

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Veronika Jerčić i Tomislav Andrić

**Određivanje intrinzične atenuacije i
atenuacije raspršenja S-valova u južnom
dijelu Vanjskih Dinarida**

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentorice prof. dr. sc. Davorke Herak i komentorice dr. sc. Ive Dasović i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

Popis kratica

MLTWA	metoda analize višestrukih vremenskih prozora
Q	faktor dobrote
Q_c	faktor dobrote koda valova
Q_i	faktor intrinzične atenuacije
Q_{sc}	faktor atenuacije raspršenja
Q_t	faktor ukupne atenuacije
Q_{ccxp}	očekivani Q^{-1} faktor
Q_{cobs}	mjereni Q^{-1} faktor za $t_L = 50$ s
Q_{Sobs}	mjereni Q^{-1} faktor
B_0	seizmički albedo
Le_{-1}	ukupna atenuacija
Le	udaljenost trnuća
η_i	koeficijent intrinzične atenuacije
η_i	koeficijent atenuacije raspršenja
E_c	teorijski dobivena energija
E_m	eksperimentalno dobivena energija
f_c	središnja frekvencija pojasnog filtra
v	brzina transverznog S-vala

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Teorijska pozadina	5
2.1	Atenuacija seizmičkih valova	5
2.2	Koda-valovi	7
2.3	Model višestrukog raspršenja	9
2.4	Teorijsko određivanje energije višestruko raspršenih valova	11
3	Metoda i analiza podataka	14
3.1	Podaci	14
3.2	Metoda analize višestrukih vremenskih prozora (MLTWA)	16
3.2.1	Teorijska gustoća energije potresa	17
3.2.2	Empirijska gustoća energije potresa	18
3.2.3	Procjena parametara B_0 i L_e^{-1}	20
3.2.4	Određivanje faktora atenuacije Q^{-1}	24
4	Rezultati i diskusija	26
5	Zaključci	35
	Zahvale	36
	Sažetak	42
	Summary	44
A	Dodatak	46

1 Uvod

Dinaridi su borano-navlačni pojas koji se pruža od Južnih Alpa na sjeverozapadu do Albanida i Helenida na jugoistoku (slika 1). Dinaridi i Alpe nastali su tijekom kompresijskih procesa kao posljedica migracije Jadranske mikroploče prema sjeveroistoku i njene kolizije s Europskom pločom. Glavno razdoblje nastajanja tog pojasa bilo je u paleogenu, s konačnim izdizanjem u oligocenu i miocenu. Dinaride općenito dijelimo na Vanjske ili Krške i Unutarnje Dinaride. Uglavnom se sastoje od stijena nekadašnje Jadranske karbonatne platforme među kojima dominiraju vapnenci, dolomiti i breče, te zatim karbonati, klastiti i fliš (Dasović (2015) i tamo navedene reference). Vanjski Dinaridi nastali su deformacijom sjeveroistočnog dijela Jadranske mikroploče. U tom području dominira sustav reversnih rasjeda dinarskog smjera pružanja u kombinaciji s rasjedima s pomakom po pružanju.

Dinaridi su seizmički umjereno aktivni s učestalom pojavom slabih potresa i povremenom pojavom snažnih. Potresi su uglavnom plitki, te ih većina ima žarište smješteno u gornjoj kori. Područje izražene seizmičke aktivnosti u južnom djelu Vanjskih Dinarida proteže se od Dinare prema jugu do Crne Gore. U toj jugoistočnoj domeni Dinarida zbio se najveći broj potresa u razdoblju 2006 – 2015 (Ivančić i sur., 2018). Na teritoriju Republike Hrvatske područje južnih Vanjskih Dinarida je područje s najizraženijim seizmičkim hazardom (Herak i sur., 2011). Posebno treba istaknuti potrese kod Dubrovnika 1667. godine intenziteta IX° EMS i posljednji jaki potres u tom djelu koji se dogodio 5. rujna 1996. godine u blizini Slanog kraj Stona, magnitude 6.0 i intenziteta I_0 =VIII° MCS. Svakako treba spomenuti i potres u podmorju Crne Gore magnitude 7.1 koji se dogodio 15. travnja 1979. (Dasović, 2015 i tamo navedene reference).

Proučavanje rasprostiranja i atenuacije visokofrekventnih S-valova u Zemljinoj kori od velikog je značaja za seizmologiju i građevinarstvo. Dobro poznavanje svojstava sredstva i atenuacije omogućuje kvalitetnu procjenu seizmičkog hazarda i paramete-

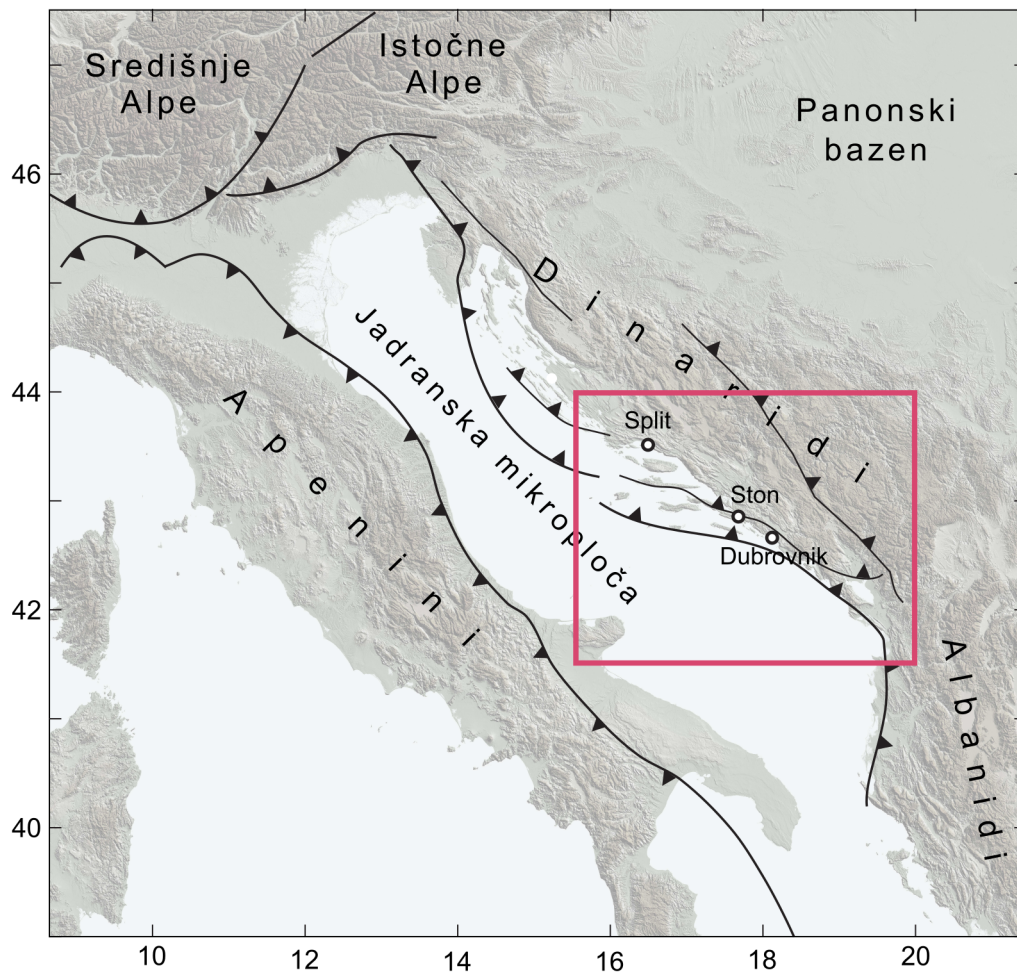
tara izvora potresa.

Kad bi Zemlja bila idealno elastično tijelo, tada bi geometrijsko rasprostiranje te refleksija i transmisija energije na graničnim plohama u potpunosti kontrolirali amplitudu seizmičkog pulsa, a seizmički valovi bi se beskonačno prostirali istom amplitudom. Međutim, stvarna Zemlja nije idealno elastična te amplitude valova s vremenom trnu zbog različitih procesa gubitka energije. Procese koji „kradu” energiju te zbog kojih se amplituda valova smanjuje zajednički zovemo atenuacijom. Energija se gubi zbog elastičkih i neelastičkih procesa. Pod seizmičkom atenuacijom uglavnom podrazumijevamo sve procese osim geometrijskog rasprostiranja. Atenuaciju opisujemo inverzom faktora dobrote Q^{-1} koji opisuje gubitak energije tijekom jedne oscilacije. Ukupni faktor dobrote kombinacija je utjecaja raspršenja i unutarnjih procesa. Atenuacija zbog neelastičnih procesa, tzv. intrinzična atenuacija, opisana je faktorom Q_i^{-1} , a uzrokovana je samom neelastičnošću sredstva, a ovisi i o viskoznim procesima unutar pornih fluida i međudjelovanju fluida i stijena. Atenuacija raspršenja opisana je faktorom Q_{sc}^{-1} , a ovisi o prostornoj strukturi nehomogenosti u promatranom sredstvu (Akinci i Eyidoğan, 2000). Ona ne predstavlja stvarni gubitak energije, nego njezinu preraspodjelu.

Na području Hrvatske, odnosno Dinarida, provedeno je nekoliko istraživanja seizmičke atenuacije visokofrekventnih valova potresa: Herak (1991a), Herak (1991b), Dasović i sur. (2012), Dasović i sur. (2013), Dasović (2015), Namjesnik (2016) i Majstorović i sur. (2017). Rezultati istraživanja pokazali su da je atenuacija na području Dinarida snažna, što upućuje na vrlo heterogenu litosferu. Također, rezultati su pokazali jaku ovisnost Q -faktora koda-valova i izravnih prostornih valova o frekvenciji i o proteklom vremenu.

Cilj ovoga rada jest određivanje doprinosa atenuacije raspršenja i intrinzične atenuacije u južnom djelu Vanjskih Dinarida, području s najvećim seizmičkim hazardom, primjenom metode analize višestrukih vremenskih prozora (engl. *Multiple*

Lapse Time Window Analysis; MLTWA). Temelji se na prilagodbi teorijskih krivulja energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti empirijskim vrijednostima energije iz seizmograma lokalnih potresa izračunatih za tri uzastopna vremenska prozora. Primjenili smo je uz pretpostavke višestrukog izotropnog raspršenja primjenom teorije prijenosa zračenjem i uniformne raspodjele raspršivača u sredstvu za model homogenog poluprostora. Pomoću dva parametra atenuacije, ukupne atenuacije L_e^{-1} i seizmičkog albeda B_0 , procijenjene su vrijednosti Q_{sc}^{-1} , Q_i^{-1} , Q_t^{-1} i Q_{cexp}^{-1} za središnje frekvencije od 1.5 Hz i 16 Hz za potrese zapisane na četiri seizmološke postaje smještene na području južnih Vanjskih Dinarida. Rezultati su uspoređeni s rezultatima bliskih područja: središnji dio (Majstorović i sur., 2017) i sjeverni dio (Namjesnik, 2016) Vanjskih Dinarida te s rezultatima drugih regija.



Slika 1: Skica regionalnih seizmotektonskih odnosa u široj regiji. Crveni pravokutnik omeđuje istraživano područje južnih Vanjskih Dinarida.

2 Teorijska pozadina

2.1 Atenuacija seizmičkih valova

Lateralno heterogeni modeli opisuju realnu Zemlju, odnosno temelje se na pretpostavci da Zemlja nije idealno elastično, homogeno i izotropno sredstvo te amplitude valova s vremenom trnu zbog različitih procesa gubitka energije. 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).

Različiti mehanizmi pretvaraju mehaničku energiju u toplinu zbog unutarnjeg trenja i viskoznosti. Proces atenuacije opisujemo faktorom dobrote Q koji je definiran na sljedeći način:

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

gdje je Q definiran gubitkom energije sustava (ΔE) unutar jednog perioda, a E je ukupna energija sustava. Za amplitudu osciliranja tada imamo:

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

te uvrštavanjem $x = vt$ te $\omega_0 = 2\pi f$ dobijemo:

$$A(x) = A_0 e^{-\frac{\pi f}{vQ} x}. \quad (3)$$

Kao što vidimo iz izraza (3) val sa višom frekvencijom trne brže, jer napravi više oscilacija u istom vremenu nego niskofrekventni val. Istraživanja su pokazala da Q raste s frekvencijom (Abdelwahed i Abdel-Fattah, 2015; Akinci i Eyidoğan, 2000) te da je funkcija dubine i gustoće materijala.

Intrinzična atenuaciju koja je opisana faktorom dobrote Q_i^{-1} velikim djelom ovisi o razlomljenosti stijena i njihovoj zapunjenosti fluidima. Na broj mikropukotina

utjecat će promjene u tlaku – povećanjem tlaka smanjuju se otvori pukotina i njihov broj te se time smanjuje i atenuacija. Na intrinzičnu atenuaciju još utječu: dubina, veličina i oblik pukotina te vrsta i količini fluida koji ih ispunjavaju. Mehanizmi atenuacije mogu se podijeliti u nekoliko kategorija (Dasović, 2015 i tamo navedene reference):

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

Detaljniji opis mehanizama atenuacije možete pronaći u Sato i sur. (2012) ili Dasović (2015).

Atenuacija zbog raspršenja opisana je faktorom dobrote Q_{sc}^{-1} (engl. *scattering*). Kod atenuacije raspršenja ne dolazi do stvarnog gubitka energije nego preraspodjele energije (refleksijom, refrakcijom, transmisijom) na nehomogenostima u mediju. U Zemljinoj kori imamo heterogenosti različitih dimenzija – rasjede, pukotine, intruzije, različite nepravilnosti nepravilnosti. Ova vrsta atenuacije ovisi o fluktuacijama brzina seizmičkih valova, fluktuacijama gustoće stijena te o prostornoj raspodjeli raspršivača u sredstvu. Raspršenje seizmičkih valova na heterogenostima generira koda-valove (P-kodu, S-kodu, Lg-kodu). Gledajući parametre

$ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$ i $\frac{L}{a}$, gdje je λ valna duljina, k valni broj, a duljina nehomogenosti (udaljenost korelacije), a L linearna dimenzija nehomogenog područja, efekte raspršenja klasificiramo u nekoliko režima:

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

U ovom radu su nam od interesa utjecaji raspršenja energije valova pod velikim kutom (kad su valne duljine nešto manje ili usporedive s dimenzijom heterogenosti) koje najviše pridonosi pojavi atenuacije i nastanku koda-valova. Raspon središnjih frekvencija koje koristimo u ovom radu je od 1.5 Hz do 16 Hz. Transverzalni S-val (brzine 3.48 km/s u kori) će za te središnje frekvencije imati valnu duljinu od 175 m do 2.3 km, što nam govori o dimenziji heterogenosti koju promatramo.

