavarstvo pokrenulo je studiju: *Seizmološka i geološka mikrozonacija dijela grada Zagreba*. Studija je napravljena po Eurokodu 8 u periodu od 2017. do 2019. te je obuhvatila područje južnih padina Medvednice, otprilike 175 km². Podsljemnska zona gusto je naseljena (~74% područja je naseljeno ili djelomično naseljeno) te postoje detaljni geološki podaci Podsljemenske zone. Geološke i hidrogeološke karte mjerila 1:25 000 (slika 3.2) kao i detaljne inženjersko geološke karte mjerila 1:5 000 napravljene su zbog detaljnog istraživanja klizišta na ovom području (od 2004. do 2007 i od 2015. do 2018.), stoga je Podsljemenska zona bila logičan izbor početnog probnog poligona mikrozonacije (Padovan i sur. 2021).

Područje grada Zagreba je u geološkom smislu kompleksno te je većina geoloških karti zagrebačkog područja male rezolucije (1:100 000 i 1:500 000). Najstarije stijene u ovom području su paleozojske metamorfne stijene (škriljevac, mramor, flit) i trijaski dolomiti. Vrlo česte su naslage miocenskih sedimenata (lapori, pješčenjaci, konglomerati, silti), prisutni su i kvartarni sedimenti pijeska i šljunka s glinom u različitim omjerima. U promatranom području omjeri materijala mogu se razlikovati i lateralno i vertikalno pa se i distribucija veličine čestica (granularnost) može jako razlikovati.



Slika 3.2. Geološka karta s tri prognostička geološka profila, u mjerilu 1:25 000 (Miklin i sur. 2010).

Geotehnička istraživanja koja su napravljena za studiju sastojala su se od terenskih i laboratorijskih istraživanja. Bušotine su izvedene do dubine od 35 m, izvršena je klasifikacija stijena i tla te laboratorijska ispitivanja na poremećenim i neporemećenim uzorcima tla (slika 3.3). SPT i neporemećeni uzorci tla su se uzimali u intervalima od otprilike 2 m, dok su se u detaljnim geotehničkim bušotinama uzimali svakih 1.5 m. Laboratorijska ispitivanja su se vršila prema HRN EN ISO/IEC 17025:2017 (2017) standardu u laboratoriju za ispitivanja tla i stijena Geotehničkog studija d.o.o. Za seizmičku zonaciju napravljene su 27 bušotina koje su pripremljene za dodatna *Down-hole* mjerenja. Samo na tri bušotine napravljena su dodatna laboratorijska ispitivanja da bi se odredile krivulje prigušenja i modula smicanja. Na svakoj od bušotina izvršena je klasifikacija tla prema Eurokodu 8 (tablica A2) uzimajući u obzir sve relevantne informacije: stratigrafski profil, nedrenirana posmična čvrstoća tla (c_u), SPT i prosječna brzina posmičnih valova do dubine od 30 m (V_{S30}).



Slika 3.3. Prikaz rezultata terenskih i laboratorijskih mjerenja na bušotini P7-8-B1: Atterbergove granice plastičnosti, granulometrijski sastav tla, broj udaraca SPT-a, nedrenirana čvrstoća te V_S iz *Down-hole* mjerenja (HGI 2019).

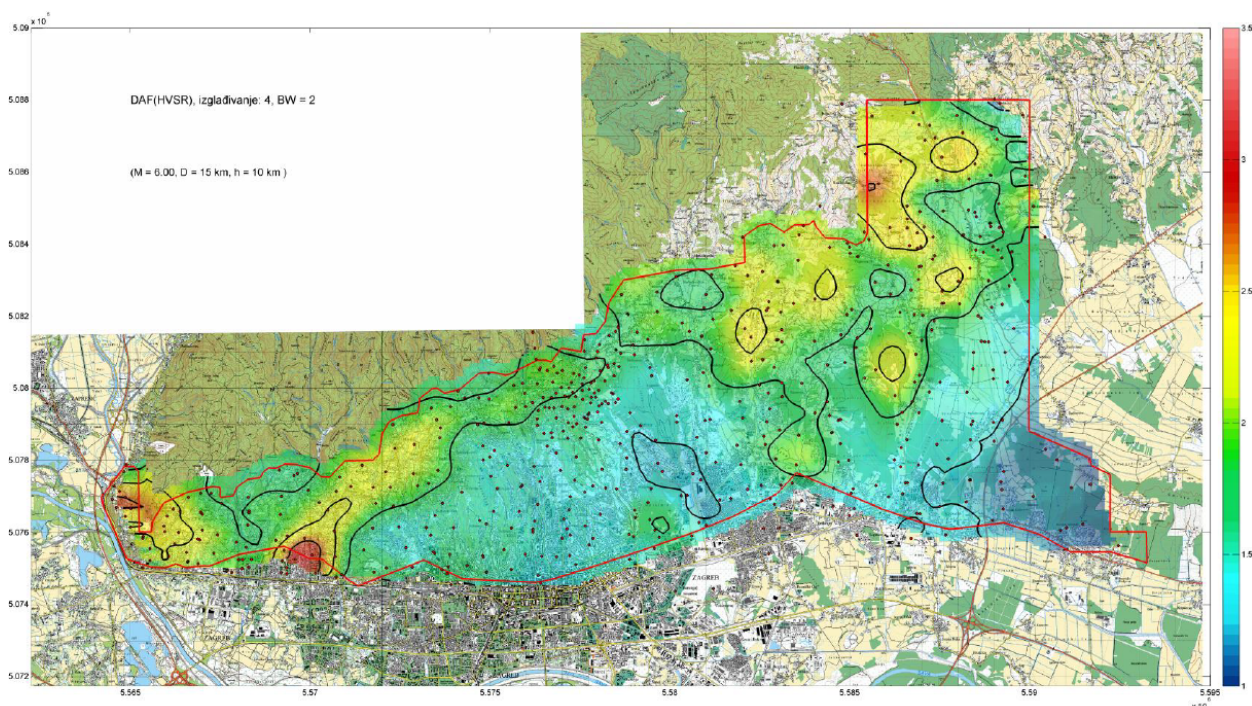
U sklopu studije provedena su opsežna geofizička istraživanja, koja su bila koncentrirana oko 14 profila. Sveukupno je napravljeno 150 1D MASW profila, 75 profila plitke seizmičke refrakcije za longitudinalne (P) i posmične (T) valove, te je napravljeno 27 *Down-hole* mjerenja brzine longitudinalnih (P) i posmičnih (S) valova. Iz 1D MASW modela brzine S valova izračunat je modul smicanja i modul elastičnosti (Dal Moro (2014)). *Down-hole* mjerenja su vršena do dubine od 30 m te se iz izmjerenih vrijednosti brzina P i S valova izračunati još Poissonov omjer, Youngov modul elastičnosti i modul smicanja.

Od geofizičkih istraživanja u studiju uključena su i mjerenja mikroseizmičkog nemira, u sklopu projekta *Mjerenje i osnovna interpretacija mikroseizmičkog nemira na području Grada Zagreba* (Herak i sur. 2007) napravljena su mjerenja na 421 poziciji, dok su u sklopu NATO projekta *Assessment of Seismic Site Amplification and Seismic Building Vulnerability in the Former Yugoslav Republic of Macedonia, Croatia and Slovenia* napravljena 70 mjerenja. Iz svakog mjerenja mikrotremora izračunat je spektar amplituda kao i omjere vertikalnog i horizontalnog spektra Nakamura (1989). Pomoću HVSR mjerenja može se izračunati dinamički amplifikacijski faktor (engl. *Dynamic Amplification Factor*, DAF) (slika 3.4). DAF je definiran kao omjer fizikalnih veličina koje opisuju gibanje tla (PGA, PGV, ...) na osnovnoj stijeni i na površini (Herak i sur. 2007). Pri promatranju DAF-a najčešće se koristi iznos najveće horizontalne akceleracije (PGA) pa će tako definirani DAF ukazivati koliki je PGA površine u odnosu na PGA osnovne stijene. Ako se pretpostavi da je amplifikacijski spektar P valova ($AMP_P(f)$) približno jednak jedan (vrijedi kad su brzine P valova znatno veće od brzina S valova), onda se iz izraza za HVSR u slučaju vertikalno upadajućih valova 3.2.

dobije da je $DAF(HVSR)=DAF(AMP_S)$.

$$HVSR = \frac{AMP_S(f)}{AMP_P(f)} \quad (3.2.)$$

Numerički eksperimenti pokazali su da će iznos $DAF(HVSR)$ u pravilu biti 20% manji od iznosa $DAF(AMP_S)$ (HGI 2019). Pri računanju $DAF(HVSR)$ u obzir se ne uzimaju nelinearni odzivi tla koji se javljaju pri jakim potresima (akceleracije tla približno veće od 0.2 g). Nelinearni odzivi tla ovise o građi tla te mogu smanjiti DAF i za više od 50%. U obzir treba uzeti i činjenicu da topografija ima značajan utjecaj na $DAF(HVSR)$, može povećati DAF za više od 40%. Navedeni nedostaci $DAF(HVSR)$ su razlog zašto je EQL metoda potrebna budući da EQL metoda u obzir uzima nelinearne efekte.



Slika 3.4. DAF izračunat iz HVSR mjerenja. Parametri potresa: $M=6.0$, epicentralna udaljenost $D=15$ km, dubina $h=10$ km (Herak i sur. 2007).

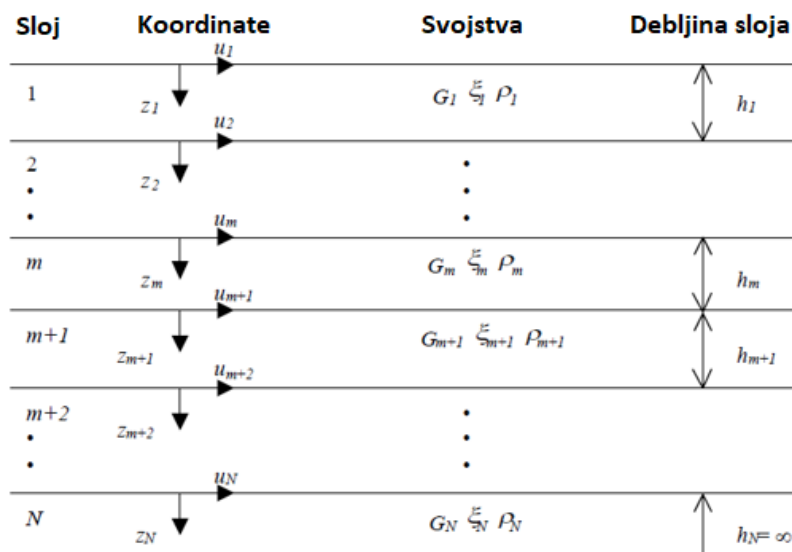
Prema shemi iz James i sur. (2013) u provedenoj seizmičkoj i geološkoj mikrozonaciji podsljemenske zone napravljena su samo prva dva koraka. Napravljena je karta područja jednake amplifikacije trešnje tla u odnosu na osnovnu stijenu, podjela je napravljena u skladu s normama Eurokod 8 koje sadrže uputu za protupotresnu gradnju. Prema karakterizaciji tipova tla iz Eurokoda 8 napravljeno je zoniranje prema tipu tla (slika 3.5). Iz mjerenja mikrosezmičkog nemira izračunata je karta DAF-a, odnosno karte HVSR spektra. Geofizička i geotehnička istraživanja dala su detaljan uvid građe podsljemenske zone.

U seizmološkoj i geološkoj mikrozonaciji podsljemenske zone nije napravljena analiza odziva tla, treći korak u mikrozonaciji prema James i sur. (2013), tj. *III razred* odziva tla prema ISSMGE (1999). Analiza seizmičkog odziva tla je važna jer daje informacije o iznosu PGA na površini, osnovnoj frekvenciji tla te daje spektar odziva tla

4. Ekvivalent-lineararna metoda (EQL) odziva tla

Ekvivalent-lineararna metoda je numerička metoda koja se koristi za izračun odziva tla na neko ulazno gibanje osnovne stijene ($V_S > 800 \text{ m/s}$). Pomoću dinamičkih svojstava tla, računa se utjecaj lokalnog tla na amplifikaciju seizmičkih gibanja. Metodu su prvi uveli Idriss i Seed (1968) u 1-D obliku, dok ju je prvi implementirao Schnabel (1972) u programu *SHAKE*. Danas postoje mnogobrojni programi za računanje odziva tla, a u diplomskom radu koristit će se program *DEEPSOIL*, Hashash i sur. (2016).

1-D EQL metoda, koju je uveo Schnabel (1972), temelji se na pretpostavci da postoje horizontalno položeni slojevi tla u kojima tijekom potresnog gibanja dominiraju vertikalno propagirajući SH valovi. Brzine posmičnih valova plicih slojeva tla obično su niže od brzina dubljih slojeva tla pa će seizmičke zrake koje upadaju pod kutom na horizontalne granice između slojeva, nakon višestrukih refrakcija, postati gotovo vertikalne (Snellov zakon). Pretpostavlja se da su horizontalni slojevi homogeni te da se nalaze iznad elastične stijene koja se proteže u beskonačnost, tj. iznad poluprostora (slika 4.1). Svaki sloj definiran je s debljinom (h), gustoćom (ρ) i dinamičkim svojstvima: modul smicanja (G) i omjer prigušenja (ξ) kao funkcije deformacije (γ). Model se sastoji od N slojeva, gdje je N -ti sloj osnovna stijena.

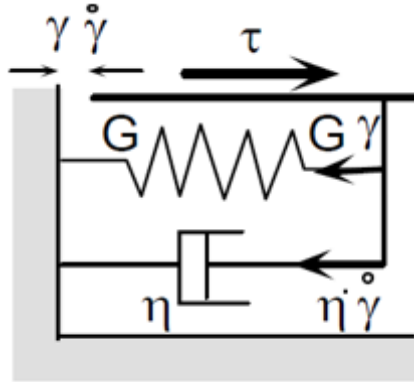


Slika 4.1. Višeslojni model tla na elastičnoj stijeni (1 sloj-površina, N -ti-osnovna stijena)(Schnabel 1972; Kramer 1996; Bardet i Tobita 2001). Svojstva tla pojedinog sloja: modul elastičnosti (G_i), omjer prigušenja (ξ_i), debljina (h_i), gustoća (ρ_i).

EQL metoda odziva tla se sastoji od četiri koraka: 1.) određivanje geometrije profila tla i određivanje brzine posmičnih valova u svakom sloju, 2.) određivanje pravilnih dinamičkih svojstva tla, opadanje modula smicanja G/G_{max} i krivulje prigušenja ξ (npr. Seed i sur. 1986; Vučetić i Dobry 1991), 3.) specificiranje ulaznog gibanja osnovne stijene te 4.) širenje ulaznog gibanja osnovne stijene kroz profil tla da bi se odredilo gibanje i maksimalno naprezanje u svakom sloju tla. Ekvivalent-lineararni model tla koji će biti definiran u sljedećem odjeljku, odnosi se na prva dva koraka metode.

4.1. Ekvivalent-linearini model tla

Nakon određene razine podrhtavanja tla, u tlu dolazi do neelastičnih deformacija pa se ne smiju zanemariti nelinearni efekti u analizi odziva tla. Ekvivalent-linearini model tla se zasniva na linearno viskoelastičnom Kelvin-Voight modelu (slika 4.2), koji aproksimira gibanje tla pri cikličkom naprežanju (Schnabel 1972, Seed i sur. 1986).



Slika 4.2. Shematski reprezentacija odnosa posmičnog napona (τ) i posmičnog naprežanja (γ) u Kelvin-Voight-ovom modelu (Kramer 1996).

Posmični napon (τ) ovisi o posmičnom naprežanju (γ) i promjeni posmičnog naprežanja ($\partial\gamma/\partial t$):

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial\gamma}{\partial t}, \quad (4.1.)$$

gdje je η viskoznost. Ako posmični napon (τ) djeluje kontinuirano, dolazi do deformiranja materijala smanjenom brzinom, asimptotski, sve dok se ne postigne ravnotežno stanje. Nakon prestanka djelovanja posmičnog napona, materijal će se polako vratiti u svoje nedeformirano stanje. Pretpostavka je da posmično naprežanje ima harmonijski oblik:

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t). \quad (4.2.)$$

Uvrštavanjem (4.2.) u (4.1.) dobije se:

$$\tau = G\gamma_0 \sin(\omega t) + \eta\omega \cos(\omega t). \quad (4.3.)$$

Jednadžbe (4.2.) i (4.3.) čine eliptičnu napon-naprežanje krivulju Kelvin-Voight modela. Prijenos energije seizmičkih valova u tlu nije potpuno elastičan, dolazi do klizanja čestica tla u odnosu jedne prema drugoj (Kramer 1996). Energija koja je disipirana u jednom ciklusu opterećenja (W_D) jednaka je površini ispod napon-naprežanje krivulje, jednadžba (4.4.).

$$W_D = \oint_{\tau_c} \tau d\tau = \pi\omega\eta\gamma_c^2 \quad (4.4.)$$

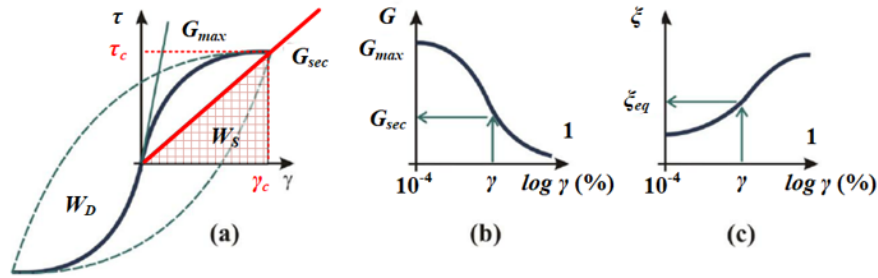
Maksimalna energija naprežanja (W_S) pohranjena u sistemu je dana jednadžbom (4.5.).

$$W_S = \frac{1}{2}\tau_c\gamma_c^2 = \frac{1}{2}G\gamma_c^2 \quad (4.5.)$$

U jednadžbi (4.6.) je definiran ekvivalent-linearni omjer prigušenja ξ , omjer prigušenja u određenom ciklusu opterećenja.

