

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Tena Belinić, Josipa Majstorović, Dalija Namjesnik

**Intrinzična atenuacija i atenuacija raspršenja seizmičkih  
transverzalnih valova u području središnjih Vanjskih Dinarida**

Zagreb, 2015.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta pod vodstvom prof. dr. sc. Davorke Herak, uz neposredno voditeljstvo Ive Dasović, dipl. ing. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2014./2015.

## Korištene kratice

$Q$	faktor dobrote, $Q$ -faktor
$Q_c$	faktor dobrote koda valova
$Q_i^{-1}$	faktor intrinzične atenuacije
$Q_{sc}^{-1}$	faktor atenuacije raspršenja
$Q_t^{-1}$	faktor ukupne atenuacije
$Q_{c\ expected}^{-1}$	očekivani $Q^{-1}$ -faktor
$Q_{c\ observed}^{-1}$	mjereni $Q^{-1}$ -faktor
$B_0$	seizmički albedo
$Le^{-1}$	ukupna atenuacija (engl. <i>extinction distance</i> )
$Le$	udaljenost utrnuća
$\eta_i$	koeficijent intrinzične atenuacije
$\eta_s$	koeficijent atenuacije raspršenja
$E_c$	teorijski dobivena energija
$E_m$	eksperimentalno dobivena energija
$f_c$	središnja frekvencija pojasnog filtra
$v$	brzina transverzalnog S-vala
$MLTWA$	Metoda analize pomoću višestrukih vremenskih prozora (engl. <i>Multiple Lapse Time Window Analysis</i> )

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teorijska pozadina</b>	<b>3</b>
2.1	Atenuacija seizmičkih valova . . . . .	3
2.2	Koda valovi . . . . .	5
2.3	Model višestrukog raspršenja . . . . .	6
2.3.1	Seizmički albedo $B_0$ i ukupna atenuacija $Le^{-1}$ . . . . .	8
2.4	Kompaktno rješenje za višestruko raspršenje valne energije u vremenskoj domeni . . . . .	9
2.4.1	Energija višestruko raspršenih valova za slučaj kada se prijamnik i izvor nalaze u istoj točki . . . . .	10
2.4.2	Aproksimacija energije višestruko raspršenih valova pomoću jednostrukog raspršenja i difuzije . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Metoda i analiza podataka</b>	<b>15</b>
3.1	Podaci i seizmotektonsko okruženje . . . . .	15
3.2	Metoda . . . . .	18
3.2.1	Seizmička energija izračunata u skladu s teorijom višestrukog raspršenja . . . . .	19
3.2.2	Energija određena iz seizmograma potresa . . . . .	21
3.2.3	Procjena parametara $B_0$ i $Le^{-1}$ uspoređivanjem teorijski i eksperimentalno dobivenih energija . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Rezultati i diskusija</b>	<b>26</b>
4.1	Izračun $Q^{-1}$ -faktora i dosadašnja istraživanja . . . . .	26
4.2	Rezultati i diskusija za pojedinačne postaje . . . . .	27
4.3	Usporedba $Q_{sc}^{-1}$ i $Q_i^{-1}$ -faktora za sve postaje . . . . .	30
4.4	Rezultati $Q^{-1}$ -faktora za središnji dio Vanjskih Dinarida . . . . .	31
4.5	Usporedba $Q_{sc}^{-1}$ i $Q_i^{-1}$ -faktora središnjih Vanjskih Dinarida s drugim regijama u svijetu . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Zaključci</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Literatura</b>	<b>36</b>

<b>Dodatak A</b>	<b>41</b>
<b>Dodatak B</b>	<b>45</b>
<b>Dodatak C</b>	<b>49</b>
<b>Dodatak D</b>	<b>52</b>
<b>Zahvale</b>	<b>56</b>
<b>Sažetak</b>	<b>57</b>
<b>Summary</b>	<b>58</b>

# 1 Uvod

Proučavanje rasprostiranja i atenuacije visokofrekventnih S-valova (od 1 do 20 Hz) u gornjem dijelu Zemljine litosfere od velikog je značaja za seizmologiju, ali i za građevinarstvo općenito, jer ovi valovi mogu nanijeti veliku štetu zgradama i ostalim objektima tijekom jakog potresa. Procjena seizmičkog hazarda i parametara izvora potresa zahtijevaju dobro poznavanje atenuacije i svojstava sredstva. Atenuacija je proces smanjenja amplitude seizmičkih valova tijekom njihove propagacije, koji se ne može objasniti geometrijskim rasprostiranjem, odnosno širenjem valne fronte. Opisuje se inverzom faktora dobrote  $Q$  i od posebne je važnosti za razumijevanje rasprostiranja energije potresa kroz litosferu jer njeno poznavanje daje dodatan uvid u svojstva promatranog područja. Mnoga dosadašnja istraživanja atenuacije pokazala su postojanje ovisnosti faktora dobrote  $Q$  o frekvenciji, odnosno da je atenuacija na nižim frekvencijama jače izražena nego na višim.

To potvrđuju i dosadašnja istraživanja koda valova na području Hrvatske, iako ih je dosad na ovom području bilo svega nekoliko. Rovelli (1984) proučavao je područje susjedne Crne Gore, uključujući Dubrovnik i okolicu. M. Herak (1991) i Dasović i sur. (2012, 2013) analizirali su atenuaciju koda valova primjenom modificirane koda  $Q$  metode (Aki i Choquet, 1975) na području Vanjskih Dinarida i okolnog područja te su dobivene procjenjene vrijednosti koda  $Q$  faktora.

Područje središnjih Vanjskih Dinarida jedno je od seizmički najaktivnijih područja Dinarida. Prema Heraku i sur. (2011), to je područje najveće potresne opasnosti u Hrvatskoj i susjednim zemljama. To nas je motiviralo da napravimo istraživanje atenuacije upravo na tom području. Budući da u dosadašnjim istraživanjima nisu određeni doprinosi intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja, cilj ovog rada je po prvi put razdvojiti utjecaj ta dva procesa. Kako bismo to postigle, odlučile smo primijeniti metodu analize pomoću višestrukih vremenskih prozora (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis*, dalje u tekstu MLTWA). Atenuacija raspršenja opisuje se recipročnom vrijednošću faktora dobrote,  $Q_{sc}^{-1}$ . Posljedica je raspršenja seizmičkih valova na nehomogenostima u sredstvu, odnosno preraspodjele energije refleksijom, refrakcijom i konverzijom seizmičkih valova te ne predstavlja stvarni gubitak energije. Dakle, ovisi o strukturi sredstva, tj. o promjenama u seizmičkim brzinama i gustoći. Atenuacija zbog unutarnje apsorpcije i trenja,  $Q_i^{-1}$ , uzrokovana je neelastičnošću

sredstva i ovisi o viskoznim procesima između matriksa<sup>1</sup> stijene i fluida sadržanih u porama te implicira konverziju elastične energije vala u toplinu. Među seizmolozima postoji veliki interes za kvantificiranje relativnih doprinosa atenuacije raspršenja i intrinzične atenuacije te je dosad razvijeno više metoda (npr. Wu 1985, Hoshiha i sur., 1991).

MLTWA-metoda koju primjenjujemo u ovom radu razvio je Hoshiha sa suradnicima 1991. godine. Ova metoda daje informacije o vremenskoj promjeni seizmičke energije u višestrukim uzastopnim vremenskim prozorima kao funkciju hipocentralne udaljenosti. Pod pretpostavkom izotropne razdiobe raspršivača, računaju se dva parametra atenuacije: seizmički albedo  $B_0$ , definiran kao bezdimenzionalni omjer gubitka energije zbog raspršenja i ukupne atenuacije, te ukupna atenuacija  $Le^{-1}$ , odnosno recipročna vrijednost udaljenosti (u kilometrima) na kojoj se energija primarnog S-vala smanji za faktor  $e^{-1}$ . Faktor  $B_0$  poprima vrijednosti između 0 i 1, a predložio ga je Wu (1985) kako bi opisao gubitak energije te odredio dominira li intrinzična atenuacija ( $B_0 < 0.5$ ) ili atenuacija raspršenja ( $B_0 > 0.5$ ). U ovom radu iz veličina  $B_0$  i  $Le^{-1}$  procijenjene su vrijednosti faktora atenuacije raspršenja  $Q_{sc}^{-1}$  i intrinzične atenuacije  $Q_t^{-1}$  u rasponu središnjih frekvencija između 1.5 Hz i 16 Hz za potrese zapisane na osam seizmoloških postaja smještenih na području središnjih Vanjskih Dinarida. Dobivene procjene faktora ukupne atenuacije  $Q_t^{-1}$  uspoređene su s rezultatima dosadašnjih mjerenja na istom području (Dasović i sur., 2012) te s rezultatima drugih regija svijeta.

---

<sup>1</sup>U sedimentologiji – kontinuirani sitnozrnasti i fino-zrnasti materijal koji okružuje veća zrna ili čestice sedimenta ili sedimentne stijene ili ispunjava porne šupljine između njih.

## 2 Teorijska pozadina

### 2.1 Atenuacija seizmičkih valova

Analiza seizmičkih valova, u svrhu proučavanja strukture kore ili određivanja parametara izvora potresa, uglavnom se temelji na pretpostavci lateralno homogenih modela Zemlje. Takva pretpostavka čini se prihvatljivom za valove velikih perioda (niskofrekventni valovi), ali ne i za valove malih perioda (visokofrekventni valovi) koji su kontrolirani plitkim dijelovima Zemljine kore, stoga se uvode lateralno heterogeni modeli Zemlje.

Lateralno heterogeni modeli opisuju realnu Zemlju, odnosno temelje se na pretpostavci da Zemlja nije idealno elastično, homogeno i izotropno sredstvo. Geofizičari karakteriziraju heterogenost na temelju promjene fizičkih svojstva Zemlje, kao što su brzina i gustoća stijena, dok geolozi uzimaju u obzir mineralnu kompoziciju stijena i veličine zrna stijena (Sato i sur., 2012). Kada bi Zemlja bila idealno elastično tijelo, amplituda seizmičkog vala bila bi ovisna jedino o pojavi geometrijskog rasprostiranja valne fronte te refleksiji i transmisiji energije na graničnim slojevima. To bi značilo da jednom pobuđeni valovi traju vječno. U stvarnosti amplitude valova s vremenom atenuiraju (opadaju, trnu). Atenuacija valova uzrokovana je dodatnim procesima kao što su apsorpcija ili unutarnje trenje i raspršenje na heterogenostima (refleksija, refrakcija i transmisija seizmičkih valova).

Atenuacija zbog neelastičnosti odnosi se na različite mehanizme koji pretvaraju mehaničku vibracijsku energiju u toplinu zbog unutarnjeg trenja i viskoznosti (npr. kretanje fluida u porama). Ovaj proces najjednostavnije se može opisati sustavom gušenog harmonijskog oscilatora. Ako zanemarimo silu trenja, odnosno silu mirenja, mali pomaci bilo kojeg sustava iz položaja ravnoteže prouzročit će jednostavno harmonijsko gibanje koje bi trajalo zauvijek. Međutim, ako promatramo gušeni harmonijski oscilator u čijem sustavu postoji sila mirenja (zbog svojstva mehanizma i sredstva u kojem se sustav nalazi), dolazi do procesa atenuacije koji se opisuje faktorom dobrote ( $Q$ -faktor):

$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E}, \quad (2.1)$$

gdje je  $Q$  definiran gubitkom energije sustava ( $\Delta E$ ) unutar jedne oscilacije, tj. perioda, pri čemu je  $E$  ukupna energija sustava. U slučaju neelastičnosti faktor dobrote označava se oznakom  $Q_i$  (engl. *intrinsic*), pa se takva atenuacija naziva intrinzičnom, odnosno unutarnjom atenuacijom. Velik broj mehanizama koji uzrokuje ovu atenuaciju temelji se na opažanjima da se u stijenama nalaze mikroskopske pukotine i pore koje mogu biti ispunjene fluidima.



Na primjer, pukotine mogu utjecati na promjenu vrijednosti brzina prostornih seizmičkih valova. Na intrinzičnu atenuaciju utjecat će i povećanje broja mikropukotina, promjene u tlaku (povećanjem tlaka smanjuju se otvori pukotina i njihov efektivni broj i time se smanjuje atenuacija), stupanj zasićenosti stijene fluidima te atmosfersko djelovanje. Prema Dasović (2015) i referencama tamo, neki od mehanizama intrinzične atenuacije su:

1. trenje na granicama čestica i na stranicama pukotina;
2. tok fluida zbog smicanja na granici fluida i pora;
3. relativno gibanje okvira matriksa stijene u odnosu na inkluzije fluida u potpuno zasićenoj stijeni, jer vlaženje vodom i zasićenje stijena fluidima smanjuju koeficijent trenja i time omogućuju klizanje jedne strane pukotine po drugoj što povećava atenuaciju;
4. stiskanje plinskih džepova pri djelomičnom zasićenju stijena fluidima, jer prisutnost mjehurića plina u djelomično zasićenim pukotinama može pojačati kretanje fluida unutar pukotina što rezultira povećanjem atenuacije.

Prema ovome nedvojbeno je da će intrinzična atenuacija ovisiti o dubini, temperaturi, tlaku, veličini i obliku pukotina te fluida kojima su pukotine ispunjene.

Atenuacija zbog raspršenja objašnjava se preraspodjelom, a ne gubitkom energije vala na nehomogenostima u sredstvu (refleksijom, refrakcijom i/ili transmisijom). Zemljina kora je vrlo složena i sastoji se od niza slojeva i heterogenosti različitih dimenzija. Heterogenosti mogu biti rasjedi, pukotine različitih veličine, intruzije, nepravilnosti i slično. I ova se vrsta atenuacije opisuje faktorom dobrote – u ovom je slučaju oznaka  $Q_{sc}$  (engl. *scattering*). Ona ovisi o prostornoj raspodjeli raspršivača u sredstvu te o fluktuacijama brzina seizmičkih valova u stijenama i fluktuacijama gustoće stijena.

Atenuaciju seizmičkih valova možemo procijeniti analizom koda valova (engl. *coda waves*) koji su njena izravna posljedica. Koda valovi na seizmogramu vidljivi su u obliku „repa” sastavljenog od nepravilnih oscilacija te predstavljaju posebnost lokalnih potresa (do stotinjak kilometara epicentralne udaljenosti). Interpretiraju se kao seizmički valovi nastali raspršenjem unatrag na slučajnim lateralnim heterogenostima u Zemljinoj litosferi, pri čemu daju informaciju o prosječnim svojstvima sredstva kojim se rasprostiru, no ne i o samoj stazi vala od izvora do postaje. Faktor dobrote koji se računa na temelju koda valova lokalni je faktor dobrote  $Q_c$  koji sadrži u sebi kombinaciju oba doprinosa atenuacije – neelastički  $Q_i$  i

od raspršenja  $Q_{sc}$ :

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_{sc}} \quad (2.2)$$

Atenuacija je veća što je  $Q$  manji i obrnuto. U slučaju jakog raspršenja i male apsorpcije (intrinzične atenuacije), zapis na seizmogramu je dug i vretenastog oblika (npr. lunarni seizmogrami). U suprotnom, kada je apsorpcija velika i raspršenje malo, imamo kratak zapis potresa pa na seizmogramu dominiraju izravne faze valova.

## 2.2 *Koda valovi*

Pojava koda valova na seizmogramu najistaknutiji je dokaz postojanja heterogenosti u litosferi. Na tipičnim zapisima lokalnih potresa (epicentralne udaljenosti oko sto kilometara) S-koda slijedi izravni S-val, dok analogno P-koda slijedi izravni P-val. Obično se pod kodom podrazumijeva koda S-valova. Oni opisuju oscilacije tla koje traju nakon prolaska svih direktnih, lomljenih i/ili reflektiranih faza. Početak kode pridjeljuje se točki gdje pad amplitude postaje pravilan, a u praksi uzima se dvostruko vrijeme putovanja S-valova (od žarišta), dok se kraj kode smješta tamo gdje je omjer signala i šuma jednak dva.

Dok se amplituda izravnih S-valova smanjuje s povećanjem epicentralne udaljenosti, prosječna amplituda S-kode ima gotovo jednaku amplitudu neovisno o epicentralnoj udaljenosti. Njena ovojnica trne približno eksponencijalno u vremenu i ovisi o lokalnim svojstvima unutrašnjosti Zemlje u širokom području oko postaje. Kako se smatra da je nastanak koda valova posljedica slučajnih procesa, odnosno superpozicija sekundarnih valova generiranih nailaskom primarnih valova na heterogenostima u sredstvu, koda valovi mogu se analizirati statističkim metodama. Statistički pristup pogodan je zbog korištenja malog broja statističkih parametara potrebnih za opisivanje heterogenosti Zemlje. Osobito je pogodan za razmatranje kratkoperiodičkih valova nastalih na malim dubinama u Zemljinoj kori, na koje snažno utječu mehanizam u žarištu i parametri sredstva. Informacija dobivena na ovaj način prikazuje usrednjena svojstva sredstva zbog toga što valovi koji čine koda valove mogu imati sasvim različite staze (Dasović, 2009).

Postoji nekoliko modela koji opisuju nastanak koda valova, a to su:

- jednostruko (povratno) raspršenje unatrag,
- izotropno jednostruko (povratno) raspršenje,
- višestruko raspršenje,

- teorija difuzije,
- model toka energije.

Model koji opisuje nastanak koda valova općenito treba objasniti šest grupa opažanja povezanih s koda valovima (Aki i Chouet, 1975):

1. spektri koda valova na različitim postajama gotovo se ne razlikuju (raniji dijelovi seizmograma jako ovise o putu koji valovi prelaze od izvora do postaje);
2. trajanje lokalnih seizmograma ovisi približno samo o magnitudi, ne i o epicentralnoj udaljenosti;
3. spektri snage koda valova različitih lokalnih potresa trnu s vremenom na sličan način;
4. vremensko opadanje spektra snage koda valova ne ovisi o magnitudi potresa;
5. amplitude koda valova ovise o lokalnim uvjetima tla na postaji;
6. analizom zapisa kode na mrežama seizmoloških postaja jasno je da to nisu ravni valovi koji dolaze iz hipocentra.

### **2.3 Model višestrukog raspršenja**

Proučavanje raspršenih seizmičkih valova djelotvoran je alat za istraživanje Zemljinih nehomogenosti. Aki (1969), Aki i Chouet (1975) i Sato (1977) u svojim istraživanjima pretpostavili su da je Zemlja slučajno nehomogeno sredstvo. Aki i Chouet (1975) predložili su model jednostrukog raspršenja unatrag: najjednostavniji i najprihvaćeniji model generiranja koda valova — pretpostavljaju slabo raspršenje koje ne proizvodi drugu generaciju valova kada val naiđe na heterogenost. Međutim, kako model jednostrukog raspršenja unatrag zanemaruje raspršenje višeg reda, valjanost ovog modela uvijek je bila upitna. Kako bi se ovo pitanje razjasnilo, predložene su mnoge teorije i provedene brojne numeričke simulacije za istraživanje procesa višestrukog raspršenja (pregled se može pogledati u Satu i sur., 2012). Također, jedan od glavnih motiva za uvođenje metoda višestrukog raspršenja jest kvantificiranje doprinosa raspršenja na heterogenostima i neelastičnosti sredstva ukupnoj atenuaciji definiranoj prema relaciji (2.2).

Povijesno gledano, teorija višestrukog raspršenja razvijena je pomoću dva različita pristupa: analitičkom teorijom i teorijom radijacijskog prijenosa (engl. *radiative transfer the-*

ory). Oba pristupa statističkim metodama opisuju rasprostiranje valova u slučajnom sredstvu. Budući da su kompleksne heterogenosti modelirane unutar slučajnog sredstva, valno polje u sredstvu također je slučajno. Pri takvoj definiciji zanimaju nas statistički parametri valnog polja kao što su srednja vrijednost intenziteta, fluktuacije faze i amplitude itd. Analitička teorija kreće od osnovne diferencijalne jednačbe (na primjer valne jednačbe) te uvođenjem raspršenja i neelastičnosti razvija diferencijalno ili integralno rješenje valnog polja. Teorija radijacijskog prijenosa, s druge strane, proučava energiju procesa prijenosa. Ova teorija direktno se bavi prijenosom energije u sredstvu koje sadrži raspršivače. Dakle, jedino se energija ili njen intenzitet pojavljuju u ovom pristupu stoga ona znatno pojednostavljuje matematičku pozadinu. Teorija radijacijskog prijenosa ima svoje korijene u Boltzmanovoj jednačbi kinetičke teorije plinova i teoriji prijenosa neutrona.

Wu (1985) te Wu i Aki (1988) prvi put su koristili teoriju radijacijskog prijenosa energije za modeliranje visokofrekventnih seizmograma lokalnih potresa. Shang i Gao (1988) formulirali su proces višestrukog izotropnog raspršenja u 2-D heterogenom sredstvu u obliku integralne jednačbe za nestacionarno stanje koje odgovara slučaju impulsne radijacije. Zeng i sur. (1991) proširili su nestacionarnu teoriju na 3-D heterogeno sredstvo. Korištenjem rješenja za model višestrukog izotropnog raspršenja, Hoshiha i sur. (1991) te Fehler i sur. (1992) razvili su metodu analize pomoću višestrukih vremenskih prozora, MLTWA-metodu, za istovremeno računanje relativnog intrinzičnog doprinosa i doprinosa raspršenja sredstva ukupnoj atenuaciji.

Metoda, koju je 1985. godine predstavio Wu, bazirala se na stacionarnom modelu energije koja se rasprostire u slučajnom heterogenom elastičnom sredstvu. Pretpostavka stacionarne energije podrazumijeva da se energija cijelo vrijeme emitira iz izvora, što je u suprotnosti s impulsnim izvorom seizmičke energije, koji je kasnije implementiran u nestacionarnom modelu. Uz pretpostavku stacionarnog modela, Wu je pretpostavio da je raspršenje izotropno i višestruko te da je litosfera homogen poluprostor. Glavna ideja njegovog modela je da se integrali seizmičke valne energije integriraju u vremenskom prozoru beskonačne duljine. Mnogi autori koristili su njegov model energije, a za usporedbu su računali integral energije seizmograma koristeći vremenski prozor konačne duljine. Kasnije se ispostavilo (Hoshiha, 1991) da postoje nedosljednosti u takvom načinu obrade podataka, jer su se uspoređivale energije dobivene integracijom signala konačne duljine s energijom dobivenom integracijom signala beskonačne duljine. Problem je bio u činjenici da je značajan dio koda valova ostao zarobljen u šumu, tako da je procjena ukupne energije često bila podcijenjena.

Kako bi se problem riješio, Hoshiba i sur. (1991) te Fehler i sur. (1992) pronašli su rješenje ovog problema razvijanjem praktične MLTWA-metode. U MLTWA-metodi ne računa se ukupna energija seizmograma, nego se gustoća energije integrira za tri uzastopna vremenska prozora konačne duljine od nailaska S-vala u ovisnosti o udaljenosti između izvora i prijemnika. Ona se temelji na dva zapažanja:

1. u ranijim dijelovima seizmograma S-vala dominiraju izravni S-valovi čija je amplituda kontrolirana ukupnom atenuacijom sredstva u kojem se valovi rasprostiru;
2. S-koda u potpunosti se sastoji od raspršenih S-valova čija je amplituda kontrolirana ukupnim koeficijentom raspršenja.

