

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Marija Ruščić

**Atenuacija visokofrekventnih seizmičkih valova u središnjem i
južnom dijelu Vanjskih Dinarida**

Zagreb, 2013.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta pod vodstvom prof. dr. sc. Davorke Herak, uz neposredno voditeljstvo Ive Dasović, dipl.inž. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2012./2013.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorijska pozadina	3
2.1. Atenuacija i raspršenje	3
2.2. Koda valovi	4
2.3. Teorija jednostrukog raspršenja unatrag i metoda normiranja kodom	6
2.3.1. Model jednostrukog raspršenja unatrag	6
2.3.2. Metoda normiranja kodom (<i>coda-normalization method</i>)	8
2.4. Svojstva Q-faktora.....	9
3. Analiza podataka	12
3.1. Podaci	12
3.2. Metoda.....	12
4. Rezultati i diskusija	16
5. Zaključci	26
Zahvale	27
Literatura	28
Sažetak	30
Summary	31
Prilozi	32
Prilog A	32
Prilog B	42

1. Uvod

Zemlja nije idealno elastično, homogeno i izotropno tijelo, pa tijekom rasprostiranja seizmičkih valova njihove amplitude naposljetku utru. Do smanjenja amplitude dolazi zbog geometrijskog širenja valne fronte, unutrašnjeg trenja te raspršenja seizmičkih valova na nehomogenostima u sredstvu. Atenuacija je definirana kao smanjenje amplitude seizmičkih valova uslijed njihove propagacije, a koje se ne može objasniti geometrijom rasprostiranja. Izražava se pomoću faktora dobrote Q koji označava gubitak energije vala tijekom jedne oscilacije. Ako je Q -faktor velik, znači da je atenuacija mala i obrnuto.

Na izgled seizmičkih valova zapisanih na seizmografu utječu svojstva izvora, sredstva kroz koje seizmički valovi prolaze, sredstva u neposrednoj okolini seizmografa te svojstva samog instrumenta. Da bismo proučavali samo jedan od navedenih doprinosa, trebamo ukloniti utjecaje ostalih. Atenuacija je propagacijsko svojstvo te ga je potrebno poznavati kako bi se iz seizmograma potresa odredilo parametre izvora kao što je npr. seizmički moment potresa. S druge strane, bitan je faktor u određivanju seizmičkog hazarda nekog područja: poznavajući atenuaciju, moguće je procijeniti amplitudu valova na nekoj udaljenosti od potresa.

Jedna od metoda određivanja Q -faktora je analiza koda valova, valova koji se pojavljuju na seizmogramu potresa u obliku „repa“ nakon nailaska izravnih P- i S-faza prostornih seizmičkih valova. Posljedica su raspršenja valova na heterogenostima. Postoje različiti modeli kojima se objašnjava nastanak koda valova, a jedan od najčešće korištenih je model jednostrukog raspršenja unatrag (Aki i Chouet, 1975). S obzirom na to da Q -faktor koda valova opisuje ukupnu atenuaciju, i zbog raspršenja i unutrašnjeg trenja, Aki (1980) predlaže metodu normiranja kodom u kojoj se analizira atenuacija izravnih S-valova (Q_S). Yoshimoto i sur. (1993) tu metodu proširuju i na proučavanje atenuacije P-valova (Q_P).

Mnoga dosadašnja istraživanja Q -faktora pokazala su da on značajno ovisi o frekvenciji. Osim o frekvenciji, uočeno je da Q -faktor znatno ovisi i o području u kojem je mjereno. Ispostavilo se da za seizmički aktivna područja Q -faktor ima manje vrijednosti, odnosno da je atenuacija u tom području velika, ali i da ima izraženiju frekvencijsku ovisnost. Hrvatsko obalno područje pripada kompleksnoj cjelini u kojoj je izraženo međudjelovanje Dinarida, Jadranske mikroploče i Alpa. Pripada širem području konvergentne zone između Afričke i Euroazijske

tektonske ploče, gdje zbog pomicanja Afričke ploče dolazi do sudaranja Jadranske mikroploče s Euroazijskom pločom. Složenost područja upućuje na litosferu ispunjenu heterogenostima različitih skala. Poznavanje atenuacije daje nam dodatan uvid u strukturu promatranog područja. Do sada je na području Hrvatske provedeno nekoliko istraživanja koda valova: Rovelli (1984) analizirao je kodu za južne vanjske Dinaride, Herak (1991) središnje Dinaride te Dasović i sur. (2012, 2013) za područje 17 seizmoloških postaja u Hrvatskoj, u Dinaridima i Panonskoj nizini. Do sada nije računata atenuacija direktnih P- i S-valova. Iako se može koristiti Q -faktor koda valova, pri određivanju parametara žarišta potresa, kao što je procjena energije oslobođene u izvoru (momentna magnituda), najčešće se koriste Q_P i Q_S . Atenuacija S-valova češće je proučavana nego atenuacija P-valova: zbog svoje velike amplitude, S-valovi su bitni pri određivanju seizmičkog hazarda.

U ovom sam radu koristila proširenu metodu normiranja kodom. Koristila sam zapise potresa zabilježenih na seizmološkim postajama Dubrovnik (DBR), Stravča (STA), Ston (STON), Čačvina (CACV), Kijevo (KIJV) i Udbina (UDBI) u razdoblju 2004–2012. godine. Izračunala sam Q_P i Q_S za svaku postaju posebno, kao i za skupinu postaja A koju čine postaje Kijevo, Udbinu i Čačvinu (središnji dio Vanjskih Dinarida) te za skupinu B koja se sastoji od postaja Dubrovnik, Ston i Stravča (južni dio Hrvatske). Odredila sam frekvencijsku ovisnost faktora dobrote Q za svaku postaju i za obje skupine te sam izračunala omjer Q_S/Q_P za različite frekvencije. Izračunate sam vrijednosti usporedila s rezultatima dobivenim sličnim istraživanjima u različitim regijama svijeta. Na kraju sam usporedila vrijednosti $Q_S(f = 1 \text{ Hz})$ s vrijednostima faktora dobrote kode (Q_C) koji je izračunat u prijašnjim istraživanjima (Dasović i sur., 2012, 2013).

2. Teorijska pozadina

2.1. Atenuacija i raspršenje

Seizmički valovi trajali bi vječno i njihova bi amplituda bila konstantna da je Zemlja idealno elastično, homogeno, izotropno i neomeđeno tijelo. Stvarna Zemlja je nehomogena, nije idealno elastična niti izotropna, pa amplitude seizmičkih valova s vremenom trnu, tj. atenuiraju. Atenuacija u takvom sredstvu uzrokovana je, osim geometrijskim rasprostiranjem, unutrašnjim trenjem i raspršenjem na heterogenostima u Zemlji. Atenuacija seizmičkih valova definirana je kao smanjenje amplitude valova uslijed njihovog rasprostiranja kroz realno sredstvo koje se ne može objasniti geometrijskim rasprostiranjem.

Jednostavni primjer pomoću kojeg možemo objasniti atenuaciju uzrokovanu unutrašnjim trenjem je harmonički oscilator s masom koja oscilira na opruzi i na koju djeluje sila mirenja. U takvom sustavu dolazi do gubitka energije, odnosno atenuacije, što opisujemo faktorom dobrote Q , gdje je Q definiran kao gubitak energije (ΔE) unutar jedne oscilacije:

$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E}, \quad (2.1.1)$$

pri čemu je E maksimalna energija sustava.

Amplituda titranja oscilatora ovisi o vremenu, odnosno o prijađenom putu:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}}, \quad (2.1.2)$$

$$A(x) = A_0 e^{-\frac{\omega_0 f x}{Qv}}, \quad (2.1.3)$$

pri čemu je A_0 početna amplituda vala, ω_0 kutna frekvencija, v brzina rasprostiranja, t vrijeme putovanja vala, x prijađeni put, a f frekvencija. Iz (2.1.2) i (2.1.3) vidimo da valovi s visokim frekvencijama atenuiraju brže od valova s niskim frekvencijama za konstantni Q . To je zato što visokofrekventni val načini više oscilacija od niskofrekventnog vala u istom vremenskom razdoblju, tj. na jednakom putu. Atenuaciju uzrokovanu unutrašnjim trenjem označavamo s Q_i (i od *intrinsic*, hrv. unutrašnji).

Na atenuaciju amplitude seizmičkih valova utječe i raspršenje na heterogenostima u Zemlji. Atenuacija uzrokovana raspršenjem posljedica je preraspodjele energije refleksijom, refrakcijom i konverzijom seizmičkih valova na heterogenostima, a ne gubitkom energije iz sustava. Također je opisujemo faktorom dobrote Q te je označavamo s Q_{sc} (*sc* od *scattering*, hrv. raspršenje). Kao izravna posljedica raspršenja seizmičkih valova nastaju tzv. koda valovi. Ako izraze (2.1.1), (2.1.2) i (2.1.3) primijenimo na koda valove, tada Q -faktor predstavlja ukupnu atenuaciju koja podrazumijeva doprinose atenuaciji od unutrašnjeg trenja i raspršenja prema izrazu

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{sc}} + \frac{1}{Q_i}. \quad (2.1.4)$$

Atenuacija je veća što je Q manji i obrnuto. U slučaju kada imamo jako raspršenje i malu apsorpciju (unutrašnje trenje), zapis na seizmogramu je jako dug i vretenastog oblika (npr. lunarni seizmogrami). U suprotnom slučaju, odnosno kada je apsorpcija velika i raspršenje malo, imamo kratak zapis potresa na seizmogramu kojim dominiraju izravne faze valova.

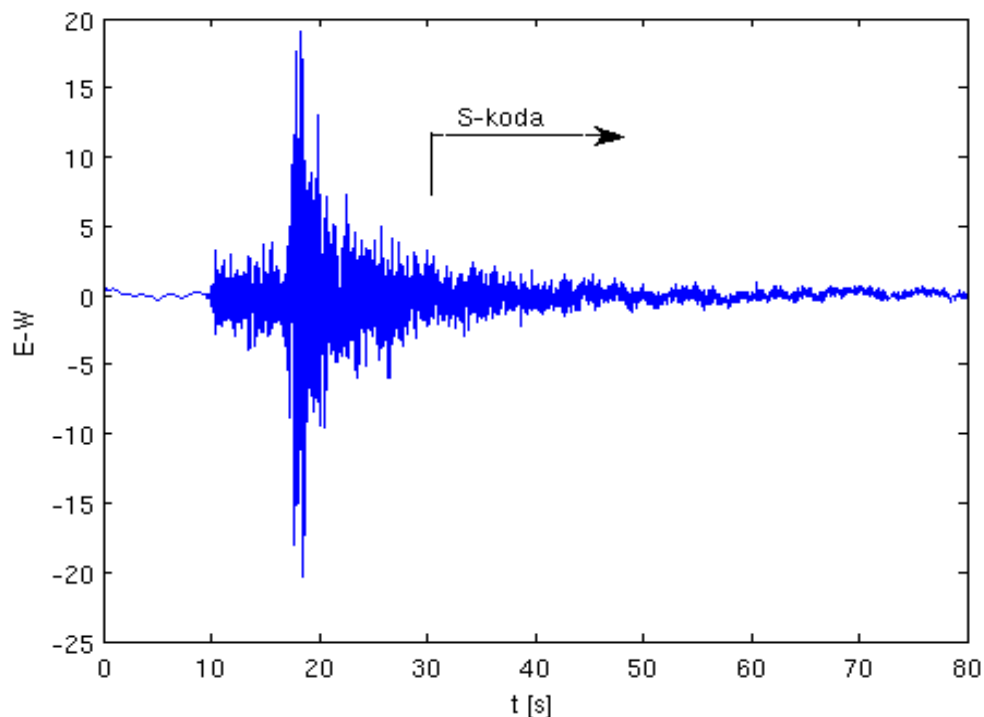
2.2. Koda valovi

Na seizmogramu se koda valovi vide kao „rep“ koji se sastoji od nepravilnih oscilacija (slika 1) koje predstavljaju osobitost lokalnih potresa. Nastaju superpozicijom sekundarnih (raspršenih) seizmičkih valova nastalih nailaskom primarnih (P i S) valova na slučajne lateralne nehomogenosti u Zemlji.

Razlikujemo P-kodu i S-kodu. P-koda zapis je valova nastalih raspršenjem longitudinalnih P-valova na heterogenostima, dok je S-koda zapis valova nastalih raspršenjem uglavnom transverzalnih S-valova na heterogenostima u sredstvu. Ako nije drugačije naznačeno, kada se govori o kodi najčešće se misli na S-kodu. Zato što početak kode nije jasno definiran, u praksi se za njega uzima dvostruko vrijeme putovanja izravne faze S-vala (Rautian i Khalturin, 1978).

Koda valove možemo promatrati statističkim pristupom zato što oni nastaju slučajnim procesima, tj. raspršenjem na heterogenostima. Taj je pristup praktičan jer omogućava opisivanje heterogenosti u Zemlji korištenjem malog broja statističkih parametara. Posebno je pogodan za proučavanje kratkoperiodičkih, odnosno visokofrekventnih valova nastalih u Zemljinoj kori, zato što na njih znatno utječu parametri sredstva. Treba napomenuti da informacija dobivena na ovaj

način prikazuje usrednjena svojstva sredstva zbog toga što valovi koji čine koda valove mogu imati sasvim različite staze.



Slika 1. Seizmogram E-W komponente potresa zabilježenog na postaji Ston, koji se dogodio 7.12.2004. godine u 0 h 54 min 59.8 s s označenim početkom S-kode.

Prema Akiju i Chouetu (1975), model koji dobro opisuje nastanak koda valova mora zadovoljiti sljedeća svojstva:

1. spektri koda s različitih postaja gotovo se ne razlikuju, dok rani dijelovi seizmograma jako ovise o putu koji valovi prolaze od izvora do postaje;
2. trajanje seizmograma lokalnih potresa ne ovisi o epicentralnoj udaljenosti već jedino o magnitudi;
3. spektri snage koda valova različitih lokalnih potresa trnu s vremenom na sličan način;
4. vremensko opadanje spektra snage koda valova lokalnih potresa ne ovisi o magnitudi;
5. amplitude koda valova ovise o lokalnim uvjetima tla ispod postaje;
6. analiza koda valova zabilježenih na mrežama seizmoloških postaja, pokazala je da to nisu ravni valovi koji dolaze iz hipocentra.

Postoji više modela koji opisuju nastanak koda valova, a najčešće korišten, ujedno najjednostavniji, model je jednostrukog raspršenja unatrag kojeg su predložili 1975. godine Aki i Chouet. Oni su pretpostavili da pri raspršenju dolazi do slabog raspršenja, odnosno da se gubitak energije primarnih valova i višestruko raspršenje mogu zanemariti (Bornova aproksimacija). S obzirom na to da Bornova aproksimacija nije u skladu sa zakonom očuvanja energije te da se zanemaruje višestruko raspršenje, razvijeni su i drugi modeli koji to uzimaju u obzir (npr. model toka energije, teorija difuzije, modeli višestrukog raspršenja). Za više informacija o koda valovima pogledati Sato i sur. (2012).

2.3. Teorija jednostrukog raspršenja unatrag i metoda normiranja kodom

Teoriju jednostrukog raspršenja unatrag predložili su Aki i Chouet (1975) kako bi pružili objašnjenje za nastanak koda valova te omogućili procjenu atenuacije. Ovaj model pretpostavlja koincidenciju žarišta potresa i prijemnika te da su koda valovi nekoherentni valovi nastali slabim raspršenjem na uniformno raspoređenim heterogenostima u homogenom i izotropnom poluprostoru. Mjerenje atenuacije koda valova pomoću ove metode ne omogućuje razdvajanje doprinosa unutrašnjeg trenja i raspršenja. Aki (1980) je predložio metodu normiranja kodom koja omogućuje određivanje atenuacije amplituda izravnih S-valova. Pretpostavio je da će se utjecaji izvora i amplifikacije podloge u amplitudi izravnih S-valova poništiti normiranjem s koda valovima koji su uglavnom nastali od S-valova. Metodu su proširili Yoshimoto i sur. (1993) i omogućili određivanje atenuacije izravnih P-valova.