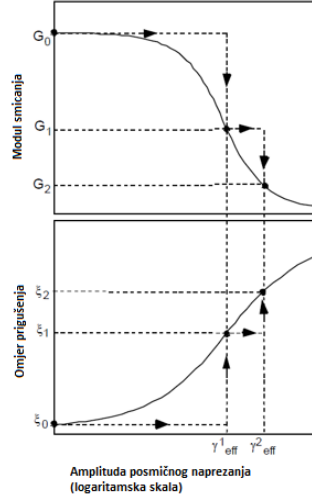
$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{\eta\omega}{2G} \quad (4.6.)$$

Ekvivalent-linearni modul smicanja je definiran kao sekanta modula smicanja G_{sec} , gdje je G_{sec} omjer napona (τ_c) i naprezanja (γ_c) na vrhovima napon-naprezanje krivulje slika 4.3(a). Pri velikim deformacijama javlja se rasipanje tla, g se smanjuje dok se ξ povećava s rastom naprezanja, stoga dolazi do nelinearnog odziva tla. Ekvivalentno prigušenje se može odrediti pomoću laboratorijskih ispitivanja (npr. Seed i sur. 1984, Vučetić i Dobry 1991), a brzina se posmičnih valova (V_S) svakog sloja tla može odrediti geofizičkim istraživanjima (*MASW, DOWN-HOLE*). Brzina posmičnih valova je dobar pokazatelj dinamičkih svojstva tla, V_S je direktno povezan s maksimalnom vrijednosti modula smicanja, $G_{max} = \rho V_S^2$. Pod uvjetom da je poznat G_{max} , moguće je odrediti naprezanje iz reduciranih krivulja modula smicanja tla (G/G_{max}) koje su objavljene prije (npr. Schnabel 1972, Seed i sur. 1986, Vučetić i Dobry 1991).



Slika 4.3. a) Krivulja histerenze za napon-naprezanje koja predstavlja ekvivalent-linearni model b) Promjena modula smicanja g s posmičnim naprezanjem c) Promjena omjera gušenja ξ s posmičnim naprezanjem (Kramer 1996, Bardet i Tobita 2001).

U EQL metodi odziva tla nelinearni efekti su aproksimirani iterativnim procesom (slika 4.4): g i ξ variraju s naprezanjem u svakom pojedinom sloju tla. Prvo se definiraju početne vrijednosti G_0 (G_{max}) i ξ_0 za svaki sloj. Na temelju definiranih vrijednosti za G_0 i ξ_0 , računa se efektivno posmično naprezanje γ_{eff} . Vršne vrijednosti posmičnog naprezanja kod potresnog gibanja obično imaju nepravilan oblik pa se za efektivno posmično naprezanje uzima 65% od maksimalne vrijednosti. Efektivna vrijednost posmičnog naprezanja za pojedini sloj se određuje pomoću maksimalnog induciranoj posmičnog napona: $\gamma_{eff}^i = 0.65 \cdot \gamma_{max}^i$, gdje i označava promatrani sloj. Za sljedeću iteraciju u svakom sloju se ponovno računaju vrijednosti G_{i+1} i ξ_{i+1} koje odgovaraju induciranoj γ_{eff}^i . Nelinearni odzivi tla ponovno se računaju koristeći nova dinamička svojstva tla i ponovno se određuje γ_{eff}^i . Ovaj postupak se ponavlja sve dok se vrijednosti G_i i ξ_i u dvije uzastopne iteracije razlikuju za više od 5% - 10% te dok su predviđena efektivna naprezanja u skladu s pretpostavljenim efektivnim naprezanjem (Schnabel i sur. 1972). EQL metoda je aproksimacija prvog reda za nelinearni odziv tla pri cikličkom gibanju tla (potres) u kojem krutost g opada, a prigušenje ξ raste s rastom posmičnog naprezanja.



Slika 4.4. Iterativni proces ekvivalent-linearne aproksimacije svojstva tla g i ξ da bi bili u skladu s induciranim posmičnim naprezanjem γ_{eff} (Bardet i Tobita 2001).

4.2. Analiza odziva tla temeljena na jednodimenzionalnoj teoriji propagacije seizmičkih valova

EQL metoda analize odziva tla za model prikazan na slici 4.1. temelji se na rješavanju jednodimenzionalne valne jednadžbe za vertikalno propagirajuće SH valove. Pretpostavlja se da se valovi šire od osnovne stijene prema površini. Uvrštavanjem jednadžbe (4.1.) za τ iz Kelvin-Voight-ovog modela tla u 1-D valnu jednadžbu (4.7.) (po Kramer (1996)):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z}, \quad (4.7.)$$

dobiva se:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}. \quad (4.8.)$$

Pomak $u(z, t)$ za harmoničko gibanje se može zapisati kao:

$$u(z, t) = U(z)e^{i\omega t}. \quad (4.9.)$$

Uvrštavanje (4.9.) u (4.8.) dovodi do jednadžbi:

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \quad (4.10.)$$

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U. \quad (4.11.)$$

U jednadžbi (4.11.) G^* je kompleksni modul smicanja $G^* = G + i\omega\eta$ te on predstavlja kompleksnu maticu krutosti tla. Ovisnost o frekvenciji kod kompleksnog modula elastičnosti se može eliminirati koristeći jednadžbu (4.6.), $G^* = G(1 + 2i\xi)$. Izraz za kompleksnu brzinu glasi $V_S^* = \sqrt{G^*/\rho}$, a izraz za kompleksni valni broj glasi $k^* = \omega\sqrt{\rho/G^*}$.

Općenito rješenje jednadžbe (4.11.) je:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t - k^* z)} + Be^{i(\omega t + k^* z)}, \quad (4.12.)$$

gdje A predstavlja amplitudu vala koji ide prema gore ($-z$), a B predstavlja amplitudu vala koji ide prema dolje ($+z$).

Odgovarajući posmični napon τ će onda glasiti:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma = G^* \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* G^* (Ae^{ik^* z} - Be^{-ik^* z}), \quad (4.13.)$$

Rubni uvjeti koje vrijede za pomak na vrhu i dnu nekog sloja m su:

$$u_m(z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t}, \quad (4.14.a)$$

$$u_m(z_m = h_m, t) = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t}. \quad (4.14.b)$$

Iz uvjeta da je gibanje između slojeva kontinuirano ($u_m(z_m = h_m, t) = u_{m+1}(z_{m+1} = 0, t)$) dobiva se:

$$A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m}. \quad (4.15.)$$

Rubni uvjeti koji vrijede za posmični napon na vrhu i dnu nekog sloja m su:

$$\tau_m(z_m = 0, t) = ik_m^* G_m^* (A_m - B_m)e^{i\omega t}, \quad (4.16.a)$$

$$\tau_m(z_m = h_m, t) = ik_m^* G_m^* (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t}. \quad (4.16.b)$$

A iz uvjeta da je posmični napon između slojeva kontinuiran ($\tau_m(z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(z_{m+1} = 0, t)$) dobiva se:

$$A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}). \quad (4.17.)$$

Nakon zbrajanja jednadžbi (4.15.) (4.17.) i oduzimanja jednadžbe (4.17.) od jednadžbe (4.15.) dobiva se rekurzivna formula za amplitude između sloja m i sloja $m+1$:

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m}, \quad (4.18.a)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m}. \quad (4.18.b)$$

Kompleksni omjer impedencije α_m^* predstavlja otpor čestica tla na gibanje i obrnuto je proporcionalan brzini posmičnih valova. Pri propagaciji seizmičkih valova kroz područje veće impedencije, povećava se otpor kretanja čestica, a amplituda valova se smanjuje da bi energija bila očuvana.

Na granicama slojeva m i $m+1$ kompleksni omjer impedencije α_m^* glasi:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \frac{\rho_m^* (V_S^*)_m}{\rho_{m+1}^* (V_S^*)_{m+1}} \quad (4.19.)$$

Ako se iskoristi rekurzivni algoritam s početkom na slobodnoj površini te ako se iskoristi rubni uvjet da napetosti iščezavaju na slobodnoj površini (posmična napetost je jednaka nuli), amplitude postaju:

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* (A_1 - B_1) e^{i\omega t} = 0 \rightarrow A_1 = B_1. \quad (4.20.)$$

Jednadžbe (4.18.a) i (4.18.b) se mogu primijeniti sukcesivno od sloja 2 do sloja m , tada će odnos između amplituda u slojevima biti:

$$A_m = a_m(\omega) A_1, \quad (4.21.a)$$

$$B_m = b_m(\omega) B_1. \quad (4.21.b)$$

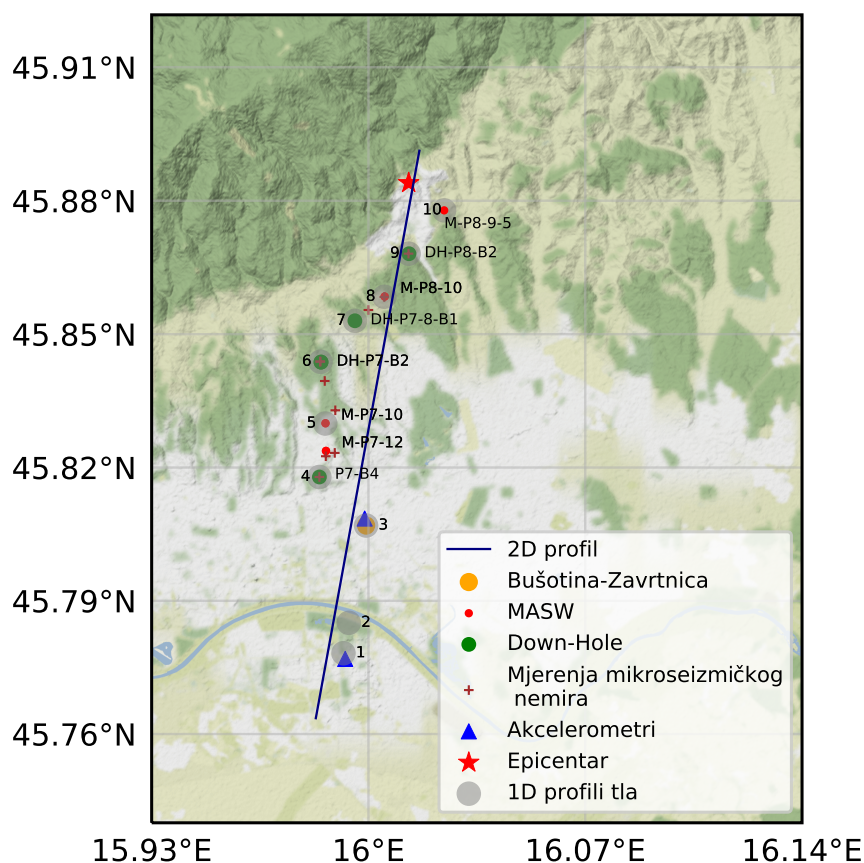
Može se definirati transfer funkcija $TF_{m,n}(\omega)$ koja će povezivati amplitude (a_n, b_n) sloja n s amplitudama (a_m, b_m) u sloju m :

$$TF_{m,n}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{a_m(\omega) + b_m(\omega)}{a_n(\omega) + b_n(\omega)} \quad (4.22.)$$

Jednadžba (4.22.) prikazuje amplifikaciju pomaka, brzine i akceleracije od sloja n do sloja m . Ako je poznato gibanje tla u nekom od slojeva pomoću rekurzivnih relacija (4.18.) moguće je odrediti gibanje tla u bilo kojem drugom sloju. Za par $(m, n) = (1, N)$ transfer funkcija $TF_{m,n}(\omega)$ povezuje gibanje površine s ulaznim gibanjem osnovne stijene (Kramer 1996).

5. EQL modeliranje

Pravac na kojem je izračunat 2D profil odziva tla prikazan je na slici 5.1. Profil se proteže od epicentra zagrebačkog potresa M5.5 (crvena zvjezdica na slici 5.1) do Novog Zagreba, te je odabran tako da bi se rezultati analize odziva tla mogli usporediti sa zapisima zagrebačkog potresa zabilježenim na dva akceleroografa. Jedan akceleroograf nalazi se u zgradi Prve Gimnazije (Avenija Dubrovnik 36, QARH), a drugi se nalazi u zgradi Ureda za upravljanje u hitnim situacijama (Ul. Kneza Branimira 71b, QUHS). Prilikom odabiranja položaja profila veliki utjecali imali su dostupni podaci, pa je profil odabran tako da se nalazi što bliže lokacijama gdje su izvršena geofizička i geotehnička istraživanja pri mikrozonaciji.



Slika 5.1. Karta profila koji ide od epicentra zagrebačkog M5.5 potresa do akceleroografa (QARH i QUHS). Na karti su prikazane lokacije na kojim je izračunata 1D EQL analiza odziva tla. Prikazane su lokacije geofizičkih i geotehničkih mjerenja iz mikrozonacije.

5.1. Određivanje lokacije i parametra 1D profila

Oko pravca za 2D profila izabrano je deset lokacija na kojima je izračunat odziv tla pomoću 1D EQL metode. U području gdje je napravljena mikrozonacija, pozicije birane su na mjestima *Down-hole* i MASW mjerenja te na pozicijama mjerenja mikrosezmičkog nemira. Izvan područja mikrozonacije odabrane su tri lokacije, lokacija 1 izabrana

je da bude što bliže zgradi Prve Gimnazije (QARH), a lokacija 3 da bude što bliže zgradi Ureda za upravljanje u hitnim situacijama (QUHS). Lokacije 1 i 3 izabrane su tako da bi se rezultati analize mogli usporediti sa zabilježenim podacima akceleroografa. Uvjeti za poziciju 2 bili su da se nalazi između lokacije 1 i 3 te da je na lokaciji na kojoj će se lako izvršiti mjerenja radi čega je odabran park Bundek. Na slici 5.1 prikazane su lokacije odabranih profila tla, a u tablici 5.1 nalaze se podaci o epicentralnoj udaljenosti, prosječnoj brzini posmičnih valova do dubine od trideset metara (V_{S30}), osnovna frekvencija tla (T_0) i dubina od osnovne stijene. U jednadžbama 5.1. i 5.2. prikazani su izrazi pomoću kojih su izračunati V_{S30} i T_0 :

$$\frac{1}{\bar{V}_S} = \frac{1}{H} \left(\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{(V_S)_i} \right), \quad (5.1.)$$

$$T_0 = 4 \frac{H}{\bar{V}_S} = 4 \left(\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{(V_S)_i} \right). \quad (5.2.)$$

Da bi se iz jednadžbe 5.1. izračunao V_{S30} , dubina h_i ide do 30 m, tj. $H=30$ m.

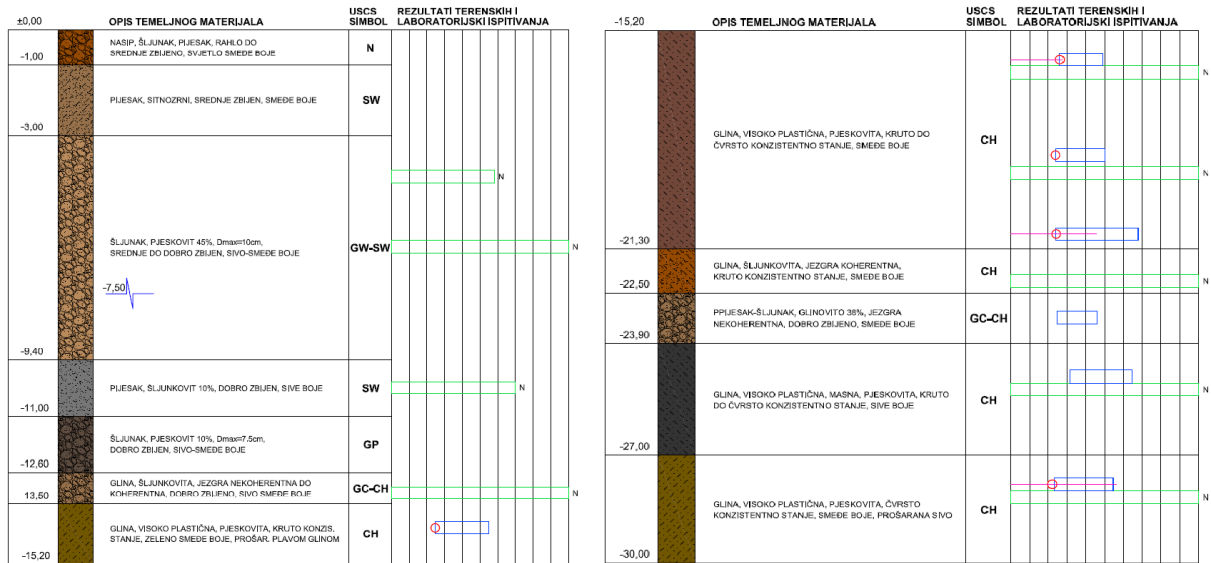
Tablica 5.1. Parametri odabranih lokacija: epicentralna udaljenost, V_{S30} , osnovna frekvencija tla i dubina do osnovne stijene (H_{800} je dubina sloja definiran s $V_S > 800$ m/s). Crveno su označene pozicije gdje se nalaze akcelerometrijske postaje.