Bitno je naglasiti da je razvoj MLTWA-metode bio moguć tek nakon razvoja rješenja radijacijske prijenosne teorije u vremenskoj domeni. Metoda se temelji na pretpostavkama da je raspršenje izotropno i homogeno, seizmička brzina u sredstvu homogena, a radijacija sferno-simetrična. Također, temelji se i na činjenici da su vremenski integrali gustoće energije pod utjecajem relativnog doprinosa raspršenja i intrinzičnog doprinosa.

### 2.3.1 Seizmički albedo $B_0$ i ukupna atenuacija $Le^{-1}$

MLTWA-metoda omogućila je praktični izračun relativnog doprinosa raspršenja i doprinosa intrinzičnih procesa ukupnoj atenuaciji, odnosno faktoru  $Q_t$  definiranog relacijom (2.2), gdje  $Q_c$  preuzima ulogu  $Q_t$ . Preraspodjela energije zbog raspršenja izražava se recipročnom vrijednošću faktora dobrote:

$$Q_{sc}^{-1} = k^{-1}\eta_s, \quad (2.3)$$

dok je gubitak energije zbog neelastičnosti sredstva izražen recipročnom vrijednošću faktora dobrote:

$$Q_i^{-1} = k^{-1}\eta_i, \quad (2.4)$$

pri čemu je  $k$  valni broj, dok su  $\eta_s$  i  $\eta_i$  koeficijent atenuacije raspršenja i koeficijent intrinzične atenuacije.

Kako bi se ovi parametri kvantificirali, Wu (1985) je uveo koncept „seizmičkog albeda” – omjer atenuacije uzrokovane raspršenjem i ukupne atenuacije, što u slučaju izotropnog raspršenja glasi:

$$B_0 \equiv \frac{Q_{sc}^{-1}}{Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1}} = \frac{\eta_s}{\eta_s + \eta_i}. \quad (2.5)$$

Seizmički albedo je bezdimenzionalna veličina s rasponom vrijednosti između 0 i 1. Sredstva s izraženom heterogenosti bez intrinzičnog doprinosa imaju albedo približno jedan, dok homogena sredstva imaju seizmički albedo jednak nuli. Odnosno, kažemo da je atenuacija zbog raspršenja dominantna kada je  $B_0 > 0.5$ , a da je intrinzična atenuacija dominantna kada je  $B_0 < 0.5$ . Istovremeno možemo definirati i dodatni parametar atenuacije, koji je nazvan ukupna atenuacija, a jednak je recipročnoj vrijednosti udaljenosti utrnuća  $Le$ :

$$Le^{-1} = \frac{Q_t^{-1}\omega}{\beta} = \eta_s + \eta_i, \quad (2.6)$$

pri čemu su  $\omega$  kutna frekvencija i  $\beta$  brzina S-vala. Udaljenost utrnuća mjeri se u kilometrima i predstavlja udaljenost duž koje primarni S-val smanji svoju energiju za  $e^{-1}$ .

Na kraju, poznavanje i razdvajanje relativnog doprinosa intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja ukupnoj atenuaciji bitno je zbog prepoznavanja strukture sredstva (kore), tektonske interpretacije područja i računanje vršne brzine gibanja tla čiji se podaci koriste u definiranju seizmičkog hazarda istraživanog područja.

## ***2.4 Kompaktno rješenje za višestruko raspršenje valne energije u vremenskoj domeni***

Kako bi se mogla koristiti MLTWA-metodu potrebno je opisati rasprostiranje energije raspršenih valova u izotropnom sredstvu sa slučajno raspoređenim raspršivačima. Po uzoru na rad Zenga (1991) razvile smo jednadžbu energije za raspršene valove proširivanjem teorije stacionarnog transporta energije (Wu, 1985) u vremensku domenu. Dobivena integralna jednadžba primjenjiva je na sva izotropna sredstva s raspršivačima. Iterativno rješenje te jednadžbe daje opći izraz za vremenske varijacije gustoće raspršene energije na proizvoljnim lokacijama izvora i prijammnika. Također, rješenje je u obliku Neumannovog reda koji raste s jačinom koeficijentata raspršenja, a prvi član reda predstavlja jednadžbu jednostrukog raspršenja koju je razvio Sato (1977). Kada se izvor i prijammnik podudaraju, ovo rješenje daje modificiranu verziju jednadžbe višestrukog raspršenja koju su dobili Gao i sur. (1983). U tom slučaju, rješavanjem jednadžbe pomoću Fourierovih transformata, dobije se kompaktno integralno rješenje za energiju raspršenih valova koja trne u vremenu. Ono uključuje sve doprinose višestrukih raspršenja i može se numerički izračunati. Radi pojednostavljenja rješenje se aproksimira modelom jednostrukog raspršenja i difuzijskim modelom te se kao takvo kasnije koristi u obradi podataka.

### 2.4.1 Energija višestruko raspršenih valova za slučaj kada se prijamnik i izvor nalaze u istoj točki

Kada se razmatra rasprostiranje akustičnih valova kroz trodimenzionalno elastično sredstvo konstantne brzine  $v$  s nasumično raspoređenim raspršivačima koji generiraju nekoherentne raspršene valove, za energiju raspršenih valova vrijedi:

$$E(\vec{r}, t) = E_{in} \left( \vec{r}_0, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{v} \right) + \sum_{\vec{r}_1 \neq \vec{r}} E_s \left( \vec{r}_1, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{v} \right). \quad (2.7)$$

Prvi član desne strane jednadžbe (2.7) predstavlja energiju slučajnog vala u točki prijarnika  $\vec{r}$ , a drugi zbroj energija raspršenih valova sa svih raspršivača  $\vec{r}_1$  sredstva. Za izotropno sredstvo s uniformnom raspodjelom raspršivača gustoće  $n_0$ , energija raspršenih valova može se izraziti kao produkt udarnog presjeka raspršivača  $\sigma$ , gustoće valne energije u točki raspršenja, faktora geometrijskog rasprostiranja i gubitka energije zbog raspršenja i intrinzične atenuacije duž staze vala od raspršivača do prijarnika. Vrijedi relacija:

$$E_s \left( \vec{r}_1, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{v} \right) = \sigma E \left( \vec{r}_1, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{v} \right) \frac{e^{-\eta|\vec{r}_1 - \vec{r}|}}{4\pi|\vec{r}_1 - \vec{r}|^2}, \quad (2.8)$$

gdje je  $\eta = \eta_s + \eta_i$ , a  $\eta_s$  iznosi  $n_0\sigma$ . Analogno energija slučajnog vala iznosi:

$$E_{in} \left( \vec{r}_0, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{v} \right) = E_{in} \left( \vec{r}_0, t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{v} \right) \frac{e^{-\eta|\vec{r} - \vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|^2}. \quad (2.9)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (2.8) i (2.9) u izraz (2.7) i korištenjem kontinuiranog zapisa, dobije se relacija:

$$E(\vec{r}, t) = E_{in} \left( t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{v} \right) \frac{e^{-\eta|\vec{r} - \vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} + \int_V \eta_s E \left( \vec{r}_1, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{v} \right) \frac{e^{-\eta|\vec{r}_1 - \vec{r}|}}{4\pi|\vec{r}_1 - \vec{r}|^2} dV_1. \quad (2.10)$$

Relaciju (2.10) zovemo jednadžbom energije raspršenih valova. To je osnovna jednadžba iz koje su izvedeni svi izrazi raspršenja za izotropna sredstva s uniformno raspoređenim raspršivačima.

Prema radu Zenga i sur. (1991) jednadžba za energiju raspršenih valova  $n$ -tog reda glasi:

$$E_n(0, t) = (\eta_s vt)^{n-3} \eta_s^3 B_n \frac{E_0}{2\pi} e^{-\eta vt}, \quad (2.11)$$

gdje je  $E_0$  ukupna energija slučajnog vala, dok se  $B_n$  dobije iterativnim rješavanjem jednadžbe (2.10) uz uvjet da se prijamnik i izvor impulsa nalaze u istoj točki. Za prvi i drugi red raspršenja mogu se izračunati  $B_1 = 1$  i  $B_2 = \frac{\pi^2}{8}$ . Viši redovi  $B_n$  ne mogu se izračunati

analitički, a prilikom numeričkog računa probleme rade višestruki integrali. Zato je potrebno potražiti kompaktno rješenje jednadžbe (2.10).

Primjeni li se Laplaceov transformat s obzirom na vrijeme na jednadžbu (2.10), dobije se:

$$E(\vec{r}, s) = E_{in}(s) \frac{e^{-(\eta + \frac{s}{v})r}}{4\pi r^2} + \int_V \eta_s E(\vec{r}_1, s) \frac{e^{-(\eta + \frac{s}{v})|\vec{r} - \vec{r}_1|}}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}_1|^2} dV_1 \quad (2.12)$$

gdje su  $E(\vec{r}, s)$  i  $E_{in}(s)$  Laplaceovi transformati funkcija  $E(\vec{r}, t)$  i  $E_{in}(t)$ , a  $s$  je varijabla Laplaceovog transformata. Drugi član jednadžbe na desnoj strani u obliku je konvolucijskog integrala. Kad se izračuna prostorni Fourierov transformat jednadžbe (2.11), uz uvjet da je Fourierov transformat konvolucijskog integrala produkt individualnih Fourierovih transformata, dobije se jednadžba:

$$E(k, s) = E_{in}(s) \frac{1}{k} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) + \eta_s E(k, s) \frac{1}{k} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right), \quad (2.13)$$

gdje je  $E(k, s)$  Fourierov transformat od  $E(\vec{r}, s)$ . Iz prethodne jednadžbe za  $E(k, s)$  vrijedi:

$$\begin{aligned} E(k, s) &= \frac{E_0 \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \sin(kr)}{1 - \frac{\eta_s}{k} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right)} \\ &= \frac{E_0}{2\pi^2 v r} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \sin(kr) \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{\eta_s}{k} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \right]^n. \end{aligned}$$

U obzir je uzet izraz za energiju impulsnog slučajnog vala  $E_{in} = \frac{E_0}{v}$ . Kad se izračuna inverzni Fourierov transformat dobije se:

$$\begin{aligned} E(r, s) &= \frac{E_0}{2\pi^2 v r} \int_0^{\infty} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \sin(kr) dk \\ &+ \frac{E_0}{2\pi^2 v r} \sum_{n=1}^{\infty} \eta_s^n \int_0^{\infty} \frac{\sin(kr)}{k^n} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \right]^n dk. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Prvi član predstavlja Laplaceov transformat energije slučajnog vala koji u vremenskoj domeni izgleda kao  $\frac{E_0 \delta(t - \frac{r}{v}) e^{-\eta vt}}{4\pi r^2 v}$ . Drugi član je zbroj individualnih redova raspršene valne energije. Laplaceov transformat  $n$ -tog reda raspršene energije je  $E_n(r, s)$ , za koji vrijedi:

$$E_n(r, s) = \frac{E_0 \eta_s^n}{2\pi^2 v r} \int_0^{\infty} \frac{\sin(kr)}{k^n} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \right]^{n+1} dk.$$

Kad se u prethodnoj jednadžbi  $r$  približava 0, za  $n > 2$  vrijedi:

$$E_n(0, s) = \frac{E_0 \eta_s^n}{2\pi^2 v} \int_0^{\infty} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right) \right]^{n+1} k^{-n+1} dk, \quad n \geq 3.$$

Uvede li se supstitucija  $x = \tan^{-1} \left( \frac{k}{\eta + \frac{s}{v}} \right)$  dobije se:

$$E_n(0, s) = \frac{E_0 (\eta_s v)^{n-3} \eta_s^3}{2\pi^2 (\eta v + s)^{n-2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{ctg^{n-3}(x)}{\sin^2(x)} x^{n+1} dx.$$



Inverzni Laplaceov transformat od  $(\eta v + s)^{n-2}$  iznosi  $\frac{t^{n-3}}{(n-3)!}e^{-\eta vt}$  pa se dobije:

$$E_n(0, t) = \frac{E_0 (\eta_s vt)^{n-3} \eta_s^3 e^{-\eta vt}}{2\pi} \frac{1}{\pi (n-3)!} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{ctg^{n-3}(x)}{\sin^2(x)} x^{n+1} dx, \quad n \geq 3. \quad (2.15)$$

Usporedba jednažbi (2.15) i (2.11), pokazuje da vrijedi:

$$B_n = \frac{1}{\pi (n-3)!} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{ctg^{n-3}(x)}{\sin^2(x)} x^{n+1} dx, \quad n \geq 3. \quad (2.16)$$

Ukupna raspršena energija kada se prijemnik i izvor impulsa nalaze u istoj točki iznosi:

$$\begin{aligned} E(0, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} E_n(0, t) \\ &= \frac{E_0 \eta_s^3 e^{-\eta vt}}{2\pi} \left\{ \frac{1}{(\eta_s vt)^2} + \frac{\pi^2}{8} \frac{1}{\eta_s vt} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sum_{n=3}^{\infty} \frac{[\eta_s vt x ctg(x)]^{n-3}}{(n-3)!} \frac{x^4 dx}{\sin^2(x)} \right\} \\ &= \frac{E_0 \eta_s^3 e^{-\eta vt}}{2\pi} \left\{ \frac{1}{(\eta_s vt)^2} + \frac{\pi^2}{8} \frac{1}{\eta_s vt} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^4}{\sin^2(x)} e^{\eta_s vt x ctg(x)} dx \right\}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

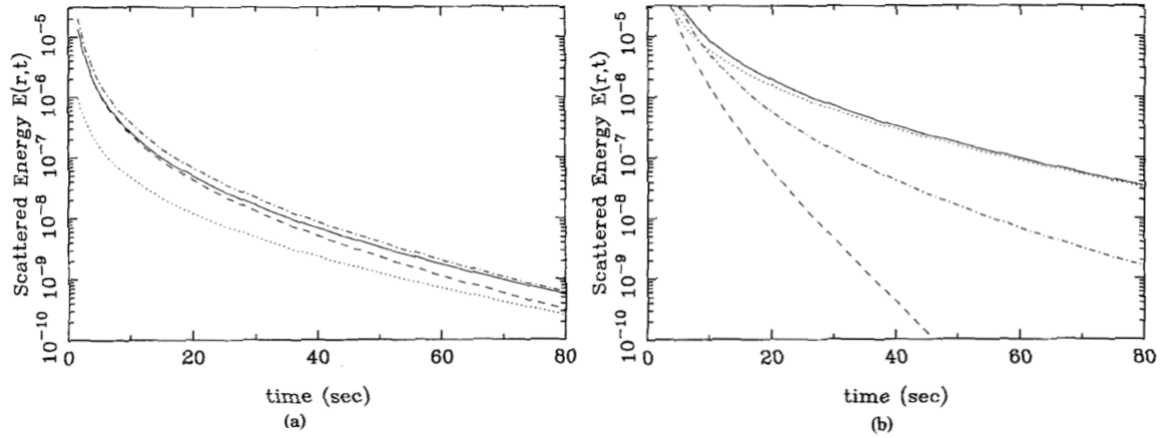
Vrijednosti koeficijenata  $B_n$  preuzete su iz rada Zenga (1991) gdje su izračunate uz pomoć jednažbe (2.16). Uspoređene su s Monte-Carlo simulacijom koju je napravio Hoshiba (1991). Iz tablice 2.1 vidljivo je da se rezultati podudaraju za red raspršenja manji od 7.

Tablica 2.1 Koeficijenti  $B_n$  izračunati za redove raspršenja  $n = 1, \dots, 10$ . Hoshiba (1991) ih je izračunao Monte-Carlo simulacijom, a Zeng (1991) pomoću jednažbe (2.16).

	HOSHIBA (1991)	ZENG (1991)
$B_1$	1.00	1.000
$B_2$	1.22	$\pm 0.025$
$B_3$	0.71	$\pm 0.043$
$B_4$	0.26	$\pm 0.013$
$B_5$	$7.3 \times 10^{-2}$	$\pm 5.9 \times 10^{-3}$
$B_6$	$1.5 \times 10^{-2}$	$\pm 9.0 \times 10^{-4}$
$B_7$	$2.8 \times 10^{-3}$	$\pm 2.4 \times 10^{-4}$
$B_8$	$4.3 \times 10^{-4}$	$\pm 3.7 \times 10^{-3}$
$B_9$	$5.5 \times 10^{-5}$	$\pm 4.4 \times 10^{-6}$
$B_{10}$	$6.2 \times 10^{-6}$	$\pm 6.4 \times 10^{-7}$

Uspoređivani su egzakti rezultati dobiveni jednažbom (2.17) s onima dobivenima modelom jednostrukog raspršenja, modelom toka energije i difuzijskog modela za iste koeficijente atenuacije unutarnjeg trenja  $\eta_i = 0.01 \text{ km}^{-1}$ , ali različite koeficijente atenuacije raspršenja:  $\eta_s = 0.002 \text{ km}^{-1}$  i  $\eta_s = 0.05 \text{ km}^{-1}$ . Na slici 2.1 vidljivo je da se u slučaju slabog raspršenja, model jednostrukog raspršenja i model toka energije dobro podudaraju s egzaktim rješenjem. S druge strane, u slučaju jakog raspršenja s egzaktim rješenjem

podudara se difuzijski model, a model jednostrukog raspršenja i toka energije značajno podcjenjuju energiju raspršenih valova. Ovi zaključci potvrđeni su u radu Zenga i sur. (1991).



Slika 2.1 (a) Energija raspršenih valova u ovisnosti o vremenu za slučaj iste lokacije izvora i prijammnika s  $E_0 = 1$ ,  $v = 3$  km/s,  $\eta_i = 0.01$  km<sup>-1</sup> i  $\eta_s = 0.002$  km<sup>-1</sup>. Puna linija predstavlja naše rješenje za višestruko raspršenu valnu energiju koju uspoređujemo s rezultatima modela jednostrukog raspršenja (isprekidana krivulja), toka energije (crta-točka-crta) i difuzijskog modela (točkasta krivulja). (b) Analogno kao (a) samo za  $\eta_s = 0.05$  km<sup>-1</sup>. Preuzeta iz Zeng i sur. (1991).

#### 2.4.2 Aproximacija energije višestruko raspršenih valova pomoću jednostrukog raspršenja i difuzije

Kao što je prethodno spomenuto, u slučaju slabog raspršenja egzaktne rješenja daju iste energije kao i model jednostrukog raspršenja i model toka energije, a u slučaju jakog raspršenja dobro ih aproksimira difuzivni model. To je dalo motivaciju za aproksimaciju egzaktnih rješenja. Poželjno je zadržati izraze za energije direktnih i jednostruko raspršenih valova, a ostatak energije od višestrukog raspršenja razdijeliti u prostoru i vremenu kao polje energije uzrokovano difuzijom. Polje energije uzrokovano difuzijom dobije se množenjem difuzijskog rješenja s Heavisideovom funkcijom,  $H\left(t - \frac{r}{v}\right)$ :

$$cH\left(t - \frac{r}{v}\right) \left(\frac{3\eta_s}{4\pi vt}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{3\eta_s r^2}{4vt} - \eta_i vt\right).$$

Faktor  $c$  izračuna se izjednačavanjem ukupne energije uzrokovane difuzijom s ostatkom energije višestrukog raspršenja (reda raspršenja većeg od 2). Ukupna energija uzrokovana difuzijom definirana je s:

$$\int_0^{vt} cH\left(t - \frac{r}{v}\right) \left(\frac{3\eta_s}{4\pi vt}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{3\eta_s r^2}{4vt} - \eta_i vt\right) 4\pi r^2 dr$$

$$= c e^{-\eta_i vt} \left( \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{3\eta_s vt}}{2}} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha \right).$$

Ostatak energije višestrukog raspršenja dan je s (Zeng i sur., 1991):

$$\begin{aligned} E_0 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(\eta_s vt)^n}{n!} e^{-\eta_s vt} &= E_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta_s vt)^n}{n!} e^{-\eta vt} - E_0 (1 + \eta_s vt) e^{-\eta vt} \\ &= E_0 [1 - (1 + \eta_s vt) e^{-\eta_s vt}] e^{-\eta_i vt}. \end{aligned}$$

Za faktor  $c$  dobije se:

$$c = \frac{E_0 [1 - (1 + \eta_s vt) e^{-\eta_s vt}]}{\frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{3\eta_s vt}}{2}} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha}. \quad (2.18)$$

Aproksimativno rješenje za energiju višestruko raspršenih valova iznosi:

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

gdje je faktor  $c$  dan relacijom (2.18). Rješenje dobiveno jednažbom (2.19) zove se hibridno rješenje jednostrukog raspršenja i difuzije.

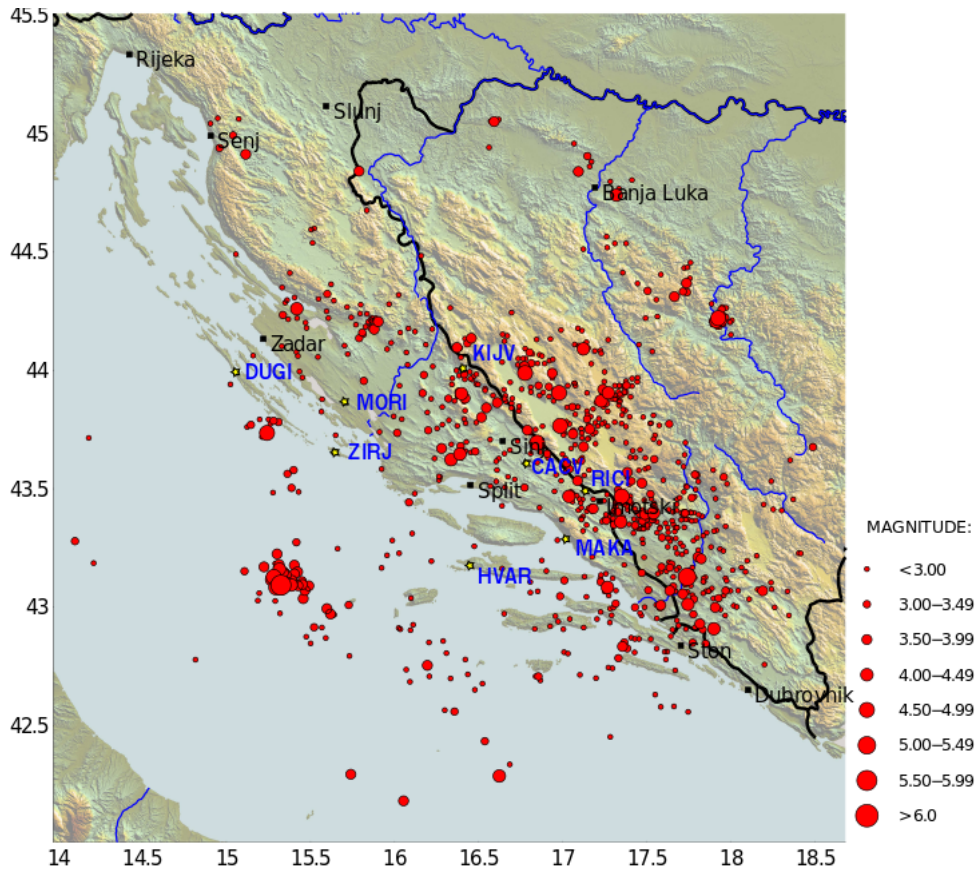
## 3 Metoda i analiza podataka

### 3.1 Podaci i seizmotektonsko okruženje

Za analizu i procjenu atenuacije raspršenja i intrinzične atenuacije u području središnjih Vanjskih Dinarida korišteni su seizmogrami potresa zabilježeni na osam seizmoloških postaja: Čačvina (CACV), Dugi otok (DUGI), Hvar (HVAR), Kijevo (KIJV), Morići (MORI), Makarska (MAKA), Ričice (RICI) i Žirje (ZIRJ). Parametri korištenih potresa preuzeti su iz hrvatskog kataloga potresa (Herak i sur., 1996; ažurirana verzija s događajima do kraja 2013. godine). U obzir su uzeti samo potresi s lokalnim magnitudama jednakim ili većim od dva, čije su hipocentralne udaljenosti u rasponu od 40 do 120 km. Instrumenti postavljeni na postajama su širokopojasni trokomponentni seizmografi modela Güralp, Lennartz, Teledyne i Streckeisen. Potresi su zabilježeni s vremenom uzorkovanja 0.01 ili 0.02 s, a analiza je napravljena za frekvencije u rasponu od 1.5 Hz do 16 Hz. Ukupno je analizirano 1246 seizmograma, odnosno 369 potresa zabilježenih u razdoblju od prosinca 2000. do kraja 2013. godine. U tablici 3.1 prikazane su postaje, njihove geografske koordinate, korišteni instrumenti, frekvencija uzorkovanja, promatrano razdoblje te broj analiziranih potresa s pojedine postaje. Svi zabilježeni potresi su plitki sa žarištem u gornjoj kori, većinom do dubine oko 15 km. Prostorna raspodjela epicentralnih udaljenosti potresa i seizmoloških postaja korištenih u analizi prikazani su na slici 3.1.

