Atenuacija transverzalnih valova u području sjevernog dijela Vanjskih Dinarida

Namjesnik, Dalija

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:847143

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geofizički odsjek

Dalija Namjesnik

Atenuacija transverzalnih valova u području sjevernog dijela Vanjskih Dinarida

Diplomski rad

Zagreb, lipanj 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geofizički odsjek

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Dalija Namjesnik

Diplomski rad

Atenuacija transverzalnih valova u području sjevernog dijela Vanjskih Dinarida

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Marijan Herak

Neposredna voditeljica: dr. sc. Iva Dasović

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Sažetak

Promatrano područje sjevernog dijela Vanjskih Dinarida dio je geološki i tektonski vrlo kompleksnog područja, nastalog kolizijom Jadranske mikroploče i Euroazijske ploče. Proučavanje atenuacije seizmičkih valova lokalnih potresa u ovom radu omogućilo je dobivanje novih informacija o strukturi i svojstvima Zemljine unutrašnjosti promatranog područja. Izračunati su doprinosi intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja ukupnoj atenuaciji seizmičkih valova pomoću metode višestrukih prozora (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis,* skraćeno MLTWA) te pomoću Wennerbergove metode.

MLTWA metoda primjenjena je na 717 seizmograma, odnosno 415 potresa, lokalnih magnituda M_L većih ili jednakih 2, hipocentralnih udaljenosti između 10 i 120 km, za do trinaest frekvencijskih pojasa središnjih frekvencija od 1.5 do 20 Hz. Metoda se temelji na pretpostavci izotropnog višestrukog raspršenja i modelu homogenog poluprostora s uniformnom raspodjelom heterogenosti.

Za primjenu Wennerbergove metode korišteni su prethodno izmjereni podaci Q-faktora izravnih S-valova i kode S-valova. Glavna pretpostavka Wennerbergove metode je kolociranost izvora i prijemnika.

Rezultati obje metode dovode do zaključka da se Q-faktor atenuacije smanjuje s porastom frekvencije, te da je intrinzična atenuacija dominantna u odnosu na atenuaciju raspršenja. Rezultati metode MLTWA također pokazuju da se atenuacija smanjuje idući od unutrašnjosti kontinenta prema jugozapadu ili prema Jadranskom moru. Usporedba rezultata dviju metoda pokazuje da su faktori intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja dobiveni Wennerbergovom metodom precjenjeni u odnosu na rezultate metode MLTWA.

Sadržaj

Sažetak i

1. Uvod 1

2. Teorijska pozadina 3

2.1 Atenuacija seizmičkih valova 3

2.1.1 Atenuacija raspršenja 3

2.1.2 Intrinzična atenuacija 4

2.2 Koda 5

2.3 Različiti pristupi u analizi atenuacije raspršenih valova – povijesni razvoj 6

2.3.1 Dva ekstremna modela za koda valove 6

2.3.2 Primjena teorije prijenosa zračenjem na višestruko raspršenje seizmičkih valova 7

2.3.3 Razvoj rješenja u vremenskoj domeni za energiju višestruko raspršenih valova 9

2.3.4 Usporedba oblika kode modela jednostrukog raspršenja i Zeng-ovog modela višestrukog raspršenja 12

3. Metoda i analiza podataka 16

3.1 Podaci 16

3.2 Metoda MLTWA 18

3.2.1 Teorijski izračun energije potresa 18

3.2.2 Energija određena iz seizmograma potresa 21

3.2.3. Procjena parametara B_0 i Le^{-1} 22

3.2.4 Izračun faktora atenuacije Q^{-1} 24

3.3 Wennerbergova metoda 25

4. Rezultati i diskusija 27

4.1 Metoda MLTWA 27

4.1.1 Rezultati pojedinih postaja 27

4.1.2 Usporedba rezultata svih postaja 30

4.1.3 Sjeverni dio Vanjskih Dinarida kao cjelina 33

4.1.4 Usporedba s drugim regijama u svijetu 34

4.2 Wennerbergova metoda 36

4.3 Usporedba rezultata MLTWA i Wennerbergove metode 37

5. Zaključak 39

6. Literatura 41

Prilog A 46
Prilog B 66
Prilog C 73

1. Uvod

Promatrano područje dio je kompleksnog Alpsko-karpatsko-dinarskog orogenog sustava. Struktura Dinarida u usporedbi s alpskim i karpatskim planinskim lancima relativno je slabo istražena (Stipčević, 2012 i tamo navedene reference). Glavna deformacijska faza Dinarida bila je u paleogenu, s konačnim uzdizanjem u razdoblju oligocena i miocena (Tomljenović i sur., 2008). Dinaridi su nastali konvergencijom i kolizijom Jadranske mikroploče i Europske ploče, a pojas čine bore i navlake te sustavi uglavnom reversnih rasjeda s kompleksno građenom litosferom (Kastelic i Carafa, 2012). Prostor je karakteriziran slojem karbonatnih stijena debljine desetak kilometara, a dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta veća je od 40 kilometara te se postupno smanjuje prema Jadranskom moru i Panonskoj nizini (Stipčević, 2012). Smjer pružanja Dinarida je od Južnih Alpa na sjevernozapadnom dijelu, do Albanida i Helenida na jugoistoku. Dinaride možemo podijeliti na Vanjske i Unutarnje. Režim napetosti u Unutarnjim Dinaridima tijekom razvoja Dinarida se mijenjao, od ektenzijskog koji je povezan s otvaranjem Panonskog bazena do kompresijskog, dok je režim napetosti u Vanjskim Dinaridima tijekom cijelog razvojnog razdoblja ostao nepromijenjen – kompresijski, s glavnom osi napetosti smjera sjeveroistok- jugozapad. Područje Dinarida seizmički je umjereno do vrlo aktivno, slabi potresi vrlo su česti dok se snažni do vrlo snažni pojavljuju tek povremeno (Ivančić i sur., 2006). Većina potresa je plitka i ima žarište u gornjoj kori do dubine 30 km.

U seizmičkim istraživanjima proučavanje atenuacije seizmičkih valova omogućuje bolje razumijevanje rasprostiranja energije potresa kroz litosferu. Parametri atenuacije seizmičkih valova u litosferi predstavljaju vrlo bitne geofizičke karakteristike koje sadrže informacije o strukturi i svojstvima Zemljine unutrašnjosti. Općenito, atenuacija predstavlja proces smanjenja amplitude, odnosno energije, seizmičkih valova tijekom njihove propagacije koji se ne može objasniti geometrijskim rasprostiranjem, odnosno širenjem valne fronte. Označava se inverzom faktora dobrote Q^{-1} koji opisuje gubitak energije tijekom jedne oscilacije. Procjena atenuacije iz izravnih kratkoperiodičnih S-valova ili iz kode sadrži kombinaciju utjecaja raspršenja i unutarnjih procesa. Atenuacija zbog unutarnje apsorpcije i trenja (dalje u tekstu: intrinzična atenuacija) opisana je faktorom Q_i^{-1}, a uzrokovana je neelastičnošću sredstva, ovisi o viskoelastičnim procesima između stijene i fluida sadržanih u porama te implicira konverziju elastične energije vala u toplinu. Atenuacija raspršenja opisana je faktorom Q_{sc}^{-1}, a ovisi o prostornoj strukturi nehomogenosti u promatranom sredstvu, o brzini rasprostiranja valova te o fluktuacijama gustoće (Akinci i sur., 2010). Predstavlja preraspodjelu energije refleksijom, refrakcijom i konverzijom seizmičkih valova, ali ne i stvarni gubitak energije. Poznavanje

relativnih vrijednosti utjecaja raspršenja (Q_{sc}^{-1}) i unutarnjih procesa (Q_i^{-1}) omogućuje lakšu identifikaciju stijena kore, interpretaciju tektonike i kvantificiranje gibanja tla (Mukhopadhyay i sur., 2014). Pouzdane kvantitativne procjene ovih parametara značajne su u istraživanju seizmičkih izvora i predviđanjima gibanja tla tijekom jakih potresa. Informacije o atenuaciji kratkoperiodičnih S-valova posebno su bitne u inženjerskoj seizmologiji i građevinarstvu, s obzirom na to da ti valovi nanose najviše štete zgradama i strukturama tijekom jakog potresa. Za procjenu seizmičkog hazarda i parametara izvora potresa moramo dobro poznavati svojstva sredstva.

Dosad je na području Hrvatske i Dinarida provedeno nekoliko istraživanja seizmičke atenuacije. Rovelli (1984) je proučavao područje susjedne Crne Gore, uključujući Dubrovnik s okolicom, a Herak (1991a, 1991b) je napravio analizu koda-Q faktora za područje središnjih Dinarida. Dasović i sur. (2012, 2013) su korištenjem modificirane koda-Q metode odredili Q-faktore kode na zapadnom dijelu kontinentalne Hrvatske te duž cijele obale, a Dasović i sur. (2015) odredili su Q-faktore S- i P-valova primjenom metode normiranja kodom na području središnjih Vanjskih Dinarida. Rezultati istraživanja pokazuju jaku ovisnost Q-faktora o frekvenciji i o proteklom vremenu (engl. *lapse time*). Atenuacija je snažna te upućuje na vrlo heterogenu litosferu.

Dosadašnja istraživanja seizmičke atenuacije najviše su se fokusirala na središnji i južni dio Vanjskih Dinarida zbog izraženije seizmičnosti i većeg broja (dostupnih) podataka pa je stoga sjeverni dio, kao seizmički manje aktivan, slabije istražen. Kako bismo saznali malo više informacija o strukturi i svojstvima litosfere sjevernog dijela Vanjskih Dinarida, usredotočila sam se na to područje.

Cilj ovoga rada je određivanje doprinosa intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja na području sjevernih Vanjskih Dinarida, primjenom dviju metoda. Prva je metoda višestrukih vremenskih prozora (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis*, u daljnjem tekstu MLTWA), koju su razvili Fehler i sur. (1992). Primjenjuje se uz pretpostavke višestrukog izotropnog raspršenja i uniformne raspodjele raspršivača u sredstvu, za model homogenog poluprostora. Temelji se na usporedbi integrala energije duž kode S-vala lokalnih potresa, izračunatih u tri odvojena uzastopna prozora u odnosu na hipocentralnu udaljenost, s teorijskom energijom čije su vrijednosti bazirane na teoriji prijenosa zračenjem (engl. *radiative transfer theory*). Drugu primijenjenu metodu za izračun intrinzičnog Q-faktora i Q-faktora raspršenja razvio je Wennerberg (1993), a pretpostavlja da su izvor i postaja kolocirani, te ne uzima u obzir utjecaje izvora vala. Za procjenu faktora intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja koristi prethodno određene Q-faktore izravnih S-valova i koda-Q faktore.

2. Teorijska pozadina

2.1 Atenuacija seizmičkih valova

U idealno elastičnom, homogenom i izotropnom sredstvu amplituda elastičkog vala smanjuje se uslijed geometrijskog širenja valne fronte, refleksije te transmisije vala na granici idealnih sredstava. Zemlju kao sredstvo kroz koje se rasprostiru seizmički valovi ne možemo smatrati idealno elastičnom, homogenom i izotropnom jer sadrži razne strukturne anomalije i heterogenosti različitih dimenzija: od (mikro)pukotina ili šupljina, ponekad ispunjenih fluidima, do velikih rasjeda odnosno rasjednih struktura. Zbog toga amplituda vala će se smanjivati brže nego što je predviđeno samo geometrijskim rasprostiranjem, refleksijom i transmisijom.

Proces smanjenja amplitude vala koji predstavlja gubitak energije tijekom vremena, a nije uzrokovan geometrijskim širenjem valne fronte naziva se atenuacija. Strukturne anomalije uslijed trenja i termalnih procesa među česticama sredstva utječu na konverziju dijela seizmičke energije u toplinu koju nazivamo intrinzičnom atenuacijom. Heterogenosti, s druge strane, raspršuju valove i skreću ih s njihove početne putanje, uzrokujući redistribuciju energije vala u sredstvu, što se naziva atenuacija raspršenja.

Gubitak energije vala zbog neelastičnosti sredstva opisuje se faktorom dobrote Q. Definiran je kao omjer gubitka energije tijekom jedne oscilacije ΔE i najveće energije deformacije u volumenu sredstva E:

$$-\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\pi}{Q}. \tag{2.1}$$

Općenito, faktor Q ovisi o tipu vala (P-val, S-val, površinski, koda P-vala, koda S-vala).

2.1.1 Atenuacija raspršenja

Uzroci lateralne heterogenosti Zemlje od kore preko plašta do jezgre mogu biti različitih skala, od zrna stijena koja mogu biti manja od milimetra do nekoliko centimetara, sve do pukotina koje mogu biti do nekoliko desetaka metara, ili rasjeda do čak 1000 km (npr. San Andreas rasjed). Ovisno o linearnoj dimenziji, heterogenosti imaju različite učinke na seizmičke valove. Promjene u brzini rasprostiranja valova i gustoći stijena mogu uzrokovati promjenu oblika vala, faze, fluktuacije amplitude, ali i atenuaciju izravnih valova. Heterogenosti u blizini izvora vala ili prijemnika također mogu modificirati valno polje uzrokujući rezonanciju, a poredane pukotine u kori mogu uzrokovati efekte anizotropije. Raspršenje seizmičkih valova na heterogenostima

generira koda valove (P-kodu, S-kodu, Lg-kodu). Svaka modifikacija seizmičkog vala na 3-dimenzionalnim heterogenostima naziva se raspršenje seizmičkih valova (Wu i Aki, 1988). Promatrajući parametre $ka = 2\pi a/\lambda$ te L/a, gdje je k valni broj, λ valna duljina, a red veličine nehomogenosti, a L linearna dimenzija nehomohenog područja, efekte raspršenja klasificiramo u nekoliko režima:

- kvazi-homogeno, $ka < 0.01$, u kojem se sredstvo može smatrati kvazi-homogeno, jer je parametar L malen u usporedbi s valnom duljinom, pri čemu su efekti raspršenja zanemarivi;
- Rayleighevo raspršenje, $ka \ll 1$ $(ka < 0.1)$, pri kojem je snaga raspršenja proporcionalna s k^4;
- raspršenje pod velikim kutom, $ka \approx 1$ $(0.1 < ka < 10)$, kad su veličine heterogenosti usporedive s valnom duljinom, a efekti raspršenja su najznačajniji – naziva se još i Mievo ili rezonantno raspršenje;
- raspršenje pod malim kutom, $ka \gg 1$ $(ka > 10)$, pri kojem je seizmička energija u najvećem dijelu raspršena prema naprijed, zbog čega glavni efekti postaju fokusiranje, difrakcija i interferencija.

U ovom radu najzanimljiviji su utjecaji raspršenja energije valova pod velikim kutom (kada su valne duljine nešto manje ili usporedive s dimenzijom heterogenosti) koje najviše pridonosi pojavi atenuacije i nastanku koda valova. Za raspon središnjih frekvencija koje koristim u ovom radu, od 1.5 Hz do 20 Hz, transverzalni S-val (brzine 3.5 km/s u kori) imat će valnu duljinu od oko 2.3 km do 175 m, što nam govori o dimenziji heteorgenosti koju promatramo.

2.1.2 Intrinzična atenuacija

Prema Steinu i Wysessionu (2003) za opis intrinzične atenuacije primjenjuje se model gušenog harmoničkog oscilatora. Gibanje se opisuje jednadžbom

$$m\frac{d^2u(t)}{dt^2} + \gamma m\frac{du(t)}{dt} + ku(t) = 0\,, \tag{2.2}$$

gdje $u(t)$ opisuje pomak mase m u vremenu t, a γ je faktor gušenja oscilatora. Konstanta k predstavlja elastičnost opruge, a vlastita frekvencija je određena kao $\omega_0 = \sqrt{k/m}$. Radi pojednostavljenja uvodi se faktor dobrote, $Q = \omega_0/\gamma$ te jednadžba prelazi u oblik

$$\frac{d^2u(t)}{dt^2} + \omega_0 Q\frac{du(t)}{dt} + {\omega_0}^2 u(t) = 0\,. \tag{2.3}$$

Realni dio rješenja ove jednadžbe predstavlja pomak gušenog oscilatora

$$u(t) = A_0 e^{-\omega_0 t/2Q} \cos \omega t, \qquad \omega = \omega_0 \sqrt{1 - 1/4Q^2}\,. \tag{2.4}$$

Energija oscilirajućeg sustava proporcionalna je kvadratu amplitude osicliranja:

$$E(t) = \frac{1}{2} k A(t)^2 = \frac{1}{2} k A_0^2 e^{-\omega_0 t/Q} = E_0 e^{-\omega_0 t/Q}\,. \tag{2.5}$$

Model gušenog harmoničkog oscilatora predstavlja idealni model za opis mehanizma intrinzične atenuacije. Procesi koji u realnom sredstvu uzrokuju pretvaranje energije valova u toplinu su brojni, a posljedica su trenja, viskoznosti i termičke relaksacije.

Mnogi predloženi mehanizmi intrinzične atenuacije temelje se na opažanjima da stijene kore sadrže mikroskopske pukotine i pore koje mogu biti ispunjene fluidima. Parametar *d* koji predstavlja omjer širine i duljine pukotine (engl. *aspect ratio*), jedna je od dominantnih veličina koje kontroliraju frekvencijsku ovisnost u mnogim atenuacijskim modelima (Sato i sur., 2012).

Mehanizmi atenuacije mogu se podijeliti u nekoliko kategorija (Dasović, 2015 i tamo navedene reference):

- trenje na granicama čestica i na stijenkama pukotina,
- tok fluida zbog smicanja na granici fluida i pora,
- relativno gibanje okvira matriksa stijene u onosu na inkluzije fluida u potpuno zasićenoj stijeni,
- ubrizgavanje (engl. *squirting*),
- stiskanje plinskih džepova pri djelomičnom zasićenju stijena,
- geometrijski efekti zbog malenih pora, većih nepravilnosti, tankih slojeva i sl.

Intrinzična atenuacija vrlo je složen proces – ovisi o dubini, tlaku, veličini i obliku pukotina te vrsti i količini fluida koji ih ispunjavaju. Moguća su razna međudjelovanja na različitim skalama, a mehanizmi koji utječu na atenuaciju ovise i o frekvenciji seizmičkih valova. Detaljniji opis mehanizama atenuacije možete pronaći u npr. Sato i sur. (2012) ili Dasović (2015) i tamo navedenim referencama.

2.2 Koda

Gibanje tla uzrokovano potresom smanjuje se postupno, ostavljajući rep na zapisu seizmograma nakon nailazaka svih prostornih izravnih, odbijenih ili lomljenih faza. Aki (1969) prvi među seizmolozima u kratkoperiodičnim zapisima prepoznaje utjecaj raspršenja te definira opaženi

kontinuirani zapis kao "koda val", termin koji nakon toga postaje uobičajen za opis repa seizmograma lokalnih potresa. U svom radu objašnjava nastanak kode raspršenjem seizmičkih valova na nasumičnim heterogenostima u Zemljinoj litosferi, te ju opisuje kao neku vrstu usrednjavanja na velikom broju heterogenosti. To upućuje na mogućnost korištenja statističkog pristupa za izračun prosječnih vrijednosti svojstava heterogenog sredstva. Aki i Chouet (1975) navode nekoliko opaženih svojstava kode opisanih u sljedećih šest točaka.

- Spektar ranijeg dijela seizmograma lokalnog potresa jako ovisi o udaljenosti od žarišta te o svojstvima sredstva na putu vala do postaje. Razlika u spektru između postaja smanjuje se u kasnijim dijelovima seizmograma, te nestaje u kodi.
- Duljina kode neovisna je o epicentralnoj udaljenosti i o azimutu za lokalne potrese te može biti korištena kao mjera magnitude potresa.
- Spektar snage koda valova različitih lokalnih potresa trne s vremenom na sličan način, za sve postaje i sve potrese unutar određenog područja.
- Vremensko opadanje spektra snage koda valova ne ovisi o magnitudi potresa.
- Amplituda kode varira ovisno o lokalnoj geologiji u okolini postaje. Može biti pet do osam puta veća za sedimente nego granit.
- Analiza kode na gustoj mreži seizmoloških postaja pokazuje da to nisu ravni valovi koji dolaze iz epicentra.

Mnoga teorijska i eksperimentalna istraživanja rezultirala su razvojem naprednih metoda za dobivanje informacija iz atenuacije koda valova. Analize su dovele do zaključaka da se koda seizmograma sastoji od mnogo nekoherentnih dolazaka s elastičkih heterogenosti u Zemljinoj unutrašnjosti te da je sposobnost reproduciranja prosječnih svojstava kode povezana s sposobnošću simuliranja raspršenja na heterogenostima u Zemlji, na različitim valnim duljinama (de Lorenzo i sur., 2013). Metode jednostrukog raspršenja obično se koriste u analizi ranijeg dijela kode (Aki, 1969; Sato, 1977), dok su metode višestrukog raspršenja razvijene za analizu cijele kode (Gao i sur., 1983; Hoshiba 1991, Zeng 1991).

2.3 Različiti pristupi u analizi atenuacije raspršenih valova – povijesni razvoj

2.3.1 Dva ekstremna modela za koda valove

Aki i Chouet (1975) razvili su dva jednostavna teorijska modela koja su pokazala dobro slaganje s izmjerenom ovojnicom energije koda valova: model jednostrukog raspršenja unazad i difuzijski model. Oba modela temeljena su na ideji da koda valovi nastaju raspršenjem unazad

na brojim heterogenostima uniformno raspoređenim u Zemljinoj kori. Model jednostrukog raspršenja unazad temelji se na pretpostavkama da je udaljenost između izvora i prijemnika zanemariva, da ne postoji sekundarno raspršenje odnosno da vrijedi Bornova aproksimacija. Predstavlja najjednostavniji i najprihvaćeniji model generiranja koda valova, a mogući razlog tomu je još uvijek valjan intuitivni prikaz valnog polja kao sume valnih zraka. Ipak, zbog zanemarivanja raspršenja višeg reda valjanost modela uvijek je bila upitna. Drugi model nije privukao toliko pažnje, a opisuje ovojnice izmjerenih koda valova pomoću vrlo jednostavne analitičke jednadžbe koja opisuje prijenos seizmičke energije kao difuzni proces:

$$E(t) \sim \frac{1}{t^{\alpha}} \exp(-\omega t / Q_c). \tag{2.6}$$

U tom modelu raspršenje je jako, energija je sačuvana, ali ostaje nedefinirano kako je energija podjeljena između raspršenja unazad i unaprijed. Istraživanja su pokazala da difuzni model ne opisuje dobro nastanak kode na Zemlji (Kopnichev, 1997), no da dobro opisuje kodu lunarnih potresa (Dainty i Toksöz, 1981) gdje je energija intenzivno raspršena na brojnim heterogenostima, a intrinzična apsorpcija mala zbog nedostatka fluida među česticama stijena.

U modelu jednostrukog raspršenja unazad Q_c je posljedica utjecaja intrinzične atenuacije Q_i i atenuacije raspršenja Q_{sc} (npr. Margerin, 2005):

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_{sc}}, \tag{2.7}$$

dok u difuznom modelu Q_c predstavlja samo efekte intrinzične apsorpcije:

$$Q_c = Q_i \,. \tag{2.8}$$

S obzirom da dva modela različito interpretiraju Q-faktor, kode, kao što vidimo u jednadžbama (2.7) i (2.8), vrlo je bitno naći raspon aproksimacija koje će se dobro slagati s dobivenim podacima, kako bi vrijednosti Q_c mogli dati smislenu interpretaciju. Teorija prijenosa zračenjem predstavlja dobar pristup u rješavanju ovog problema, a omogućuje izračun ovojnica energije seizmičkih valova uzimajući u obzir raspršenja svih redova.

2.3.2 Primjena teorije prijenosa zračenjem na višestruko raspršenje seizmičkih valova

Kako se povećava vrijeme od nastanka potresa, očekuje se da će raspršenja drugog, trećeg i viših redova imati veći doprinos nego jednostruko raspršenje. Najbolji pristup za modeliranje koji uključuje efekte višestrukog raspršenja daje teorija prijenosa zračenjemu seizmologiji (engl.

radiative transfer theory). Ona predstavlja osnovni analitički pristup u nuklearnoj teoriji, kinetičkoj teoriji plinova i teoriji prijenosa kroz vodljive materijale. Izravno opisuje procese prijenosa energije te ne uzima u obzir difrakciju ni interferenciju valova, čime zanemaruje razlike u fazi individualnih doprinosa valnog polja. S obzirom na to da teorija nema osnovu u valnoj jednadžbi, u ovom pristupu pojavljuju se jedino energija ili intenzitet, što bitno pojednostavljuje matematički pristup.

Model prijenosa zračenjem u seizmologiju je uveo Wu (1985). Prvi je uzeo u obzir višestruko raspršenje pri mjerenju relativnih doprinosa atenuacije raspršenja i intrinzične atenuacije u ukupnoj atenuaciji. Primijenio je teoriju prijenosa zračenjem na gustoću seizmičke energije te razvio model za propagaciju seizmičke energije u elastičnom sredstvu s heterogenostima raspodjeljenim uniformno i slučajno u poluprostoru. Pretpostavio je da je raspršenje izotropno i uključuje višestruko raspršenje. Wuov model opisuju dva parametra: koeficijent raspršenja g i intrinzični faktor dobrote Q_i. Koeficijent raspršenja je recipročna vrijednost srednjeg slobodnog puta raspršenja, a s faktorom dobrote raspršenja Q_{sc} povezan je jednadžbom

$$Q_{sc} = \frac{\omega}{gV}, \tag{2.9}$$

pri čemu je ω kutna frekvencija, a V brzina seizmičkih valova. Modeliranjem Wu dobiva karakteristične krivulje koje predstavljaju raspodjelu seizmičke energije u odnosu na udaljenost od izvora u sredstvu. Rezultat predstavlja raspodjelu energije s udaljenošću od izvora s kontinuiranim zračenjem ili, alternativno, kao ovisnost udaljenosti i energije intergrirane u beskonačnom vremenskom prozoru s impulsnim izvorom seizmičke energije. Svaka dobivena krivulja energije određena je vrijednošću seizmičkog albeda B_o, parametra kojeg je Wu uveo i definirao kao omjer atenuacije raspršenja i ukupne atenuacije:

$$B_o = \frac{g}{g + \omega(Q_i V)^{-1}} = \frac{Q_{sc}^{-1}}{Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1}}. \tag{2.10}$$

Seizmički albedo može poprimiti vrijednosti između 0 i 1. Izraz u nazivniku $g + \omega(Q_i V)^{-1}$ zove se atenuacijski koeficijent utrnuća. Sredstva s izraženom heterogenosti bez intrinzičnog doprinosa imaju albedo približno jedan, dok homogena sredstva imaju albedo jednak nuli. Atenuacija raspršenja dominantna je kada je $B_o > 0.5$, a ako je $B_o < 0.5$ dominira intrinzična atenuacija.

Brojna istraživanja (npr. Wu i Aki, 1988 a,b; Mayeda i sur., 1991) provedena su koristeći pristup koji je razvio Wu, integrirajući energije potresa u prozoru konačne duljine u ovisnosti o udaljenosti. Dobivene vrijednosti albeda pojedinih područja omogućili su određivanje

dominantnog mehanizma atenuacije. Ovakav pristup ipak nije sasvim prikladan, jer se uspoređuju rezultati dobiveni integracijom u prozoru konačne vremenske duljine s Wuovim modelom koji se temelji na integraciji seizmičke energije u vremenskom prozoru beskonačne duljine. U slučaju jakog raspršenja, zapis kode na seizmogramu je dugačak, stoga posljedice ignoriranja energije na seizmogramu u dijelu izvan prozora integracije mogu biti značajne. Hoshiba (1991) naglašava da ovakav pristup može uzrokovati odstupanja u izračunu seizmičkog albeda. On koristi metodu Monte Carlo za numeričko modeliranje oblika ovojnice kode lokalnih potresa u vremenu i procjenu relativnih doprinosa viših redova raspršenja na njen oblik. Pri modeliranju koristi iste pretpostavke za proces raspršenja kao i Wu (1985): izotropno raspršenje i uniformnu, slučajnu raspodjelu heterogenosti u poluprostoru. Iako je fizikalna pozadina koju koriste Hoshiba (1991) i Wu (1985) ista, Hoshiba numeričkim modeliranjem određuje raspodjelu energije za impulsni izvor u prostoru i vremenu, dok analitički izrazi koje je razvio Wu nemaju vremensku ovisnost. Paralelno s pristupom korištenja Monte Carlo metode razvija se i analitički pristup. Zengov (1991) dolazak do rješenja radijacijske teorije prijenosa u vremenskoj domeni omogućuje daljnje rješavanje problema primjene Wuovog modela. Fehler i sur. (1992) razvijaju metodu višestrukih vremenskih prozora (engl. *Multiple lapse time window analysis*, skraćeno MLTWA), koristeći Zengovo rješenje za energiju višestruko raspršenih valova.

2.3.3 Razvoj rješenja u vremenskoj domeni za energiju višestruko raspršenih valova

Nedugo nakon što je Hoshiba (1991) pružio dokaze očuvanja energije za model višestrukog raspršenja u obliku numeričke simulacije, Zeng i sur. (1991) dokazali su isto i u teoriji, te su došli do kompaktnog rješenja za energiju višestruko raspršenih valova u vremenskoj domeni, pod pretpostavkom uniformnog modela Zemlje.

Ako promatramo akustične valove koji se rasprostiru u trodimenzionalnom elastičnom sredstvu s konstantnom brzinom i nasumično raspoređenim raspršivačima u poluprostoru koji generiraju nekoherentne raspršene valove, energija raspršenih valova u tom sredstvu je aditivna. Tada vrijedi jednadžba energije u vremenu t:

$$E(\vec{r},t) = E_{in}\left(\overrightarrow{r_0},\vec{r},t-\frac{|\vec{r}-\overrightarrow{r_0}|}{v}\right)+\sum_{\overrightarrow{r_1}\neq\vec{r}} E_s\left(\overrightarrow{r_1},\vec{r},t-\frac{|\overrightarrow{r_1}-\vec{r}|}{v}\right). \tag{2.11}$$

Prvi član desne strane jednadžbe predstavlja energiju upadnog (izravnog, neraspršenog) vala na prijemnik u točki $\vec{r}$, a drugi član sumu energija raspršenih valova iz svih mogućih točaka

raspršenja $\overrightarrow{r_1}$ do prijemnika $\vec{r}$. U sredstvu u kojem su raspršivači izotropno i uniformno raspršeni s gustoćom n_0, energija raspršenog vala E_s može se pisati kao umnožak udarnog presjeka raspršivača σ, gustoće valne energije u točki raspršenja, faktora geometrijskog raspršenja, gubitka zbog raspršenja i intrinzične atenuacije od točke raspršenja do prijemnika:

$$E_s\left(\vec{r}_1, \vec{r}, t - \frac{|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|}{v}\right) = \sigma E\left(\overrightarrow{r_{1,}} t - \frac{|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|}{v}\right) \frac{e^{-\eta|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|}}{4\pi|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|^2}, \tag{2.12}$$

gdje je $\eta = \eta_s + \eta_i$, η_s je koeficijent raspršenja jednak $n_0\sigma$, a η_i koeficijent apsorpcije. Analogno, energija upadnog vala E_{in} iznosi:

$$E_{in}\left(\vec{r}_0, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|}{v}\right) = E_{in}\left(t - \frac{|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|}{v}\right) \frac{e^{-\eta|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|}}{4\pi|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|^2}. \tag{2.13}$$

Nakon uvrštavanja jednadžbi (2.12) i (2.13) u jednadžbu (2.11), izraz za energiju tada se može zapisati u obliku kontinuiranog zapisa

$$\begin{aligned} E(\vec{r}, t) = {} & E_{in}\left(t - \frac{|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|}{v}\right) \frac{e^{-\eta|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|}}{4\pi|\vec{r} - \overrightarrow{r_0}|^2} \\ & + \int_V \eta_s E\left(\overrightarrow{r_{1,}} t - \frac{|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|}{v}\right) \frac{e^{-\eta|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|}}{4\pi|\overrightarrow{r_1} - \vec{r}|^2} dV_1, \end{aligned} \tag{2.14}$$

čime se dobiva jednadžba energije raspršenog vala (Zeng i sur., 1991). Jednadžba (2.14) predstavlja osnovnu jednadžbu koja ujedinjuje dotad objavljena rješenja energije jednostrukih i višestrukih raspršenja te energije radijacijskog prijenosa. Rješavanjem integrala u jednadžbi (2.14) iterativno, dobije se Neumannov red, u kojem je svaki član određen potencijom koeficijenta raspršenja i predstavlja pripadni red raspršenja. Općenito, energija raspršenih valova n-tog reda dana je izrazom

$$E_n(0, t) = (\eta_s v t)^{\,n-3} \eta_s^3 B_n \frac{E_0}{2\pi} e^{-\eta v t}, \tag{2.15}$$

pri čemu je E_0 ukupna energija upadnog vala, dok se izraz B_n dobije iterativnim rješavanjem jednadžbe (2.14) s impulsnim izvorom i prijemnikom u istoj točki (Zeng i sur., 1991).