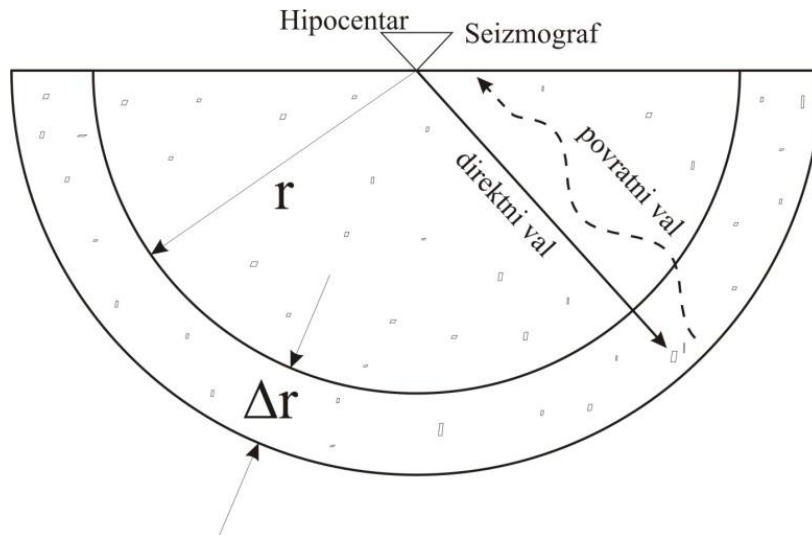
2.3.1. Model jednostrukog raspršenja unatrag

Razmatramo nastajanje raspršenih valova u homogenom i izotropnom poluprostoru sa slučajno raspoređenim heterogenostima u sredstvu (slika 2). Pretpostavimo se da je raspršenje slabo te da se višestruko raspršenje može zanemariti. Gustoća slučajno raspoređenih nehomogenosti u poluprostoru je σ . Energija unatrag raspršenih valova pristiglih na prijemnik u vremenskom intervalu Δt jednaka je umnošku Δt i spektra snage koda valova $P(\omega, t)$:

$$P(\omega, t)\Delta t = \sum_{r_n} |\Phi_n(\omega)|^2 = \frac{dN}{dr} \Delta r |\Phi_n(\omega, r)|^2, \quad (2.3.1)$$

pri čemu je $\Phi_n(\omega, r)$ Fourierov transformat pomaka unatrag raspršenog vala ($\theta = \pi$) na n -tom raspršivaču, r_n udaljenost od postaje do n -tog raspršivača unutar polusferične ljuske ($r, r+\Delta r$), $N(r)$ je ukupan broj raspršivača unutar polukugle radijusa r , a $\frac{dN}{dr} \Delta r$ označava broj raspršivača unutar polusferične ljuske ($r, r+\Delta r$). Za $\frac{dN}{dr} \Delta r$ vrijedi da je

$$\frac{dN}{dr} \Delta r = 2 \pi r^2 \sigma \Delta r. \quad (2.3.2)$$



Slika 2. Shema modela jednostrukog raspršenja (preuzeto iz Dasović, 2009).

S obzirom na to da Fourierov transformat ovisi o geometrijskom rasprostiranju valova te da pretpostavljamo da je riječ o prostornim valovima čija amplituda opada linearno s udaljenosti, za referentnu udaljenost r_0 vrijedi

$$|\Phi_n(\omega, r)| = |\Phi_n(\omega, r_0)| \left(\frac{r_0}{r}\right)^2. \quad (2.3.3)$$

Amplituda valova smanjuje se i zbog neelastičnosti sredstva, pa je potrebno u (2.3.3)

uključiti član koji sadrži faktor dobrote Q , odnosno član koji opisuje atenuaciju: $e^{-\frac{\omega t}{2Q}}$. Faktor Q osim što opisuje atenuaciju zbog neelastičnosti sadrži i efekte povezane s raspršenjem. Ako je v brzina rasprostiranja vala tada je

$$r = \frac{vt}{2} \text{ i } \Delta r = \frac{v\Delta t}{2} . \quad (2.3.4)$$

Uvrštavanjem (2.3.2), (2.3.3) i (2.3.4) u (2.3.1) dobije se izraz za energiju raspršenih valova

$$P(\omega, r) = |\Phi_n(\omega, r)|^2 4 r_0 \pi \sigma v^{-1} t^{-2} e^{-\frac{\omega t}{Q}} = S(\omega) t^{-m} e^{-\frac{\omega t}{Q}} , \quad (2.3.5)$$

pri čemu je m koeficijent geometrijskog rasapa i ima vrijednost 2 za prostorne valove ($m = 1$ za površinske valove), dok je $S(\omega)$ član koji opisuje ponašanje definirano izvorom zračenja.

2.3.2. Metoda normiranja kodom (*coda-normalization method*)

Za $t > 2t_S$ (t_S je vrijeme putovanja izravnog S-vala) spektralna amplituda koda valova može se izraziti kao

$$A(\omega, t) = S_C(\omega) R_C(\omega) P(\omega, t) , \quad (2.3.6)$$

pri čemu je $R_C(f)$ član koji opisuje utjecaj podloge na kojoj se postaja nalazi, $S_C(\omega)$ je faktor izvora, a $P_C(f)$ je neovisan o epicentralnoj udaljenosti i smjeru (Aki i Chouet, 1975; Aki, 1980).

Prema Akiju (1980), amplituda direktnih prostornih valova može se zapisati kao

$$A(\omega, t) = S(\omega, \theta) R(\omega, \theta) \frac{1}{r} e^{-\frac{\omega r}{2Qv}} , \quad (2.3.7)$$

pri čemu θ opisuje položaj postaje.

Da bi se odredio Q iz (2.3.6) i (2.3.7), Aki (1980) pretpostavlja da je $\ln \frac{S(\omega, \theta)}{S_C(\omega, \theta)}$ u prosjeku neovisan o θ za mnogo potresa koji su se dogodili na širokom području oko postaje. Ista pretpostavka vrijedi i za $\ln \frac{S(\omega, \theta)}{S_C(\omega, \theta)}$ gdje se pretpostavlja da se utjecaji podloge ponište jer se radi o S-valovima u oba slučaja. Uvažavanjem ovih pretpostavki, logaritmiranjem (2.3.6) i (2.3.7) te

uvrštavanjem $\omega = 2\pi f$ dobije se izraz

$$\ln \left[\frac{A_S(f, r)r}{A_C(f, t_C)} \right] = - \frac{\pi f}{Q_S(f)v_S} r + konst(f). \quad (2.3.8)$$

Izraz (2.3.8) pokazuje da logaritam spektralne amplitude izravnog S-vala normiranog spektralnom amplitudom koda valova linearno ovisi o hipocentralnoj udaljenosti r . Primjenom linearne regresije na (2.3.8) možemo izračunati Q_S iz koeficijenta nagiba pravca b_S .

$$b_S = - \frac{\pi f}{Q_S(f)v_S}, \quad (2.3.9)$$

$$\Rightarrow Q_{S(f)} = - \frac{\pi f}{b_S(f)v_S}. \quad (2.3.10)$$

Akijevu (1980) metodu normiranja kodom za procjenu atenuacije izravnih S-valova proširili su Yoshimoto i sur. (1993) kako bi odredili atenuaciju izravnih P-valova. Pod pretpostavkom da potresi u uskom pojasu magnituda i frekvencija imaju isti omjer spektara zračenja $S_P(f)$ i $S_S(f)$, na analogni način dobije se

$$\ln \left[\frac{A_P(f, r)r}{A_C(f, t_C)} \right] = - \frac{\pi f}{Q_P(f)v_P} r + konst(f), \quad (2.3.11)$$

iz kojeg linearnom regresijom izračunamo koeficijent nagiba (2.3.10)

$$b_P = - \frac{\pi f}{Q_P(f)v_P}, \quad (2.3.12)$$

te atenuaciju izravnih P-valova

$$Q_{P(f)} = - \frac{\pi f}{b_P(f)v_P}. \quad (2.3.13)$$

2.4. Svojstva Q-faktora

Q -faktorom opisujemo atenuaciju seizmičkih valova, odnosno smanjenje amplitude, koje se događa zbog njihovog rasprostiranja kroz neelastičko, nehomogeno i anizotropno sredstvo.

Atenuaciji doprinose unutrašnje trenje koje se izražava pomoću Q_i i raspršenje koje se izražava pomoću Q_{sc} (Dainty, 1981)

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{sc}} + \frac{1}{Q_i}. \quad (2.4.1)$$

U praksi razdvajanje ta dva doprinosa nije jednostavno. Između Q_i i Q_{sc} postoji fundamentalna razlika. Q_i opisuje neelastičke procese u kojima se dio seizmičke energije pretvara u toplinu (apsorbira u sredstvo), a Q_{sc} opisuje doprinos raspršenja gdje nema gubitka energije nego se ona samo preraspoređuje.

Iako se u početku pretpostavljalo da je u određenom rasponu frekvencija Q konstantan, brojna su istraživanja pokazala da je Q ovisan o frekvenciji i da ovisi o području u kojem je mjeren. Pokazalo se da izraz

$$Q(f) = Q_0 f^n \quad (2.4.2)$$

dovoljno dobro opisuje podatke iz bilo kojeg dijela svijeta. U (2.4.2) $Q_0 = Q(1 \text{ Hz})$, a eksponent n opisuje frekvencijsku ovisnost te obično poprima vrijednosti od 0 do 1.2, ovisno o području u kojem je mjeren.

S obzirom na to da Q ovisi o području u kojem je mjeren, isto vrijedi za Q_0 i n . Mjerenja su pokazala da Q_C ovisi i o proteklom vremenu, gdje je proteklo vrijeme definirano kao vrijeme koje je prošlo od trenutka nastanka potresa. Q_0 i n također ovise o proteklom vremenu. Q_0 , kao i Q , uglavnom raste s proteklom vremenom, dok se n uglavnom smanjuje ili je stabilan. Ne postoji široko prihvaćeni izraz koji bi opisivao $Q(t)$. Svojstvo povećanja Q s proteklom vremenom objašnjava se povećanjem Q s dubinom (Sato i sur., 2012). Naime, valovi koji na postaju dolaze kasnije, prodiru do većih dubina u unutrašnjosti Zemlje gdje je heterogenost manja te će biti manje prigušeni od valova koji putuju plićim slojevima gdje je heterogenost velika.

Primijećena je i značajna varijabilnost vrijednosti Q -faktora ovisno o području na kojem je mjeren. Pokazalo se da Q i Q_0 imaju veće vrijednosti u seizmički stabilnijim područjima kao što su Baltički štit (Kvamme i Havskov, 1989) ili centralni i istočni dio Sjeverne Amerike (Toro i sur., 1997). Također u tim područjima koeficijent n ima manje vrijednosti, tj. manja je frekvencijska ovisnost Q -faktora. Nasuprot tome, u seizmički aktivnim područjima koeficijent n

je veći, tj. veća je frekvencijska ovisnost Q -faktora, dok Q i Q_0 imaju manje vrijednosti. Manje vrijednosti Q -faktora znače da je atenuacija veća, odnosno ukazuje na jako raspršenje na nehomogenostima u tom području, što i očekujemo u području velike seizmičnosti. U seizmički stabilnim područjima sredstvo je nešto homogenije.

Faktor dobrote kojim se opisuje atenuacija izravnih P-valova označava se s Q_P , a faktor dobrote koji opisuje atenuaciju izravnih S-valova označava se s Q_S . U teorijskim razmatranjima omjer tih dviju vrijednosti iznosi $Q_S/Q_P = 4/9$ (Singh i sur., 2011). Međutim, vrijednosti tog omjera izračunatog za različita područja u svijetu ne slažu se nužno s teorijski predviđenim te su dobivene vrijednosti omjera često veće od 1.

3. Analiza podataka

3.1. Podaci

Za analizu atenuacije izravnih P- i S-valova u području središnjeg i južnog dijela Dinarida, korišteni su seizmogrami potresa zabilježenih na šest seizmoloških postaja koje smo podijelili u dvije skupine po tri postaje prema njihovom geografskom položaju. Kijevo (KIJV), Čačvina (CACV) i Udbina (UDBI) čine skupinu A u središnjem dijelu Dinarida, a Ston (STON), Stravča (STA) i Dubrovnik (DBR) skupinu B u južnom dijelu Dinarida. Svi instrumenti na seizmološkim postajama su širokopojasni 3-komponentni seizmografi marke Güralp. Parametri korištenih potresa preuzeti su iz Hrvatskog kataloga potresa (ažurirana verzija Herak i sur., 1996), a u obzir su uzeti samo potresi čija je hipocentralna udaljenost $r \leq 105$ km od razmatrane postaje. Ukupno je analizirano 249 različitih potresa, pri čemu su neki od njih zadovoljili kriterije za analizu na više korištenih seizmoloških postaja. Radi se o plitkim potresima sa žarištima u gornjoj kori većinom na dubinama do 15 km, s lokalnim magnitudama 2.0–5.1 (slika 3). U tablici 1 prikazane su postaje, njihove geografske koordinate, korišteni instrumenti, frekvencija uzorkovanja, promatrano razdoblje te broj potresa korištenih u ovom istraživanju.

Tablica 1. Postaje, instrumenti, frekvencija uzorkovanja (f_s), broj korištenih potresa (N) i razdoblje u kojem su se oni dogodili.

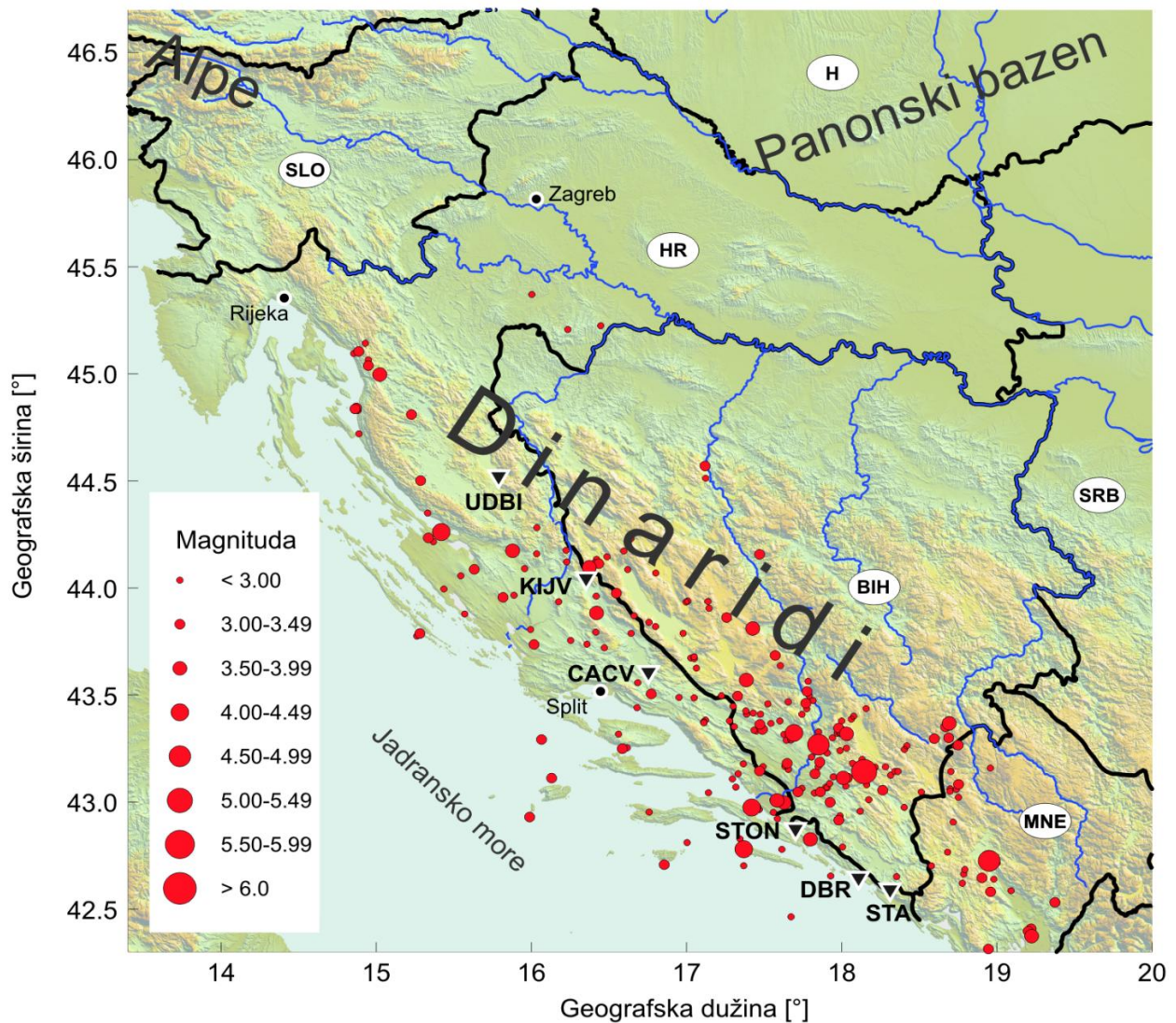
Postaja	Koordinate postaje	Instrument	f_s [Hz]	Period	N
Kijevo (KIJV)	44.005°N, 16.405°E	CMG-40T	50, 100	2004-2007	24
Čačvina (CACV)	43.609°N, 16.784°E	CMG-3ESP	50, 100	2007-2008	54
Udbina (UDB)	44.531°N, 15.769°E	CMG-40T	50	2009-2012	32
Ston (STON)	42.872°N, 17.699°E	CMG-40T	50, 200	2004-2008	76
Stravča (STA)	42.601°N, 18.312°E	CMG-40T	50	2005-2007	53
Dubrovnik (DBR)	43.647°N, 18.079°E	CMG-40T	100	2004-2008	69

3.2. Metoda

Faktori dobrote P-valova (Q_P) i S-valova (Q_S) izračunati su metodom normiranja kodom (eng. *coda-normalization method*). Metoda se bazira na proporcionalnosti spektralnih amplituda koda valova, P-valova i S-valova

$$A_C(f_0, t_C) \propto S_S(f_0) \propto S_P(f_0),$$

pri čemu je $A_C(f_0, t_C)$ amplituda koda valova u vremenu t_C nakon nastanka potresa na centralnoj frekvenciji f_0 , a $S_S(f_0)$ i $S_P(f_0)$ su spektralne amplitude S, odnosno P- valova. Kao vrijeme početka koda uzeto je dvostruko vrijeme putovanja S-vala ($2t_S$). Iz empirijskih promatranja može se zaključiti da je amplituda koda valova za vrijeme $t > 2t_S$ proporcionalna spektralnoj amplitudi S-valova na hipocentralnim udaljenostima $r \leq 100$ km (Aki i Chouet, 1975) te se pretpostavlja da je spektralna amplituda koda valova neovisna o hipocentralnoj udaljenosti (Aki, 1980). Primjenom metode normiranja kodom uklanjaju se utjecaji izvora i podloge ispod seizmološke postaje.