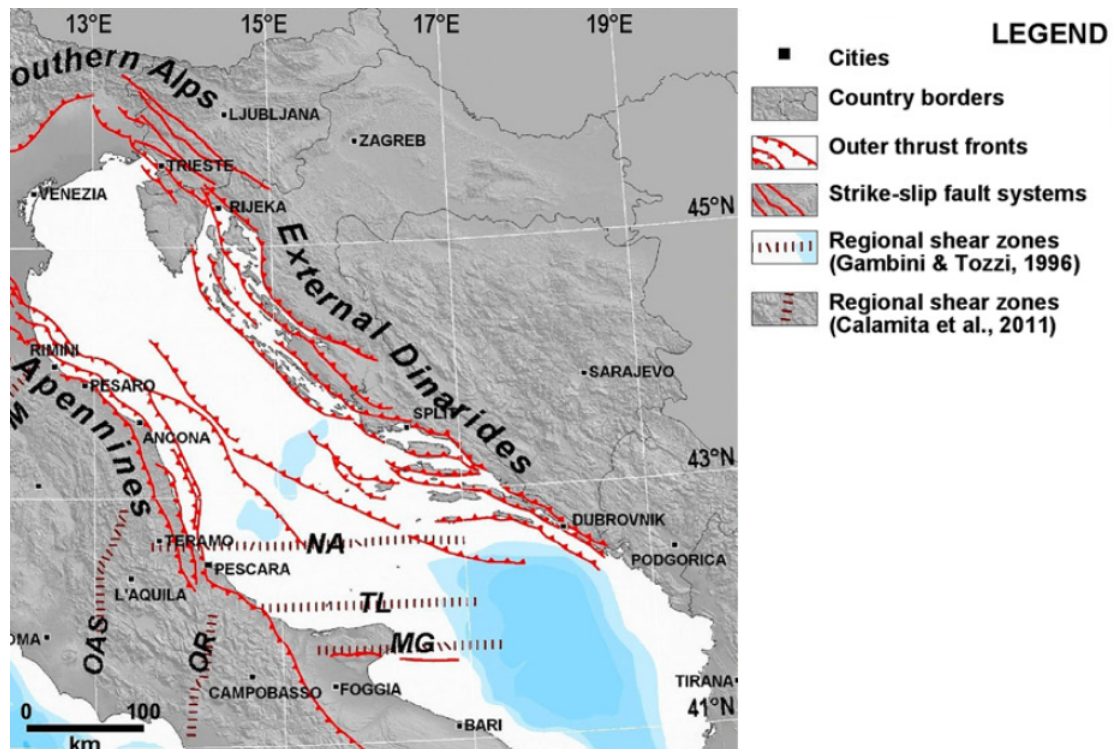
Tablica 3.1 Postaje, njihove geografske koordinate, korišteni instrumenti, frekvencija uzorkovanja, promatrano razdoblje te broj analiziranih potresa za pojedine postaje.

Postaja	Geografske koordinate	Instrument	$f_s$ [Hz]	Razdoblje	N
Čačvina (CACV)	43.609°N, 16.784°E	Lennartz LE-3D/20s Güralp CMG-3ESP Güralp CMG-40TD	50	2007 - 2013	219
Dugi otok (DUO)	44.113°N, 14.932°E	Güralp CMG-3ESPC	50	2011 - 2013	56
Hvar (HVAR)	43.178°N, 16.449°E	Streckeisen STS-2 Güralp CMG-40TD Güralp CMG-3ESP	50, 100	2000 - 2013	225
Kijevo (KIJV)	44.005°N, 16.405°E	Güralp CMG-40T Güralp CMG-40TD Teledyne S13x3	50, 100	2007 - 2013	234
Makarska (MAKA)	43.288°N, 17.020°E	Güralp CMG-40TD Güralp CMG-6TD	50	2012 - 2013	76
Morići (MORI)	43.866°N, 15.707°E	Güralp CMG-3ESPC	50	2011 - 2013	117
Ričice (RICI)	43.499°N, 17.136°E	Güralp CMG-3ESP Güralp CMG-3ESPC	50	2009 - 2013	186
Žirje (ZIRJ)	43.654°N, 15.644°E	Lennartz LE-3D/20s	50	2010 - 2013	133



Slika 3.1 Karta epicentara korištenih potresa i seizmoloških postaja (žute zvjezdice) u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida.

Područje koje proučavamo dio je kompleksnog Alpsko-Karpatško-Dinarskog ulančanog gorja, u kojem dominira kompresijska tektonika te se nalazi duž konvergentnih i kolizijskih granica između tektonskih ploča. Karakterizira ga međudjelovanje Jadranske mikroploče, Dinarida i Panonskog bazena (npr. Tomljenović i sur., 2008). Prema Dasović (2015) i tamo navedenim referencama, Dinaridi su nastali deformacijom Jadranske mikroploče tijekom njene subdukcije pod Euroazijsku ploču. Pružaju se od Južnih Alpa na sjeverozapadu do Albanida na jugoistoku. Glavna deformacijska faza Dinarida bila je u paleogenu, s konačnim uzdizanjem u razdoblju oligocena i miocena. Pojas Dinarida čine bore i navlake te sustavi uglavnom reversnih rasjeda koji se pružaju dominantno u smjeru sjeverozapad-jugoistok (slika 3.2).



Slika 3.2 Glavni strukturalni elementi Jadranskog područja. Slika preuzeta iz Kastelic i sur. (2013).

Složenost područja upućuje na postojanje heterogenosti različitih dimenzija unutar litosfere. Prema Vlahoviću i sur. (2005), u području nalazimo stijene mezozoika (vapnenci, dolomiti i breče), ali i paleogene stijene (karbonati, klastiti, fliš). Također su prisutne i starije naslage. Prema Stipčević (2012) središnji Vanjski Dinaridi su područje s procijenjenim dubinama Mohorovičićevog diskontinuiteta pretežito od 40 do 55 km. Potresi se većinom događaju u gornjoj kori, do dubina 20-25 km. Seizmičnost je umjerena do jaka s rijetkom pojavom jačih događaja te se pojačava prema jugoistoku. Hrvatski katalog potresa (Herak i sur., 1996; ažurirana verzija s događajima do 2013. godine) sadrži 16 potresa s lokalnom magnitudom većom od 5.5 u promatranom području središnjih Vanjskih Dinarida u zadnjih 150 godina. Najjači zabilježen potres dogodio se 2. srpnja 1898. u blizini Sinja s  $I_0 = IX$  °MCS i  $M_L = 6.7$ . Najjači događaj u Hrvatskoj u 20. stoljeću dogodio se 29. prosinca 1942. godine u blizini Imotskog lokalne magnitude  $M_L = 6.2$  i intenziteta  $I_0 = VIII-IX$  °MCS. U ovoj analizi najjači potres je magnitude  $M_L = 5.86$ , a dogodio se 29. ožujka 2003. u blizini otoka Jabuke.

### 3.2 Metoda

MLTWA-metoda temelji se na određivanju najbolje prilagodbe između energije izmjerene pomoću seizmograma (dalje u tekstu eksperimentalne energije) unutar tri uzastopna vremenska intervala i seizmičke energije izračunate pomoću rješenja teorije višestrukog izotropnog raspršenja (dalje u tekstu teorijska energija) u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti te intrinzičnim parametrima i parametrima raspršenja. Osnovne pretpostavke metode su (Abubakirov, 2005):

- izvor potresa je impulzivan, koncentriran u točki te ga karakterizira sferno-simetrično rasprostiranje skalarnih (akustičnih) valova;
- raspodjela raspršenja i apsorpcije u sredstvu je homogena;
- brzina valova u sredstvu je konstantna;
- raspršenje je izotropno i višestruko;
- zanemaruje se konverzija između P- i S-valova;
- raspršeni valovi su nekoherentni.

Atenuacijska svojstva ( $Q_{sc}^{-1}$  i  $Q_i^{-1}$ ) djeluju na distribuciju energije u seizmogramu. Raspršenje valova javlja se na mjestima akumulacije energije, nakon nailaska direktnih S-faza ili u koda valovima nailaskom primarnih valova na heterogenostima sredstva. S druge strane, intrinzična atenuacija uzrokuje isti linearni pad logaritma seizmičke energije valnog polja s udaljenošću za cijelo područje. Zato je proučavanje opadanja energije u tri različita vremenska prozora, u ovisnosti o hipocentralnim udaljenostima, opravdano i predstavlja idealan slučaj za proučavanje odvajanja intrinzičnog utjecaja i utjecaja raspršenja ukupnoj atenuaciji.

Teorijsku energiju dobivamo numeričkim modeliranjem, dok eksperimentalne energije računamo odgovarajućom obradom seizmograma. Konačno, najbolju prilagodbu energija definirat će odgovarajući par parametara  $B_0$  i  $Le^{-1}$ , pomoću kojih možemo odrediti relativni intrinzični doprinos ili doprinos raspršenja ukupnoj atenuaciji.

### 3.2.1 Seizmička energija izračunata u skladu s teorijom višestrukog raspršenja

Gustoća seizmičke energije numerički se modelira kao funkcija hipocentralne udaljenosti  $r$  i proteklog vremena  $t$  (mjereno od vremena nastanka potresa do trenutka zabilježavanja na prijemniku) korištenjem hibridnog rješenja jednostrukog raspršenja i difuzije, pomoću jednadžbi (2.18) i (2.19):

$$E(r, t) \simeq E_0 e^{-\eta vt} \left( \frac{\delta(t - \frac{r}{v})}{4\pi v r^2} + \eta_s \frac{H(t - \frac{r}{v})}{4\pi v r t} \ln \frac{1 + \frac{r}{vt}}{1 - \frac{r}{vt}} \right) + \left[ c H\left(t - \frac{r}{v}\right) \left(\frac{3\eta_s}{4\pi vt}\right)^{3/2} \times e^{[(-3\eta_s r^2/4vt) - \eta_i vt]} \right] \quad (3.1)$$

uz

$$c = E_0 [1 - (1 + \eta_s vt) e^{-\eta_s vt}] \left( \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{3\eta_s vt}/2} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha \right)^{-1} \quad (3.2)$$

gdje je  $E_0$  energija u  $t = 0$ ,  $H$  je Heavisideova funkcija,  $\delta$  je Diracova delta funkcija,  $\alpha = vt/r$ ,  $v$  je brzina vala,  $\eta = \eta_i + \eta_s$ .  $\eta_i$  i  $\eta_s$  predstavljaju koeficijente intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja, a mogu se izraziti preko odgovarajućeg faktora dobrote prema relaciji:

$$\eta_{i,s} = \frac{2\pi f}{v Q_{i,sc}}. \quad (3.3)$$

Jednadžba (3.1) omogućuje nam određivanje distribucije energije u vremenu i prostoru, a da bi se dobile teorijske gustoće energije, koje se koriste u MLTWA-metodi, integriramo ju u vremenu. Računanjem integrala dobivaju se krivulje energije kao funkcije hipocentralne udaljenosti:

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

Vrijednosti vremena  $t_i(r)$ , unutar kojih se vrši integracija, predstavljaju tri uzastopna vremenska prozora odgovarajuće duljine, gdje se početak prvog prozora podudara s nailaskom S-faze vala. Ove krivulje energije mogu se parametrizirati veličinama pomoću kojih možemo odrediti relativni intrinzični doprinos ili doprinos raspršenja ukupnoj atenuaciji. Radi se o veličinama seizmičkog albeda  $B_0$  i ukupne atenuacije  $Le^{-1}$ , koji su definirani relacijama (2.5) i (2.6):

$$Le^{-1} = \eta_s + \eta_i, \quad B_0 = \frac{\eta_s}{\eta_s + \eta_i}. \quad (3.5)$$

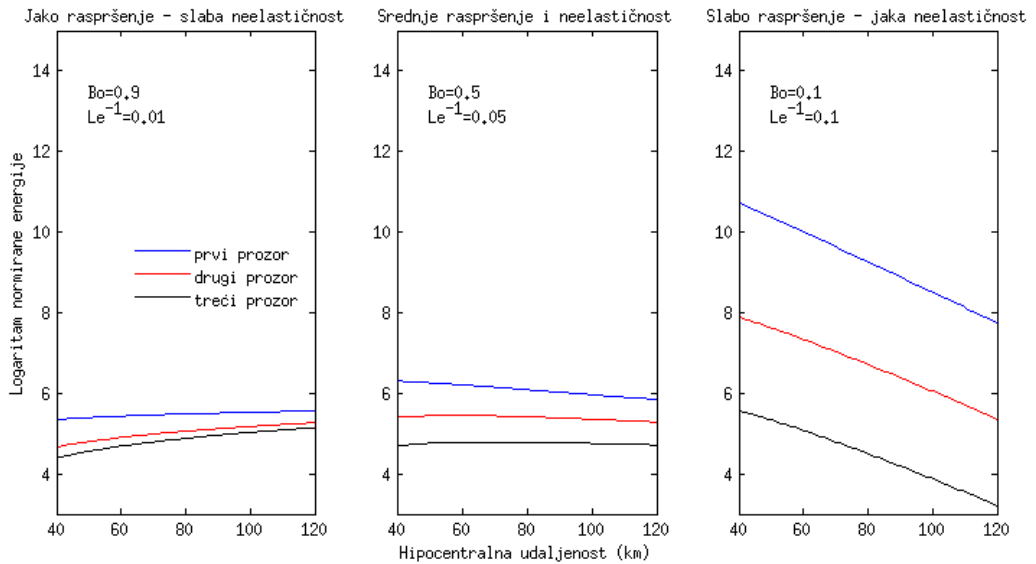
Detaljniji opis parametara nalazi se u potpoglavlju 2.3.1.



Kako bi se uklonili utjecaji seizmičkih izvora različite jakosti, lokalne amplifikacije i utjecaj instrumenta, integrali u relaciji (3.4) moraju se normirati. U tom slučaju koristi se metoda normiranja kodom (Aki, 1980), gdje se energije  $\hat{E}_i(r, B_0, Le^{-1})$  za  $i = 1, \dots, 3$  dijele s prosječnom energijom kode izračunate u fiksiranom referentnom vremenskom prozoru. Početak vremenskog prozora za normiranje može se uzeti oko 23 s nakon nastanka potresa (Mukhopadhyay i sur., 2014), što otprilike odgovara dvostrukom maksimalnom vremenu putovanja S-vala. Kako bi se izbjegao utjecaj izravnih S-valova, u praksi se koristi prozor koda normiranja kasnijih vremena. Sljedeći korak jest uklanjanje utjecaja geometrijskog rasprostiranja množenjem s faktorom  $4\pi r^2$ . Konačno, integrali se logaritmiraju:

$$E_{c_i}(r, B_0, Le^{-1}) = \log \left[ \left( \frac{\hat{E}_i(r, B_0, Le^{-1})}{\int_{t_{1c}}^{t_{2c}} E(r, B_0, Le^{-1}, t) dt} \right) 4\pi r^2 \right], \quad i = 1, \dots, 3 \quad (3.6)$$

Izrazom (3.6) generiramo teorijske vrijednosti energija  $E_{c_i}(r, B_0, Le^{-1})$  koristeći odgovarajući raspon seizmičkog albeda i ukupne atenuacije:  $2 \times 10^{-3} \leq Le^{-1} \leq 0.1$  i  $0.05 \leq B_0 \leq 0.999$ . Izgled teorijske energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti, za jako, srednje i slabo raspršenje, definira se odabirom odgovarajućih parametara seizmičkog albeda i ukupne atenuacije. Primjer jednog takvog jakog, srednjeg i slabog raspršenja nalazi se na slici 3.3.



Slika 3.3 Logaritmirane integrirane normirane energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti bez utjecaja geometrijskog rasprostiranja. Grafovi predstavljaju tri različita sistema atenuacije definiranih odgovarajućim parametrima seizmičkog albeda  $B_0$  i ukupne atenuacije  $Le^{-1}$ .

Duljinu vremenskog prozora, unutar kojeg računamo energije u relaciji (3.4), postavljamo na 15 s. Konkretno, definiramo tri vremenska prozora: 0 – 15 s, 15 – 30 s, 30 – 45 s. Duljine vremenskih prozora izabrane su tako da prvi prozor sadrži energiju direktnih S-valova, dok ostala dva prozora sadrže energiju koda valova. Kao početak i kraj koda prozora normiranja uzima se 50 i 65 s nakon nastanka potresa. Uzimajući u obzir da je prosječna brzina S-vala  $v = 3.5$  km/s (unutar volumena u kojem se javlja proces raspršenja) naše teorijske energije odgovarat će homogenoj intrinzičnoj atenuaciji i raspršenju kore središnjih Vanjskih Dinarida.

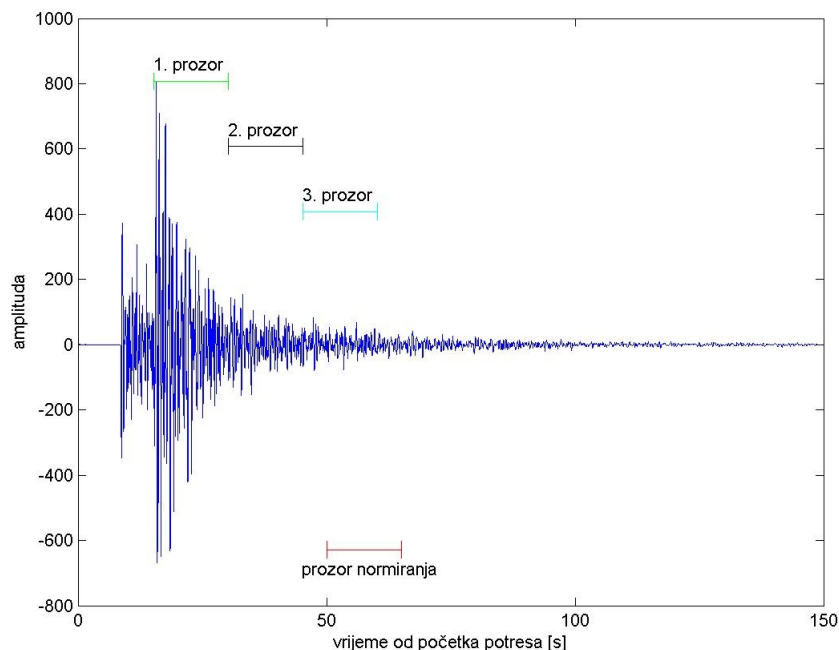
### 3.2.2 Energija određena iz seizmograma potresa

Kako bismo izračunale eksperimentalne energije, obradu započinjemo odabirom seizmograma s osam seizmoloških postaja: CACV, MAKA, HVAR, KIJV, DUGI, ZIRJ, MORI i RICI s hipocentralnim udaljenostima od 40 do 120 km. Ne uzimamo udaljenosti veće od 120 km jer na oblik tih seizmograma utječu površinski i reflektirani valovi koje naš model ne uzima u obzir. Ukupno je odabrano 1246 seizmograma s dobrim omjerom signala i šuma. Početak prozora za S-valove određen je nailaskom izravnih S-faza.

Najprije odabrane seizmograme filtriramo pomoću Butterworthovog pojasno-propusnog filtera četvrtog reda sa središnjim frekvencijama  $f_c$ : 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14 i 16 Hz te gornjom i donjom graničnom frekvencijom  $\frac{f_c}{\sqrt{2}}$  i  $\sqrt{2}f_c$ . Pretpostavljamo da su frekvencijski pojasevi dovoljno uski kako bi svojstva raspršenja i apsorpcije sredstva bila neovisna o frekvenciji. U drugom koraku obrade računamo ovojnice seizmograma za sve tri komponente (N, E, Z). Ovojnice seizmograma izračunate su pomoću RMS metode (engl. *root mean square*), odnosno korištenjem korijena srednje kvadratne amplitude filtriranih podataka. Zatim usrednjujemo ovojnice za sve tri komponente i provodimo izgladivanje kliznim srednjacima za vremenski period od 1 s, gdje broj podataka korištenih u izgladivanju ovisi o uzorkovanju, tako je na primjer za uzorkovanje od 0.02 s broj podataka koji uzimamo 50.

Konačno, eksperimentalnu seizmičku energiju računamo integracijom spomenute kvadrirane ovojnice po vremenskim prozorima u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti i frekvenciji. Odabiru se isti vremenski prozori kao i kod računanja teorijske energije: 0 – 15 s, 15 – 30 s i 30 – 45 s, mjereni od vremena nailaska S-vala (slika 3.4).