Primjenom Laplaceovog transformata te inverza Fourierovog transformata na jednadžbu energije raspršenog vala (2.14) za $n > 2$, uz $\vec{r} \to 0$, dobiva se

$$E_n(0, t) = \frac{E_0 (\eta_s v t)^{\,n-3} {\eta_s}^3 e^{-\eta v t}}{2\pi} \frac{1}{\pi(n-3)!} \int_0^{\pi/2} \frac{\operatorname{ctg} x^{n-3}}{\sin x^2} x^{n+1} dx, n \geq 3, \tag{2.16}$$

uz korištenu supstituciju $x = \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{k}{\eta + {}^{s}/_{v}}\right)$, gdje je s varijabla Laplaceovog transformata. Usporedbom (2.15) i (2.16) vidimo da vrijedi

$$B_n = \frac{1}{\pi(n-3)!}\int_0^{\pi/2} \frac{\mathrm{ctg}\, x^{n-3}}{\sin x^2} x^{n+1} dx\,, n \geq 3\,. \tag{2.17}$$

Ukupna energija raspršenog valnog polja za slučaj izvora i prijemnika u istoj točki dana je izrazom

$$\begin{aligned} E(0,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} E_n(0,t) \\ &= \frac{E_0 \eta_s{}^3 e^{-\eta v t}}{2\pi}\left\{\frac{1}{(\eta_s v t)^2} + \frac{\pi^2}{8}\frac{1}{\eta_s v t}\right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi/2}\sum_{n=3}^{\infty}\frac{[\eta_s v t x\,\mathrm{ctg}(x)]^{n-3}}{(n-3)!}\frac{x^4 dx}{\sin(x)^2}\right\} \\ &= \frac{E_0 \eta_s{}^3 e^{-\eta v t}}{2\pi}\left[\frac{1}{(\eta_s v t)^2} + \frac{\pi^2}{8}\frac{1}{\eta_s v t} + \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi/2}\frac{x^4}{\sin(x)^2} e^{\eta_s v t x\,\mathrm{ctg}(x)} dx\right]. \end{aligned} \tag{2.18}$$

Vrijednosti koeficijenta B_n danog izrazom (2.17) Zeng (1991) je usporedio s rješenjima numeričke Monte-Carlo simulacije (Hoshiba, 1991) za $n \leq 10$, te je dobio dobro slaganje do $n = 7$. Energiju izračunatu pomoću (2.18) Zeng (1991) je zatim usporedio s rezultatima modela jednostrukog raspršenja, modela toka energije, i difuzijskog modela, pri čemu je koeficijent apsorpcije držao konstantnim ($\eta_i = 0.01\,\mathrm{km}^{-1}$), dok je varirao koeficijent raspršenja ($\eta_s = 0.002$ i $0.05\,\mathrm{km}^{-1}$). Došao je do zaključka da pri slabom raspršenju, modeli jednostrukog raspršenja i toka energije daju dobru aproksimaciju egzaktnog rješenja. Kod jakog raspršenja, dobro slaganje s egzaktnim rezultatom pokazuje model difuzije. Ovaj rezultat dao je Zengu (1991) ideju za daljni razvoj izraza za energiju. Zadržao je izraze za energiju izravnih i jednostruko raspršenih valova, a za višestruko raspršene valove u vremenu i prostoru koristio je difuzno polje energije. Konačan rezultat ovog pristupa dao je hibridno rješenje jednostrukog raspršenja i difuzije:

$$\begin{aligned} E(r,t) \cong E_0 e^{-\eta v t}&\left[\frac{\delta(t - {}^{r}/_{v})}{4\pi v r^2} + \frac{\eta_s H(t - {}^{r}/_{v})}{4\pi r v t}\ln\frac{1 + {}^{r}/_{(vt)}}{1 - {}^{r}/_{(vt)}}\right] \\ &+ cH\left(t - \frac{r}{v}\right)\left(\frac{3\eta_s}{4\pi v t}\right)^{3/2} e^{-\frac{3\eta_s r^2}{4vt} - \eta_i v t}\,, \end{aligned} \tag{2.19}$$

gdje je $c = E_0\,[1 - (1 + \eta_s v t)e^{-\eta_s v t}]/\left(\frac{4}{\sqrt{\pi}}\right)\int_0^{\sqrt{3\eta_s v t}/2} e^{-\alpha^2}\alpha^2 d\alpha$.

Fehler i sur. (1992) su dobiveno hibridno rješenje iskoristili za rekonstrukciju teorijske energije potresa, odnosno aproksimaciju energije višestruko raspršenih valova na udaljenosti r od izvora, u novoj metodi koju su nazivali metodom višestrukih vremenskih prozora (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis,* skraćeno MLTWA).

2.3.4 Usporedba oblika kode modela jednostrukog raspršenja i Zengovog modela višestrukog raspršenja

Iako niti model jednostrukog raspršenja niti Zengov model ne mogu u potpunosti opisati kompleksnu strukturu kore Zemlje, sve dok se ne razviju modeli temeljeni na neuniformnoj distribuciji raspršivača u sredstvu, Zengov model višestrukog raspršenja ostaje najznačajniji u opisu fizikalnih procesa koji opisuju trnjenje kode u vremenu. Wennerberg (1993) u svojem je radu numerički usporedio oblike kode modela jednostrukog raspršenja i Zengovog modela. Fokusirao se na matematički najjednostavniju formulaciju ali dovoljno dobru da naglasi fundamentalne značajke: slučaj kada su izvor i prijemnik kolocirani. To je dovoljno dobra aproksimacija i za veće vremenske odmake od nastanka potresa (engl. *long lapse time*), pri čemu su izvor i prijemnik udaljeni jedan od drugoga.

Prema Wennerbergu(1993), Q-faktor izravnog S-vala Q_D, promatramo kao kombinaciju utjecaja raspršenja i intrinzične atenuacije:

$$\frac{1}{Q_D} = \frac{1}{Q_{sc}} + \frac{1}{Q_i}. \tag{2.20}$$

Koeficijent intriznične atenuacije, eksponencijalni faktor $e^{-\omega t/2Q_i}$, sadržan je u oba modela koja se ovdje promatraju, te ga u daljnoj usporedbi možemo zanemariti.

Amplituda kode u modelu jednostrukog raspršenja, za slučaj kolociranih izvora i prijemnika, može se pisati kao

$$A_{SS}(\tau) \propto \frac{e^{-\tau/2}}{\tau}. \tag{2.21}$$

Zeng (1991, jednadžba 7) u svom modelu višestrukog raspršenja opisuje oblik ovojnice kode s

$$A_{YZ}(\tau) \propto \frac{e^{-\tau/2}}{\tau}\sqrt{1 + \frac{\tau\pi^2}{8} + \frac{\tau^2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^4 e^{\tau x \cot(x)}}{\sin(x)^2} dx}. \tag{2.22}$$

Amplitude oba modela u (2.21) i (2.22) ovisne su o vremenu srednjeg slobodnog puta (engl. *mean free time*), odnosno funkcije su bezdimenzionalnog parametra τ, gdje je $t = \tau/\eta_s v = \tau Q_{sc}/\omega$.

Wennerberg je odnos amplituda opisanih s (2.21) i (2.22) promatrao na prikazu logaritma njihovog omjera $\log\frac{A_{SS}(\tau)}{A_{YZ}(\tau)}$ u ovisnosti o parametru τ. Iz grafa je zaključio da se dobivena krivulja može aproksimirati pravcem, te da se logaritam omjera amplituda može zapisati kao linearna ovisnost o parametru τ: $\log\frac{A_{SS}(\tau)}{A_{YZ}(\tau)} = -\delta\tau + C$, gdje δ predstavlja nagib pravca. Ako omjer amplituda $\frac{A_{SS}(\tau)}{A_{YZ}(\tau)}$ označimo s $e^{-\delta t}$, tada amplituda kode iz Zengovog modela A_{YZ} (2.22) prelazi u

$$A_{YZ} \propto \left(\frac{e^{-\tau/2}}{\tau}\right) e^{\delta t} \tag{2.23}$$

ili kao funkcija u ovisnosti o vremenu t u oblik

$$A_{YZ} \propto \frac{e^{-\frac{\omega t}{2Q_{sc}}(1-2\delta)}}{t}. \tag{2.24}$$

Amplituda kode za model jednostrukog raspršenja u vremenu t je

$$A_{SS} \propto \frac{e^{-\frac{\omega t}{2Q_c}}}{t}. \tag{2.25}$$

Ako se zanemari intrinzična atenuacija, mjerena vrijednost faktora Q_c bila bi povezana s faktorom Q_{sc} u Zengovom modelu kao

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1-2\delta}{Q_{sc}}, \tag{2.26}$$

gdje parametar δ ovisi o vremenu proteklom od nastanka potresa.

Tražeći pravac najbolje prilagodbe na grafu logaritma omjera dviju amplituda u ovisnosti o τ, Wenerberg (1993) je dobio vrijednosti koeficijenta nagiba pravca, odnosno parametra δ. Postupak je napravio za dva različita raspona parametra τ koji odgovaraju slabom i jakom raspršenju:

$$\ln(A_{SS}/A_{YZ}) \approx -0.586\tau + C \qquad \text{za } 0 \leq \tau \leq 2 \text{ i slabo raspršenje} \tag{2.27}$$

$$\ln(A_{SS}/A_{YZ}) \approx -0.532\tau + C \qquad \text{za } 0 \leq \tau \leq 15 \text{ i jako raspršenje} \tag{2.28}$$

Iz jednadžbi (2.27) i (2.28) vidljivo je da se δ smanjuje s 0.586 na 0.532 kako se povećava vrijeme od početka potresa, odnosno (bezdimenzionalno) vrijeme srednjeg slobodnog puta τ (s 2 na 15).

Wennerberg (1993) je zatim promatrao ovisnost omjera Q-faktora Q_c i Q_{sc} o vremenu τ za raspon $0 \leq \tau \leq 15$. Prema jednadžbi (2.26), vidimo da promatrani omjer Q_c/Q_{sc} odgovara recipročnoj vrijednosti izraza $(1 - 2\delta)$. Ovaj graf također je pokazivao linearnu ovisnost u obliku $-a\tau + b$:

$$\frac{Q_c(\tau)}{Q_{sc}} = -(0.738\tau + 4.44), \tag{2.29}$$

Ovaj rezultat omogućio je aproksimativno određivanje parametra $\delta(\tau)$. Uspoređujući jednadžbe (2.26) i (2.29) vidimo da vrijedi:

$$\delta(\tau) = \frac{0.5}{4.44 + 0.738\tau} - 0.5 \tag{2.30}$$

Dosad je intrinzična atenuacija u jednadžbama bila zanemarena. Ako je uključena u modele raspršenja, tada atenuacija opisana jednadžbom (2.20) određuje amplitudu izravnih S-valova, kao i efekte propagacije za raspršenu energiju. Ako pretpostavimo da je Zengov model ispravan, tada je faktor Q_c povezan s Q_i i Q_{sc} relacijom

$$\frac{1}{Q_c(\tau)} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1 - 2\delta(\tau)}{Q_{sc}}. \tag{2.31}$$

Jedan od pristupa koji je Wennerberg predložio za razdvajanje prosječnih vrijednosti intrinzične atenuacije i atenuacija raspršenja jest pomoću jednadžbi (2.20) i (2.31), koje predstavljaju linearni sustav povezan s procjenama Q-faktora izravnih S-valova Q_D i kode Q_C . Zanemarujući potencijalne poteškoće pri mjerenju Q_D i Q_C, atenuacija raspršenja dana je izrazom

$$\frac{1}{Q_{sc}} = \frac{1}{2\delta(\tau)}\left(\frac{1}{Q_D} - \frac{1}{Q_c(\tau)}\right). \tag{2.32}$$

Pozitivna vrijednost faktora Q_s^{-1} implicira da bi vrijednost faktora Q_c^{-1} trebala biti manja od Q_D^{-1}. Intrinzična atenuacija dana je s

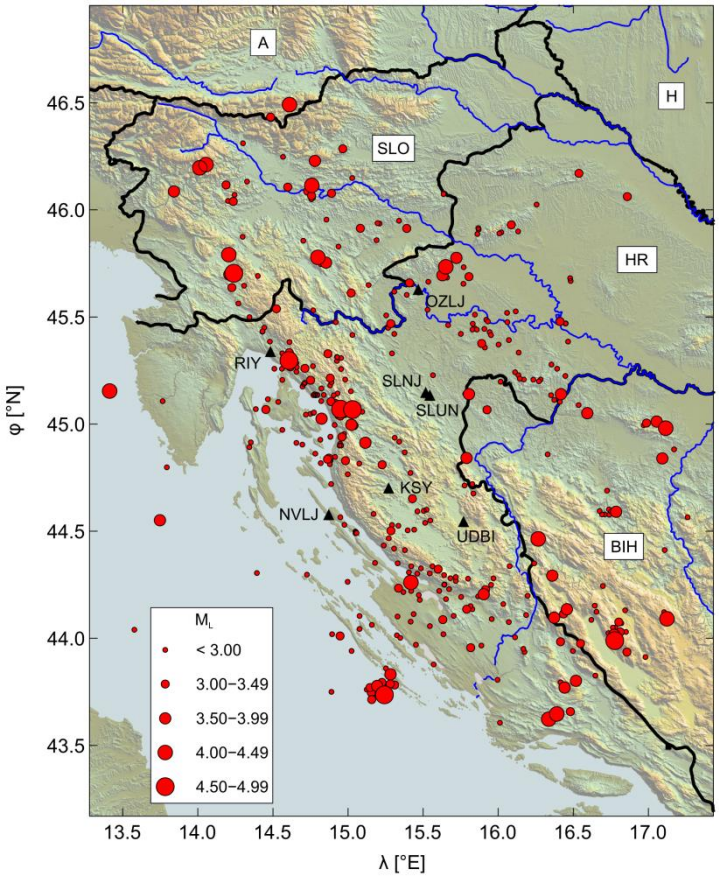
$$\frac{1}{Q_i} = \frac{1}{2\delta(\tau)}\left(\frac{1}{Q_c(\tau)} + \frac{2\delta(\tau) - 1}{Q_D}\right). \tag{2.33}$$

Jednadžbe (2.31), (2.32) i (2.33) omogućuju da, poznavanjem procjena Q-faktora izravnih S-valova Q_D i kode Q_C, odredimo Q-faktore intrinzične atenuacije Q_i i atenuacije raspršenja Q_{sc}.

3. Metoda i analiza podataka

3.1 Podaci

U ovom radu istraživala sam sjeverni dio Vanjskih Dinarida. Za analizu sam koristila seizmograme lokalnih potresa zabilježenih na šest seizmoloških postaja prikazanih na slici 3.1: Ozalj (OZLJ), Rijeka (RIY), Slunj (SLNJ), Kosinj (KSY), Novalja (NVLJ), Udbina (UDBI). Postaja Slunj tijekom svog rada promijenila je lokaciju: postaja SLNJ (radi od 2011. godine) nalazi se 2.6 kilometara sjeverozapadno od prethodne lokacije SLUN (2006.-2011.). U radu je za obje postaje korištena oznaka SLNJ. Instrumenti postavljeni na postajama su širokopojasni trokomponentni seizmografi modela Guralp CMG-40T i CMG-40TD. Analizirala sam potrese lokalnih magnituda M_L većih ili jednakih 2, hipocentralnih udaljenosti između 10 i 120 km i dubina do 30 km (većinom oko 10 km).



Slika 3.1 Karta epicentara potresa (crveni kružići) i seizmoloških postaja (crni trokuti) korištenih u analizi.

Seizmogrami su najprije vizualno pregledani, te su odbačeni nedovoljno kvalitetni zapisi: oni s velikom razinom šuma radi čega se nisu mogle uočiti P- i/ili S-faze te oni koji su sadržavali prethodne ili naknadne potrese i slične smetnje.

Ukupan broj analiziranih potresa je 415, odnosno 717 seizmograma, zabilježenih u razdoblju od siječnja 2003. godine do početka travnja 2015. godine. Potresi su zabilježeni s intervalima uzorkovanja 0.005 s, 0.01 s, 0.02 s i 0.04 s, a analizu sam napravila za do trinaest frekvencijskih pojasa, središnjih frekvencija od 1.5 Hz do 20 Hz. Tablica 3.1 prikazuje popis postaja i njihovih koordinata, instrumenata, frekvencija uzorkovanja, promatrano razdoblje te broj analiziranih seizmograma za sve postaje.

Razlog ograničenju hipocentralnih udaljenosti leži u pretpostavci da je na udaljenostima većima od 120 km prisutan utjecaj površinskih valova, a model MLTWA ne uzima u obzir reflektirane niti površinske valove. Dodatni razlog ograničenju je neefikasnost metode normiranja kodom (korištena kao dio postupka metode MLTWA) kod jako velikog raspona hipocentralnih udaljenosti i dubina žarišta (Abubakirov i sur., 2015, i tamo navedene reference). Slika 3.1 pokazuje kartu epicentara korištenih potresa i seizmoloških postaja u sjevernom području Vanjskih Dinarida.

Tablica 3.1 Postaje s geografskim koordinatama ($\boldsymbol{\varphi}$ i $\boldsymbol{\lambda}$), instrumentima koji su zabilježili potrese, frekvencije uzorkovanja $\boldsymbol{f_S}$, promatrano razdoblje i broj analiziranih potresa pojedine postaje N.

Seizmološka postaja	φ[°N] , λ[°E]	Instrument	f_S [Hz]	Razdoblje	N
Kosinj (KSY)	44.75000, 15.22610	Guralp CMG-40T	25, 50	2006. – 2015.	122
Ozalj (OZLJ)	45.61527, 15.46727	Guralp CMG-40TD	50	2011. – 2015.	88
Udbina (UDBI)	44.52790, 15.76440	Guralp CMG-40T	50	2009. – 2015.	148
Slunj (SLNJ)	45.12073, 15.54445	Guralp CMG-40T	50, 200	2007. – 2015.	139
Novalja (NVLJ)	44.56347, 14.87105	Guralp CMG-40T	50, 200	2006. – 2015.	132
Rijeka (RIY)	45.32510, 14.48280	Guralp CMG-40T	100, 50	2003. – 2015.	88

3.2 Metoda MLTWA

Metoda višestrukih prozora ili metoda MLTWA, najčešće je korištena metoda za procjenu doprinosa raspršenja i intrinzičnih procesa u ukupnoj atenuaciji. U ovom radu omogućila je bolje razumijevanje svojstava atenuacije na sjevernom dijelu Vanjskih Dinarida. Osnovna pretpostavka metode je višestruko izotropno raspršenje s uniformnom raspodjelom raspršivača u poluprostoru. Temelji se na određivanju najbolje prilagodbe između energije izračunate prema rješenju teorije višestrukog izotropnog raspršenja (dalje u tekstu: teorijska energija) i energije izmjerene iz seizmograma potresa (dalje u tekstu: mjerena energija), unutar tri uzastopna vremenska intervala, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti. Omogućuje procjenu dva parametra koji su funkcije intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja: duljinu srednjeg slobodnog puta Le, odnosno njegove recipročne vrijednosti, totalne atenuacije Le^{-1}, te seizmičkog albeda B_0.

Pretpostavlja se da vrijedi (Abubakirov i sur., 2015):

- izvor potresa je impulsnog oblika, koncentriran u točki i karakteriziran sferno-simetričnim rasprostiranjem skalarnih (akustičkih) valova,
- svojstva intrinzične atenuacije i raspršenja u sredstvu su homogena,
- brzina vala je konstantna u prostoru,
- raspršenje je izotropno,
- odsutnost konverzije raspršenih valova (P-valovi u S-valove i obratno),
- raspršeni valovi su nekoherentni, tj. vrijedi svojstvo aditivnosti za intenzitet (srednju kvadratnu amplitudu) raspršenih valova.

3.2.1 Teorijski izračun energije potresa

Za rekonstrukciju teorijske energije potresa kreće se od hibridnog rješenja jednostrukog raspršenja i difuzije, koje je Zeng (1991) razvio u vremenskoj domeni (postupak opisan u poglavlju 2.3.3) za uniformni model Zemlje. Aproksimacija energije višestruko raspršenih valova, na udaljenosti r od izvora, u zadanom proteklom vremenu od nastanka potresa t, pod pretpostavkom izotropnog raspršenja i uniformne distribucije raspršivača u poluprostoru, dana je jednadžbom (2.19):

$$E(r,t) \cong$$
$$E_0 e^{-\eta v t}\left[\frac{\delta(t-{}^{r}/_{v})}{4\pi v r^2}+\frac{\eta_s H(t-{}^{r}/_{v})}{4\pi r v t}\ln\frac{1+{}^{r}/_{(vt)}}{1-{}^{r}/_{(vt)}}\right]+cH\left(t-\frac{r}{v}\right)\left(\frac{3\eta_s}{4\pi v t}\right)^{3/2} e^{-\frac{3\eta_s r^2}{4vt}-\eta_i v t},$$

$$c = E_0\,[1-(1+\eta_s vt)e^{-\eta_s vt}]\Big/\left(\frac{4}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\sqrt{3\eta_s vt}/2} e^{-\alpha^2}\alpha^2 d\alpha\right),$$

gdje je $\alpha = vt/r$, E_0 energija u vremenu $t = 0$, $H\left(t-\frac{r}{v}\right)$ je Heavisideova funkcija, a $\delta\left(t-\frac{r}{v}\right)$ Diracova delta-funkcija. Nazivnik u izrazu varijable c može se zapisati i u sljedećem obliku (Goutbeek i sur., 2004 i tamo navedene reference):

$$\frac{4}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\sqrt{3\eta_s vt}/2} e^{-\alpha^2}\alpha^2 d\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}}P(u,x)\Gamma(u), \tag{3.1}$$

gdje je $P(u,x)$ nepotpuna gama funkcija, $\Gamma(u)$ je gama funkcija, $u = 1.5$, $x = \sqrt{0.5\sqrt{3\eta_s vt}}$. Koeficijenti η_i i η_s konstante su u prostoru te se odnose na intrinzičnu atenuaciju i raspršenje, a s Q-faktorima povezani su izrazom

$$\eta_{s,i} = \frac{2\pi f}{v}Q_{s,i}^{-1} \tag{3.2}$$

Koriste se i u izrazima za duljinu srednjeg slobodnog puta Le, odnosno njegove recipročne vrijednosti, totalne atenuacije Le^{-1}, te seizmičkog albeda B_0:

$$Le^{-1} = \eta_i + \eta_s,\;\; B_0 = \frac{\eta_s}{\eta_i+\eta_s} \quad \Rightarrow \eta_s = B_0 \cdot Le^{-1} \tag{3.3}$$

Seizmički albedo ima raspon vrijednosti između 0 i 1: homogena područja imaju albedo 0, a područja s jakom heterogenosti i niskom intrinzičnom apsorpcijom imaju visoke vrijednosti albeda.

U ovom radu za izračun integrala gustoće teorijske energije u vremenu koristila sam izraze (2.19) i (3.1). Izraz za $E(r,t)$ integriran je u tri uzastopna vremenska prozora duljine 15 s, za sve moguće kombinacije atenuacijskih parametara B_0 i Le^{-1} u rasponima: $0.05 \le B_0 \le 0.999$ i $0.002 \le Le^{-1} \le 0.1$. Vrijeme početka prvog prozora postavljen je na vrijeme nailaska S-vala, te su za rezultat dobivene tri krivulje kao funkcije ovisne o hipocentralnoj udaljenosti:

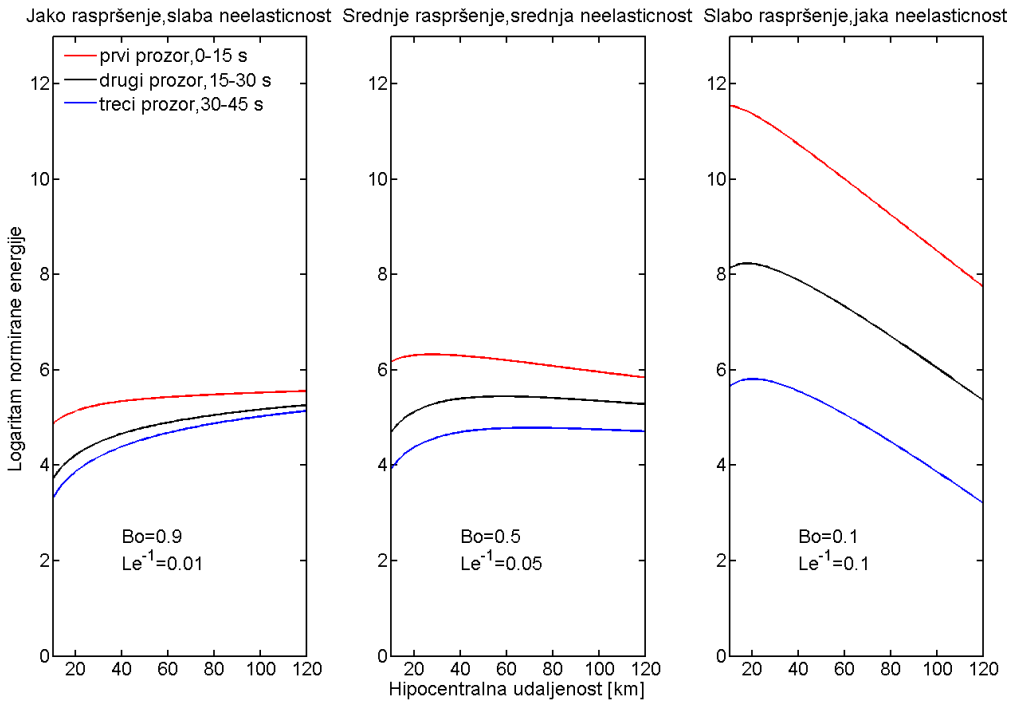
$$\hat{E}_i(r,\eta_i,\eta_s) = \int_{t_i(r)}^{t_{i+1}(r)} E(r,\eta_i,\eta_s,t)dt\,, \qquad i = 1,2,3. \tag{3.4}$$

Krivulje su zatim normirane zbog uklanjanja utjecaja seizmičkih izvora različitih jakosti, lokalne amplifikacije i utjecaja instrumenta. U tu svrhu koristi se metoda normiranja kodom (Aki, 1980), gdje se energije $\hat{E}_i(r,B_0,Le^{-1}), i = 1,2,3,$ dijele s prosječnom energijom kode izračunatom u fiksnom vremenskom intervalu (obično se taj interval nalazi nakon dvostrukog vremena

nailaska S-vala). Množenjem s $4\pi r^2$ uklanja se utjecaj geometrijskog rasprostiranja. Konačno, oblik korigirane teorijske energije je:

$$E_{c_i}(r, B_0, Le^{-1}) = \log\left[\left(\frac{\hat{E}_i(r, B_0, Le^{-1})}{\int_{t_{1c}}^{t_{2c}} E(r, B_0, Le^{-1}, t)dt}\right)4\pi r^2\right], \qquad i = 1, 2, 3. \tag{3.5}$$

Pri računanju energije za tri integrala u izrazu (3.4) koristila sam vremenske prozore duljine 15 s, počevši s nailaskom S-vala: $0 - 15$ s, $15 - 30$ s, $30 - 45$ s, dok sam za primjenu metode normiranja kodom primjenila prozor $50 - 65$ s od vremena nastanka potresa. Primjer dobivenih krivulja za tri različite kombinacije parametara atenuacije B_0 i Le^{-1}, koje odgovaraju jakom, srednjem i slabom raspršenju, prikazan je na slici 3.2. Prozori su određeni tako da najveći doprinos energiji prvog prozora dolazi od izravnih S-valova, dok najveći doprinos energiji druga dva prozora dolazi od raspršenja. Svojstva atenuacije $\left(Q_i^{-1}, Q_{sc}^{-1}\right)$ utječu na distribuciju energije u tri prozora u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti, npr. kad je raspršenje malo, većina energije sadržana je u prvom prozoru.



Slika 3.2 Logaritam normirane energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za tri vremenska integrala. Prikaz tri različita režima atenuacije (jako, srednje i slabo raspršenje) definiranih parametrima seizmičkog albeda B_0 i ukupne atenuacije Le^{-1}.

3.2.2 Energija određena iz seizmograma potresa

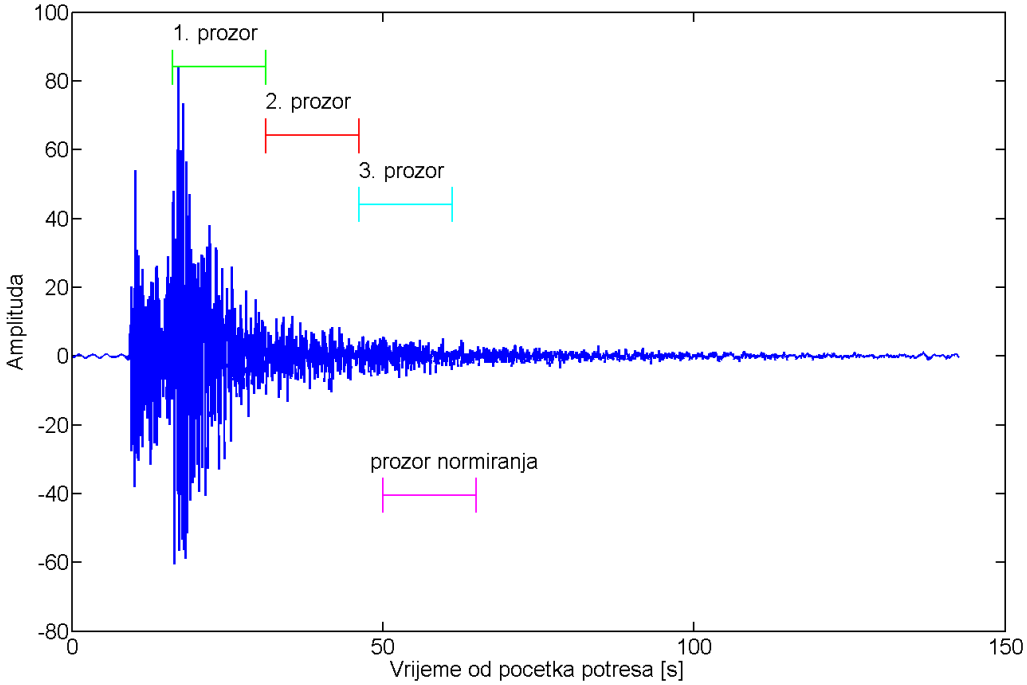
Za određivanje energije seizmograma potresa, odabrani seizmogram brzina najprije je filtriran Butterworthovim pojasno-propusnim filtrom četvrtog reda za do 13 frekvencijskih pojasa središnjih frekvencija f_c: 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 Hz. Broj korištenih frekvencijskih pojasa varirao je ovisno o frekvenciji uzorkovanja pojedinog zapisa, ograničen Nyquisitovom frekvencijom (tablica 3.1). Gornja i donja frekvencija pojasa određene su s $\frac{f_c}{\sqrt{2}}$ i $\sqrt{2}f_c$. Zatim su određene ovojnice seizmograma posebno za sve tri komponente (Z, N, E) metodom RMS (engl. *root mean square*): spektralna amplituda svake komponente dobivena je računanjem korijena srednje kvadratne amplitude filtriranih podataka uz klizni vremenski prozor duljine 1s. Radi dodatne procjene kvalitete podataka, provela sam analizu omjera signala i šuma Z-komponente seizmograma (engl. *signal to noise ratio, SNR*), u ovisnosti o frekvenciji. Omjer signala i šuma morao je zadovoljiti kriterij da je veći ili jednak dva. U tom omjeru, signal je određen kao srednja vrijednosti zapisa spektralne amplitude duljine 15 s počevši od proteklog vremena $t = 50$ s , a nemir kao srednja vrijednost zapisa spektralne amplitude duljine 5 s, koji prethodi P-fazi vala. Osim zbog razlika u uzorkovanju, broj korištenih seizmograma varira po frekvencijama i zbog razlika u zadovoljavanju kriterija $SNR \geq 2$. Ukupni broj seizmograma korištenih u daljnoj analizi, po postajama i frekvencijama, prikazan je u tablici 3.2.