Slika 3. Prostorna raspodjela epicentara potresa i seizmoloških postaja korištenih u analizi.

Q_P i Q_S sam izračunala iz izraza (2.3.8) i (2.3.11)

$$\ln \left[\frac{A_S(f_0, r)r}{A_C(f_0, t_C)} \right] = -\frac{\pi f_0}{Q_S(f_0)v_S} r + konst(f_0). \quad (2.3.8)$$

$$\ln \left[\frac{A_P(f_0, r)r}{A_C(f_0, t_C)} \right] = -\frac{\pi f_0}{Q_P(f_0)v_P} r + konst(f_0), \quad (2.3.11)$$

Kako bismo izračunali Q_P i Q_S , potrebno je najprije pojasno filtrirati seizmograme. Koristila sam Butterworth filter drugog reda za pojase frekvencija definirane u tablici 2. Analiza P-valova napravljena je na vertikalnoj (Z) komponenti seizmograma, a analiza S-valova uglavnom na N-S komponenti jer su maksimalne amplitude na horizontalnim komponentama imale slične vrijednosti. Na filtriranim signalima mjerila sam maksimalne vršne (eng. *peak to peak*) amplitude P-, S- i koda valova unutar prozora od 5 s. Početak prozora za P- i S-valove određen je nailaskom izravnih P-, odnosno S-faza. Za vrijeme početka prozora u kodi odredila sam $t_C = 60$ s, što odgovara raspršenim valovima koji su mogli putovati do oko 100 km od postaje (slika 4). $A_P(f_0, r)$, $A_S(f_0, r)$ i $A_C(f_0, r)$ su spektralne amplitude i jednake su polovici zbroja maksimalnih amplitude. Korištena brzina P-valova je $v_P = 5.8$ km/s i brzina S-valova $v_S = 3.45$ km/s (Herak i Herak, 1995). Nakon što su izračunate lijeve strane izraza (2.3.8) i (2.3.11) za svaku središnju frekvenciju i potres za pojedinu postaju, koristeći metodu najmanjih kvadrata izračunala sam koeficijente pravca regresije, a iz koeficijenta nagiba pravca izračunala sam Q_P i Q_S prema (2.3.10) i (2.3.13).

Tablica 2. Frekvencije korištene za filtriranje gdje je f_0 centralna frekvencija, f_d donja granična frekvencija filtra i f_g gornja granična frekvencija filtra.

f_d [Hz]	1	2	4	6	8	12
f_0 [Hz]	1.5	3	6	9	12	18
f_g [Hz]	2	4	8	12	16	24

Ovisnost faktora dobrote Q o frekvenciji određena je izrazom

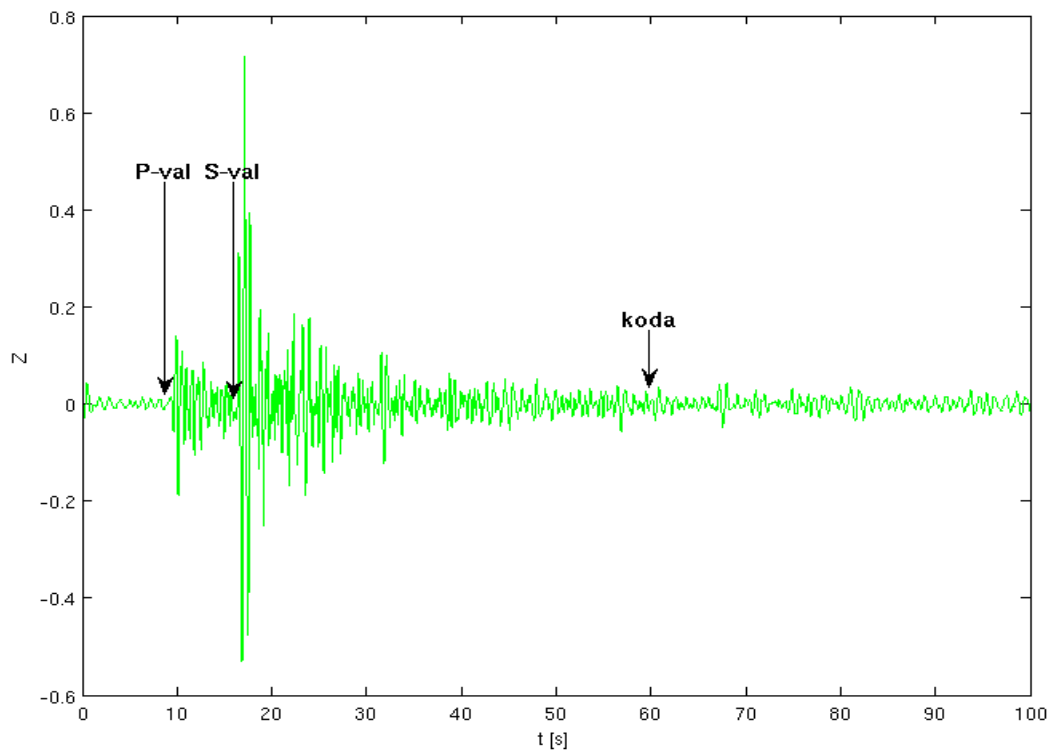
$$Q(f) = Q_0 f^n \quad (2.4.2)$$

gdje je $Q_0 = Q(f = 1 \text{ Hz})$, a n označava frekvencijsku ovisnost. Logaritmiranjem gornjeg izraza

dobijemo

$$\ln Q = \ln Q_0 + n \ln f_0 \quad , \quad (3.1)$$

na koji možemo primijeniti linearnu regresiju. Iz koeficijenata nagiba pravca dobivenog linearnom regresijom odredila sam n i Q_0 : Q_0 se dobije iz izraza $\ln Q_0$ koji predstavlja odsječak na ordinati, a n je jednak koeficijentu nagiba pravca.



Slika 4. Primjer vertikalne (Z) komponente seizmograma zabilježenog na postaji Ston, filtriranog za centralnu frekvenciju 1.5 Hz, za potres koji se dogodio 4.10.2004. godine u 00 h 31 min 58.8 s, magnitude 2.6. Označen je početak P- i S-valova te početak promatranog prozora kode.

4. Rezultati i diskusija

Na smanjenje amplitude seizmičkih valova utječu geometrijsko rasprostiranje valova i atenuacija valova uzrokovana unutrašnjim trenjem i raspršenjem. U ovoj analizi korištena je pretpostavka da smanjenje amplitude valova zbog geometrijskog rasprostiranja ovisnosti o r što je prikladno za slučaj kada je $r \leq h_m$, pri čemu je h_m dvostruka dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta. Za dubinu Mohorovičićevog diskontinuiteta pretpostavila sam vrijednost od 50 km kao približnu vrijednost za sve postaje (za detalje pogledati Stipčević, 2012) te su korišteni potresi s $r \leq h_m$. Za postaje s malim brojem potresa, uzeti su u obzir i potresi s hipocentralnom udaljenosti do 105 km.

Q_P i Q_S sam izračunala iz nagiba pravca linearne regresije (slika 5a i 5b) za svaku seizmološku postaju posebno (tablice 3 i 4). Linearnu regresiju sam provela pomoću metode najmanjih kvadrata (MNK) i pomoću robusne linearne regresije (iterativno utežavana MNK s bikvadratnom težinskom funkcijom). Kako nije bilo bitne razlike između podataka dobivenih različitim metodama, odlučila sam za daljnju analizu koristiti podatke dobivene uobičajenijom metodom najmanjih kvadrata. Na slikama 5a i 5b prikazan je primjer za ovisnost normiranih vršnih amplituda o hipocentralnoj udaljenosti za seizmološku postaju STON. Kako to izgleda za ostale postaje može se pogledati u prilogu A.

Tablica 3. Vrijednosti Q_P i Q_S za sve seizmološke postaje u skupini A.

f_0 [Hz]	KIJV		CACV		UDBI	
	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$
1.5	102 ± 51	193 ± 96	63 ± 31	223 ± 188	204 ± 103	363 ± 198
3	205 ± 102	219 ± 110	139 ± 76	351 ± 246	147 ± 74	625 ± 364
6	263 ± 132	295 ± 147	191 ± 95	250 ± 124	356 ± 205	926 ± 550
9	369 ± 184	389 ± 194	222 ± 111	364 ± 182	456 ± 228	787 ± 401
12	441 ± 220	473 ± 236	292 ± 146	467 ± 233	526 ± 263	947 ± 488
18	518 ± 259	657 ± 327	392 ± 196	577 ± 288	767 ± 383	1663 ± 887

U tablici 5 prikazane su vrijednosti Q_P i Q_S za obje skupine postaja. Te su vrijednosti izračunate kao srednja vrijednost Q_P i Q_S postaja koje pripadaju skupini A, odnosno skupini B. Grafički su Q_P i Q_S prikazane na slikama 6 i 7 zajedno s pripadnim standardnim pogreškama. Pravac prikazan na istim grafovima opisuje ovisnost faktora dobrote Q o frekvenciji, a izračunat

je primjenom linearne regresije iz izraza (3.1) pomoću robusne linearne regresije.

Tablica 4. Vrijednosti Q_P i Q_S za sve seizmološke postaje u skupini B.

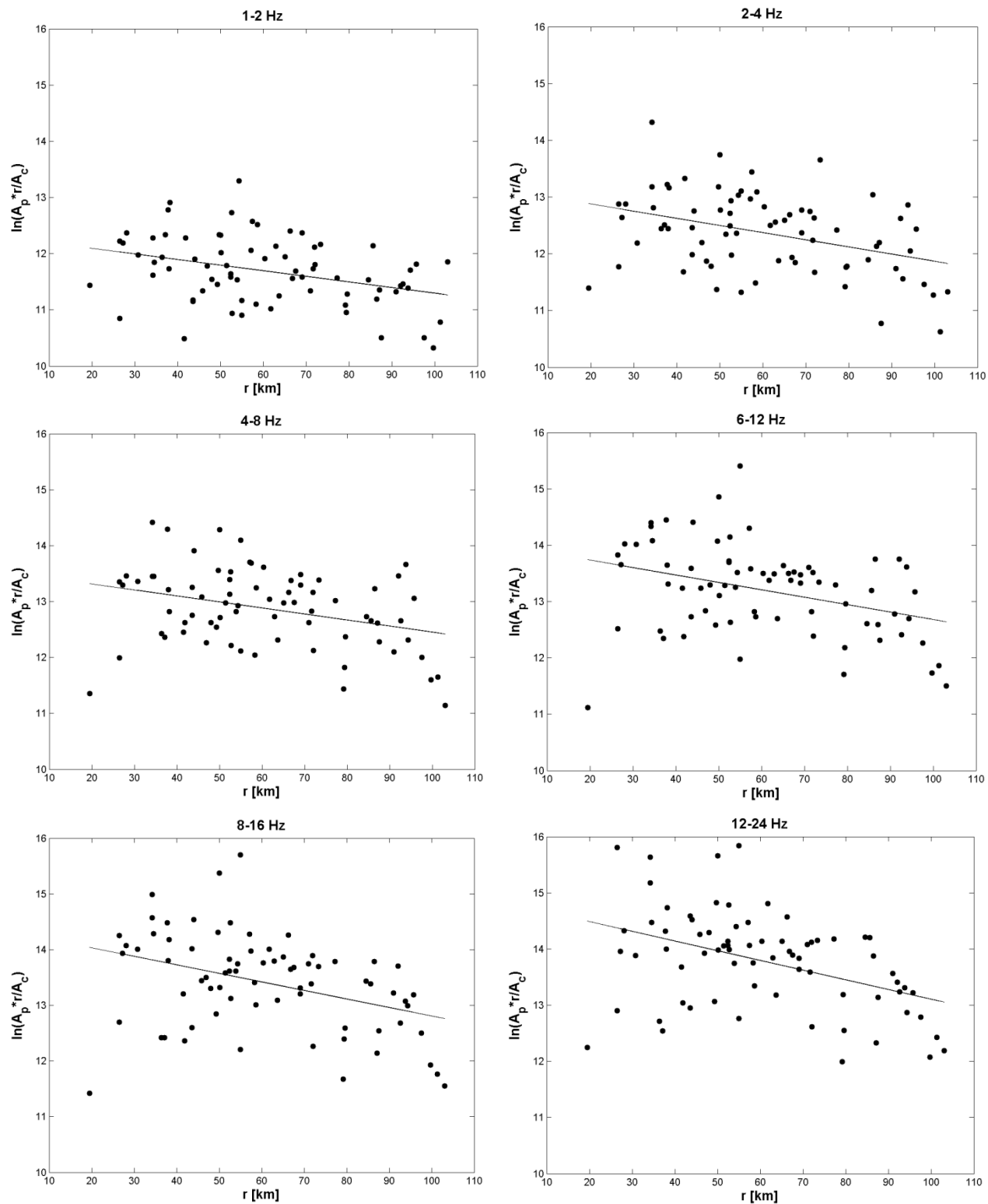
f_0 [Hz]	STON		STA		DBR	
	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$
1.5	81 ± 41	186 ± 93	95 ± 56	310 ± 153	182 ± 92	724 ± 305
3	139 ± 65	298 ± 149	162 ± 81	1361 ± 1056	138 ± 69	323 ± 162
6	302 ± 151	428 ± 214	345 ± 176	482 ± 241	242 ± 121	432 ± 216
9	371 ± 186	475 ± 237	402 ± 201	478 ± 239	485 ± 250	652 ± 326
12	424 ± 212	540 ± 270	472 ± 236	562 ± 281	824 ± 510	683 ± 341
18	564 ± 282	767 ± 383	593 ± 297	627 ± 314	1440 ± 1092	1152 ± 576

Tablica 5. Vrijednosti Q_P i Q_S za obje skupine.