Br. profila	Epicentralna udaljenost (m)	V_{S30} (m/s)	f_0 (Hz)	H_{800} (m) ($V_S > 800$ m/s)
1 (QARH)	11873	350	1.58	80
2	11101	334	1.46	80
3 (QUHS)	8631	293	1.73	50
4	7684	291	1.79	50
5	6367	371	3.09	30
6	4987	285	1.79	50
7	3699	302	1.87	50
8	2909	292	1.82	50
9	1767	354	2.46	40
10	1122	398	3.03	35

U sklopu istraživanja za diplomski rad na lokacijama 1, 2 i 3 napravljena su MASW mjerenja, a terenska mjerenja izvršila je *Terra Compacta d.o.o.* (Dodatak B). Za lokacije 1 i 2 (Novi Zagreb) korišteni su podaci iz bušotine *KBNZ-1A* (nedovršena Sveučilišna bolnica) (Herak 2006) i podaci iz bušotina napravljenih pri izgradnje Arena Centra (Salković i sur. 2009). Na lokaciji 3 (Zavrtnica preko puta QUHS-a) MASW mjerenja napravljena su pokraj istražne bušotine (slika 5.2) bušene pri ispitivanjima tla za izgradnju poslovno-stambenog kompleksa.

Iz tablice 5.1 vidi se da se osnovna frekvencija postepeno povećava što su profili bliže epicentru, sukladno s tim smanjuje se i dubina do osnovne stijene. Vrijednosti V_{S30} variraju od otprilike 290 m/s do otprilike 400 m/s. Osnovna frekvencija kod zgrade Prve Gimnazije (QARH) iznosi $f_0 = 1.58$ Hz, a prosječna brzina posmičnih valova iznosi $V_{S30} = 350$ m/s, dok kod zgrade Ureda za upravljanje u hitnim situacijama

(QUHS) osnovna frekvencija iznosi $f_0 = 1.73$ Hz, a prosječna brzina posmičnih valova iznosi $V_{S30} = 293$ m/s.



Slika 5.2. Istražna bušotina B-15 na Zavrtnici: opis materijala, USCS klasifikacija tla, SPT (zeleni pravokutnik) i Atterberg-ove granice (plavi pravokutnik).

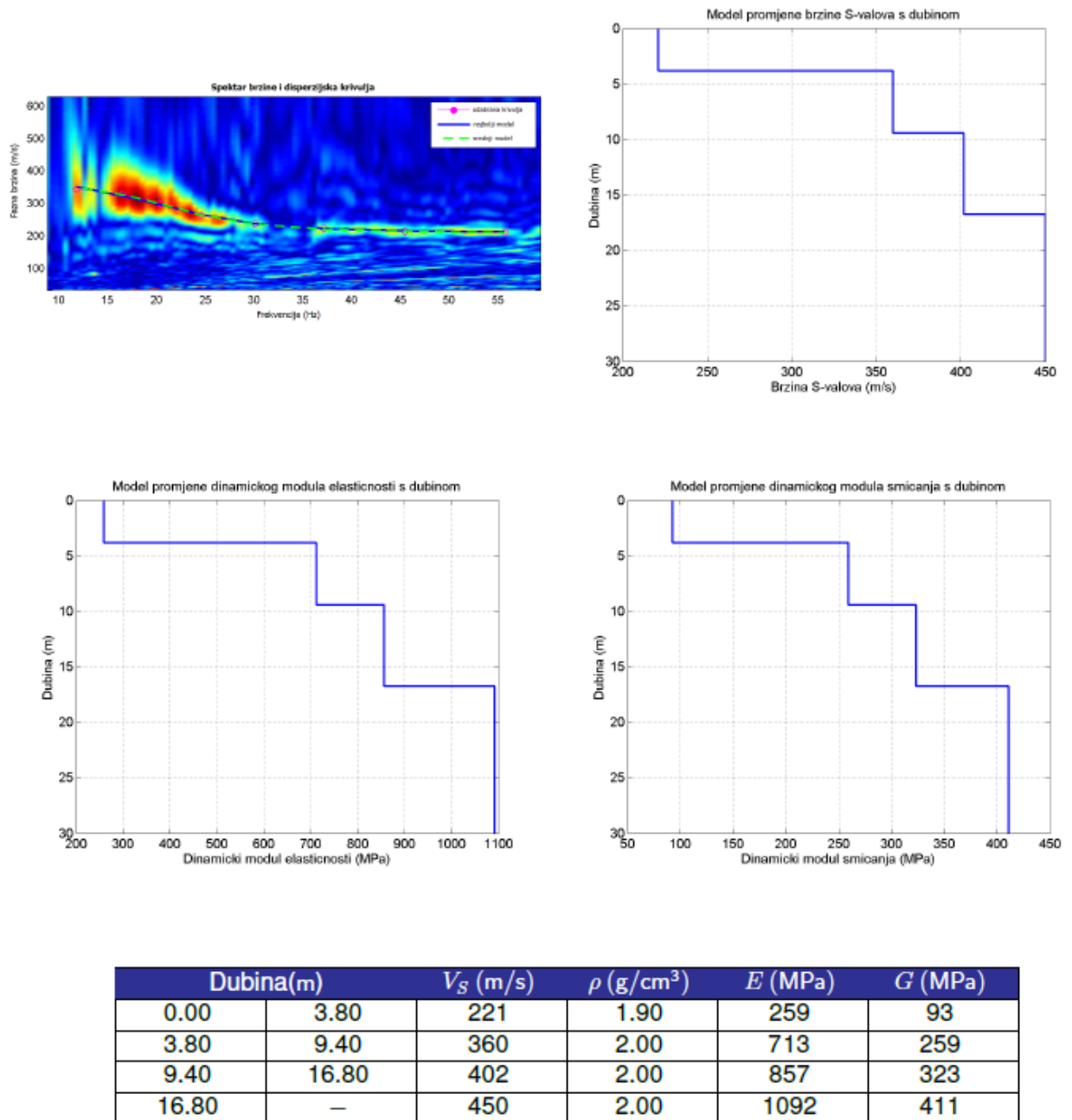
Lokacije 4-10 nalaze se u području gdje je napravljena mikrozonacija, *Down-hole* mjerena napravljena su na lokacijama 4, 6, 7 i 9 dok na lokacijama 5, 8 i 10 napravljena su samo MASW mjerenja (slika 5.3). Prilikom određivanja parametra tla na lokacijama gdje je napravljen samo MASW, tipovi tla određeni su pomoću prve najbliže bušotine. Kako bi se odredila dubina do osnovne stijene na lokacijama gdje mjerenja nisu došla dovoljno duboko, iskorištene su empirijske relacije iz Stanko i Markušić (2020a). Empirijska relacija koja povezuje dubinu osnovne stijene (d) s osnovnom frekvencijom tla (f_0) (5.3.) i empirijska relacija koja povezuje V_{S30} s osnovnom frekvencijom tla (f_0) (5.4.). Na slici 5.4 prikazana je promjena brzine posmičnih valova po dubini na svim profilima tla te izračunati V_{S30} za svaki profil.

$$d[m] = 134.37(\pm 15)f_0^{-1.27(\pm 0.053)} \quad (5.3.)$$

$$\ln(V_{S30}) = 5.34(\pm 0.09) + 0.46(\pm 0.015)\ln(f_0); \text{ za } 1 \leq f_0 \leq 10 \quad (5.4.)$$

POZICIJA M-P7-12

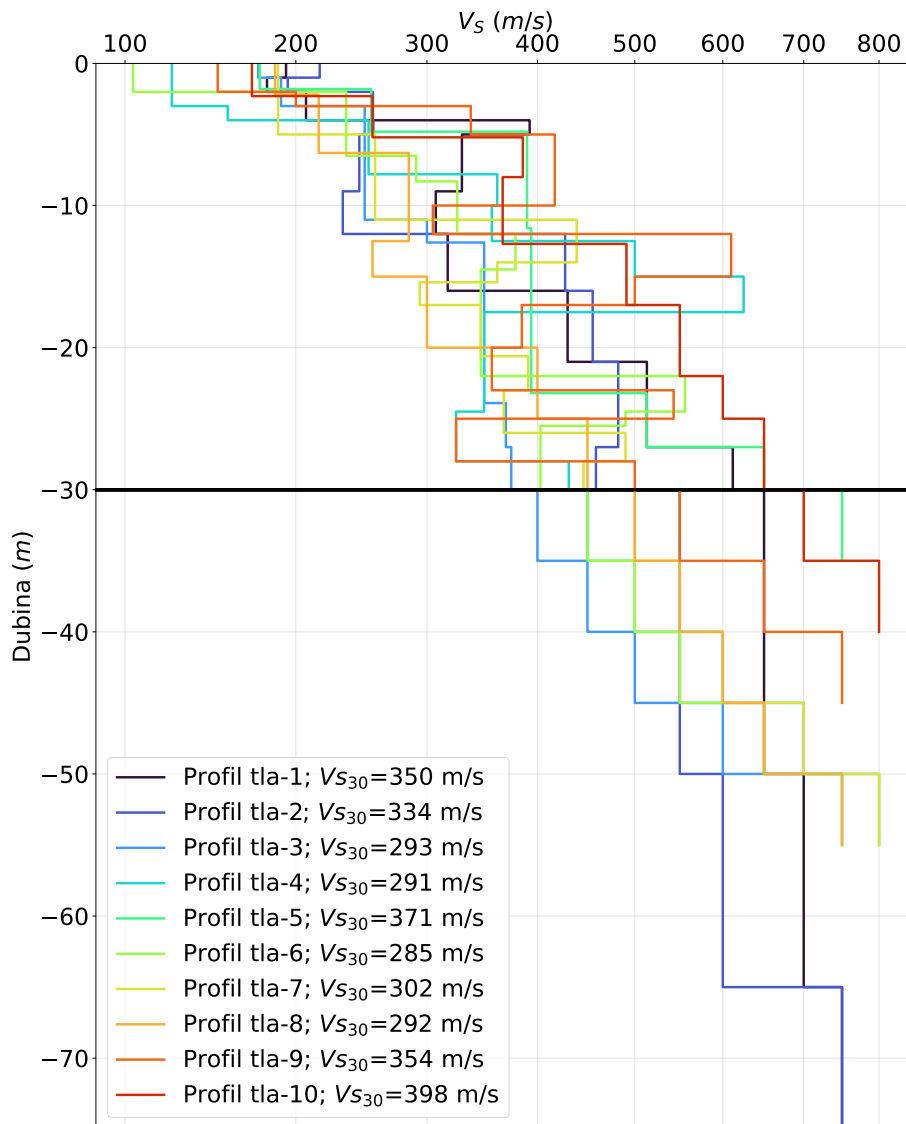
PROJEKT: Seizmička mikrozonacija GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA MASW-METODA



$V_{S-30} = 372$ m/s

Tip tla prema Eurokodu 8: B

Slika 5.3. Primjer MASW profila iz seizmičke mikrozonacije, profil M-P7-12: disperzijska krivulja (gore lijevo), promjena brzine posmičnih valova s dubinom (gore desno), promjena modula elastičnosti s dubinom (dolje lijevo) i promjena modula smicanja s dubinom (dolje desno) (HGI 2019).



Slika 5.4. 1-D profili brzine posmičnih valova (V_S) po dubini s vrijednostima V_{S30} za svaki profil tla.

5.2. Ulazna gibanja osnove stijene

U procesu analize odziva tla postoji puno potencijalnih izvora nastanka nepouzdanosti (pogrešaka), najznačajniji utjecaj imaju odabir ulaznih gibanja tla i određivanje parametara profila tla. Rathje i sur. (2010) pokazali su da se stabilni srednjak spektra odziva tla na površini (unutar $\pm 20\%$) može postići već s pet ulaznih gibanja, ako se spektri ulaznih gibanja dobro slažu s ciljanim spektrom. Odstupanje srednjaka spektra odziva tla na površini se može smanjiti na samo $\pm 5\%$ do $\pm 10\%$ ako se koriste deset ili dvadeset ulaznih gibanja. Ako je u analizi odziva tla potrebno dobiti standardnu devijaciju, po Rathje i sur. (2010) preporuča se korištenje dvadeset ulaznih gibanja dok je deset ulaznih gibanja minimum da bi se dobili pouzdani podaci standardne devijacije.

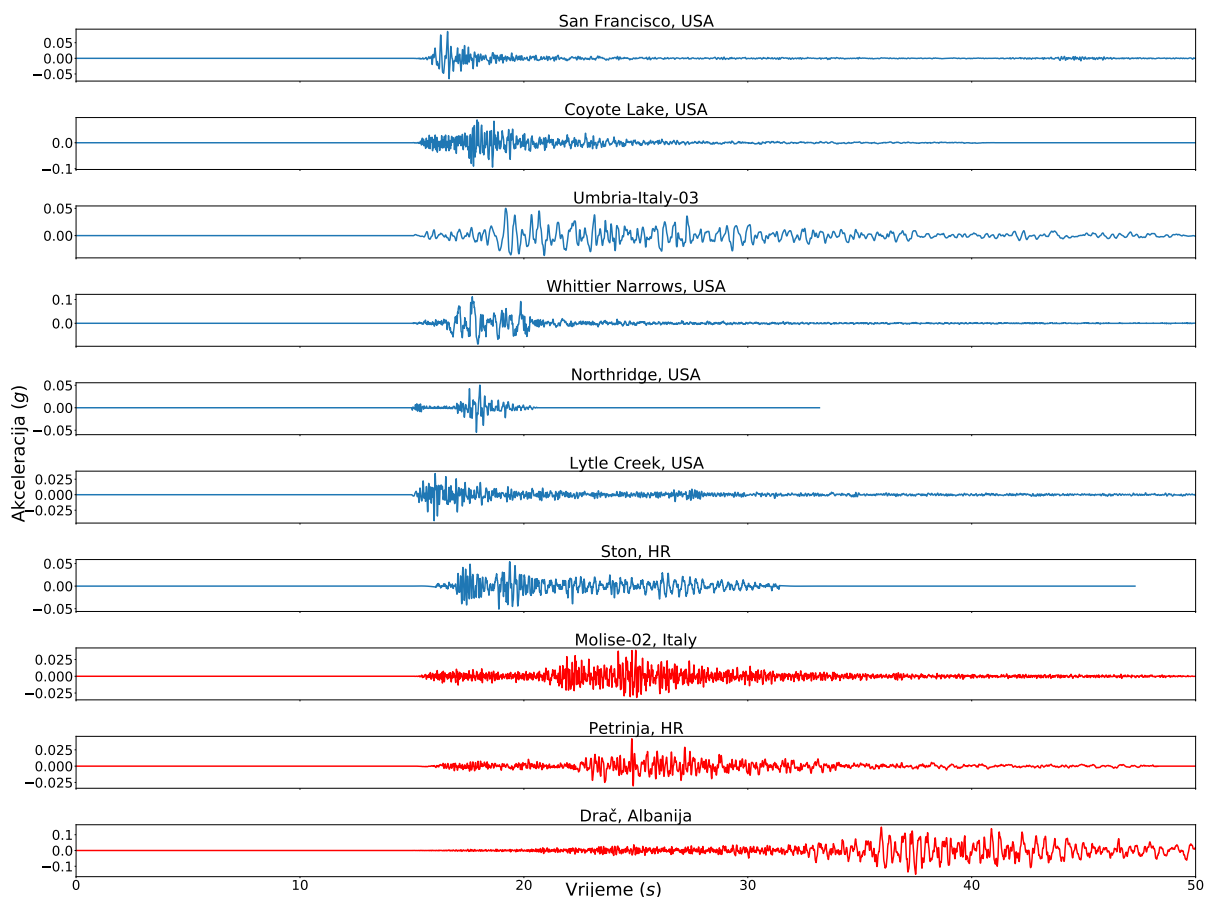
Zagreb se nalazi u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske, regiji umjerene seizmičke ak-

tivnosti za koju postoji mali broj instrumentalno zabilježenih potresa (bar onih koji su približne magnitude ($M_L=5.5$) promatranog zagrebačkog potresa iz 2020.). U diplomskom radu korišteni su samo zapisi potresa koji su zabilježeni na seizmološkim postajama koje se nalaze na lokacijama s $V_{S30} > 800$ (m/s), kako bi se izbjegle nepouzdanosti i utjecaj lokalne amplifikacije na zapise na mekim tlima. Odabrano je deset zapisa potresa, pet lokalnih potresa i pet potresa iz Sjedinjenih Američkih Država. Lokalni zapisi potresa su: potres u Stonu 1996 zabilježen na seizmološkoj postaji u Dubrovniku (Herak i sur. 2010) iz *BSHAP* baze (Markušić i sur. 2016), potres u Petrinji 2021. godine (Markušić i sur. 2021) zabilježen na seizmološkoj stanici Puntijarka (koja je po Stanko i Markušić (2020b) stanica na čvrstoj stijeni), dva potresa iz *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* baza podataka baze (Molise 2002 i Umbria 2003) te Potres u Drači (Albanija) iz 2019. godine preuzeti s IGEWE 2019 <https://www.geo.edu.al/newweb/?fq=november>. Potresi zabilježeni u SAD uzeti su iz *PEER NGA-West 2* baza podataka <https://ngawest2.berkeley.edu/>. Detalji o odabranim ulaznim gibanjima nalaze se u tablici 5.2, dok se pojedinačni zapisi svakog gibanja nalaze na slici 5.5.