2.2 Koda-valovi

Budući da je Zemlja heterogeno tijelo koje nije savršeno elastično, doći će do pojave raspršenja seizmičkih valova koji će biti zabilježeni na seizmogramu potresa. Nakon što prođu svi izravni, reflektirani i refraktirani valovi slijede karakteristični valovi

koji se jako dobro uočavaju na samom kraju seizmograma i koje nazivamo koda-valovima. Javljaju se u obliku "repa" uočljivog na lokalnim seizmogramima, a koji je rezultat interakcije seizmičkih valova s heterogenostima u Zemljinoj kori. Valovi kode toliko su kompleksni da ih se ne može analizirati pretpostavljajući ravne valove koji su prošli izravnom putanjom iz žarišta. Koda-valovi imaju amplitudu čija vrijednost ne ovisi o udaljenosti od izvora, već pokazuje eksponencijalni pad u vremenu neovisno o položaju prijammnika u odnosu na žarište potresa. Proučavanje kode vrlo je važno jer može dati mnogo informacija o kori u kojoj je nastala. Oblik kode ovisi o sredstvu kroz koje su valovi putovali koje uzrokuje intrinzičnu apsorpciju i raspršenje. U proučavanju kode primjenjuju se statističke metode jer pretpostavljamo da je koda rezultat niza slučajnih procesa. Taj pristup nam donekle i olakšava analizu jer je kodu, tj. uzrok njenog nastanka, moguće opisati malim brojem statističkih parametara. Prema tome, rezultati koje dobijemo opisuju usrednjena svojstva sredstva. Analizom koda-valova određujemo atenuaciju valova, tj. određujemo ukupan faktor dobrote Q_c . Ukupan faktor ovisi o faktoru dobrote koji opisuje intrinzičnu atenuaciju Q_i i faktoru dobrote koji opisuje atenuaciju zbog raspršenja Q_{sc} kao

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_{sc}}. \quad (4)$$

U nastojanjima da se koda što bolje opiše tijekom povijesti razvilo se nekoliko modela koji opisuju koda-valova više ili manje dobro ovisno i o tome koji dio kode razmatramo. To su: model jednostrukog (povratno) raspršenja unatrag, izotropno (povratno) raspršenje, višestruko raspršenje, teorija difuzije i model toka energije, te ćemo kroz nastavak ovog rada dati detaljniji opis modela višestrukog raspršenja kojeg obrađujemo metodom MLTWA koja se temelji na spomenutom modelu.

2.3 Model višestrukog raspršenja

Aki (1969), Aki i Chouet (1975) i Sato (1977) u svojim istraživanjima pretpostavili su da je Zemlja nehomogeno sredstvo. Aki i Chouet (1975) razvili su jednostavni teorijski model – model jednostrukog raspršenja unatrag: najjednostavniji i najprihvaćeniji model generiranja koda-valova. Model pretpostavlja da ne postoji sekundarno raspršenje odnosno da vrijedi Bornova aproksimacija te ne dolazi do stvaranja druge generacije valova kad val naiđe na heterogenost. Temelji se na pretpostavkama da je udaljenost između izvora i prijemnika zanemariva. Nedostatak ovog modela je zanemarivanje raspršenja višeg reda. Raspršenje drugog, trećeg i viših redova imat će veći doprinos nego jednostruko raspršenje kako se povećava vrijeme od nastanka potresa. Najbolji pristup za modeliranje koji uključuje efekte višestrukog raspršenja daje teorija prijenosa zračenjem u seizmologiji (engl. *radiative transfer theory*). Ona ne uzima u obzir difrakciju i interferenciju valova te izravno opisuje procese prijenosa energije. S obzirom na to da teorija nema osnovu u valnoj jednadžbi, u ovom pristupu pojavljuju se jedino energija ili intenzitet, što bitno pojednostavljuje matematički pristup.

Hoshiaba (1991) te Fehler i sur. (1992) korištenjem su rješenja za model višestrukog izotropnog raspršenja razvili metodu analize pomoću višestrukih vremenskih prozora, tzv. metodu MLTWA, za istovremeno računanje relativnog intrinzičnog doprinosa i doprinosa raspršenja sredstva ukupnoj atenuaciji.

Wu (1985) predstavlja metodu kojom određuje raspodjelu energije koda-valova u ovisnosti o udaljenosti od izvora dobijajući pri tome krivulje koje opisuju tu ovisnost. Wuova metoda temelji se na već spomenutoj teoriji radijacijskog prijenosa energije, uz pretpostavku o litosferi kao homogenom poluprostoru s izotropnom i uniformnom raspodjelom raspršivača. Prvi put su u račun energije uzeti u obzir i višestruko raspršeni valovi, što je predstavljalo veliki korak naprijed u modeliranju kode. Wu je uzeo slučaj stacionarnog izvora razmatrajući kontinuirano zračenje

energije i zanemarujući njegovu vremensku ovisnost i konačno trajanje. Iako je takav model predstavljao značajan pomak naprijed i dalje je imao nedostatke. Glavni nedostatak je bio u tome što se u praksi nije moglo integrirati energiju u prozoru beskonačne nego konačne duljine. Na taj način je općenito dolazilo do podcijenjivanja rezultata jer je energija izvan prozora integracije znala biti značajna, posebno u slučajima jakog raspršenja.

Relativna jakost raspršenja i intrinzične atenuacije utječu na razdiobu gustoće energije, stoga su krivulje koje su predstavljale tu ovisnost energije o udaljenosti kroz sredstvo od izvora, bile određene s dva parametra, B_0 i L_e^{-1} , definirani upravo kako bi kvantificirali učinke raspršenja i intrinzične atenuacije.

Seizmički albedo B_0 predstavlja omjer atenuacije raspršenja i ukupne atenuacija, a L_e je duljina srednjeg slobodnog puta. Vrijednosti seizmičkog albeda kreću se u rasponu od 0 do 1: ako je B_0 bliže vrijednosti 1, atenuacija raspršenja približno je jednaka ukupnoj atenuaciji te je ta koja ima dominantan utjecaj nad intrinzičnom atenuacijom u takvom sredstvu. Suprotno tome, što je albedo bliže 0 sredstvo je homogenije i atenuacija raspršenja je to manja u odnosu na ukupnu atenuaciju tj. na intrinzičnu atenuaciju. Stoga, ako je $B_0 < 0.5$ intrinzična atenuacija je dominantan uzrok gubitka energije valova, dok je za $B_0 > 0.5$ raspršenje dominantno. Drugi parametar kojim kvantificiramo učinke atenuacije jest duljina srednjeg slobodnog puta L_e , tj. udaljenost (u kilometrima) na kojoj se energija S-vala smanji za faktor e (Mukhopadhyay i sur., 2014) i tamo navedene reference). Seizmički albedo i ukupna atenuacija definirani su kao

$$B_0 = \frac{Q_{sc}^{-1}}{Q_t^{-1}} = \frac{Q_{sc}^{-1}}{Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1}}, \quad (5)$$

$$L_e^{-1} = (Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1}) \cdot \frac{2\pi f}{v} = \frac{Q_t^{-1}\omega}{v}, \quad (6)$$

gdje su Q_i , Q_{sc} i Q_t faktori dobrote intrinzične atenuacije, te atenuacije raspršenja

i totalne atenuacije, ω je kutna frekvencija, f je frekvencija i v je brzina S-vala. Kad je seizmički albedo malen krivulje logaritma gustoće energije skoro su pa linearno ovisne o udaljenosti, te im je amplituda mala u usporedbi s krivuljama određjenim za slučaj kad je raspršenje značajno. Mali seizmički albedo znači da je energija kode mala. Usporedbom teorijski izračunate energije i empirijski određene energije iz seizmograma potresa određuju se parametri atenuacije. Razmatranjem seizmograma, na taj način moguće je procijeniti kolika je energija izravnih valova, a kolika raspršenih.

2.4 Teorijsko određivanje energije višestruko raspršenih valova

Promatramo akustične valove i njihovo rasprostiranje kroz trodimenzionalno elastično sredstvo u kojem je brzina valova konstantna. Kako bi se odredio izraz za energiju višestruko raspršenih valova razmatraju se nasumično raspoređeni raspršivači u homogenom poluprostoru. Energija raspršenih valova u tom je slučaju dana s

$$E(\vec{r}, t) = E_{in}\left(\vec{r}_0, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{v}\right) + \sum_{\vec{r}_1 \neq \vec{r}} E_s\left(\vec{r}_1, \vec{r}, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{v}\right). \quad (7)$$

Prvi član s desne strane (7) predstavlja energiju upadnog, neraspršenog vala na prijammniku u položaju \vec{r} , a drugi član je suma doprinosa energija raspršenih valova nastalih na svim mogućim raspršivačima u položaju \vec{r}_1 u odnosu na prijammnik u \vec{r} . Razmatrali se izotropno sredstvo s uniformnom raspodjelom raspršivača gustoće n_0 , dolazi se do izraza za energiju upadnog vala E_{in} i također do izraza za energiju sume raspršenih valova E_s . Uvrštavanjem tih izraza u jednadžbu (7), dolazi se do još jednog oblika izraza energije raspršenih valova:

$$E(\vec{r}, t) = E_{in} \left(t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|}{v} \right) \frac{e^{-\eta|\vec{r} - \vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} + \int_V \eta_s E \left(\vec{r}_1, t - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}|}{v} \right) \frac{e^{-\eta|\vec{r}_1 - \vec{r}|}}{4\pi|\vec{r}_1 - \vec{r}|^2} dV_1, \quad (8)$$

gdje je $\eta = \eta_s + \eta_i$, η_s je koeficijent raspršenja ($\eta_s = n_0\sigma$), a η_i je koeficijent apsorpcije, uz σ kao oznaka za udarni presjek raspršivača.

Prema Zeng (1991), izraz za energiju raspršenih valova n -tog reda je

$$E_n(0, t) = (\eta_s vt)^{n-3} \eta_s^3 B_n \frac{E_0}{2\pi} e^{-\eta vt} \quad (9)$$

gdje je E_0 ukupna energija upadnog vala (tj. energija vala u $t = 0$), a B_n je koeficijent koji se dobije iz izraza (8) uz $\vec{r} = 0$. Koeficijenti B_n ne mogu se analitički odrediti iz izraza (8), dok je numeričko računanje također poprilično komplicirano. Zbog tog se pristupilo razvijanju aproksimativnih rješenja (za detalje vidi Namjesnik, 2016)

Zeng (1991) je pokazao da model jednostrukog raspršenja sa slabim raspršenjem dobro aproksimira egzaktnu rezultate energije raspršenih valova početnog dijela kode. U slučaju jakog raspršenja, koje se javlja u kasnijim dijelovima kode, difuzijski model je taj koji daje dobru aproksimaciju egzaktnih podataka. Zbog toga je osmišljen model u kojem je početni dio kode aproksimiran izrazom za direktne i jednostruko raspršene valove, a ostatak energije višestruko raspršenih valova u prostoru i vremenu je aproksimiran difuzijskim modelom. Polje energije difuzijskim modelom dobije se tako da se difuzijsko rješenje pomnoži Heavisideovom funkcijom $H(t - r/v)$:

$$cH \left(t - \frac{r}{v} \right) \left(\frac{3\eta_s}{4\pi vt} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{3\eta_s r^2}{4vt} - \eta_i vt \right). \quad (10)$$

Faktor c je rezultat izjednačavanja ukupne difuzijske energije s preostalom energijom višestruko raspršenih valova za raspršenje reda $n > 2$. Ukupna difuzijska energija dana je s

$$\begin{aligned}
& \int_0^{vt} cH\left(t - \frac{r}{v}\right) \left(\frac{3\eta_s}{4\pi vt}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{3\eta_s r^2}{4vt} - \eta_i vt\right) 4\pi r^2 dr \\
& = ce^{-\eta_i vt} \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{3\eta_s vt}/2} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha\right),
\end{aligned} \tag{11}$$

dok je ostatak energije višestruko raspršenih valova dobiven kao

$$\begin{aligned}
E_0 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(\eta_s vt)^n}{n!} e^{-\eta_s vt} &= E_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta_s vt)^n}{n!} e^{-\eta_s vt} - E_0(1 + \eta_s vt)e^{-\eta_s vt} \\
&= E_0[1 - (1 + \eta_s vt)e^{-\eta_s vt}]e^{-\eta_i vt}.
\end{aligned} \tag{12}$$

Iz jednadžbi (11) i (12) konačno se dobije

$$c = E_0[1 - (1 + \eta_s vt)e^{-\eta_s vt}] / \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{3\eta_s vt}/2} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha\right). \tag{13}$$

Aproksimativno rješenje za energiju višestruko raspršenih valova, koje nazivamo hibridno rješenje jednostrukog raspršenja i difuzije, glasi

$$\begin{aligned}
E(r, t) &\cong E_0 e^{-\eta_i vt} \left[\frac{\delta(t - r/v)}{4\pi v r^2} + \frac{\eta_s H(t - r/v)}{4\pi r vt} \ln \frac{1 + r/(vt)}{1 - r/(vt)} \right] + \\
&+ cH\left(t - \frac{r}{v}\right) \left(\frac{3\eta_s}{4\pi vt}\right)^{3/2} e^{-\frac{3\eta_s r^2}{4vt} - \eta_i vt},
\end{aligned} \tag{14}$$

gdje je faktor c dan jednadžbom (13).