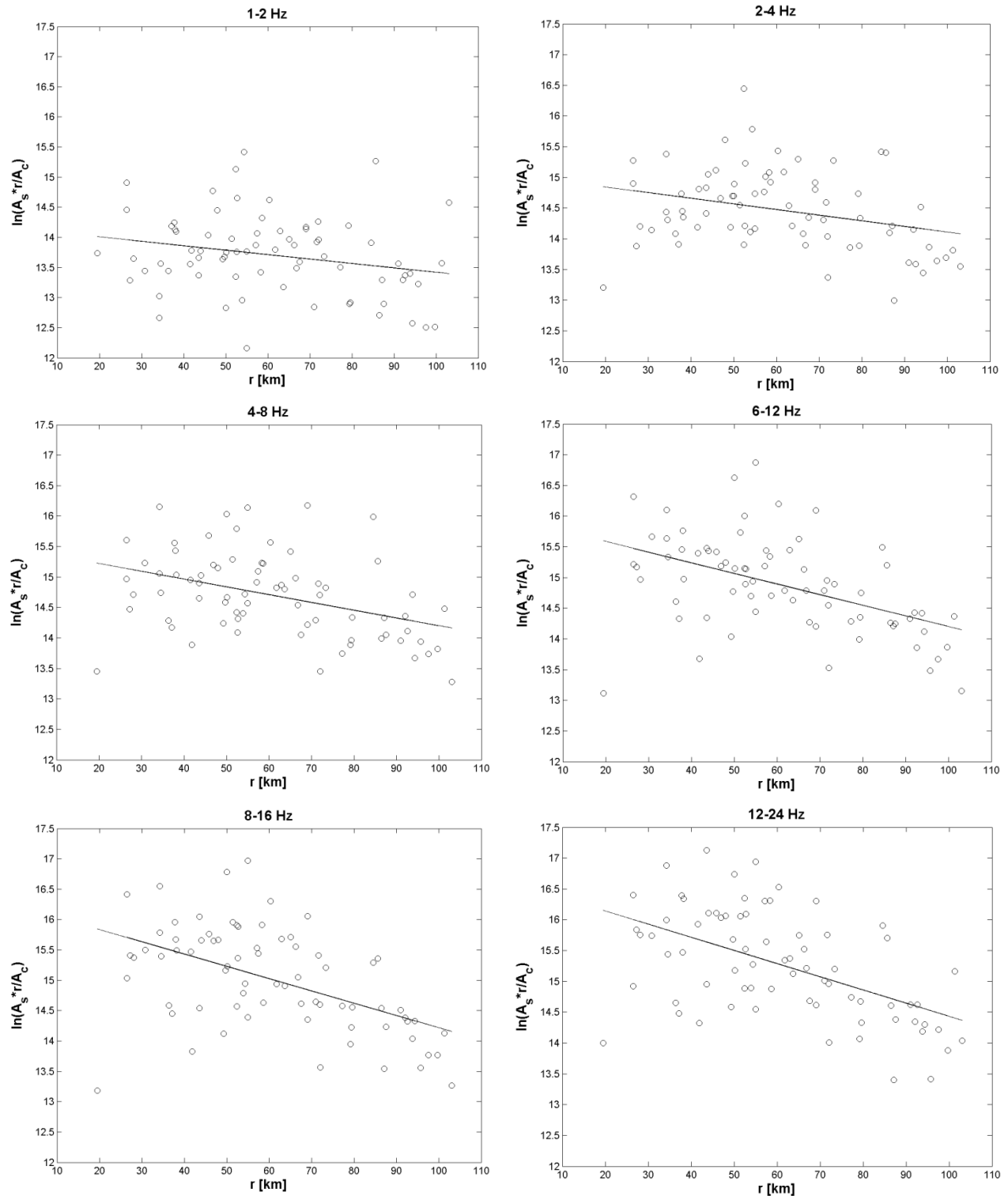
f_0 [Hz]	Skupina A		Skupina B	
	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$	$Q_P \pm \sigma_Q$	$Q_S \pm \sigma_Q$
1.5	123 ± 73	260 ± 91	119 ± 54	407 ± 281
3	164 ± 36	398 ± 207	143 ± 17	660 ± 607
6	270 ± 83	490 ± 378	296 ± 52	448 ± 30
9	349 ± 118	513 ± 237	419 ± 59	535 ± 101
12	419 ± 118	629 ± 275	573 ± 218	595 ± 77
18	559 ± 191	966 ± 605	866 ± 497	849 ± 272

Za skupinu A dobivene su nešto veće vrijednosti standardnih pogrešaka za Q_S u odnosu na ostale, na što su najviše utjecale dobivene vrijednosti za postaju Udbina koje su i po nekoliko puta veće od iznosa na postajama Kijevo i Čačvina.

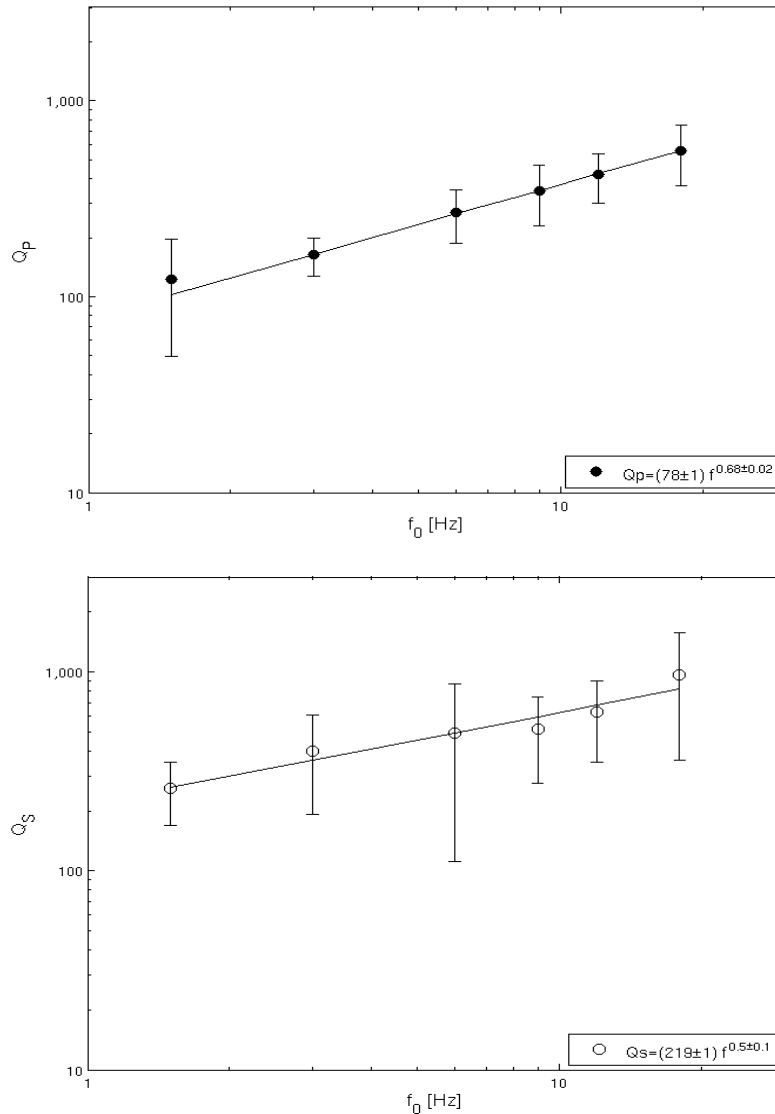
Uočavamo da se s porastom frekvencije Q_P i Q_S uglavnom povećavaju, no postoje odstupanja na nekim frekvencijama. Znatno odstupanje vidimo u skupini B za Q_S za $f_0 = 3$ Hz. Takvo odstupanje ne pojavljuje se na postajama Dubrovnik i Ston, ali je zato znatno na postaji Stravča (slika 8) te na taj način znatno utječe na srednju vrijednost ukupnog Q_S i standardnu devijaciju u skupini B. Što bi točno mogao biti uzrok tome, izvan je dosega ovog istraživanja. Za $f_0 = 1.5$ Hz na postaji Dubrovnik dobivene su nešto veće vrijednosti od očekivanih, što na kraju utječe na srednju vrijednost Q_P i Q_S za skupinu B. Moguće je da je to utjecaj mikroseizmičkog nemira na frekvencijama 1–2 Hz.



Slika 5a. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za P-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Ston (STON).

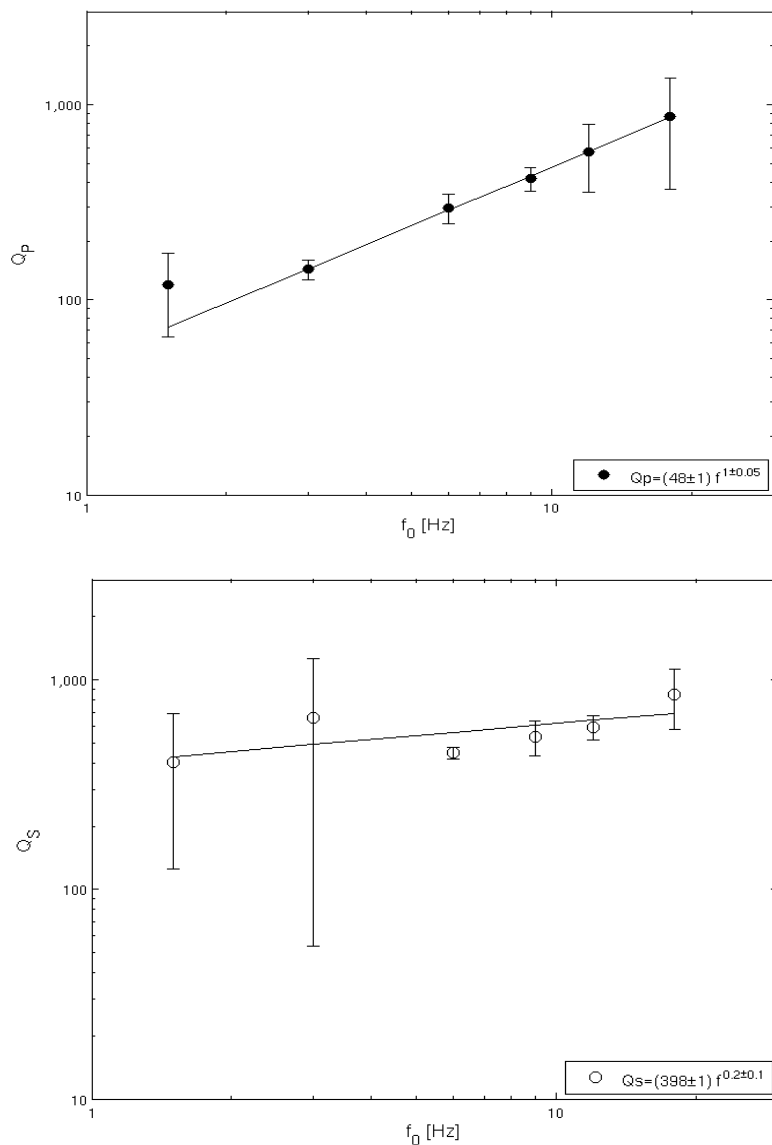


Slika 5b. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za S-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Ston (STON).



Slika 6. Srednje vrijednosti Q_P i Q_S sa standardnim pogreškama te pravcem prilagodbe koji prikazuje izraz (2.4.2) za skupinu A.

Zbog lakše usporedbe na slici 9 prikazane su izračunate vrijednosti Q_P i Q_S za sve seizmološke postaje. Promatrajući rezultate za Q_P , jasno se ističe seizmološka postaja Dubrovnik čije se ponašanje vrijednosti Q_P jasno razlikuje od drugih. Rezultati ukazuju i na snažno izraženu atenuaciju u području seizmološke postaje Čačvina. Ostale postaje su grupirane oko bliskih vrijednosti i ukazuju na slična svojstva. Vrijednosti za Q_S raspršenije su od onih za Q_P , a posebno se ističe postaja Stravča za $f_0 = 3$ Hz. Za postaju Dubrovnik vidimo da, kao i za Q_P , na $f_0 = 1.5$ Hz za Q_S imamo neočekivano veliku vrijednost. Također za postaju Udbina na svim frekvencijama imamo veće vrijednosti od postaja Kijevo i Čačvina, koje se nalaze u istoj skupini, što je znatno drugačije ponašanje u odnosu na Q_P .

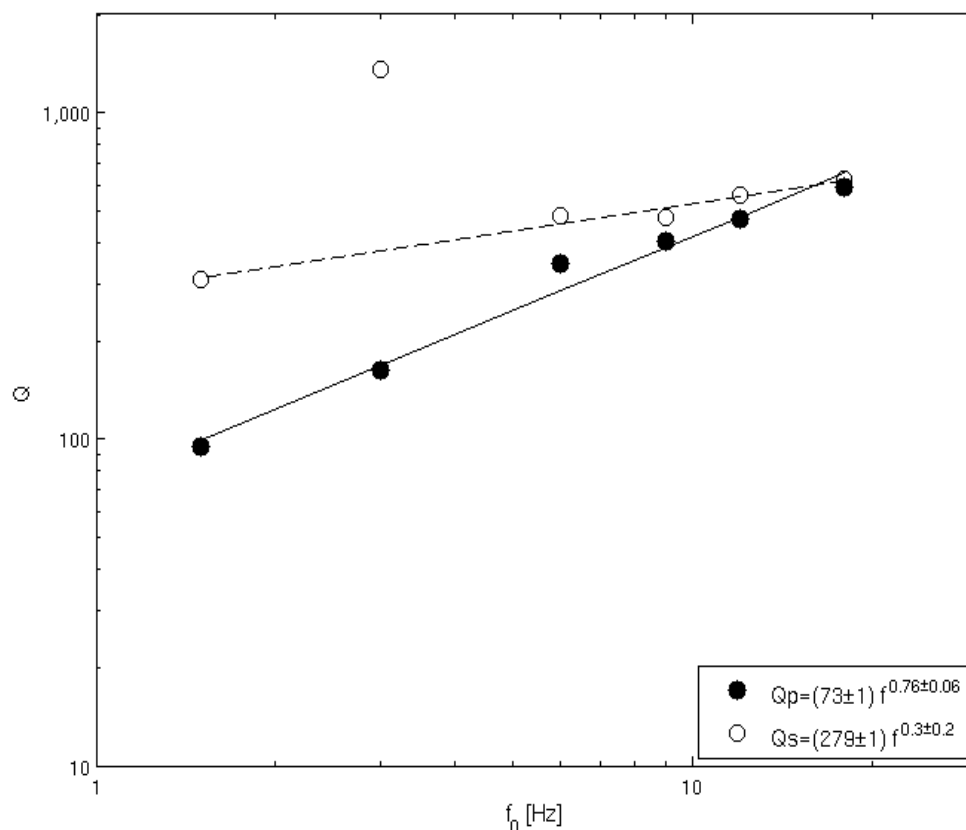


Slika 7. Srednje vrijednosti Q_P i Q_S sa standardnim pogreškama te pravcem prilagodbe koji prikazuje izraz (2.4.2) za skupinu B.