Tablica 5.2. Odabrana ulazna gibanja tla poredana po epicentralnoj udaljenosti.

Br.	Potres	Godina	Stanica	Magnituda	V_{S30} (m/s)	PGA _{stijene} (g)	Dubina (km)	Epicentralna udaljenost (km)
1	San Francisco, USA	1957.	Golden Gate Park	5.28	874	0.086	8	13.7
2	Coyote Lake, USA	1979.	Gilroy Array #1	5.74	1428	0.094	9.6	14.9
3	Umbria-Italy-03	2003.	Gubbio	5.6	922	0.050	9	17.08
4	Whittier Narrows, USA	1987.	Pasadena - CIT Kresge Lab	5.99	969	0.104	14.6	20.12
5	Northridge, USA	1994.	LA - Wonderland Ave	5.28	1223	0.055	13.09	20.45
6	Lytle Creek, USA	1970.	Cedar Springs, Allen Ranch	5.33	813	0.042	8	20.5
7	Ston, HR	1996.	Dubrovnik	6.0	>800	0.054	10.5	21.5
8	Molise-02, Italy	2002.	Sannicandro	5.7	865	0.039	25.2	49.6
9	Petrinja, HR	2020.	Puntijarka (PTJ)	6.2	800	0.042	11	59.65
10	Drač, Albanija	2019.	BERA 1	6.3	1008	0.077	20	93.71

Iz tablice 5.2 vidi se da su odabrani potresi približne magnitude kao zagrebački potres 2020. godine, magnitude $M_L = 5.5$. Dubina hipocentra odabranih potresa varira od 8 do otprilike 15 km, osim kod potresa u Molise (2002.) i potresa u Draču (2019.) kojima se dubina hipocentara nalazi na više od 20 km. Epicentralne udaljenosti odabranih potresa se kreću od 13 pa sve do 93 km. Na slici 5.5 može primijetiti da vrijeme trajanja zapisa potresa raste s epicentralnom udaljenošću.



Slika 5.5. Prikaz svih deset gibanja korištenih u analizi odziva tla poredanih od najmanje do najveće epicentralne udaljenosti, crveno su označeni potresi s epicentralnom udaljenosti većom od 25 km.

Nakon odabira ulaznih gibanja svako gibanje skalirano je na atenuirane vrijednosti $PGA_{stijene}$, koje su dobivene pomoću atenuacijske relacije iz Markušić i sur. (2002), jednadžba 3.1. U diplomskom radu promatrana su dva slučaja, prvi slučaj u kojemu je razmatrano kao da su svi profili u epicentru, tj. epicentralna udaljenost postavljena je na jedan km i drugi slučaj u kojemu su uzete atenuirane vrijednosti za svaki profil. U tablici 5.3 prikazane su vrijednosti na koje su skalirani svi zapisa potresa.

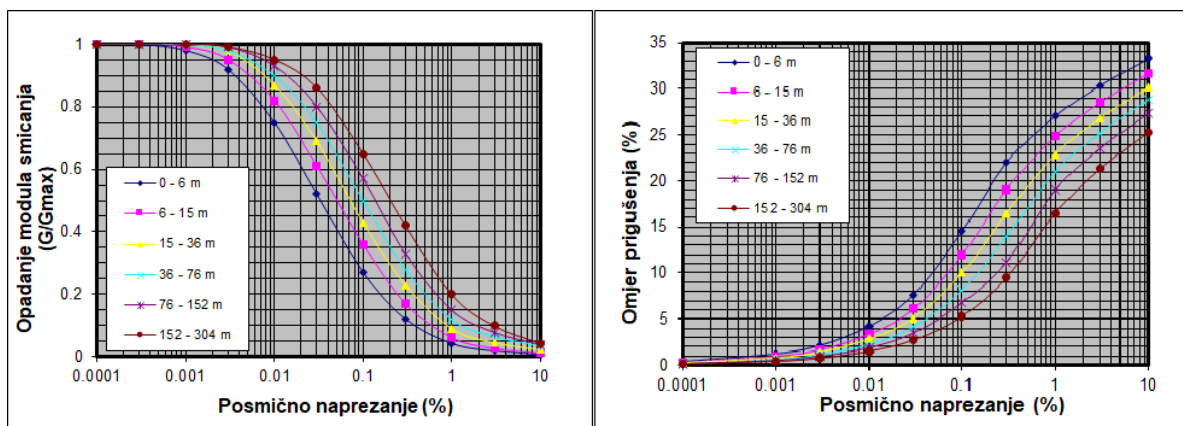
Tablica 5.3. $PGA_{stijene}$ za svaki profil tla određen po Markušić i sur. (2002) atenuacijskoj relaciji za horizontalnu komponentu gibanja. Crveno su označene atenuirane vrijednosti $PGA_{stijene}$ na akcelerometrijskim stanicama i za slučaj kad se svi profili tla gledaju kao da su epicentru.

Br. profila	Epicentralna udaljenost (m)	$PGA_{stijene}$ (g)
1 (QARH)	11873	0.1087
2	11101	0.1128
3 (QUHS)	8631	0.1288
4	7684	0.1350
5	6367	0.1440
6	4987	0.1566
7	3699	0.1613
8	2909	0.1653
9	1767	0.1696
10	1122	0.1741
Epicentar	1000	0.1716

5.3. Odabir krivulja prigušenja i modula smicanja tla

Budući da je ponašanje tla tijekom dinamičkog opterećenja (potres) nelinearna funkcija puno egzogenih varijabli poput slojevitosti tla, povijesti naprezanja i dr., koje u većini slučajeva nisu poznate. U analizama odziva tla koristi se pretpostavka da vrh krivulje napon-naprezanje prati određenu krivulju modula redukcije, a s tim povezano povećanje "histeretičnog ili histereznog" prigušenja prati drugu specificiranu krivulju (slika 5.6). Zbog čega je potrebno imati reprezentativno prigušenje dinamičkog modula smicanja i krivulju ovisnosti omjera prigušenja o napreznju (Panjamani i sur. 2017). Panjamani i sur. (2017) navodi najvažnije faktore koji utječu na omjer prigušenja (ξ) i naprezanje (γ) kao što su: tip tla, indeks plastičnosti (engl. Plasticity Index, PI), frekvencija naprezanja i broj ciklusa naprezanja.

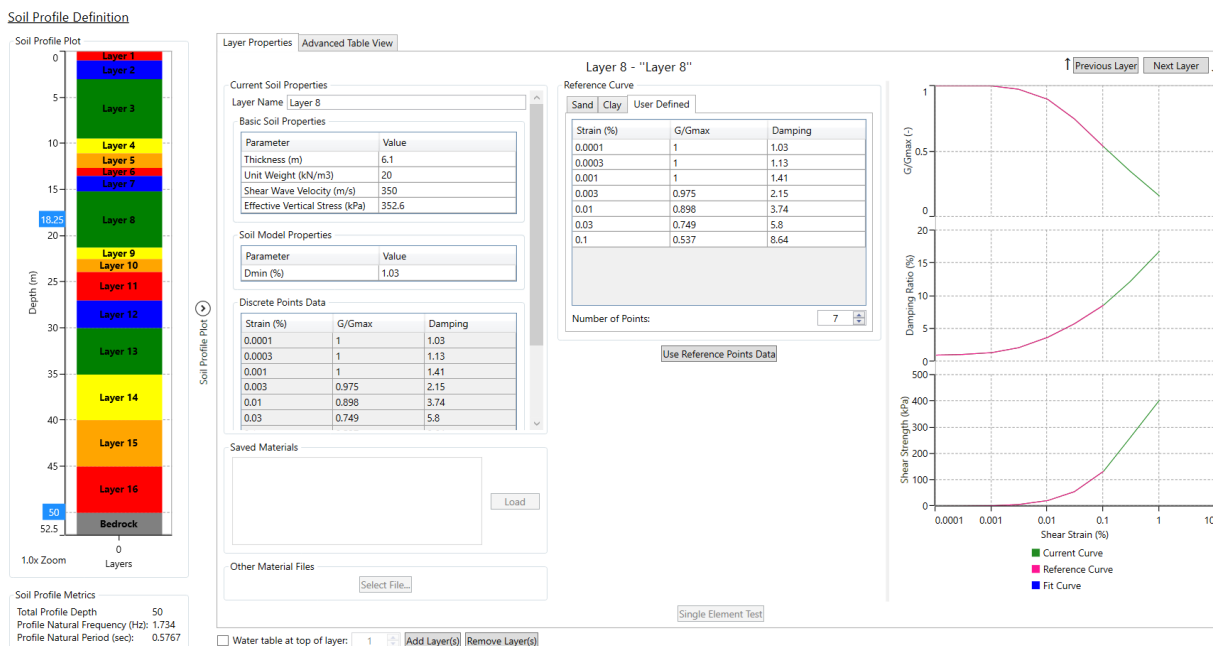
U diplomskom radu krivulje prigušenja i modula smicanja iz EPRI (1993) korištene su za pijesak, dok su za glinu korištene krivulje iz Dobry i Vucetic (1987), a za šljunak korištene su krivulje iz Roblee i Chiou (2004).



Slika 5.6. Primjer krivulja omjera prigušenja i modula smicanja za pijesak iz EPRI (1993).

5.4. Primjer 1-D ekvivalent linearne metode

Nakon definiranja svojstva profila tla (stratigrafija tla, brzina posmičnih valova, gustoća i dinamička svojstva tla), odabira krivulja prigušenja i krivulja modula smicanja za pojedini sloj tla i odabira ulaznih gibanja, svi ti podaci uneseni su u kompjuterski program *DEEPSOIL v7*. (Hashash i sur. 2016). *DEEPSOIL v7* je program koji koristi 1D ekvivalent linearnu metodu za izračun nelinearnih odziva tla, nelinearni efekti se otprilike javljaju pri akceleracijama tla većim od 0.2 g (ulazne akceleracije korištene u diplomskom su od 0.10 do 0.17 g). Na slici 5.7 prikazan je primjer jednog profila tla (profil 3, QUHS) skupa s prikazanim dinamičkim svojstvima tla.



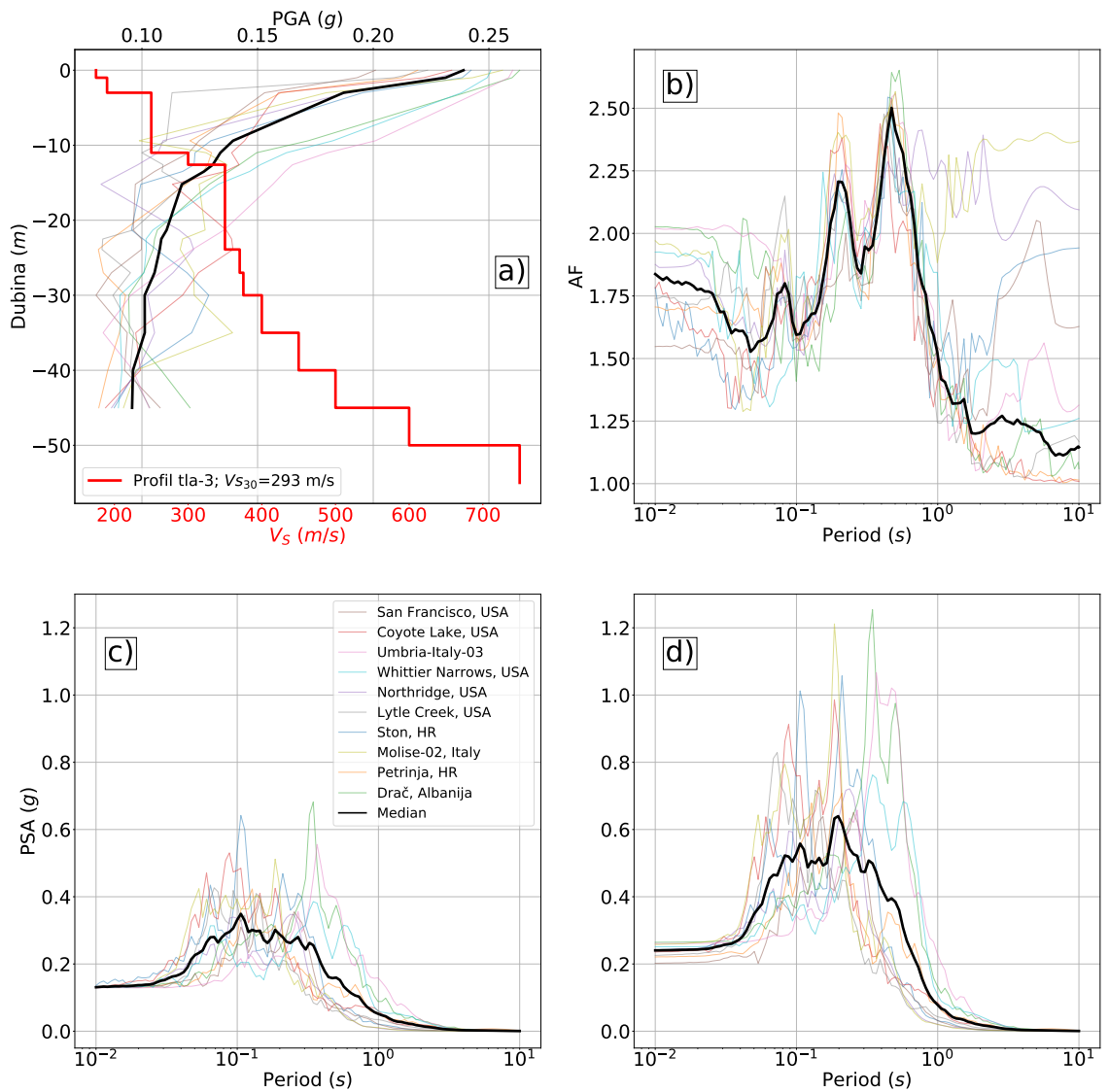
Slika 5.7. Primjer profila tla definiranog u *DEEPSOIL v7* za profil tla 3, QUHS akcelerometrijska stanica, $V_{S30} = 293 \text{ m/s}$.

1D ekvivalent-linearna metoda se provodila u frekventnoj domeni na diskretnim točkama s petnaest iteracija. Efektivni posmični napon može se izračunati pomoću formule $\gamma = \frac{M-1}{10}$, gdje je M magnituda potresa. Za potrebe diplomskog rada uzimalo se 65% vrijednosti od maksimuma efektivnog posmičnog naprezanja. Izraz koji se koristio za kompleksni modul smicanja je: $G^* = G(1 + 2i\xi)$. Na slici 5.8 nalaze se navedene postavke korištene u *DEEPSOIL*-u.

Analysis Method		Complex Shear Modulus Formulation	
<input checked="" type="radio"/> Equivalent Linear		<input checked="" type="radio"/> Frequency Independent (Recommended)	
		$G^* = G(1+2i\xi)$	
Solution Type		<input type="radio"/> Frequency Dependent (Use with Caution)	
<input checked="" type="radio"/> Frequency Domain		$G^* = G(1-2i\xi^2+2i\xi\sqrt{1-\xi^2})$	
		<input type="radio"/> Simplified	
		$G^* = G(1-i\xi^2+2i\xi)$	
Default Soil Model		Automatic Profile Generation	
Note: The selected default soil model will be assigned to all newly generated layers.		<input type="radio"/> On <input checked="" type="radio"/> Off	
<input checked="" type="radio"/> Discrete Points		Unit System	
		<input type="radio"/> English <input checked="" type="radio"/> Metric	
Frequency Domain		Complementary Analyses	
Number of iterations: <input type="text" value="15"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Equivalent Linear - Frequency Domain	
		<input type="checkbox"/> Linear - Frequency Domain (Under development)	
		<input type="checkbox"/> Linear - Time Domain (Under development)	
Effective Shear Strain Definition			
		$SSR = \frac{M-1}{10}$	
Effective Shear Strain Ratio (SSR): <input type="text" value="0.65"/>			

Slika 5.8. Prikaz postavki korištenih u *DEEPSOIL v7.* pri 1D EQL metodi.

Kao što je navedeno, 1D ekvivalent-linearna metoda provedena je na deset profila (Slika 5.4) koristeći deset različitih ulaznih gibanja (Slika 5.5) koja su skalirana na atenuirane vrijednosti $PGA_{stijena}$, koristeći atenuacijsku relaciju iz Markušić i sur. (2002). Na slici 5.9 prikazan je primjer EQL metode i rezultata za profil tla 3, profila tla kraj akcelerometarske stanice QUHS. Slika 5.9 a) prikazuje promjenu PGA po dubini za svako ulazno gibanje, medijan PGA svih ulaznih gibanja te promjenu V_S po dubini. Na dijelu b) prikazan je amplifikacijski faktor dobiven kao omjer spektra odziva na površini c) i spektra odziva na osnovnoj stijeni d). Vrijednosti $PGA_{stijene}$ i $PGA_{površine}$ zapravo su vrijednosti spektra odziva za nulti period (npr. Stanko i sur. 2019). Amplifikacijski faktor profila tla izračunat je kao omjer spektra na površini pri 5% kritičnog prigušenja i spektara odziva osnovne stijene, $AF = Sa_{površine}/Sa_{stijene}$ (npr. Kottke i Rathje 2009). U slučaju profila 3 ulazno gibanje od $PGA_{stijene}=0.1288$ g amplificirano je za $AF=1.86$ te je za površinu dobivena $PGA_{površine}=0.2390$ g. Na slici 5.9 a) u prvih dvadeset metara vidi se značajna amplifikacija ulaznog gibanja, AF je najveći u mekim površinskim slojevima koji se nalaze iznad tvrdih slojeva tla (npr. Stanko i sur. 2019, Beresnev i Wen 1996). Sa slike 5.9 b) može se očitati period, odnosno frekvencija na kojoj dolazi do najveće amplifikacije $T_0 = 0.4714$, tj. $f_0 = 2.1215$, a dobiveni period može se usporediti s periodom iz tablice 5.1.