Tablica 3.2 Broj analiziranih seizmograma, po frekvencijama, nakon ograničenja zbog Nyquisitove frekvencije te nedovoljnog omjera signala i nemira.

	f [Hz]												
	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
KSY	90	111	114	112	113	115	107	48	43	35	26	0	0
OZLJ	79	85	85	84	82	78	75	62	52	36	28	0	0
UDBI	124	140	144	145	144	137	122	109	90	77	65	0	0
SLNJ	115	128	135	138	135	135	130	123	120	114	104	8	4
NVLJ	73	107	123	128	129	129	124	123	120	112	105	18	17
RIY	68	77	77	76	69	68	61	58	53	48	43	16	13

Ovojnice seizmograma tri komponente (Z, N, E) zatim su usrednjene. Analiza svakog seizmograma nastavljena je definiranjem tri uzastopna prozora (slika 3.3). Duljina svakog prozora postavljena je na 15 s, počevši od nailaska S-faze vala, analogno prozorima korištenima za izračun teorijske enegije. Energija svakog prozora zatim se računa integracijom usrednjene ovojnice u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti i frekvenciji. Kao i kod računa teorijske energije, potrebno je ukloniti utjecaje različitih izvora i lokalne amplifikacije, što se postiže primjenom metode normiranja kodom (Aki, 1980): energije svakog prozora dijele se energijom

prozora normiranja, definiranim za proteklo vrijeme 50 – 65 s od nastanka potresa (slika 3.3). Na normirane energije zatim je primjenjena korekcija za geometrijsko rasprostiranje sfernih valova množenjem s $4\pi r^2$. Analogno izrazu za teorijsku energiju (3.5), izmjerene energije zatim su logaritmirane, čime su dobivene njihove konačne vrijednosti.



Slika 3.3 Seizmogram potresa zabilježen na postaji KSY, 21. lipnja 2009. godine u 10:54:37, $M_L = 4.1$. Prikazana je Z-komponenta, s označenim vremenskim prozorima integracije: 0 – 15 s, 15 – 30 s, 30 – 45 s od nailaska S-vala te prozorom normiranja 50 – 65 s od vremena nastanka potresa.

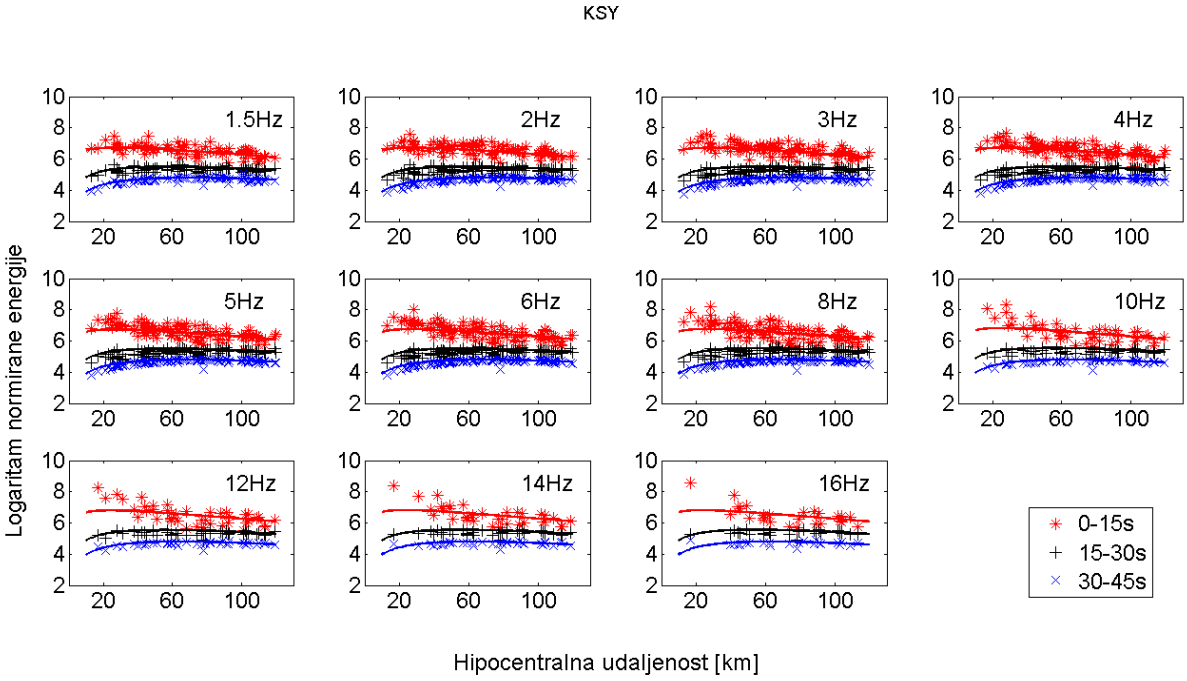
3.2.3. Procjena parametara B_0 i Le^{-1}

Energije određene iz seizmograma zatim se uspoređuju s energijama izračunatim sukladno teoriji, kako bi se odredila najbolja prilagodba teorijske energije mjerenoj. Parametri modela B_0 i Le^{-1}, koji odgovaraju najboljoj prilagodbi (u smislu najmanjih kvadrata) dobiju se traženjem minimuma tzv. *misfit* funkcije M (Bianco i sur., 2002):

$$M(B_0, Le^{-1}) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{3} \left(E_{c_k}(r_i) - E_{m_k}(r_i) \right)^2, \tag{3.6}$$

gdje je N broj korištenih seizmograma, dok k predstavlja indeks prozora energije. E_{m_k} su energije određene iz seizmograma, a E_{c_k} teorijske energije. Minimum funkcije M tražen je na skupu parametara dimenzije 950×99, za paramete B_0 i Le^{-1} u rasponima $0.05 \leq B_0 \leq 0.999$ i $0.002 \leq Le^{-1} \leq 0.1$. Krivulje teorijskih energija koje predstavljaju najbolju prilagodbu

mjerenim energijama seizmograma zabilježenih na postaji KSY, izračunate za par $(\widehat{B_0}, \widehat{Le}^{-1})$ koji odgovara minimumu funkcije M, prikazane su na slici 3.4 zajedno s mjerenim energijama, za frekvencijske pojase $f_c = 1.5, \ldots, 20$ Hz. Slike prilagodbi na izmjerene energije seizmograma ostalih postaja nalaze se u Prilogu A.



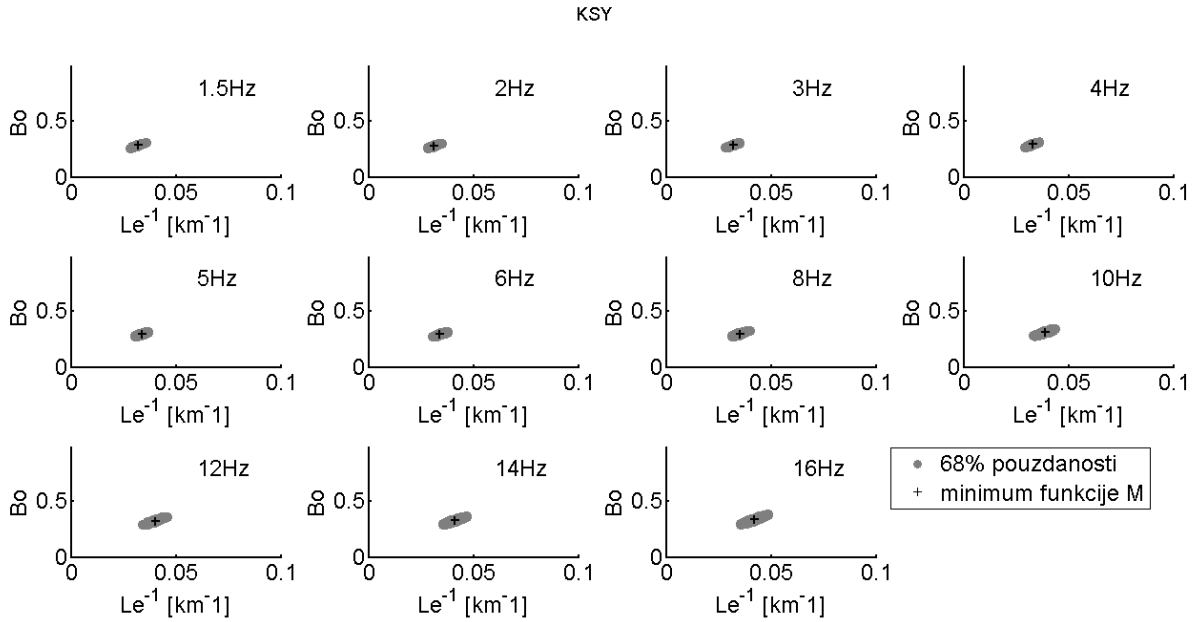
Slika 3.4 Izmjerene energije seizmograma postaje KSY u tri vremenska prozora: 0 – 15 s(∗), 15 – 30 s (+), 30 – 45 s (×), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima , u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.

Može se uočiti da u prvom vremenskom prozoru (0 – 15 s) imamo nešto manje pravilnu distribuciju izmjerene energije, odnosno veliko raspršenje podataka, što se smanjuje u drugom i trećem prozoru. Taj efekt uočen je i u brojnim drugim istraživanjima na raznim područjima, što se obično pripisuje razlikama u prostornoj razdiobi intenziteta zračenja (engl. *radiation pattern*) pojedinih potresa. Primjena metode normiranja kodom uklanja samo utjecaje razlika jakosti izvora, ne i razlike u razdiobi intenziteta zračenja (Sahin i sur., 2007 i tamo navedene reference), što posebno velik utjecaj ima na izravne S-valove sadržane u prvom prozoru. Na energiju izravnih S-valova, sadržanu u prvom prozoru, bitno jače utječu navedene razlike. Kasniji nailasci koda valova, čija je energija sadržana u drugom i trećem prozoru, sadrže utjecaj većeg volumena sredstva i raspršenja na velikom broju raspršivača, čime se poništava utjecaj razdiobe intenziteta zračenja, odnosno mehanizma potresa.

Procjena intervala pogreški parametara $\widehat{B_0}$ i $\widehat{Le}^{-1}$ odgovara području 68% pouzdanosti F-distribucije. Računa se pomoću izraza (Meirova i sur., 2014):

$$\frac{\left(M(B_0,Le^{-1})-M(\widehat{B_0},\widehat{Le}^{-1})\right)/2}{M(\widehat{B_0},\widehat{Le}^{-1})/(N-2)} \leq F_{0.68,2,N-2}\,, \tag{3.7}$$

gdje $F_{0.68,2,N-2}$ predstavlja Fisherovu distribuciju (tzv. F-distribucija) sa 68% kvantilom koji odgovara traženom nivou pouzdanosti, dok je N broj korištenih seizmograma. Na slici 3.5 prikazani su svi parovi $(\widehat{B_0}, \widehat{Le}^{-1})$ koji odgovaraju najboljoj prilagodbi (crni križić), zajedno sa svim parovima (B_0, Le^{-1}) unutar područja 68% pouzdanosti (sivo područje) za sve frekvencije za postaju KSY. Procjene intervala sa 68% pouzdanosti parova $(\widehat{B_0}, \widehat{Le}^{-1})$ ostalih postaja prikazane su na slikama u Prilogu A. Vrijednosti standardnih devijacija $\widehat{\sigma B_0}$ i $\widehat{\sigma Le}^{-1}$, procjenjene su iz rubnih točaka 68%-tnog područja pouzdanosti (navedene u tablicama u Prilogu A).



Slika 3.5 Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje). Rezultati za postaju KSY.

3.2.4 Izračun faktora atenuacije Q^{-1}

Prethodni koraci metode MLTWA omogućili su procjenu vrijednosti parova koeficijenata seizmičkog albeda B_0 i ukupne atenuacije Le^{-1} koji odgovaraju minimumu funkcije M prema jednadžbi (4.6). Dobiveni parovi (za svaki od 13 frekvencijskih pojasa) koriste se za određivanje Q-faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} te atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}. Faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t^{-1} predstavlja zbroj dobivenih Q_i^{-1} te Q_{sc}^{-1}. Vrijednosti su dobivene iz jednadžbi preuzetih iz rada Abdelwahed i sur. (2015):

$$Q_{sc}^{-1} = (B_0 \cdot Le^{-1}) \cdot \frac{v}{2\pi f_c}, \tag{3.8}$$

$$Q_i^{-1} = Le^{-1} \cdot (1 - B_0) \cdot \frac{v}{2\pi f_c}, \tag{3.9}$$

$$Q_t^{-1} = Q_i^{-1} + Q_{sc}^{-1}, \tag{3.10}$$

gdje je v brzina S-valova, $v = 3.5\ km/s$, a f_c je središnja frekvencija pojedinog pojasa. Teorija također predviđa i očekivane vrijednosti Q-faktora kode, $Q_{c\ expected}$, korištenjem relacije (Mayeda i sur., 1992) :

$$Q_{c\ expected}^{-1} = Q_{sc}^{-1}\left(1 - \frac{B_2 + 2B_3\eta_s vt + 3B_4(\eta_s vt)^2 + \cdots}{1 + B_2\eta_s vt + B_3(\eta_s vt)^2 + \cdots}\right) + Q_i^{-1}, \tag{3.11}$$

pri čemu je t vrijeme proteklo od nastanka potresa ($t = 50$ s u ovom radu), a B_n koeficijenti n– tog reda preuzeti iz rada Hoshibe i sur. (1991).

3.3 Wennerbergova metoda

Uspoređujući oblike kode Zengovog modela i modela jednostavnog raspršenja, Wennerberg (1993) je pokazao da je moguće izraziti vrijednosti mjerenog Q-fakora kode (Q_c) preko intrinzičnog Q_i-faktora i Q_{sc}-faktora raspršenja u obliku (2.30):

$$\frac{1}{Q_c(\tau)} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1 - 2\delta(\tau)}{Q_{sc}},$$

pri čemu su $\delta(\tau)$ i τ dani s (Tselentis, 1998)

$$\delta(\tau) = \frac{0.72}{4.44 + 0.738\tau} - 0.5\,, \tag{3.12}$$

$$\tau = \frac{\omega t}{Q_{sc}}, \tag{3.13}$$

gdje su ω i t kutna frekvencija i proteklo vrijeme.

Pretpostavimo da je Q_D Q-faktor izravnih S-valova (pri čemu volumen u kojem se oni rasprostiru odgovara volumenu rasprostiranja promatranih koda valova) te da opisuje totalnu atenuaciju. Tada vrijedi izraz (2.20)

$$\frac{1}{Q_D} = \frac{1}{Q_{sc}} + \frac{1}{Q_i}$$

Faktori Q_i i Q_{sc} tada se mogu opisati izrazima (2.31) i (2.32):

$$\frac{1}{Q_{sc}} = \frac{1}{2\delta(\tau)}\left(\frac{1}{Q_D} - \frac{1}{Q_c(\tau)}\right),$$
$$\frac{1}{Q_i} = \frac{1}{2\delta(\tau)}\left(\frac{1}{Q_c(\tau)} + \frac{2\delta(\tau) - 1}{Q_D}\right).$$

Uzimajući u obzir jednadžbe (2.30), (3.12) i (3.13), Q_{sc}-faktor predstavlja pozitivan korijen kvadratne jednadžbe

$$4.44\left(\frac{1}{Q_D} - \frac{1}{Q_c}\right)Q_{sc}^2 + \left[0.738\left(\frac{1}{Q_D} - \frac{1}{Q_c}\right)\omega t - 5.88\right]Q_{sc} - 0.738\omega t = 0 \qquad (3.14)$$

Dobiveni izrazi pokazuju je da mjerenjem Q_c fakora kao funkcije proteklog vremena t moguće procijeniti Q_i- i Q_{sc}-faktore kao funkcije proteklog vremena za različite frekvencije.

Rješavanjem kvadratne jednadžbe (3.14) dobivene su vrijednosti Q_{sc}-faktora ovisne o frekvenciji. Do vrijednosti Q_i-faktora dolazi se korištenjem izraza (2.32). $\delta(\tau)$ i τ izračunati su iz (3.12) i (3.13), a Q-faktori izravnih S-valova Q_D i Q_c-faktor (tablice u prilogu B) preuzeti su iz Dasović (2015) u obliku $Q = Q_0 f^n$. Faktor Q_c dobiven je koda-Q metodom jednostrukog raspršenja unazad (Aki i Chouet, 1975), dok je Q_D dobiven primjenom metode normiranja kodom (Aki, 1980). Svi navedeni Q-faktori ovisni su o proteklom vremenu t_L (engl. *lapse time*), a u ovom radu, radi mogućnosti usporedbe s rezultatima metode MLTWA, odnosno promatranja raspršenih valova u jednakom volumenu, promatram ih za $t_L = 50$ s.

Iako za izračun Q_c- i Q_D- faktora nije korišten u potpunosti isti skup podataka (seizmograma) kao u ovom radu te postoje i neke druge manje razlike (npr. malo veća pretpostavljena brzina S-vala te male razlike u određivanju raspona frekvencijskih pojasa), metode su provedene na dovoljno velikom broju podataka te rezultate možemo smatrati statistički pouzdanima i relevantnima.

Faktori intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja izračunati su za niz središnjih frekvencija od 1.5 do 20 Hz, isti kao kod MLTWA metode.

Valja imati na umu da bi, prema izrazu (2.32), za dobivanje pozitivnih vrijednosti Q_{sc}^{-1} faktora vrijednost Q_D^{-1} trebale biti veće od Q_c^{-1} (Wennerberg, 1993), te da je pretpostavka metode također kolociranost izvora i prijemnika.

4. Rezultati i diskusija

4.1 Metoda MLTWA

Metoda MLTWA temelji se na usporedbi integrala energije duž kode S-vala lokalnih potresa, izračunatih u tri odvojena uzastopna prozora u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti, s teorijskom energijom čije se vrijednosti temelje na teoriji prijenosa zračenjem. Metoda je primijenjena na zapise lokalnih potresa sa žarištem u gornjoj kori, hipocentralnih udaljenosti $10 \leq \Delta \leq 120$ km, lokalne magnitude $M_L \geq 2$, za do trinaest frekvencijskih pojasa središnjih frekvencija u rasponu od 1.5 Hz do 20 Hz, zabilježenih na seizmološkim postajama na području sjevernih Vanjskih Dinarida.

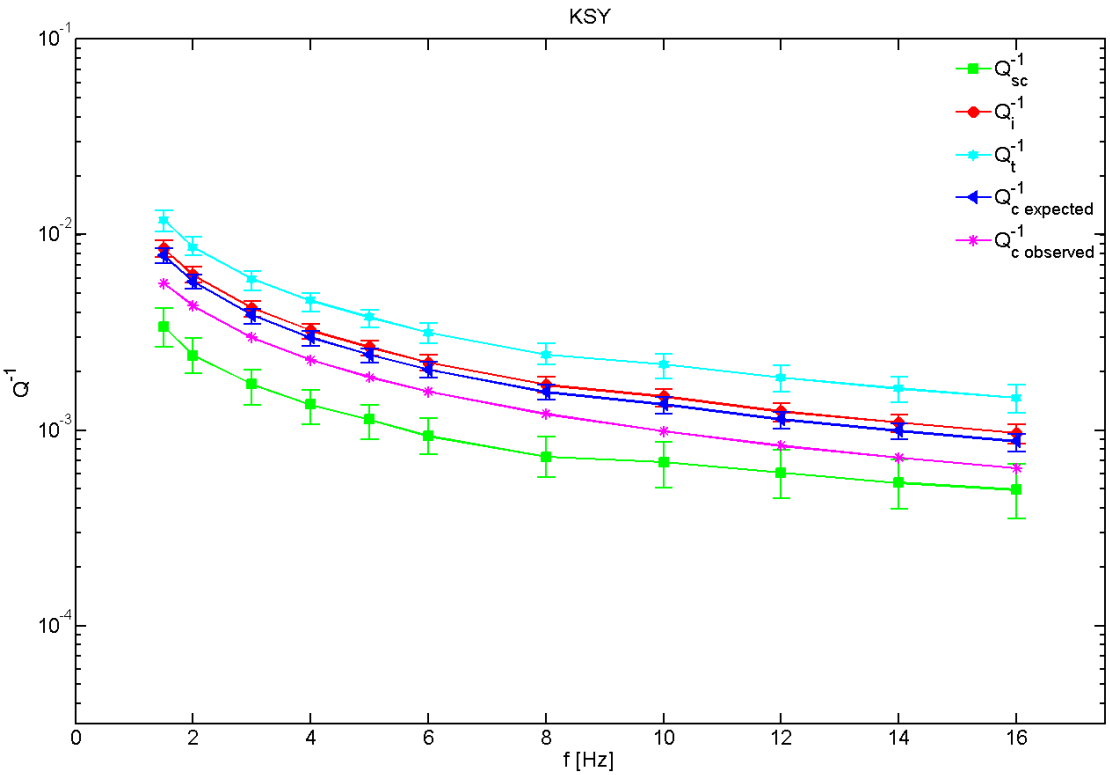
Procjene Q-faktora dobivene primjenom metode MLTWA objasnit ću na primjeru rezultata i slika postaje KSY. Slike i tablice s rezultatima ostalih postaja nalaze u Prilogu A.

Osim parova parametara Le^{-1} i B_0 koji najbolje opisuju razdiobu izmjerene energije, također su dobivene i vrijednosti koje se nalaze u 68%-tnom području pouzdanosti F-distribucije, na način opisan u poglavlju 3.2.3. Raspon mogućih rješenja Q_i^{-1}i Q_{sc}^{-1} faktora, izračunatih za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti, predstavljaju pogrešku unutar jedne standardne devijacije.

4.1.1 Rezultati pojedinih postaja

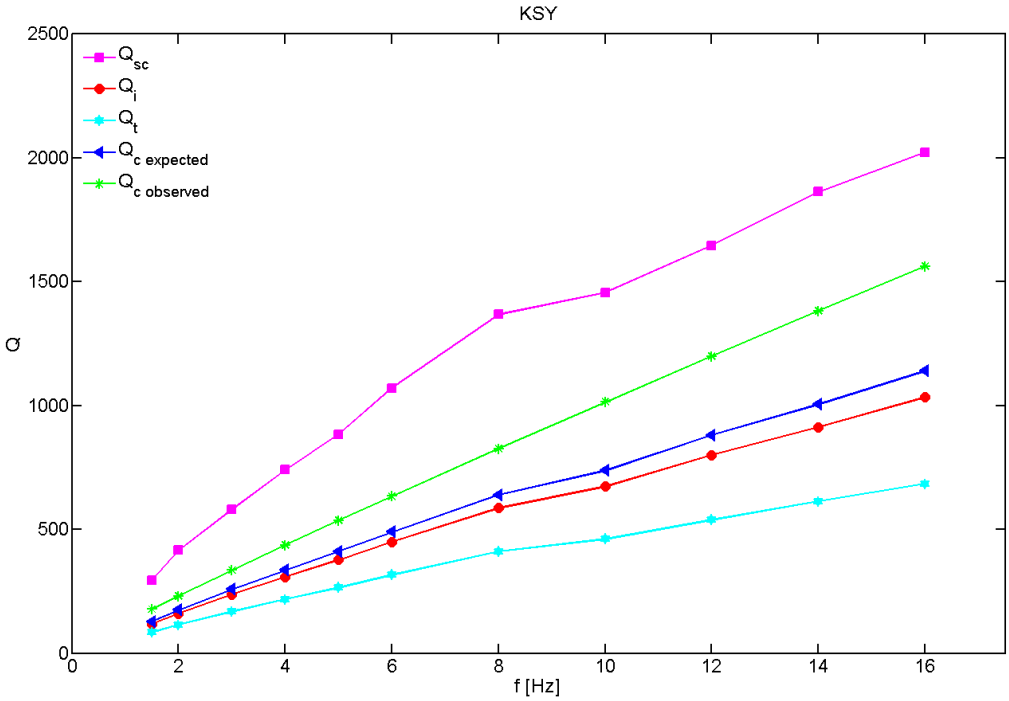
Na slici 4.1 uspoređene su dobivene vrijednosti svih izračunatih Q^{-1}-faktora i njihove standardne devijacije u ovisnosti o frekvenciji za postaju KSY: faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1} te očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$.

Lako je uočiti da su vrijednosti Q_i^{-1} veće od vrijednosti Q_{sc}^{-1}, za sve frekvencije. To znači da je atenuacija zbog unutarnjeg trenja puno veća od atenuacije uzrokovane raspršenjem. Vrijednosti svih Q^{-1}-faktora dobivenih MLTWA metodom ovisne su o frekvenciji, te pokazuju približno jednaki trend opadanja kako frekvencija raste. Ovisnost o frekvenciji je očekivana, s obzirom na prethodno spomenuta istraživanja atenuacije na području Dinarida. Q_i^{-1} faktori u pravilu monotono opadaju s frekvencijom s malenim fluktuacijama. Mogući uzrok su fluktuacije elastičkih svojstava sredstva s povećanjem dubine (Hoshiba, 1993). Teorija prijenosa energije predviđa vrijednosti Q_c^{-1}-faktora vrlo bliske intrinzičnoj atenuaciji (Pisconti i sur., 2015, Sato i sur., 2012), kao što se i vidi na slici usporedbom $Q_{c\,expected}^{-1}$ te Q_i^{-1}. Rezultati su uspoređeni s mjerenim faktorom $Q_{c\,observed}^{-1}$, dobivenim koda– Q metodom (Dasović, 2015).



Slika 4.1 Rezultati za postaju KSY. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom: atenuacija raspršenja Q_{sc}^{-1} , intrinzična Q_i^{-1} i ukupna Q_t^{-1} atenuacija, očekivani koda Q^{-1} faktor $Q_{c\ expected}^{-1}$ te mjereni $Q_{c\ observed}^{-1}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.

Za lakše uočavanje kvantitativnih razlika, umjesto atenuacije, odnosno Q^{-1}-faktora, na slici 4.2 prikazani su Q-faktori na primjeru postaje KSY (slika 4.2). Radi jednostavnosti, uz Q-faktore izostavljam prikaz stupaca pogreški. Općenito, za sve postaje (slike u Prilogu A) vrijednosti $Q_{c\ observed}$ bliže su vrijednostima $Q_{c\ expected}$ te Q_i nego faktorima Q_{sc}.



Slika 4.2 Q–faktori dobiveni MLTWA metodom: faktor dobrote raspršenja Q_{sc}, intrinzični Q_i i inverz ukupne atenuacije Q_t, očekivani Q_c-faktor $Q_{c\ expected}$ te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Rezultati za postaju KSY.

Atenuacija raspršenja može se interpretirati i promatrajući odnos valne duljine i veličine heterogenosti. Na primjer, transverzalni S-val (brzine 3.5 km/s u kori) frekvencije 1.5 Hz imat će valnu duljinu oko 2.3 km, a frekvencija 20 Hz odgovarat će valnoj duljini 175 m. U ovom radu promatram režim raspršenja gdje su a (red veličine nehomogenosti) i λ (valna dulijna) usporedive (Mievo raspršenje).

Sve dobivene vrijednosti opisane ovdje za postaju KSY navedene su u tablici u Prilogu A. Procjene vrijednosti seizmičkog albeda B_0 za KSY pokazuju lagani porast od 0.286 za $f = 1.5$ Hz, do 0.338 za $f = 20$ Hz. Za sve frekvencije vrijednosti su znatno manje od 0.5, što implicira dominaciju intrinzične atenuacije u odnosu na raspršenje. Sredstvo nema vrlo visok stupanj heterogenosti, kao npr. područja u blizini vulkana, gdje atenuacija raspršenja nadjačava intrinzičnu atenuaciju (de Lorenzo i sur., 2013). Vrijednosti totalne atenuacije Le^{-1} također pokazuju lagani porast s frekvencijom, od 0.032 km^{-1} do 0.042 km^{-1}, što odgovara srednjem slobodnom putu vala od 31.25 km za $f = 1.5$ Hz i 23.81 km za $f = 20$ Hz. Za ostale postaje analizirane u ovom radu kvalitativni opis rezultata MLTWA metode vrlo je sličan kao za postaju KSY, a dobivene vrijednosti nalaze se u tablicama u Prilogu A. Odstupanja od navedenog vide se za frekvencije $f = 18$ Hz i $f = 20$ Hz, na rezultatima postaja RIY i SLNJ, gdje vidimo nagli skok, odnosno pad vrijednosti svih Q–faktora izračunatih metodom MLTWA. Ova odstupanja ukazuju

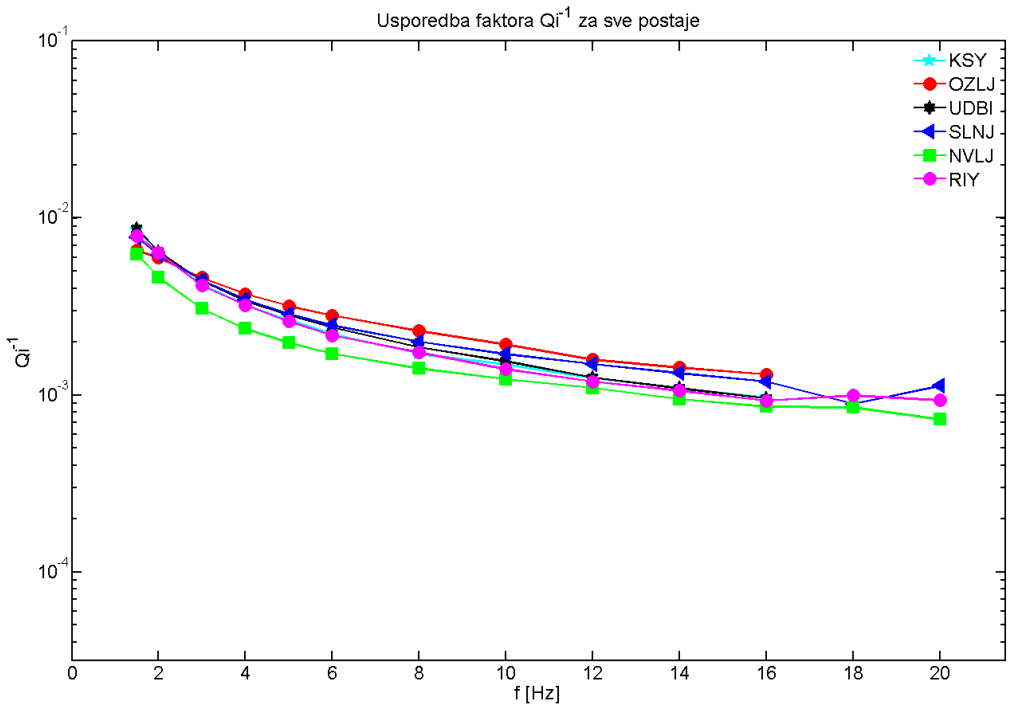
na moguće postojanje prostorne anomalije. S obzirom na puno manji broj dostupnih potresa za analizu (zbog frekvencije uzorkovanja), te zbog relativnog povećanja razine nemira u odnosu na seizmičke valove s frekvencijom (tablica 4.1), navedena odstupanja kod procjena Q-faktora na frekvencijama $f = 18$ Hz i $f = 20$ Hz potrebno je razmatrati s oprezom.