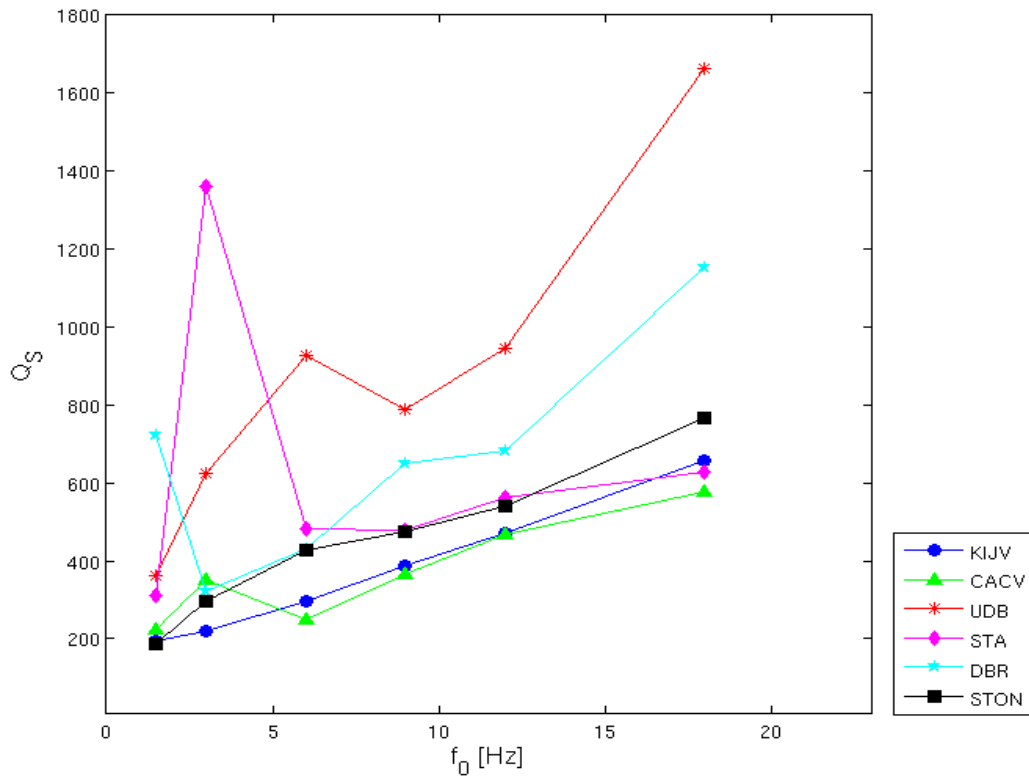
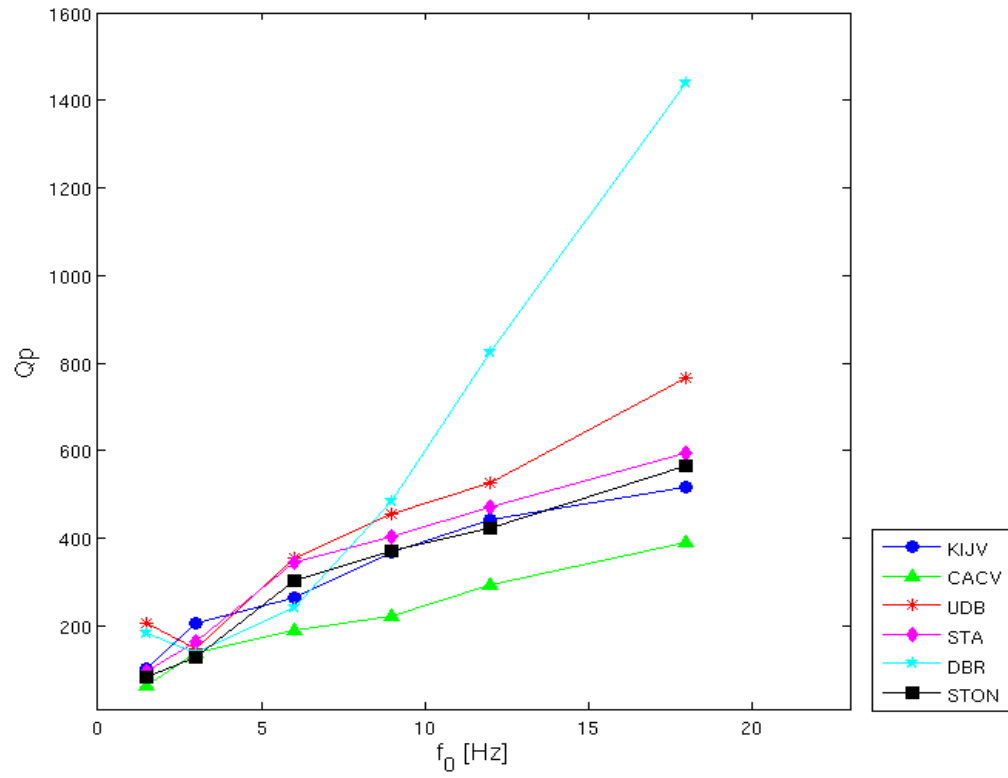
Iz tablice 6 uočavamo da su vrijednosti $Q_0 = Q_P$ (1 Hz) manje od vrijednosti za $Q_0 = Q_S$ (1 Hz) što bi značilo da je atenuacija veća u odnosu na atenuaciju S-valova. Osim toga, primjećujemo da i koeficijent n koji opisuje frekvencijsku ovisnost Q -faktora ima veću vrijednost za P-valove što znači da s promjenom frekvencije dolazi do veće promjene Q_P u odnosu na Q_S . Na slici 8 dan je primjer seizmološke postaje Stravča, no slično se ponašaju Q -faktori i na ostalim postajama (prilog B).

Različita istraživanja diljem svijeta pokazala su da su za seizmički aktivna područja

svojevrsne male vrijednosti Q -faktora, dok seizmički stabilna područja, kao što su središnji i sjeveroistočni dio SAD-a i jugoistočni dio Kanade, pokazuju velike vrijednosti Q -faktora (Sato i sur., 2012). Kastelic i sur. (2010) su za područje zapadne i središnje Slovenije za $0.8 \leq f_0 \leq 12$ Hz dobili $Q_S = 83 f^{0.8}$. Za isti su raspon frekvencija Polatidis i sur. (2003) za područje Grčke dobili $Q_S = 55 f^{0.91}$. Bindi i sur. (2006) su za područje sjeverozapadne Turske za $2.5 \leq f_0 \leq 10$ Hz izračunali $Q_S = 56 f^{0.25}$, dok su Horasan i Boztepe-Güney (2004) za pet regija u Mramornom moru u Turskoj za $1.5 \leq f_0 \leq 12$ Hz Q_S dobili su u rasponu od $13 f^{1.22}$ do $94 f^{0.83}$. Ma'hood i sur. (2009) su dobili $Q_S = 53 f^{1.02}$ i $Q_P = 40 f^{0.99}$ za $1.5 \leq f_0 \leq 24$ Hz za istočni dio središnjeg Irana, a Yoshimoto i sur (1993) su za Kanto regiju u Japanu izračunali $Q_S = (101-803) f^{0.7}$ i $Q_P = (49-541) f^{1.0}$ za $1.5 \leq f_0 \leq 24$ Hz. Iz dobivenih rezultata i njihovom usporedbom s različitim područjima u svijetu mogu zaključiti da promatrano područje spada u seizmički aktivno i heterogeno područje.



Slika 8. Q_P i Q_S za postaju Stravča s pravcem prilagodbe $Q = Q_0 f^n$.



Slika 9. Na gornjoj slici prikazane su vrijednosti od Q_p , a na donjoj za Q_s za sve postaje.

Tablica 6. Q_0 i n za sve korištene postaje za $Q_P(1 \text{ Hz})$ i $Q_S(1 \text{ Hz})$.

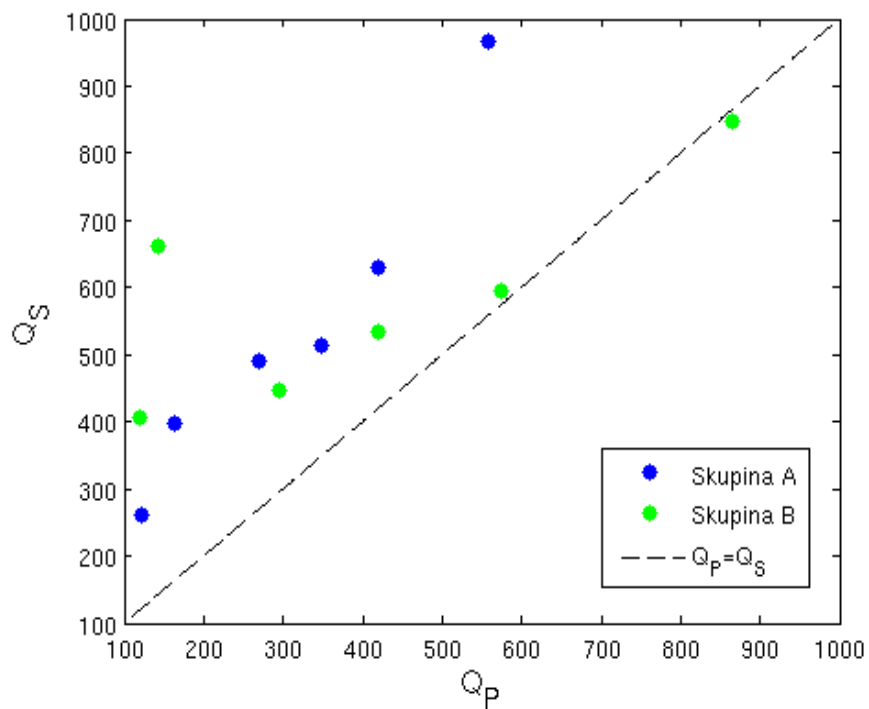
	KIJV	CACV	UDBI	STON	STA	DBR	Skupina A	Skupina B
$Q_0 \pm \sigma_Q$								
P	54 ± 1	87 ± 1	61 ± 1	59 ± 1	73 ± 1	72 ± 2	78 ± 1	48 ± 1
S	196 ± 1	138 ± 1	316 ± 1	156 ± 1	279 ± 1	384 ± 2	219 ± 1	398 ± 1
$n \pm \sigma_n$								
P	0.69 ± 0.07	0.64 ± 0.06	0.9 ± 0.1	0.81 ± 0.06	0.76 ± 0.06	0.9 ± 0.2	0.68 ± 0.02	1.00 ± 0.05
S	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.53 ± 0.04	0.30 ± 0.02	0.3 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.2 ± 0.1

Pretpostavljamo da na atenuaciju, u području koje proučavamo, znatno utječe raspršenje. Bianco i sur. (1999) pretpostavljaju da su velike vrijednosti u omjeru Q_S/Q_P uzrokovane plitkim nehomogenostima u kori. To sugerira da su dobivene velike vrijednosti tog omjera na nekim frekvencijama u ovoj analizi (tablica 7) uzrokovane plitkim nehomogenostima na promatranom području. Na slici 10 prikazani su omjeri Q_S/Q_P za središnje frekvencije f_0 za obje skupine analizirane u ovom radu. Teorijska vrijednost omjera Q_S/Q_P jednaka je 4/9 (Bindi i sur., 2006; Singh i sur., 2011). Vrijednosti ovog omjera mjenjenog u različitim područjima diljem svijeta razlikuju se od teorijske vrijednosti. U tablici 7 je vidljivo da su vrijednosti Q_S/Q_P najveće za najmanje frekvencije i da opadaju porastom frekvencije, no da su omjeri uglavnom veći od 1. Prema Hough i Anderson (1988), $Q_S/Q_P > 1$ se očekuje za većinu vrsta raspršenja.

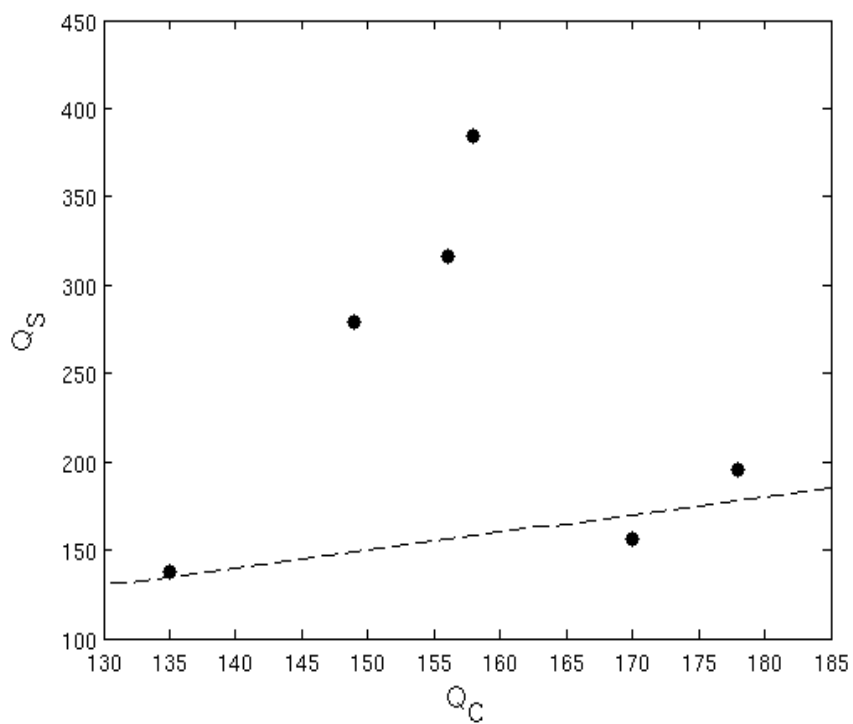
Tablica 7. Omjeri Q_S/Q_P za centralne frekvencije f_0 za obje skupine.

f_0 [Hz]	1.5	3	6	9	12	18
Skupina 1	2.11	2.44	1.82	1.47	1.50	1.73
Skupina 2	3.41	4.61	1.51	1.28	1.04	0.98

Na slici 11 prikazana je usporedba izračunatih vrijednosti $Q_S(1 \text{ Hz})$ (tablica 6) s $Q_C(1 \text{ Hz})$ za $t_L = 60 \text{ s}$ iz Dasović i sur. (2012) i Dasović i sur. (2013) dobivenih za prozor kode širine 30 s. Smatra se da se koda valovi sastoje prvenstveno od raspršenih S-valova. Ako raspršenje nije znatno ili dominantno, vrijednosti faktora Q_C i Q_S trebale bi biti slične. $Q_S(1 \text{ Hz})$ dobiven u ovoj analizi je veći od $Q_C(1 \text{ Hz})$, što ukazuje da su izravni S-valovi manje atenuirani od koda valova. Iz toga možemo zaključiti da raspršenje na heterogenostima u plitkim slojevima znatno doprinosi ukupnoj atenuaciji koda valova.



Slika 10. Usporedba omjera Q_S/Q_P za obje skupine za sve središnje frekvencije.



Slika 11. Usporedba $Q_S(1 \text{ Hz})$ s $Q_C(1 \text{ Hz})$. Isprekidana linija označava $Q_S = Q_C$.

5. Zaključci

Cilj ove analize bio je odrediti atenuaciju prostornih valova, odnosno Q -faktor, za područje središnjeg i južnog dijela Vanjskih Dinarida upotrebom seizmograma sa šest hrvatskih seizmoloških postaja (Kijevo, Čačvina, Udbina, Ston, Stravča i Dubrovnik). Korištena je proširena metoda normiranja kodom (Aki, 1980; Yoshimoto i sur., 1993) koja se temelji na modelu jednostrukog raspršenja unatrag (Aki i Chouet, 1975). Izračunati su Q -faktori za svaku postaju posebno te za dvije skupine koje čine cjeline po geografskom položaju korištenih postaja. Podaci su pojasno filtrirani za šest centralnih frekvencija u rasponu od 1.5 do 18 Hz. Dobivene vrijednosti Q_P i Q_S pokazale su postojanje frekvencijske ovisnosti, s tim da je ta ovisnost izraženija kod Q_P . Niske vrijednosti Q_P i Q_S ukazuju na jaku atenuaciju u analiziranom području te odgovaraju rezultatima dobivenim za druga seizmički aktivna područja u svijetu. Na cijelom rasponu centralnih frekvencija Q_P je manji od Q_S , odnosno atenuacija P-valova je veća od atenuacije S-valova što vjerojatno ukazuje na veliku heterogenost u promatranom području. Omjer Q_S/Q_P za obje skupine uglavnom je veći od 1, što je u skladu s rezultatima dobivenim u drugim istraživanjima za tektonski aktivna područja. Usporedbom Q_S i Q_C (Dasović i sur., 2012, 2013) za svaku postaju primijećena je nešto veća atenuacija koda valova u odnosu na S-valove, tj. $Q_S > Q_C$, što vodi na zaključak da ukupnoj atenuaciji koda valova uvelike doprinosi raspršenje na heterogenostima u plitkim slojevima. Poznavanje atenuacije seizmičkih valova i mehanizama vezanih uz rasprostiranje energije oslobođene potresima kroz litosferu, može doprinijeti daljnjim istraživanjima strukture Zemljine kore, seizmičkog hazarda te u proučavanju svojstava žarišta potresa u ovom području.

Zahvale

Zahvaljujem se Ivi Dasović, dipl.inž. na usmjeravanju, iznimnoj susretljivosti, strpljenju, savjetima i na svoj ukazanoj pomoći. Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Davorki Herak na savjetima, strpljenju te pruženoj prilici i poticanju na samostalan rad.

Literatura

Aki, K. (1980): *Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere*. J. Geophys. Res., 85, No. B11, 6496–6540.

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

Bianco, F., Castellano, M., Del Pezzo, E., Ibanez, J. M. (1999): *Attenuation of short-period seismic waves at Mt Vesuvius, Italy*. Geophys. J. Int., 138, 67–76

Bindi, D., Parolai, S., Grosser, H., Milkereit, C., and Karakisa, S. (2006): *Crustal Attenuation Characteristics in Northwestern Turkey in the Range from 1 to 10 Hz*. Bull. Seism. Soc. Am., 96, 200–214.