Slika 5.9. Primjer profila tla definiranog u *DEEPSOIL v7*. za profil tla 3, QUHS akcelerometrijska stanica, $V_{S30} = 293$ m/s. a) Prikaz promjene PGA po dubini svih ulaznih gibanja i medijan tih gibanja te promjena V_S po dubini. Za $PGA_{stijene} = 0.1288$ g dobiven je $PGA_{površine} = 0.2390$ g. b) Amplifikacijski faktor dobiven kao omjer spektra na površini pri 5% kritičnog prigušenja i spektra odziva osnovne stijene. c) Spektar odziva na osnovnoj stijeni. d) Spektar odziva na površini pri 5% kritičnog prigušenja.

6. Rezultati

Tablica 6.1 prikazuje rezultate medijana PGA na površini svih deset profila tla. Prikazani su rezultati za slučaj neatenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$ (kao da su svi profili u epicentru) i za slučaj atenuiranih ulaznih vrijednosti $PGA_{stijene}$. U tablici se nalaze vrijednosti $V_{S_{30}}$ i epicentralne udaljenosti svakog profila tla. Prevolnik i sur. (2021) predstavili su gibanja zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa zabilježena na dvije akcelerometarske postaje (QARH i QUHS), pri čemu se obje stanice nalaze blizu epicentra (unutar 12 km). U tom radu za stanicu QARH dobivena je $PGA_{površine} = 0.20$ g, a za stanicu QUHS $PGA_{površine} = 0.22$ g, s pretpostavkom da je na tim lokacijama tip tla C (po EN 1998-1 2004). Rezultati $PGA_{površine}$, za slučaj atenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$, koristeći 1D EQL metodu su na lokaciji QARH izračunat je $PGA_{površine} = 0.20$ g, a na lokaciji QUHS izračunat je $PGA_{površine} = 0.24$ g. Vidi se da se vrijednosti iz Prevolnik i sur. (2021) slažu s vrijednostima dobivenim u ovom diplomskom radu. Kad se u obzir uzmu sve nepouzdanosti koje se javljaju pri EQL metodi (parametri tla, ulazna gibanja, odabir krivulja tla) rezultati diplomskog rada su unutar 5% nesigurnosti pogreške.

Tablica 6.1. Tablica s epicentralnom udaljenosti, $V_{S_{30}}$ i prikaz rezultata medijana $PGA_{površine}$ svih deset profila za slučaj atenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$ i neatenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$.

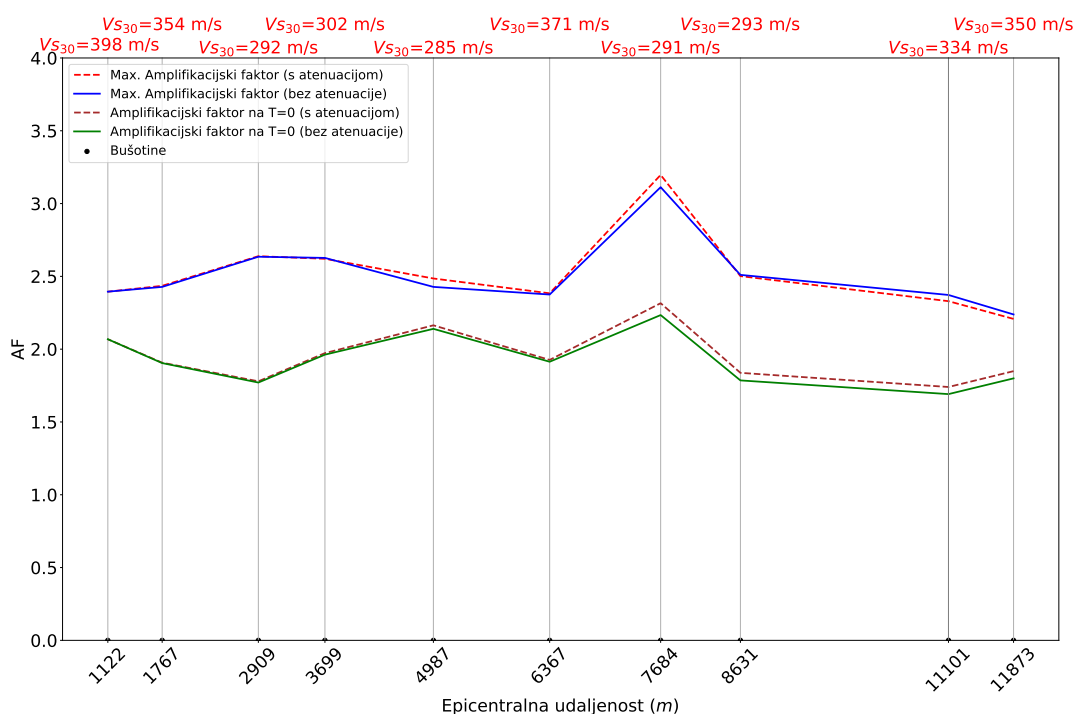
Br. profila	Epicentralna udaljenost (m)	$V_{S_{30}}$ (m/s)	$PGA_{stijene}$ (g)	$PGA_{površine}$ (g) neatenuirani $PGA_{stijene}$	$PGA_{površine}$ (g) atenuirani $PGA_{stijene}$
1 (QARH)	11873	350	0.1087	0.3114	0.2024
2	11101	334	0.1128	0.2930	0.1981
3 (QUHS)	8631	293	0.1288	0.3097	0.2390
4	7684	291	0.1350	0.3876	0.3157
5	6367	371	0.1440	0.3289	0.2778
6	4987	285	0.1566	0.3699	0.3419
7	3699	302	0.1613	0.3402	0.3212
8	2909	292	0.1653	0.3069	0.2973
9	1767	354	0.1696	0.3283	0.3251
10	1122	398	0.1741	0.3563	0.3559

Na slici 6.1 prikazana je promjena amplifikacijskog faktora po svim profilima, a u tablici 6.2 nalaze se vrijednosti sa slike 6.1. Prikazani AF izračunat je kao omjer spektra odziva na površini i spektra odziva stijene, prikazane su vrijednosti AF za slučaj bez atenuacije $PGA_{stijene}$ (pune linije) i za slučaj atenuirane vrijednosti $PGA_{stijene}$ (isprekidane linije). Vrijednosti AF za nulti period variraju od 1.69 do 2.23 u slučaju bez atenuacije, dok u slučaju s atenuacijom variraju od 1.74 do 2.32. Maksimalni amplifikacijski faktor varira od 2.24 do 3.11 u slučaju bez atenuacije, dok u slučaju s atenuacijom variraju od 2.11 do 3.20. Iz tablice 6.2 i slike 6.1 vidi se poklapanje vrijednosti u slučaju s atenuacijom i bez atenuacije na četiri profila najbliža epicentru (profili 7, 8, 9 i 10), kod ostalih profila AF je skoro svugdje veći u slučaju s atenuacijom. Uzrok većeg amplifikacijskog faktora u slučaju s atenuacijom je pojave nelinearnosti pri velikim akceleracijama tla, tj. dolazi do deamplifikacije gibanja (Beresnev i Wen 1996). Profili tla bliže epicentra (Podsljemenska zona) puno su plići te V_S slojeva tla raste brže s dubinom nego kod profila tla dalje od epicentra (područje oko rijeke Save). Na profilu 4, AF poprima najveće vrijednosti te dolazi do najveće razlike između slučaja

bez atenuacije i slučaja s atenuacijom. Najvjerojatniji razlog tome su izrazito niske brzine posmičnih valova tla u prvih pet metara tog profila ($V_S < 150 \text{ m/s}$).

Tablica 6.2. Tablica amplifikacijskog faktora na nultom periodu i maksimuma amplifikacijskog faktora na svakom profilu tla (za oba slučaja), skupa s epicentralnom udaljenošću i V_{S30} .

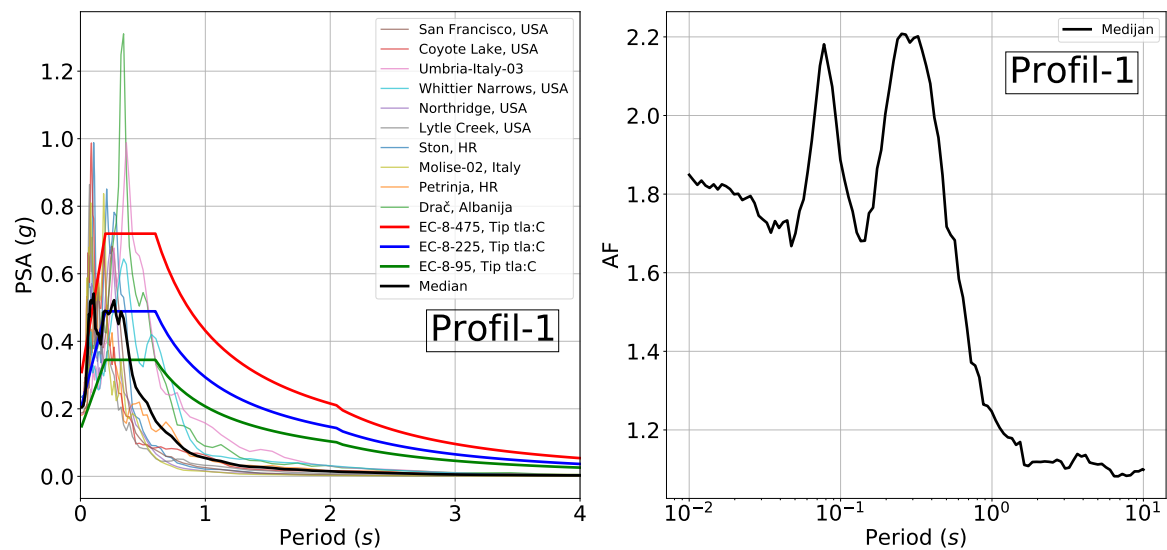
Br. profila	Epicentralna udaljenost (m)	V_{S30} (m/s)	Bez atenuacije		S atenuacijom	
			AF na T=0	Max. AF	AF na T=0	Max. AF
1 (QARH)	11873	350	1.8	2.24	1.85	2.21
2	11101	334	1.69	2.37	1.74	2.33
3 (QUHS)	8631	293	1.79	2.51	1.84	2.5
4	7684	291	2.23	3.11	2.32	3.20
5	6367	371	1.91	2.38	1.93	2.38
6	4987	285	2.14	2.43	2.16	2.49
7	3699	302	1.96	2.63	1.97	2.62
8	2909	292	1.77	2.63	1.78	2.64
9	1767	354	1.9	2.43	1.91	2.44
10	1122	398	2.07	2.39	2.07	2.39



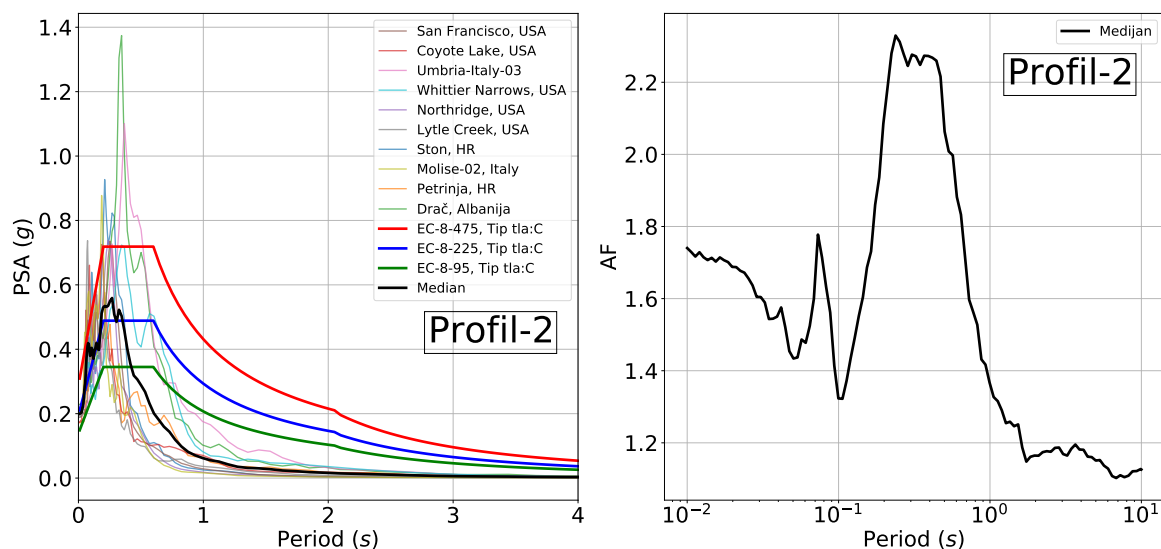
Slika 6.1. Prikaz amplifikacijskog faktora na nultom periodu i maksimuma amplifikacijskog faktora na svakom profilu tla. Punim linijama označen je slučaj bez atenuacije $PGA_{stijene}$, a isprekidanim je prikazano je slučaj atenuirane vrijednosti $PGA_{stijene}$.

Na slikama od 6.2 do 6.11 prikazani su rezultati 1D EQL metode, tj. prikazani su dobiveni spektri odziva na površini za slučaj atenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$.

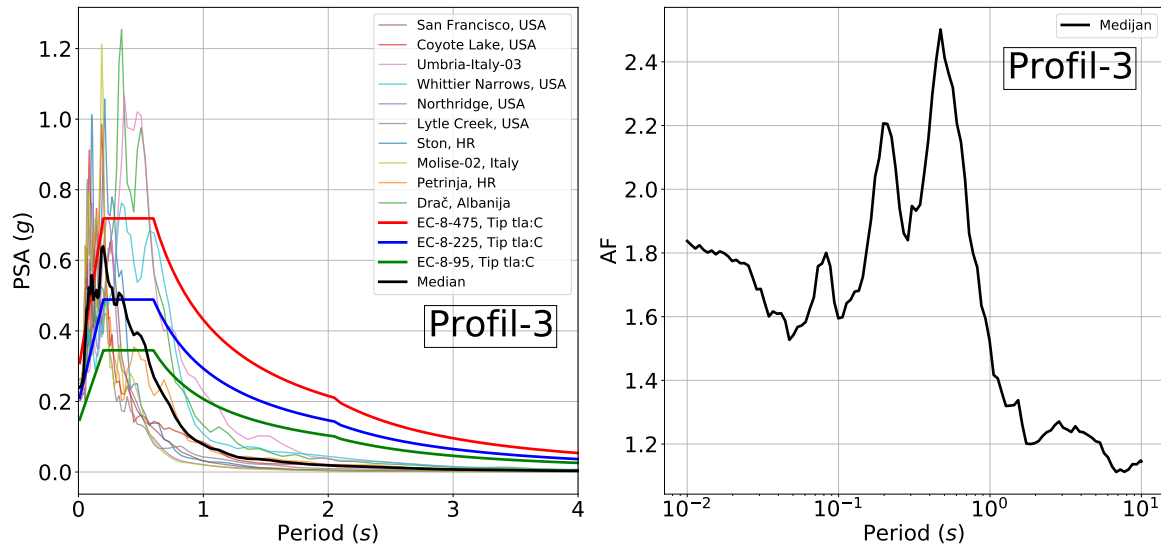
Na lijevoj strani prikazana je ovisnost spektra odziva o periodu, a na desnoj strani prikazan je amplifikacijski faktor u ovisnosti o periodu. Dobiveni spektar odziva na površini uspoređen je sa spektrom odziva iz EN 1998-1 (2004) (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina (Herak i sur. 2011). Na svim profilima tla može se primijetiti da je spektar odziva najveći na kratkim periodima, do 0.5 s. Također, vidi se da su dobiveni spektri odziva na profilima 1 i 2 unutar spektra EN 1998-1 (2004) za 225 godina, profili 3, 5, 7 i 8 su unutar spektra EN 1998-1 (2004) za 475 godina, dok kod profila 6, 9 i 10 spektri odziva prelaze vrijednosti spektra EN 1998-1 (2004) za 475 godina.



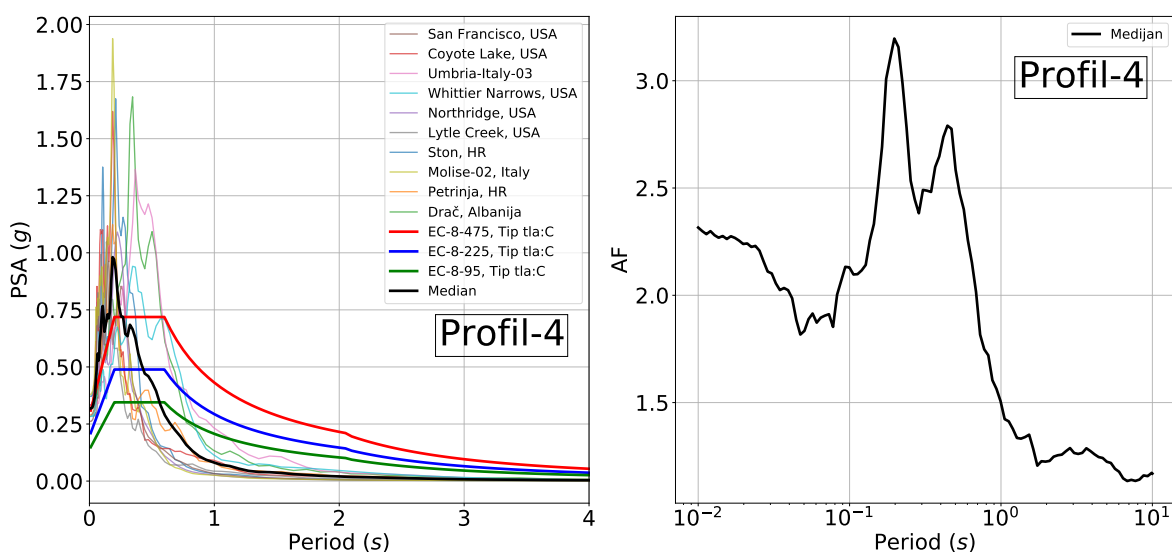
Slika 6.2. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 1 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 1 (desno).