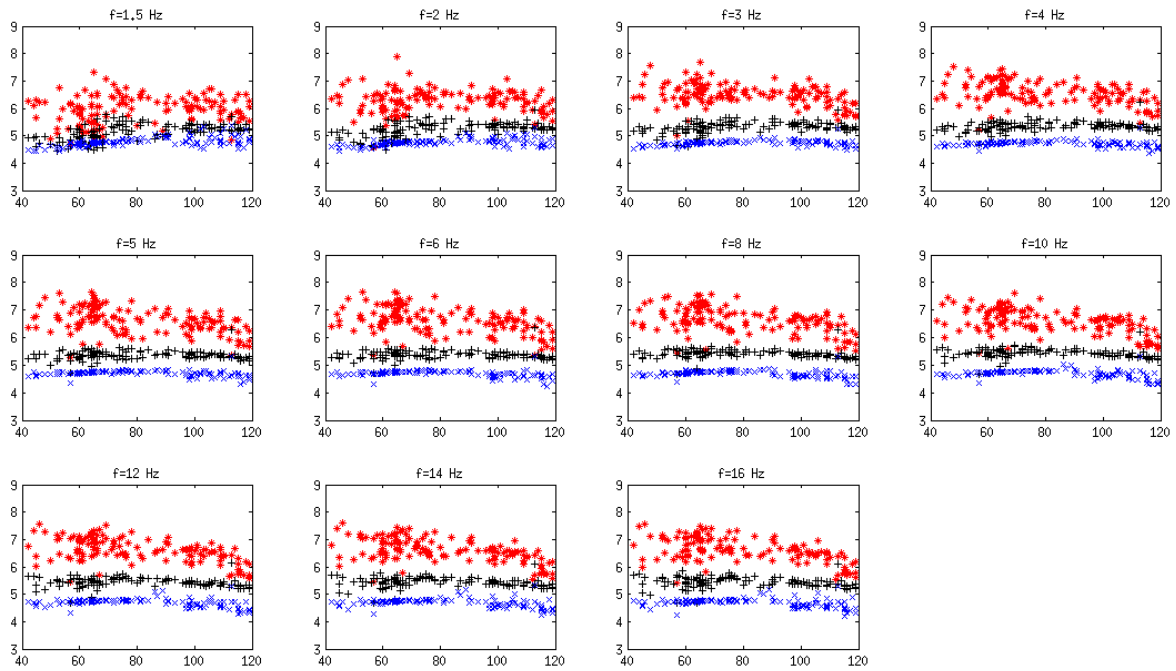
Kako bi uklonili utjecaj izvora i amplifikacije na energiju pojedinog prozora primjenjujemo metodu normiranja kode (Aki, 1980). Korekciju radimo vremenskim prozorom definiranim između 50 i 65 s od vremena nastanka potresa.



Slika 3.4 Seizmogram potresa zabilježenog na postaji MAKa koji se dogodio 18. studenog 2013. u 7:58:40 h,  $M_L = 4.76$ . Prikazana je Z komponenta u ovisnosti o vremenu. Označeni su vremenski prozori 0-15 s, 15-30 s, 30-45 s mjereni od vremena nailaska S-vala i prozor normiranja 50-65 s od vremena nastanka potresa.

Na dobivene normirane energije primjenimo korekciju za geometrijsko rasprostiranje sfernih valova množenjem s  $4\pi r^2$  čime se dobiju konačne vrijednosti eksperimentalnih energija pojedinih prozora  $E_{m_k}(r, B_0, Le^{-1})$  za  $k = 1, 2, 3$  kao funkcije hipocentralnih udaljenosti.

Na slici 3.5 su prikazane izračunate energije za postaju ZIRJ u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti, za svaku središnju frekvenciju i za tri vremenska prozora. Vidimo da je za sve frekvencije energija prvog prozora (energija S-valova) viša od energije druga dva prozora (energija koda valova). Možemo uočiti veće raspršenje energije za sva tri prozora za frekvencije od 1.5 i 2 Hz. Također energija prvog prozora ima blagi pad s povećanjem hipocentralne udaljenosti, dok su energije drugog i trećeg prozora gotovo horizontalne i neovisne o hipocentralnoj udaljenosti. Ovakav raspored energija podsjeća na teorijsku krivulju energija srednjeg raspršenja sa slike 3.3.



Slika 3.5 Normirane energije s korekcijom za geometrijsko rasprostiranje za tri različita vremenska prozora 0-15 s (\*), 15-30 s (+), 30-45 s (×) u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za svaku centralnu frekvenciju. Podaci za postaju ZIRJ.

Kao i u dosadašnjim istraživanjima drugih područja, na slici 3.5 vidljivo je veće raspršenje energije za prvi prozor nego za druga dva prozora. Kao moguće uzroke autori navode utjecaj razdiobe intenziteta zračenja između događaja koje metoda normiranja kodom ne uzima u obzir i/ili utjecaj lokalnog tla ispod seizmičkih postaja (Mayeda i sur., 1992; Akinci i sur., 2000; Bianco i sur., 2002, 2005; Fehler i sur., 1992). Kasniji nailasci koda valova sadrže utjecaj većeg volumena i usrednjavaju veći broj raspršivača pri široj azimutalnoj pokrivenosti između izvora i postaja. Goutbeek i sur. (2003) kao jedan od mogućih razloga raspršenja navode nailaske Rayleighjevih ili Loveovih valova netom poslije nailaska S-vala. Nasuprot tome, energije drugog i trećeg prozora su manje ovisne o razdiobi intenziteta zračenja jer predstavljaju energiju koda valova kod kojih se utjecaj razdiobe intenziteta zračenja poništava procesom raspršenja.

### 3.2.3 Procjena parametara $B_0$ i $Le^{-1}$ uspoređivanjem teorijski i eksperimentalno dobivenih energija

Kako bi se procijenili  $B_0$  i  $Le^{-1}$  (Hoshiba i sur., 1991) uspoređujemo eksperimentalne podatke s modelom, koristeći funkciju:

$$M(B_0, Le^{-1}) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^3 (E_{c_k}(r_i) - E_{m_k}(r_i))^2, \quad (3.7)$$

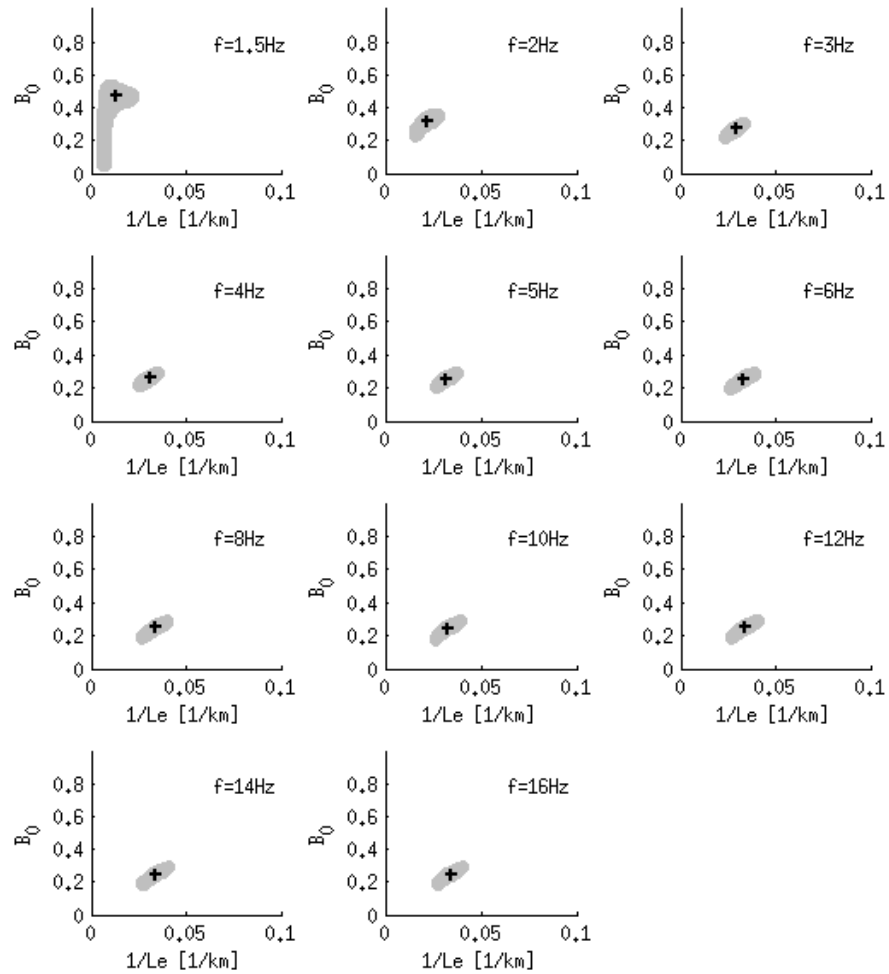
gdje su  $E_{m_k}(r)$  eksperimentalne energije izračunate iz podataka za hipocentralne udaljenosti naših seizmograma, a  $E_{c_k}(r)$  teorijske energije izračunate postupkom opisanim u prethodnom poglavlju. Indeks  $k$  predstavlja određeni prozor, a  $N$  je broj seizmograma. Diskretna funkcija  $M(B_0, Le^{-1})$  ovisi o parovima  $B_0$  i  $Le^{-1}$ . Minimum te funkcije odgovara procjeni  $B_0$  i  $Le^{-1}$  u smislu najmanjih kvadrata. Kako smo definirali  $0.05 \leq B_0 \leq 0.999$  i  $2 \times 10^{-3} \leq Le^{-1} \leq 0.1$ , minimum funkcije tražili smo u setu podataka dimenzije  $950 \times 99$ . Dobiveni par  $(\hat{B}_0, \hat{Le}^{-1})$  najbolje opisuje razdiobu eksperimentalne energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.

U skladu s radom Abubakirov i sur. (2005) definiramo 68%-tno područje pouzdanosti za parametre  $B_0$  i  $Le^{-1}$  za koje vrijedi nejednakost:

$$\frac{M(B_0, Le^{-1})}{M(\hat{B}_0, \hat{Le}^{-1})} \leq 1 + \frac{2}{N-2} F_{0.68,2,N-2} \quad (3.8)$$

gdje je  $F_{0.68,2,N-2}$  68% kvantil Fisherove distribucije (F-distribucija), a  $N$  broj seizmograma.

Na slici 3.6 je prikazan raspon mogućih parametara  $B_0$  i  $Le^{-1}$  s rezidualima izračunatima F-distribucijom. Prikazani raspon odgovara razini 68%-tne pouzdanosti za seizmološku postaju ZIRJ na svim frekvencijama. Vidimo da je za najnižu frekvenciju područje pouzdanosti najveće, a za ostale frekvencije manje i približno podjednako, što se može objasniti malim raspršenjem energije na visokim frekvencijama. Također vidimo da procijenjeni par  $(\hat{B}_0, \hat{Le}^{-1})$  ne ovisi o frekvencijama za  $f > 1.5$  Hz, što je u skladu sa dosadašnjim istraživanjima (Bianco i sur., 2002).



Slika 3.6 Prikaz reziduala (vrijednosti su normirane s pripadajućim minimumom) za sve frekvencije. Parovi  $Le^{-1}$  i  $B_0$  koji odgovaraju minimumu reziduala označeni su crnim križićem, dok sivi „oblak” predstavlja 68%-tno područje pouzdanosti. Podaci za postaju ZIRJ.

## 4 Rezultati i diskusija

U ovom su radu analizirane karakteristike seizmičke atenuacije u geološko i tektonsko kompleksnom području središnjih Vanjskih Dinarida, uzrokovanom kolizijom Jadranske mikroploče i Euroazijske ploče. U ovom radu proučavana je atenuacija S-valova razdvajanjem faktora dobrote koda valova  $Q_c$  na faktor intrinzične atenuacije i faktor atenuacije raspršenja. Razdvajanje faktora postigli smo primjenom MLTWA-metode. Ova analiza omogućuje bolje razumijevanje fizikalnih mehanizama u kori koji utječu na atenuaciju seizmičkih valova.

### 4.1 Izračun $Q^{-1}$ -faktora i dosadašnja istraživanja

MLTWA-metoda, opisana u prethodnim poglavljima, omogućila nam je izračun parova koeficijenata seizmičkog albeda  $B_0$  i ukupne atenuacije  $Le^{-1}$  definiranih jednadžbama (2.5) i (2.6), u rasponu hipocentralnih udaljenosti od 40 do 120 km za jedanaest frekvencijskih pojasa. Dobivene koeficijente upotrijebile smo za izračun parametara  $Q_i^{-1}$  i  $Q_{sc}^{-1}$  te faktor ukupne atenuacije  $Q_t^{-1}$ . Izraze ovih parametara preuzele smo iz rada Abdelwahed i sur. (2015), a mogu se izvesti iz jednadžbi (3.3) i (3.5):

$$Q_{sc}^{-1} = (B_0 \cdot Le^{-1}) \cdot \frac{v}{2\pi f_c}, \quad (4.1)$$

$$Q_i^{-1} = Le^{-1} \cdot (1 - B_0) \cdot \frac{v}{2\pi f_c}, \quad (4.2)$$

$$Q_t^{-1} = Q_i^{-1} + Q_{sc}^{-1}, \quad (4.3)$$

gdje je  $v$  brzina S-valova 3.5 km/s, a  $f_c$  središnje frekvencije frekvencijskih pojasa korištenih u analizi. Izračunale smo i teorijski očekivane vrijednosti  $Q^{-1}$ -faktora koda valova  $Q_{c \text{ expected}}^{-1}$  koristeći relaciju (Mayeda i sur., 1992):

$$Q_{c \text{ expected}}^{-1} = Q_{sc}^{-1} \left( 1 - \frac{B_2 + 2B_3\eta_s vt + 3B_4(\eta_s vt)^2 + \dots}{1 + B_2\eta_s vt + B_3(\eta_s vt)^2 + \dots} \right) + Q_i^{-1}, \quad (4.4)$$

gdje su  $B_n$  koeficijenti  $n$ -tog reda raspršenja za  $n = 1, \dots, 10$  preuzeti iz rada Hoshibe i sur. (1991) prikazani u tablici 2.1,  $\eta_s = B_0 Le^{-1}$  izveden je iz relacije (3.5), dok je za vrijeme početka S-kode  $t$  uzeta referentna vrijednost od 50 s.

Za sve postaje izračunale smo vrijednosti  $Le^{-1}$ ,  $B_0$  (s pripadajućim standardnim devijacijama),  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_{sc}^{-1}$ ,  $Q_t^{-1}$ ,  $Q_{c \text{ expected}}^{-1}$  i  $Q_{c \text{ observed}}^{-1}$ . Faktor  $Q_{c \text{ observed}}^{-1}$  dobiven je iz frekvencijske ovisnosti  $Q_c = Q_0 f^n$ , gdje je vrijeme početka kode proteklo od hipocentralnog vremena (engl. *lapse time*)  $t_L = 50$  s, što odgovara raspršenim valovima koji su mogli putovati do oko 100 km oko postaje. Parametri  $Q_0$  i  $n$  za postaje KIJV, CACV, DUGI i HVAR su pre-

uzeti iz rada Dasović i sur. (2012), dok su za postaje ZIRJ, MORI, RICI, MAKA dobivene osobnom komunikacijom s I. Dasović.

Općenito, očekujemo da je vrijednost  $Q_c^{-1}$  faktora bliža izmjenenom faktoru  $Q_i^{-1}$  nego faktoru  $Q_{sc}^{-1}$  za frekvencije veće od 3 Hz na što ukazuju teorijski rezultati Frankela i Wennerberga (1987), analitička rješenja Shanga i Gaoa (1988) te laboratorijski eksperimenti Matsunamija (1991). Veći doprinos u opadanju energije s udaljenošću imat će intrinzična atenuacija nego atenuacija uzrokovana raspršenjem. Za slučaj nasumično raspoređenih raspršivača i homogene apsorpcije, Shang i Gao (1988) pokazali su da je  $Q$ -faktor koda valova jednak  $Q$ -faktoru intrinzične atenuacije.

## 4.2 Rezultati i diskusija za pojedinačne postaje

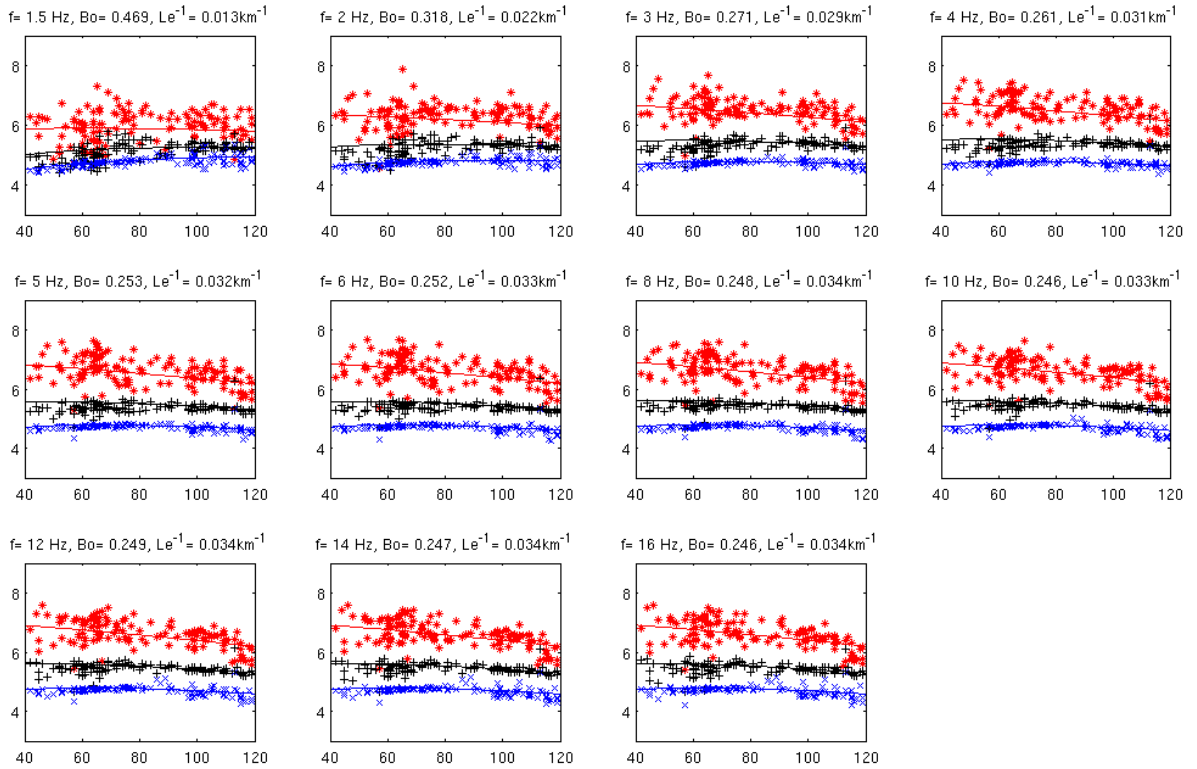
Za prikaz rezultata odabrale smo postaju ZIRJ, dok se rezultati za ostale postaje nalaze u Dodacima. U tablici 4.1 uočavamo da ukupna atenuacija  $Le^{-1}$  uglavnom raste s frekvencijom, dok seizmički albedo  $B_0$  opada s frekvencijom uz izuzetke koji se nalaze unutar granica pogreške. Vrijednosti seizmičkog albeda su manje od 0.5 za sve frekvencije, osim za postaje MORI i DUGI na frekvenciji 1.5 Hz. Niske vrijednosti albeda izračunate za ovo područje ukazuju na niski stupanj lateralne heterogenosti u gornjoj kori većinom do 15 km (Sahin i sur., 2007), odnosno malenu vjerojatnost postojanja gusto raspoređenih rasjednih struktura.

Tablica 4.1 Ukupna atenuacija i seizmički albedo s pripadnim standardnim pogreškama,  $Q^{-1}$ -faktor intrinzičnih procesa, raspršenja, ukupni, očekivani i mjereni u ovisnosti o frekvenciji. Podaci postaje ZIRJ.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{\text{expected}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{\text{observed}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0130	0.0042	0.4690	0.1339	2.5635	2.2642	6.3131	1.8403	4.8736
2	0.0220	0.0094	0.3180	0.1345	4.1789	1.9485	3.8993	3.4491	3.9391
3	0.0290	0.0099	0.2710	0.0920	3.9255	1.4593	2.2282	3.2855	2.9180
4	0.0310	0.0104	0.2610	0.0870	3.1903	1.1268	1.6711	2.6747	2.3585
5	0.0320	0.0114	0.2530	0.0890	2.6631	0.9020	1.4483	2.2499	1.9995
6	0.0330	0.0118	0.2520	0.0892	2.2917	0.7721	1.2069	1.9234	1.7471
8	0.0340	0.0120	0.2480	0.0867	1.7803	0.5871	0.9052	1.4942	1.4121
10	0.0330	0.0119	0.2460	0.0876	1.3860	0.4522	0.7242	1.1780	1.1972
12	0.0340	0.0120	0.2490	0.0874	1.1853	0.3930	0.6035	0.9926	1.0461
14	0.0340	0.0122	0.2470	0.0877	1.0187	0.3341	0.5173	0.8569	0.9333
16	0.0340	0.0123	0.2460	0.0883	0.8925	0.2912	0.4874	0.7524	0.8455



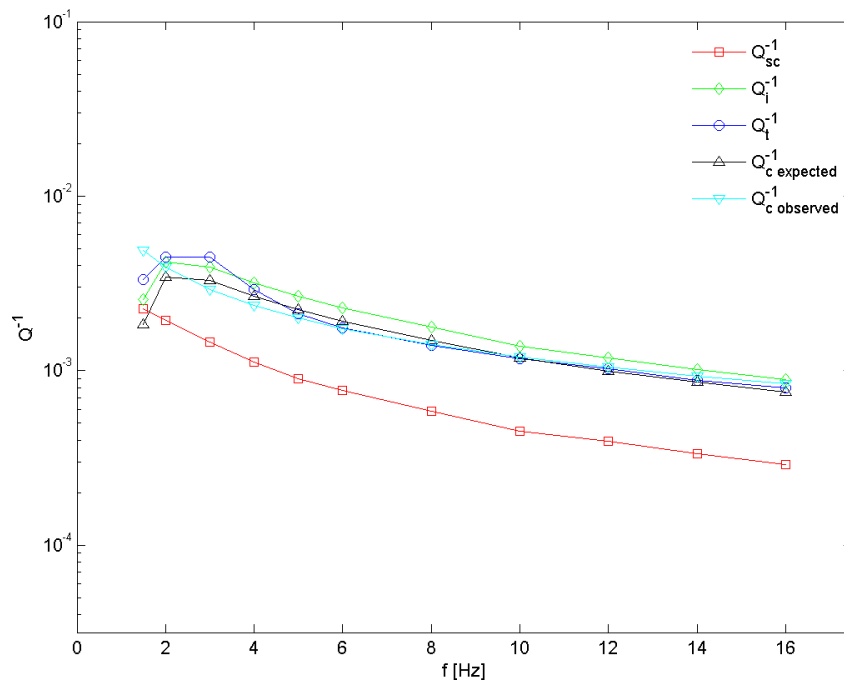
Izračunate parove  $Le^{-1}$  i  $B_0$ , koji odgovaraju minimumu reziduala (slika 3.6) za svaku frekvenciju, iskoristile smo za određivanje teorijskih krivulja. One predstavljaju najbolju prilagodbu za energije dobivene iz eksperimentalnih podataka za hipocentralne udaljenosti korištene u analizi (slika 3.5). Raspršene energije zajedno s prilagodbom prikazujemo na slici 4.1. Krivulje vrlo dobro opisuju raspršene energije za sva tri vremenska prozora.



Slika 4.1 Normirane energije s korekcijom za geometrijsko rasprostiranje za tri različita vremenska prozora 0 – 15 s (\*), 15 – 30 s (+), 30 – 45 s (×) u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za svaku središnju frekvenciju. Krivulje predstavljaju najbolju prilagodbu definiranu za par  $Le^{-1}$  i  $B_0$  koji odgovara minimumu reziduala. Podaci za postaju ZIRJ.