Dainty, A. M. (1981): *A scattering model to explain seismic Q observation in the lithosphere between 1 and 30 Hz*. Geophys. Res. Lett., 8, 1126 –1128.

Dasović, I. (2009): *Analiza koda valova na području Stona i širem području otoka Hvara*. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, PMF-Geofizički odsjek, str. 47.

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

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

Herak, M. (1991): *Lapse-time dependent Q_c -spectra observed in the Dinarides region*. Phys. Earth Plant. Inter., 67: 303–312.

Herak, M., Herak, D. (1995): *Body-wave velocities in the circum-Adriatic region*. Tectonophysics 241, 121–141.

Herak, M., Herak, D., Markušić, S. (1996): *Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992*. Terra Nova 8, 86–94.

Horasan, G., Boztepe-Güney, A. (2004): *S-wave attenuation in the Sea of Marmara, Turkey*. Phys. Earth Plant. Inter., 142, 215–224.

Hough, S. E., Anderson, J. G. (1988): *High-frequency spectra observed at Anza, California: implications for Q structure*. Bull. Seism. Soc. Am., 78, 692–707.

Kvamme, L. B., Havskov, J. (1989): *Q in southern Norway*. Bull. Seism. Soc. Am. 79,1575–1588.

Kastelic, V., Kiratzi, A., Benetatos, C., Živčić, M., Bajc J., (2010): *Shear wave Q determination for the upper crust of the western and central Slovenia*. Scientific Annals, School of Geology, University of Thessaloniki, Proceedings of the XIX CBGA Congress, Spec. vol. 99, str. 377–385.

Ma'hood, M., Hamzehloo, H., Doloei, G. J. (2009): *Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of the East-Central Iran*, Geophys. J. Int., 179, 1669–1678.

Polatidis, A., Kiratzi, A., Hatzidimitriou, P., Margaris, B. (2003): *Attenuation of shear-waves in the back-arc region of the Hellenic arc for frequencies from 0.6 to 16 Hz*. Tectonophysics 367, 29–40.

Rautian, T. G., Khalturin, V. I. (1978): *The use of the coda for determination of earthquake source spectrum*. Bull. Seismol. Soc. Am. 68, 923–948.

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

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

Singh, C., Singh, A., Srinivasa Bharathi, V. K., Bansal, A. R., Chadha, R. K. (2011): *Frequency-dependent body-wave attenuation characteristics in the Kaumaun Himalaya*. Tectonophysics, 524-525, 37–42.

Stipčević, J., (2012): *Struktura kore i gornjeg plašta u širem području Dinarida određena analizom širokopojasnih funkcija prijemnika*. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, str.170.

Toro, G. R., Abrahamson, N. A., Schneider, J. F., (1997): *Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties*. Seism. Res. Lett. 68, 41–57.

Yoshimoto, K., Sato, H., Ohtake, M. (1993): *Frequency-dependent attenuation of P and S waves in the Kanto area, Japan, based on the coda-normalization method*. Geophys. J. Int., 114, 165–174.

Sažetak

Marija Ruščić

Atenuacija visokofrekventnih seizmičkih valova u središnjem i južnom dijelu Vanjskih Dinarida

Kako bi se provjerila atenuacija izravnih P- i S-valova u središnjem i južnom dijelu Vanjskih Dinarida, analizirala sam seizmogramе potresa zabilježenih na šest hrvatskih seizmoloških postaja. U tu svrhu korištena je proširena metoda normiranja kodom, primijenjena na šest centralnih frekvencija (1.5, 3, 6, 9, 12 i 18 Hz). Izračunate su vrijednosti Q_P i Q_S za svaku postaju posebno te za dvije skupine u koje su postaje grupirane prema svom položaju. Dobivene vrijednosti Q_P i Q_S pokazuju da postoji frekvencijska ovisnost $Q = Q_0 f^n$ koja je izraženija za Q_P : $Q_P(1 \text{ Hz}) = 54\text{--}87$, $n_P = 0.64\text{--}0.90$, $Q_S(1 \text{ Hz}) = 138\text{--}384$ i $n_S = 0.30\text{--}0.53$. Omjer Q_S/Q_P , koji je za obje skupine uglavnom veći od 1, ukazuje na veliku heterogenost promatranog područja. Da ukupnoj atenuaciji kode doprinosi raspršenje na plitkim heterogenostima sugerira usporedba Q_S i u prethodnim istraživanjima izračunatog Q_C . Vrijednosti dobivene za Q_P i Q_S slične su rezultatima dobivenih u drugim seizmički aktivnim područjima poput područja Grčke, sjeverozapadne Turske i Kanto regije u Japanu.

Ključne riječi: *koda valovi, prostorni valovi, raspršenje, atenuacija, faktor dobrote*

Summary

Marija Ruščić

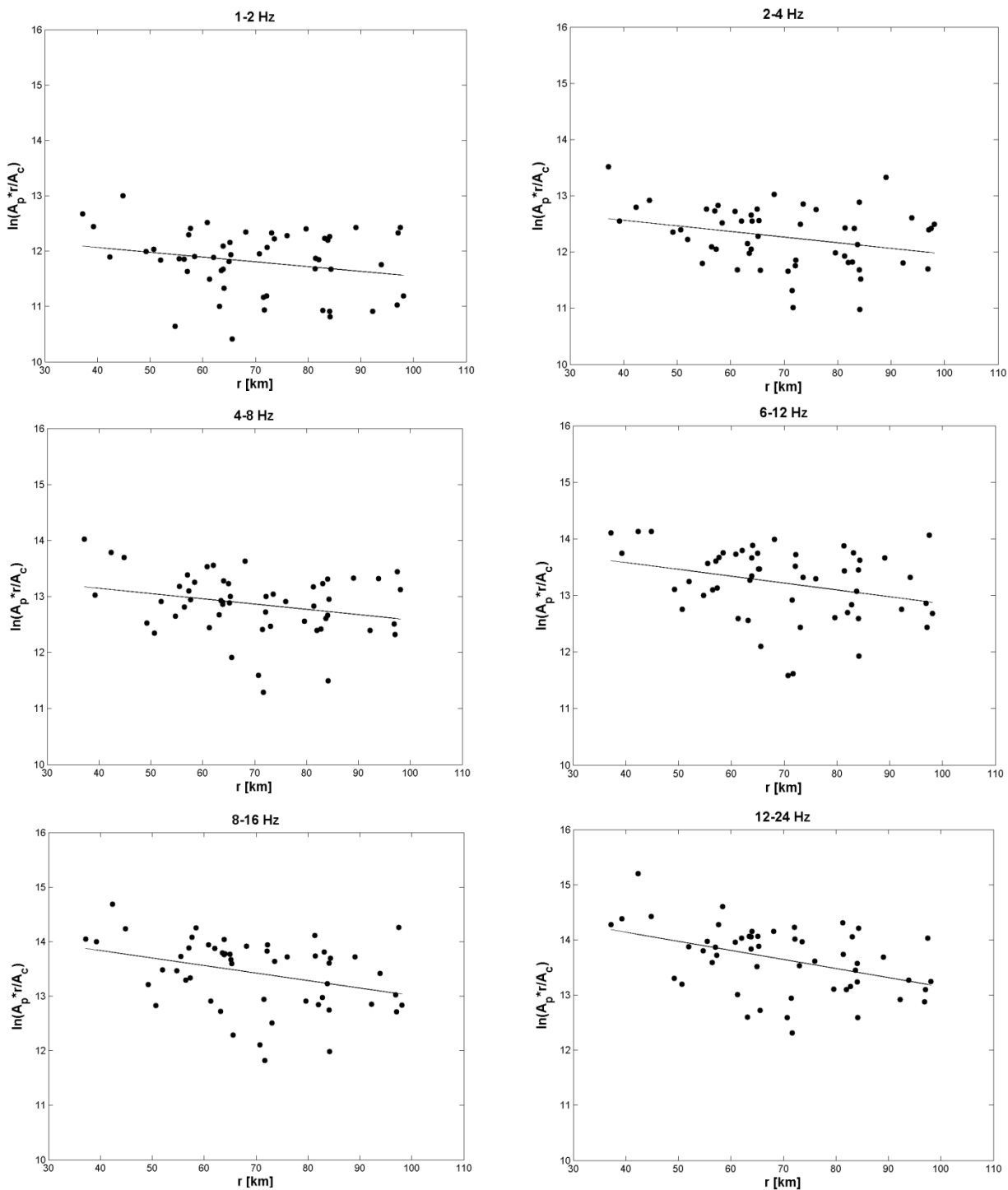
Attenuation of high frequency seismic waves in the central and southern part of the External Dinarides

In order to estimate attenuation of the direct P- and S-waves in the central and southern parts of the External Dinarides, earthquake seismograms from six Croatian seismological stations were analysed. The extended coda-normalization method was used on six central frequencies (1.5, 3, 6, 9, 12 and 18 Hz). The values for Q_P and Q_S were calculated for each station and for two groups in which the stations are placed according to their geographical position. Q_P and Q_S show frequency dependence $Q = Q_0 f^n$ that is more pronounced in Q_P : $Q_P(1 \text{ Hz}) = 54\text{--}87$, $n_P = 0.64\text{--}0.90$, $Q_S(1 \text{ Hz}) = 138\text{--}384$ and $n_S = 0.30\text{--}0.53$. The ratios Q_S/Q_P , mostly larger than unity for both groups, suggest that the area is characterized by a high degree of heterogeneity. Comparison of Q_S with previously estimated Q_C , implies that scattering on shallow heterogeneities noticeably contributes to total attenuation of coda waves. The values Q_P and Q_S are in accordance with results from other seismically active regions such as Greece, north-western Turkey and Kanto region in Japan.

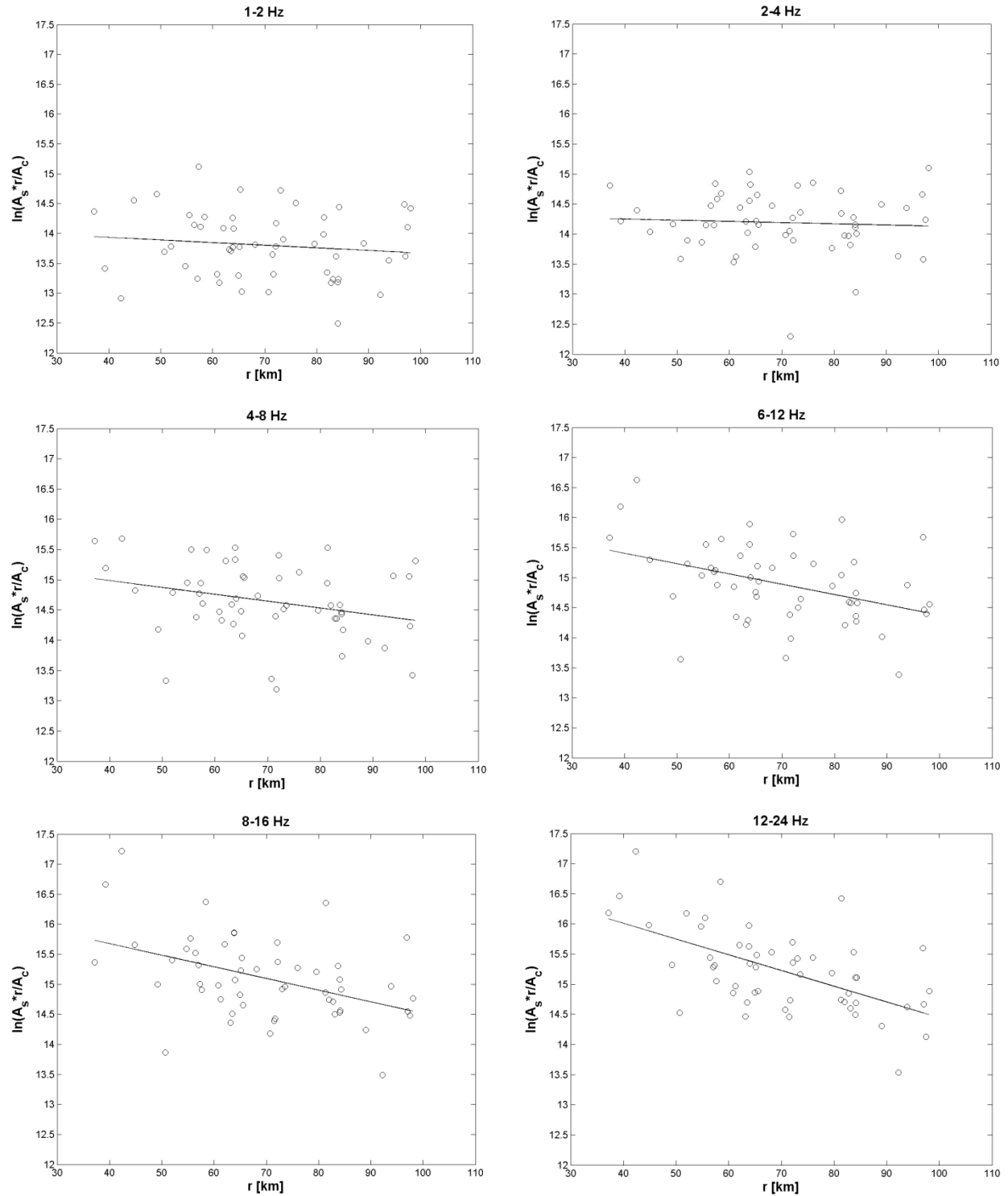
Keywords: *coda waves, body waves, scattering, attenuation, quality factor*