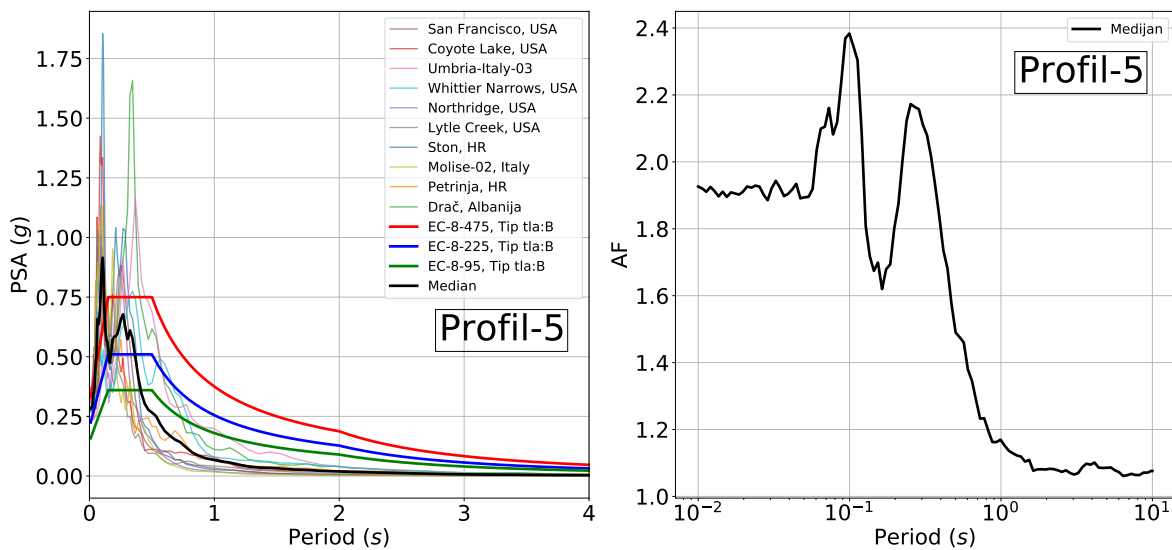
Slika 6.3. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 2 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 2 (desno).



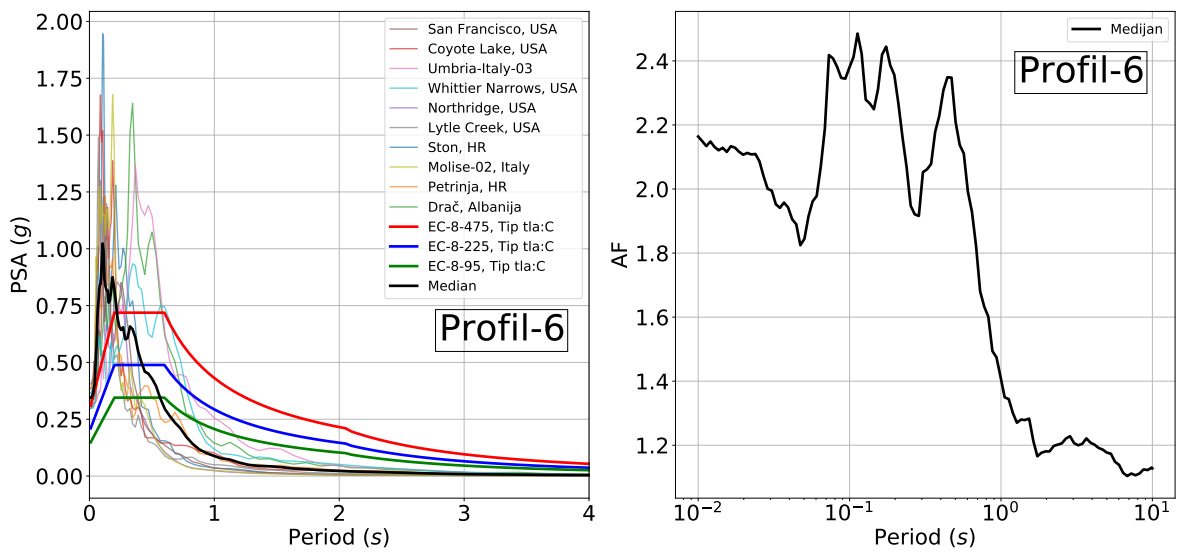
Slika 6.4. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 3 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 3 (desno).



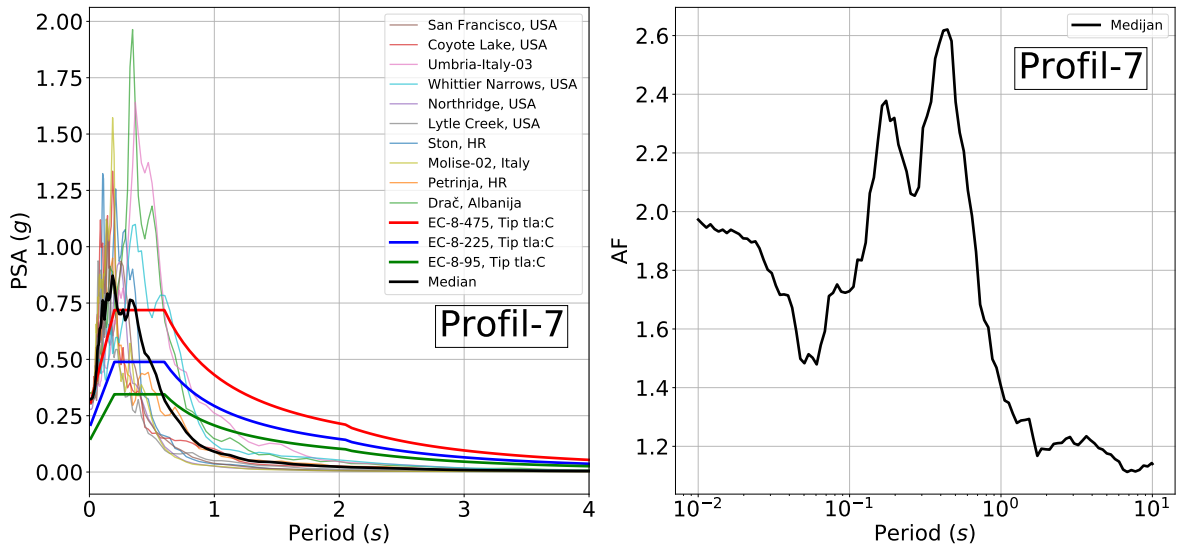
Slika 6.5. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 4 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 4 (desno).



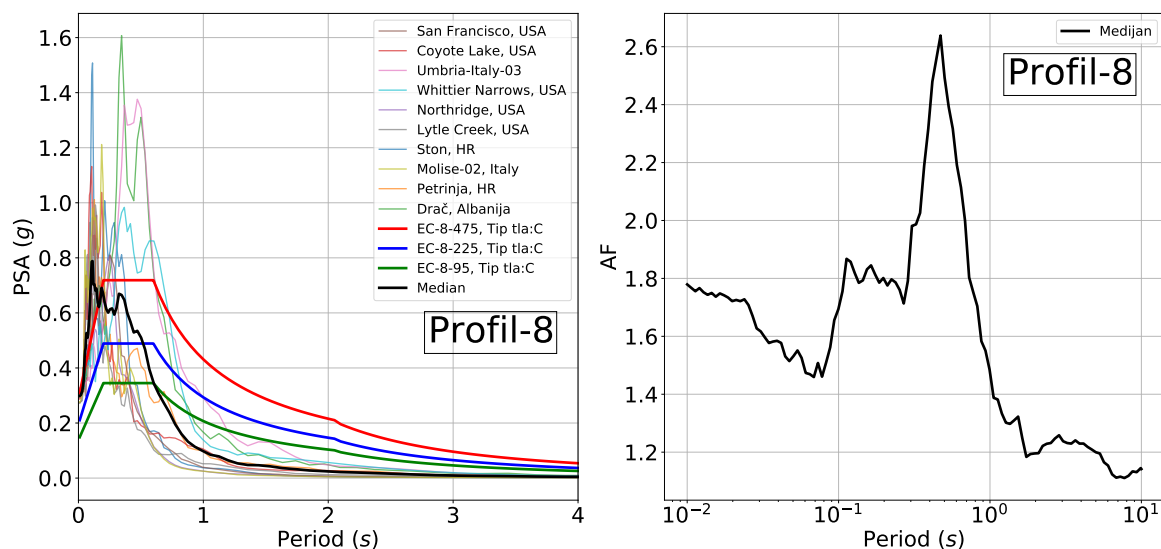
Slika 6.6. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 5 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 5 (desno).



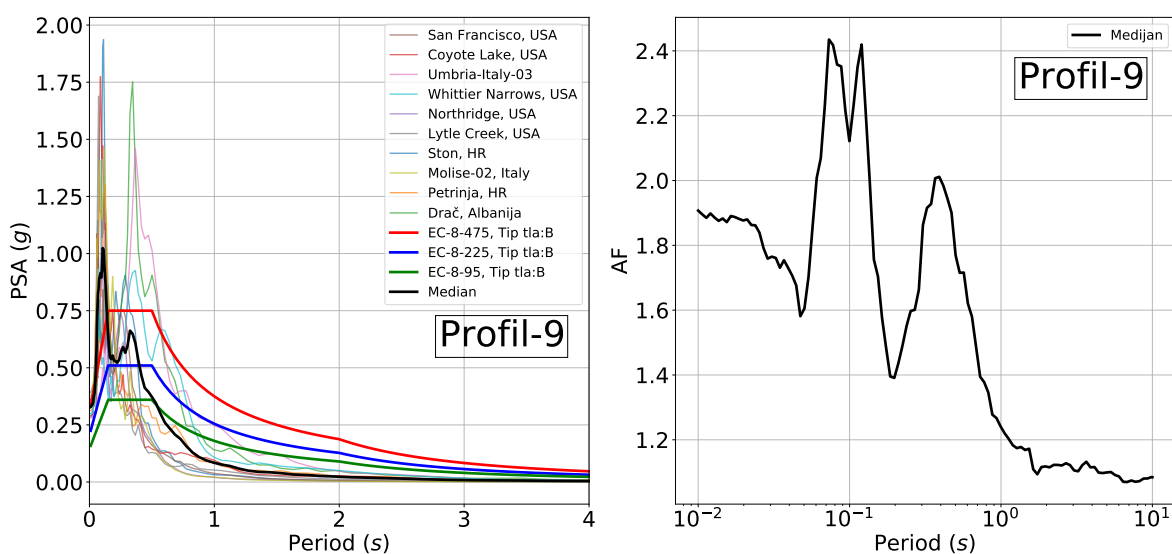
Slika 6.7. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 6 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 6 (desno).



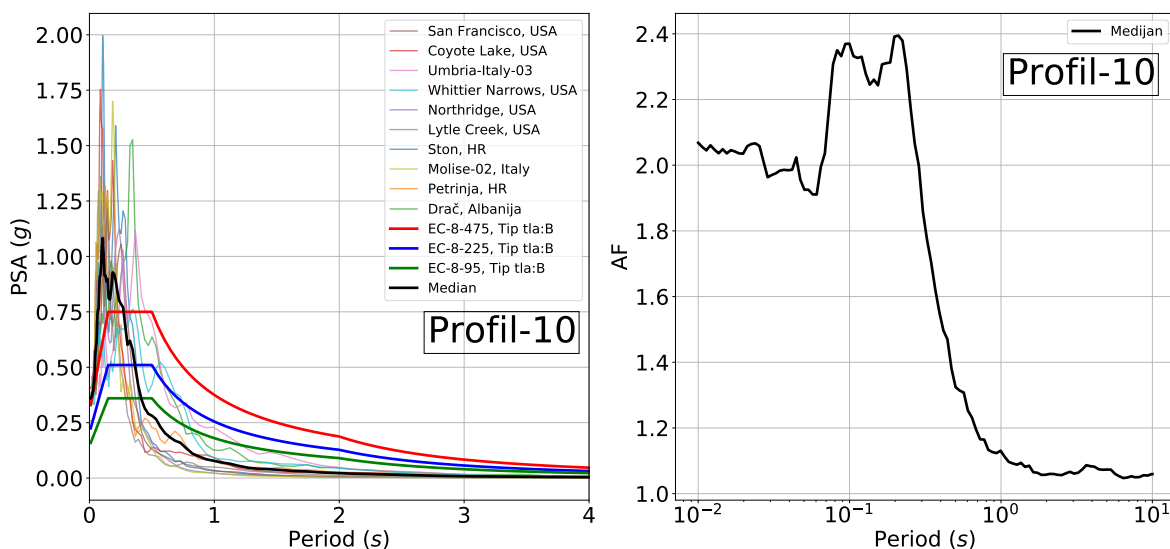
Slika 6.8. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 7 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 7 (desno).



Slika 6.9. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 8 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 8 (desno).



Slika 6.10. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 9 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 9 (desno).



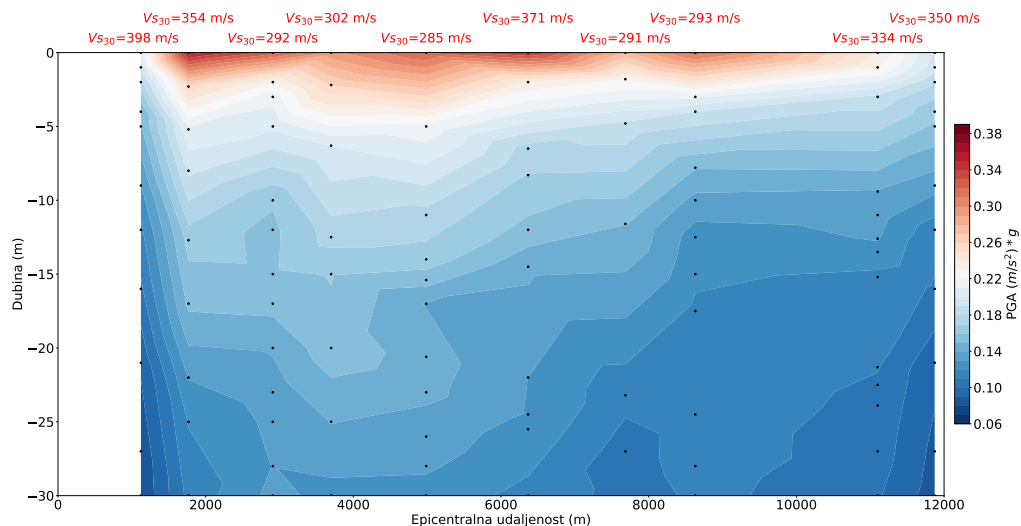
Slika 6.11. Prikaz medijana spektra odziva na površini skupa sa spektrom iz Eurokoda 8 (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina za Profil 10 (lijevo). Prikaz medijana amplifikacijskog faktora svih ulaznih gibanja za Profil 10 (desno).

U tablici 6.3 prikazane su vrijednosti osnovne frekvencije tla izračunate pomoću formule $T_0 = \frac{4H}{V_s}$, tj. pomoću formule $f_0 = \frac{V_s}{4H}$ (V_s je prosječna brzina posmičnih valova do dubine osnovne stijene) te prikazane su frekvencije/periodi na kojima se javlja maksimum amplifikacijskog spektra (bitan za rezonanciju tlo-građevina) i maksimum spektra odziva na površini (bitan za projektiranje prema Eurokodu 8 i procjenu štete građevina-spektar potresa). Iz tablice se može primijetiti da je osnovni period tla dobiveni iz spektra odziva na svim profilima manja od 0.3 s, tj. osnovni periodi tla poklapaju se s osnovnim periodima konstrukcija malih obiteljskih kuća čiji period je $T < 0.2$ s (Dowrick 2009).

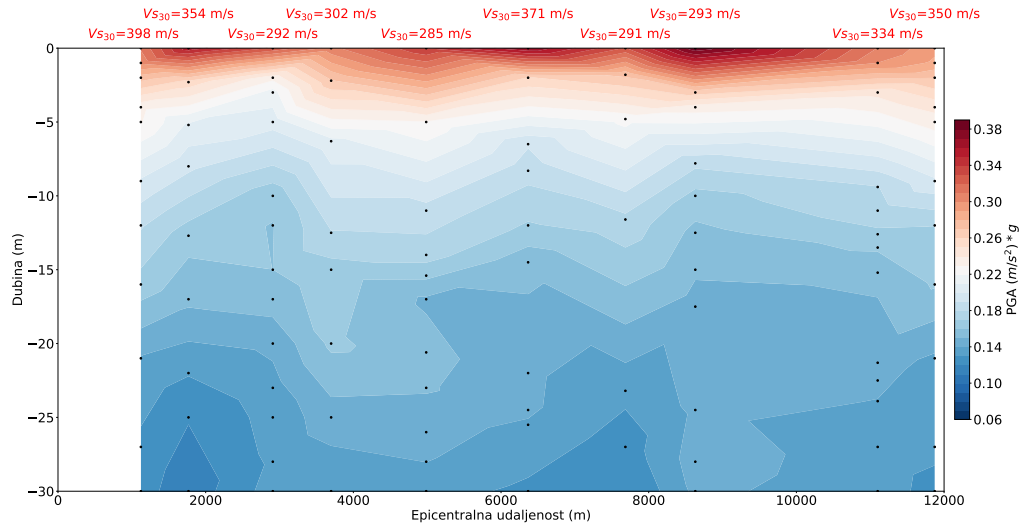
Tablica 6.3. Tablica osnovnih frekvencija i perioda tla dobivenih iz ulaznih podataka, spektra odziva (period/frekvencija na kojemu se javljaju maksimum spektra odziva) te iz amplifikacijskog faktora (period/frekvencija na kojemu se javljaju maksimum AF) skupa s epicentralnom udaljenošću i V_{S30} . Ulazna frekvencija tla je frekvencija određena iz formule: $T_0 = \frac{4H}{V_s}$, tj. $f_0 = \frac{1}{T_0}$.