3 Metoda i analiza podataka

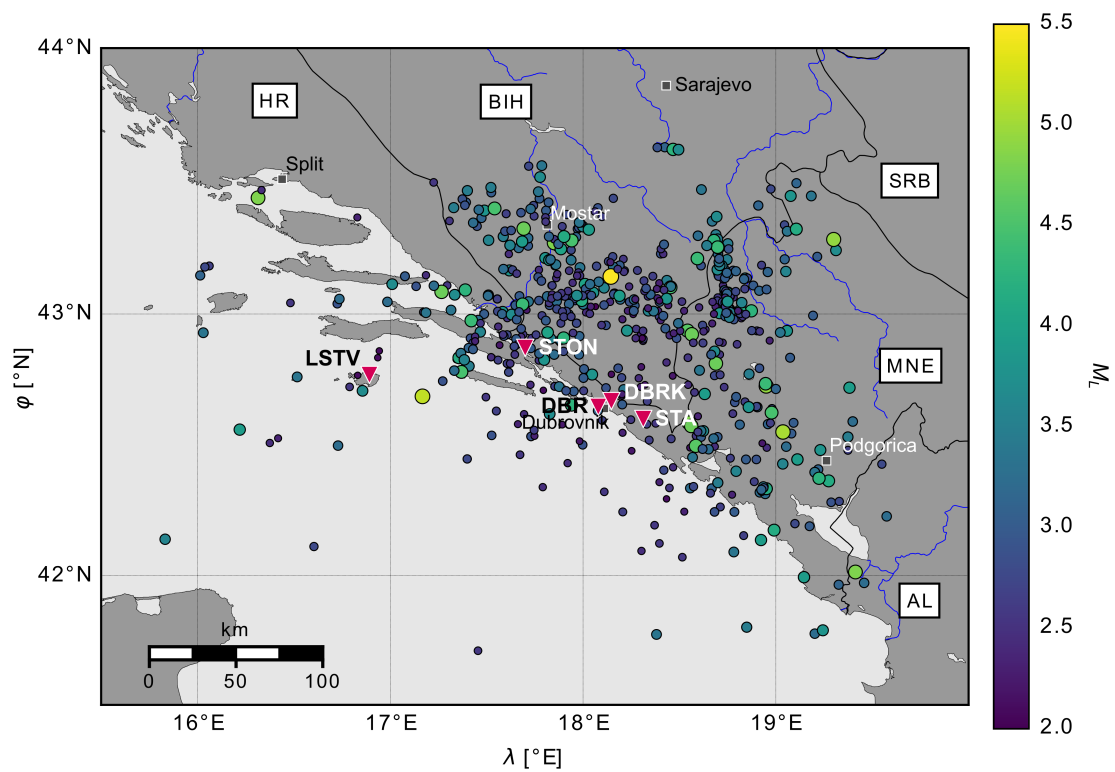
3.1 Podaci

Za potrebe određivanja intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja prostornih valova u južnom dijelu Vanjskih Dinarida (engl. *the southern part of the External Dinarides*, SED) korišteni su seizmogrami zabilježeni na postajama Dubrovnik (DBR i DBRK), Lastovo (LSTV), Stravča (STA) i Ston (STON) prikazanim na slici 2. Postaja Dubrovnik promijenila je tijekom svog rada lokaciju: postaja DBRK (radi od 2012. godine) nalazi se 6 km sjeveroistočno od položaja postaje DBR (2000. – 2011.) – u radu označena je jedinstvenom oznakom DBRK (?). Instrumenti pomoću kojih su prikupljeni korišteni podaci su širokopojsni trokomponentni seizmografi modela Güralp (Tablica 1).

Analizirani su lokalni potresi magnitude M_L veće od ili jednake dva, hipocentralnih udaljenosti između 20 i 90 km, te dubine žarišta do 30 km. Seizmogram potresa trebao je zadovoljiti vizualnu i kvantitativnu kontrolu kvalitete. Vizualna kontrola podrazumijeva uklanjanje onih potresa na kojima su uočeni preveliki šumovi i smetnje, te na kojima se uočavaju prethodni ili naknadni potresi. Ukupno je analizirano 1957 seizmograma za 784 potresa koji su se dogodili u razdoblju između siječnja 2001. i kraja prosinca 2016. godine. Potresi su analizirani u rasponu središnjih frekvencija od 1.5 do 16 Hz, a korištene frekvencije uzorkovanja f_s su 25, 50, 100 i 200 Hz ovisno o postaji i razdoblju.

Tablica 1: Postaje, njihove geografske koordinate, korišteni instrumenti, frekvencija uzorkovanja f_s , razdoblje tijekom kojeg imamo podatke o potresima i broj analiziranih seizmograma N .

Seizmološka postaja	φ [°N]	λ [°E]	Instrument	f_s [Hz]	Razdoblje	N
Dubrovnik (DBRK)	42.647325	18.078922	CMG-3T, CMG-3ESP, CMG-40TD	50, 100	2001. – 2016.	370
Lastovo (LSTV)	42.768552	16.891928	CMG-3ESPC, CMG-40TD	50, 100	2014. – 2016.	57
Stravča (STA)	42.600814	18.312441	CMG-40T	25, 50	2005. – 2016.	453
Ston (STON)	42.8716	17.6999	CMG-40T	50, 200	2003. – 2016.	1042



Slika 2: Karta epicentara korištenih potresa (kružići) i seizmoloških postaja (crveni trokutići) u južnom dijelu Vanjskih Dinarida.

3.2 Metoda analize višestrukih vremenskih prozora (MLTWA)

Glavni je cilj ovog istraživanja razdvojiti i kvantificirati utjecaj intrinzične atenuacije i atenuacije raspršenja temeljem razmatranja kode S-valova. Da bismo to postigli, primjenili smo metodu analize višestrukih vremenskih prozora, tzv. metodu MLTWA (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis*), koja računa gustoću energije u tri uzastopna konačna vremenska prozora od nailaska izravnog S-vala pomoću teorijskog modela višestrukog raspršenja i iz seizmograma potresa te ih uspoređuje. Ovu metodu razvili su Fehler i sur. (1992) integriravši gustoću energije duž tri uzastopna vremenska prozora definirana od 0 – 15 s, 15 – 30 s, 30 – 100 s u odnosu na nastupno vrijeme izravne S-faze. Temelj ovog pristupa je pretpostavka da prvi prozor, onakav kako smo ga definirali, sadrži uglavnom energiju izravnih S-valova, dok preostala dva prozora sadrže (svaki sve više) energije raspršenih valova. Općenito, apsorpcija ili intrinzična atenuacija smanjuje amplitude i direktnih i raspršenih valova, dok raspršenje smanjuje amplitudu direktnih valova, ali povećava amplitudu koda-valova.

Za razliku od raznih metoda koje su prethodile ovoj, metoda MLTWA uzima u obzir prostornu i vremensku distribuciju energije. Osnovne pretpostavke ove metode su (?):

- izvor potresa je točkasti impuls, karakteriziran sferno-simetričnim zračenjem skalarnih (akustičnih) valova
- sredstvo ima homogena svojstva apsorpcije i raspršenja
- valna brzina je konstantna u sredstvu
- raspršenje je izotropno
- konverzija valova raspršenjem (P- u S-valove i obrnuto) je odsutna

- raspršeni valovi su nekoherentni, tj. svojstvo aditivnosti je ispunjeno za intenzitete (prosječni kvadrati amplituda) raspršenih valova.

3.2.1 Teorijska gustoća energije potresa

Jednadžba prema kojoj smo računali jest aproksimativna teorijska energija raspršenih valova uz sferno rasprostiranje (?):

$$E(r, t) \cong E_0 e^{-L_e^{-1}vt} \left[\frac{\delta(t - r/v)}{4\pi v r^2} + \frac{B_0 \cdot L_e^{-1} H(t - r/v)}{4\pi r v t} \ln \frac{1 + r/(vt)}{1 - r/(vt)} \right] + c H\left(t - \frac{r}{v}\right) \left(\frac{3B_0 \cdot L_e^{-1}}{4\pi v t}\right)^{3/2} e^{-\frac{3B_0 \cdot L_e^{-1} r^2}{4vt} - (L_e^{-1} - B_0 \cdot L_e^{-1})vt} \quad (15)$$

$$c = E_0 [1 - (1 + B_0 \cdot L_e^{-1}vt) e^{-B_0 \cdot L_e^{-1}vt}] / \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{3B_0 \cdot L_e^{-1}vt/2}} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha \right),$$

gdje je E_0 ukupna energija upadnog vala, tj. energija u $t = 0$, $H(t)$ je Heavisideova funkcija, $\delta(t)$ je Diracova delta-funkcija, t je vrijeme putovanja vala, r je hipocentralna udaljenost i $\alpha = vt/r$. Dio izraza za varijablu c , u nazivniku može se napisati na praktičniji način (?):

$$\frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{3B_0 \cdot L_e^{-1}vt/2}} e^{-\alpha^2} \alpha^2 d\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}} P(u, x) \Gamma(u), \quad (16)$$

gdje je $P(u, x)$ nepotpuna gama-funkcija, $\Gamma(u)$ je gama-funkcija, $u = 1.5$ i $x = \sqrt{0.5 \sqrt{3B_0 \cdot L_e^{-1}vt}}$. Kako bismo odredili teorijske krivulje gustoće energije, integrirali smo za tri uzastopna vremenska prozora, 0 – 15 s, 15 – 30 s i 30 – 45 s, izraz (15) računajući od trenutka nailaska izravnog S-vala za atenuacijske parametre B_0 i L_e^{-1} u rasponima $0.05 \leq B_0 \leq 0.999$ i $0.002 \leq L_e^{-1} \leq 0.1$. Tako dobivene tri krivulje korigirali smo za gubitak energije izgubljene zbog geometrijskog rasprostiranja valova tako da smo izračunato pomnožili s faktorom $4\pi r^2$. Osim efekta rasprostiranja morali smo ukloniti i utjecaj izvora, te utjecaj instrumenta i lokalna

svojstva tla kroz koje se val rasprostire, zato smo primjenili metodu normiranja kodom. Računali smo energiju u dijelu kode integrirajući ovojnica uzevši vremenski prozor između 50 i 65 s. Korigirane integrale energije za tri vremenska prozora podjelili smo s energijom kode te logaritmirali. Na taj način smo dobili tri krivulje energije za različite kombinacije parametara B_0 i Le^{-1} ovisne o hipocentralnoj udaljenosti r .

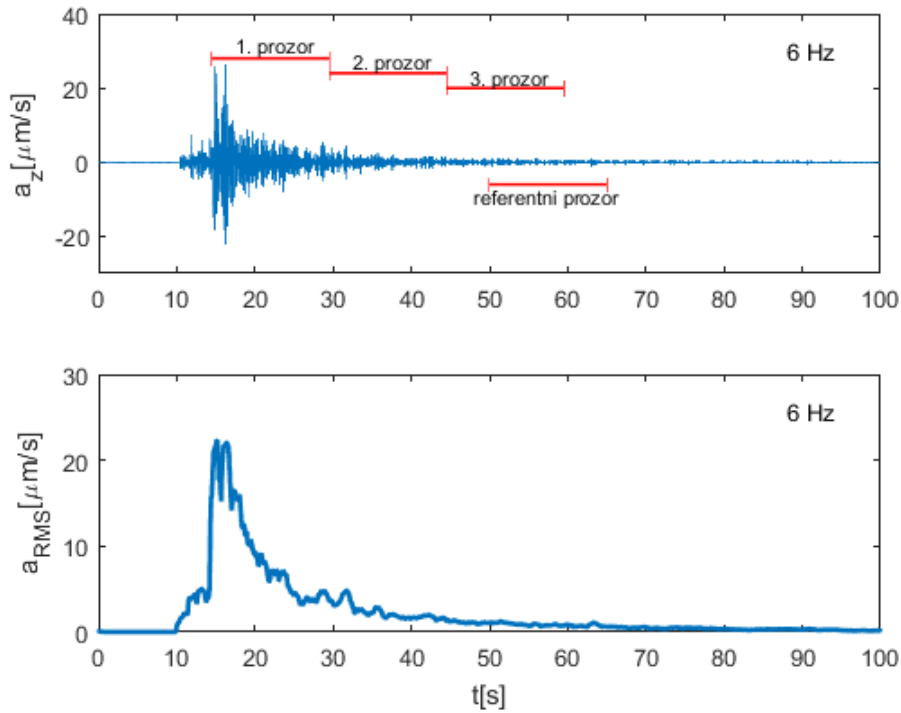
3.2.2 Empirijska gustoća energije potresa

Da bismo procijenili empirijsku gustoću energije, analizirali smo seizmogramе plitkih lokalnih potresa zabilježenih na četiri seizmološke postaje: STON, DBRK, STA i LSTV. Koristili smo potrese hipocentralne udaljenosti između 20 km i 90 km jer bi na većim udaljenostima utjecaj površinskih valova i reflektiranih faza mogao biti značajan što metoda MLTWA ne uzima u obzir (Aki i Chouet, 1975).

Koristili smo Butterworthov pojasno-propusni filter četvrtog reda kako bi filtrirali podatke seizmograma. Broj korištenih središnjih frekvencija bio je ograničen Nyquistovom frekvencijom, tako da smo podatke filtrirali za 11 središnjih frekvencija: 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14 i 16 Hz. Gornja i donja frekvencija pojasa određene su s $\frac{f_c}{\sqrt{2}}$ i $\sqrt{2}f_c$, kako bi frekvencijski pojasevi bili dovoljno uski, a raspršenja i apsorpcije sredstva neovisna o frekvenciji unutar svakog od njih. Nakon uklanjanja trenda određena je ovojnica seizmograma metodom RMS (engl. *root mean square*): spektralna amplituda je dobivena računanjem korijena sume kvadrata amplituda filtriranih podataka uz klizni vremenski prozor duljine 1 s. Radi dodatne procjene kvalitete podataka, provjerili smo odnos signala i šuma (komponente seizmograma) računajući njihov omjer (engl. *signal to noise ratio, SNR*), u ovisnosti o frekvenciji. Omjer signala i šuma morao je zadovoljiti kriterij da je veći ili jednak dva. Signal je određen kao srednja vrijednost zapisa spektralne amplitude duljine 15 s počevši od proteklog vremena $t = 50$ s, dok je nemir izračunat

kao srednja vrijednost zapisa spektralne amplitude duljine 5 s, koji prethodi P-fazi vala. Pokušali smo i s $SNR \geq 3$, no uočili smo da time više gubimo podatke nego što dobivamo na većoj točnosti. Ukupni broj seizmograma po postajama prikazan je u tablici 1.

Analizirana su tri uzastopna vremenska prozora duljine 15 s, počevši od nailaska S-faze vala, analogno prozorima korištenima za izračun teorijske energije (slika 3). Gustoća energija svakog prozora određena je integracijom, kako je računato, za svaku frekvenciju i svaki potres. Kao i kod teorijske energije, potrebno je ukloniti utjecaje različitih funkcija izvora i lokalne amplifikacije, što se postiže primjenom metode normiranja kodom (Aki, 1980) gustoća energije svakog prozora dijeli se s gustoćom energijom prozora normiranja, definiranim za proteklo vrijeme 50 – 65 s od nastanka potresa (slika 3). Na normiranja kodom primjenjena je korekcija za geometrijsko rasprostiranje sfernih valova množenjem s $4\pi r^2$.



Slika 3: Postupak obrade signala primjenjen na seizmogram lokalnog potresa zapisanog na postaji STON (17. listopada 2013. u 08:42:15 UTC, $M_L = 3.7$, $D = 8$ km). Na gornjoj slici prikazana je komponenta Z seizmograma filtrirana na $f_c = 6$ Hz, uz označena tri prozora integracije 0 – 15 s, 15 – 30 s, 30 – 45 s i referentni prozor kode 50 – 65 s. Na donjoj slici prikazana je ovojnica ukupnog polja brzina za središnju frekvenciju 6 Hz.