Prilozi

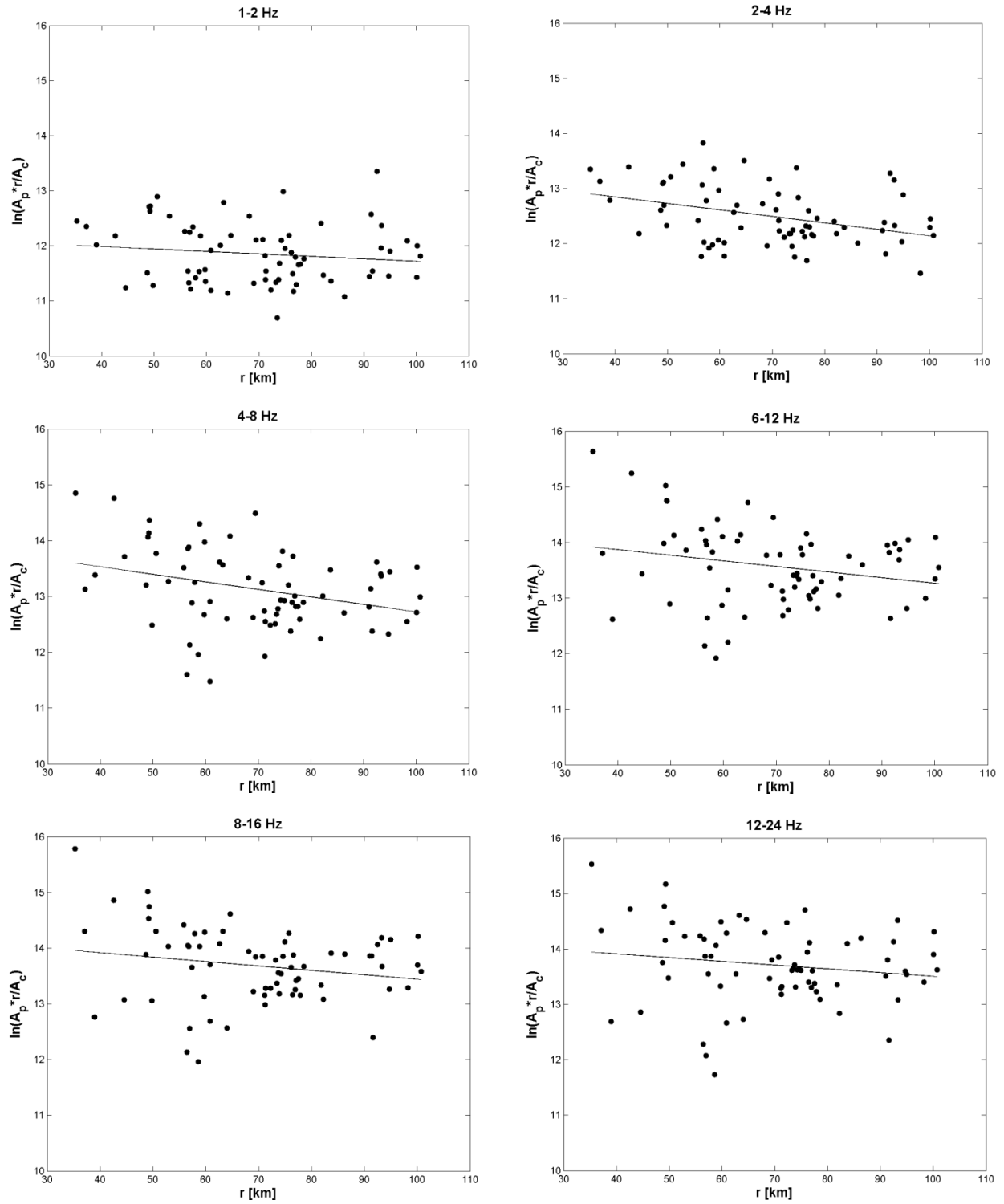
Prilog A



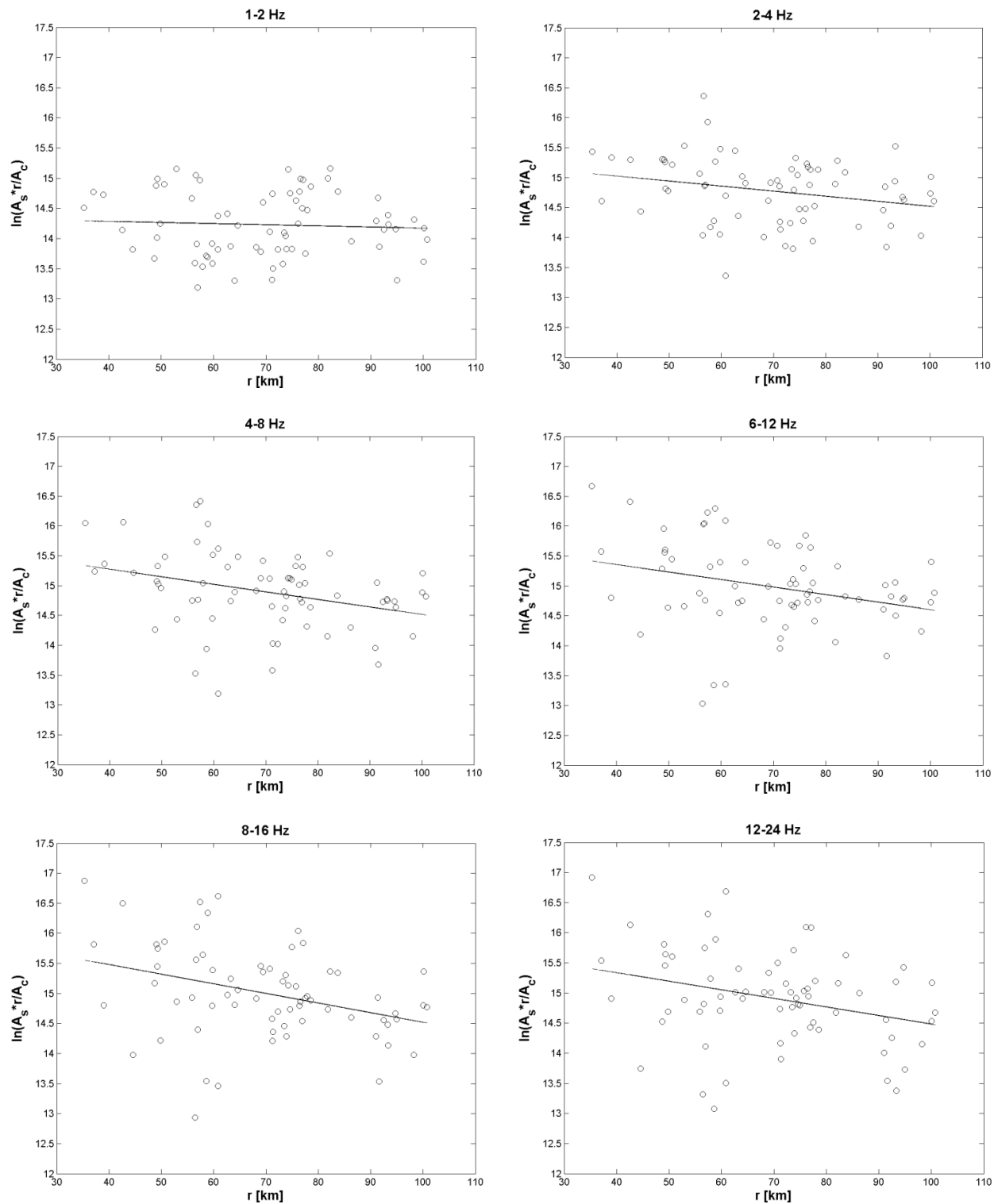
Slika A1. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za P-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Stravča (STA).



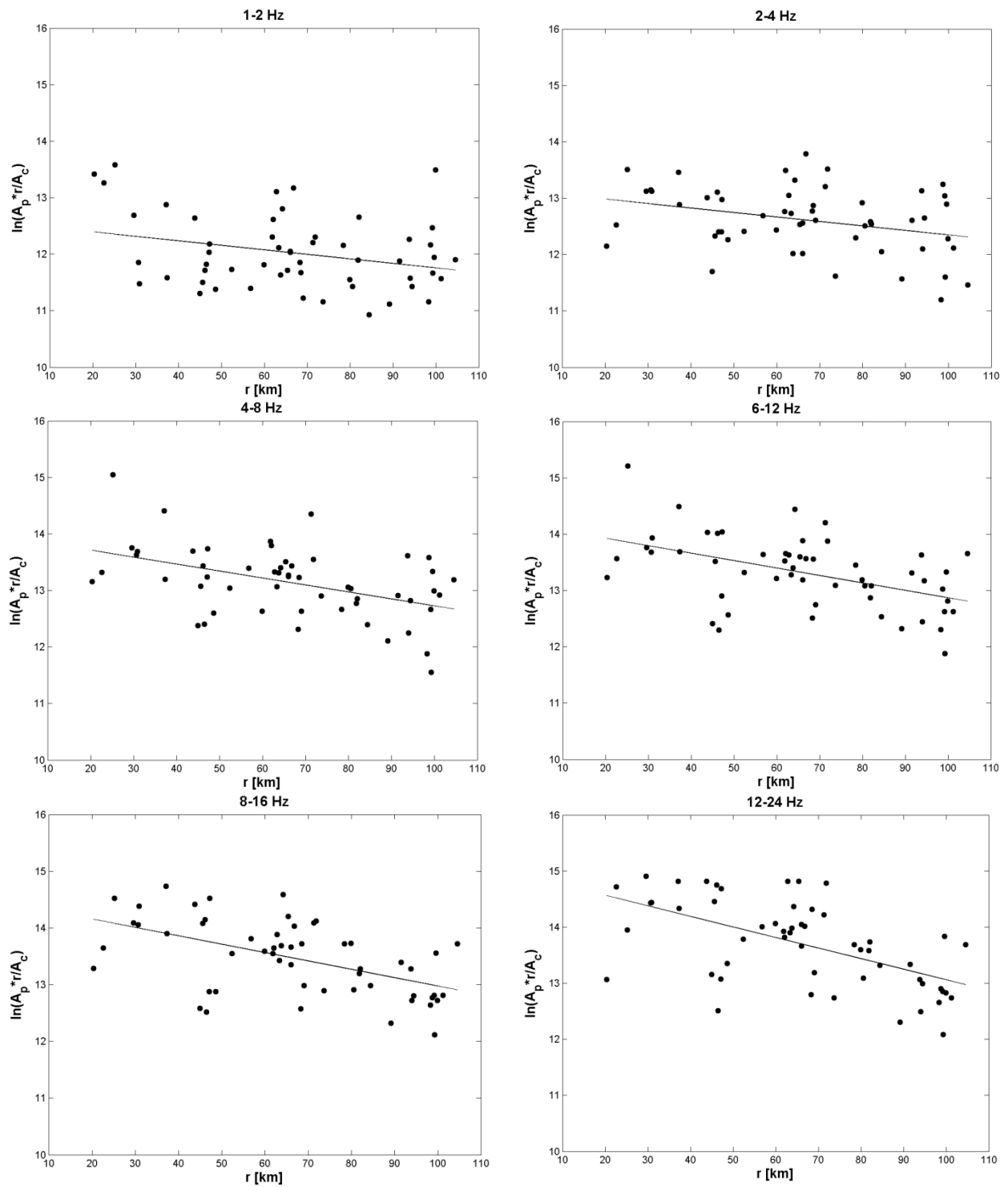
Slika A2. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za S-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Stravča (STA).



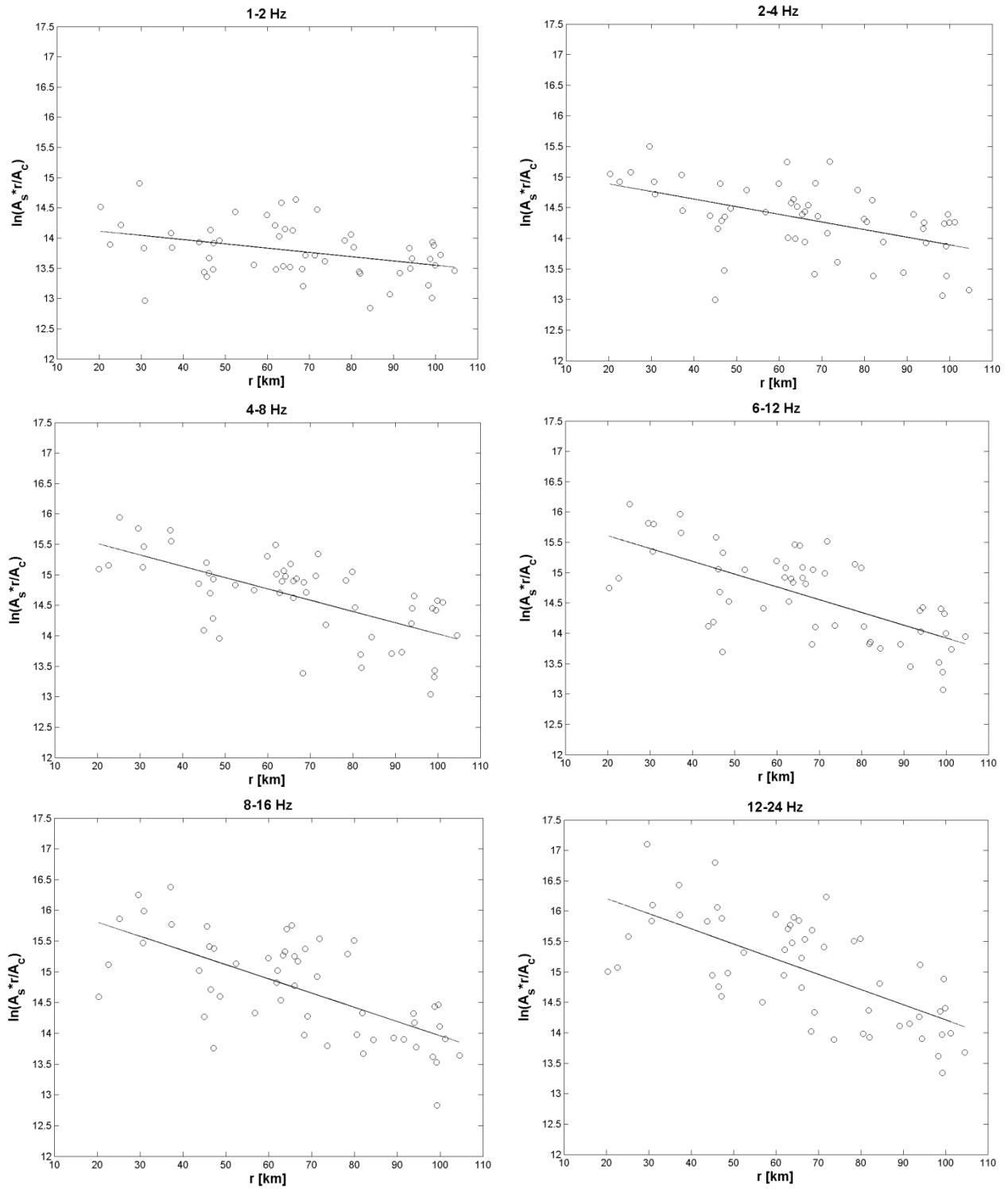
Slika A3. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za P-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Dubrovnik (DBR).



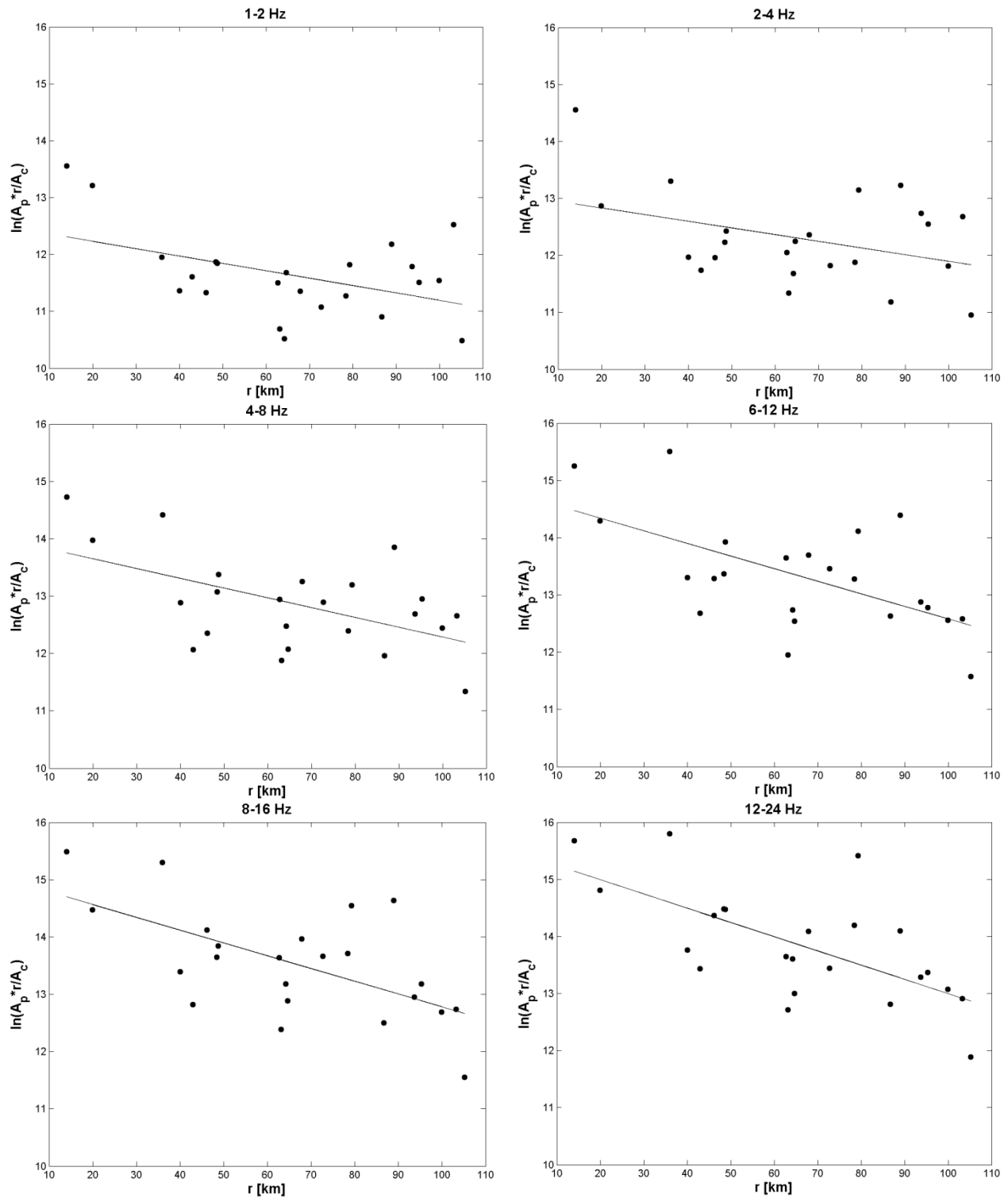
Slika A4. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za S-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Dubrovnik (DBR).