Da bismo istražile odnose  $Q^{-1}$ -faktora uspoređujemo faktore  $Q_{c\ expected}^{-1}$ ,  $Q_t^{-1}$ ,  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_{sc}^{-1}$ , koji odgovaraju rješenjima minimuma reziduala, i  $Q_{c\ observed}^{-1}$  u ovisnosti o frekvenciji (slika 4.2). Za sve analizirane hipocentralne udaljenosti vrijednosti,  $Q_{c\ expected}^{-1}$ ,  $Q_{c\ observed}^{-1}$ ,  $Q_t^{-1}$  bliske su vrijednostima  $Q_i^{-1}$  faktora te pokazuju vrlo sličan trend frekvencijske ovisnosti, što je u skladu s očekivanjem. Neke postaje pokazuju odstupanje od prethodno opisanih odnosa. Kao jedno od mogućih objašnjenja odstupanja mnogi autori navode (npr. Mayeda i sur., 1992; Akinci i sur., 2000; Bianco i sur., 2005; Giampiccolo i sur., 2006) korištenje pretpostavke uniformne raspodjele raspršivača. Nadalje, vrijednosti  $Q_i^{-1}$  veće su od vrijednosti  $Q_{sc}^{-1}$  za sve frekvencije. Ovakav učinak može se objasniti ako su valne duljine seizmičkih valova

manje od prosječne veličine heterogenosti u sredstvu (Bianco i sur., 2005). Na nižim frekvencijama razlike između faktora su manje, a vrijednosti svih faktora opadaju s povećanjem frekvencije. Faktor  $Q_{sc}^{-1}$  pokazuje brži pad, odnosno veću frekvencijsku ovisnost. To znači da povećanjem frekvencije na atenuaciju sve više utječe neelastičnost sredstva, a smanjuje se utjecaj raspršenja valova. Mnogi autori povezuju jaku frekvencijsku ovisnost s dimenzijama heterogenosti. Jaka frekvencijska ovisnost  $Q_{sc}^{-1}$  javlja se kada su heterogenosti odgovorne za raspršenje usporedive s valnom duljinom najnižih analiziranih frekvencija (približno 2 km, npr. Akinci i sur., 2000).

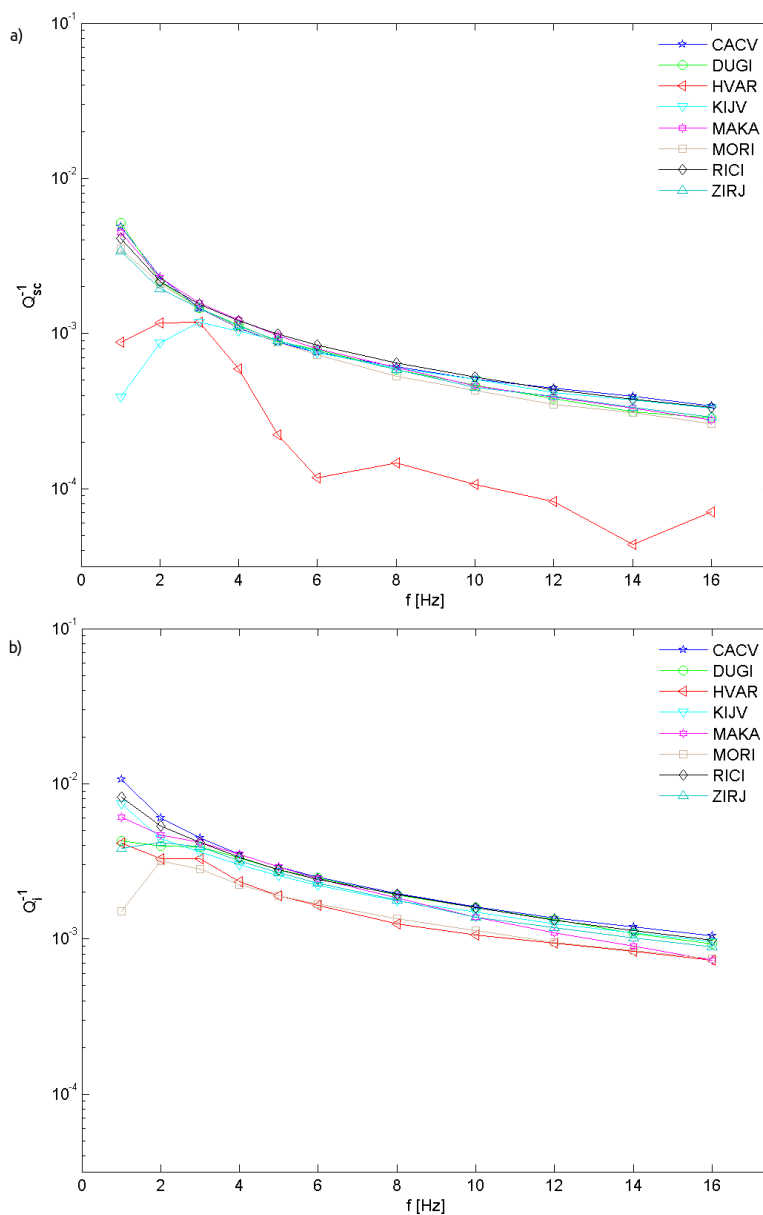


Slika 4.2  $Q^{-1}$ -faktor atenuacije raspršenja, intrinzične, ukupne, očekivane i mjerene atenuacije u ovisnosti o frekvenciji za hipocentralne udaljenosti od 40 do 120 km. Podaci za postaju ZIRJ.

Na pojedinim postajama na frekvencijama manjima od 4 Hz uočavamo odstupanja od uobičajenog trenda frekvencijske ovisnosti. Primjer je postaja MORI (slika D6 u Dodatku D) gdje na frekvenciji 1.5 Hz  $Q_{sc}^{-1}$ -faktor premašuje vrijednost  $Q_i^{-1}$ -faktora. Kod postaje HVAR (slika D3 u Dodatku D) nema kontinuiranog pada vrijednosti  $Q_{sc}^{-1}$ -faktora, a uzrok tome mogla bi biti složenija građa, odnosno heterogenost sredstva. Postaja HVAR nalazi se na samom rubu Vanjskih Dinarida.

### 4.3 Usporedba $Q_{sc}^{-1}$ i $Q_i^{-1}$ -faktora za sve postaje

Usporedba  $Q_{sc}^{-1}$  i  $Q_i^{-1}$ -faktora za sve postaje korištene u analizi nalazi se na slici 4.3. Uz pojedine izuzetke, za sve postaje uočavamo konzistentnost u vrijednostima  $Q^{-1}$ -faktora i sličnost trenda frekvencijskih ovisnosti, tj. intrinzična atenuacija prevladava nad atenuacijom raspršenja za sve frekvencije na svim postajama. Rezultati su očekivani, budući da se postaje nalaze na relativno malim međusobnim udaljenostima, odnosno unutar iste tektonske jedinice. Dasović (2015) navodi da se raspršenje može interpretirati pomoću omjera faktora dobrote S-valova i faktora dobrote P-valova,  $Q_S/Q_P$ . Napravljena je usporedba rezultata za postaju HVAR.



Slika 4.3 Usporedba rezultata ovisnosti: a)  $Q_{sc}^{-1}$ -faktora, b)  $Q_i^{-1}$ -faktora o frekvenciji za sve postaje korištene u analizi.

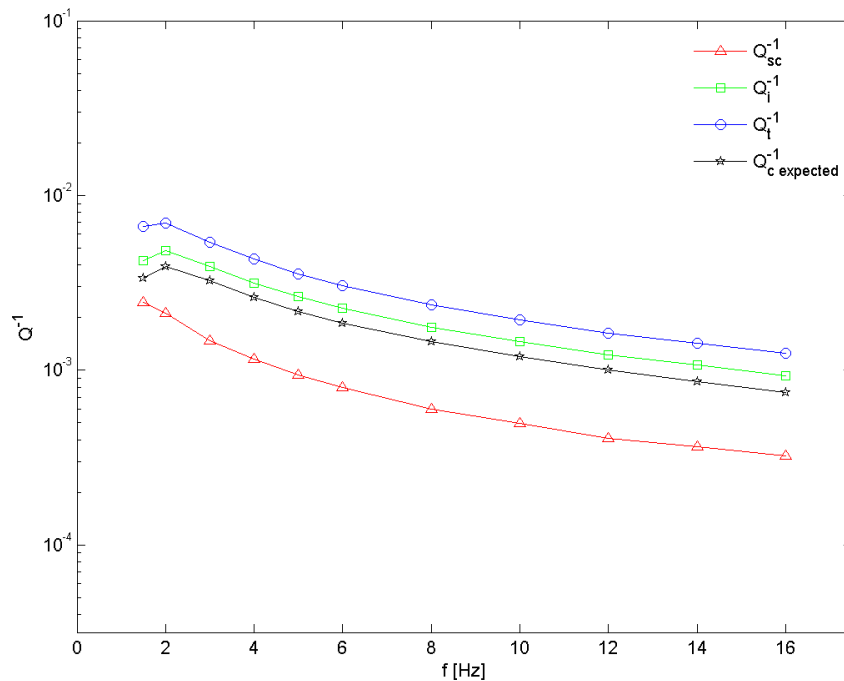
Rezultati postaje HVAR, koja je udaljenija od ostalih postaja, pokazuju različit trend i vrijednosti atenuacije raspršenja (slabije raspršenje). Prema Dasović (2015), postaja HVAR za frekvencije 4–6 Hz pokazuje vrlo velike vrijednosti omjera  $Q_S/Q_P$ , što ukazuje na izraženiji doprinos raspršenja atenuaciji S-valova, odnosno na smanjenje atenuacije S-valova u odnosu na atenuaciju P-valova. Tako ponašanje mogli bi se objasniti relativnim povećanjem gustoće većih raspršivača s dubinom. To znači da bi atenuacija raspršenja  $Q_{sc}^{-1}$  u rasponu 4 – 6 Hz trebala biti nešto veća nego za okolne frekvencije. Rezultati ovog rada pokazuju da postaja HVAR ima manje vrijednosti atenuacije raspršenja  $Q_{sc}^{-1}$  za frekvencije 4 – 6 Hz (slika 4.3 a), što je kontradiktorno s zaključkom iznesenim u radu Dasović (2015). Za frekvencije veće od 6 Hz, Dasović (2015) pokazuje smanjenje vrijednosti  $Q_S/Q_P$ , što ukazuje na smanjivanje utjecaja raspršenja na atenuaciju S-valova, odnosno relativno smanjenje gustoće raspršivača. Ovaj rad za frekvencije veće od 6 Hz pokazuje smanjenje faktora  $Q_{sc}^{-1}$  s frekvencijom (slika 4.3 a), odnosno manje raspršenje, što je u skladu sa zaključcima koje je iznijela Dasović (2015).

#### **4.4 Rezultati $Q^{-1}$ -faktora za središnji dio Vanjskih Dinarida**

Kako bismo dobile jedinstvene vrijednosti faktora za promatrano područje središnjih Vanjskih Dinarida, analizu smo ponovile na cijelom skupu podataka (1246 seizmograma), ne uzimajući u obzir podjelu po postajama. Rezultati su prikazani u tablici 4.2 i na slici 4.4. Međusobne ovisnosti faktora slične su onima u prethodnoj analizi za pojedinačne postaje. Seizmički albedo nalazi se u rasponu između 0.36 (za 1.5 Hz) i 0.25 (za 16 Hz), a ukupna atenuacija ima vrijednosti između 0.018 (1.5 Hz) i 0.036 (16 Hz)  $\text{km}^{-1}$ . Dakle, dobiveni rezultati upućuju na dominaciju intrinzične atenuacije nad atenuacijom raspršenja na promatranom području.

U ovom području prevladavaju potresi sa žarištem u gornjoj kori, uglavnom do dubine od 15 km. To nas upućuje da se rasjedne strukture nalaze pretežito na plićim dubinama te uzrokuju relativno veliki koeficijent raspršenja pri nižim frekvencijama, kada su valne duljine usporedive s veličinom heterogenosti. Procjene  $Q$ -faktora iz kode S-valova temeljene na jednostavnom modelu poluprostora (Zeng i sur., 1991) vjerojatno nisu adekvatne za modeliranje atenuacije u kori, posebno zato što donja kora i plašt nisu uzeti u obzir (Margerin i sur., 1998, 1999; Hoshiba i sur., 2001). No ipak, ova detaljna analiza daje nam razumni početni model za  $Q$ -faktor. S druge strane, smanjivanje dimenzija i/ili broja heterogenosti u dubljoj kori, kada visoki tlak efektivno djeluje na zatvaranje pukotine, trebalo bi rezultirati

rati manjim koeficijentom raspršenja na tim dubinama. Naša analiza nije uključivala izračun koeficijenata u ovisnosti o dubini, ali drugi autori (Bianco i sur., 2002, 2005; Ugalde i sur., 2007) ukazuju da korištenje neuniformnog modela preciznije opisuje seizmičku atenuaciju, posebno ako podzemne strukture sadrže inverze brzina i /ili diskontinuitete koji uzrokuju znatne promjene u energiji koda valova, mijenjajući ukupni sadržaj energije u sredstvu.



Slika 4.4  $Q^{-1}$ -faktor raspršenja, intrinzičnih procesa, ukupni, očekivani i mjereni u ovisnosti o frekvenciji za hipocentralne udaljenosti od 40 do 120 km. Podaci za područje središnjih Vanjskih Dinarida.

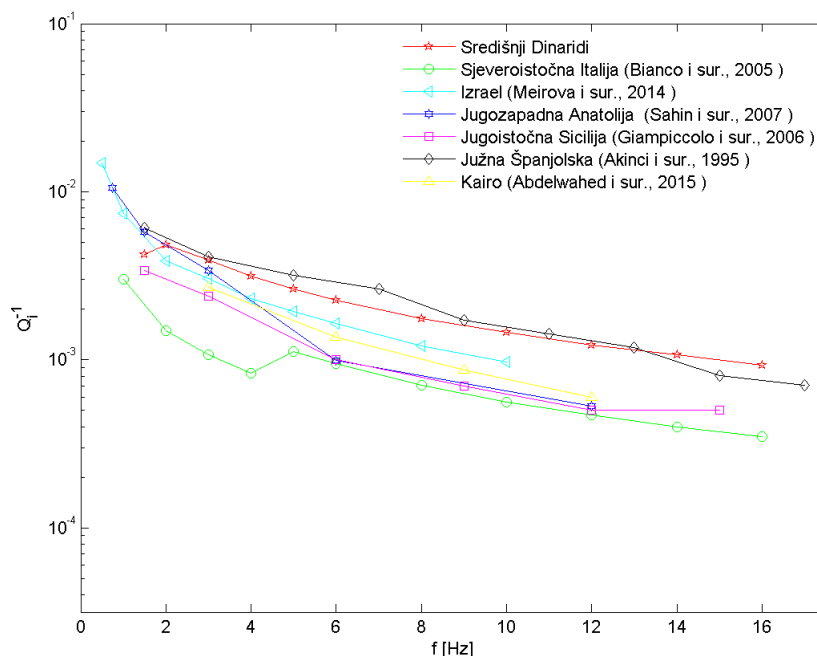
Tablica 4.2  $Q^{-1}$ -faktor raspršenja, intrinzičnih procesa, ukupni, očekivani i mjereni u ovisnosti o frekvenciji za hipocentralne udaljenosti od 40 do 120 km. Podaci za područje središnjih Vanjskih Dinarida.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c\text{expected}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0180	0.0026	0.3670	0.0199	4.2313	2.4532	6.6845	3.3746
2	0.0250	0.0119	0.3060	0.1456	4.8323	2.1307	6.9630	3.9332
3	0.0290	0.0125	0.2730	0.1176	3.9147	1.4700	5.3847	3.2631
4	0.0310	0.0128	0.2670	0.1106	3.1644	1.1527	4.3171	2.6185
5	0.0320	0.0135	0.2630	0.1105	2.6275	0.9376	3.5651	2.1719
6	0.0330	0.0135	0.2600	0.1062	2.2672	0.7966	3.0637	1.8683
8	0.0340	0.0140	0.2540	0.1047	1.7661	0.6013	2.3674	1.4619
10	0.0350	0.0145	0.2540	0.1050	1.4544	0.4952	1.9496	1.1920
12	0.0350	0.0145	0.2500	0.1034	1.2185	0.4062	1.6247	1.0087
14	0.0360	0.0146	0.2550	0.1039	1.0671	0.3653	1.4324	0.8630
16	0.0360	0.0149	0.2570	0.1060	0.9312	0.3221	1.2533	0.7488

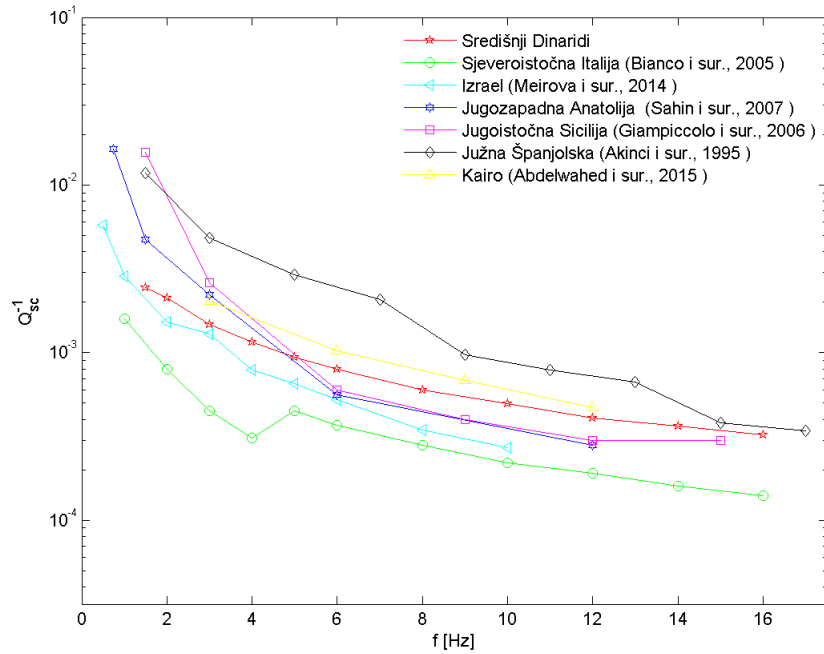
#### 4.5 Usporedba $Q_{sc}^{-1}$ i $Q_i^{-1}$ -faktora središnjih Vanjskih Dinarida s drugim regijama u svijetu

Na slikama 4.5 i 4.6 uspoređujemo dobivene faktore  $Q_i^{-1}$  i  $Q_{sc}^{-1}$  za središnje Vanjske Dinaride s rezultatima drugih autora. Intrinzična atenuacija našeg područja veća je od intrinzične atenuacije sjeveroistočne Italije (Bianco i sur., 2005), jugoistočne Sicilije (Giampiccolo i sur., 2006), Kaira (Abdelwahed i sur., 2005), jugozapadne Anatolije (Sahin i sur., 2007) i Izraela (Meirova i sur., 2014) za frekvencije veće od 3 Hz, dok se dobro podudara s vrijednostima južne Španjolske (Akinci i sur., 1995). S druge strane, nemamo potpunu podudarnost atenuacije raspršenja s ostalim regijama: južna Španjolska i Kairo pokazuju veće vrijednosti, Izrael i sjeveroistočna Italija manje za sve frekvencije, dok se odnos vrijednosti našeg područja te jugoistočne Sicilije i jugozapadne Anatolije mijenja po frekvencijama.

Uspoređujući vrijednosti  $Q_i^{-1}$  i  $Q_{sc}^{-1}$  dobivene za različita područja, može se zaključiti da su vrijednosti  $Q_i^{-1}$  za središnji dio Vanjskih Dinarida među većima. To navodi na zaključak da je atenuacija S-valova općenito vrlo velika u istraživanom području. Iako vrijednosti  $Q_{sc}^{-1}$  za središnji dio Vanjskih Dinarida mijenjaju odnose s vrijednostima drugih regija, može se zaključiti da je raspršenje istraživanog područja približno prosječna za uspoređene regije.



Slika 4.5 Usporedba rezultata ovisnosti  $Q_i^{-1}$ -faktora o frekvenciji za različita područja: središnji Vanjski Dinaridi (ovaj rad), sjeveroistočna Italija (Bianco i sur., 2005), Izrael (Meirova i sur., 2014), jugozapadna Anatolija (Sahin i sur., 2007), jugoistočna Sicilija (Giampiccolo i sur., 2006), južna Španjolska (Akinci i sur., 1995), Kairo (Abdelwahed i sur., 2005)



Slika 4.6 Usporedba rezultata ovisnosti  $Q_{sc}^{-1}$ -faktora o frekvenciji za različita područja: središnji Vanjski Dinaridi (ovaj rad), sjeveroistočna Italija (Bianco i sur., 2005), Izrael (Meirova i sur., 2014), jugozapadna Anatolija (Sahin i sur., 2007), jugoistočna Sicilija (Giampiccolo i sur., 2006), južna Španjolska (Akinci i sur., 1995), Kairo (Abdelwahed i sur., 2005)

## 5 Zaključci

Ovaj rad pruža nove informacije o svojstvima atenuacije kore u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida. Po prvi put procjenjen je, za ovo područje, doprinos intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja ukupnoj atenuaciji. Poznavanje relativnih doprinosa bitno je zbog prepoznavanja svojstava potpovršinskog sredstva, tektonske interpretacije područja i određivanja seizmičkog hazarda.

Primjenile smo MLTWA-metodu koja se temelji na pretpostavci višestrukog izotropnog raspršenja u sredstvu uniformne razdiobe raspršivača. Koristile smo 1246 seizmograma s osam hrvatskih seizmoloških postaja: CACV, MAKA, HVAR, KIJV, DUGI, ZIRJ, MORI i RIC1. Odabrani potresi imaju hipocentralne udaljenosti od 40 do 120 km i lokalne magnitude  $\geq 2$ , a analiza je provedena za središnje frekvencije pojaseva u rasponu od 1.5 do 16 Hz. Rezultati pokazuju da je seizmički albedo  $B_0$  promatranog područja manji od 0.5 što sugerira dominaciju intrinzične atenuacije nad atenuacijom raspršenja za sve frekvencije, a posebno za više frekvencije. To je vidljivo i u izračunu svih  $Q^{-1}$ -faktora. Vrijednosti svih faktora opadaju s povećanjem frekvencije. Vrijednosti  $Q_{c \text{ expected}}^{-1}$  i  $Q_t^{-1}$  bliske su vrijednostima  $Q_i^{-1}$  faktora te pokazuju isti trend frekvencijske ovisnosti. Faktori se dobro se slažu i s procjenama  $Q_{c \text{ observed}}^{-1}$  dobivenih za isto područje modelom jednostrukog raspršenja:  $Q_{c \text{ observed}}^{-1}$  bliži je faktoru  $Q_i^{-1}$ , što se podudara s teorijskim predviđanjima za prostorno uniformni model. Vrijednosti  $Q_i^{-1}$  veće su od vrijednosti  $Q_{sc}^{-1}$  za sve frekvencije. Uzrok vjerojatno leži u tome da su valne duljine seizmičkih valova manje od prosječne veličine heterogenosti u sredstvu. Uspoređujući faktore atenuacije s rezultatima dobivenim za druga područja, može se zaključiti da su vrijednosti  $Q_i^{-1}$  za središnji dio Vanjskih Dinarida među većima, odnosno da je intrinzična atenuacija snažna. Vrijednosti  $Q_{sc}^{-1}$  dobivene u ovoj analizi predstavljaju približno prosječne vrijednosti u odnosu na one dobivene za uspoređena područja.