Shang i Gao (1988) pokazali su da je za nasumično raspoređene heterogenosti i uniformnu intrinzičnu atenuaciju Q_c-faktor identičan Q-faktoru intrinzične atenuacije. Razlike su uočene za slučaj ovisnosti faktora atenuacije i raspršenja o dubini (Zeng, 1991; Mayeda i sur., 1992). Za bolje razumijevanje razdiobe Q-faktora unutar sredstva te njihovo fizikalno značenje, potrebno je u modele uključiti efekte neizotropnog raspršenja.

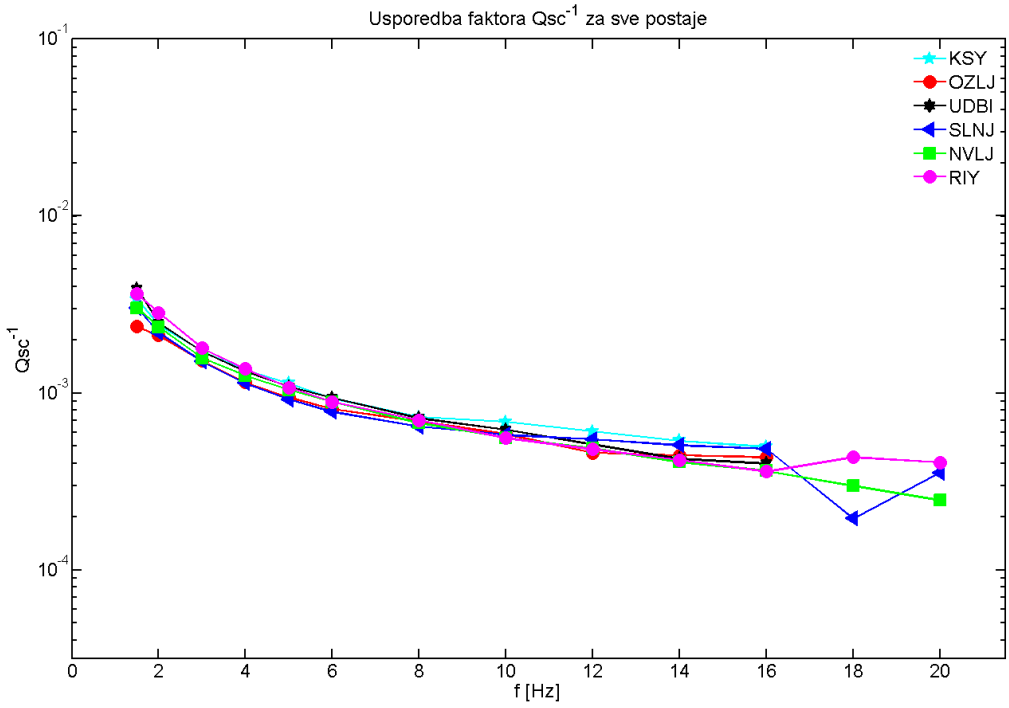
Kvantitativna procjena atenuacijskih parametara također jako ovisi o pretpostavljenoj raspodjeli brzina u sredstvu. Atenuacijski koeficijenti u uniformnom modelu veći su nego za višeslojni model (Bianco i sur., 2005; Del Pezzo i Bianco, 2010). Prema Mayeda i sur. (1992) u sredstvu s jakim raspršenjem, koeficijenti raspršenja dobiveni pod pretpostavkom izotropnog raspršenja bit će precijenjeni.

4.1.2 Usporedba rezultata svih postaja

Usporedbe procijenjenih Q_i^{-1} i Q_{sc}^{-1} svih postaja korištenih u analizi prikazane su na slikama 4.3 i 4.4., no radi lakšeg uočavanja razlika među dobivenim vrijednostima pojedinih postaja, rezultate ću objasniti pomoću prikaza Q-faktora (slike 4.5 i 4.6) .

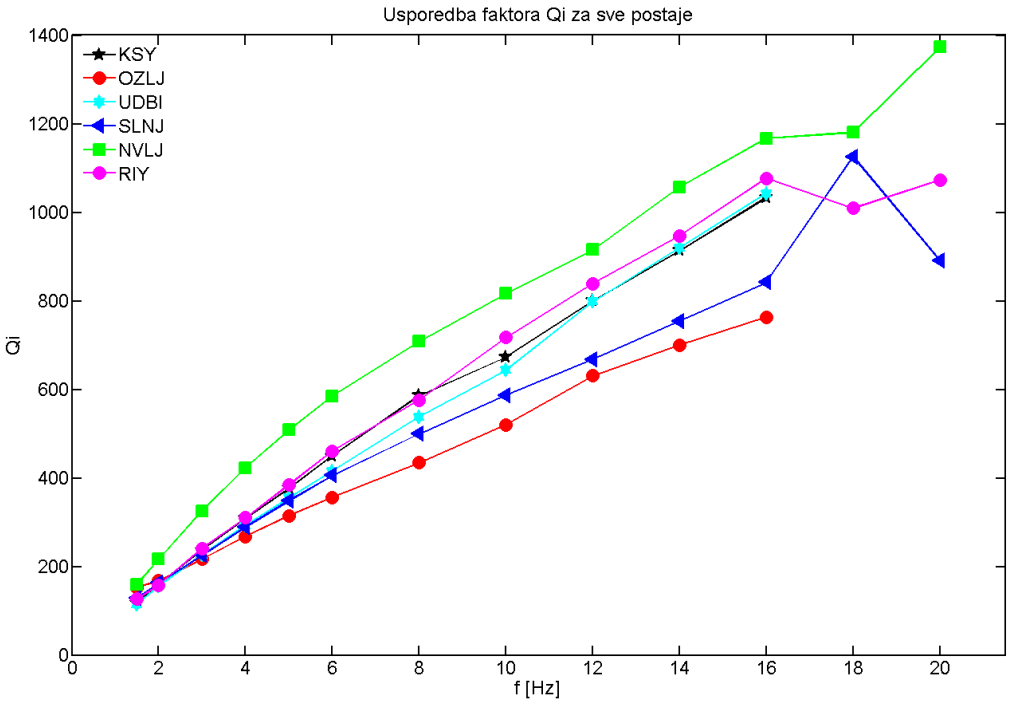


Slika 4.3 Usporedba faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} za sve analizirane postaje



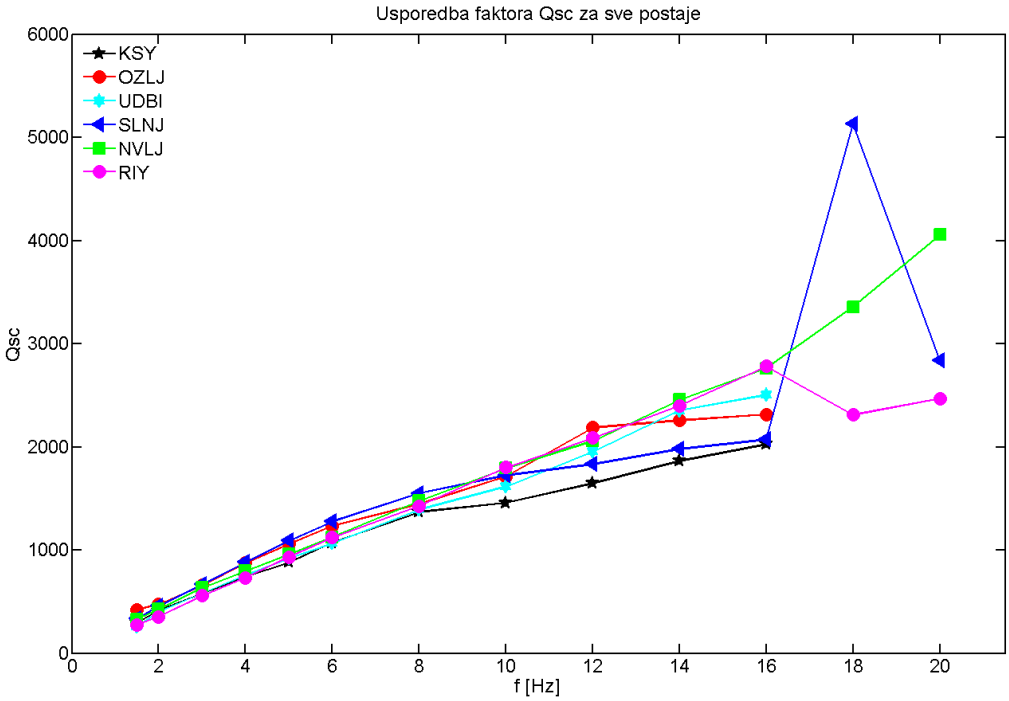
Slika 4.4 Usporedba faktora atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} za sve analizirane postaje

Promotrimo najprije intrinzičnu atenuaciju, odnosno Q_i– faktor (slika 4.5). Na nižim frekvencijama vrijednosti su gotovo jednake za sve postaje, jedino se NVLJ ističe s nešto većim vrijednostima. Razlike se uočavaju porastom frekvencije: od najmanjih vrijednosti za postaju OZLJ, prema većima – slijedi SLNJ, zatim UDBI i KSY koji imaju vrlo slične rezultate, pa RIY i konačno NVLJ s najvećim vrijedostima. Rezultat (slika 4.5) je vrlo zanimljiv, uzevši u obzir geografski raspored postaja, prikazan na karti na slici 3.1. Faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1} je najveći (odnosno Q_i-faktor najmanji) na sjevernom dijelu promatranog područja, koji se nalazi više u unutrašnjosti, dok opada prema juguzapadu i prema obali. Iz skupine se posebno izdvaja NVLJ, postaja koja se nalazi na rubnom dijelu Vanjskih Dinarida prema slabije deformiranom dijelu Jadranske mikroploče.



Slika 4.5 Usporedba Q_i- faktora za postaje analizirane u ovom radu.

Nešto manje razlike po postajama uočavaju se za dobivene vrijednosti faktora atenuacije raspršenja, odnosno Q_{sc}-faktora (slika 4.6). Ipak, za f između 8 Hz i 16 Hz može se uočiti sličnost s uočenim kod vrijednosti Q_i-faktora: niže vrijednosti imaju KSY, SLNJ i OZLJ (veća atenuacija), dok se više vrijednosti uočavaju za postaje RIY, UDBI i NVLJ (manja atenuacija).

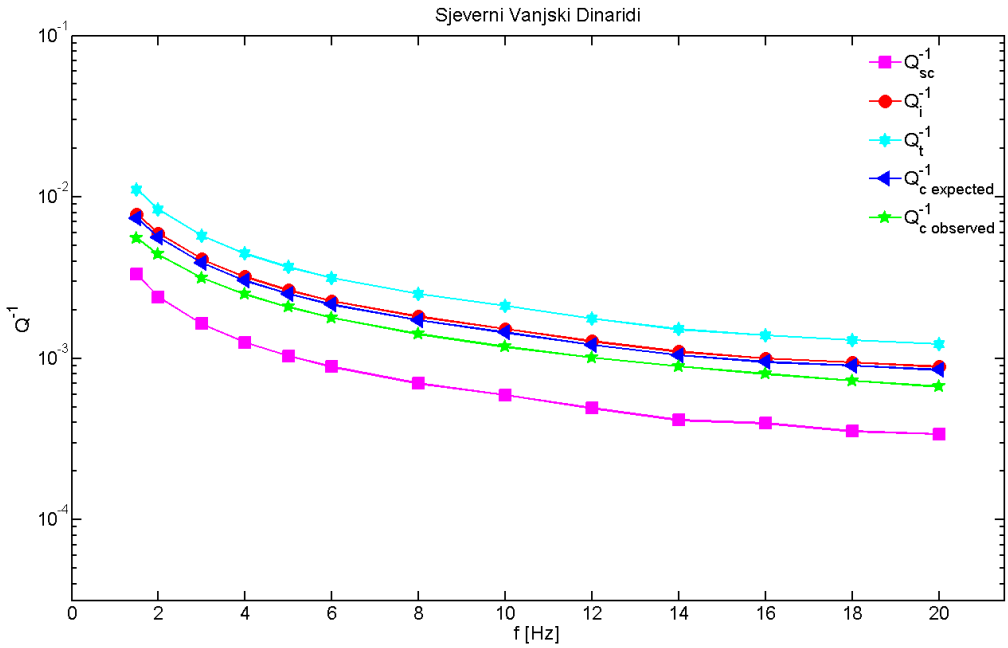


Slika 4.6 Usporedba Q_{sc}- faktora za sve analizirane postaje

4.1.3 Sjeverni dio Vanjskih Dinarida kao cjelina

Metoda MLTWA primjenjena je i na cijeli skup seizmograma, promatrajući ih kao jedinstvenu cjelinu. Na taj način dobivene su vrijednosti Q_i^{-1} i Q_{sc}^{-1} za područje sjevernih Vanjskih Dinarida. Na slici 4.7 prikazani su izračunati faktori atenuacije.

Dobiveni Q^{-1}-faktori primjenom MLTWA metode uspoređeni su s koda-Q faktorom $Q_{c\,observed}^{-1}$, čije su vrijednosti dobivene usrednjavanjem $Q_{c\,observed}^{-1}$ preuzetih iz Dasović (2015) za postaje analizirane u ovom radu. Međusobni odnos svih faktora vrlo je sličan onom kod pojedinačno promatranih postaja – intrinzična atenuacija je puno jača od atenuacije raspršenja. Seizmički albedo nalazi se u rasponu 0.299 (1.5 Hz) do 0.277 (20 Hz), a ukupna atenuacija ima vrijednosti između 0.03 km^{-1} (1.5 Hz) i 0.44 (20 Hz) km^{-1}.



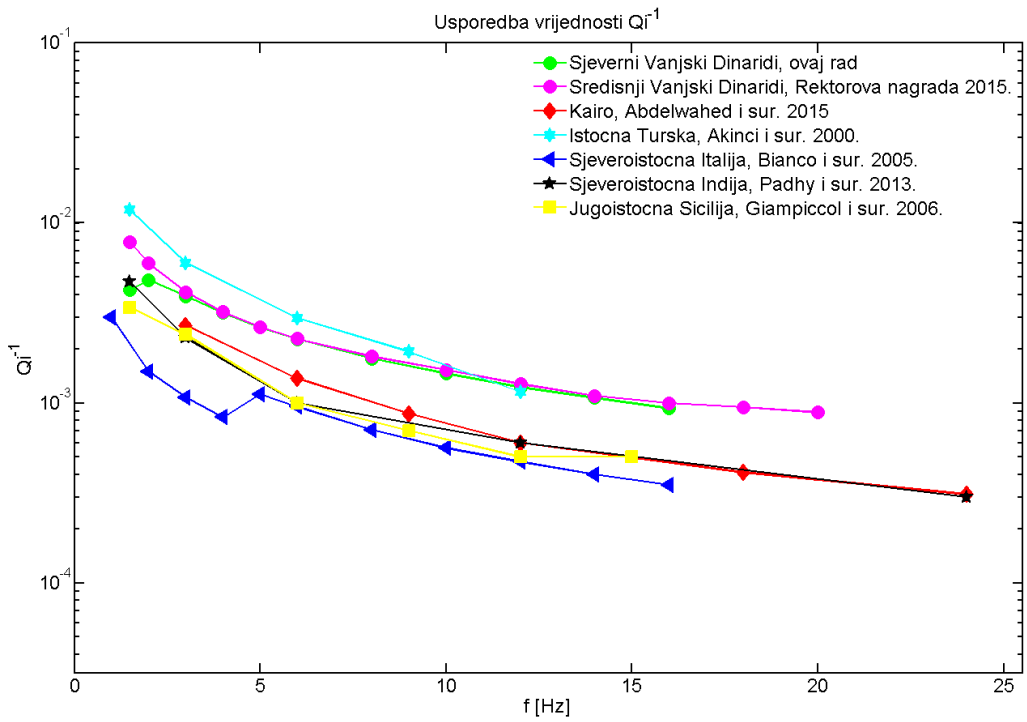
Slika 4.7 $\boldsymbol{Q^{-1}}$–faktori dobiveni MLTWA metodom: faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} , intrinzične Q_i^{-1} i ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$ te mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ preuzet iz Dasović (2015).

4.1.4 Usporedba s drugim regijama u svijetu

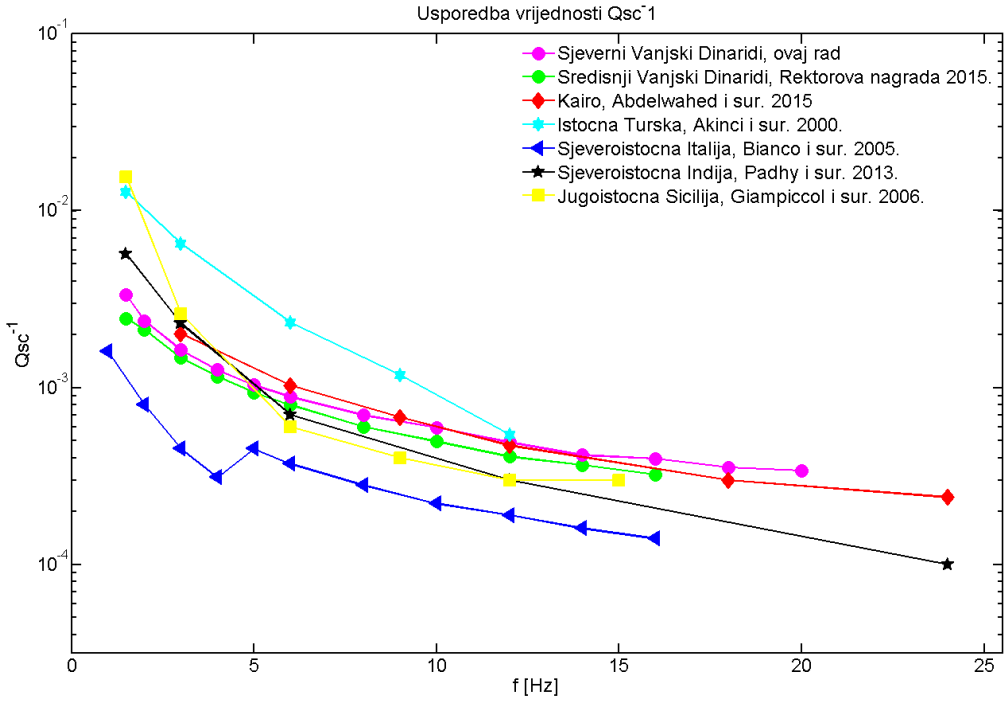
Faktori intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja uspoređeni su s rezultatima drugih područja u svijetu, te s rezultatima rada Belinić i sur. (2015), u kojem je MLTWA metoda primjenjena na središnji dio Vanjskih Dinarida – područje koje se nastavlja na sjeverni dio Vanjskih Dinarida idući prema jugoistoku.

Q_i-faktor (slika 4.8) na području sjevernih Vanjskih Dinarida među najvećima je, uspoređujući s rezultatima drugih razmotrenih regija. Usporedba s rezultatima središnjeg dijela Vanjskih Dinarida ukazuje da je Q_i^{-1} približno jednak na oba dijela, s malo većim vrijednostima na sjevernom dijelu – što se slaže s prethodno dobivenim zaključkom da atenuacija u promatranoj regiji opada prema jugu.

Vrijednosti Q_{sc}^{-1}-faktora (slika 4.9) prosječne su u odnosu na vrijednosti za druga uspoređena područja u svijetu. Uspoređujući sa središnjim dijelom Vanjskih Dinarida vidimo da je atenuacija raspršenja također, uz intrinzičnu atenuaciju, nešto veća na sjevernom dijelu.



Slika 4.8 Usporedba rezultata ovisnosti faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} za različita područja: sjeverni Vanjski Dinaridi (ovaj rad), središnji Vanjski Dinaridi (Belinić i sur., 2015), Kairo (Abdelwahed i sur., 2005), istočna Turska (Akinci i sur., 2000), sjeveroistočna Italija (Padhy i sur., 2013), jugoistočna Sicilija (Giampiccolo i sur., 2006)

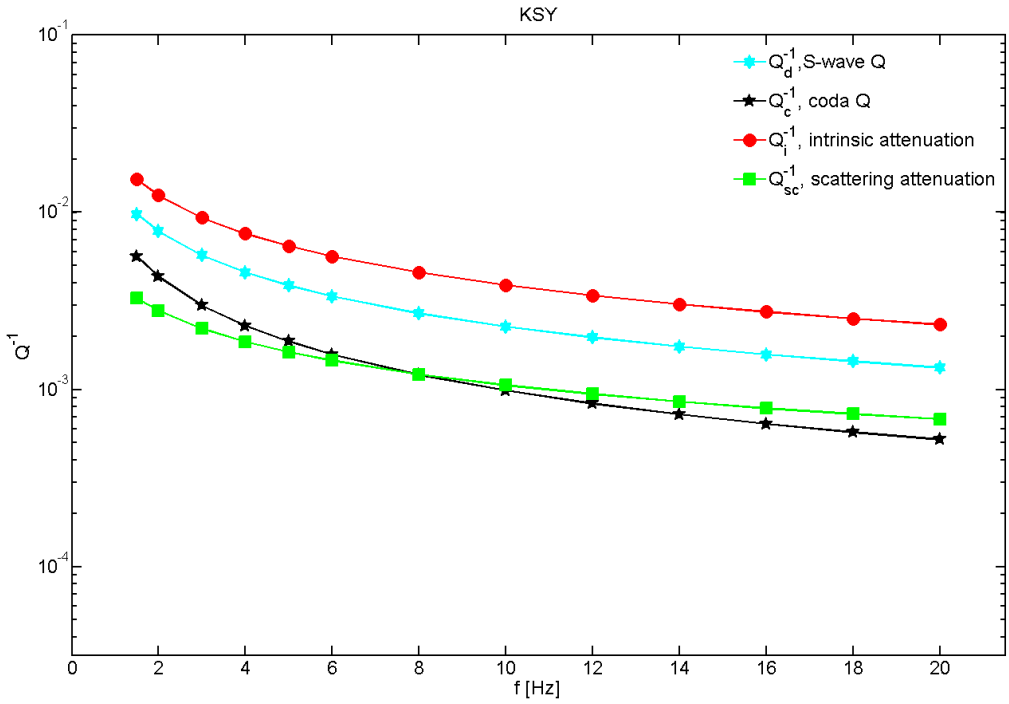


Slika 4.9 Usporedba rezultata ovisnosti faktora atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} za različita područja: sjeverni Vanjski Dinaridi (ovaj rad), središnji Vanjski Dinaridi (Belinić i sur., 2015), Kairo (Abdelwahed i sur., 2005), istočna Turska (Akinci i sur., 2000), sjeveroistočna Italija (Padhy i sur., 2013), jugoistočna Sicilija (Giampiccolo i sur., 2006).

4.2 Wennerbergova metoda

Wennerberg (1993) je razvio metodu za izračun intrinzičnog Q_i-faktora i Q_{sc}-faktora raspršenja, uz pretpostavku da su izvor i postaja kolocirani, bez uzimanja u obzir utjecaja izvora vala. Za procjenu Q_i^{-1}- i Q_{sc}^{-1}-faktora koriste se prethodno određeni Q-faktori izravnih S-valovaQ_D i koda-Q faktori Q_c preuzeti iz Dasović (2015).

Slika 4.10 prikazuje usporedbu dobivenih Q_i^{-1}-faktora i Q_{sc}^{-1}-faktora te Q^{-1}-faktora izravnih S-valova Q_D^{-1} i kode Q_c^{-1} korištenih u analizi, u ovisnosti o frekvenciji, na primjeru postaje KSY. Vrijednosti navedenih Q-faktora za sve postaje nalaze se u tablicama u prilogu B, kao i slike dobivene za ostale postaje. Zaključak do kojeg se dolazi je očekivan: vrijednosti Q_i^{-1} faktora veće su od vrijednosti Q_{sc}^{-1}-faktora. Rezultati ostalih postaja slažu se s navedenim.

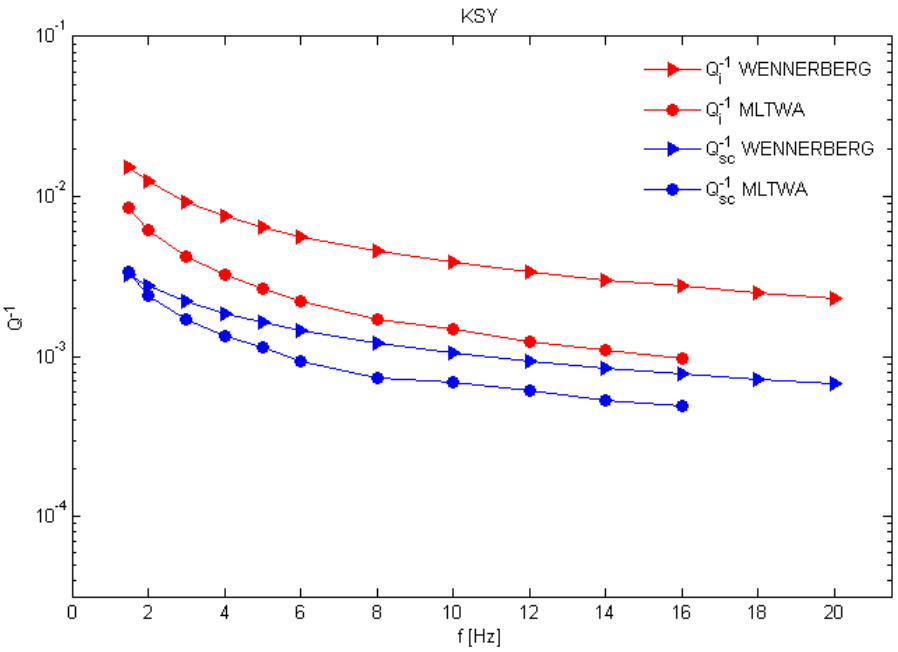


Slika 5.10 Usporedba Q_i^{-1}-faktora i Q_{sc}^{-1}-faktora dobivenih metodom Wennerberg te Q^{-1}-faktora izravnih S valova Q_D^{-1} i kode Q_c^{-1} korištenih u analizi, u ovisnosti o frekvenciji. Rezultat postaje KSY.

Odstupanja su dobivena jedino za postaju OZLJ, gdje su se pojavila negativne vrijednosti faktora raspršenja. Jedino objašnjenje takvog rezultata nalazim u odnosu faktora Q_D^{-1} i Q_c^{-1} korištenima u analizi: Q_c^{-1}-faktor za postaju OZLJ veći je od faktora Q_D^{-1}, što se ne slaže s pretpostavkom metode. Kako bi se ispunila pretpostavka da Q_c^{-1} mora biti manji od Q_D^{-1}, analiza je ponovljena s vrijednostima Q_D^{-1} smanjenima za vrijednost jedne standardne devijacije, a prethodni rezultat je odbačen.

4.3 Usporedba rezultata MLTWA i Wennerbergove metode

Uzimajući u obzir različiti pristup obje metode, rezultate je vrlo teško uspoređivati. Kod metode MLTWA promatramo višestruko raspršene valove, s ograničenjem na hipocentralne udaljenosti do ~100 km, odnosno do udaljenosti gdje su javljaju utjecaji površinskih valova. Jedna od osnovnih pretpostavki Wennerbergove metode je kolociranost izvora i prijemnika, te je za njenu primjenu potrebno koristiti vrijednosti mjerenih Q-faktora izravnih S-valova i koda-Q faktora za vrlo male hipocentralne udaljenosti. U ovom radu ta pretpostavka nije ispunjena, jer su korištene prethodno dobivene vrijednosti Q_D i Q_c za raspon hipocentralnih udaljenosti do stotinjak km, kao i kod MLTWA metode. Usporedba dobivenih vrijednosti faktora intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja za dvije korištene metode prikazana je na slici 4.11 (primjer za postaju KSY). Rezultati usporedbi za ostale postaje prikazane su na slikama u Prilogu C.



Slika 6

Slika 5.11 Usporedba faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metodu MLTWA i Wennerbergovu metodu. Rezultati za postaju KSY.

Može se uočiti da kod rezultata obje metode intrinzična atenuacija dominira nad atenuacijom raspršenja. Također, vidimo da su Q^{-1}– faktori dobiveni Wennerbergovom metodom precijenjeni u odnosu na rezultate metode MLTWA. Pisconti i sur. (2015) također su napravili usporedbu rezultata dviju metoda primijenjenih na seizmograme potresa na području središnje Italije. Usporedbe pokazuju da su vrijednosti faktora intrinzične atenuacije i atenuacije

raspršenja koje su dobili primjenom metode MLTWA manje u odnosu na vrijednosti istih faktora koje su de Lorenzo i sur. (2013) dobili Wennerbergovom metodom. Kao moguće razloge ovakvog rezultata navode razlike u osnovnim pretpostavkama ova dva pristupa. Također navode da bi neispunjavanje pretpostavke o kolociranosti izvora i prijemnika kod primjene Wennerbergove metode moglo biti uzrok dobivanja precijenjenih vrijednosti.

U ovom radu za primjenu Wennerbergove metode pretpostavka o kolociranosti izvora i prijemnika također nije ispunjena zbog korištenje faktora Q_D i Q_c određenih za preveliki raspon hipocentralnih udaljenosti. Stoga nisu moguće usporedbe apsolutnih vrijednosti faktora atenuacije dobivenih Wennerbergovom metodom s vrijednostima faktora dobivenih metodom MLTWA.

5. Zaključak

Za određivanje parametara atenuacije u sjevernom području Vanjskih Dinarida u ovom radu korištene su dvije metode: MLTWA i Wennerbergova.

Metoda MLTWA primjenjena je na ukupno 717 seizmograma, odnosno 415 potresa zapisanih na šest seizmoloških postaja: OZLJ, RIY, SLNJ, KSY, NVLJ i UDBI. Analizirani su lokalni potresi sa žarištem u gornjoj kori, hipocentralnih udaljenosti $10 \leq \Delta \leq 120$ km, lokalne magnitude $M_L \geq 2$, za do 13 frekvencijskih pojasa središnjih frekvencija u rasponu od 1.5 Hz do 20 Hz. Parametri seizmičkog albeda B_0, ukupne atenuacije Le^{-1} te faktori intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i atenuacije raspršenje Q_{sc}^{-1} procijenjeni su za model homogenog poluprostora s uniformno raspodjeljenim heterogenostima, pod pretpostavkom izotropnog višestrukog raspršenja. Rezultati pokazuju da intrinzična atenuacija dominira nad atenuacijom raspršenja, odnosno da je gubitak energije zbog neelastičnosti sredstva veći od gubitka energije zbog raspršenja valova. Svojstva atenuacije u kori prostorno variraju, intrinzična atenuacija jača je na sjevernom dijelu promatranog područja, a smanjuje se prema jugoistoku. Općenito, faktor atenuacije Q^{-1} smanjuje se s povećanjem frekvencije.