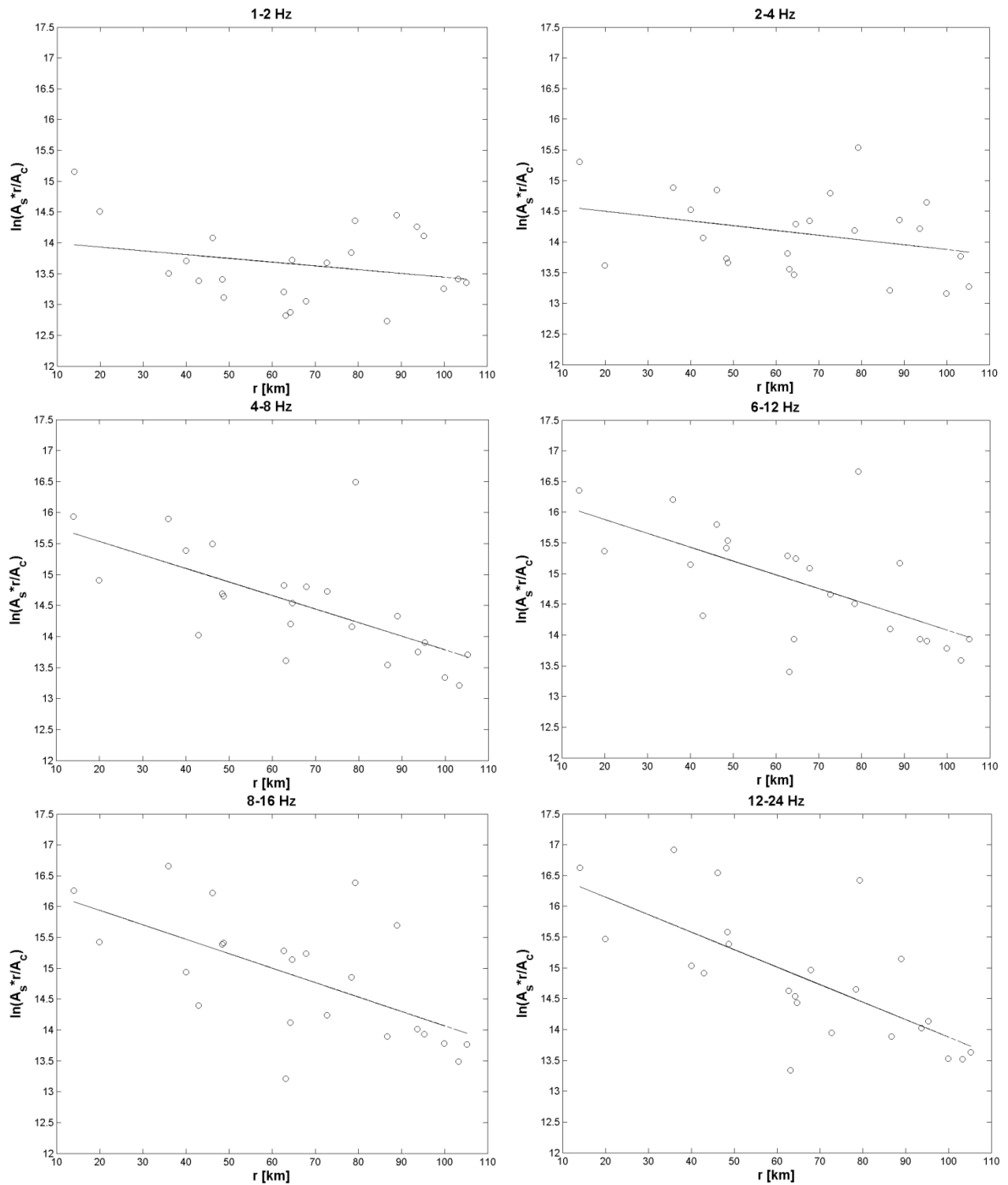
Slika A5. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za P-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Čačvina (CACV).



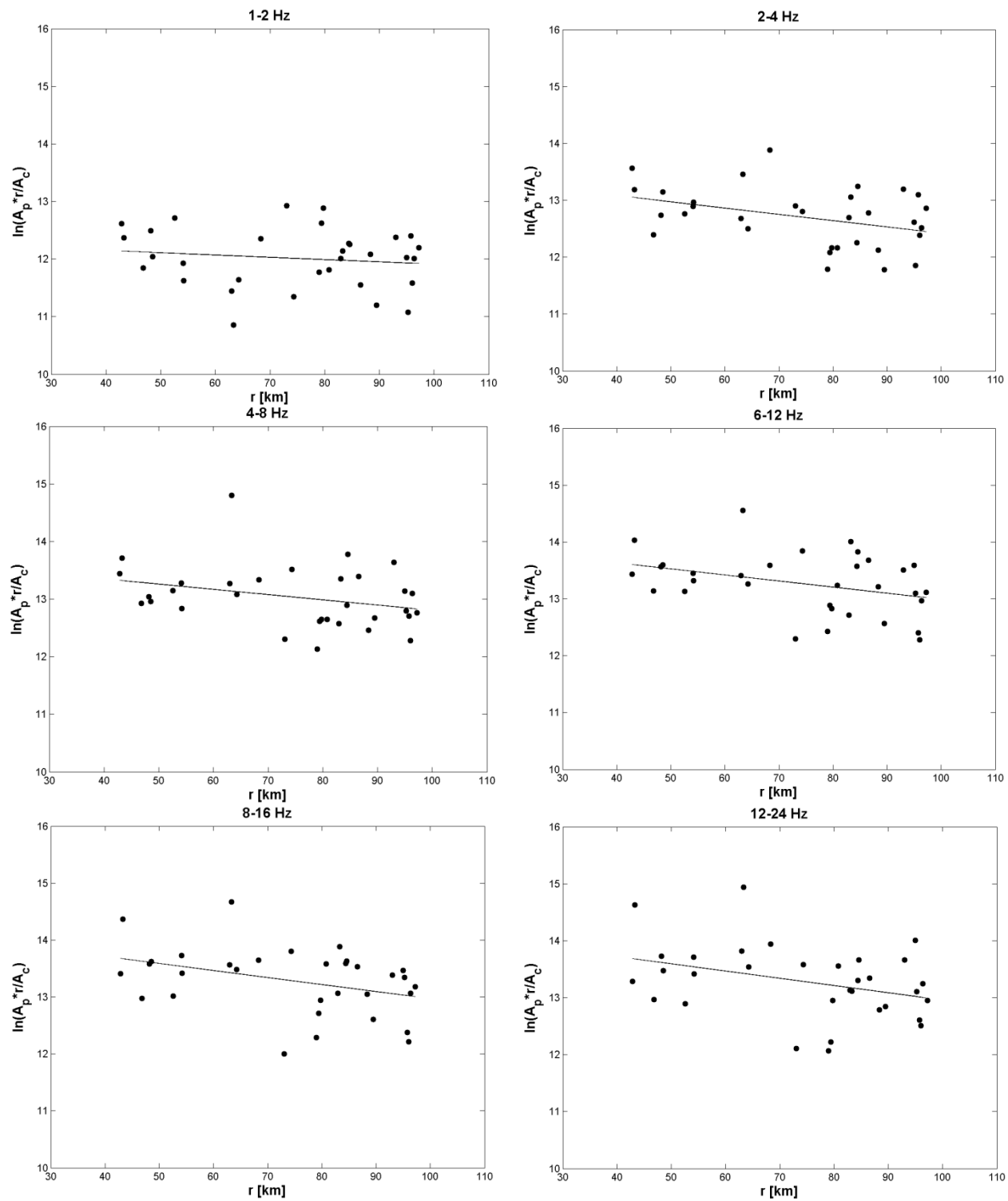
Slika A6. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za S-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Čačvina (CACV).



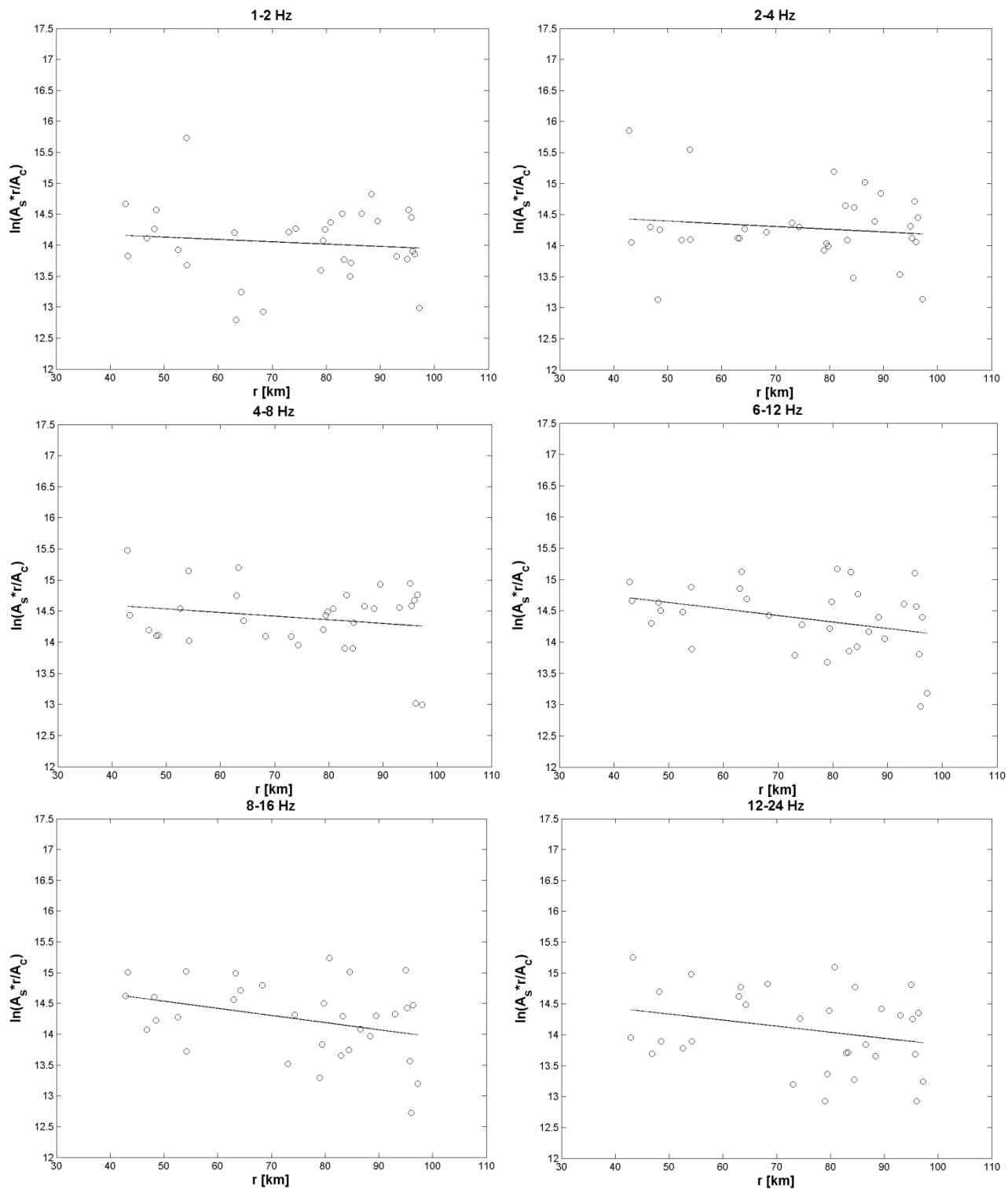
Slika A7. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za P-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Kijevo (KIJV).



Slika A8. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za S-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Kijevo (KIJV).



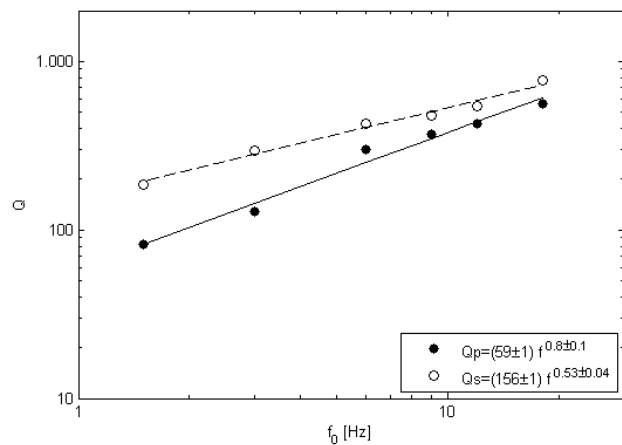
Slika A9. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za P-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Udbina (UDBI).



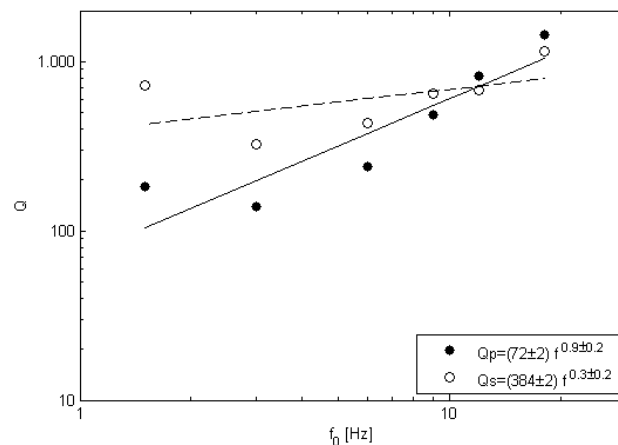
Slika A10. Normirane vršne amplitude u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti za S-valove za šest središnjih frekvencija na postaji Udbina (UDBI).

Prilog B

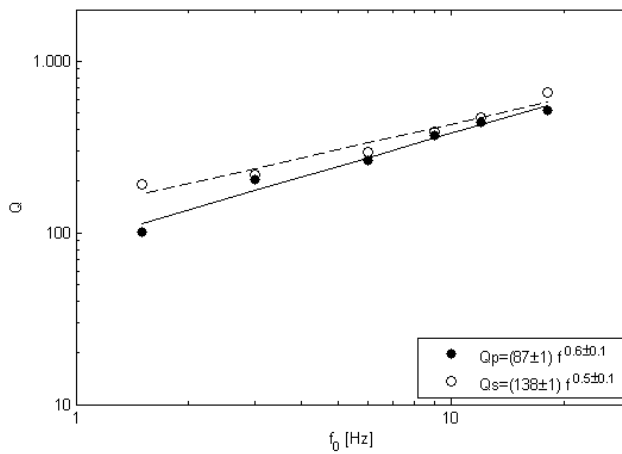
a)



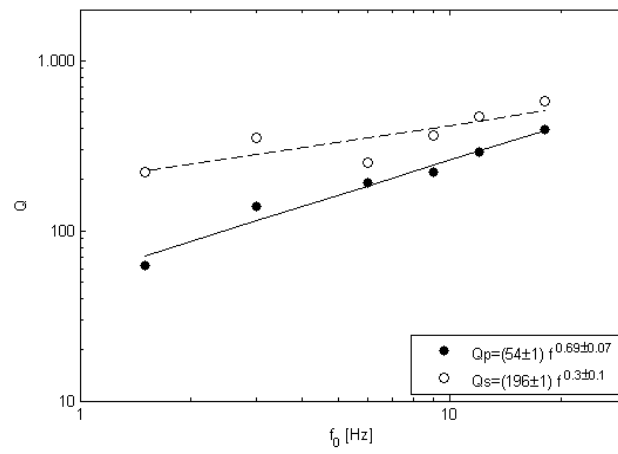
b)



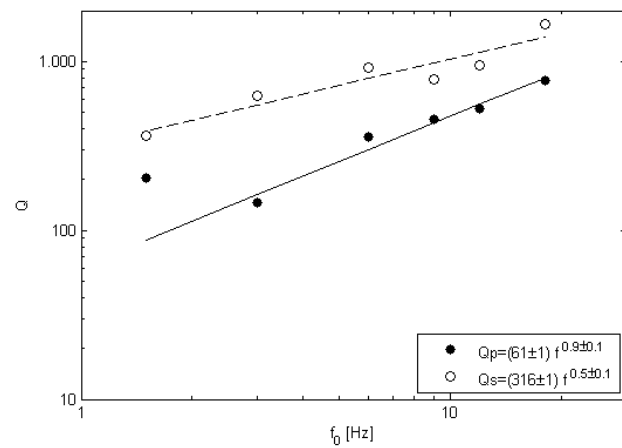
c)



d)



e)



Slika B1. Q_P i Q_S s pravcem prilagodbe $Q = Q_0 f^n$ za postaje: Ston (a), Dubrovnik (b), Čačvina (c), Kijevo (d) i Udbina (e).