Procjene  $Q$ -faktora u ovoj analizi temelje se na jednostavnom modelu poluprostora. Takav model vjerojatno nije adekvatan za proučavanje atenuacije u kori, posebno jer donja kora i plašt nisu uzeti u obzir. Ipak, ova detaljna analiza daje nam razumni početni model za  $Q$ -faktor.



## 6 Literatura

- [1] 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.
- [2] Abubakirov, I. R. (2005): *Attenuation Characteristics of Transverse Waves in the Lithosphere of Kamchatka Estimated from Observations at the Petropavlovsk Digital Broadband Station*, Izv., Phys. Solid Earth, Vol. 41, No. 10, 813-824.
- [3] Aki, K. (1969): *Analysis of seismic coda of local earthquakes as scattered waves*, J. Geophys. Res., 74, 615-631.
- [4] Aki, K., Chouet, B. (1975): *Origin of coda waves source, attenuation and scattering effects*, J. Geophys. Res., 80, 3322-3342.
- [5] 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.
- [6] Akinci, A., Del Pezzo, E., Ibanez, J. (1995): *Separation of scattering and intrinsic attenuation in southern Spain and Western Anatolia (Turkey)*, Geophys. J. Int., 121, 337-353.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 sector of the Italian Peninsula*, Geophys. J. Int., 161, 130-142.
- [10] Dasović, I. (2009): *Analiza koda valova na području Stona i širem području otoka Hvara*, diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 3-4.
- [11] 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.

- [12] 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*, Phys. Chem. Earth, 63, 47–54.
- [13] Dasović, I., Ruščić, M., Herak, D., Herak, M. (2015): *Attenuation of high-frequency body waves in the crust of the Central External Dinarides* (U postupku recenzije).
- [14] Dasović, I. (2015): *Atenuacija seizmičkih valova u području Dinarida*, doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 23-26. (U postupku ocjene).
- [15] Fehler, M., Hoshiya, 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.
- [16] Frankel, A., Wennerberg, L. (1987): *Energy-flux model of seismic coda: separation of scattering and intrinsic attenuation*, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1223–1251.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Goutbeek, F. H., Dost, B., van Eck, T. (2004) : *Intrinsic Absorption and Scattering Attenuation in the Southern Part of the Netherlands*, J. Seismol., 8, 11-23.
- [20] Herak, M. (1991): *Lapse time dependent  $Q_c$ -spectra observed in the Dinarides region (Yugoslavia)*, Phys. Earth Planet. Inter., 67, 303-312.
- [21] Herak, M., Herak, D., Markušić, S., (1996): *Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992*, Terra Nova 8, 86–94.
- [22] Herak, M. i sur. (2011): *Karte potresnih područja Republike Hrvatske*, <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php> za niz normi: 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1.dio: Opća pravila, potresna djelovanja

*i pravila za zgrade*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek.

- [23] Hoshiha, 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., Vol. 42, No. 2, 65-91.
- [24] Hoshiha, M. (1991): *Simulation of multiple-scattered coda wave excitation based on the energy conservation law*, Phys. Earth. Planet. In., 67, 123-136.
- [25] Hoshiha, M., Rietbrock, A., Scherbaum, F., Nakahara, H., Haberland, C. (2001): *Scattering attenuation and intrinsic absorption using uniform and depth dependent model - Application to full seismogram envelope recorded in Northern Chile*, J. Seismol., 5, 157-179.
- [26] Kastelic, V., Vannoli, P., Burrato, P., Fracassi, U., Tiberti, M. M., Valensise, G. (2013.): *Seismogenic sources in Adriatic Domain*, Mar. Petrol. Geol. ,42, 191-213.
- [27] Margerin, L., Campillo, M., van Tiggelen, B. (1998): *Radiative transfer and diffusion of waves in a layered medium: new insight into coda Q*, Geophys. J. Int., 134, 596-612.
- [28] Margerin, L., Campillo, M., Shapiro, N., M., van Tiggelen, B. (1999): *Residence time of diffuse waves in the crust as a physical interpretation of coda Q: application to seismograms recorded in Mexico*, Geophys. J. Int., 138, 343-352.
- [29] Matsunami, K. (1991): *Laboratory tests of excitation and attenuation of coda waves using 2-D models of scattering media*, Phys. Earth Planet. Int., 67, 36–47.
- [30] Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiha, 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.
- [31] 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.

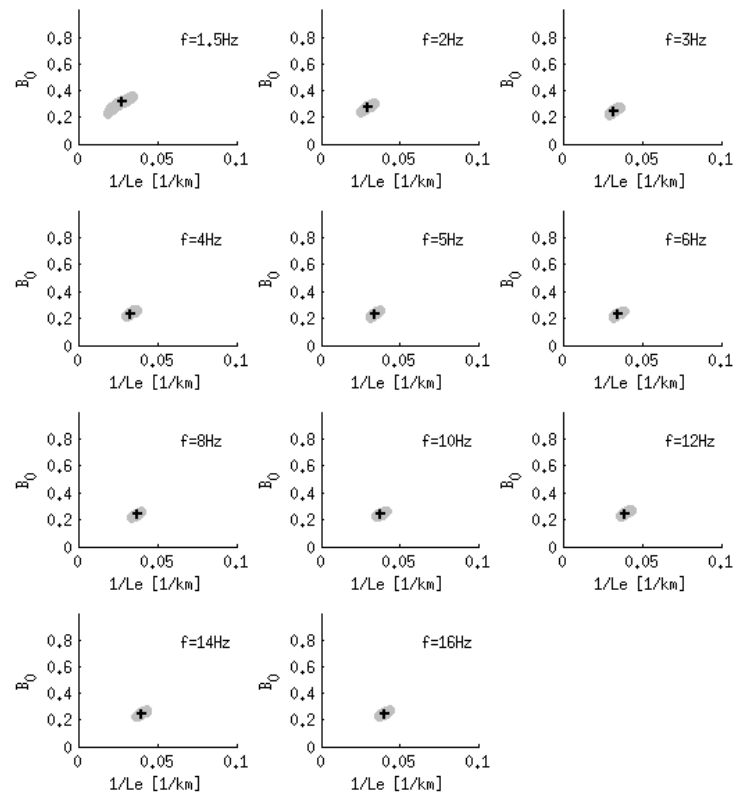
- [32] Mukhopadhyay, S., Kumar, A., Garg, A., Del-Pezzo, E., Kayal, J.R. (2014): *The attenuation mechanism of S-waves in the source zone of the 1999 Chamoli earthquake*, J. Asian Earth Sci., 79, 446–454.
- [33] Rovelli, A. (1984) *Seismic Q for the lithosphere of the Montenegro region (Yugoslavia): frequency, depth and time windowing effects*, Phys. Earth Planet. Inter., 34, 159-172.
- [34] Sahin, S., Erduran, M., Alptekin, O., Cakir, O. (2007): *Intrinsic and Scattering Seismic Attenuation in Southwestern Anatolia*, Pure Appl. Geophys., 164, 2255- 2270.
- [35] Sato, H. (1977): *Energy propagation including scattering effects: single isotropic scattering approximation*, J. Geophys. Res., 25, 27-41.
- [36] Sato, H., Fehler, M. C., Maeda, T., (2012): *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*, Second Edition, Springer
- [37] 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.
- [38] Stipčević, J., (2012): *Struktura kore i gornjeg plašta u širem području Dinarida određena analizom širokopojasnih funkcija prijemnika*, Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 170 str.
- [39] 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, 298,145–167.
- [40] Ugalde, A., Tripathi, J.N., Hoshiba, M., Rastogi, B.K. (2007): *Intrinsic and scattering attenuation in western India from aftershocks of the 26 January, 2001 Kachchh earthquake*, Tectonophysics., 429, 111–123.
- [41] Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I., Matičec, D., (2005) *Evolution of the Adriatic carbonate platform: paleogeography, main events and depositional dynamics*, Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 220, 333-360.

- [42] 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.
- [43] Yoshimoto, K., Okada, M., (2009): *Frequency-dependent attenuation of S-waves in the Kanto region, Japan*, Earth Planets Space, 61, 1067-1075.
- [44] Zeng, Y. (1991): *Compact solutions for multiple scattered wave energy in time domain*, B. Seismol. Soc. Am, Vol. 81, No. 3, 1022-1029.
- [45] 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.

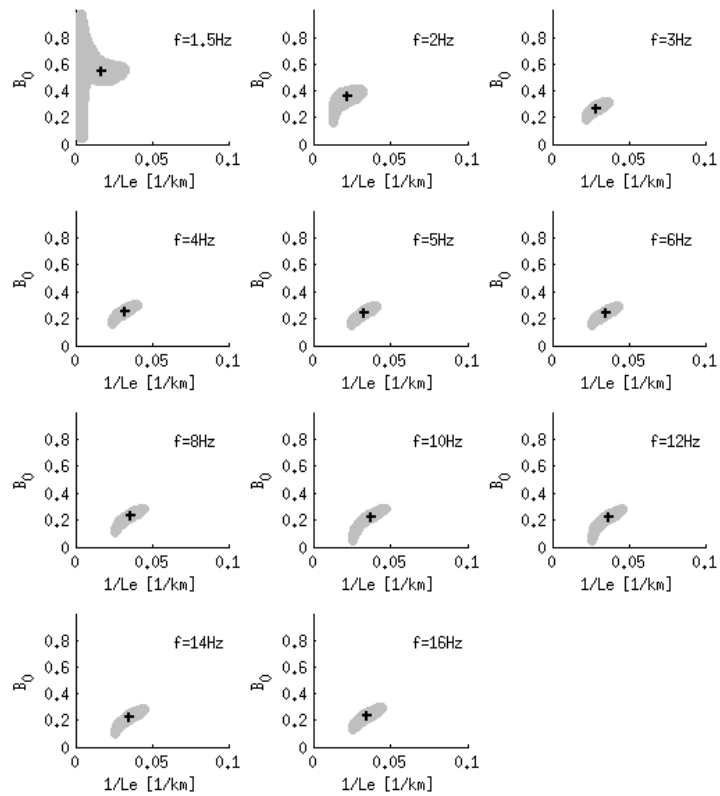
# Dodatak A

## Prikazi reziduala za određivanje $B_0$ i $Le^{-1}$

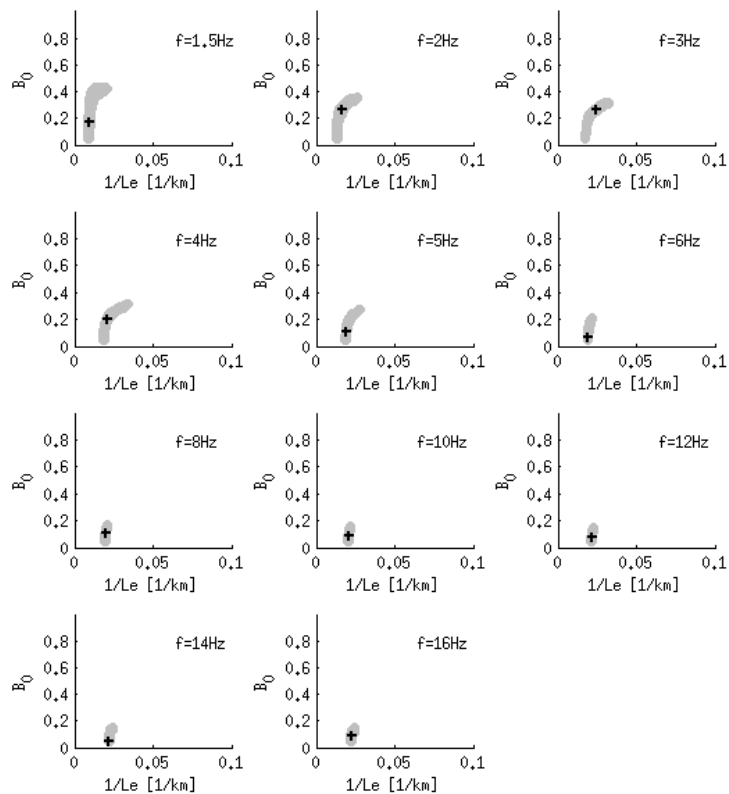
Slike prikazuju rezidualne (vrijednosti su normirane s pripadnim minimumom) za sve frekvencije. Parovi  $Le^{-1}$  i  $B_0$  koji odgovaraju minimumu reziduala označeni su crnim križićem, dok sivi „oblak” predstavlja 68%-tno područje pouzdanosti. Prikazani su rezultati za postaje CACV, DUGI, HVAR, KIJV, MAKA, MORI i RICI.



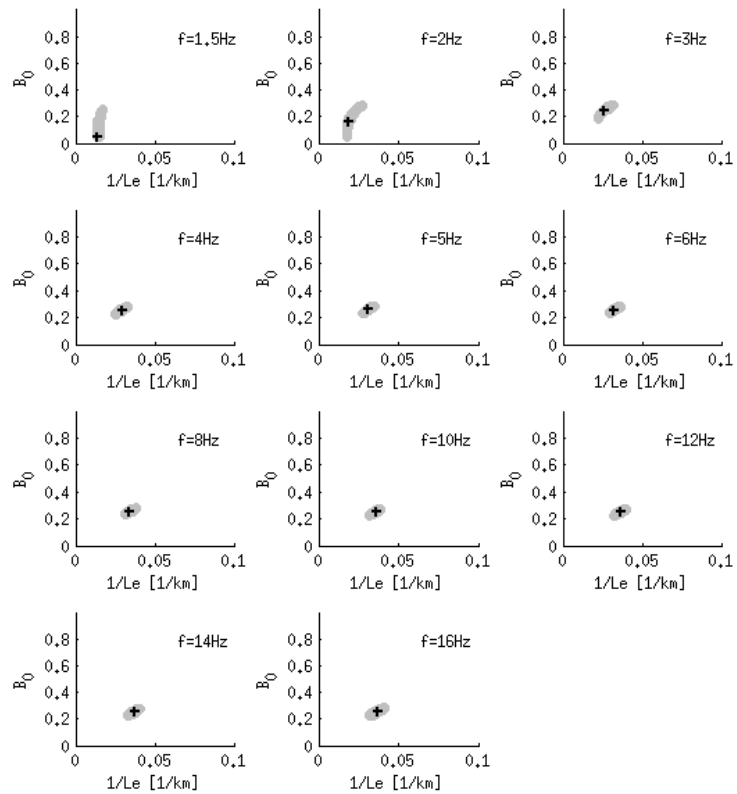
Slika A1 Prikazi reziduala za postaju CACV.



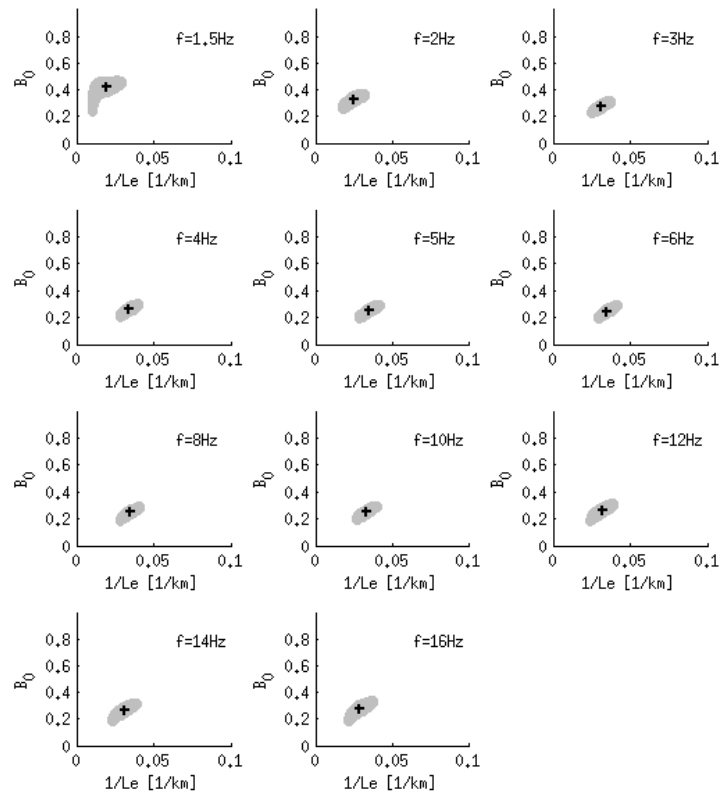
Slika A2 Prikazi reziduala za postaju DUGI.



Slika A3 Prikazi reziduala za postaju HVAR.

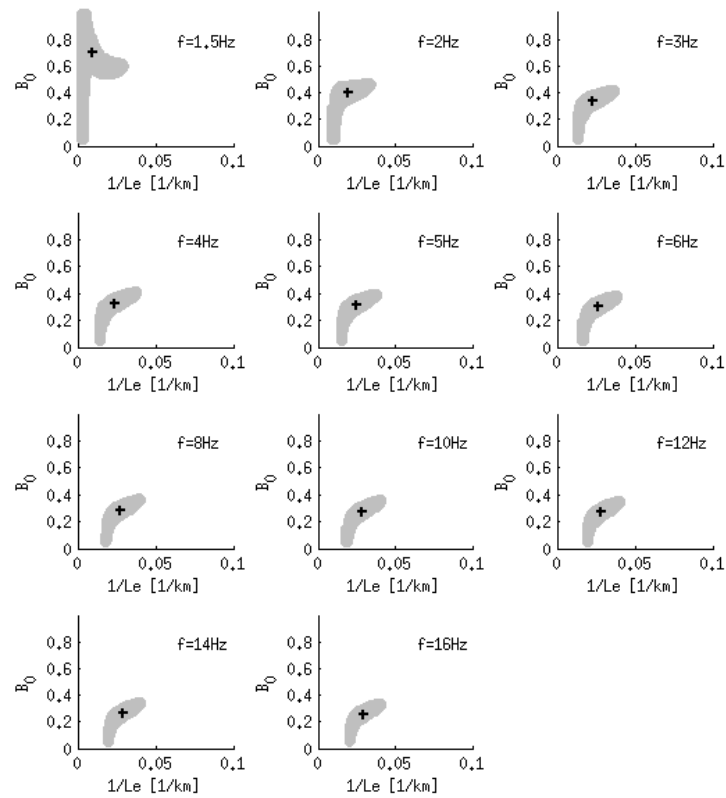


Slika A4 Prikazi reziduala za postaju KIJV.

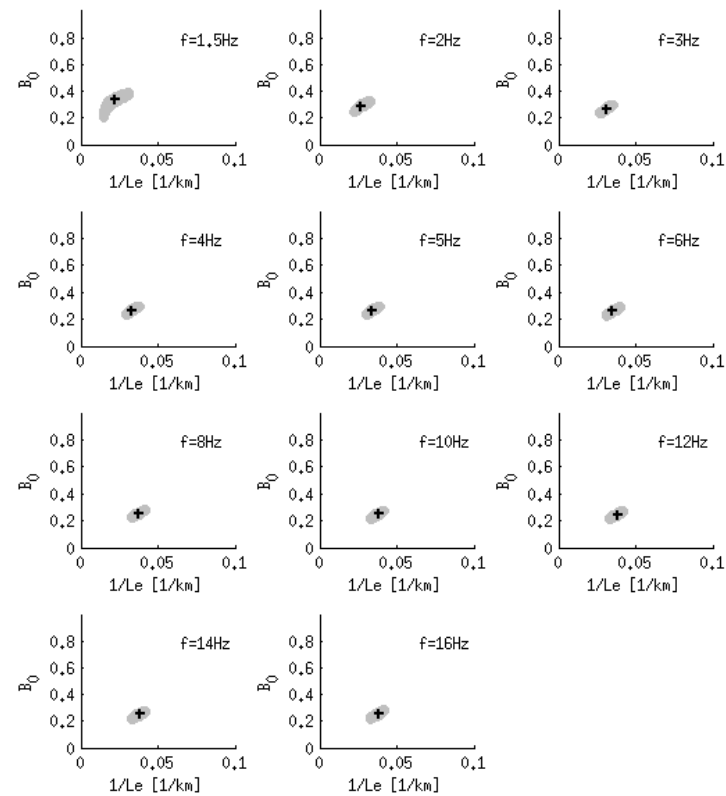


Slika A5 Prikazi reziduala za postaju MAKА.





Slika A6 Prikazi reziduala za postaju MORI.

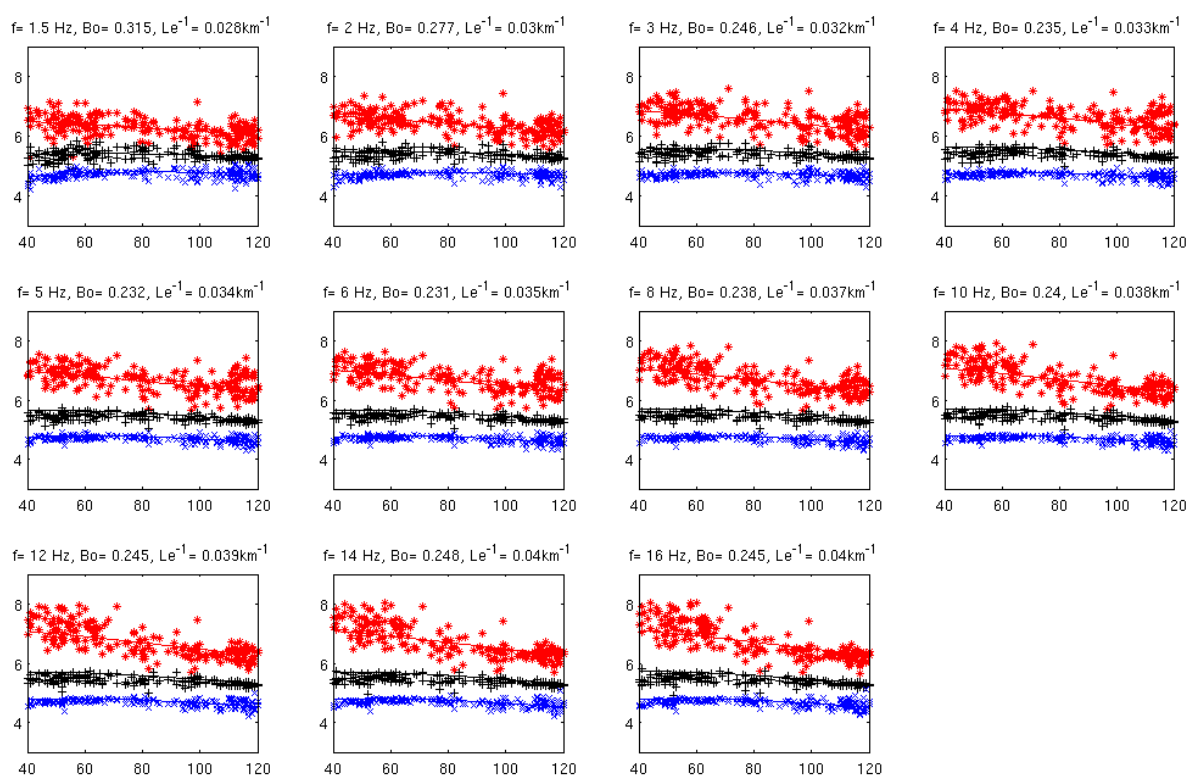


Slika A7 Prikazi reziduala za postaju RIC1.