Za procjenu faktora intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja primjenom Wennerbergove metode korišteni su prethodno izmjereni podaci Q-faktora izravnih S-valova i Q-faktora kode, preuzetih iz Dasović (2015). Rezultati dovode do kvalitativno istog zaključka kao i kod metode MLTWA: glavni uzroci atenuacije na promatranom području su intrinzični procesi, a raspršenje ima slabije djelovanje.

Rezultati dviju metoda, MLTWA i Wennerbergove, značajno se kvantitativno razlikuju, pa je usporedba moguća samo kvalitativno. Najvjerojatniji uzroci odstupanja u vrijednostima Q-faktora razlike su u osnovnim pretpostavkama i pristupima pojedine metode. Također, bitan uvjet Wennerbergove metode o primjeni vrijednosti Q-faktora S-vala i koda-Q faktora dobivenih za vrlo male hipocentralne udaljenosti nije bio ispunjen, što je moguć uzrok dobivenih precijenjenih vrijednosti faktora atenuacije.

Dostupna istraživanja pokazala su da jednostavan model homogenog poluprostora s uniformno raspodjeljenim heterogenostima i izotropnim raspršenjem može uzrokovati precjenjivanje atenuacijskih parametara. Za realnije procjene parametara atenuacije koje će omogućiti bolji uvid u strukturu promatranog područja, potrebno je metodu MLTWA primijeniti na višeslojnom, anizotropnom modelu raspršenja, s parametrima ovisnima o dubini. Ipak, rezultati

ove analize korisni su za razumijevanje prirode atenuacije u kori na području sjevernih Vanjskih Dinarida.

6. Literatura

Abubakirov, I. R. (2005): Attenuation Characteristics of Transverse Waves in the Litosphere of Kamchatka Estimated from Observations at the Petropavlovsk Digital Broadband Station, Izv., Phys. Solid Earth, Vol. 41, No. 10, 813-824.

Abdelwahed, A., Abdel-Fattah, A.K. (2015): Scattering and intrinsic attenuation in Cairo metropolitan area using genetic algorithm, Soil. Dyn. Earthq. Eng., 69, 93–102.

Aki, K. (1969): Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. J. Geophys. Res. 74, 615–631.

Aki, K. (1980): Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, Phys. Earth planet. Int., 21, 50–60.

Aki, K., Chouet, B. (1975): Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. J. Geophys. Res. 80, 3322–3342.

Akinci, A., Eyidogan, H. (2000): Scattering and anelastic attenuation of seismic energy in the vicinity of north anatolian fault zone, eastern Turkey, Phys. Earth. Planet. In., 122, 229–239.

Belinić, T., Majstorović, J., Namjesnik, D. (2015): Intrinzična atenuacija i atenuacija raspršenja seizmičkih transverzalnih valova u području središnjih Vanjskih Dinarida, Rad za rektorovu nagradu. 58 str.

Bianco, F., Del Pezzo, E., Castellano, M., Ibanez, J., Di Luccio, F. (2002): Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in the Southern Apennine zone, Italy, Geophys. J. Int. ,150, 10–22.

Bianco, F., Del Pezzo, E., Malagnini, L., Di Luccio, F., Akinci, A., (2005): Separation of depth – dependent intrinsic and scattering seismic attenuation in the northeastern sectir of the Italian Peninsula, Geophys. J. Int., 161, 130–142.

Dainty, A. M., Toksöz, M. N. (1981): Seismic codas on the Earth and the Moon: a comparison. Phys. Earth Plant. Inter. 26, 250–260.

Dasović, I. (2015): Atenuacija seizmičkih valova u području Dinarida. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 125 str.

Dasović, I., Herak, M., Herak, D. (2012): Attenuation of coda waves in the contact zone between the Dinarides and the Adriatic Microplate. Stud. Geophys. Geod. 56, 231–247. http://dx.doi.org/10.1007/s11200-010-0077-8

Dasović, I., Herak, M., Herak, D., (2013): Coda-Q and its lapse time dependence analysis in the interaction zone of the Dinarides, the Alps and the Pannonian basin. J. Phys. Chem. Earth 63, 47–54. http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2013.03.001

Dasović, I., Ruščić, M., Herak, D., Herak, M. (2015): Attenuation of high-frequency body waves in the crust of the Central External Dinarides. J. Seismol., 19(4), 849–860. http://dx.doi.org/10.1007/s10950-015-9498-8

de Lorenzo, S., Del Pezzo, E., Bianco, F. (2013): Q_c, Q_β, Q_i and Q_s attenuation parameters in the Umbria-Marche (Italy) region, Phys. Earth. Planet. In., 218, 19–30.

Del Pezzo, E., Bianco, F. (2010.): Two-layer earth model corrections to the MLTWA estimates of intrinsic-and scattering-attenuation obtained in a uniform half-space, Geophys. J. Int., 182(2), 949–955.

Fehler, M., Hoshiba, M., Sato, H., Obara, K. (1992): Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto- Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance, Geophys. J. Int, 108, 787–800.

Gao, L.S., Lee, L.C., Biswas, N.N., Aki, K. (1983): Comparison of the effects between single and multiple scattering on coda waves for local earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 73, 377–389.

Giampiccolo, E., Tuve, T., Gresta, S., Patane, D. (2006): S-wave attenuation and separation of scattering and intrinsic absorption of seismic energy in southeastern Sicily (Italy), Geophys. J. Int., 165, 211–222.

Goutbeek, F. H., Dost, B., van Eck, T. (2004) : Intrincis Absorption and Scattering Attenuation in the Southern Part of the Netherlands, J. Seismol., 8, 11–23.

Herak, M. (1991a): Lapse time dependent Qc-spectra observed in the Dinarides region (Yugoslavia). Phys. Earth. Planet. Inter. 67, 303–312.

Herak, M. (1991b): Modeliranje kode lokalnih potresa. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 129 str.

Hoshiba, M. (1991): Simulation of multiple-scattered coda wave excitation based on

the energy conservation law, Phys. Earth. Planet. In., 67, 123–136.

Hoshiba, M. (1993): Separation of scattering attenuation and intrinsic absorption in Japan using the multiple lapse time window analysis of full seismogram envelope, J. Geophys. Res., 98, B9, 15809–15824.

Hoshiba, M., Sato, H., Fehler, M. (1991): Numerical Basis of the Separation of Scattering and Intrinsic Absorption from Full Seismogram Envelope – a Monte-Carlo Simulation of Multiple Isotropic Scattering, Pap. Meteorol. Geophys., 42, 2, 65–91.

Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I., Herak, M. (2006): Seismicity of Croatia in the period 2002–2005. Geofizika 23, 87–103.

Kastelic, V., Carafa, M.M.C. (2012): Fault slip rates for the active External Dinarides thrust-and-fold belt. Tectonics 31, TC3019.

Kopnichev Y.F. (1977): The role of multiple scattering in the formulation of a seismogram's tail. Izvestiya Akademii nauk SSSR Fizika zemli 13, 394–398.

Margerin, L. (2005): Introduction to radiative transfer of seismic waves, in Seismic Earth:Array Analysis of Broad-band Seismograms, A. Levander and G. Nolet (Ed.), Geophysical Monograph Series, Vol. 157, Ch 14, 229–252, AGU, Washington.

Mayeda, K., Su, F., Aki, K. (1991), Seismic Albedo from the Total Seismic Energy Dependence on Hypocentral Distance in Southern California, Phys. Earth Planet. Int. 67, 104–114.

Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiba, M., Aki, K., Zeng, Y. (1992): A comparative study of scattering, intrinsic, and coda Q^{-1} for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15.0 Hz, J. Geophys. Res., 97, 6643–6659.

Meirova, T., Pinsky, V. (2014): Seismic wave attenuation in Israel region estimated from the multiple lapse time window analysis and S. wave coda decay rate, Geophys. J. Int., 197, 581–590.

Mukhopadhyay, S., Kumar, A., Garg, A., Del Pezzo, E., Kayal, J.R. (2014): The attenuation mechanism of S-waves in the source zone of the 1999 Chamoli earthquake, J. Asian Earth Sci., 79, 446–454.

Padhy, S., Subhadra, N. (2013): Separation of intrinsic and scattering seismic wave attenuation in Northeast India, , Geophys. J. Int., 195, 1892–1903.

Pisconti, A., Del Pezzo, E., Bianco, F., de Lorenzo, S. (2015): Seismic Q estimates in Umbria MArche (Central Italy): hints for the retrieval of a new attenuation law for seismic risk. Geophys. J. Int. ,201, 1370–1382.

Rovelli A. (1984): Seismic Q for the lithosphere of the Montenegro region (Yugoslavia): frequency, depth and time windowing effects. Phys. Earth. Planet. Inter., 34, 159–172.

Sahin, S., Erduran, M., Alptekin, O., Cakir, O. (2007): Intrinsic and Scattering Seismic Attenuation in Southwestern Anatolia, Pure Appl. Geophys., 164, 2255–2270.

Sato, H. (1977): Energy propagation including scattering effects: single isotropic scattering approximation, J. Geophys. Res., 25, 27–41.

Sato, H., Fehler, M.C., Maeda, T. (2012): Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth: Second Edition. Springer-Verlag, Heidelberg.

Shang, T.L., Gao, L.S. (1988): Transportation theory of multiple scattering and its application to seismic coda waves of impulsive source, Sci. Sinica., 31, 1503–1514.

Stein, S., Wysession, M. (2003): An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishing, Oxford

Stipčević, J. (2012): Stuktura kore i gornjeg plašta u širem području Dinarida određena analizom širokopojasnih funkcija prijemnika. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 170 str.

Tomljenović, B., Csontos, L., Márton, E., Márton, P. (2008): Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia, in: Siegesmund, S., Fügenschuh, B., Froitzheim, N. (Eds.), Tectonic aspects of the Alpine-Dinaride-Carpathian system. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., vol. 298, 145–167.

Tselentis, G.,A. (1998): Intrinsic and Scattering Attenuation in W. Greece, Pure Appl. Geophys, 153, 703–712.

Wennerberg, L. (1993): Multiple-scattering Interpretation of coda-Q Measurements, Bull. Seismol. Soc Am. 83, 279–290.

Wu, R.S. (1985): Multiple scattering and energy transfer of seismic waves – separation of scattering effect from intrinsic attenuation – I. Theoretical modelling, Geophys. J. R. Astr. Soc., 82, 57–80.

Wu, R. S., Aki, K. (1988a): Introduction: Seismic Wave Scattering in Three-dimensionally Heterogeneous Earth, Pure and appl. geophys. 128, 1–6.

Wu, R. S., Aki, K. (1988b): Multiple Scattering and Energy Transfer of Seismic Waves—Separation of Scattering Effect from Intrinsic Attenuation, II. Application of the Theory to Hindu-Kush Region, Pure and appl. geophys. 128, 49–80.

Zeng, Y. (1991): Compact solutions for multiple scattered wave energy in time domain, B. Seismol. Soc. Am, Vol. 81, No. 3, 1022–1029.

Zeng, Y., Su, F. , Aki, K. (1991): Scattering wave energy propagation in a random isotropic scattering medium, J. Geophys. Res., Vol. 96, No. 81, 607–619.

Prilog A

Rezultati metode MLTWA

U ovom prilogu prikazane su najprije po četiri slike za postaje OZLJ, UDBI, SLNJ, NVLJ i RIY te za sjeverne Vanjske Dinaride. Zatim slijede tablice s izračunatim vrijednostima svih parametara atenuacije, za sve postaje uključujući i KSY te za sjeverne Vanjske Dinaride.

Najbolja prilagodba teorijske energije energiji dobivenoj iz seizmograma

Slike A.1 do A.6 prikazuju izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.

Parovi B_0 i Le^{-1} najbolje prilagodbe i područje 68% pouzdanosti

Na slikama A.7 do A.12 prikazani su parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).

Q^{-1}-faktori atenuacije

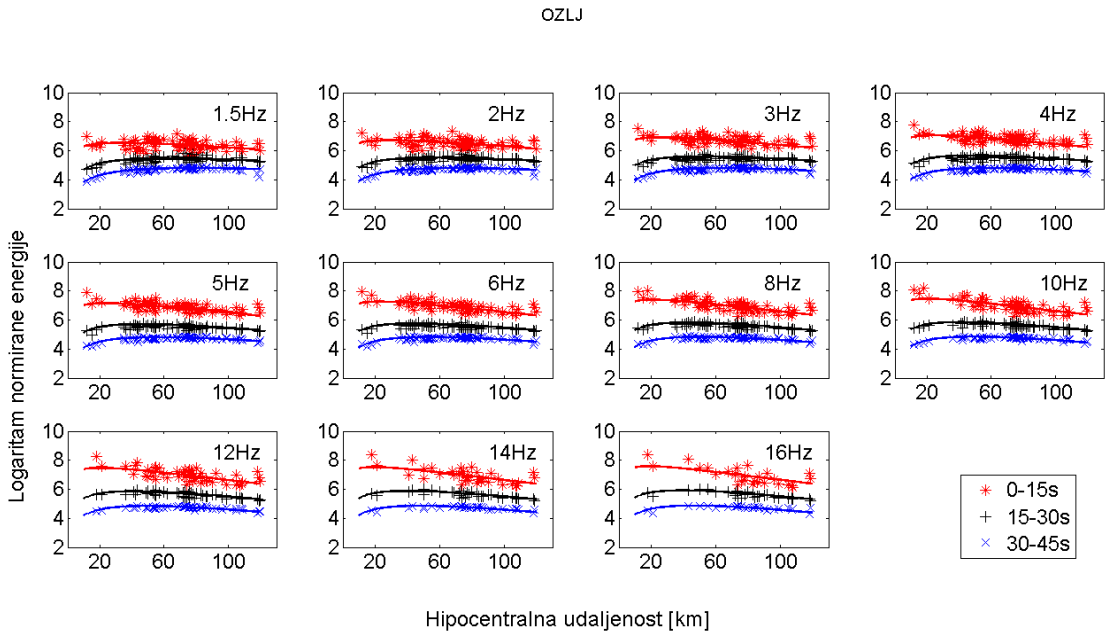
Slike A.13 do A.18 prikazuju usporedbu Q^{-1}–faktora: faktora atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, intrinzične Q_i^{-1} i ukupne Q_t^{-1} atenuacije, očekivanog Q_c^{-1} -faktora $Q_{c\,expected}^{-1}$ te mjerenog $Q_{c\,observed}^{-1}$ preuzetog iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.

Q –faktori

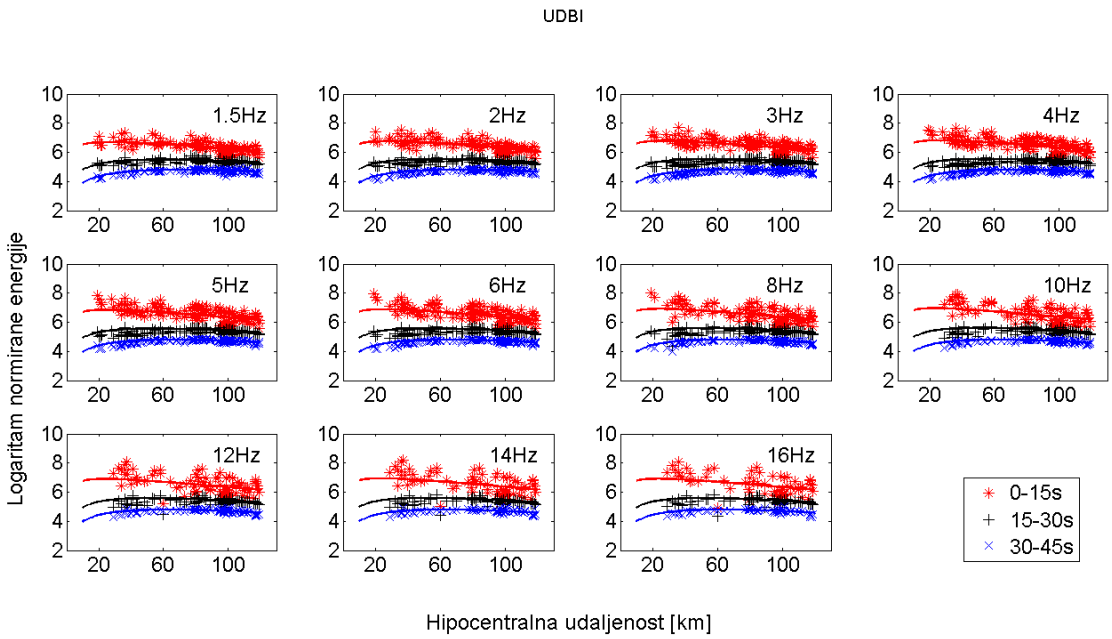
Slike A.19 do A.24 prikazuju usporedbu Q-faktora: faktora raspršenja Q_{sc}, intrinzičnog faktora Q_i, inverza ukupne atenuacije Q_t, očekivanog koda-Q faktora $Q_{c\,expected}^{-1}$ te mjerenog $Q_{c\,observed}$ preuzetog iz Dasović (2015). Stupci pogreške označavaju raspon vrijednosti dobivenih za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.

Tablica s parametrima atenuacije i pripadnim pogreškama

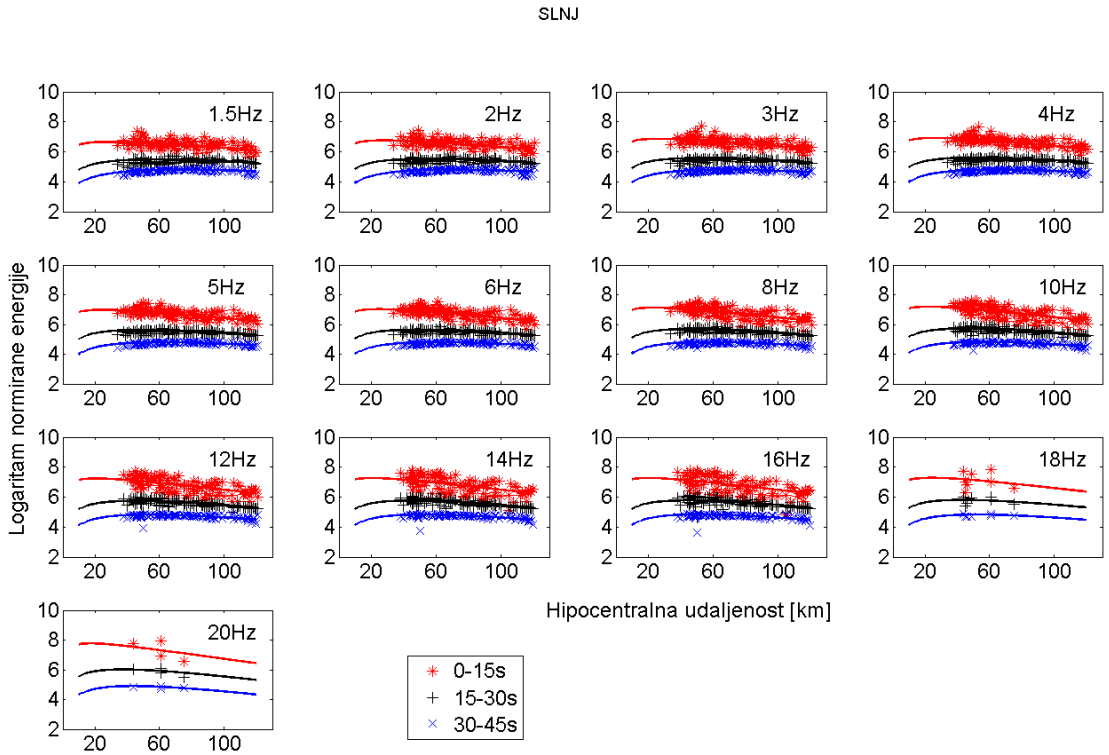
Tablice A.1 do A.7 sadrže: parove B_0 i Le^{-1} najbolje prilagodbe teorijske energije mjerenoj, faktore intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne Q_t^{-1} atenuacije, očekivane Q_c^{-1}-faktore $Q_{c\,expected}^{-1}$ i mjerene $Q_{c\,observed}^{-1}$, te Q-faktore: faktore raspršenja Q_{sc}, intrinzični faktori Q_i, inverzi ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktori $Q_{c\,expected}^{-1}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$.



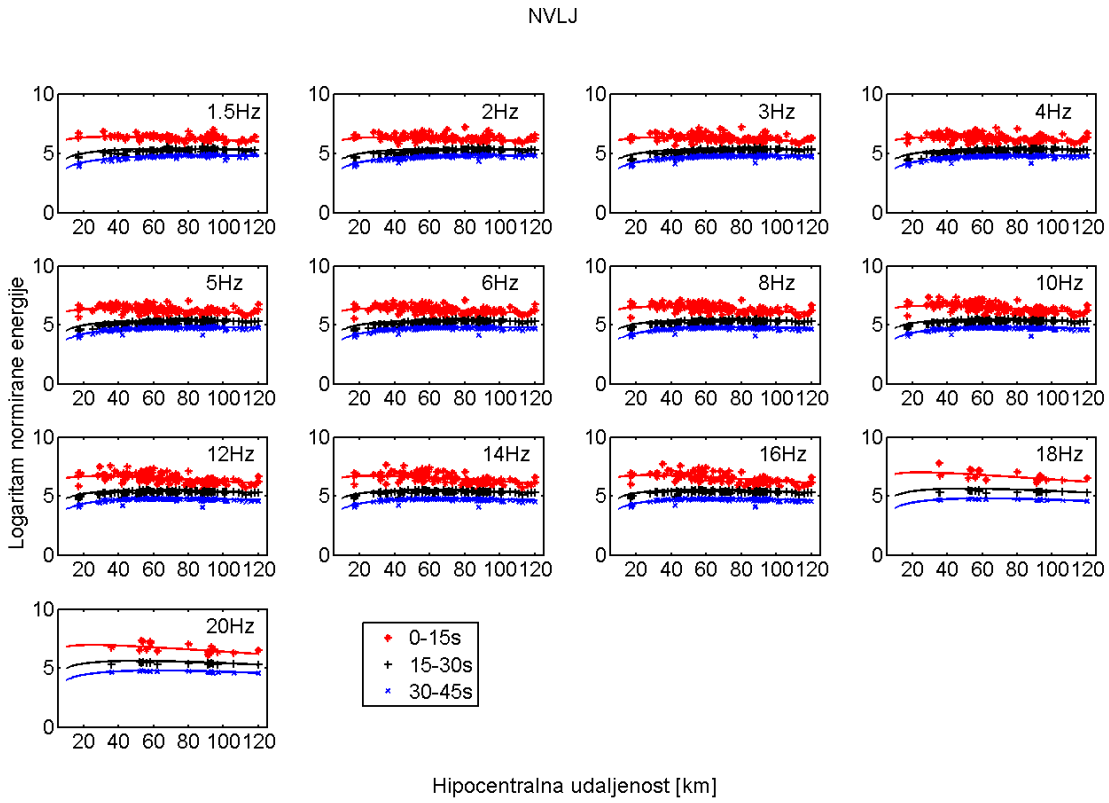
Slika A.1 Rezultati za postaju OZLJ. Izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.



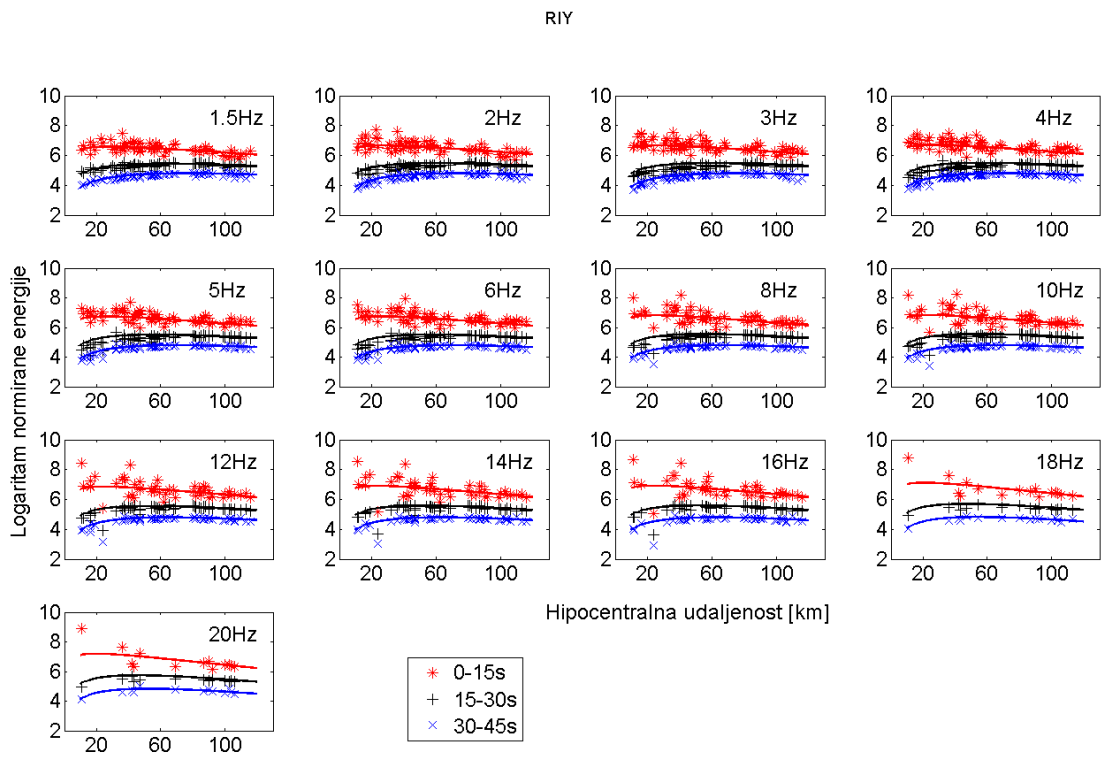
Slika A.2 Rezultati za postaju UDBI. Izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.



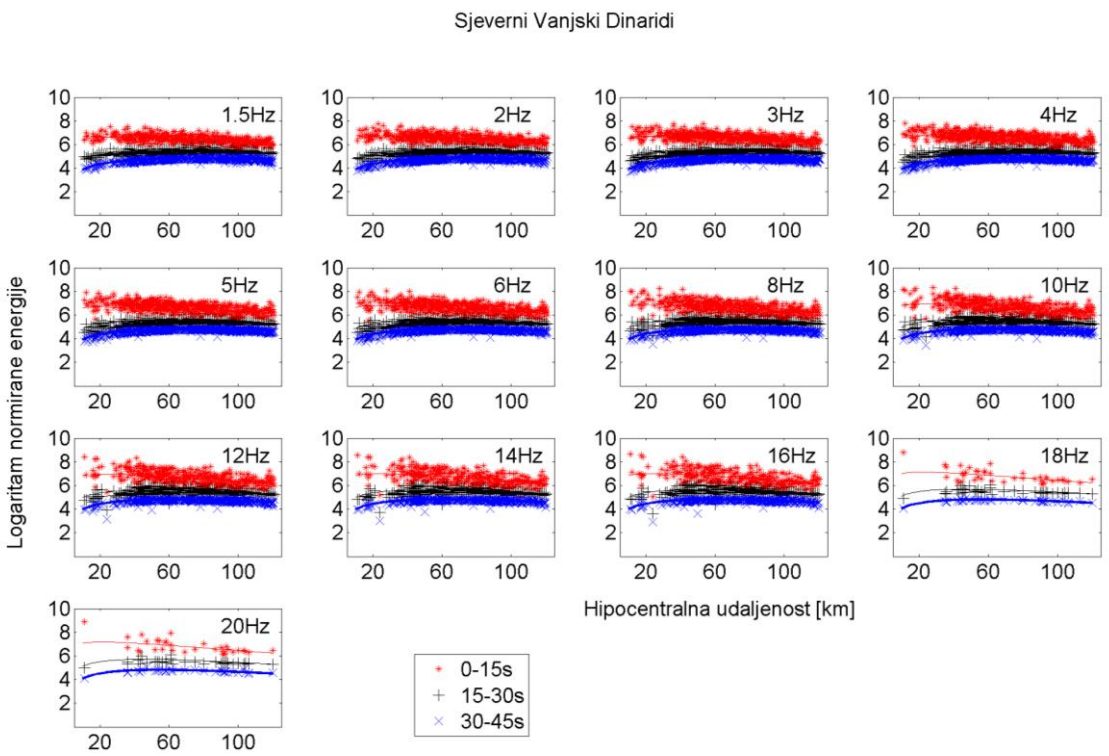
Slika A.3 Rezultati za postaju SLNJ. Izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.



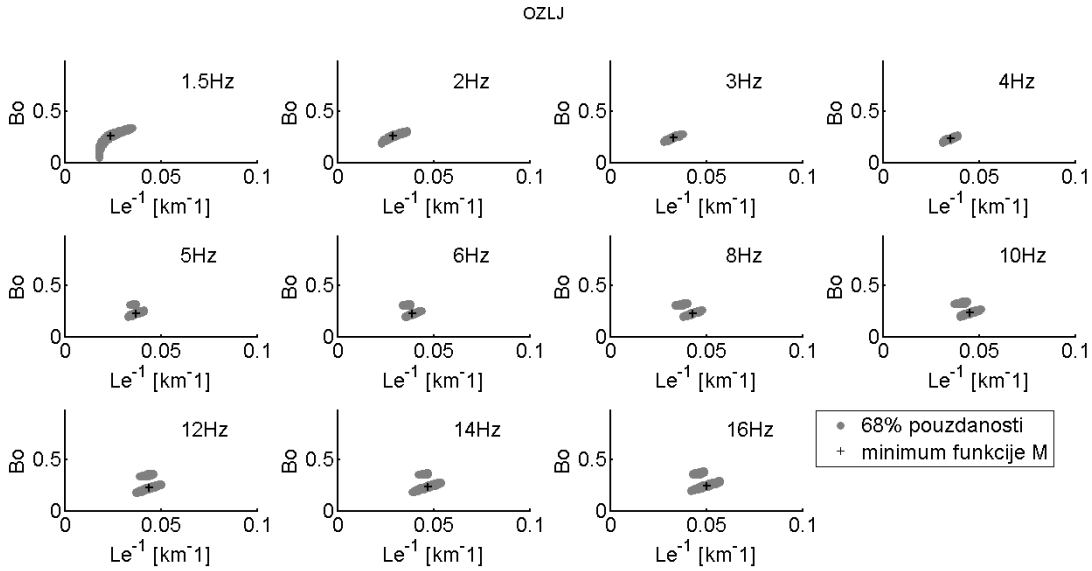
Slika A.4 Rezultati za postaju NVLJ. Izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.



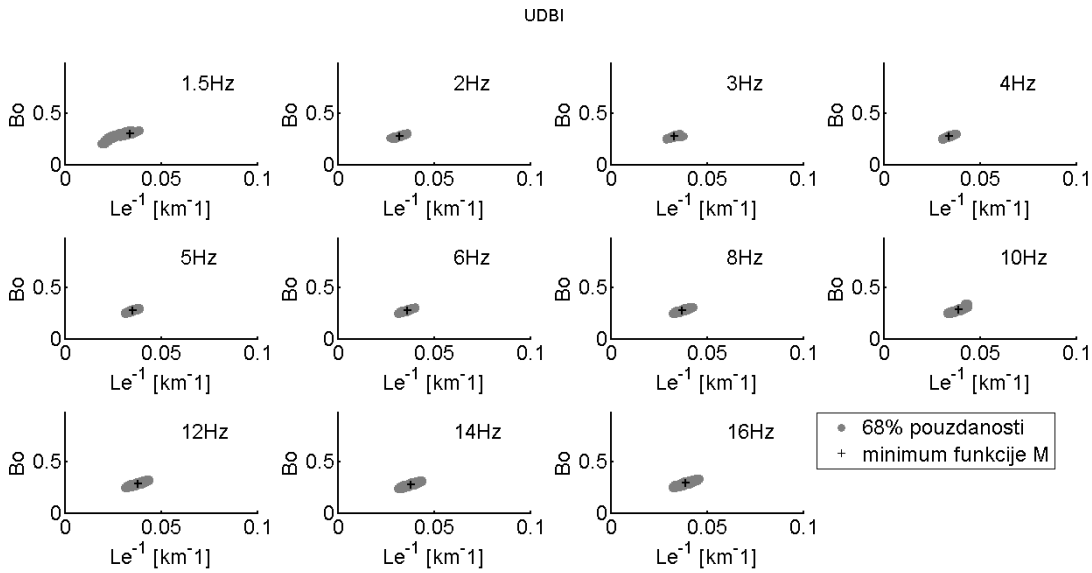
Slika A.5 Rezultati za postaju NVLJ. Izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.