3.2.3 Procjena parametara B_0 i L_e^{-1}

Kako bi odredili parametre atenuacije B_0 i L_e^{-1} uspoređujemo empirijski određene gustoće energije sa seizmograma s teorijski izračunatim gustoćama energije. Tražimo takve parametre B_0 i L_e^{-1} za koje će funkcija odstupanja M (engl. *misfit function*) biti minimalna (Bianco i sur., 2002). Funkcija odstupanja definirana je

kao:

$$M(B_0, Le^{-1}) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^3 (E_{c_k}(r_i) - E_{m_k}(r_i))^2, \quad (17)$$

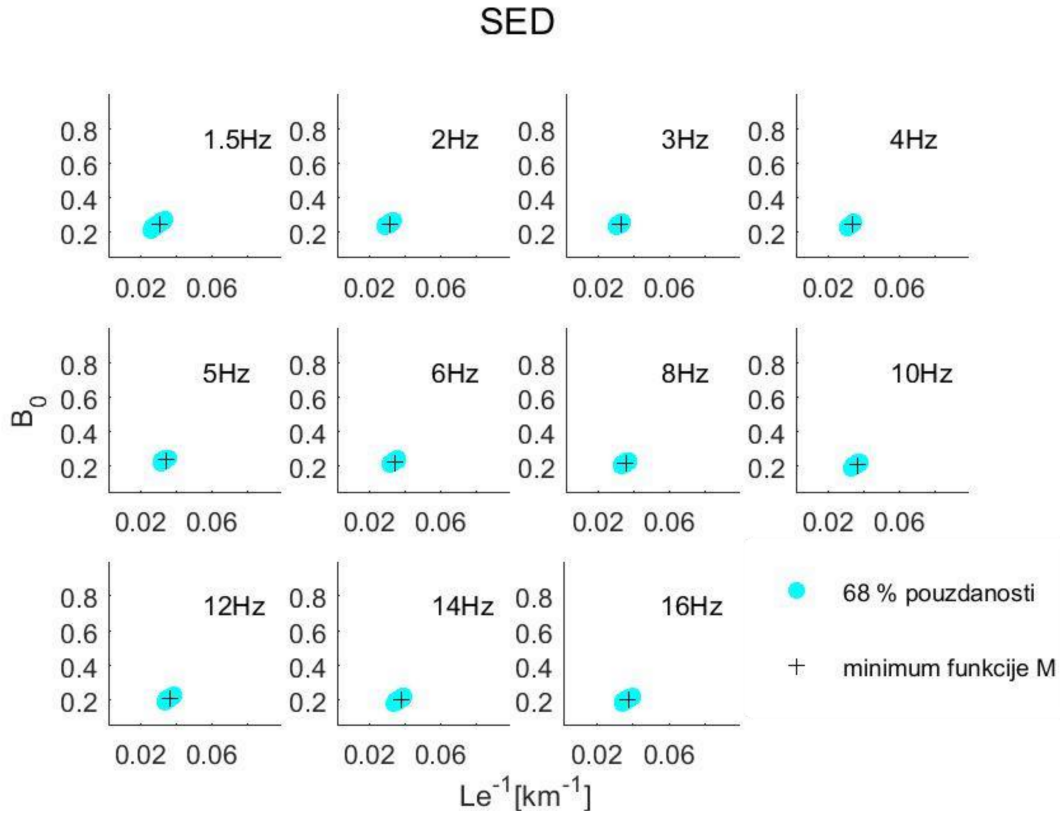
gdje k predstavlja indeks prozora energije, a N broj korištenih seizmograma. E_{c_k} su teorijske energije, a E_{m_k} su energije određene iz seizmograma. Minimum funkcije odstupanja tražen je na skupu parametara dimenzije $950 \cdot 99$, za parametre B_0 i Le^{-1} u rasponima $0.05 \leq B_0 \leq 0.999$ i $0.002 \leq Le^{-1} \leq 0.1$. Dobiveni par (B_0^*, Le^{-1*}) najbolje opisuje razdiobu empirijske gustoće energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti.

U ovom smo radu odredili parametre atenuacije B_0^* i Le^{-1*} za svaku od postaja zasebno (DBRK, LSTV, STA i STON), te također za cjelokupno područje južnih Vanjskih Dinarida tako da smo razmatrali skup svih analiziranih seizmograma kao cjelinu.

Slijedeći Mayeda i sur. (1992), 68%-tno područje pozdnanosti za parametre B_0 i Le^{-1} definirano je nejednakošću

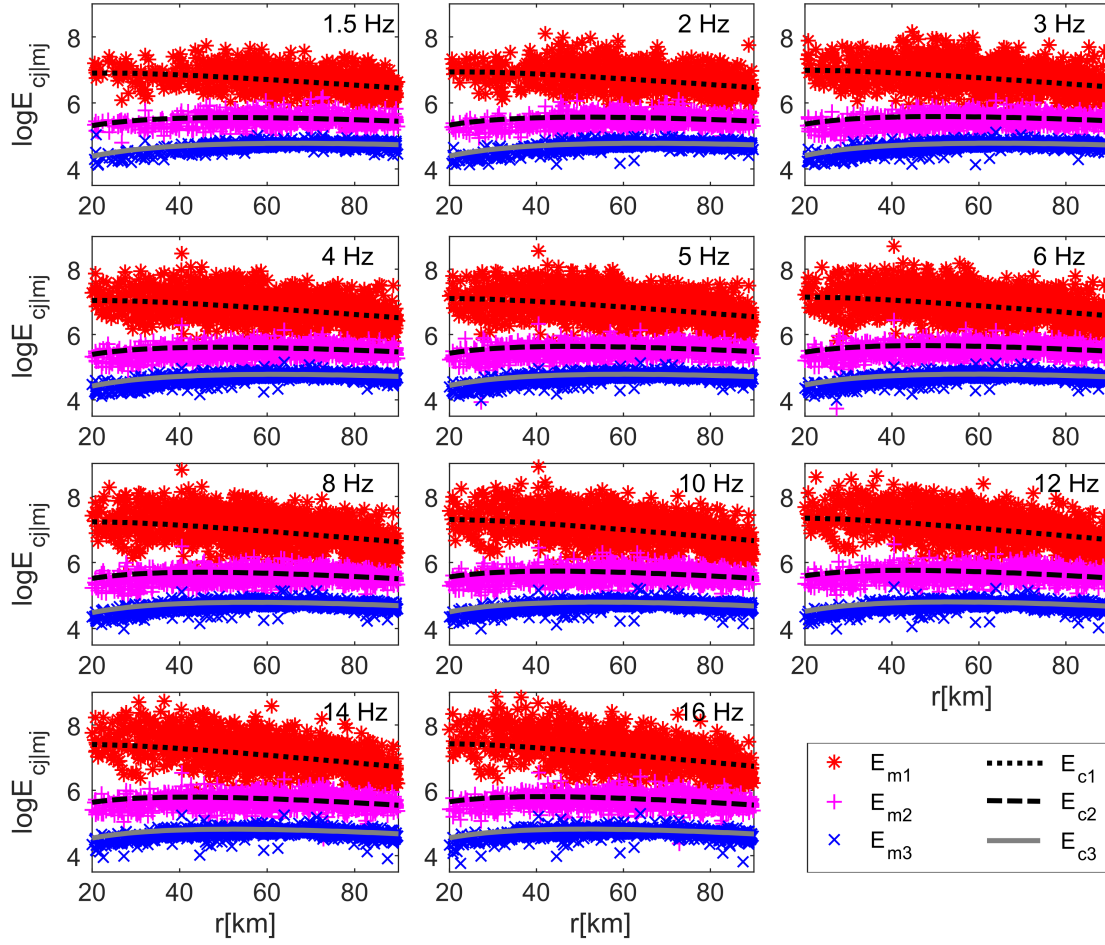
$$F \left(\frac{M(B_0, Le^{-1})}{B_0^*, Le^{-1*}}, N - 2, N - 2 \right) \leq 0.68, \quad (18)$$

gdje je F Fischerova razdioba, N broj seizmograma, a 2 broj variranih parametara. Slika 4 pokazuje 68%-tno područje pozdnanosti za SED. Možemo vidjeti da dobiveni par (B_0^*, Le^{-1*}) ne ovisi puno o frekvenciji, posebno kad je ona veća od 1.5 Hz što je u skladu s ranijim rezultatima (npr. Bianco i sur. (2002)).



Slika 4: Prikaz područja 68 % pouzdanosti za B_0^* i Le^{-1*} (cijan područje, računato koristeći pretpostavke F-distribucije) te različite središnje frekvencije. Parovi B_0^* i Le^{-1*} , koji odgovaraju minimumu funkcije odstupanja označeni su s crnim križićem. Rezultati su za cijelo područje SED.

Krivulje teorijskih gustoća energija koje predstavljaju najbolju prilagodbu mjerenim energijama seizmograma potresa zabilježenih razmatranim zajedno za sve postaje (za cijelo područje SED), izračunate za par (B_0^*, Le^{-1*}) koji odgovara minimumu funkcije M , prikazane su na slici 5 zajedno s mjerenim energijama za sve središnje frekvencije.



Slika 5: Prikaz logaritma normiranih empirijskih gustoća energija ($E_{m,1,2,3}$) uz primjenjenu korekciju zbog geometrijskog rasprostiranja za tri vremenska prozora: 0 – 15 s (*), 15 – 30 s (+), 30 – 45 s (×) u odnosu na hipocentralnu udaljenost r za središnje frekvencije naznačene na svakom pojedinom grafu. Siva i crne linije predstavljaju krivulju logaritma normirane teorijske gustoće energije uz korekciju zbog geometrijskog rasprostiranja za (B_0^*, Le^{-1*}) : točkasta crta označava prvi prozor, isprekidana linija označava drugi prozor i puna crta označava treći prozor. Prikazani su rezultati za cijelo područje SED (mjerjenja sa svih seizmoloških postaja razmatrana zajedno).

Može se uočiti da je u prvom vremenskom prozoru (0 – 15 s) raspodjela izmjerene energije nešto manje pravilna, odnosno raspršenje podataka je veće, nego u drugom i trećem prozoru. Taj efekt uočen je i u brojnim drugim istraživanjima na raznim područjima, što se obično pripisuje razlikama u prostornoj razdiobi intenziteta zračenja pojedinih potresa. Primjena metode normiranja kodom uklanja samo utjecaje razlika jakosti izvora, ne i razlike u razdiobi intenziteta zračenja (Şahin i sur. (2007) i tamo navedene reference), što posebno velik utjecaj ima na izravne S-valove sadržane u prvom prozoru. Kasniji nailasci koda-valova, čija je energija sadržana djelom u drugom i pogotovo u trećem prozoru, sadrže utjecaj većeg volumena sredstva i raspršenja na velikom broju raspršivača, čime se poništava utjecaj razdiobe intenziteta zračenja, odnosno mehanizma potresa.

3.2.4 Određivanje faktora atenuacije Q^{-1}

Prethodni koraci u metodi MLTWA omogućili su procjenu vrijednosti parova koeficijenta seizmičkog albeda B_0^* i ukupne atenuacije Le^{-1*} koji odgovaraju minimumu funkcije M prema jednadžbi (18). Dobiveni parovi (za svaki od 11 frekvencijskih pojasa) koriste se za određivanje Q-faktora intrinzične atenuacije Q_i^{-1} te atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} . Faktor dobrote ukupne atenuacije Q_t^{-1} predstavlja zbroj dobivenih Q_i^{-1} i Q_{sc}^{-1} , odnosno ukupnu atenuaciju S-valova. Vrijednosti su dobivene iz jednadžbi preuzetih iz rada Abdelwahed i Abdel-Fattah (2015):

$$Q_{sc}^{-1} = (B_0^* \cdot Le^{-1*})^{-1} \frac{v}{2\pi f_c} \quad (19)$$

$$Q_i^{-1} = Le^{-1*}(1 - B_0^*) \frac{v}{2\pi f_c} \quad (20)$$

$$Q_t^{-1} = Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1} \quad (21)$$

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

$$Q_{c,exp} = Q_{sc}^{-1} \left(1 - \frac{B_2 + 2B_3\eta_{sc}vt + 3B_4(\eta_{sc}vt)^2 + \dots}{1 + B_2\eta_{sc}vt + B_3(\eta_{sc}vt)^2 + \dots} \right) + Q_i^{-1}, \quad (22)$$

pri čemu je t vrijeme proteklo od nastanka potresa ($t = 50$ s u ovom radu), a B_n koeficijenti n -tog reda preuzeti iz rada Hoshiha (1991). Za brzinu S-valova uzeli smo $v = 3.48$ km/s.

U ovom radu smo računali faktore dobrote intrinzične atenuacije Q_i , atenuacije raspršenja Q_{sc} , totalne atenuacije Q_t i teorijski faktor dobrote Q_{cexp} prema jednadžbama (19), (20), (21) i (22) za svaku postaju zasebno, te također za cjelokupno područje južnih Vanjskih Dinarida, SED. Uz to odredili smo i očekivani faktor dobrote Q_{cobs} koji je računat prema relaciji $Q_{cobs} = Q_0 f^n$ gdje su varijable Q_0 i n preuzete iz rada Dasović (2015) za svaku stanicu (osim LSTV, za koju nije bilo podataka) i za cjelokupno područje SED.

4 Rezultati i diskusija

Primjenili smo metodu višestrukih prozora kako bismo odredili intrinzičnu atenuaciju i atenuaciju raspršenja i njihov doprinos ukupnoj atenuaciji u seizmički aktivnom području južnog dijela Vanjskih Dinarida, a time dobili i dodatne informacije i o strukturi i svojstvima kore na tom području. Najbolje procjene koeficijenta ukupne atenuacije i seizmičkog albeda s pripadajućim faktorima atenuacije za cijelo istraživano područje (SED) prikazane su u tablici 3. Općenito, najbolje procjene seizmičkog albeda B_0^* opadaju s frekvencijom od 0.251 za $f_c=3$ Hz do 0.198 za $f_c=16$ Hz. Kao što se vidi u tablici 3, njihova se vrijednost nalazi u uskom rasponu vrijednosti te je uvijek manja od 0.5. Niske vrijednosti albeda izračunate za ovo područje ukazuju na niski stupanj lateralne heterogenosti u gornjoj kori većinom do 15 km (Şahin i sur., 2007), odnosno malenu vjerojatnost postojanja gusto raspoređenih rasjednih struktura. Najbolje procjene za Le^{-1*} rastu s frekvencijom od 0.031 za $f_c=1.5$ Hz do 0.038 km^{-1} za $f_c=16$ Hz. Znači da se udaljenosti na kojim se energije primarnih S-valova smanje za faktor e^{-1} kreću između 26 km (16 Hz) i 32 km (1.5 Hz). Vrijednosti B_0^* i Le^{-1*} za sve frekvencije i sve postaje dane su u tablicama 4 i 5.