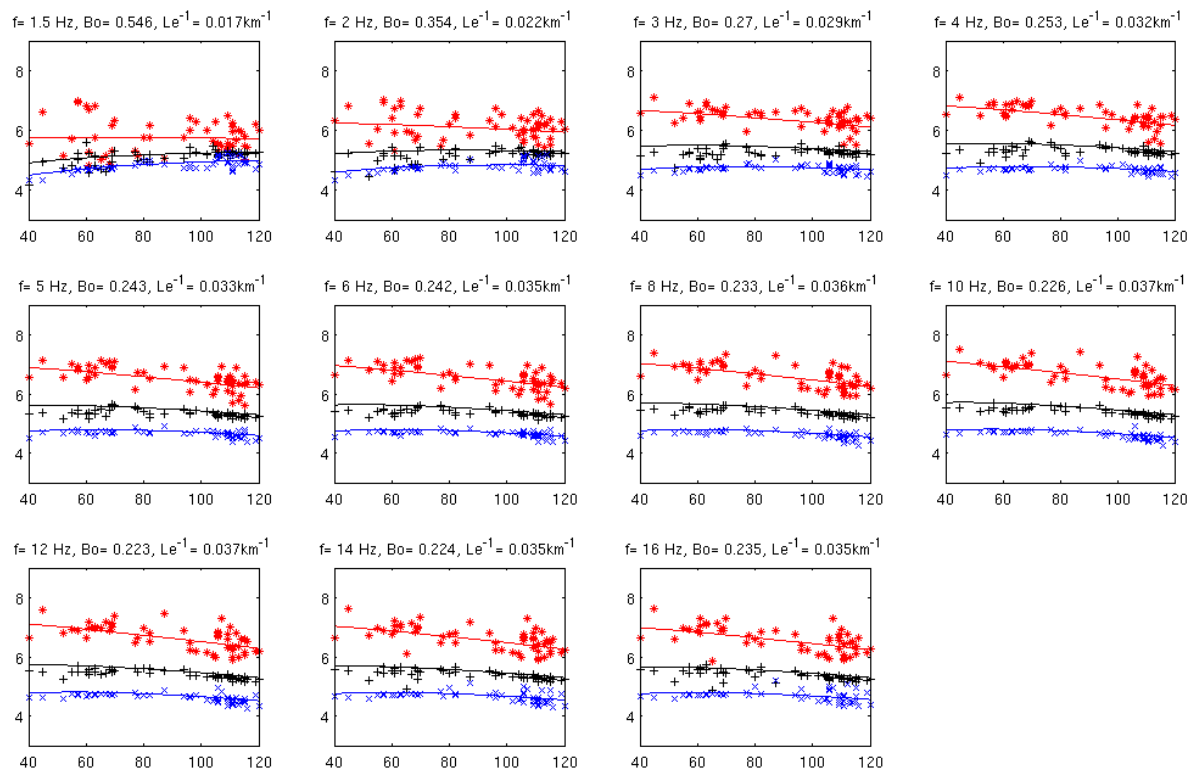
# Dodatak B

## Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe

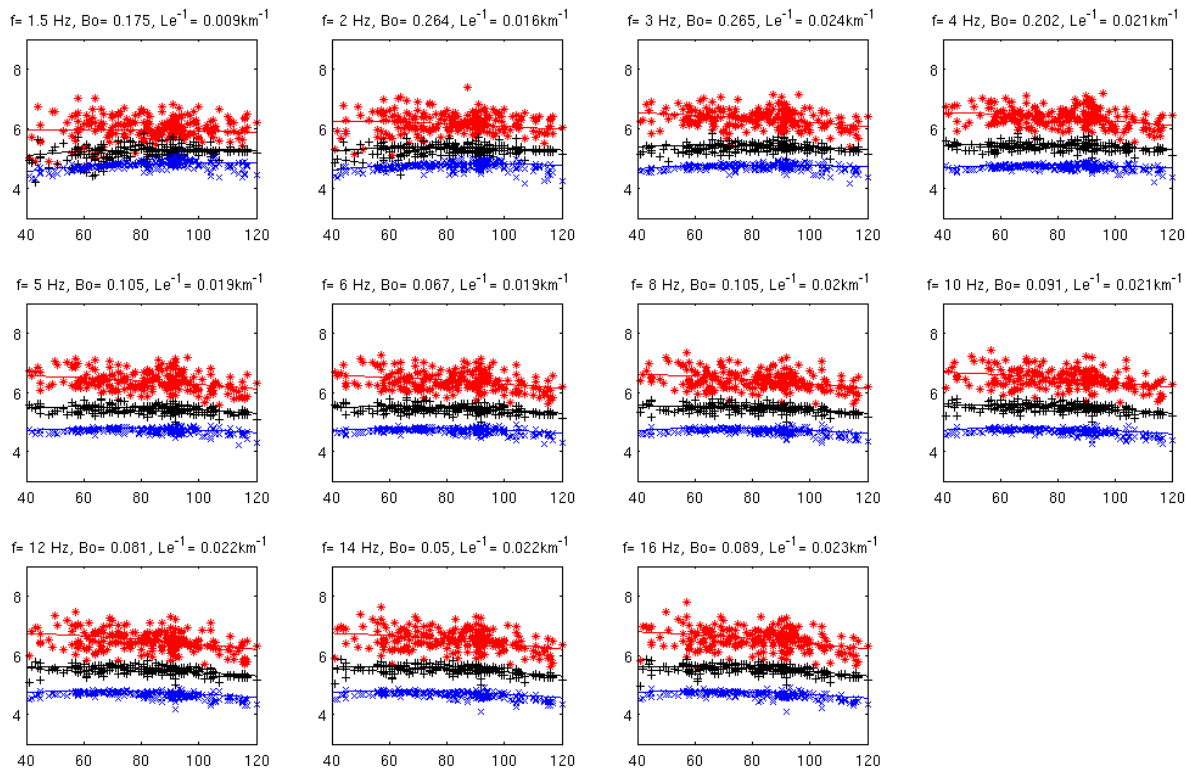
Slike prikazuju normirane energije s korekcijom za geometrijsko rasprostiranje za tri različita vremenska prozora 0-15 s (\*), 15-30 s (+), 30-45 s (×) u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za svaku središnju frekvenciju. Krivulje predstavljaju najbolju prilagodbu definiranu parom  $Le^{-1}$  i  $B_0$  koji odgovara minimumu reziduala. Prikazani su rezultati za postaje CACV, DUGI, HVAR, KIJV, MAKA, MORI i RICI.



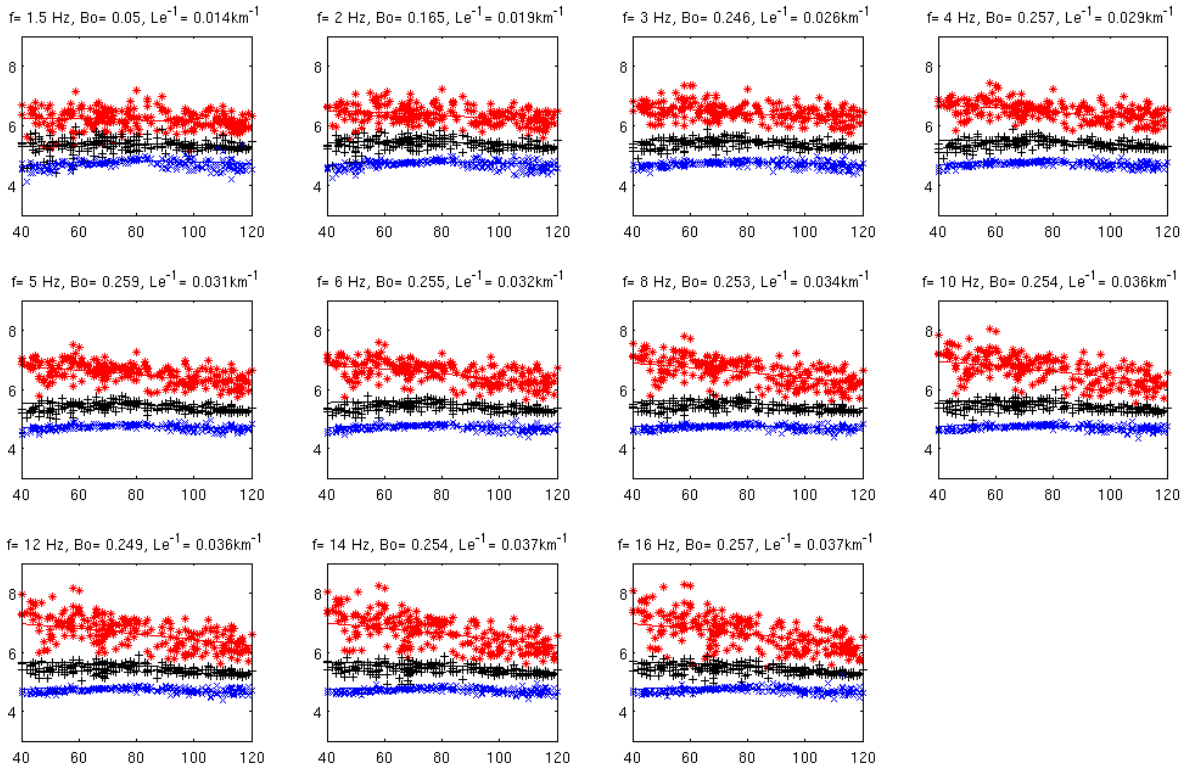
Slika B1 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju CACV.



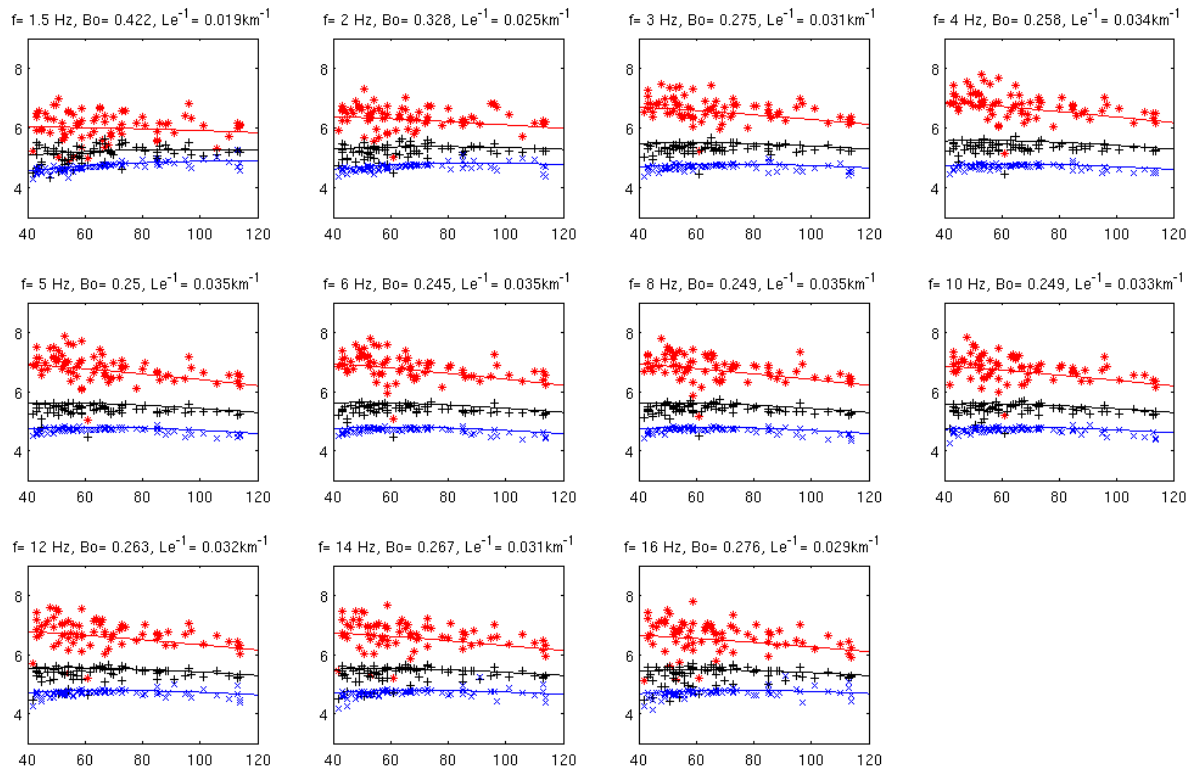
Slika B2 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju DUGI.



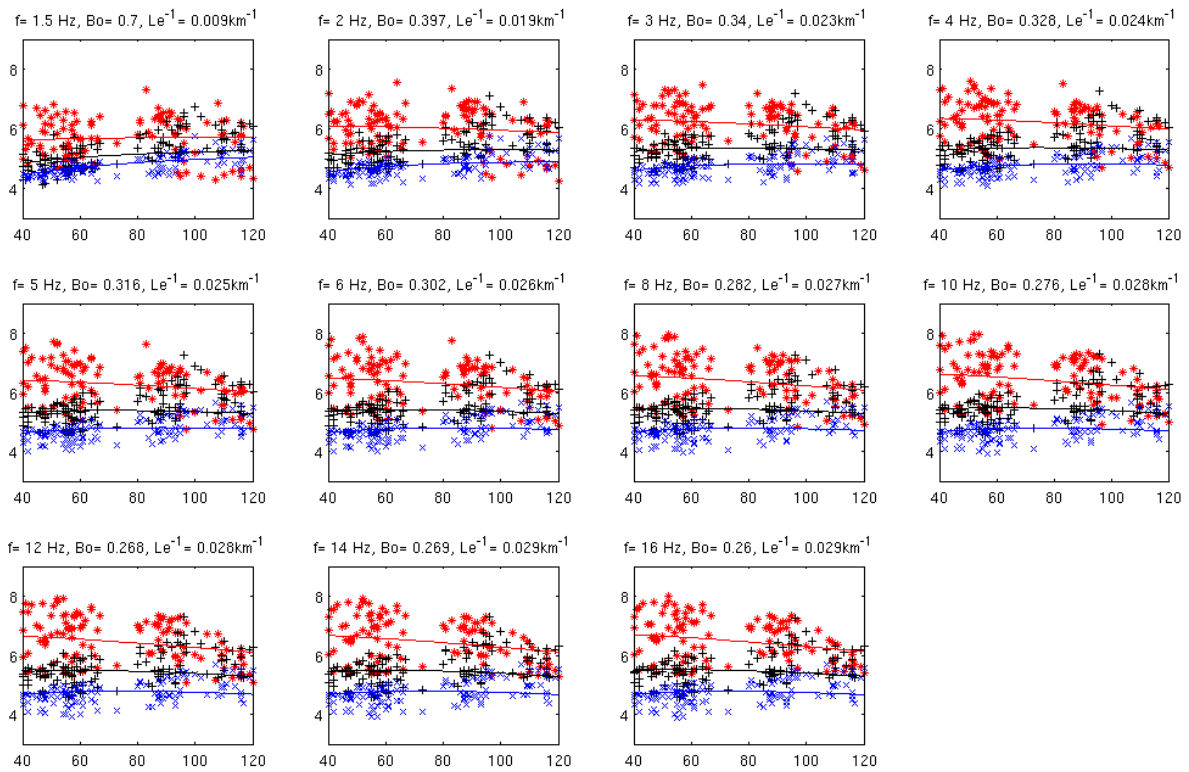
Slika B3 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju HVAR.



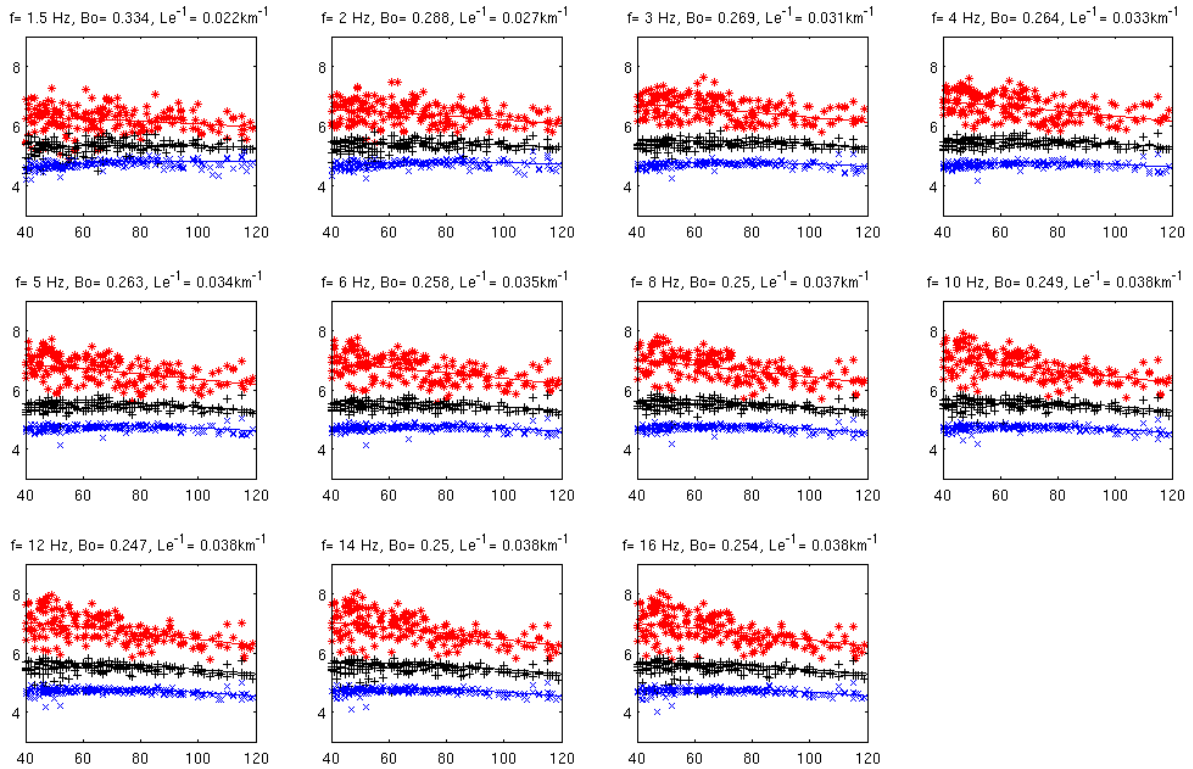
Slika B4 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju KIJV.



Slika B5 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju MAK.



Slika B6 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju MORI.



Slika B7 Normirane energije s teorijskim krivuljama prilagodbe za postaju RICI.

# Dodatak C

## Tablice svih izračunatih parametara atenuacije

Tablice sadrže ukupnu atenuaciju i seizmički albedo s pripadnim pogreškama,  $Q^{-1}$ -faktor intrinzičnih procesa, raspršenja, ukupni, očekivani i mjereni u ovisnosti o frekvenciji. Prikazani su rezultati za postaje CACV, DUGI, HVAR, KIJV, MAKA, MORI i RICL.

Tablica C1 Svi parametri atenuacije za postaju CACV.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c_{expected}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c_{observed}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0280	0.0045	0.3150	0.0341	7.1227	3.2754	10.3981	5.4088	6.0337
2	0.0300	0.0148	0.2770	0.1364	6.0411	2.3145	8.3556	4.9383	4.6842
3	0.0320	0.0158	0.2460	0.1209	4.4801	1.4617	5.9418	3.8376	3.2785
4	0.0330	0.0161	0.2350	0.1147	3.5156	1.0800	4.5956	3.0510	2.5452
5	0.0340	0.0164	0.2320	0.1114	2.9091	0.8788	3.7879	2.5217	2.0915
6	0.0350	0.0167	0.2310	0.1097	2.4988	0.7506	3.2494	2.1557	1.7814
8	0.0370	0.0170	0.2380	0.1091	1.9632	0.6132	2.5763	1.6431	1.3830
10	0.0380	0.0179	0.2400	0.1127	1.6087	0.5080	2.1168	1.3279	1.1364
12	0.0390	0.0185	0.2450	0.1161	1.3668	0.4435	1.8104	1.1015	0.9680
14	0.0400	0.0189	0.2480	0.1172	1.1968	0.3947	1.5915	0.9446	0.8452
16	0.0400	0.0194	0.2450	0.1186	1.0514	0.3412	1.3926	0.8380	0.7515

Tablica C2 Svi parametri atenuacije za postaju DUGI.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c_{expected}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c_{observed}}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0170	0.0078	0.5460	0.1779	2.8662	3.4470	6.3131	0.9036	3.5514
2	0.0220	0.0093	0.3540	0.1467	3.9583	2.1691	6.1275	3.0194	2.9036
3	0.0290	0.0085	0.2700	0.0784	3.9309	1.4539	5.3847	3.2967	2.1861
4	0.0320	0.0089	0.2530	0.0691	3.3289	1.1275	4.4563	2.8124	1.7874
5	0.0330	0.0094	0.2430	0.0682	2.7831	0.8934	3.6765	2.3796	1.5289
6	0.0350	0.0096	0.2420	0.0654	2.4631	0.7864	3.2494	2.0772	1.3457
8	0.0360	0.0104	0.2330	0.0656	1.9226	0.5841	2.5067	1.6403	1.1003
10	0.0370	0.0113	0.2260	0.0661	1.5953	0.4658	2.0611	1.3712	0.9412
12	0.0370	0.0114	0.2230	0.0659	1.3345	0.3830	1.7175	1.1540	0.8284
14	0.0350	0.0109	0.2240	0.0678	1.0807	0.3119	1.3926	0.9443	0.7437
16	0.0350	0.0112	0.2350	0.0739	0.9322	0.2864	1.2185	0.7979	0.6773

Tablica C3 Svi parametri atenuacije za postaju HVAR.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{expected}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{observed}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0090	0.0064	0.1750	0.4228	2.7574	0.5849	3.3423	2.6473	3.8804
2	0.0160	0.0065	0.2640	0.4330	3.2799	1.1765	4.4563	3.1015	3.2186
3	0.0240	0.0071	0.2650	0.4249	3.2754	1.1809	4.4563	3.0734	2.4729
4	0.0210	0.0074	0.2020	0.4136	2.3337	0.5907	2.9245	2.2442	2.0511
5	0.0190	0.0077	0.1050	0.4023	1.8945	0.2223	2.1168	1.8547	1.7742
6	0.0190	0.0079	0.0670	0.3933	1.6458	0.1182	1.7640	1.6227	1.5759
8	0.0200	0.0082	0.1050	0.3703	1.2464	0.1462	1.3926	1.2205	1.3072
10	0.0210	0.0083	0.0910	0.3329	1.0633	0.1065	1.1698	1.0441	1.1307
12	0.0220	0.0081	0.0810	0.2864	0.9385	0.0827	1.0212	0.9233	1.0043
14	0.0220	0.0076	0.0500	0.2166	0.8316	0.0438	0.8754	0.8229	0.9086
16	0.0230	0.0067	0.0890	0.0745	0.7295	0.0713	0.8007	0.7168	0.8330

Tablica C4 Svi parametri atenuacije za postaju KIJV.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{expected}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{observed}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0140	0.0020	0.0500	0.0769	4.9391	0.2600	5.1991	4.8840	4.9516
2	0.0190	0.0059	0.1650	0.0846	4.4187	0.8732	5.2919	4.2301	3.9906
3	0.0260	0.0134	0.2460	0.1281	3.6401	1.1876	4.8277	3.2405	2.9442
4	0.0290	0.0138	0.2570	0.1249	3.0006	1.0379	4.0386	2.5782	2.3728
5	0.0310	0.0142	0.2590	0.1213	2.5592	0.8945	3.4537	2.1544	2.0072
6	0.0320	0.0148	0.2550	0.1206	2.2133	0.7576	2.9709	1.8622	1.7507
8	0.0340	0.0159	0.2530	0.1214	1.7685	0.5990	2.3674	1.4673	1.4109
10	0.0360	0.0169	0.2540	0.1222	1.4960	0.5094	2.0054	1.2132	1.1935
12	0.0360	0.0175	0.2490	0.1242	1.2550	0.4161	1.6711	1.0315	1.0409
14	0.0370	0.0180	0.2540	0.1267	1.0982	0.3739	1.4722	0.8808	0.9273
16	0.0370	0.0184	0.2570	0.1312	0.9571	0.3311	1.2882	0.7607	0.8389

Tablica C5 Svi parametri atenuacije za postaju MAK A.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{expected}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{observed}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0190	0.0054	0.4220	0.0476	4.0783	2.9776	7.0559	2.7338	6.9707
2	0.0250	0.0123	0.3280	0.1596	4.6792	2.2839	6.9630	3.6127	5.3961
3	0.0310	0.0139	0.2750	0.1220	4.1732	1.5829	5.7561	3.3885	3.7615
4	0.0340	0.0152	0.2580	0.1151	3.5133	1.2216	4.7349	2.8796	2.9118
5	0.0350	0.0158	0.2500	0.1122	2.9245	0.9748	3.8993	2.4209	2.3874
6	0.0350	0.0157	0.2450	0.1098	2.4533	0.7961	3.2494	2.0550	2.0298
8	0.0350	0.0154	0.2490	0.1090	1.8302	0.6068	2.4371	1.5187	1.5713
10	0.0330	0.0153	0.2490	0.1145	1.3805	0.4577	1.8382	1.1661	1.2882
12	0.0320	0.0154	0.2630	0.1258	1.0948	0.3907	1.4854	0.9050	1.0953
14	0.0310	0.0153	0.2670	0.1306	0.9041	0.3293	1.2335	0.7482	0.9549
16	0.0290	0.0147	0.2760	0.1365	0.7310	0.2787	1.0096	0.6055	0.8479

Tablica C6 Svi parametri atenuacije za postaju MORI.

f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c\_expected}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c\_observed}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0090	0.0070	0.7000	0.2044	1.0027	2.3396	3.3423	0.2286	5.6092
2	0.0190	0.0099	0.3970	0.1853	3.1910	2.1009	5.2919	2.3217	4.5076
3	0.0230	0.0110	0.3400	0.1514	2.8186	1.4520	4.2707	2.1864	3.3122
4	0.0240	0.0113	0.3280	0.1447	2.2460	1.0963	3.3423	1.7641	2.6617
5	0.0250	0.0115	0.3160	0.1372	1.9051	0.8801	2.7852	1.5162	2.2465
6	0.0260	0.0119	0.3020	0.1310	1.6849	0.7290	2.4138	1.3656	1.9558
8	0.0270	0.0125	0.2820	0.1227	1.3499	0.5302	1.8800	1.1276	1.5717
10	0.0280	0.0126	0.2760	0.1178	1.1292	0.4305	1.5597	0.9449	1.3266
12	0.0280	0.0126	0.2680	0.1142	0.9514	0.3483	1.2998	0.8083	1.1549
14	0.0290	0.0125	0.2690	0.1101	0.8435	0.3104	1.1539	0.7088	1.0272
16	0.0290	0.0124	0.2600	0.1059	0.7471	0.2625	1.0096	0.6386	0.9281

Tablica C7 Svi parametri atenuacije za postaju RIC1.