Br. profila	Ep. udaljenost (m)	V_{S30} (m/s)	Ulazne vrijednosti		Spektar odziva		AF	
			f_0 (Hz)	T_0 (s)	f_0 (Hz)	T_0 (s)	f_0 (Hz)	T_0 (s)
1 (QARH)	11873	350	1.58	0.63	9.43	0.11	3.95	0.25
2	11101	334	1.46	0.68	3.71	0.27	4.2	0.24
3 (QUHS)	8631	293	1.73	0.59	5.06	0.20	2.12	0.47
4	7684	291	1.79	0.56	5.39	0.19	5.06	0.20
5	6367	371	3.09	0.32	9.43	0.11	10.03	0.10
6	4987	285	1.79	0.56	9.43	0.11	8.86	0.11
7	3699	302	1.87	0.53	5.39	0.19	2.26	0.44
8	2909	292	1.82	0.55	8.86	0.11	2.12	0.47
9	1767	354	2.46	0.41	9.43	0.11	13.69	0.07
10	1122	398	3.03	0.33	9.43	0.11	4.76	0.21

Slike 6.12 i 6.13 prikazuju interpolirani 2D profil promjene PGA po dubini. Na slici 6.12 prikazane su vrijednosti PGA dobivene pomoću atenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$, dok se na slici 6.13 nalaze vrijednosti dobivene iz neatenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$ (slučaj kao da su svi profili u epicentru). 2D profil proteže se od epicentra zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa do Novog Zagreba. Profil prolazi pokraj akcelerometarskih postaja QUHS i QARH (5.1). Dubina profila je za oba dva slučaja (s atenuacijom i bez atenuacije) prikazana samo do 30 m da bi prikaz bio konzistentan s vrijednostima $V_{S_{30}}$ iz EN 1998-1 (2004). Na slikama se vidi velika razlika vrijednosti $PGA_{površine}$ između slučajeva. Slučaj s atenuacijom na profilima tla koji se nalaze najdalje od epicentra dolazi do $PGA_{površine}$ od otprilike 0.24 g te se vidi postupno opadanje $PGA_{površine}$ s epicentralnom udaljenošću. Na slici 6.13 jasno se može primijetiti da u prvih 5 m, dolazi do najvećeg povećavanja vrijednosti PGA, tj. amplifikacija ulaznog gibanja je najveća u prvih 5 m profila tla.



Slika 6.12. 2D model promjene PGA od dubine 30 m do površine za slučaj atenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$. Profil se proteže od epicentra zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa do Novog Zagreba, tj. do akcelerometarskih stanica QUHS ($V_{S_{30}} = 293 \text{ m/s}$) i QARH ($V_{S_{30}} = 350 \text{ m/s}$).



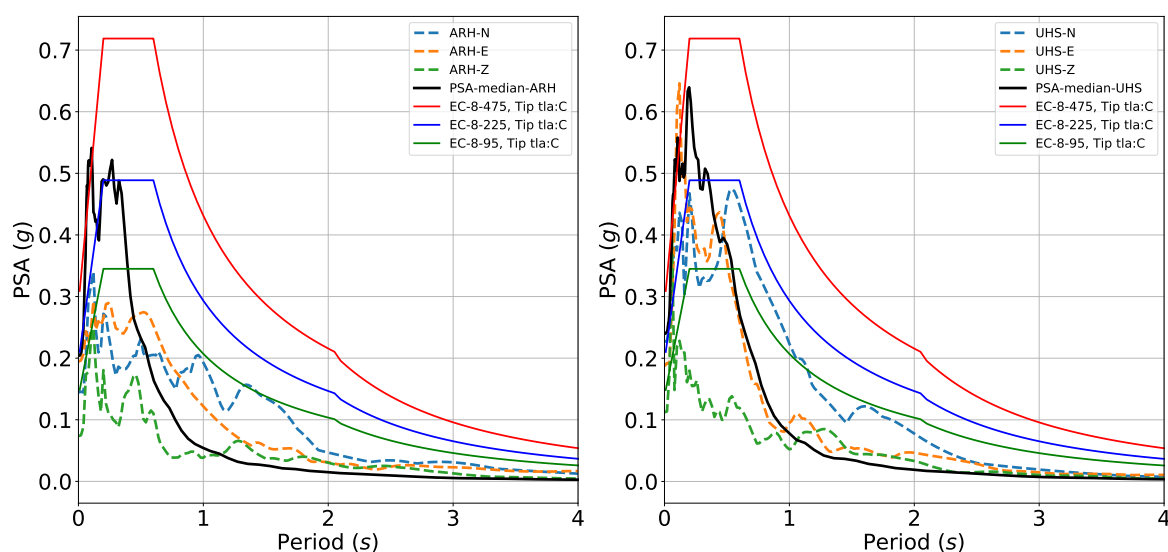
Slika 6.13. 2D model promjene PGA od dubine 30 m do površine za slučaj neatenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$. Profil se proteže od epicentra zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa do Novog Zagreba, tj. do akcelerometrijskih stanica QUHS ($V_{S_{30}} = 293 \text{ m/s}$) i QARH ($V_{S_{30}} = 350 \text{ m/s}$).

7. Diskusija

Amplifikacijski faktor izračunat pomoću omjera spektra odziva na površini i spektra na stijeni (slika 6.1 i tablica 6.2) može se usporediti s rezultatima iz Markušić i sur. (2020) i Lokmer i sur. (2002). Markušić i sur. (2020) dobili su da u Podsljemenskoj zoni AF iznosi 1.6-1.8, otprilike 1.4-1.6 u centru Zagreba i otprilike 1.3 oko rijeke Save (Novi Zagreb). U diplomskom radu AF (na nultom periodu, $T = 0$) za Podsljemensku zonu (profili 7, 8, 9 i 10) kreće se od 1.78 do 2.07, za centar Zagreba (profili 4, 5 i 6) dobiven je AF od 1.93 do 2.32, a za područje oko Save (profili 1-QARH, 2 i 3-QUHS) dobiven je AF od 1.74 do 1.85. Rezultati pokazuju da su vrijednosti AF dobivene u Markušić i sur. (2020) manje nego vrijednosti dobivene u diplomskom, s tim da se u Podsljemenskoj zoni rezultati najbolje poklapaju. Lokmer i sur. (2002) koji su proučavali scenarij Velikog potresa u Zagrebu 1880., dobili su da najveći amplifikacijski faktor koji se može očekivati u Zagrebu otprilike iznosi 3.5. Ako se u obzir uzmu nesigurnosti koje se javljaju u oba pristupa, rezultati diplomskog rada mogu se usporediti i s kartom DAF-a iz seizmičke mikrozonacije dijela grada Zagreba (sažeto u Padovan i sur. 2021). Karta DAF-a temelji se na HVSR mjerenjima za scenarij potresa $M = 6.0$, dubine $h = 10$ km i epicentralne udaljenosti $D = 15$ km.

Na slikama od 6.2 do 6.11 vidi se da na spektru odziva dominiraju niski periodi do 0.5 s. Razlog tomu može biti da se značajna amplifikacija malih perioda javlja kad se u analizi odziva tla koriste ulazna gibanja kratkog trajanja visoke frekvencije na plitkim profilima tla s velikim kontrastima impedancije (Pehlivan i sur. 2017). Također Dobry i Vucetic (1987) pokazali su da gline s visokim PI mogu značajno amplificirati ulazno gibanje, koja je prisutna u većini korištenih profila tla. Može se primijetiti da je većina profila unutar spektra odziva iz EN 1998-1 (2004) za 225 i 475 godina, dok kod profila 6, 9 i 10 spektar odziva premašuje spektar iz EN 1998-1 (2004) za 475 godina.

Prevolnik i sur. (2021) prikazali su spektre zapisa zagrebačkog $M_L 5.5$ potresa s dvije akcelerometarske postaje, Slika 7.1 prikazuje usporedbu tih rezultata s rezultatima spektra odziva EQL metode korištene u diplomskom radu (za slučaj atenuiranih vrijednosti $PGA_{stijene}$). Na slici se nalaze još spektri iz EN 1998-1 (2004) (Tip 1) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina. U radu Prevolnik i sur. (2021), uz pretpostavku da se stanice nalaze na tipu tla C (po EN 1998-1 (2004)), za stanicu QARH izračunali su PGA od 0.20 g (iz EQL metode PGA za QARH je 0.20 g), a za stanicu QUHS 0.22 g (iz EQL metode PGA za QUHS je 0.24 g). Za akcelerometarsku stanicu QARH vrijednosti PGA iz diplomskog poklapaju se s vrijednostima iz rada Prevolnik i sur. (2021), a spektri odziva se ne poklapaju dobro. Dobiveni spektri odziva za stanicu QUHS se dobro poklapaju dok se kod PGA javlja odstupanje. Ako se u obzir uzmu sve nepouzdanosti koje se javljaju pri EQL metodi, dobiveni rezultati su vrlo dobri, ali u obzir treba uzeti da su nepouzdanosti izrazito velike jer se mogu javiti na puno mjesta: geotehnička istraživanja (bušotine, laboratorijska ispitivanja), geofizička ispitivanja (određivanje V_S i gustoće), određivanje dubine do osnovne stijene, odabir krivulja prigušenja i modula smicanja za određene tipove tla te konačno u odabiru ulaznih gibanja stijene (Rathje i sur. 2010).



Slika 7.1. Prikaz usporedbe spektra odziva površine dobivenog EQL metodom (crna linija), spektra odziva iz Eurokoda 8 (Tip 1, EN 1998-1 (2004)) za 95 (0.12 g), 225 (0.18 g) i 475 (0.25 g) godina te spektra odziva zagrebačkog $M_L5.5$ potresa zabilježenog na akcelerometarskim stanicama (Prevolnik i sur. 2021): lijevo QARH i desno QUHS.

Rezultati diplomskog rada mogu se sažeti kao:

- na profilima tla blizu epicentra dobiven je $PGA_{površine}$ preko 0.30 g, dok je za profil 1 QARH dobiven $PGA_{površine} = 0.24$ g, a za profil 3 QUHS dobiven je $PGA_{površine} = 0.20$ g, što je unutar 5% razlike od rezultata iz Prevolnik i sur. (2021);
- Podsljemenska zona koja je pretrpjela veliku štetu od potresa (Atalić i sur. 2021; Markušić i sur. 2020), nalazi se na području niske dubine do osnovne stijene za koje je iz EQL metode dobivena izražena amplifikacija na niskim periodima (slika 6.2 - slika 6.11);
- u usporedbi sa spektrima iz Eurokoda 8 (EN 1998-1 2004) pokazalo se da u blizini epicentra (do 10 km) bolje odgovara spektar za 475 godina (0.25 g) nego spektar za 225 godina (0.18 g) ili spektar za 95 godina (0.12 g);
- osnovne frekvencije tla (tablica 6.3) odgovaraju osnovnim frekvencijama konstrukcija obiteljskih kuća $T < 0.2$ s (Dowrick 2009), koje su pretrpjele veliku štetu u zagrebačkom $M_L5.5$ potresu.

Kao što je navedeno u Markušić i sur. (2020), poznavanje amplifikacije tla na određenoj periodu, tj. poznavanje spektra odziva površine korisno je pri izgradnji novih zgrada te pri rekonstrukciji i učvršćivanju postojećih građevina. EQL metoda primijenjena na realnim profilima tla dala je rezultate koji su usporedivi s podacima iz drugih radova koji su računali AF (npr. Markušić i sur. 2020, Lokmer i sur. 2002, karta DAF-a iz mikrozonacije) te je EQL metoda u usporedbi sa zapisima zagrebačkog $M_L5.5$ potresa (iz Prevolnik i sur. 2021) dala vrlo dobro slaganje. Rezultati diplomskog rada pokazali su da je EQL metoda na realnim profilima tla dobra metoda za određivanje odziva tla, podaci koji su izrazito korisni pri urbanom planiranju i obnovi zgrada oštećenih u zagrebačkom $M_L5.5$ potresu. Važno je da se mikrozonacija grada Zagreba nastavi te da se u plan mikrozonacije uključi analiza odziva tla.

8. Zaključak

Zagrebački potres $M_L = 5.5$ 2020. godine prouzročio je veliku štetu i uzrokovao je velike socijalno-ekonomske posljedice u gradu Zagrebu i okolnom području. Proučavan je odziv tla na realnim profilima dobivenim iz mikrozonacije dijela Zagreba i napravljena je usporedba dobivenih rezultata s empirijskim vrijednostima. Glavni dobiveni rezultati diplomskog pokazali su da je područje blizu epicentra bilo izloženo vrijednostima $PGA_{\text{površine}}$ većima od 0.30 g. Izračunate vrijednosti $PGA_{\text{površine}}$ na profilima tla kraj akcelerometarskih stanica (oko 10 km od epicentra) su QUHS (0.24 g) i QARH (0.20 g). Navedene vrijednosti usporedive su s rezultatima iz Prevolnik i sur. (2021). Usporedbom spektara odziva površine dobivenih EQL metodom i spektara iz Eurokoda 8, uspostavljeno je da je u zonama blizu epicentra spektar za 475 (0.25 g) godina pogodniji nego spektri za 225 (0.18 g) i 95 (0.12 g) godina. Dobiveni spektri odziva površine ukazuju da osnovna frekvencija tla odgovara malim obiteljskim kućama, koje su pretrpjele značajnu štetu u potresu. Usporedbom rezultata za AF iz diplomskog rada s rezultatima AF dobivenog u drugim istraživanjima, zaključeno je da 1D EQL metoda na realnim profilima tla daje dobre rezultate. Slaganje rezultata dobivenih u ovom diplomskom radu s empirijskim vrijednostima ukazuje na to da se i bez raspoloživih zapisa potresa, EQL metoda može uspješno koristiti. Uzimajući u obzir sve navedeno, potrebno je da se nastavi mikrozonacija grada Zagreba, ali i ostatka Hrvatske te da se u mikrozonaciju uključi analiza odziva tla kako bi dobili važne informacije o amplifikaciji tla, spektru odziva na površini i osnovnoj frekvenciji tla što je potrebno pri urbanom planiranju, ojačavanju postojećih i obnovi oštećenih zgrada.

Literatura

- Asimaki, D. i S. Jeong (2013, 10). Ground-Motion Observations at Hotel Montana during the M 7.0 2010 Haiti Earthquake: Topography or Soil Amplification? *The Bulletin of the Seismological Society of America* 103, 2577–2590.
- Assimaki, D., E. Kausel, i G. Gazetas (2005). Soil-dependent topographic effects: A case study from the 1999 athens earthquake. *Earthquake Spectra* 21, 929 – 966.
- Atalić, J., M. Uroš, M. Šavor Novak, M. Demšić, i M. Nastev (2021). The Mw5.4 Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Bardet, J.-P. i T. Tobita (2001, 01). *NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits*.
- Beresnev, I. i K. Wen (1996). Nonlinear soil response—a reality? *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, 1964–1978.
- Boore, D. (2003, 03). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics* 160, 635–676.
- Dal Moro, G. (2014). *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications* (1 ed.). Elsevier.
- Dasović, I. (2015). Atenuacija seizmičkih valova u području dinarida.
- Dobry, R. i M. Vucetic (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits.
- Dowrick, D. (2009). *Earthquake Resistant Design and Risk Reduction*, Volume 2. Chichester, UK,: Wiley and Sons.
- EN 1998-1 (2004). In *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1:2004)*. European Committee for Standardization (CEN).
- EPRI (1993). *Guidelines for Determining Design Basic Ground Motions / Resolution Copper Project and Land Exchange Environmental Impact Statement*, Volume 1. Electric Power Research Institute (EPRI).
- Finn, W. L., T. Onur, i C. E. Ventura (2004). Microzonation: developments and applications. In *Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation*, pp. 3–26. Springer.
- Gallipoli, M. R., M. Mucciarelli, B. Šket Motnikar, P. Zupančić, A. Gosar, S. Prevolnik, M. Herak, J. Stipčević, D. Herak, i Z. Milutanović (2010). Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of european buildings. *Bulletin of earthquake engineering* 8(3), 593–607.
- Hashash, Y., M. Musgrove, J. Harmon, D. Groholski, C. Phillips, i D. Park (2016). Deepsoil 6.1, user manual. *Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign*.