Iz tablice 3 vidimo da je Q_i^{-1} veći od Q_{sc}^{-1} za svaku frekvenciju. Oba se smanjuju s frekvencijom s tim da se Q_{sc}^{-1} smanjuje brže. Prema podacima u tablici 2 dodatno nam je potvrđeno da vrijedi $Q_i^{-1} > Q_{sc}^{-1}$. Ovo ukazuje na to da je intrinzična atenuacija dominantni mehanizam atenuacije u području južnih Vanjskih Dinarida, posebno na višim frekvencijama. Očekivana atenuacija kode manja je od ukupne atenuacije S-valova ($Q_{cexp}^{-1} < Q_t^{-1}$) i usporediva je s Q_i^{-1} . Donekle je i za očekivati da će Q_c^{-1} biti manji od Q_t^{-1} jer izravni valovi osjećaju raspršenje isključivo kao gubitak energije, dok ga koda-valovi osjećaju kao gubitak, ali i djelomični dobitak energije. Naravno, dobivene vrijednosti atenuacije ovisit će o pretpostavljenoj strukturi brzine. U radu Mayeda i sur. (1992) već je pretpostavljeno da može

Tablica 2: Tablica s vrijednostima Q_0 i pripadni n te njihove nepouzdanosti, za ovisnost $Q_a(f) = Q_{0,a}f^{n_a}$, gdje je $a = i, sc, t, cexp$.

	Q_0	$\pm\delta Q_0$	n	$\pm\delta n$
<i>i</i>	82.2	0.5	0.882	0.003
<i>sc</i>	219	7	1.02	0.01
<i>t</i>	60.0	0.3	0.913	0.002
<i>c exp</i>	86.7	0.5	0.876	0.003

doći do precijenjivanja rezultata ako se pretpostavi model izotropnog raspršenja u području s jakim raspršenjem. Također, Bianco i sur. (2002) pokazali su da su procjene faktora atenuacije raspršenja precijenjene u odnosu na vrijednosti dobivene za nešto složeniji model dvoslojne litosfere. No, uz to pokazali su i da vrijednosti faktora intrinzične atenuacije dobivene metodom MLTWA predstavljaju nepristranu procjenu tog faktora u kori za slučaj plitkih izvora i kraćih epicentralnih udaljenosti u spomenutom modelu prostora.

Općenito, faktori atenuacije izračunati za pojedinačne postaje međusobno su konzistentni (slika 6). Vrijednosti Q_i^{-1} i Q_{sc}^{-1} među postajama vrlo su slične. Ove rezultatske sličnosti su očekivane jer su postaje smještene blizu jedna druge (udaljenosti između stanica su između 20 km i 118 km) i nalaze se unutar iste tektonske jedinice. Budući da atenuacijske karakteristike kore koreliraju sa strukturom u kori možemo očekivati da će razlog dominantnosti intrinzične atenuacije nad atenuacijom raspršenja biti upravo u načinu kako i od čega je kora građena. Kompleksna geološka i seizmotektonska svojstva osnovni su elementi koje moramo uzeti u obzir kad razmatramo atenuaciju rasprostirućih seizmičkih valova (Meirova i Pinsky, 2014). U radu Bianco i sur. (2002) sugerirano je da efekt dominantne intrinzične atenuacije može biti uzrokovan činjenicom da su valne duljine seizmičkih valova manje od prosječne veličine nehomogenosti u istraživanoj regiji. U ovom istraživanju valne duljine su 2.32 km za 1.5 Hz i 0.22 km za 16 Hz što nas odmah i

Tablica 3: Procijenjeni parametri atenuacije za SED (cijelo područje): koeficijent ukupne atenuacije Le^{-1*} i njegova nepouzdanost, seizmički albedo B_0 i njegova nepouzdanost, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1} , atenuacije raspršenja Q_{SC}^{-1} , ukupne atenuacije Q_t^{-1} i očekivane atenuacije Q_{cexp}^{-1} za različite središnje frekvencije f_c .

f_c [Hz]	Le^{-1*} [km ⁻¹]	$-\delta Le^{-1*}$ [km ⁻¹]	δLe^{-1*} [km ⁻¹]	B_0	$-\delta B_0$	δB_0	Q_i^{-1} (10 ⁻³)	Q_{SC}^{-1} (10 ⁻³)	Q_t^{-1} (10 ⁻³)	Q_{cexp}^{-1} (10 ⁻³)
1.5	0.031	0.005	0.003	0.250	0.037	0.026	8.58	2.86	11.45	8.17
2	0.032	0.003	0.002	0.251	0.019	0.021	6.64	2.22	8.86	6.32
3	0.033	0.003	0.001	0.249	0.015	0.016	4.58	1.52	6.09	4.36
4	0.034	0.003	0.001	0.245	0.016	0.015	3.55	1.15	4.71	3.39
5	0.035	0.003	0.001	0.241	0.017	0.013	2.94	0.93	3.88	2.81
6	0.035	0.003	0.001	0.231	0.016	0.016	2.48	0.75	3.23	2.38
8	0.036	0.003	0.001	0.221	0.017	0.017	1.94	0.55	2.49	1.86
10	0.037	0.004	0.001	0.215	0.022	0.016	1.61	0.44	2.05	1.55
12	0.037	0.003	0.002	0.206	0.019	0.022	1.36	0.35	1.71	1.30
14	0.038	0.004	0.002	0.203	0.023	0.021	1.20	0.31	1.50	1.15
16	0.038	0.003	0.002	0.198	0.020	0.024	1.05	0.26	1.32	1.02

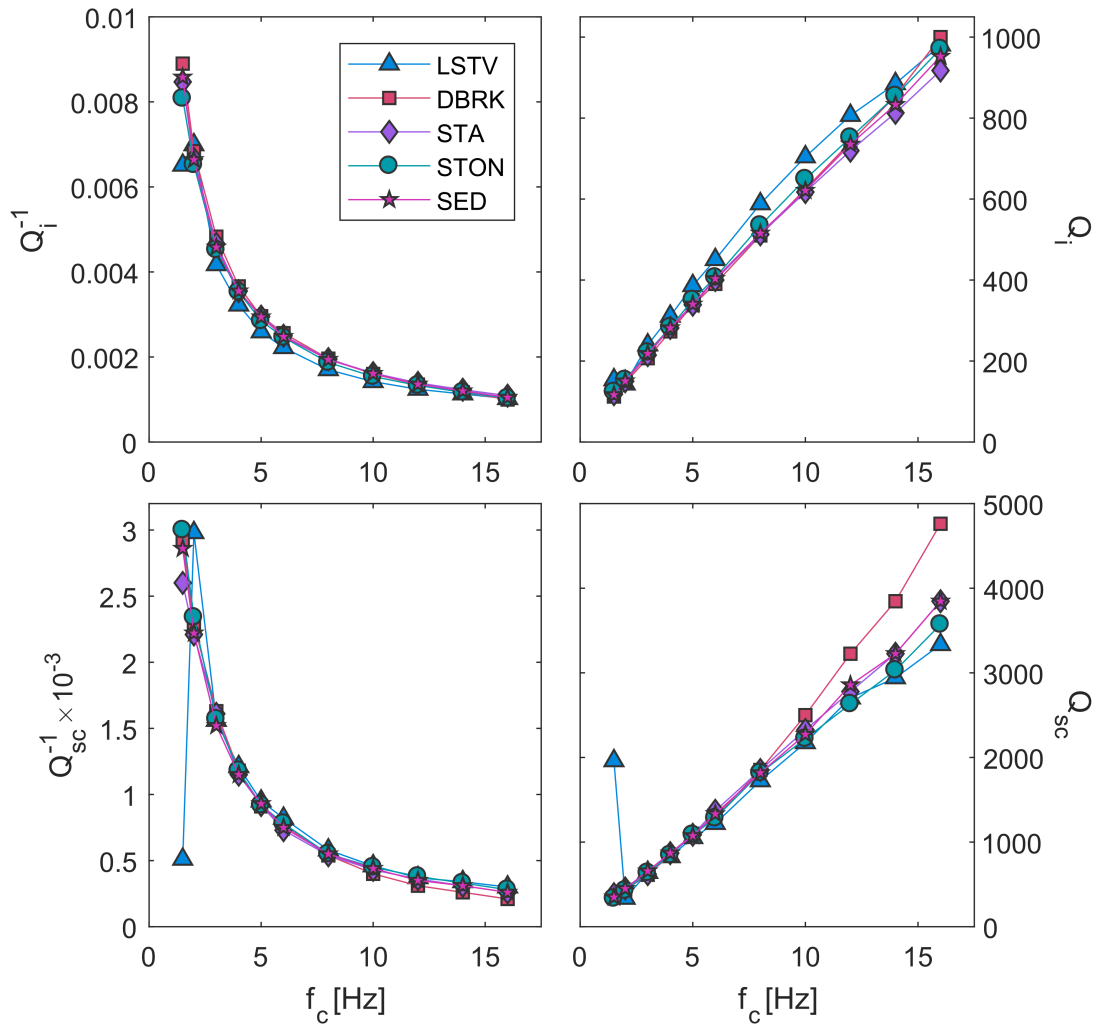
Tablica 4: Procijenjeni seizmički albedo B_0 za sve postaje korištene u analizi.

f_c [Hz]	DBRK	LSTV	STA	STON
1.5	0.2470	0.0720	0.2350	0.2710
2	0.2510	0.2990	0.2490	0.2640
3	0.2520	0.2720	0.2570	0.2580
4	0.2440	0.2730	0.2450	0.2500
5	0.2360	0.2690	0.2380	0.2430
6	0.2310	0.2700	0.2270	0.2400
8	0.2150	0.2550	0.2160	0.2290
10	0.2000	0.2460	0.2080	0.2260
12	0.1890	0.2320	0.2050	0.2240
14	0.1800	0.2300	0.2000	0.2200
16	0.1720	0.2250	0.1950	0.2140

Tablica 5: Procijenjena ukupna atenuacija $Le^{-1}[\text{km}^{-1}]$ za sve postaje korištene u analizi.

f_c [Hz]	DBRK	LSTV	STA	STON
1.5	0.0320	0.0720	0.0300	0.0300
2	0.0330	0.2990	0.0320	0.0320
3	0.0350	0.2720	0.0340	0.0330
4	0.0350	0.2730	0.0340	0.0340
5	0.0350	0.2690	0.0350	0.0340
6	0.0360	0.2700	0.0350	0.0350
8	0.0360	0.2550	0.0360	0.0350
10	0.0360	0.2460	0.0370	0.0360
12	0.0360	0.2320	0.0380	0.0370
14	0.0360	0.2300	0.0390	0.0380
16	0.0350	0.2250	0.0390	0.0380

upućuje na moguće veličine heterogenosti na razmatranom području SED. Osim o odnosu veličina heterogenosti i valnih duljina dominantnost intrinzične atenuacije može biti utjecana i stupnjem zasićenosti stijena fluidima, porastom stupnja zasićenosti atenuacija S-valova raste (Dasović, 2015). Zaključak o tome da veličine heterogenosti i valnih duljina kao glavnog utjecaja na dominantnost intrinzične atenuacije podudaraju se i sa zaključcima drugih istraživanja metodom MLTWA na susjednim područjima (Namjesnik, 2016, Majstorović i sur., 2017). Prema tome možemo zaključiti da su upravo izlomljeni krški karbonati, uglavnom vapnenac koji prevladava na području Vanjskih Dinarida zajedno s prisutnošću raznih rasjeda i pukotina glavni uzrok uočenih svojstava atenuacije. Međutim, treba uzeti u obzir da zbog kompleksnosti atenuacije i načina na koji je ona izazvana nije moguće doći do čistog i točno definiranog uzroka kako u području SED tako i općenito na drugim područjima, te vjerojatno njen uzrok nije čisto jedan mehanizam, već kombinacija više mehanizama i općenito karakteristika Zemljine kore.

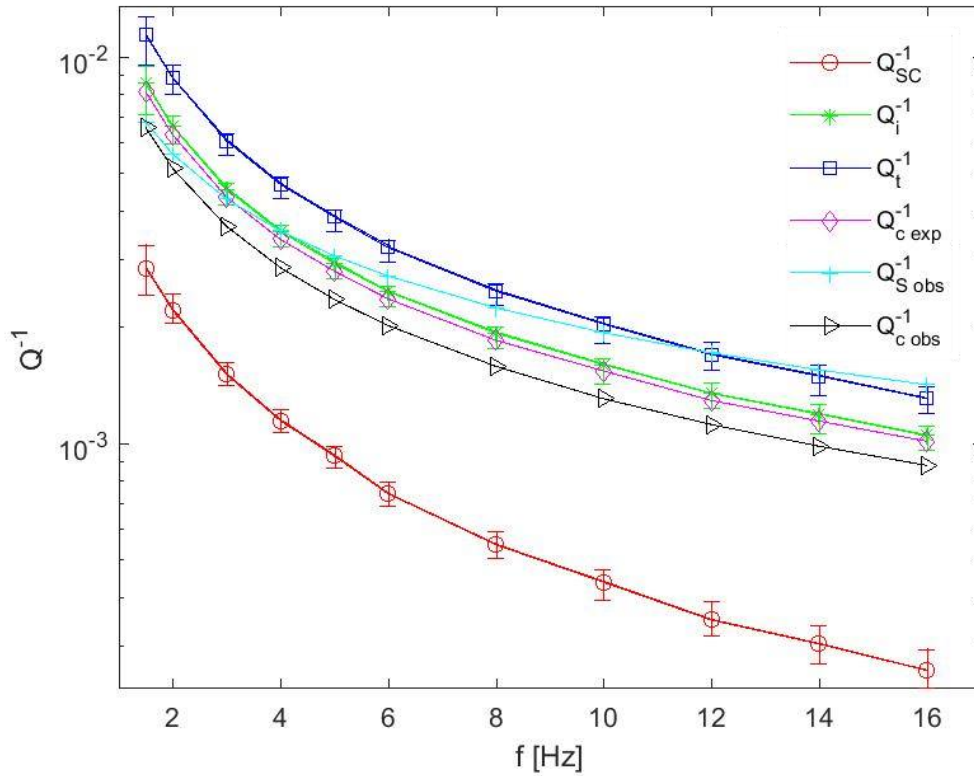


Slika 6: Q-faktori u ovisnosti o frekvenciji za sve postaje korištene u analizi i SED.

Na slici 7 prikazana je usporedba faktora atenuacije: Q_{sc}^{-1} , Q_i^{-1} , Q_t^{-1} , Q_{cexp}^{-1} , Q_{Sobs}^{-1} , Q_{cobs}^{-1} za SED. Q_{Sobs}^{-1} za analizirane postaje je preuzet iz Dasović (2015) te predstavlja atenuaciju visokofrekventnih S-valova dobivenih metodom normiranja kodom (Aki, 1980). Q_{cobs}^{-1} za postaje iz ovog istraživanja preuzet je iz Dasović (2015) te predstavlja atenuaciju koda-valova za $t_L = 50$ s, a dobiven je koda-Q metodom Aki i Chouet (1975). Za seizmološku postaju LSTV nema podataka za Q_{Sobs}^{-1} i Q_{cobs}^{-1} .