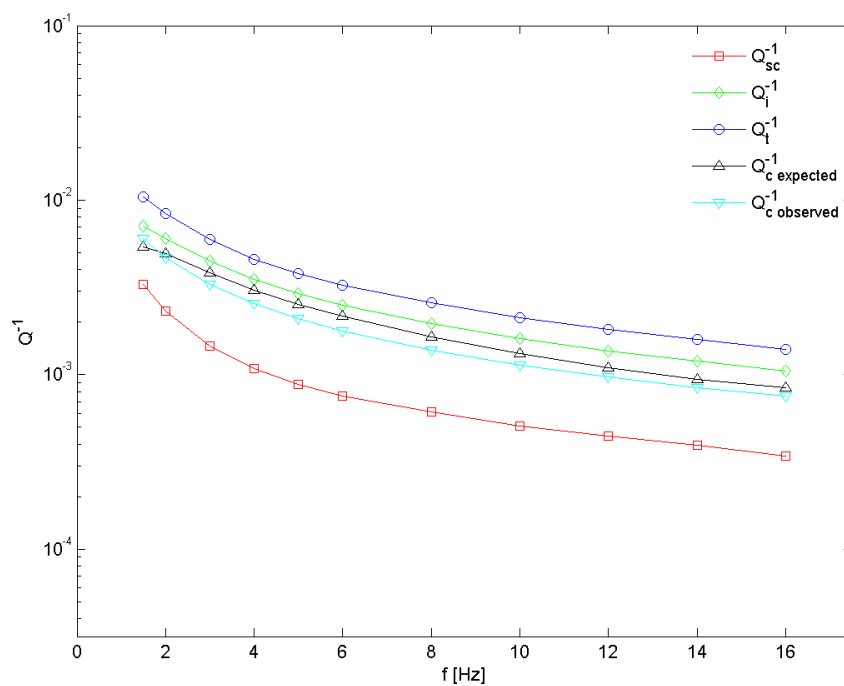
f (Hz)	$Le^{-1}$	$\delta Le^{-1}$	$B_0$	$\delta B_0$	$Q_i^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{sc}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_t^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c\_expected}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	$Q_{c\_observed}^{-1}$ ( $\cdot 10^{-3}$ )
1.5	0.0220	0.0046	0.3340	0.0433	5.4412	2.7288	8.1700	4.3516	6.8784
2	0.0270	0.0135	0.2880	0.1422	5.3543	2.1658	7.5201	4.4189	5.3863
3	0.0310	0.0140	0.2690	0.1211	4.2077	1.5484	5.7561	3.4660	3.8160
4	0.0330	0.0152	0.2640	0.1210	3.3824	1.2132	4.5956	2.7600	2.9882
5	0.0340	0.0158	0.2630	0.1215	2.7917	0.9962	3.7879	2.2586	2.4719
6	0.0350	0.0162	0.2580	0.1188	2.4111	0.8383	3.2494	1.9552	2.1171
8	0.0370	0.0164	0.2500	0.1109	1.9322	0.6441	2.5763	1.5677	1.6578
10	0.0380	0.0168	0.2490	0.1104	1.5897	0.5271	2.1168	1.2796	1.3714
12	0.0380	0.0170	0.2470	0.1103	1.3283	0.4357	1.7640	1.0755	1.1745
14	0.0380	0.0174	0.2500	0.1142	1.1340	0.3780	1.5120	0.9101	1.0303
16	0.0380	0.0175	0.2540	0.1172	0.9869	0.3360	1.3230	0.7823	0.9197



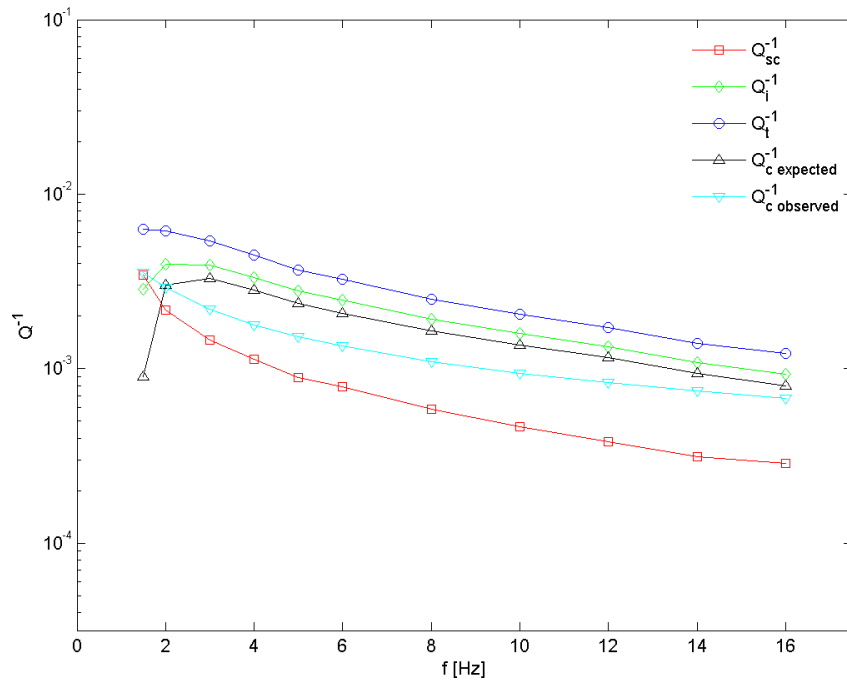
# Dodatak D

## Usporedba različitih $Q^{-1}$ -faktora

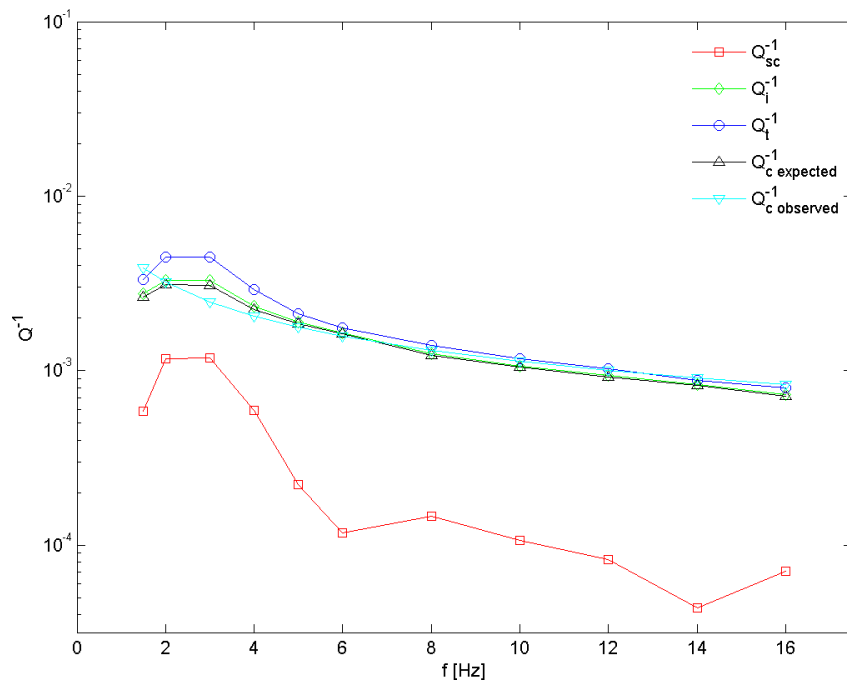
Slike prikazuju  $Q^{-1}$ -faktore raspršenja, intrinzičnih procesa, ukupni, očekivani i mjereni u ovisnosti o frekvenciji za hipocentralne udaljenosti od 40 do 120 km. Prikazani su rezultati za postaje CACV, DUGI, HVAR, KIJV, MAKA, MORI i RICL.



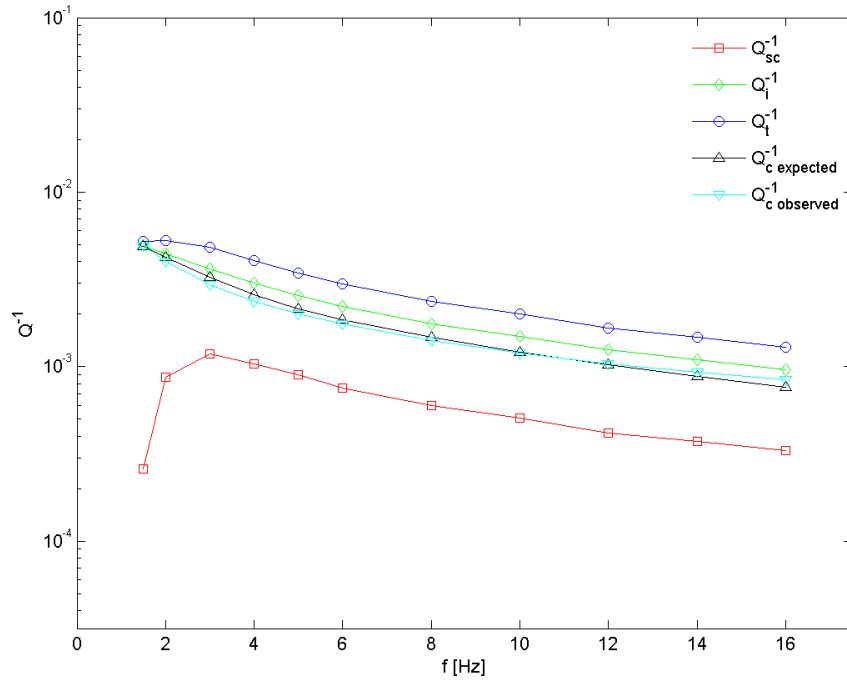
Slika D1 Usporedba različitih  $Q^{-1}$  -faktora za postaju CACV.



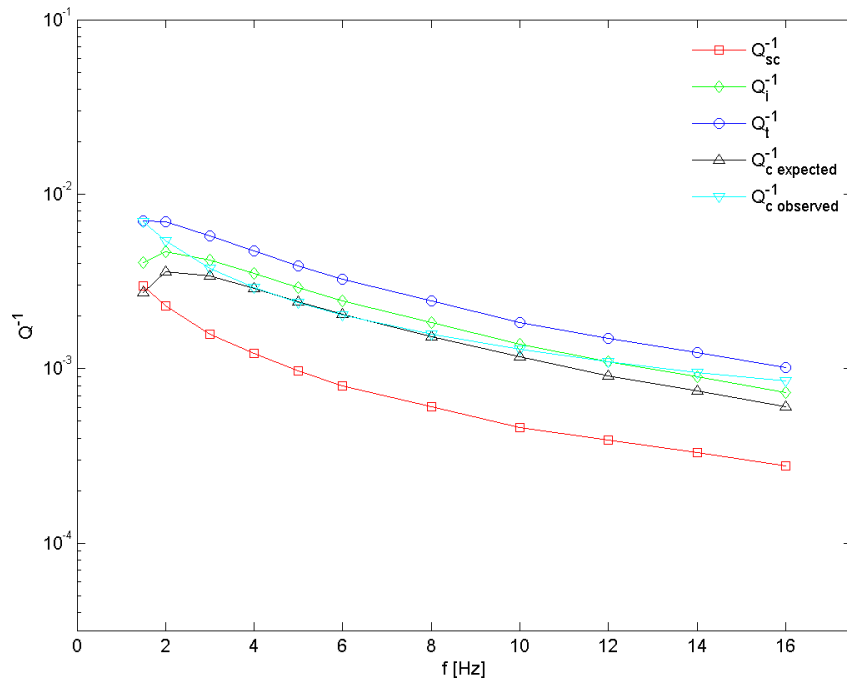
Slika D2 Usporedba različitih  $Q^{-1}$  -faktora za postaju DUGI.



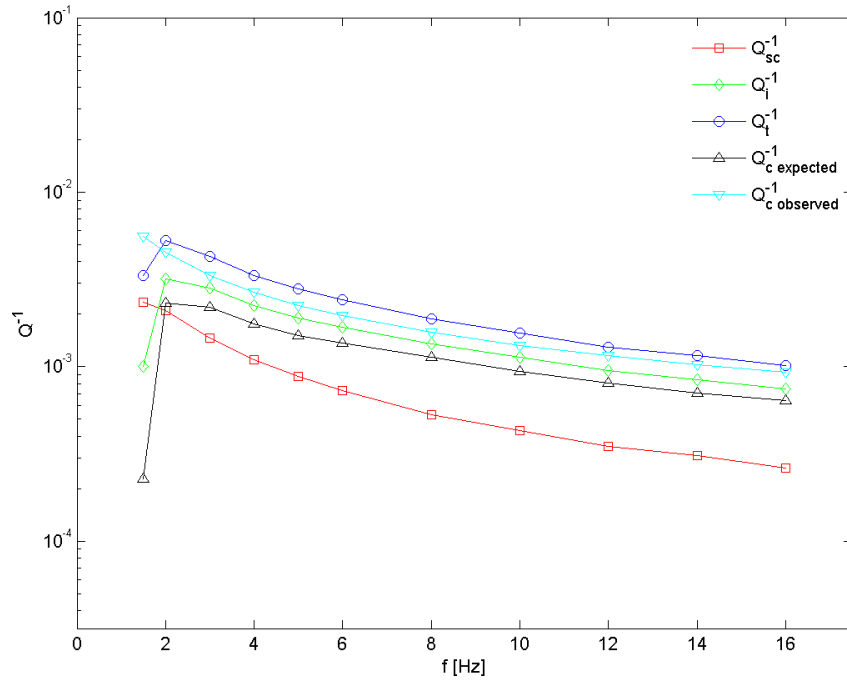
Slika D3 Usporedba različitih  $Q^{-1}$  -faktora za postaju HVAR.



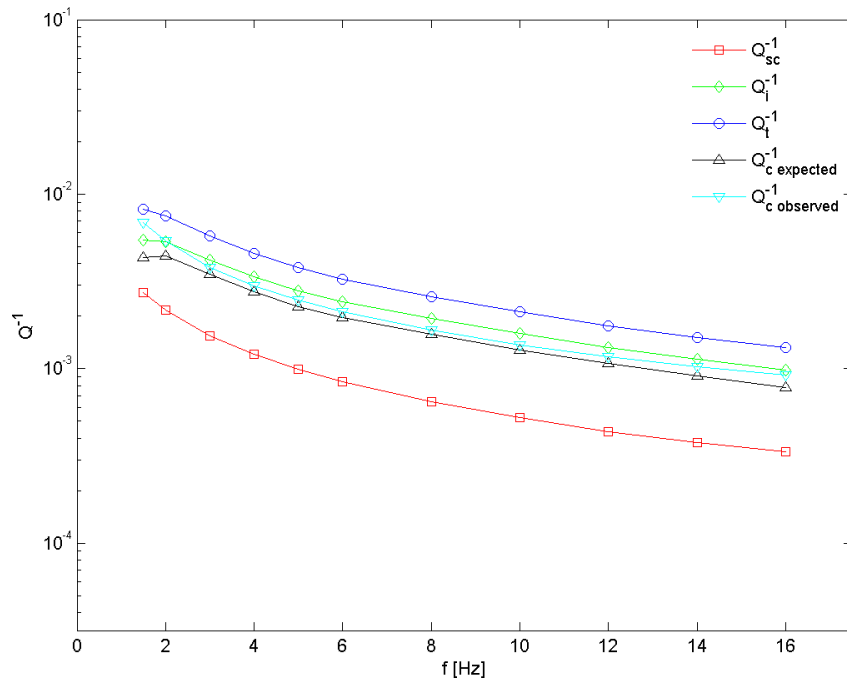
Slika D4 Usporedba različitih  $Q^{-1}$  -faktora za postaju KIJV.



Slika D5 Usporedba različitih  $Q^{-1}$  -faktora za postaju MAKA.



Slika D6 Usporedba različitih  $Q^{-1}$ -faktora za postaju MORI.



Slika D7 Usporedba različitih  $Q^{-1}$ -faktora za postaju RICI.

# Zahvale

Zahvaljujemo se prof. dr. sc. Davorki Herak na pruženoj prilici i poticaju na samostalan rad te Ivi Dasović, dipl. ing. na ideji za novi pristup u istraživanju kode, sugestijama te na svoj ukazanoj pomoći. Također, zahvaljujemo dr. sc. Francesci Bianco s Nacionalnog instituta za geofiziku i vulkanologiju iz Napulja, prema čijem smo članku radile, na susretljivosti i konstruktivnim savjetima kada smo nailazile na prepreke u obradi podataka.

# Sažetak

Tena Belinić, Josipa Majstorović, Dalija Namjesnik

## **Intrinzična atenuacija i atenuacija raspršenja seizmičkih transverzalnih valova u području središnjih Vanjskih Dinarida**

Ovaj rad pruža nove informacije o svojstvima seizmičke atenuacije kore u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida. To je geološki i tektonski kompleksno područje jer je nastalo u koliziji Jadranske mikroploče i Euroazijske ploče. Po prvi put izračunat je doprinos intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja ukupnoj atenuaciji seizmičkih valova. MLTWA-metoda, koja se temelji na pretpostavci višestrukog izotropnog raspršenja u sredstvu uniformne distribucije raspršivača, primjenjena je na 1246 seizmograma zapisanih na osam seizmoloških postaja. Analizirani su lokalni potresi hipocentralnih udaljenosti između 40 i 120 km te lokalne magnitude  $\geq 2$  za jedanaest središnjih frekvencija u rasponu od 1.5 do 16 Hz. Dobiveni seizmički albedo promatranog područja je manji od 0.5 što sugerira dominaciju intrinzične atenuacije nad atenuacijom raspršenja za sve korištene frekvencije, odnosno da je gubitak energije zbog neelastičnosti sredstva veći od gubitka energije raspršenjem valova. To je vidljivo i iz dobivenih vrijednosti faktora  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_{sc}^{-1}$ ,  $Q_t^{-1}$ ,  $Q_{c\text{ observed}}^{-1}$  i  $Q_{c\text{ expected}}^{-1}$  za sve postaje te njihovom međusobnom odnosu. Općenito se atenuacija smanjuje povećanjem frekvencije. Usporedba s rezultatima dobivenima za različita područja u svijetu ukazuje da su vrijednosti intrinzične atenuacije za središnji dio Vanjskih Dinarida među većima, dok su vrijednosti atenuacije raspršenja približno prosječne.

*Ključne riječi: koda valovi, intrinzična atenuacija, atenuacija raspršenja, MLTWA-metoda, Dinaridi*

# Summary

Tena Belinić, Josipa Majstorović, Dalija Namjesnik

## Separation of intrinsic absorption and scattering attenuation in the central part of the External Dinarides

This study provides novel information about the attenuation properties of the crust beneath the central part of the External Dinarides. It is geologically and tectonically complex region and formed due to collision between Adriatic microplate and Euroasian plate. The contribution of intrinsic and scattering attenuation factors to total attenuation was calculated for the first time. MLTWA-method, which is based on assumption of multiple isotropic scattering in a medium with uniformly distributed scatterers, was applied on 1246 seismograms recorded at eight seismic stations. The selected events have hypocentral distances between 40 and 120 km with local magnitudes  $\geq 2$ . The analysis was performed over 11 frequency bands with central frequencies between 1.5 and 16 Hz. The results show that the seismic albedo of the study area is less than 0.5, suggesting that intrinsic attenuation dominates over scattering attenuation at all central frequencies and for all stations. In other words, energy loss from intrinsic processes is greater than energy loss from scattering. In addition, we calculated and compared  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_{sc}^{-1}$ ,  $Q_t^{-1}$ ,  $Q_{c\ observed}^{-1}$  and  $Q_{c\ expected}^{-1}$ -factors for all stations. Attenuation decreases with increasing frequency. Comparison with results obtained for different areas in the world indicates that the values of intrinsic attenuation of the central part of the External Dinarides are among the highest and the values of scattering attenuation are within the average.

Keywords: *coda-waves*, *intrinsic attenuation*, *scattering attenuation*, *MLTWA-method*, *Dinarides*