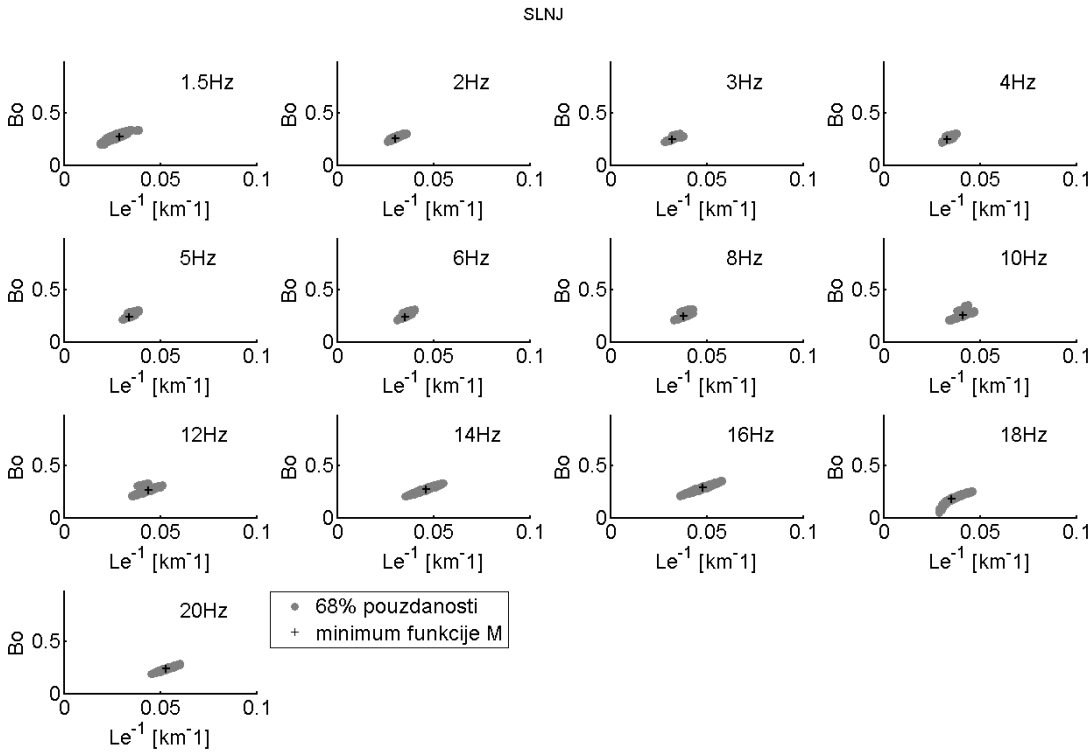
Slika A.6 Rezultati za sjeverne Vanjske Dinaride. Izmjerene energije seizmograma, u tri vremenska prozora: 0–15 s(∗), 15–30 s (+), 30–45 s (x), zajedno s teorijskim krivuljama energije koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenjima, u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.



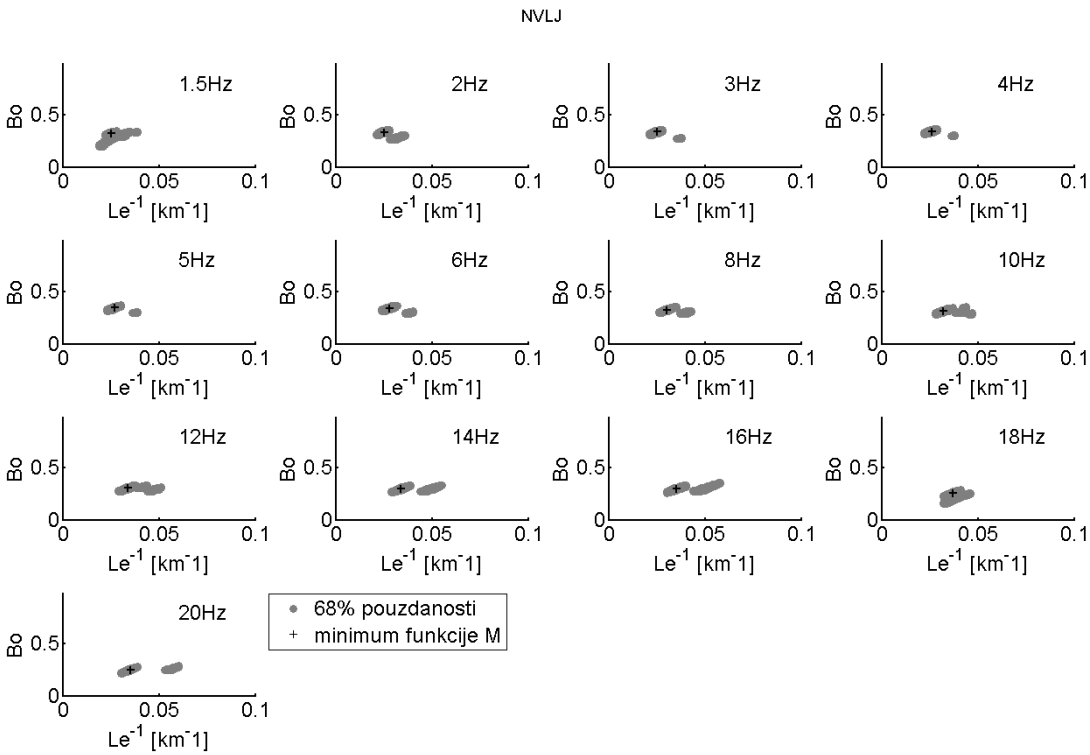
Slika A.7 Rezultati za postaju OZLJ. Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).



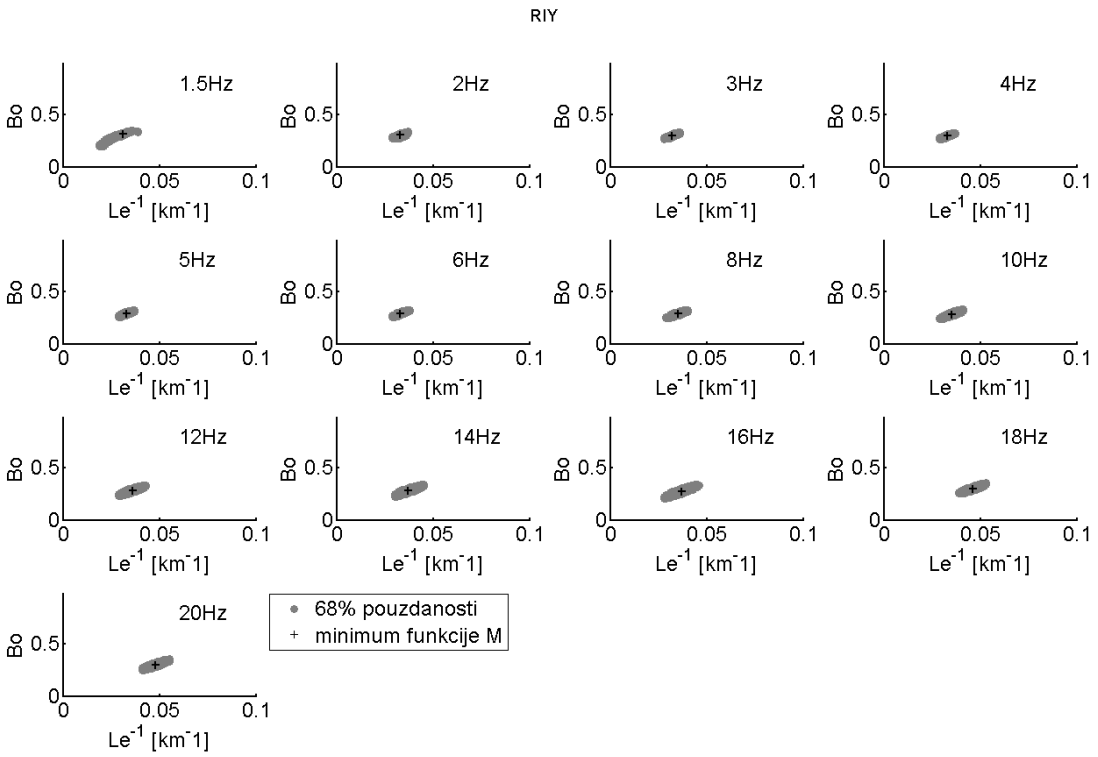
Slika A.8 Rezultati za postaju UDBI. Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).



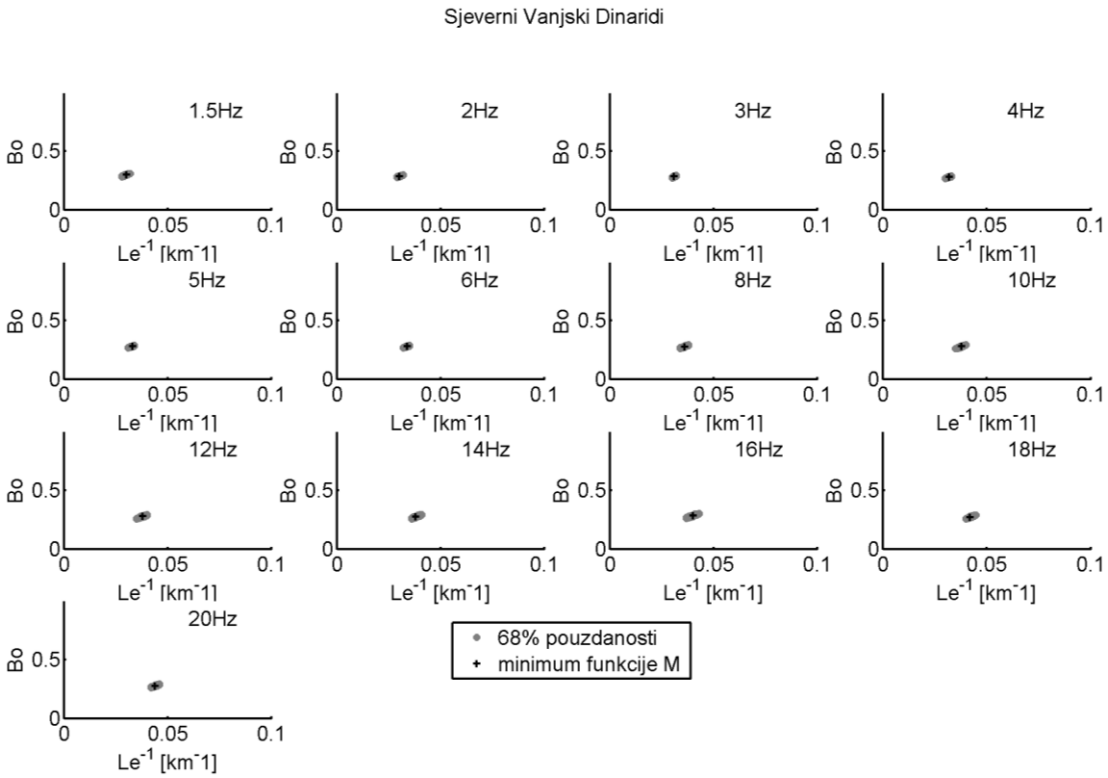
Slika A.9 Rezultati za postaju SLNJ. Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).



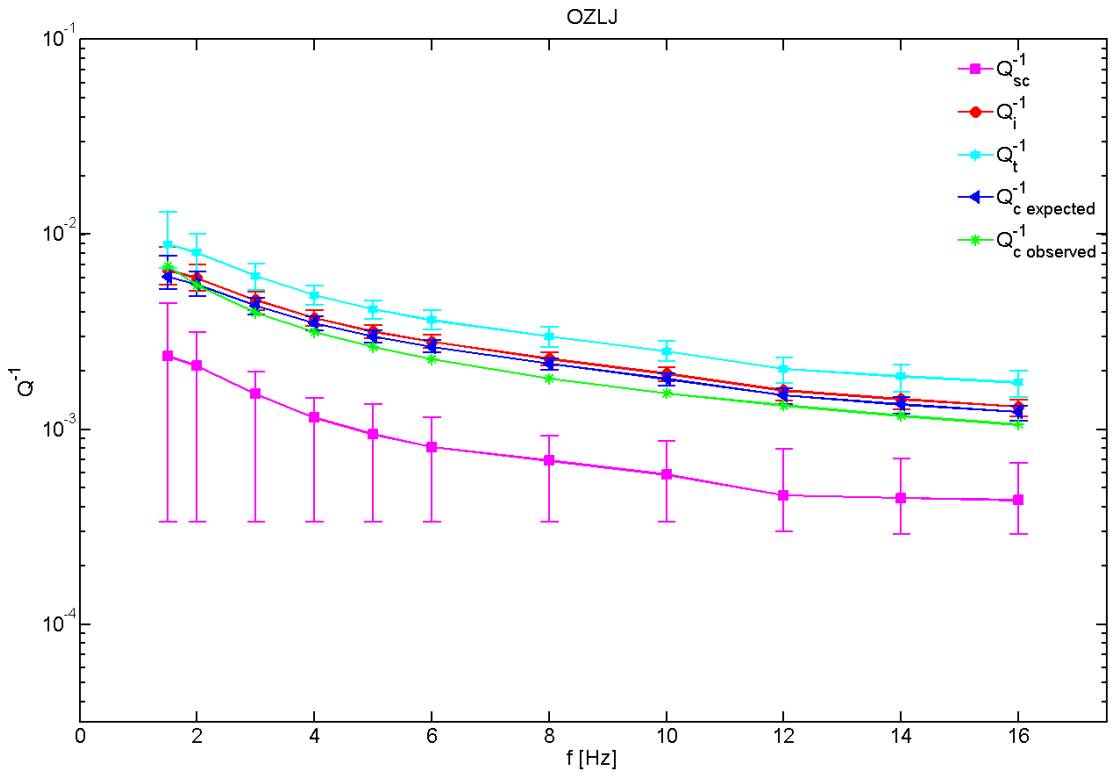
Slika A.10 Rezultati za postaju NVLJ. Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).



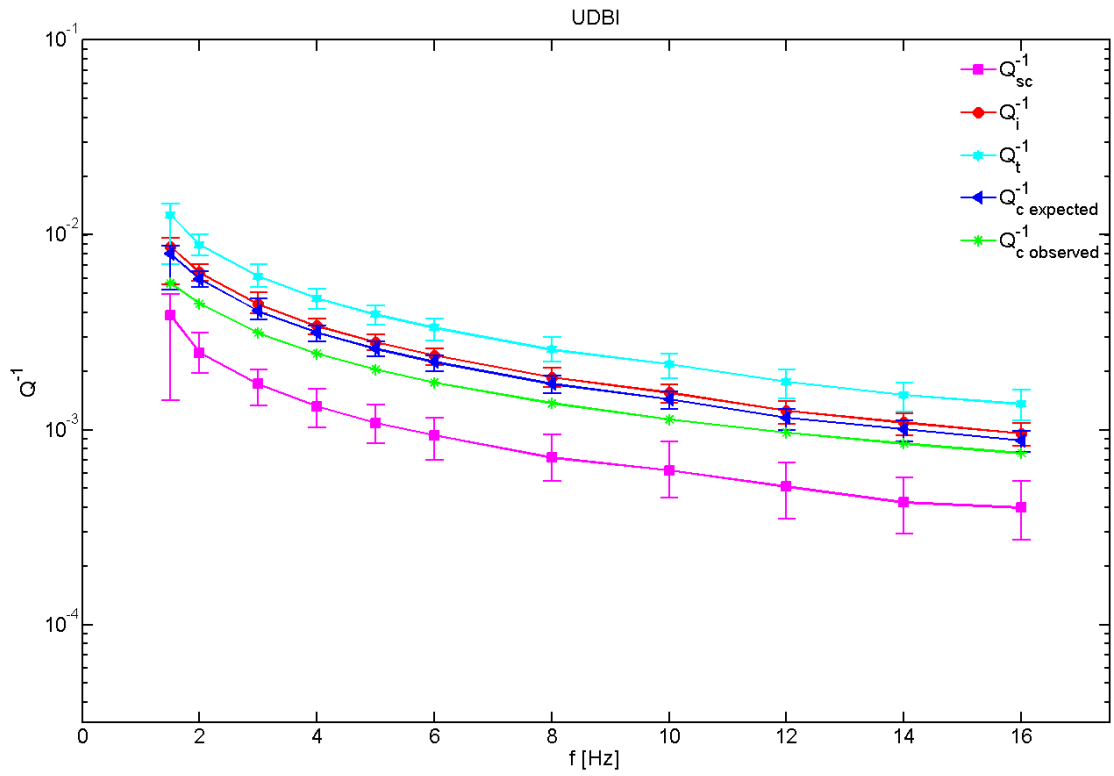
Slika A.11 Rezultati za postaju RIY. Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).



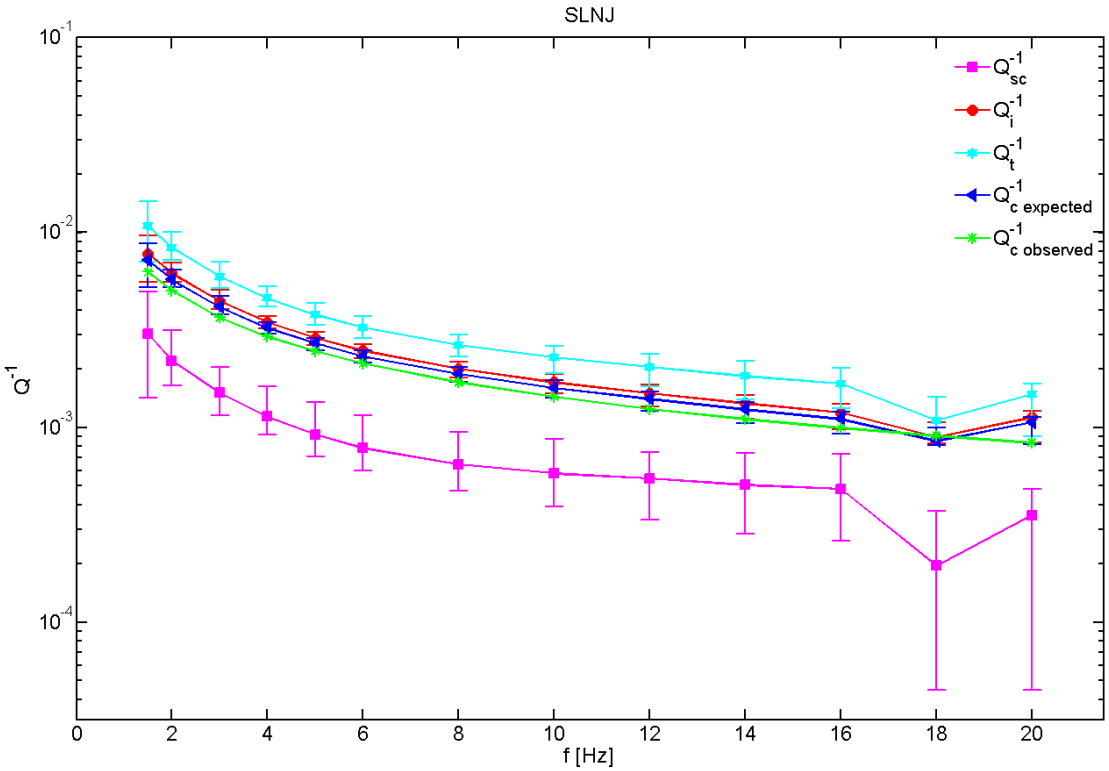
Slika A.12 Rezultati za sjeverne Vanjske Dinaride. Parovi B_0 i Le^{-1} koji predstavljaju najbolju prilagodbu teorijske energije mjerenoj (+), po frekvencijama, te procjena intervala njihovih pogreški, koje odgovaraju području 68% pouzdanosti F-distribucije (sivo područje).



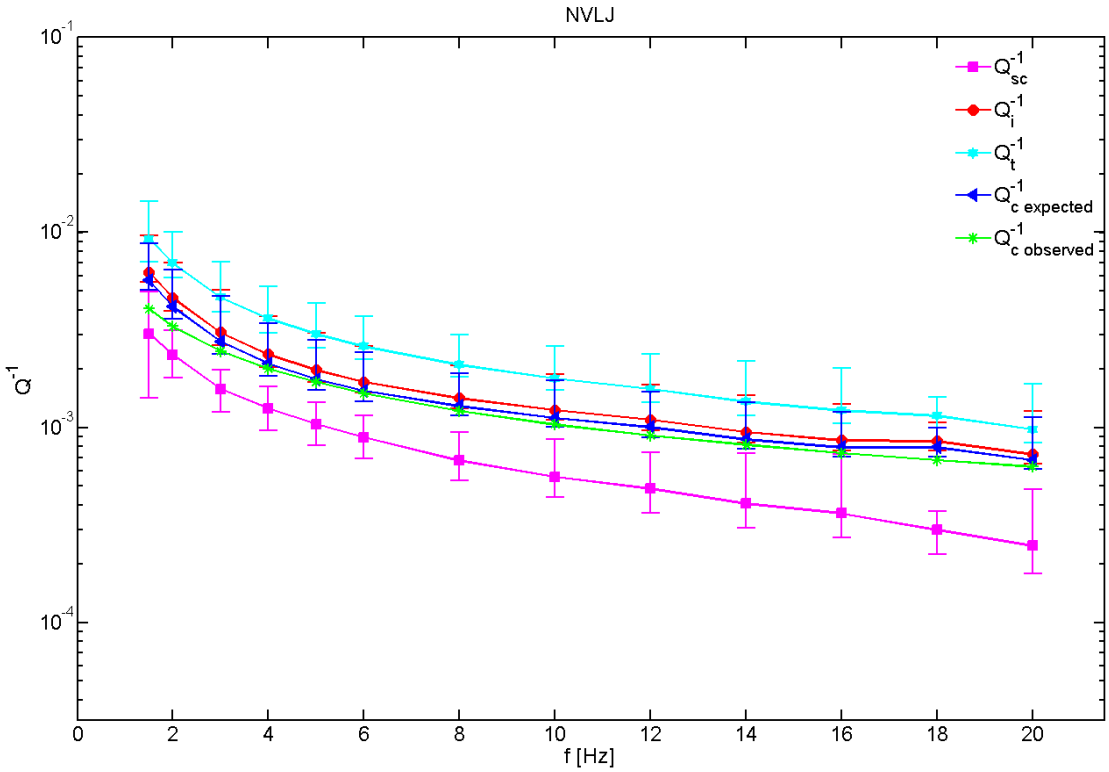
Slika A.13 Rezultati za postaju OZLJ. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q^{-1}_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.



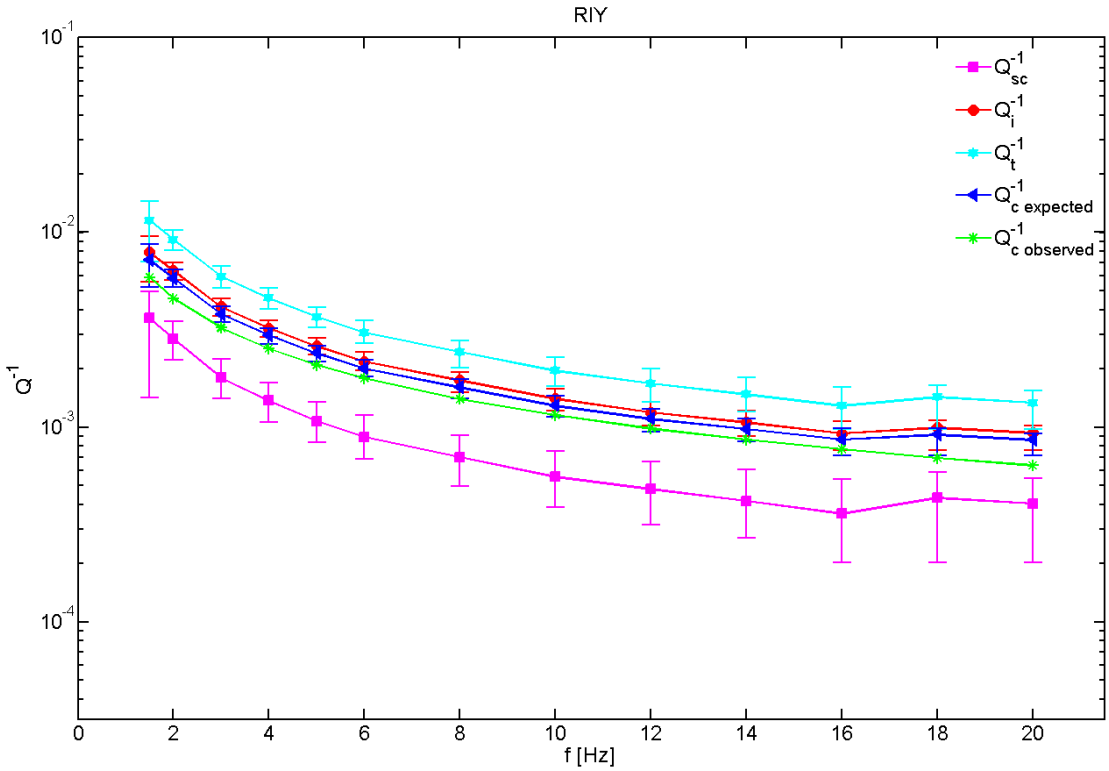
Slika A.14 Rezultati za postaju UDBI. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q^{-1}_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.



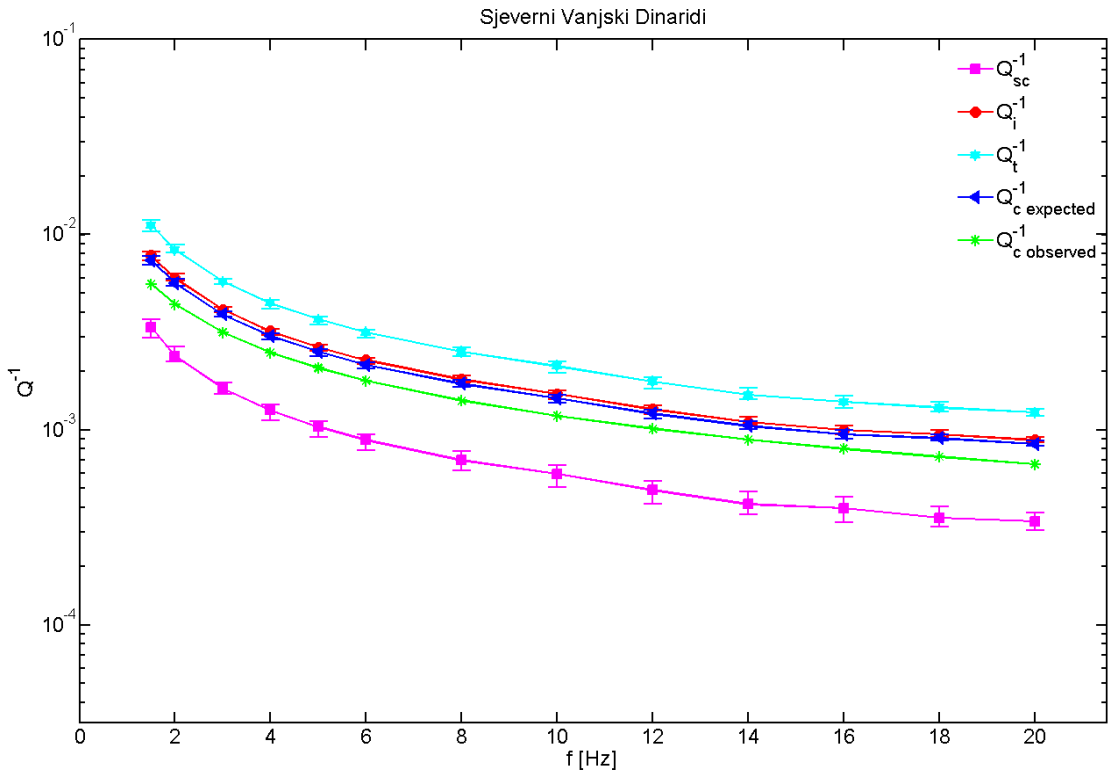
Slika A.15 Rezultati za postaju SLNJ. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q^{-1}_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.



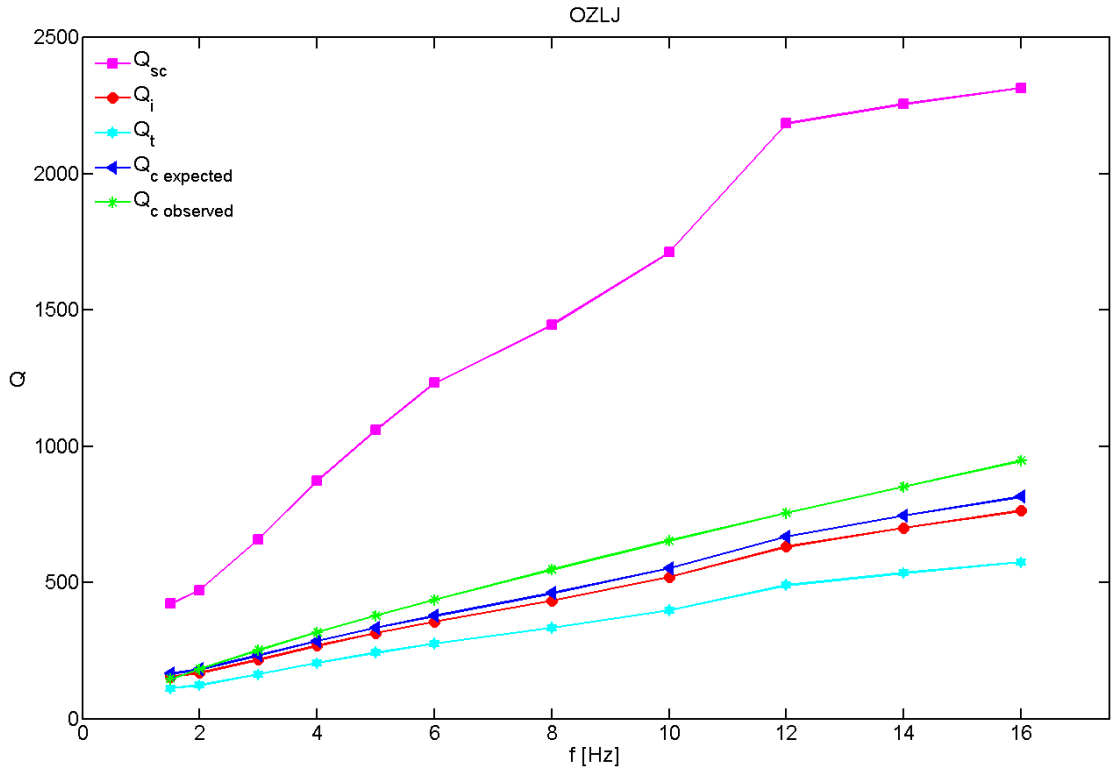
Slika A.16 Rezultati za postaju NVLJ. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q^{-1}_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.