Q_{Sobs}^{-1} i Q_{cobs}^{-1} za SED dobiveni su usrednjavanjem preuzetih faktora atenuacije za postaje analizirane u ovom radu. Q_i^{-1} , Q_{cexp}^{-1} i Q_{cobs}^{-1} vrlo su slični po vrijednostima i frekvencijskoj ovisnosti. To posebno vrijedi za Q_i^{-1} i Q_{cexp}^{-1} , dok Q_{cobs}^{-1} ima nešto niže vrijednosti po frekvencijama. Q_{Sobs}^{-1} se bolje slaže s trima navedenim faktorima za niže frekvencije (do 6 Hz), dok se za više frekvencije (8 – 16 Hz) bolje slaže s faktorom ukupne atenuacije Q_t^{-1} . Očekivano je da vrijednosti Q_c^{-1} budu bliže vrijednostima Q_i^{-1} nego vrijednostima Q_{sc}^{-1} za frekvencije veće od 3 Hz jer se doprinos atenuacije raspršenja smanjuje s frekvencijom kako se heterogenosti na maloj skali smanjuju.

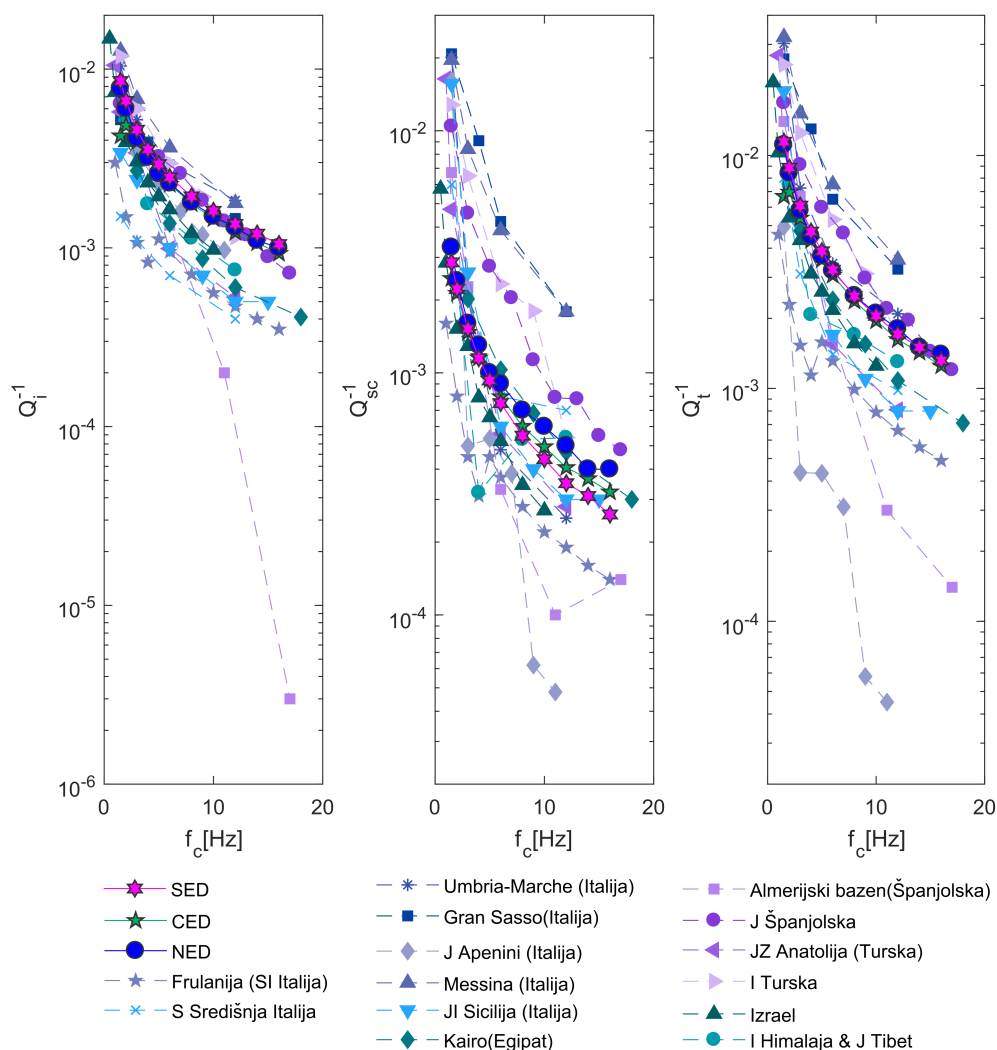
Model prostora korišten u ovom istraživanju je pretpostavljao homogeni poluprostor s uniformno raspoređenima raspršivačima, a pretpostavljao je i izotropno raspršenje. Uočena neslaganja između očekivanih teorijskih rezultata i dobivenih empirijskih vrijednosti vjerojatno su uzrokovana upravo zbog jednostavnosti pretpostavljenog modela. Međutim, ta neslaganja, tj. odstupnja nisu velika, već dovoljno se podudaraju da možemo zaključiti da ovako pretpostavljeni model iznenađujuće dobro opisuje atenuaciju u području južnih Vanjskih Dinarida. Za precizniju procjenu parametara atenuacije, svakako bi trebalo primijeniti složeniji model litosfere, odnosno Zemlje, kao što je višeslojni prostor, anizotropno raspršenje i sl.



Slika 7: Faktori atenuacije raspršenja, intrinzične atenuacije, ukupne atenuacije i očekivane atenuacije uspoređeni sa Q_{Sobs}^{-1} (Dasović, 2015) i Q_{cobs}^{-1} za $t_L = 50$ s (Dasović, 2015) u ovisnosti o frekvenciji za SED.

Kako bi dodatno pojasnili i razumijeli dobivene rezultate usporedili smo ih s rezultatima drugih područja istraživanih metodom MLTWA, kao što su susjedna područja u središnjem (CED) i sjevernom (NED) dijelu Vanjskih Dinarida, u Sredozemlju i Himalaji (slika 8). Q_i^{-1} za sva tri spomenuta područja Vanjskih Dinarida vrlo su bliski, dok su u odnosu na ostale regije u svijetu među većim vrijednostima. Također, Q_i^{-1} za SED vrlo je sličan vrijednostima za područje južne Španjolske (Akinci i sur., 1995), te s planinskim područjem Gran Sasso u središ-

njoj Italiji (Galluzzo i sur., 2015). U odnosu na Furlaniju (Bianco i sur., 2005), područje u sjeveroistočnoj Italiji, i južni dio središnje Italije Del Pezzo i sur., 2011 vrijednosti intrinzične atenuacije za SED su veće. Ako pak gledamo područje Messine u južnoj Italiji Tuvè i sur., 2006, i istočnu Tursku (Akinci i Eyidoğan, 2000) vrijednosti su usporedive, ali ipak uočljivo manje. Vrijednosti faktora atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} , za područje Vanjskih Dinarida su usporedive, ali mogu se uočiti veće razlike među rezultatima, nego što je to kod Q_i^{-1} . U odnosu na ostala područja u svijetu, vrijednosti Q_{sc}^{-1} za SED blizu su prosječnih. Međutim, dosta su manje nego na već spomenutim područjima Gran Sassa i Messine u Italiji, te su veće gledano u odnosu na područje Furlanije. Najbližnje su vrijednostima u području Kaira Abdelwahed i Abdel-Fattah, 2015. Faktor ukupne atenuacije Q_t^{-1} za SED jest otprilike oko prosjeka za razmatrane Q_t^{-1} u ostalim područjima, što smo i mogli očekivati uzimajući u obzir vrijednosti faktora Q_i^{-1} i Q_{sc}^{-1} . Također, možemo primjetiti i da je ukupna atenuacija za sva tri područja u Vanjskim Dinaridima vrlo slična, te se vrijednosti u određenim frekvencijama, čak i podudaraju.



Slika 8: Frekvencijska ovisnost Q_i^{-1} , Q_{SC}^{-1} i Q_t^{-1} dobivenih metodom MLTWA: SED (ovaj rad), CED (Belinić i sur., 2015), NED (Namjesnik, 2016), Gran Sasso (Galluzzo i sur., 2015), Umbria-Marche (Pisconti i sur., 2015), Messina (Tuvè i sur., 2006), S Apenines (Bianco i sur., 2002), Messina, JZ Anatolija (Şahin i sur., 2007), I Turska (Akinci i Eyidoğan, 2000), Furlanija (Bianco i sur., 2005), J Apenini (Bianco i sur., 2002), I Himalaja i J Tibet (Singh i sur., 2016), Almerijski bazen (Pujades i sur., 1997), J Španjolska (Akinci i sur., 1995), S Središnja Italija (Del Pezzo i sur., 2011), Jl Sicilija (Giampiccolo i sur., 2006), Kairo (Abdelwahed i Abdel-Fattah, 2015), Izrael (Meirova i Pinsky, 2014).

5 Zaključci

Kako bi istražili efekte atenuacije u kori južnog dijela Vanjskih Dinarida, te razdvojili doprinose raspršenja i apsorpcije energije ukupnoj atenuaciji, primjenjena je metoda višestrukih prozora (MLTWA). Istraživanje se temelji na modelu homogenog poluprostora uz pretpostavku višestrukog izotropnog raspršenja i uniformne raspodjele raspršivača u sredstvu. Razmatrano je ukupno 1957 seizmograma za 784 potresa sa žarištem u gornjoj kori zabilježenih na četiri postaje: DBRK, LSTV, STA i STON. Svi potresi su hipocentralnih udaljenosti između 20 i 90 km, lokalne magnitude $M_L \geq 2$, središnjih frekvencija pojasnih filtera 1.5 – 16 Hz.

Dobivene su vrijednosti seizmičkog albeda B_0 za sve postaje i razmatrano cjeloukupno područje konzistentno manje od 0.5 (0.299 – 0.172) što upućuje na intrinzičnu atenuaciju kao dominantni čimbenik atenuacije u južnom dijelu Vanjskih Dinarida. Vrijednosti faktora Q^{-1} to potvrđuju ($Q_{sc}^{-1} < Q_i^{-1}$). Uzrok tako jakoj intrinzičnoj atenuaciji najvjerojatnije su vrste i stanje stijena u Vanjskim Dinaridima, izlomljeni krški karbonati i pukotine u potpunosti ili djelomično ispunjene fluidima. Općenito i jedan i drugi faktor atenuacije opadaju s frekvencijom, ali Q_{sc}^{-1} opada brže. Q_i^{-1} i Q_{cexp}^{-1} vrlo su sličnih vrijednosti i bliski vrijednostima dobivenim za Q_{cobs}^{-1} u prethodnim istraživanjima. Atenuacija izravnih S-valova Q_{Sobs}^{-1} izračunata u prethodnim istraživanjima na niskim frekvencijama sličnija je Q_i^{-1} i Q_{cexp}^{-1} , dok je na višim frekvencijama po vrijednosti bliska faktoru ukupne atenuacije S-valova Q_t^{-1} . Uspoređivanjem naših vrijednosti s drugim područjima u svijetu uočili smo da je faktor Q_i^{-1} veći od prosječne vrijednosti razmatranih regija, dok je Q_{sc}^{-1} u okviru prosjeka. U skladu s time faktor ukupne atenuacije Q_t^{-1} , relativno je blizu prosjeka, no ipak veći. Prema dobivenim vrijednostima, te s obzirom na njihovo slaganje s teorijskim predviđanjem možemo zaključiti da primjenjeni model homogenog poluprostora dobro modelira atenuaciju S-valova u području južnih Vanjskih Dinarida.

Zahvale

Zahvaljujemo HEP-u d. d. na ustupljenim podacima sa seizmološke postaje Stravča.

Iskreno zahvaljujemo dr. sc. Ivi Dasović na svestranoj pomoći i susretljivosti bez koje ovaj rad ne bi ugledao svjetlo dana. Također, zahvaljujemo prof. dr. sc. Davorki Herak na pruženoj prilici.

Literatura

- Abdelwahed, M. F. i Abdel-Fattah, A. K. (2015), 'Scattering and intrinsic attenuation in Cairo metropolitan area using genetic algorithm', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **69**, 93–102.
- Aki, K. (1969), 'Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves', *J. Geophys. Res.* **74**, 615–631.
- Aki, K. (1980), 'Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz', *Phys. Earth Planet. Inter.* **21**(1), 50–60.
- Aki, K. i Chouet, B. (1975), 'Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects', *J. Geophys. Res.* **80**(23), 3322–3342.
- Akinci, A. i Eyidoğan, H. (2000), 'Scattering and anelastic attenuation of seismic energy in the vicinity of north anatolian fault zone, eastern Turkey', *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **122**(3-4), 229–239.
- Akinci, A., Pezzo, E. i Ibáñez, J. M. (1995), 'Separation of scattering and intrinsic attenuation in southern Spain and western Anatolia (Turkey)', *Geophys. J. Int.* **121**, 337.
- Belinić, T., Majstorović, J. i Namjesnik, D. (2015), 'Intrinzična atenuacija i atenuacija raspršenja seizmičkih transverzanih valova u području središnjih vanjskih dinarida'.
- Bianco, F., Del Pezzo, E., Castellano, M., Ibanez, J. i Di Luccio, F. (2002), 'Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in the Southern Apennine zone, Italy', *Geophysical Journal International* **150**(1), 10–22.

- Bianco, F., Del Pezzo, E., Malagnini, L., Di Luccio, F. i Akinci, A. (2005), ‘Separation of depth-dependent intrinsic and scattering seismic attenuation in the northeastern sector of the Italian Peninsula’, *Geophys. J. Int.* **161**(1), 130–142.
- Şahin, c., Erduran, M., Alptekin, Ö. i Çakir, Ö. (2007), ‘Intrinsic and scattering seismic attenuation in Southwestern Anatolia’, *Pure and Applied Geophysics* **164**(11), 2255–2270.
- Dasović, I. (2015), Atenuacija seizmičkih valova u području dinarida, PhD thesis, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Dasović, I., Herak, M. i Herak, D. (2012), ‘Attenuation of coda waves in the contact zone between the Dinarides and the Adriatic Microplate’, *Stud. Geophys. Geod.* **56**(1), 231–247.
- Dasović, I., Herak, M. i 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.
- Del Pezzo, E., Bianco, F., Marzorati, S., Augliera, P., D’Alema, E. i Massa, M. (2011), ‘Depth-dependent intrinsic and scattering seismic attenuation in north central Italy’, *Geophys. J. Int.* **186**(1), 373–381.
- Fehler, M., Hoshihara, M., Sato, H. i Obara, K. (1992), ‘Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance’, *Geophysical Journal International* **108**(3), 787–800.
- Galluzzo, D., La Rocca, M., Margerin, L., Del Pezzo, E. i Scarpa, R. (2015), ‘Attenuation and velocity structure from diffuse coda waves: Constraints from underground array data’, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **240**, 34–42.