- Hassani, B. i G. M. Atkinson (2018). Application of a site-effects model based on peak frequency and average shear-wave velocity to california. *Bulletin of the Seismological Society of America* 108, 351–357;.
- Herak, M. (2006.). A (very) short report on the work done so far in Croatia.
- Herak, M., I. Allegretti, I. Dasović, T. Fiket, D. Herak, I. Ivančić, K. Kuk, V. Kuk, K. Marić, S. Markušić, S. Prevolnik, I. Sović, i J. Stipčević (2007). Mjerenje i osnovna interpretacija mikro seizmičkog nemira na području Grada Zagreba, Elaborat o izvršenim mjerenjima. *Sveučilište u Zagrebu, Geofizički odsjek PMF-a*.
- Herak, M., I. Allegretti, D. Herak, I. Ivančić, K. Kuk, K. Marie, S. Markušić, i I. Sović (2011). Seismic hazard maps of croatia. pp. 43–43.
- Herak, M., I. Allegretti, D. Herak, K. Kuk, V. Kuk, K. Marić, S. Markušić, i J. Stipčević (2010). HVSR of ambient noise in Ston (Croatia) – comparison with theoretical spectra and with the damage distribution after the 1996 Ston-Slano earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8(3), 483–499.
- Herak, M., D. Herak, i S. Markušić (1996). Revision of the earthquake catalogue and seismicity of croatia, 1908–1992. *Terra Nova* 8(1), 86–94.
- Herak, M., S. Markušić, i I. Ivančić (2001). Attenuation of peak horizontal and vertical acceleration in the dinarides area. *Studia Geophysica et Geodaetica* 45(4), 383–394.
- Herak, M., M. Živčić, I. Sović, I. Cecić, I. Dasović, J. Stipčević, i D. Herak (2018). Historical seismicity of the rijeka region (northwest external dinarides, croatia)—part ii: The klana earthquakes of 1870. *Seismological research letters* 89(4), 1524–1536.
- HGI (2019). *Studija: Seizmička i geološka mikrozonacija dijela grada Zagreba*, Volume 1-4. Zagreb: Hrvatski geološki institut.
- HRN EN ISO/IEC 17025:2017 (2017). Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija (ISO/IEC 17025:2005+Cor.1:2006; EN ISO/IEC 17025:2005+AC:2006). Technical report, Hrvatski zavod za norme.
- Idriss, I. M. i H. Seed (1968). Seismic response of horizontal soil layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 94, 1003–1031.
- ISSMGE (1999). Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. pp. 209.
- James, N., T. Sitharam, G. Padmanabhan, i C. S. Pillai (2013). Seismic microzonation of a nuclear power plant site with detailed geotechnical, geophysical and site effect studies. *Natural Hazards* 71, 419–462.
- Kottke, A. i E. Rathje (2009). Technical manual for strata.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Lokmer, I., M. Herak, G. F. Panza, i F. Vaccari (2002). Amplification of strong ground motion in the city of Zagreb, Croatia, estimated by computation of synthetic seismograms. *22(2)*, 105–113.

- Markušić, S., Z. Gülerce, N. Kuka, L. Duni, I. Ivančić, S. Radovanović, B. Glavatović, Z. Milutinović, S. Akkar, S. Kovačević, J. Mihaljević, i R. Šalić (2016). An updated and unified earthquake catalogue for the Western Balkan Region. *14*(2), 321–343.
- Markušić, S., D. Stanko, T. Korbar, N. Belić, D. Penava, i B. Kordić (2020). The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020. *Geosciences* *10*(7).
- Markušić, S., D. Stanko, D. Penava, I. Ivančić, O. Bjelotomić Oršulić, T. Korbar, i V. Sarhosis (2021). Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020—Preliminary Multidisciplinary Research. *13*(6).
- Markušić, S., M. Herak, D. Herak, i I. Ivančić (2002). Peak horizontal-to-vertical acceleration ratio and local amplification of strong ground motion. *Studia Geophysica et Geodaetica* *46*(1), 83–92.
- McGuire, R. (2001, 07). Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* *21*, 377–384.
- Miklin, Z., Ž. Mlinar, Ž. Brkić, i I. Hećimović (2010). Detaljna inženjerskogeološka karta Podsljemenske urbanizirane zone mjerila 1:5000 (DIGK-Faza I). *Hrvatski geološki institut, Zagreb, Knjige 1-4, 44 karte*.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports* *30*(1).
- Narayan, J. P. i M. Sharma (2004, 08). Effects of local geology on damage severity during Bhuj, India earthquake.
- Nazarian, S. (1984). In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave. *Proceedings of 8th Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 1984*.
- Padovan, B., L. Podolszki, I. Sokolić, I. Sović, T. Novosel, N. Pivčević, i I. Kosović (2021). Seismic and geological zonation of the part of the city of zagreb area. pp. 35–46.
- Panjamani, A., A. Prabhakaran, H. Madhura, S. Moustafa, i N. Alarifi (2017). Selection of representative shear modulus reduction and damping curves for rock, gravel and sand sites from the KiK-net downhole array. *88*.
- Panzer, F., G. Lombardo, S. D'Amico, i P. Galea (2013). Speedy techniques to evaluate seismic site effects in particular geomorphologic conditions: Faults, cavities, landslides and topographic irregularities. In S. D'Amico (Ed.), *Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering*, Chapter 5. Rijeka: IntechOpen.
- Park, C. B., R. D. Miller, i J. Xia (2005). *Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record*, pp. 1377–1380.
- Pehlivan, M., D. Park, S. Sadiq, i Y. M. A. Hashash (2017). Seismic site response of shallow sites in moderate seismicity regions.

- Prevolnik, S., S. Markušić, i I. Ivančić (2021). Strong ground motion records of the Zagreb earthquake of 22 March 2020. *Proceedings of 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering, 1CroCEE*. Lakušić, S. & Atalić, J. (urdnici).
- Rathje, E. M., A. R. Kottke, i W. L. Trent (2010). Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(4), 607–619.
- Roblee, C. i B. Chiou (2004). A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. pp. 29.
- Salković, I., P. Kvasnicka, S. Mihalic, i M. Krkač (2009.). Geotehnicka istraživanja za određivanje lokalnih uvjeta tla na lokaciji Arene Zagreb.
- Schnabel, P. B. (1972). Shake: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *EERC Report 72-12, University of California, Berkeley.*
- Seed, H. B., R. T. Wong, I. M. Idriss, i K. Tokimatsu (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 112(11), 1016–1032.
- Seizmološka služba (2020). Zagreb Earthquake visualization. https://www.youtube.com/watch?v=FI4Vqm_FvGI/. [Online; Pristupljeno 19-05-2021].
- SFRJ (1964). *Pravilnik o Privremenim Tehničkim Propisima za Građenje u Seizmičkim Područjima*. Službeni List SFRJ 39/64. Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija: Beograd, Srbija,.
- SFRJ (1981). *Pravilnik o Tehničkim Normativima za Izgradnju Objekata Visokogradnje u Seizmičkim Područjima*. Službeni list SFRJ 31/81, 49/82, 29/83, 20/88, 52/90. Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija: Beograd, Srbija,.
- Stanko, D. (2018). *Analysis of the local site effects on the amplification of seismic ground motion in Croatia*. Ph. D. thesis.
- Stanko, D., Z. Gülerce, S. Markušić, i R. Šalić (2019). Evaluation of the site amplification factors estimated by equivalent linear site response analysis using time series and random vibration theory based approaches. 117, 16–29.
- Stanko, D. i S. Markušić (2020a, September). An empirical relationship between resonance frequency, bedrock depth and VS30 for Croatia based on HVSR forward modelling. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards* 103(3), 3715–3743.
- Stanko, D. i S. Markušić (2020b). An empirical relationship between resonance frequency, bedrock depth and VS30 for croatia based on HVSR forward modelling. 103(3), 3715–3743.
- Strelec, S., D. Stanko, i M. Gazdek (2016). Empirical correlation between the shear-wave velocity and the dynamic probing heavy test : case study varaždin, croatia. *Acta Geotechnica Slovenica* 13(1), 3–15.

- Stur, D. (1871). Das erdbeben von Klana im Jahre 1870. *Jahrbuch der kaiserlich-königlichen geologischen Reichsanstalt* 11, 231–264 (na njemačkom).
- Veinović, Z. i D. Domitrović (2007). Pojava likvefakcije na području zagreba u prošlosti i procjena mogućnosti ponovne pojave tijekom jačeg potresa. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 19, 111–120.
- Vučetić, M. i R. Dobry (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering* 117(1), 89–107.
- Wald, D. J. i T. I. Allen (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America* 97(5), 1379–1395.
- Xia, J., R. D. Miller, i C. B. Park (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of rayleigh waves. *GEOPHYSICS* 64(3), 691–700.

Popis kratica

AF	Amplifikacijski faktor
CPT	engl. <i>Cone penetration test</i>
D	epicentralna udaljenost
DAF	engl. <i>Dynamic amplification factor</i> - dinamički amplifikacijski faktor
DG	engl. <i>Damage grade</i> - stupanj štete
DSHA	engl. <i>Deterministic seismic hazard analysis</i>
EQL	engl. <i>Equivalent linear</i>
f	frekvencija
FAS	engl. <i>Fourier amplitude spectrum</i> - Fourierov spektar amplituda
GMPE	engl. <i>Ground motion prediction equations</i> - atenuacijske relacije nove generacije
h	dubina epicentra potresa
HVSR	engl. <i>horizontal-to-vertical spectral ratio</i> - omjer horizontalnog i vertikalnog spektra
ISSMGE	engl. <i>International Society for Soili Mechanics and Geotechnical Engineering</i>
M_L	lokalna magnituda
MASW	engl. <i>Multichannel analysis of surface waves</i>
MSK	Medvedev-Sponheuer-Karnikova ljestvica intenziteta potresa
PGA	engl. <i>Peak ground acceleration</i> - vršna akceleracija tla
$PGA_{\text{površina}}$	PGA na površini
PGA_{stijene}	PGA na stijeni
PI	engl. <i>Plasticity Index</i> - indeks plastičnosti
PSHA	engl. <i>Probabilistic seismic hazard analysis</i>
PGV	engl. <i>Peak ground velocity</i> - vršna brzina tla
RVT	engl. <i>Random vibration theory</i>
SA	engl. <i>Spectral acceleration</i> - spektralna akceleracija
SASW	engl. <i>Spectral analysis of surface waves</i>
SPT	engl. <i>Standard penetration test</i> - standardni penetracijski test
T	period
V_S	brzina posmičnih valova
V_{S30}	prosječna brzina posmičnih valova do dubine od 30 m

Dodatak A

Tablica A1. Tablica razina mikrozonacije (ISSMGE 1999)

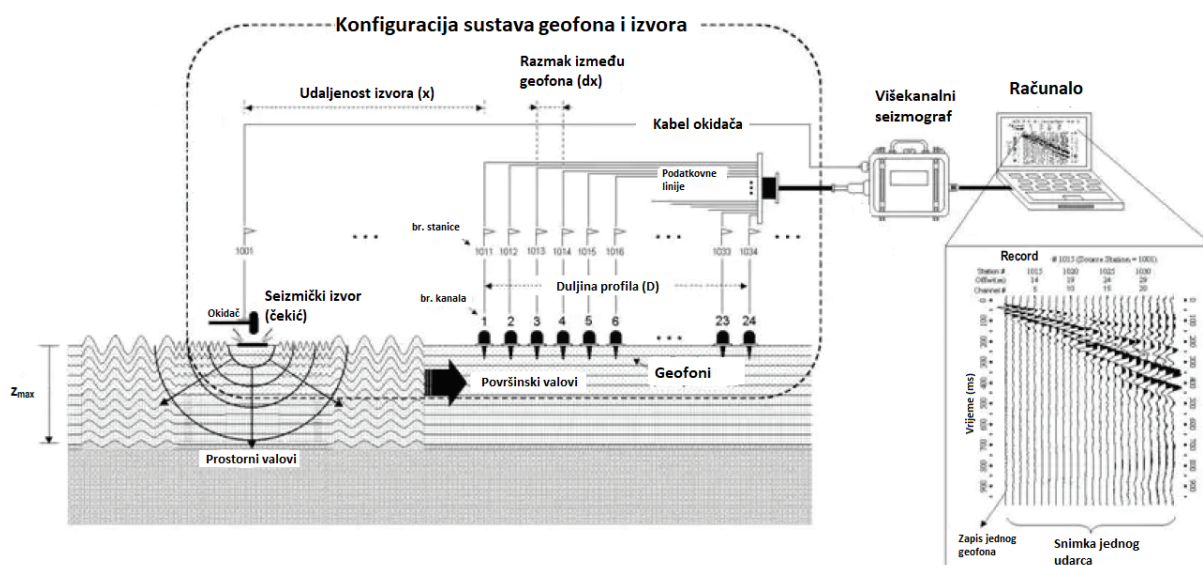
	I razred	II razred	III razred
Odziv tla	<ul style="list-style-type: none"> • povijesni zapisi potresa i postojeće informacije • geološke karte • intervjuiranje lokalnog stanovništva 	<ul style="list-style-type: none"> • mikrotremor • pojednostavljene analize odziva tla 	<ul style="list-style-type: none"> • geotehnička istraživanja • analize odziva tla
Klizišta	<ul style="list-style-type: none"> • povijesni zapisi potresa i postojeće informacije • geološke karte i geomorfološke karte 	<ul style="list-style-type: none"> • fotografiranje iz zraka • terenska istraživanja • vrgetaciski i percitipaciski podaci 	<ul style="list-style-type: none"> • geotehnička istraživanja • analiza
Likvefakcija	<ul style="list-style-type: none"> • povijesni zapisi potresa i postojeće informacije • geološke karte i geomorfološke karte 	<ul style="list-style-type: none"> • fotografiranje iz zraka • terenska istraživanja • intervjuiranje lokalnog stanovništva 	<ul style="list-style-type: none"> • geotehnička istraživanja • analiza
Skala mapiranja	1:1000000–1:50000	1:100000–1:10000	1:25000–1:5000

Tablica A2. Tipovi tla po Eurokodu 8 EN 1998-1 (2004)

Tip tla	Opis stratigrafskog profila	Parametri		
		$V_{S30}(m/s)$	N_{SPT} (udara/30cm)	$c_u(kPa)$
A	Stijena ili druge geološke formacije slične stijeni, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini.	>800	-	-
B	Naslage vrlo gustog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, najmanje debele nekoliko desetak metara, karakterizirana s postupnim povećanjem mehaničkih svojstva s dubinom.	360-800	>50	>250
C	Duboke naslage gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara.	180-360	15-50	70-250
D	Naslage labavog do srednje nekohezivnog tla (s ili bez mekih kohezivnih slojeva) ili pretežito meko do čvrsto kohezivno tlo.	<180	<15	<70
E	Profil tla koji se sastoji od aluvijalnog površinskog sloja s vrijednostima V_S za tipove tla C ili D i s debljinom koja varira između 5 i 20 m, iznad čvrstog materijala $V_S > 800$ (m/s).			
S_1	Naslage koje se sastoje ili sadrže sloj debljine najmanje 10 m, mekih glina/mulja velikog indeksa plastičnosti $PI > 40$ s velikom količinom vode.	<100	-	10-20
S_2	Naslage tla podložnog likvefakciji, osjetljivih glina ili bilo kojeg profila tla koji ne pripada pod tipove A - E ili S_1 .			

Dodatak B MASW mjerenja

Spektralna analiza površinskih valova (engl. *Spectral Analysis of Surface Waves*, SASW) uvedena je početkom 1980-ih od strane Nazarian (1984). SASW se temelji na spektralnoj analizi površinskih valova koje generira neki izvor (čekić, eksplozija). Mijenjanjem razmaka između izvora i geofona, određuje se brzina posmičnih valova u plitkim slojevima tla. Budući da se u metodi koriste samo dva geofona čiji je položaj potrebno promjeniti mnogo puta, metoda je izrazito spora pa su 1998. Park i sur. (2005) i Xia i sur. (1999) uveli MASW metodu. MASW nedestruktivna je seizmička metoda koja se koristi za procjenu debljine slojeva tla, brzine posmičnih valova (1D ili 2D), Poissonovog omjera i gustoće tla. Metoda je brza i jednostavna jer jednostavni seizmički izvori poput čekića i eksplozije mogu uzrokovati dovoljno jake Rayleigh-eve valove s kojima se može, pomoću više geofona, pokriti veliki raspon dubina. Klasični MASW sustav za mjerenje sastoji se od 24-kanalnog seizmografa, 24 geofona (obično frekvencije 4.5 Hz) te nekog uređaja za akviziciju i pohranu podataka (slike B1). Rezolucija snimke će ovisiti o udaljenosti između geofona (dx), dok će dubina mjerenja (Z_{max}) ovisiti o udaljenosti između izvora i prvog najbližeg geofona (x), udaljenosti između prvog i zadnjeg geofona, jačini izvora i tipu izvora.



Slika B1. Shematski dijagram prikupljanja podataka MASW metodom (po Strelec i sur. (2016)).

Površinski valovi su disperzivni, tj. fazna brzina vala ovisi o valnoj duljini, odnosno frekvenciji. To omogućava da se mjerenjem vremena putovanja pojedinih faza vala dobije disperzijska krivulja. Iz disperzijske krivulje inverznim modeliranjem moguće je dobiti 1D profil brzine posmičnih valova.

Mjerenja u diplomskom radu napravljena su s 24-kanalnim seizmografom PASI (model GEA24), razmak između geofona bio je $dx = 3$ m te su na sve tri lokacije napravljena mjerenja s četiri različite udaljenosti izvora od geofona ($x = 4, 8, 16$ i 24 m). Razlog uzimanja četiri različite udaljenosti između izvora i geofona je da se dobije što bolja kvaliteta podataka. Manje udaljenosti rezultirat će boljom kvalitetom

mjerenja u plćim slojevima, dok će veće udaljenosti izvora rezultirati boljom kvalitetom mjerenja u dubljim slojevima.