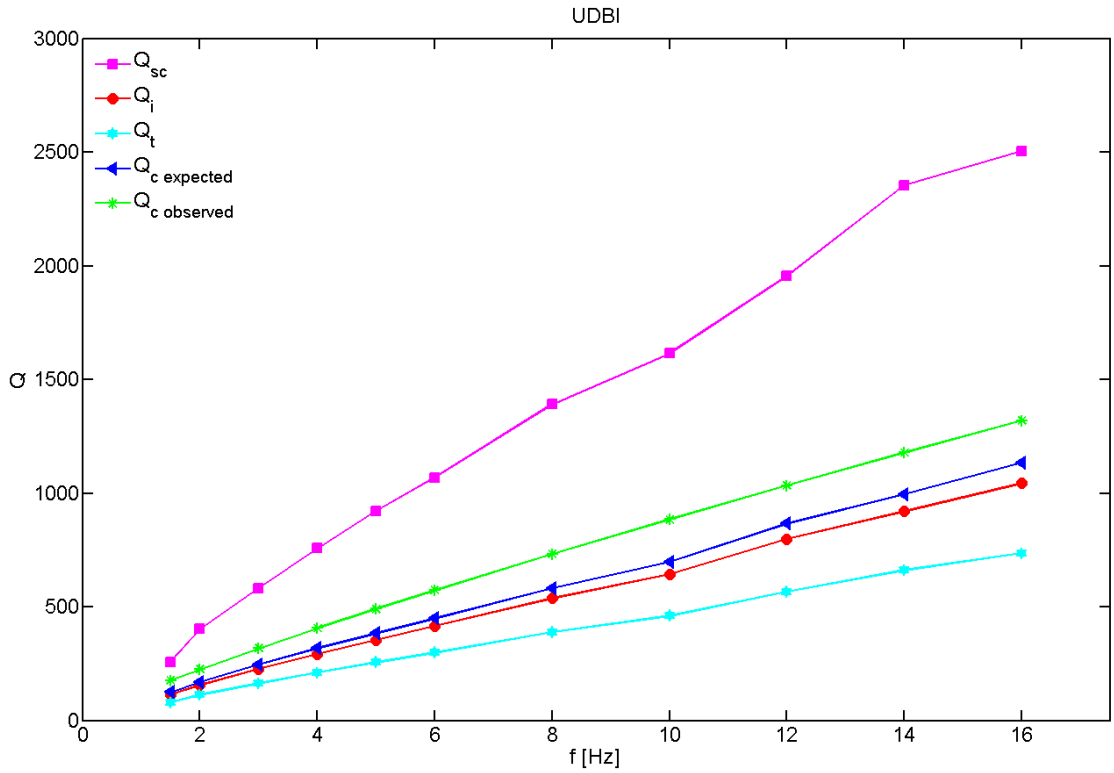
Slika A.17 Rezultati za postaju RIY. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q^{-1}_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.



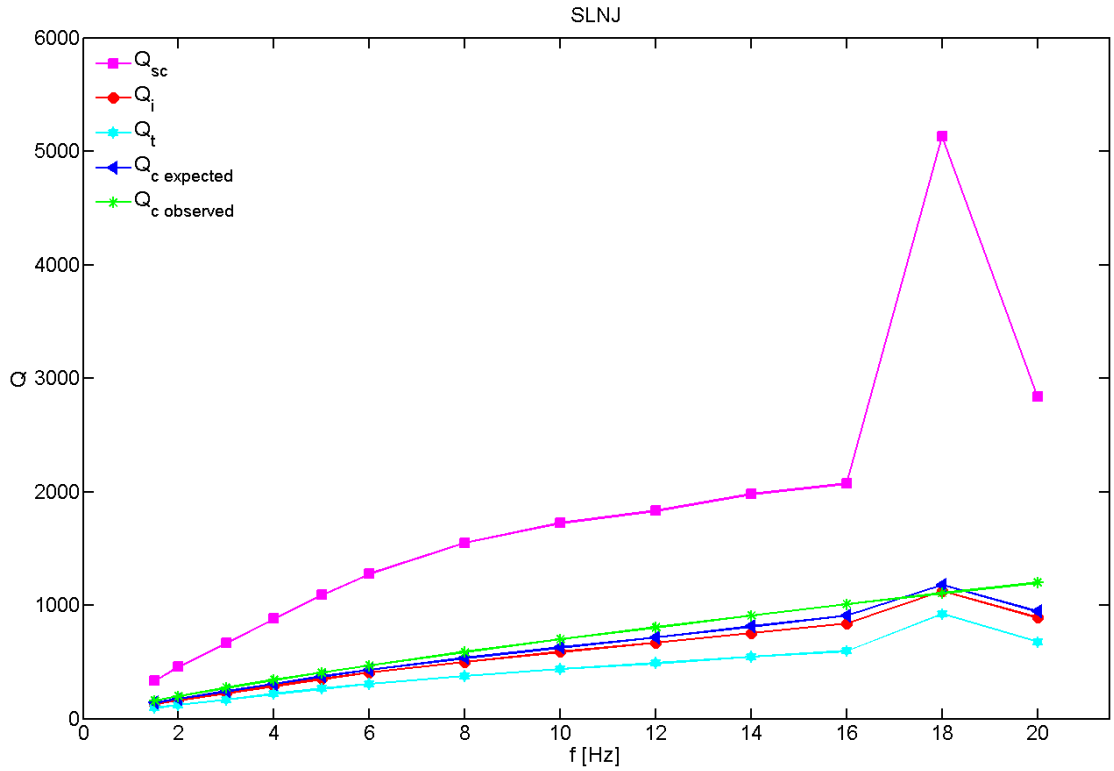
Slika A.18 Rezultati za sjeverne Vanjske Dinaride. Q^{-1}-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q^{-1}_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015). Prikazane su i pripadajuće standardne devijacije dobivene za parove Le^{-1} i B_0 područja 68% pouzdanosti F-distribucije.



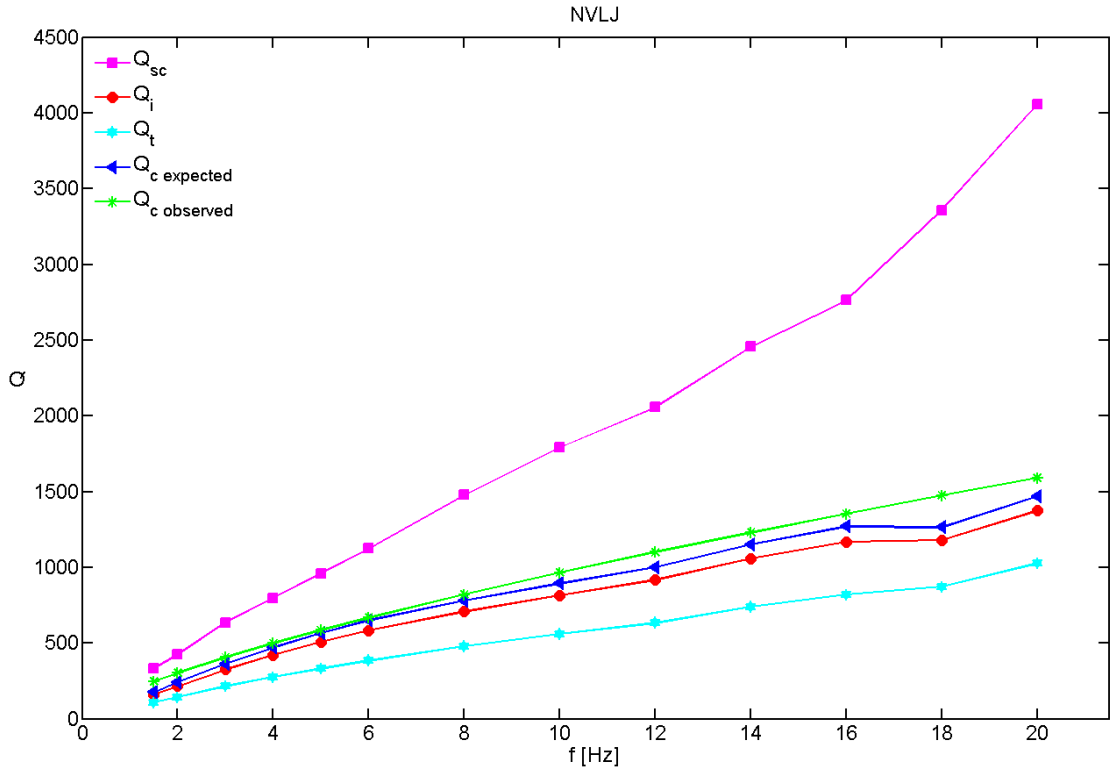
Slika A.19 Rezultati za postaju OZLJ. Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015).



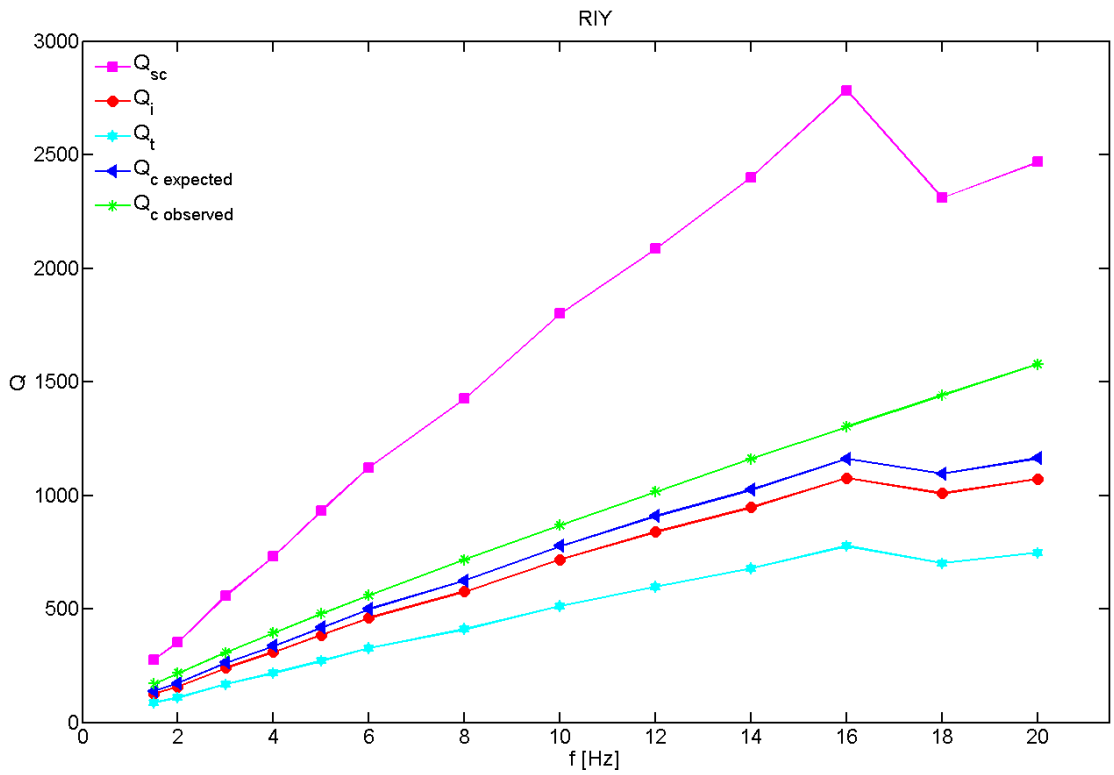
Slika A.20 Rezultati za postaju UDBI. Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015).



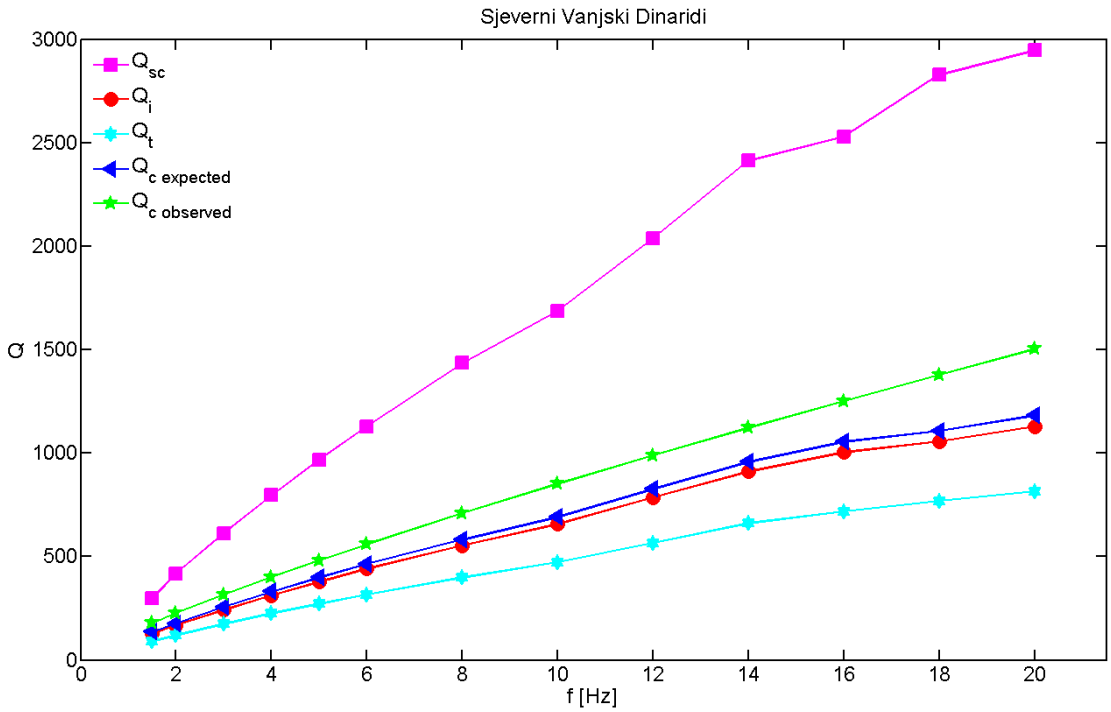
Slika A.21 Rezultati za postaju SLNJ. Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015).



Slika A.22 Rezultati za postaju NVLJ. Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015).



Slika A.23 Rezultati za postaju RIY. Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015).



Slika A.24 Rezultati za sjeverne Vanjske Dinaride. Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji dobiveni MLTWA metodom te mjereni $Q_{c\ observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

Tablica A.1 Podaci za postaju KSY. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.286	- 0.031 + 0.030	0.032	- 0.004 + 0.004	0.0085	0.0034	0.0119	0.0078	0.0056	118	294	84	128	335
2	0.279	- 0.029 + 0.026	0.031	- 0.003 + 0.004	0.0062	0.0024	0.0086	0.0057	0.0043	161	415	116	174	437
3	0.290	- 0.031 + 0.024	0.032	- 0.004 + 0.003	0.0042	0.0017	0.0059	0.0039	0.0030	237	580	168	258	536
4	0.294	- 0.029 + 0.025	0.033	- 0.004 + 0.003	0.0032	0.0014	0.0046	0.0030	0.0023	308	740	218	336	634
5	0.299	- 0.031 + 0.026	0.034	- 0.004 + 0.003	0.0027	0.0011	0.0038	0.0024	0.0019	377	883	264	411	826
6	0.296	- 0.028 + 0.031	0.034	- 0.004 + 0.004	0.0022	0.0009	0.0032	0.0020	0.0016	450	1070	317	490	1015
8	0.300	- 0.033 + 0.033	0.035	- 0.004 + 0.005	0.0017	0.0007	0.0024	0.0016	0.0012	586	1368	410	639	1200
10	0.316	- 0.041 + 0.037	0.039	- 0.006 + 0.005	0.0015	0.0007	0.0022	0.0014	0.0010	673	1457	460	737	1383
12	0.327	- 0.042 + 0.043	0.040	- 0.006 + 0.006	0.0012	0.0006	0.0019	0.0011	0.0008	800	1647	539	880	1564
14	0.329	- 0.044 + 0.047	0.041	- 0.006 + 0.006	0.0011	0.0005	0.0016	0.0010	0.0007	914	1863	613	1005	335
16	0.338	- 0.048 + 0.054	0.042	- 0.007 + 0.007	0.0010	0.0005	0.0015	0.0009	0.0006	1033	2023	684	1140	437

Tablica A.2 Podaci za postaju OZLJ. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.266	- 0.216 + 0.076	0.024	- 0.006 + 0.011	0.0065	0.0024	0.0089	0.0061	0.0068	153	422	112	165	146
2	0.262	- 0.074 + 0.051	0.029	- 0.006 + 0.007	0.0060	0.0021	0.0081	0.0055	0.0055	168	473	124	181	183
3	0.248	- 0.045 + 0.033	0.033	- 0.005 + 0.005	0.0046	0.0015	0.0061	0.0043	0.0040	217	658	163	232	252
4	0.235	- 0.037 + 0.032	0.035	- 0.004 + 0.004	0.0037	0.0011	0.0049	0.0035	0.0032	268	873	205	286	317
5	0.229	- 0.034 + 0.096	0.037	- 0.004 + 0.004	0.0032	0.0009	0.0041	0.0030	0.0026	315	1059	243	334	378
6	0.224	- 0.029 + 0.103	0.039	- 0.005 + 0.005	0.0028	0.0008	0.0036	0.0026	0.0023	356	1233	276	377	437
8	0.231	- 0.035 + 0.102	0.043	- 0.009 + 0.005	0.0023	0.0007	0.0030	0.0022	0.0018	434	1446	334	461	437
10	0.233	- 0.036 + 0.120	0.045	- 0.008 + 0.006	0.0019	0.0006	0.0025	0.0018	0.0015	520	1712	399	553	1383
12	0.224	- 0.050 + 0.146	0.044	- 0.007 + 0.006	0.0016	0.0005	0.0020	0.0015	0.0013	631	2186	490	668	1564
14	0.237	- 0.051 + 0.139	0.047	- 0.008 + 0.007	0.0014	0.0004	0.0019	0.0013	0.0012	701	2256	535	1005	335
16	0.248	- 0.051 + 0.144	0.0500	- 0.008 + 0.007	0.0013	0.0004	0.0017	0.0012	0.0011	764	2316	574	1140	437

Tablica A.3 Podaci za postaju UDBI. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.308	- 107 +0.029	0.034	-0.015 +0.005	0.0087	0.0039	0.0126	0.0080	0.0057	114	257	79	125	176
2	0.279	-0.034 +0.033	0.032	-0.004 +0.004	0.0064	0.0025	0.0089	0.0059	0.0044	156	402	112	168	225
3	0.280	-0.032 +0.036	0.033	-0.004 +0.005	0.0044	0.0017	0.0061	0.0041	0.0031	227	583	163	245	318
4	0.279	-0.035 +0.042	0.034	-0.005 +0.006	0.0034	0.0013	0.0047	0.0032	0.0025	293	757	211	317	406
5	0.278	-0.047 +0.046	0.035	-0.007 +0.007	0.0028	0.0011	0.0039	0.0026	0.0020	355	923	256	384	491
6	0.280	-0.051 +0.034	0.036	-0.007 +0.005	0.0024	0.0009	0.0033	0.0022	0.0017	416	1069	299	449	573
8	0.279	-0.034 +0.025	0.037	-0.004 +0.005	0.0019	0.0007	0.0026	0.0017	0.0014	538	1391	388	582	732
10	0.285	-0.028 +0.031	0.039	-0.004 +0.004	0.0016	0.0006	0.0022	0.0014	0.0011	644	1615	460	697	885
12	0.290	-0.031 +0.039	0.038	-0.004 +0.006	0.0013	0.0005	0.0018	0.0012	0.0010	798	1955	567	866	1033
14	0.281	-0.068 +0.041	0.038	-0.005 +0.006	0.0011	0.0004	0.0015	0.0010	0.0008	920	2354	661	995	1178
16	0.294	-0.044 +0.047	0.039	-0.006 +0.007	0.0010	0.0004	0.0014	0.0009	0.0008	1043	2505	736	1133	1320

Tablica A.4 Podaci za postaju SLNJ. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.279	-0.078+ 0.036	0.029	-0.010 +0.004	0.0078	0.0030	0.0108	0.0072	0.0063	129	333	93	139	159
2	0.262	-0.031 +0.027	0.030	-0.004 +0.003	0.0062	0.0022	0.0084	0.0057	0.0050	162	457	120	174	199
3	0.253	-0.030 +0.032	0.032	-0.004 +0.004	0.0044	0.0015	0.0059	0.0041	0.0037	225	665	168	241	273
4	0.247	-0.038 +0.048	0.033	-0.005 +0.007	0.0035	0.0011	0.0046	0.0032	0.0029	289	881	218	309	342
5	0.242	-0.061 +0.072	0.034	-0.009 +0.011	0.0029	0.0009	0.0038	0.0027	0.0025	348	1091	264	371	407
6	0.241	-0.080 +0.130	0.035	-0.012 +0.006	0.0025	0.0008	0.0032	0.0023	0.0021	405	1277	308	432	469
8	0.244	-0.052 +0.063	0.038	-0.008 +0.010	0.0020	0.0006	0.0026	0.0019	0.0017	500	1549	378	533	587
10	0.254	-0.051 +0.052	0.041	-0.006 +0.006	0.0017	0.0006	0.0023	0.0016	0.0014	587	1724	438	627	699
12	0.267	-0.060 +0.067	0.044	-0.005 +0.005	0.0015	0.0005	0.0020	0.0014	0.0012	668	1834	490	716	806
14	0.276	-0.070 +0.074	0.046	-0.005 +0.005	0.0013	0.0005	0.0018	0.0012	0.0011	755	1980	546	811	909
16	0.289	-0.099 +0.064	0.048	-0.006 +0.007	0.0012	0.0005	0.0017	0.0011	0.0010	842	2071	598	908	1008
18	0.180	-0.061 +0.071	0.035	-0.009 +0.010	0.0009	0.0002	0.0011	0.0008	0.0009	1126	5129	923	1178	1106
20	0.239	-0.082 +0.049	0.053	-0.011 +0.007	0.0011	0.0004	0.0015	0.0011	0.0008	890	2834	677	944	1200

Tablica A.5 Podaci za postaju NVLJ. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.325	-0.124 +0.072	0.025	-0.006 +0.004	0.0063	0.0030	0.0093	0.0057	0.0041	160	331	108	176	246
2	0.338	-0.067 +0.047	0.025	-0.004 +0.004	0.0046	0.0024	0.0070	0.0042	0.0033	217	425	144	241	303
3	0.339	-0.049 +0.050	0.025	-0.004 +0.004	0.0031	0.0016	0.0046	0.0028	0.0025	326	635	215	362	406
4	0.346	-0.032 +0.032	0.026	-0.004 +0.004	0.0024	0.0013	0.0036	0.0021	0.0020	422	798	276	470	499
5	0.346	-0.037 +0.038	0.027	-0.005 +0.005	0.0020	0.0010	0.0030	0.0018	0.0017	508	961	332	566	586
6	0.342	-0.036 +0.100	0.028	-0.005 +0.005	0.0017	0.0009	0.0026	0.0015	0.0015	585	1125	385	649	668
8	0.324	-0.040 +0.024	0.030	-0.005 +0.014	0.0014	0.0007	0.0021	0.0013	0.0012	708	1478	479	779	822
10	0.313	-0.023 +0.024	0.032	-0.011 +0.013	0.0012	0.0006	0.0018	0.0011	0.0010	817	1792	561	894	966
12	0.308	-0.023 +0.024	0.034	-0.012 +0.012	0.0011	0.0005	0.0016	0.0010	0.0009	916	2057	634	1000	1101
14	0.301	-0.025 +0.031	0.034	-0.012 +0.013	0.0009	0.0004	0.0014	0.0009	0.0008	1058	2456	739	1151	1230
16	0.297	-0.040 +0.030	0.035	-0.015 +0.017	0.0009	0.0004	0.0012	0.0008	0.0007	1167	2763	821	1269	1355
18	0.260	-0.036 +0.063	0.037	-0.021 +0.023	0.0008	0.0003	0.0011	0.0008	0.0007	1180	3359	873	1265	1474
20	0.253	-0.028 +0.035	0.035	-0.009 +0.025	0.0007	0.0002	0.0010	0.0007	0.0006	1373	4055	1026	1469	1591

Tablica A.6 Podaci za postaju RIY. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.315	-0.114 +0.036	0.031	-0.012 +0.004	0.0079	0.0036	0.0115	0.0072	0.0059	127	276	87	139	170
2	0.309	-0.032 +0.035	0.033	-0.004 +0.004	0.0064	0.0028	0.0092	0.0058	0.0046	157	352	109	172	218
3	0.302	-0.035 +0.036	0.032	-0.004 +0.004	0.0041	0.0018	0.0059	0.0038	0.0032	241	557	168	263	309
4	0.298	-0.043 +0.045	0.033	-0.006 +0.006	0.0032	0.0014	0.0046	0.0030	0.0025	310	730	218	337	395
5	0.292	-0.053 +0.057	0.033	-0.007 +0.007	0.0026	0.0011	0.0037	0.0024	0.0021	384	932	272	417	479
6	0.291	-0.072 +0.048	0.033	-0.009 +0.007	0.0022	0.0009	0.0031	0.0020	0.0018	460	1122	326	500	560
8	0.288	-0.053 +0.035	0.035	-0.007 +0.008	0.0017	0.0007	0.0024	0.0016	0.0014	576	1425	410	624	718
10	0.285	-0.031 +0.032	0.035	-0.004 +0.004	0.0014	0.0006	0.0019	0.0013	0.0012	717	1800	513	776	869
12	0.287	-0.029 +0.033	0.036	-0.004 +0.004	0.0012	0.0005	0.0017	0.0011	0.0010	839	2085	598	908	1017
14	0.283	-0.036 +0.039	0.037	-0.005 +0.005	0.0011	0.0004	0.0015	0.0010	0.0009	947	2400	679	1024	1161
16	0.279	-0.045 +0.048	0.037	-0.006 +0.007	0.0009	0.0004	0.0013	0.0009	0.0008	1077	2782	776	1162	1302
18	0.304	-0.057 +0.062	0.046	-0.008 +0.009	0.0010	0.0004	0.0014	0.0009	0.0007	1009	2311	702	1095	1441
20	0.303	-0.052 +0.054	0.048	-0.007 +0.007	0.0009	0.0004	0.0013	0.0009	0.0006	1073	2469	748	1163	1578

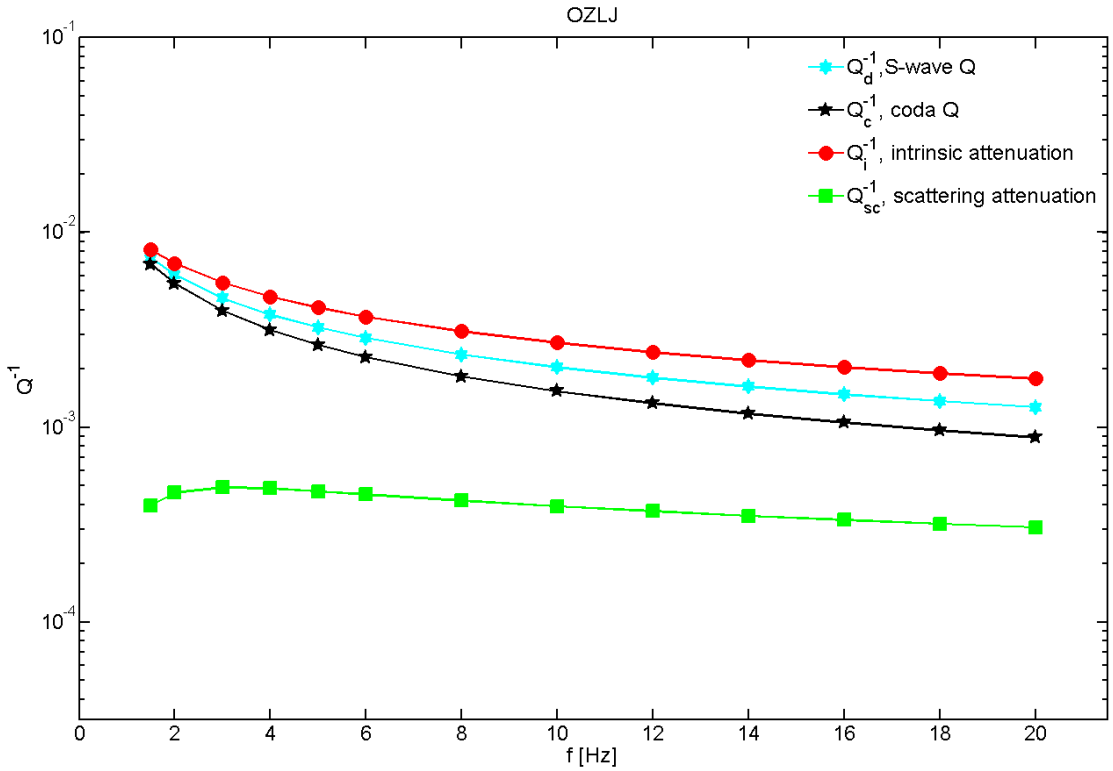
Tablica A.7 Podaci za sjeverne Vanjske Dinaride. Svi izračunati parametri atenuacije: seizmički albedo B_0 i ukupna atenuacija Le^{-1} s pripadnim greškama, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1}, atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1}, ukupne atenuacije Q_t^{-1}, očekivani Q_c^{-1}-faktor $Q_{c\,expected}^{-1}$, mjereni $Q_{c\,observed}^{-1}$ te intrinzični Q-faktor Q_i, faktor raspršenja Q_{sc}, faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t, očekivani koda-Q faktor $Q_{c\,expected}$ te mjereni $Q_{c\,observed}$ preuzet iz Dasović (2015).