- Giampiccolo, E., Tuvè, T., Gresta, S. i Patanè, D. (2006), ‘S-waves attenuation and separation of scattering and intrinsic absorption of seismic energy in southeastern Sicily (Italy)’, *Geophys. J. Int.* **165**(1), 211–222.
- Herak, M. (1991a), ‘Lapse time dependent Qc-spectra observed in the Dinarides region (Yugoslavia)’, *Phys. Earth. Planet. Inter.* **67**, 303–312.
- Herak, M. (1991b), Modeliranje kode lokalnih potresa, PhD thesis, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S. i Sović, I. (2011), Republika Hrvatska, Karta potresnih područja (Republic of Croatia, Seismic Hazard Maps; in Croatian). University of Zagreb, Faculty of Science, Department of Geophysics. <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>. Accessed 19 December 2014., in ‘Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance—part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. National Annex.’, Croatian Standards Institute, p. 28.
- Hoshiya, M. (1991), ‘Simulation of multiple-scattered coda wave excitation based on the energy conservation law’, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **67**(1-2), 123–136.
- Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I. i Stipčević, J. (2018), ‘Seismicity of Croatia in the period 2006–2015’, *Geofizika* .
- Majstorović, J., Belinić, T., Namjesnik, D., Dasović, I., Herak, D. i Herak, M. (2017), ‘Intrinsic and scattering attenuation of high-frequency S-waves in the central part of the External Dinarides’, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **270**, 73–83.

- Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshihara, M., Aki, K. i 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**(B5), 6643–6659.
- Meirova, T. i Pinsky, V. (2014), 'Seismic wave attenuation in Israel region estimated from the multiple lapse time window analysis and S-wave coda decay rate', *Geophysical Journal International* **197**(1), 581–590.
- Mukhopadhyay, S., Kumar, A., Garg, A., Del-Pezzo, E. i Kayal, J. R. (2014), 'The attenuation mechanism of S-waves in the source zone of the 1999 Chamoli earthquake', *Journal of Asian Earth Sciences* **79**, 446–454.
- Namjesnik, D. (2016), Atenuacija transverzalnih valova u području sjevernog dijela Vanjskih Dinarida Atenuacija transverzalnih valova u području sjevernog dijela Vanjskih Dinarida, PhD thesis, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Pisconti, A., Del Pezzo, E., Bianco, F. i De Lorenzo, S. (2015), 'Seismic Q estimates in Umbria Marche (Central Italy): Hints for the retrieval of a new attenuation law for seismic risk', *Geophysical Journal International* **201**(3), 1370–1382.
- Pujades, L. G., Ugalde, A., Canas, J. A., Navarro, M., Badal, F. J. i Corchete, V. (1997), 'Intrinsic and scattering attenuation from observed seismic codas in the Almeria Basin (southeastern Iberian Peninsula)', **129**, 281.
- Sato, H. (1977), 'Energy propagation including scattering effects – Single isotropic scattering approximation', *J. Phys. Earth* **25**, 27–41.
- Sato, H., Fehler, M. C. i Maeda, T. (2012), *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth: Second Edition*.

- Singh, S., Singh, C., Biswas, R., Mukhopadhyay, S. i Sahu, H. (2016), ‘Attenuation characteristics in eastern Himalaya and southern Tibetan Plateau: An understanding of the physical state of the medium’, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **257**, 48–56.
- Tuvè, T., Bianco, F., Ibáñez, J., Patanè, D., Del Pezzo, E. i Bottari, A. (2006), ‘Attenuation study in the Straits of Messina area (southern Italy)’, *Tectonophysics* **421**(3-4), 173–185.
- Wu, R.-S. (1985), ‘Multiple scattering and energy transfer of seismic waves – separation of scattering effect from intrinsic attenuation – I. Theoretical modeling’, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **82**, 57–80.
- Zeng, Y. H. (1991), ‘Compact Solutions for Multiple Scattered Wave Energy in Time Domain’, *Bulletin of The Seismological Society of America* **81**(3), 1022–1029.

Sažetak

Vanjski Dinaridi nastali su deformacijom sjeveroistočnog ruba Jadranske mikro-ploče. Područje Dinarida seizmički je umjereno aktivno s povremenom pojavom snažnih. Potresi su uglavnom plitki, te ih većina ima žarište smješteno u gornjoj kori. Područje izražene seizmičke aktivnosti u južnom djelu Vanjskih Dinarida proteže se od Dinare prema jugu do Crne Gore. U toj južnoj domeni Vanjskih Dinarida zbio se najveći broj potresa u razdoblju 2006 – 2015. Na području Republike Hrvatske južni dio Vanjskih Dinarida područje je s najizraženijim seizmičkim hazardom.

Proučavanje rasprostiranja i atenuacije visokofrekventnih S-valova u Zemljinoj kori od velikog je značaja za seizmologiju i građevinarstvo. Dobro poznavanje svojstava sredstva i atenuacije omogućuje kvalitetnu procjenu seizmičkog hazarda i parametara izvora potresa te nas je to motiviralo da odredimo doprinose atenuacije raspršenja i intrinzične atenuacije u južnom dijelu Vanjskih Dinarida primjenom metode analize višestrukih vremenskih prozora (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis*; MLTWA). Ta se metoda temelji na prilagodbi teorijskih krivulja gustoće energije u ovisnosti o hipocentralnoj udaljenosti empirijskim vrijednostima gustoće energije iz seizmograma lokalnih potresa izračunatih za tri uzastopna vremenska prozora. Primjenili smo je uz pretpostavke višestrukog izotropnog raspršenja primjenom teorije prijenosa zračenjem i uniformne raspodjele raspršivača u sredstvu u homogenom poluprostoru na 1957 seizmograma zapisanih na četiri seizmološke postaje. Analizirani su lokalni potresi hipocentralnih udaljenosti između 20 i 90 km te lokalne magnitude $M_L \geq 2$ za 11 središnjih frekvencija pojasnih filtera 1.5 – 16 Hz.

Intrinzična atenuacija dominantni je čimbenik atenuacije u južnom dijelu Vanjskih Dinarida ($Q_{sc}^{-1} < Q_i^{-1}$). Uzrok jakoj intrinzičnoj atenuaciji najvjerojatnije su vr-

ste i stanje stijena u Vanjskim Dinaridima: izlomljeni krški karbonati i pukotine u potpunosti ili djelomično ispunjene fluidima. Općenito, i jedan i drugi faktor atenuacije opadaju s frekvencijom, ali Q_{sc}^{-1} opada brže. Q_i^{-1} , Q_{cexp}^{-1} i Q_{cobs}^{-1} vrlo su sličnih vrijednosti, a iz teorijskih predviđanja za prostorno uniforman model očekuje se sličnost po frekvencijskoj ovisnosti, što je i potvrđeno. Sličnost u vrijednostima posebno vrijedi za Q_i^{-1} i Q_{cexp}^{-1} . Q_{Sobs}^{-1} bolje se slaže s trima navedenim faktorima za niže frekvencija, dok se s faktorom ukupne atenuacije S-valova Q_t^{-1} bolje slaže za više frekvencije. Pokazalo se da je faktor Q_i^{-1} veći od prosječne vrijednosti razmatranih područja u Sredozemlju, dok je Q_{sc}^{-1} u okviru prosjeka. U skladu s time, faktor Q_t^{-1} relativno nešto malo je veći od prosjeka za uspoređena područja.

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

Summary

Estimation of the intrinsic and the scattering attenuation of S-waves in the southern part of the External Dinarides

Veronika Jerčić and Tomislav Andrić

The External Dinarides are formed from the northeast margin of the Adriatic microplate. The Dinarides are seismically moderately active with the rare occurrence of strong earthquakes. The earthquakes are shallow with the foci mostly located in the upper crust. The area of marked seismic activity in the southern part of the External Dinarides stretches from the Dinara mountain to the south into Montenegro. The majority of earthquakes in the External Dinarides occurred in the period 2006–2015 in this southern part. This area has the greatest seismic hazard on the territory of the Republic of Croatia.

Study of propagation and attenuation of high-frequency S-waves in the Earth's crust is of a great importance for seismology and civil engineering. A good knowledge of the properties of the medium and the attenuation enables good quality assessments of seismic hazard and earthquake source parameters. This motivated us to estimate the contribution of the intrinsic and the scattering attenuation to the total attenuation in the southern part of the External Dinarides by applying the Multiple Lapse Time Window Analysis (MLTWA). This method is based on the adaptation of the theoretical energy density curves in dependence on the hypocentral distance to the empirical values of the density of energy from the seismograms of local earthquakes calculated for three consecutive time windows. We applied this method with the assumptions of multiple isotropic scattering by applying the theory of radiation transfer and uniform distribution of the scatterers

in the homogeneous halfspace on 1957 seismograms recorded on four seismic stations. The data analyzed are local earthquakes with hypocentral distance between 20 and 90 km and the local magnitude $M_L \geq 2$ for 11 central frequency of the band-pass filter 1.5–16 Hz.

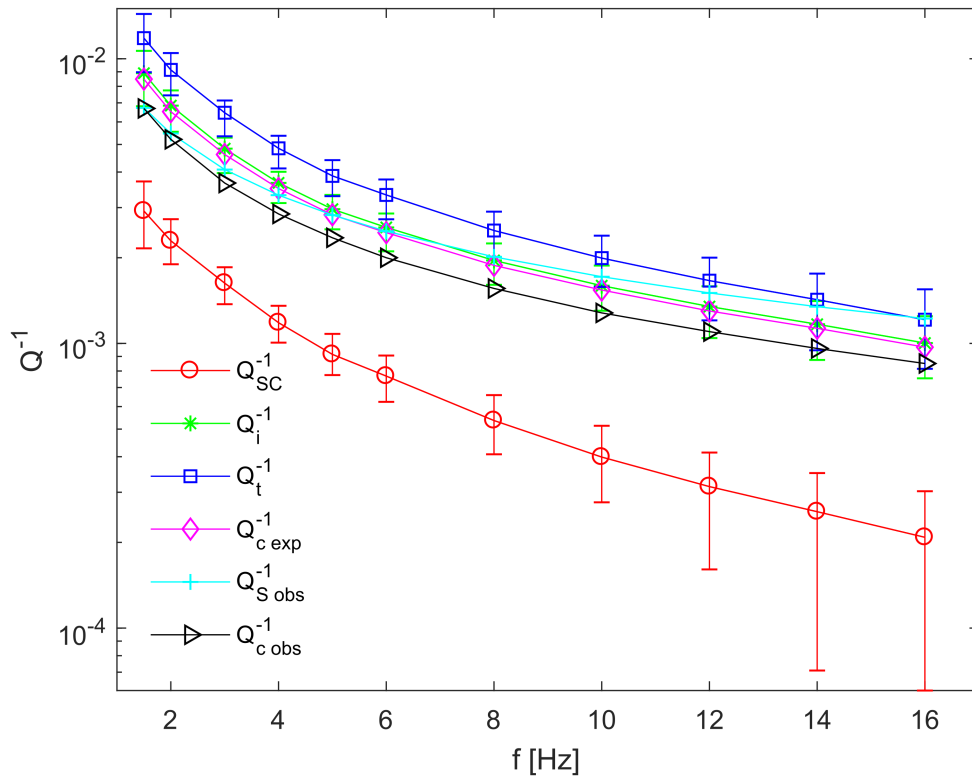
Intrinsic attenuation is dominant factor of attenuation in the southern part of the External Dinarides ($Q_{sc}^{-1} < Q_i^{-1}$). The the most likely cause of the strong intrinsic attenuation are the types and condition of the rocks in the External Dinarides: fractured karst carbonates and the cracks fully or partially filled with fluids. In general, both attenuation factors decreases with frequency, but Q_{sc}^{-1} is decreasing faster. Q_i^{-1} , Q_{cep}^{-1} and Q_{cobs}^{-1} are very similar in values and the expected frequency dependence similarity for spatially uniform model was confirmed. This similarity in values holds especially for the Q_i^{-1} i Q_{cep}^{-1} . Q_{Sobs}^{-1} is in better agreement with the three aforementioned factors for lower frequencies, while it agrees better with the factor of the total attenuation of S-waves Q_t^{-1} for higher frequencies. The factor Q_i^{-1} is higher than the average value for the compared areas in the Mediterranean, while the Q_{sc}^{-1} is around their average. Therefore, the factor Q_t^{-1} is just a little higher than the average for the compared area.

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

A Dodatak

Tablica 6: Procijenjeni parametri atenuacije za postaju DBRK: koeficijent ukupne atenuacije Le^{-1*} i njegova nepouzdanost, seizmički albedo B_0 i njegova nepouzdanost, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1} , atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} , ukupne atenuacije Q_t^{-1} i očekivane atenuacije Q_{cexp}^{-1} za različite središnje frekvencije f_c .

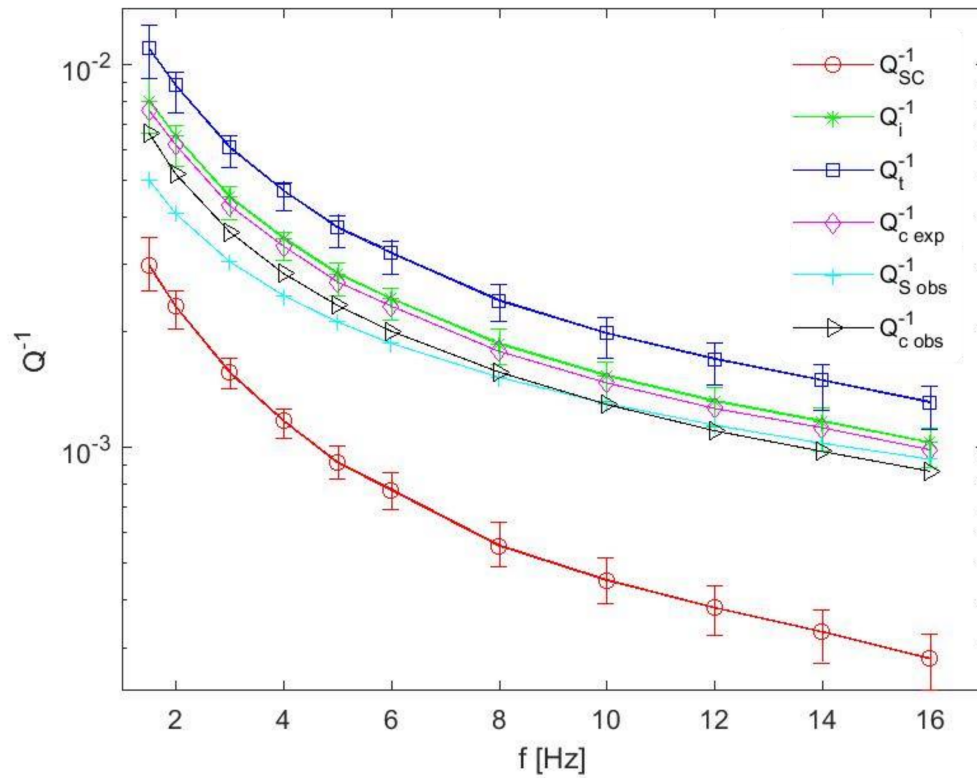
f_c [Hz]	Le^{-1*} [km ⁻¹]	$-\delta Le^{-1*}$ [km ⁻¹]	δLe^{-1*} [km ⁻¹]	B_0	$-\delta B_0$	δB_0	Q_i^{-1} (10 ⁻³)	Q_{sc}^{-1} (10 ⁻³)	Q_t^{-1} (10 ⁻³)	Q_{cexp}^{-1} (10 ⁻³)
1.5	0.032	0.007	0.006	0.247	0.064	0.048	8.90	2.92	11.82	8.48
2	0.033	0.006	0.004	0.251	0.043	0.037	6.84	2.29	9.14	6.52
3	0.035	0.006	0.003	0.252	0.039	0.027	4.83	1.63	6.46	4.61
4	0.035	0.005	0.003	0.244	0.036	0.029	3.66	1.18	4.85	3.50
5	0.035	0.005	0.004	0.236	0.036	0.033	2.96	0.91	3.88	2.83
6	0.036	0.006	0.004	0.231	0.043	0.033	2.56	0.77	3.32	2.45
8	0.036	0.006	0.005	0.215	0.051	0.039	1.96	0.54	2.49	1.88
10	0.036	0.006	0.006	0.200	0.061	0.047	1.60	0.40	1.99	1.54
12	0.036	0.007	0.006	0.189	0.091	0.051	1.35	0.31	1.66	1.30
14	0.036	0.007	0.007	0.180	0.130	0.056	1.17	0.26	1.42	1.13
16	0.035	0.007	0.008	0.172	0.122	0.067	1.00	0.21	1.21	0.97



Slika 9: Opaženi faktori atenuacije raspršenja, intrinzične atenuacije, ukupne atenuacije i očekivane atenuacije uspoređeni sa $Q_{S\ obs}^{-1}$ (Dasović i sur., 2015) i $Q_{c\ obs}^{-1}$ za $t_L = 50$ s (Dasović, 2015) u ovisnosti o frekvenciji za DBRK.

Tablica 7: Procijenjeni parametri atenuacije za postaju STON: koeficijent ukupne atenuacije Le^{-1*} i njegova nepouzdanost, seizmički albedo B_0 i njegova nepouzdanost, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1} , atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} , ukupne atenuacije Q_t^{-1} i očekivane atenuacije Q_{cexp}^{-1} za različite središnje frekvencije f_c .

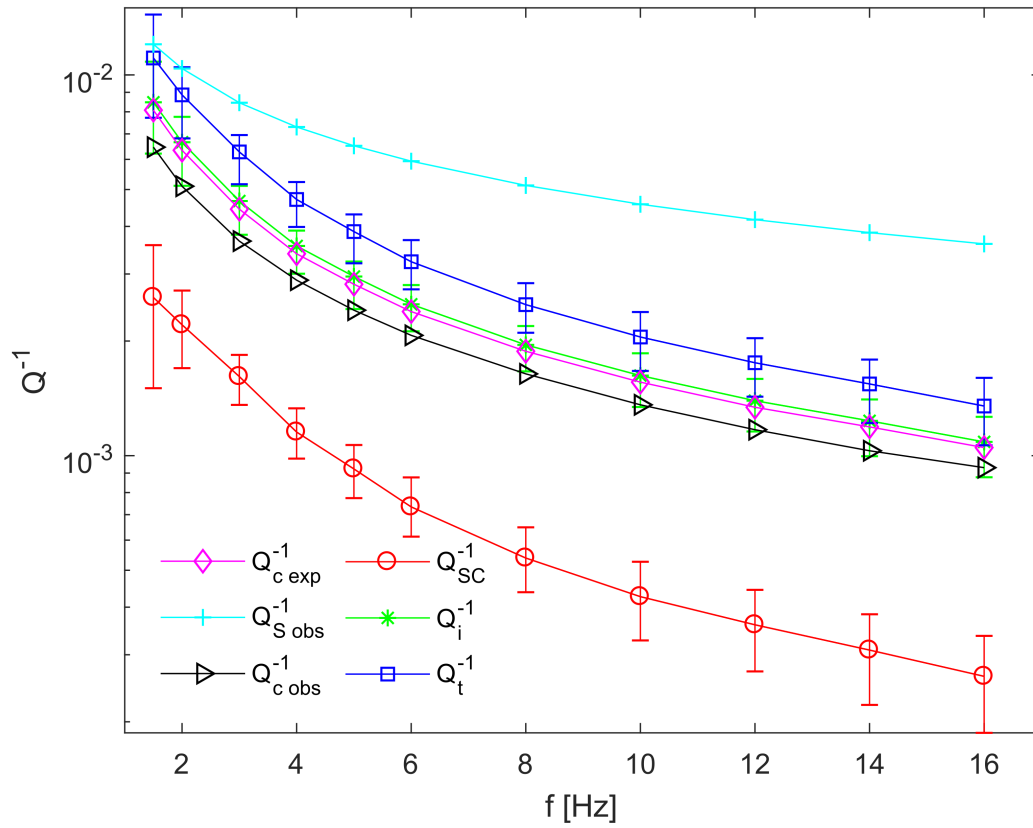
f_c [Hz]	Le^{-1*} [km ⁻¹]	$-\delta Le^{-1*}$ [km ⁻¹]	δLe^{-1*} [km ⁻¹]	B_0	$-\delta B_0$	δB_0	Q_i^{-1} (10 ⁻³)	Q_{sc}^{-1} (10 ⁻³)	Q_t^{-1} (10 ⁻³)	Q_{cexp}^{-1} (10 ⁻³)
1.5	0.030	0.005	0.004	0.271	0.038	0.033	8.08	3.00	11.08	7.65
2	0.032	0.005	0.003	0.264	0.032	0.022	6.52	2.34	8.86	6.19
3	0.033	0.004	0.003	0.258	0.023	0.019	4.52	1.57	6.09	4.30
4	0.034	0.004	0.001	0.250	0.024	0.018	3.53	1.18	4.71	3.37
5	0.034	0.004	0.004	0.243	0.023	0.022	2.85	0.92	3.77	2.72
6	0.035	0.004	0.002	0.240	0.026	0.022	2.46	0.78	3.23	2.35
8	0.035	0.004	0.002	0.229	0.026	0.028	1.87	0.55	2.42	1.79
10	0.036	0.005	0.003	0.226	0.029	0.027	1.54	0.45	1.99	1.48
12	0.037	0.005	0.003	0.224	0.034	0.026	1.33	0.38	1.71	1.27
14	0.038	0.006	0.003	0.220	0.037	0.026	1.17	0.33	1.50	1.13
16	0.038	0.005	0.003	0.214	0.037	0.030	1.03	0.28	1.32	0.99



Slika 10: Opaženi faktori atenuacije raspršenja, intrinzične atenuacije, ukupne atenuacije i očekivane atenuacije uspoređeni sa $Q_{S\ obs}^{-1}$ (Dasović i sur., 2015) i $Q_{c\ obs}^{-1}$ za $t_L = 50$ s (Dasović, 2015) u ovisnosti o frekvenciji za STON.

Tablica 8: Procijenjeni parametri atenuacije za postaju STA: koeficijent ukupne atenuacije Le^{-1*} i njegova nepouzdanost, seizmički albedo B_0 i njegova nepouzdanost, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1} , atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} , ukupne atenuacije Q_t^{-1} i očekivane atenuacije Q_{cexp}^{-1} za različite središnje frekvencije f_c .

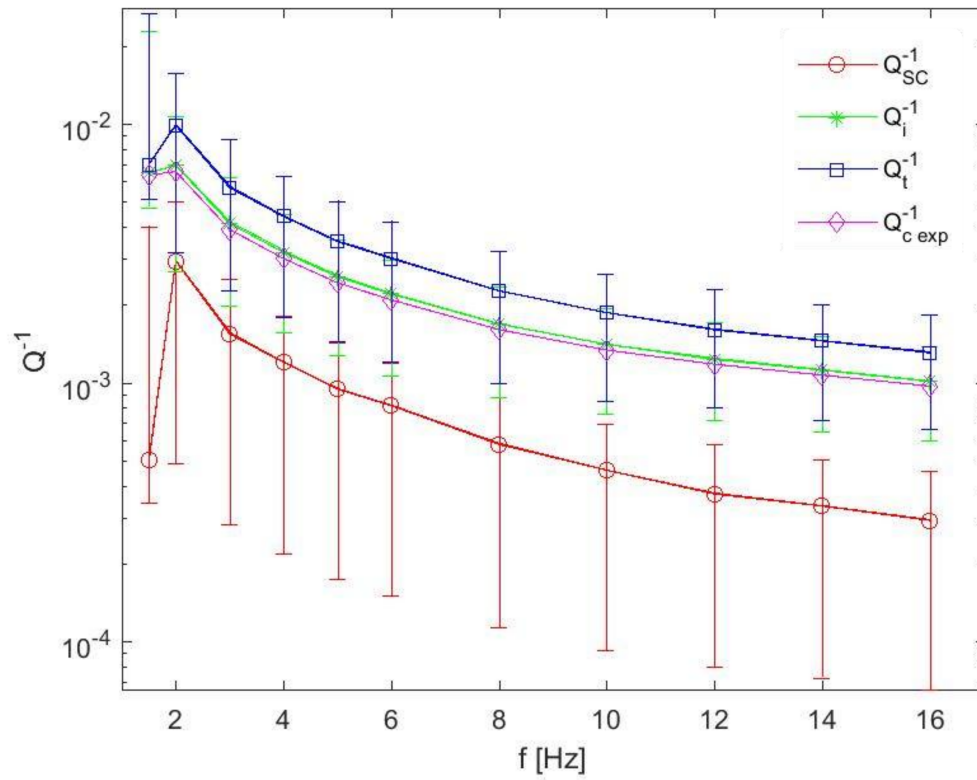
f_c [Hz]	Le^{-1*} [km ⁻¹]	$-\delta Le^{-1*}$ [km ⁻¹]	δLe^{-1*} [km ⁻¹]	B_0	$-\delta B_0$	δB_0	Q_i^{-1} (10 ⁻³)	Q_{sc}^{-1} (10 ⁻³)	Q_t^{-1} (10 ⁻³)	Q_{cexp}^{-1} (10 ⁻³)
1.5	0.030	0.007	0.008	0.235	0.099	0.061	8.47	2.60	11.08	8.08
2	0.032	0.007	0.005	0.249	0.057	0.042	6.66	2.21	8.86	6.34
3	0.034	0.006	0.003	0.257	0.040	0.028	4.66	1.61	6.28	4.44
4	0.034	0.005	0.003	0.245	0.036	0.031	3.55	1.15	4.71	3.39
5	0.035	0.006	0.003	0.238	0.038	0.031	2.95	0.92	3.88	2.82
6	0.035	0.005	0.004	0.227	0.037	0.036	2.50	0.73	3.23	2.39
8	0.036	0.005	0.004	0.216	0.040	0.037	1.95	0.54	2.49	1.88
10	0.037	0.006	0.005	0.208	0.048	0.040	1.62	0.43	2.05	1.56
12	0.038	0.006	0.005	0.205	0.050	0.040	1.39	0.36	1.75	1.34
14	0.039	0.007	0.005	0.200	0.056	0.041	1.23	0.31	1.54	1.19
16	0.039	0.007	0.006	0.195	0.056	0.045	1.09	0.26	1.35	1.05



Slika 11: Opaženi faktori atenuacije raspršenja, intrinzične atenuacije, ukupne atenuacije i očekivane atenuacije uspoređeni sa Q_{Sobs}^{-1} (Dasović i sur., 2015) i Q_{cobs}^{-1} za $t_L = 50$ s (Dasović, 2015) u ovisnosti o frekvenciji za STA.

Tablica 9: Procijenjeni parametri atenuacije za postaju LSTV: koeficijent ukupne atenuacije Le^{-1*} i njegova nepouzdanost, seizmički albedo B_0 i njegova nepouzdanost, faktor intrinzične atenuacije Q_i^{-1} , atenuacije raspršenja Q_{sc}^{-1} , ukupne atenuacije Q_t^{-1} i očekivane atenuacije Q_{cexp}^{-1} za različite središnje frekvencije f_c .

f_c [Hz]	Le^{-1*} [km ⁻¹]	$-\delta Le^{-1*}$ [km ⁻¹]	δLe^{-1*} [km ⁻¹]	B_0	$-\delta B_0$	δB_0	Q_i^{-1} (10 ⁻³)	Q_{sc}^{-1} (10 ⁻³)	Q_t^{-1} (10 ⁻³)	Q_{cexp}^{-1} (10 ⁻³)
1.5	0.019	0.005	0.047	0.072	0.022	0.469	6.51	0.51	7.02	6.41
2	0.036	0.018	0.018	0.299	0.249	0.142	6.99	2.98	9.97	6.61
3	0.031	0.013	0.015	0.272	0.222	0.111	4.17	1.56	5.72	3.95
4	0.032	0.013	0.012	0.273	0.223	0.093	3.22	1.21	4.43	3.05
5	0.032	0.013	0.012	0.269	0.219	0.090	2.59	0.95	3.54	2.46
6	0.033	0.014	0.011	0.270	0.220	0.086	2.22	0.82	3.05	2.11
8	0.033	0.013	0.012	0.255	0.205	0.091	1.70	0.58	2.28	1.62
10	0.034	0.013	0.012	0.246	0.196	0.091	1.42	0.46	1.88	1.35
12	0.035	0.012	0.013	0.232	0.182	0.095	1.24	0.37	1.62	1.19
14	0.037	0.013	0.012	0.230	0.180	0.090	1.13	0.34	1.46	1.08
16	0.038	0.013	0.013	0.225	0.175	0.096	1.02	0.30	1.32	0.98



Slika 12: Opaženi faktori atenuacije raspršenja, intrinzične atenuacije, ukupne atenuacije i očekivane atenuacije u ovisnosti o frekvenciji za LSTV.