$f(Hz)$	Bo	δBo	Le^{-1}	δLe^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_t^{-1}	$Q_{c\,expected}^{-1}$	$Q_{c\,obs}^{-1}$	Q_i	Q_{sc}	Q_t	$Q_{c\,exp}$	$Q_{c\,obs}$
1.5	0.299	-0.016 +0.010	0.030	-0.002 +0.001	0.0078	0.0033	0.0111	0.0072	0.0056	128	300	90	140	177
2	0.286	-0.011 +0.014	0.030	-0.001 +0.002	0.0060	0.0024	0.0084	0.0055	0.0043	168	418	120	182	231
3	0.284	-0.015 +0.016	0.031	-0.002 +0.002	0.0041	0.0016	0.0058	0.0038	0.0030	243	612	174	263	335
4	0.282	-0.016 +0.020	0.032	-0.002 +0.003	0.0032	0.0013	0.0045	0.0030	0.0023	313	796	224	338	437
5	0.281	-0.021 +0.017	0.033	-0.003 +0.002	0.0026	0.0010	0.0037	0.0024	0.0019	378	968	272	409	536
6	0.281	-0.023 +0.015	0.034	-0.003 +0.002	0.0023	0.0009	0.0032	0.0021	0.0016	441	1127	317	476	634
8	0.278	-0.016 +0.011	0.036	-0.002 +0.002	0.0018	0.0007	0.0025	0.0017	0.0012	553	1435	399	596	826
10	0.280	-0.014 +0.010	0.038	-0.002 +0.001	0.0015	0.0006	0.0021	0.0014	0.0010	656	1687	472	708	1015
12	0.278	-0.010 +0.010	0.038	-0.001 +0.001	0.0013	0.0005	0.0018	0.0012	0.0008	785	2039	567	847	1200
14	0.274	-0.010 +0.015	0.038	-0.001 +0.002	0.0011	0.0004	0.0015	0.0010	0.0007	911	2414	661	981	1383
16	0.284	-0.014 +0.016	0.040	-0.002 +0.002	0.0010	0.0004	0.0014	0.0009	0.0006	1003	2528	718	1083	1564
18	0.272	-0.022 +0.018	0.042	-0.003 +0.003	0.0009	0.0004	0.0013	0.0009	0.0006	1057	2829	769	1136	1743
20	0.277	-0.019 +0.016	0.044	-0.003 0.002	0.0009	0.0003	0.0012	0.0008	0.0005	1129	2946	816	1214	1920

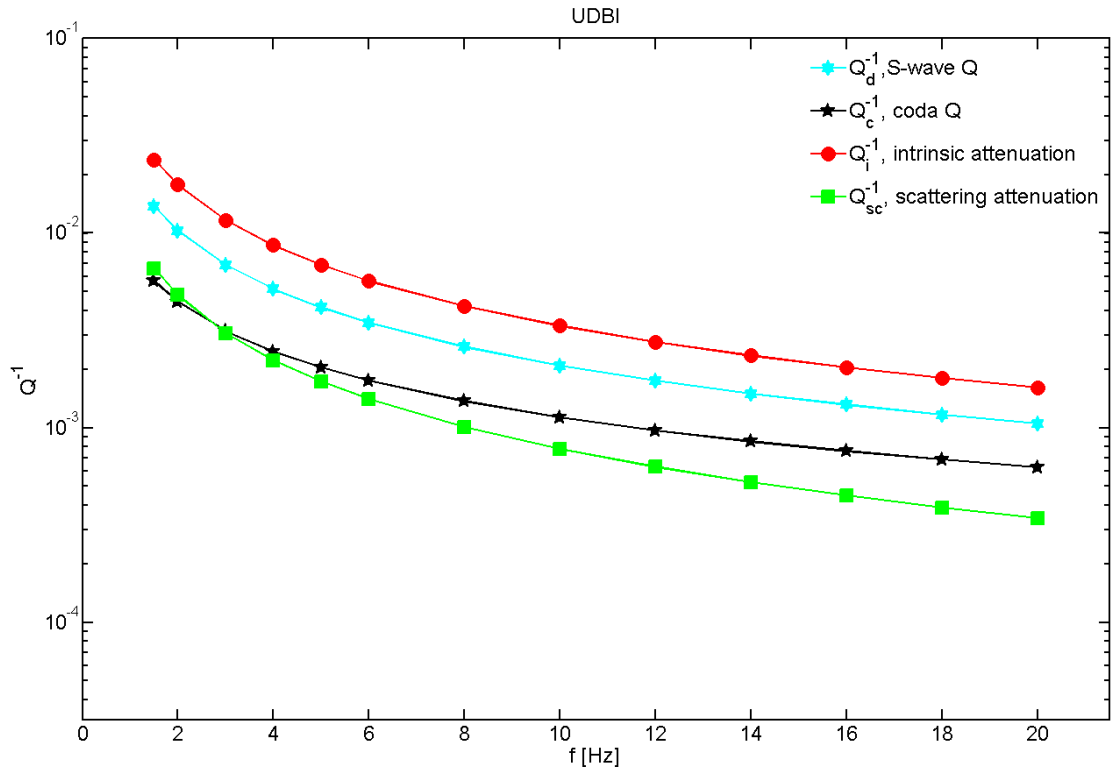
Prilog B

Rezultati Wennerbergove metode

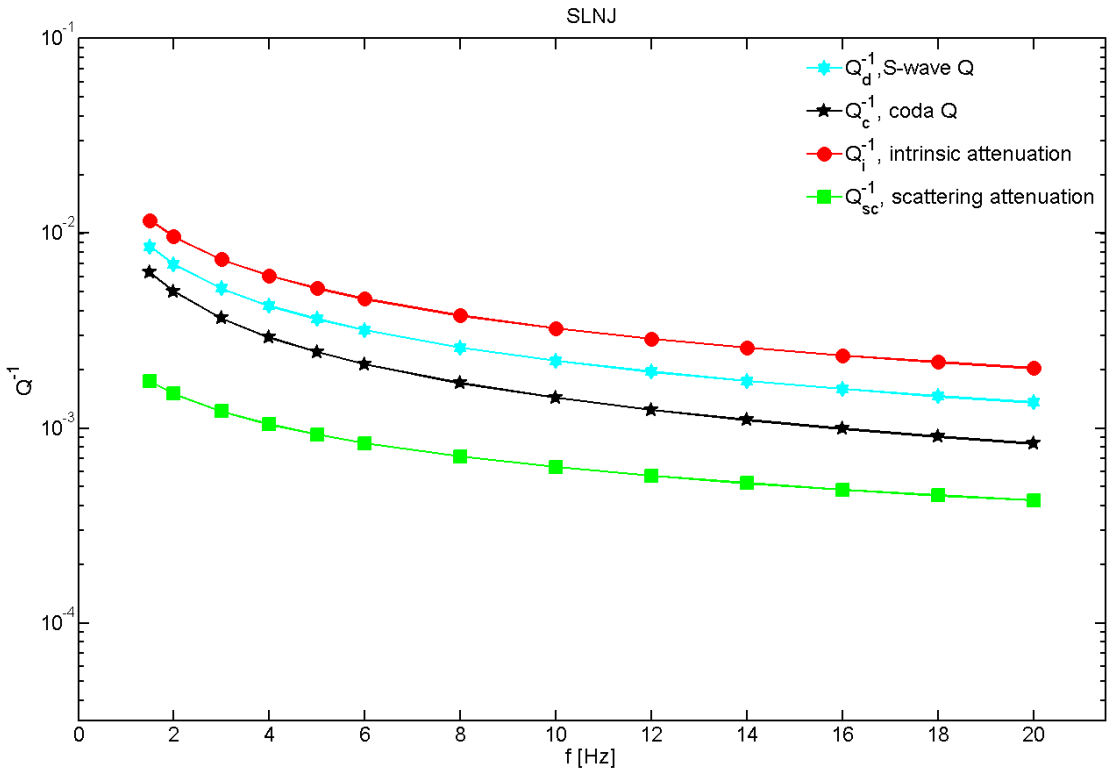
Ovaj prilog sadrži slike usporedbe faktora atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobivene Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi za postaje: OZLJ, UDBI, SLNJ, NVLJ i RIY, te tablice s vrijednostima izračunatih parametara za sve navedene postaje uključujući i KSY.



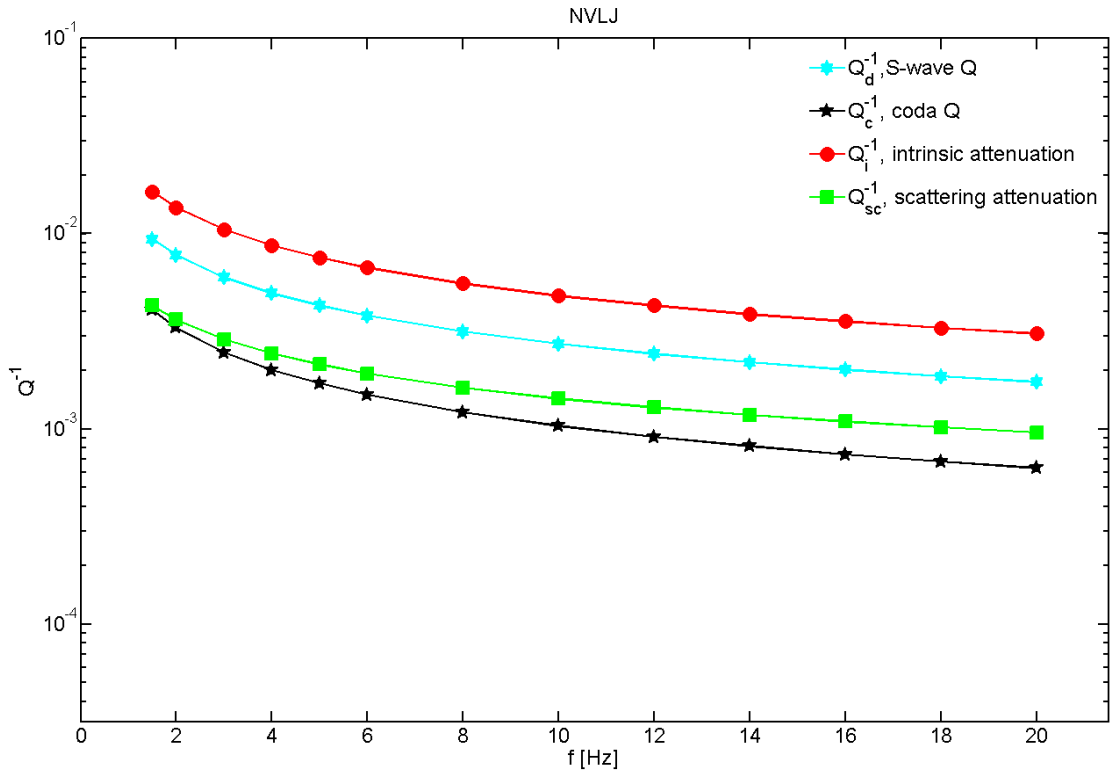
Slika B.1 Rezultati za postaju OZLJ. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi.



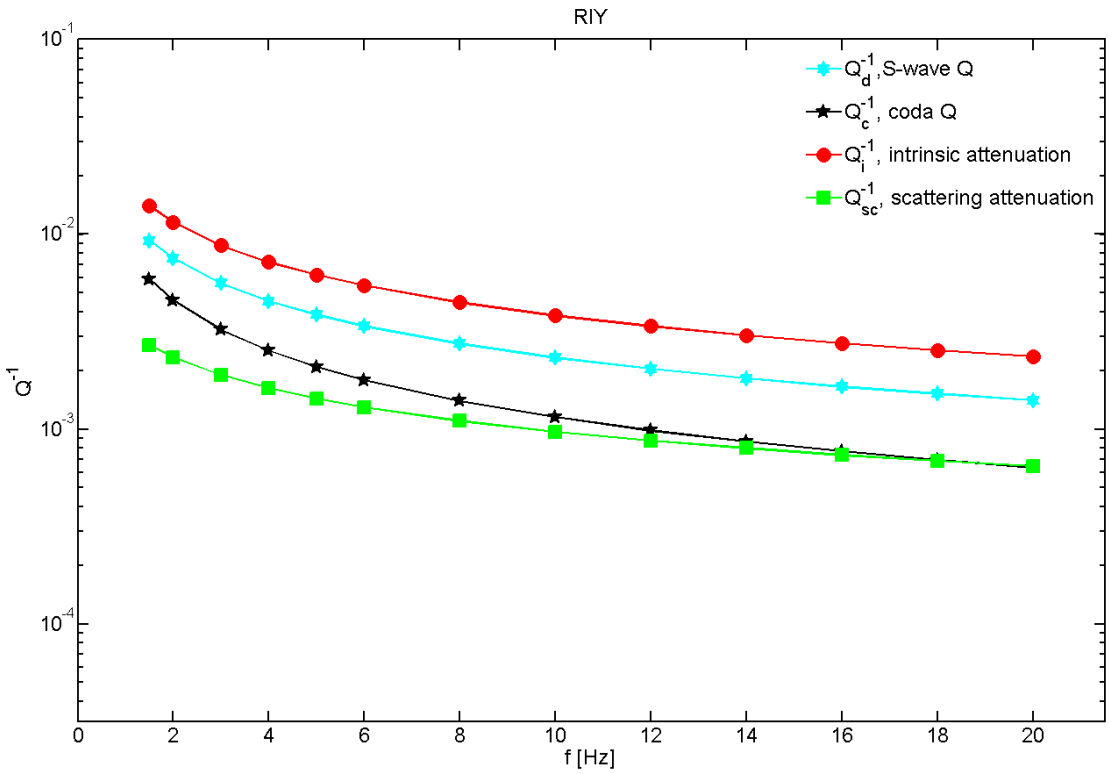
Slika B.2 Rezultati za postaju UDBI. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi.



Slika B.3 Rezultati za postaju UDBI. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi.



Slika B.4 Rezultati za postaju UDBI. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi.



Slika B.5 Rezultati za postaju RIY. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi.

Tablica B.1 Podaci za postaju KSY. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi, te pripadni Q-faktori.

$f\ [Hz]$	Q_C^{-1}	Q_D^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_C	Q_D	Q_i	Q_{sc}
1.5	0.0056	0.0098	0.0153	0.0033	177	102	65	306
2	0.0043	0.0078	0.0125	0.0028	231	128	80	359
3	0.0030	0.0057	0.0093	0.0022	335	175	107	453
4	0.0023	0.0046	0.0076	0.0019	437	218	132	537
5	0.0019	0.0039	0.0064	0.0016	536	259	155	615
6	0.0016	0.0034	0.0056	0.0015	634	298	177	687
8	0.0012	0.0027	0.0046	0.0012	826	372	219	822
10	0.0010	0.0023	0.0039	0.0011	1015	442	258	945
12	0.0008	0.0020	0.0034	0.0009	1200	508	295	1061
14	0.0007	0.0017	0.0030	0.0009	1383	572	330	1171
16	0.0006	0.0016	0.0027	0.0008	1564	634	365	1276
18	0.0006	0.0014	0.0025	0.0007	1743	694	398	1377
20	0.0005	0.0013	0.0023	0.0007	1920	753	430	1474

Tablica B.2 Podaci za postaju OZLJ. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi, te pripadni Q-faktori.

$f\ [Hz]$	Q_C^{-1}	$Q_D^{-1} - \sigma$	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_C	$Q_D - \sigma$	Q_i	Q_{sc}
1.5	0.0068	0.0074	0.0081	0.0004	146	136	123	2524
2	0.0055	0.0061	0.0069	0.0005	183	165	144	2169
3	0.0040	0.0046	0.0055	0.0005	252	217	181	2036
4	0.0032	0.0038	0.0047	0.0005	317	264	214	2065
5	0.0026	0.0032	0.0041	0.0005	378	308	244	2133
6	0.0023	0.0029	0.0037	0.0005	437	348	272	2213
8	0.0018	0.0024	0.0031	0.0004	548	424	322	2381
10	0.0015	0.0020	0.0027	0.0004	654	493	369	2546
12	0.0013	0.0018	0.0024	0.0004	755	558	412	2704
14	0.0012	0.0016	0.0022	0.0004	853	620	453	2855
16	0.0011	0.0015	0.0020	0.0003	947	679	492	2999
18	0.0010	0.0014	0.0019	0.0003	1040	735	529	3136
20	0.0009	0.0013	0.0018	0.0003	1130	790	564	3268

Tablica B.3 Podaci za postaju UDBI.Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi, te pripadni Q-faktori.

$f\ [Hz]$	Q_C^{-1}	Q_D^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_C	Q_D	Q_i	Q_{sc}
1.5	0.0057	0.0137	0.0238	0.0066	176	73	42	152
2	0.0044	0.0103	0.0177	0.0048	225	97	56	208
3	0.0031	0.0069	0.0117	0.0031	318	145	86	327
4	0.0025	0.0052	0.0087	0.0022	406	193	116	451
5	0.0020	0.0041	0.0069	0.0017	491	241	146	580
6	0.0017	0.0035	0.0057	0.0014	573	289	176	713
8	0.0014	0.0026	0.0042	0.0010	732	384	238	992
10	0.0011	0.0021	0.0033	0.0008	885	479	300	1284
12	0.0010	0.0017	0.0028	0.0006	1033	574	363	1589
14	0.0008	0.0015	0.0023	0.0005	1178	668	427	1906
16	0.0008	0.0013	0.0020	0.0004	1320	763	491	2233
18	0.0007	0.0012	0.0018	0.0004	1458	857	556	2571
20	0.0006	0.0011	0.0016	0.0003	1595	951	621	2918

Tablica B.4 Podaci za postaju SLNJ Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi, te pripadni Q-faktori.

$f\ [Hz]$	Q_C^{-1}	Q_D^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_C	Q_D	Q_i	Q_{sc}
1.5	0.0063	0.0085	0.0117	0.0017	159	117	86	574
2	0.0050	0.0069	0.0096	0.0015	199	144	104	665
3	0.0037	0.0052	0.0073	0.0012	273	192	136	821
4	0.0029	0.0042	0.0060	0.0010	342	235	165	957
5	0.0025	0.0036	0.0052	0.0009	407	276	192	1080
6	0.0021	0.0032	0.0046	0.0008	469	314	217	1193
8	0.0017	0.0026	0.0038	0.0007	587	385	264	1399
10	0.0014	0.0022	0.0033	0.0006	699	451	307	1585
12	0.0012	0.0019	0.0029	0.0006	806	514	348	1756
14	0.0011	0.0017	0.0026	0.0005	909	573	387	1916
16	0.0010	0.0016	0.0024	0.0005	1008	630	423	2067
18	0.0009	0.0015	0.0022	0.0005	1106	685	459	2211
20	0.0008	0.0014	0.0020	0.0004	1200	738	493	2349

Tablica B.5 Podaci za postaju SLNJ. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi, te pripadni Q-faktori.

$f\ [Hz]$	Q_C^{-1}	Q_D^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_C	Q_D	Q_i	Q_{sc}
1.5	0.0041	0.0094	0.0164	0.0043	246	107	61	234
2	0.0033	0.0078	0.0136	0.0036	303	129	73	276
3	0.0025	0.0060	0.0105	0.0029	406	167	95	349
4	0.0020	0.0050	0.0087	0.0024	499	202	115	412
5	0.0017	0.0043	0.0075	0.0021	586	233	133	469
6	0.0015	0.0038	0.0067	0.0019	668	263	149	521
8	0.0012	0.0032	0.0056	0.0016	822	317	180	615
10	0.0010	0.0027	0.0048	0.0014	966	366	208	700
12	0.0009	0.0024	0.0043	0.0013	1101	412	234	778
14	0.0008	0.0022	0.0039	0.0012	1230	456	259	850
16	0.0007	0.0020	0.0035	0.0011	1355	497	282	919
18	0.0007	0.0019	0.0033	0.0010	1474	537	305	984
20	0.0006	0.0017	0.0031	0.0010	1591	575	326	1046

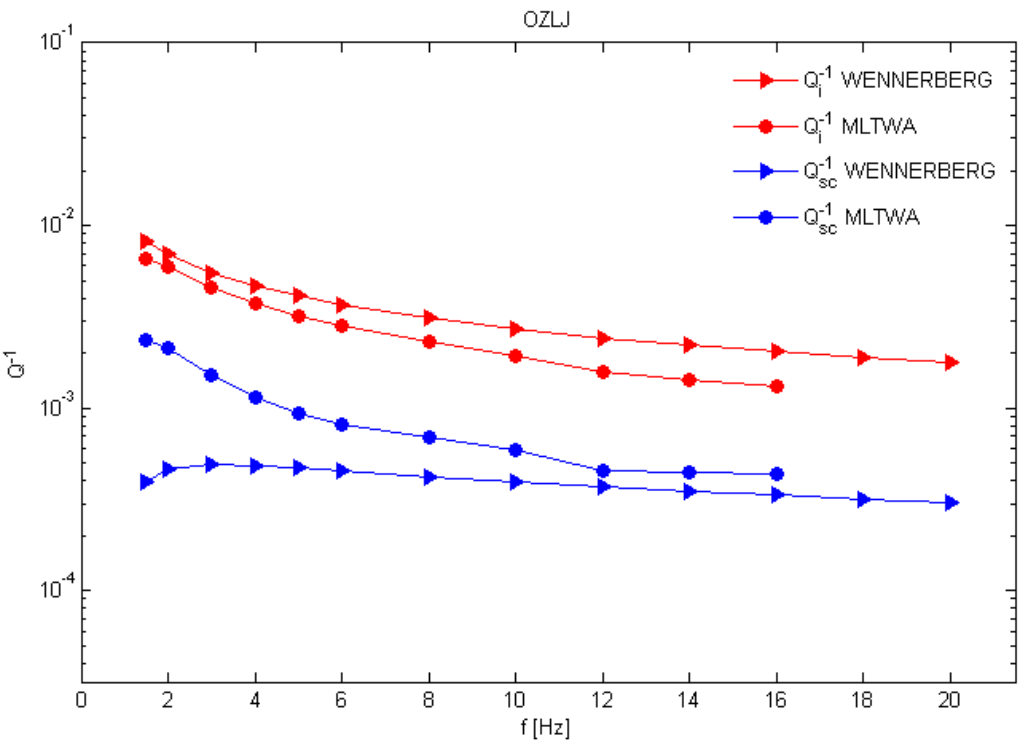
Tablica B.6 Podaci za postaju RIY. Faktor atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} i intrinzične atenuacije Q_i^{-1} dobiveni Wennerbergovom metodom, zajedno s vrijednostima faktora atenuacije S-vala Q_D^{-1} i kode Q_C^{-1} korištenih u metodi, te pripadni Q-faktori.

$f\ [Hz]$	Q_C^{-1}	Q_D^{-1}	Q_i^{-1}	Q_{sc}^{-1}	Q_C	Q_D	Q_i	Q_{sc}
1.5	0.0059	0.0093	0.0140	0.0027	170	108	72	371
2	0.0046	0.0075	0.0115	0.0023	218	133	87	428
3	0.0032	0.0056	0.0088	0.0019	309	178	114	528
4	0.0025	0.0045	0.0072	0.0016	395	220	139	617
5	0.0021	0.0039	0.0062	0.0014	479	259	162	697
6	0.0018	0.0034	0.0055	0.0013	560	296	183	772
8	0.0014	0.0027	0.0045	0.0011	718	365	224	908
10	0.0012	0.0023	0.0038	0.0010	869	430	261	1032
12	0.0010	0.0020	0.0034	0.0009	1017	491	297	1148
14	0.0009	0.0018	0.0030	0.0008	1161	549	330	1256
16	0.0008	0.0017	0.0028	0.0007	1302	605	363	1359
18	0.0007	0.0015	0.0025	0.0007	1441	660	394	1457
20	0.0006	0.0014	0.0024	0.0006	1578	713	424	1551

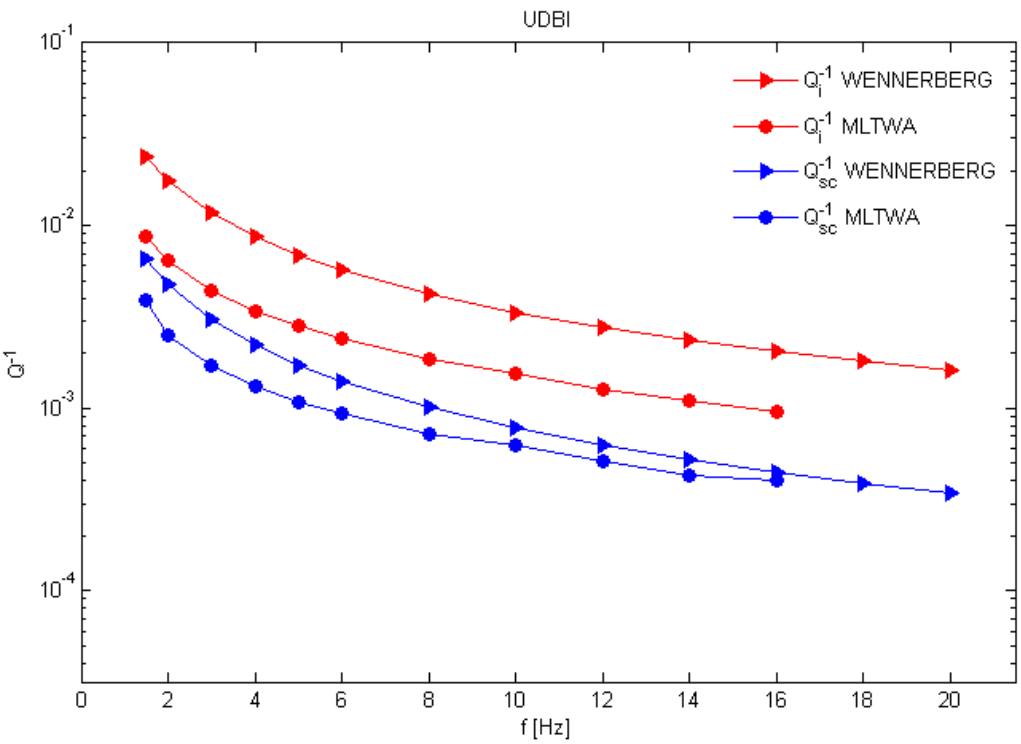
Prilog C

Usporedba rezultata metode MLTWA i Wennerbergove metode

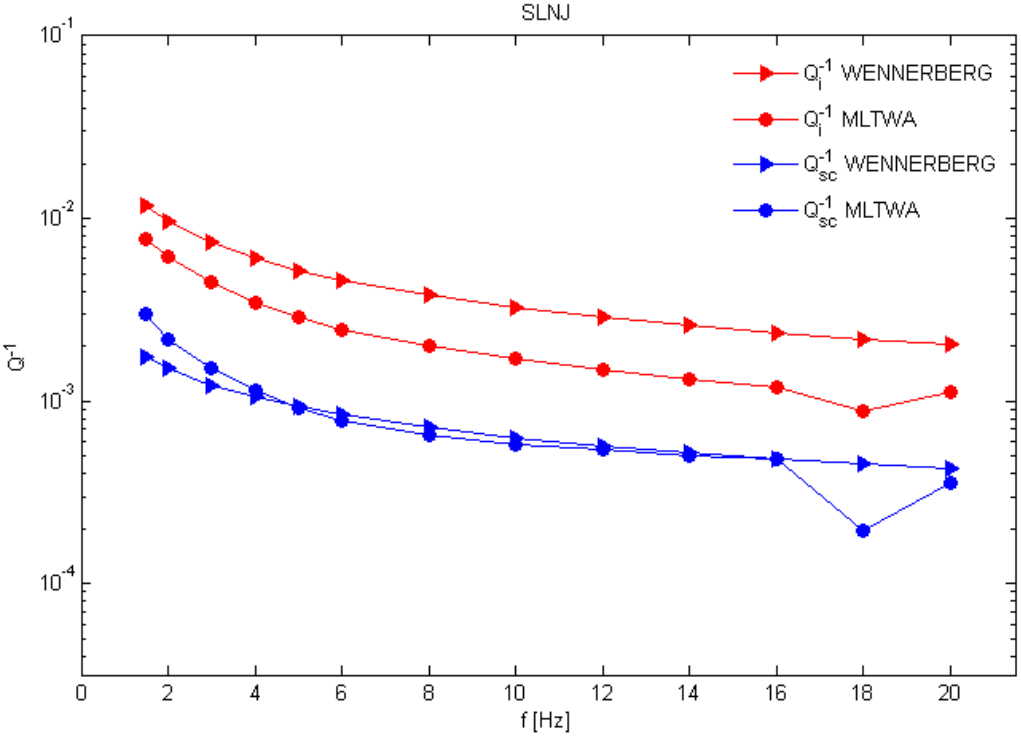
Na slikama su prikazane usporedbe faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metode MLTWA i Wennerbergovu metodu, za postaje OZLJ, UDBI, SLNJ, NVLJ i RIY.



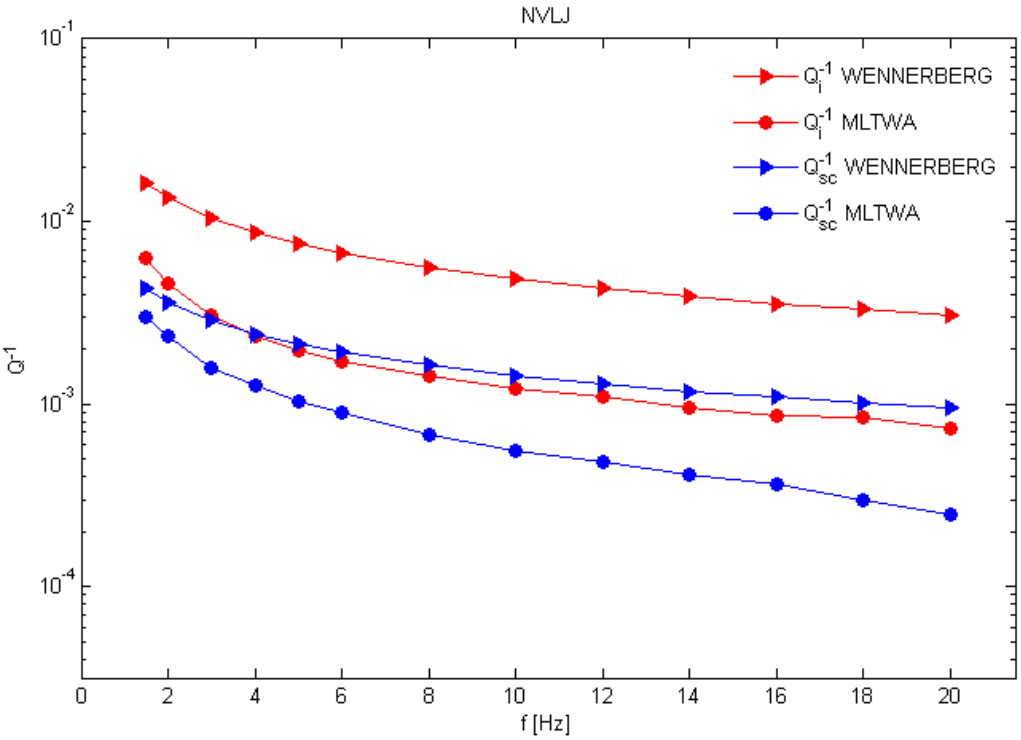
Slika C.1 Rezultati za postaju OZLJ. Usporedbe faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metodu MLTWA i Wennerbergovu metodu.



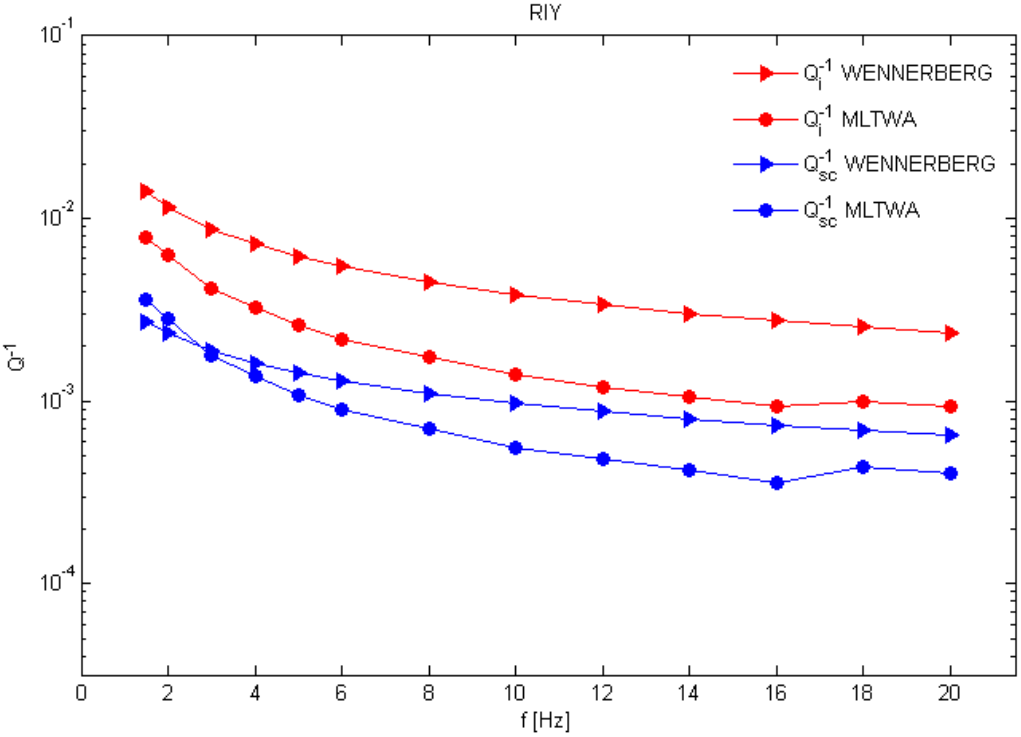
Slika C.2 Rezultati za postaju UDBI. Usporedbe faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metodu MLTWA i Wennerbergovu metodu.



Slika C.3 Rezultati za postaju SLNJ.Usporedbe faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metodu MLTWA i Wennerbergovu metodu.



Slika C.4 Rezultati za postaju NVLJ. Usporedbe faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metodu MLTWA i Wennerbergovu metodu.



Slika C.5 Rezultati za postaju RIY. Usporedbe faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} i faktora raspršenja Q_{sc}^{-1} procjenjenje za metodu MLTWA i Wennerbergovu metodu.