

# Prostorna analiza atenuacije visokofrekventnih seizmičkih valova u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida

---

Golub, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:349799>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Lucija Golub

PROSTORNA ANALIZA ATENUACIJE  
VISOKOFREKVENTNIH SEIZMIČKIH  
VALOVA U SREDIŠNJEM DIJELU  
VANJSKIH DINARIDA

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Lucija Golub

Diplomski rad

**Prostorna analiza atenuacije  
visokofrekventnih seizmičkih valova u  
središnjem dijelu Vanjskih Dinarida**

Voditeljica diplomskog rada: doc. dr. sc. Iva Dasović

Zagreb, 2022.

Zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Ivi Dasović na pruženoj prilici za izradu diplomskog rada na temu koja me izrazito zanimala te na svim savjetima i pomoći. Zahvaljujem Seizmološkoj službi na ustupljenim podacima potrebnim za rad i Heleni Latečki, mag. phys.–geophys., na pomoći oko prikupljanja podataka koji su nedostajali.

Zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su me podržavali tijekom studija, olakšavali povremene teške trenutke te slavili sa mnom one sretne i uspješne. Posebno hvala seki Dijani na lektoriranju dijelova diplomskog rada unatoč nedostatku vremena te maloј nećakinji Katji koja mi je uljepšavala dane tijekom pisanja diplomskog rada.



## Sažetak

Istraživana je atenuacija izravnih P- i S-valova ( $Q_P^{-1}$  i  $Q_S^{-1}$ ) lokalnih potresa na području središnjih Vanjskih Dinarida. Korišteno je 844 seizmograma za izračun atenuacije P-valova, te 762 seizmograma za S-valove zabilježenih na 10 postaja u tom području. Provedena je metoda normiranja kodom i inverzija kako bi se dobile varijacije atenuacije izravnih valova te faktor geometrijskog širenja  $\gamma$ . Postupak se provodio za četiri središnje frekvencije  $f_c = 3, 6, 12, 18$  Hz. Korišten je programski paket MuRAT (engl. *Multi-Resolution seismic Attenuation Tomography*), pisan u Matlabu, za provođenje inverzije u prostoru te prostorni prikaz varijacija atenuacije seizmičkih valova. Cilj je vidjeti primjenjivost MuRAT-a na području središnjih Vanjskih Dinarida te kako bi se metoda mogla unaprijediti za kvalitetnije rezultate.

Ova analiza pokazala je da se izračunati faktori geometrijskog širenja  $\gamma$  smanjuju se s frekvencijama tako da je za niže frekvencije vrijednost bliska  $\gamma = 1$  što odgovara prostornim valovima, a za veće frekvencije faktor  $\gamma$  bliži je vrijednosti 0.5 koja se obično pretpostavlja za površinske valove što ukazuje da na višim frekvencijama prevladavaju površinski valovi. Dobiveni srednji  $Q$ -faktori pokazuju da se radi o području visoke atenuacije, a oni se povećavaju s frekvencijama tako da je raspon srednje vrijednosti faktora dobrote  $Q$  za P-valove ( $\langle Q_P \rangle$ ) od 137 (za 3 Hz) do 622 (za 18 Hz), a raspon srednje vrijednosti ( $\langle Q_S \rangle$ ) od 196 (za 3 Hz) do 525 (za 18 Hz). Iako se malo razlikuju, ove vrijednosti u skladu su s iznosima dobivenima u prethodnim istraživanjima za ovo područje, posebno kad se uzme u obzir da su analizirani različiti skupovi podataka te da se razlikuje faktor geometrijskog širenja.

Prostorne varijacije atenuacije izravnih seizmičkih valova ukazuju na to da je područje vrlo heterogeno. Varijacije su vidljive do otprilike 25 km dubine. Provedeni su testovi rezolucije – tzv. *checkerboard* i *spike* testovi u kojima se dobro vide područja s manjkom rezolucije te s više zamućenosti i razmazanosti. Rezultati *checkerboard* testa ukazuju na to da su rješenja najmanje stabilna za 3 Hz zbog najveće mutnoće i razmazanosti, a *spike* testovi reproduciraju anomaliju dobro na svim frekvencija osim na 3 Hz.

**Ključne riječi:** atenuacija, metoda normiranja kodom, MuRAT, Dinaridi, tomografija, testovi rezolucije

# Spatial analysis of body wave attenuation in the central part of the External Dinarides

## Abstract

Attenuation of direct P- and S-waves is analyzed in the area of the central External Dinarides. In the analysis 844 seismograms of local earthquakes were used to determine direct P-wave attenuation and 762 seismograms for S-wave attenuation recorded on 10 stations. The coda normalization method and inversion procedure were applied to obtain variations of the attenuation factor  $Q_{P,S}$  and geometrical spreading factor  $\gamma$ . The method was applied to four central frequencies  $f_c = 3, 6, 12, 18$  Hz. MuRAT (*Multi-Resolution seismic Attenuation Tomography*), a Matlab package for attenuation of seismic waves, was used for inversion in space. The goal was to investigate if MuRAT is applicable to the central External Dinarides and what can be done to achieve better results.

Obtained geometrical spreading factors  $\gamma$  decrease with frequency in a way that for lower frequencies factor  $\gamma$  is closer to 1, which is an assumed value for direct wave energies, and for higher frequencies the value of  $\gamma$  is closer to 0.5, which is an assumed value for surface waves and it indicates that for higher frequencies surface waves prevail. Average quality factors  $Q$  indicate that this area exhibits high attenuation and they increase with frequency. The range of average P-wave quality factors  $\langle Q_P \rangle$  values is 137 (for 3 Hz) and 622 (for 18 Hz), while the range of  $\langle Q_S \rangle$  values is 196 (for 3 Hz) and 525 (for 18 Hz). Obtained values were compared to those calculated from frequency dependant quality factors obtained in earlier research of this area – values do not differ much, even though completely different data set and geometrical spreading factors were used.

Spatial variations of direct P- and S-wave attenuations are obtained and they indicate that the area is highly heterogeneous. Attenuation variations are resolved to the depth of approximately 25 km due to the high ray density. Checkerboard and spike tests are used to determine areas with more smearing and less resolution. The results of the checkerboard test indicate least stability for 3 Hz, with more smearing and blurring than for other frequencies, while spike tests reconstruct the anomaly from input model well for all frequencies except for 3 Hz.

**Keywords:** attenuation, coda normalization method, MuRAT, Dinarides, tomography, resolution tests

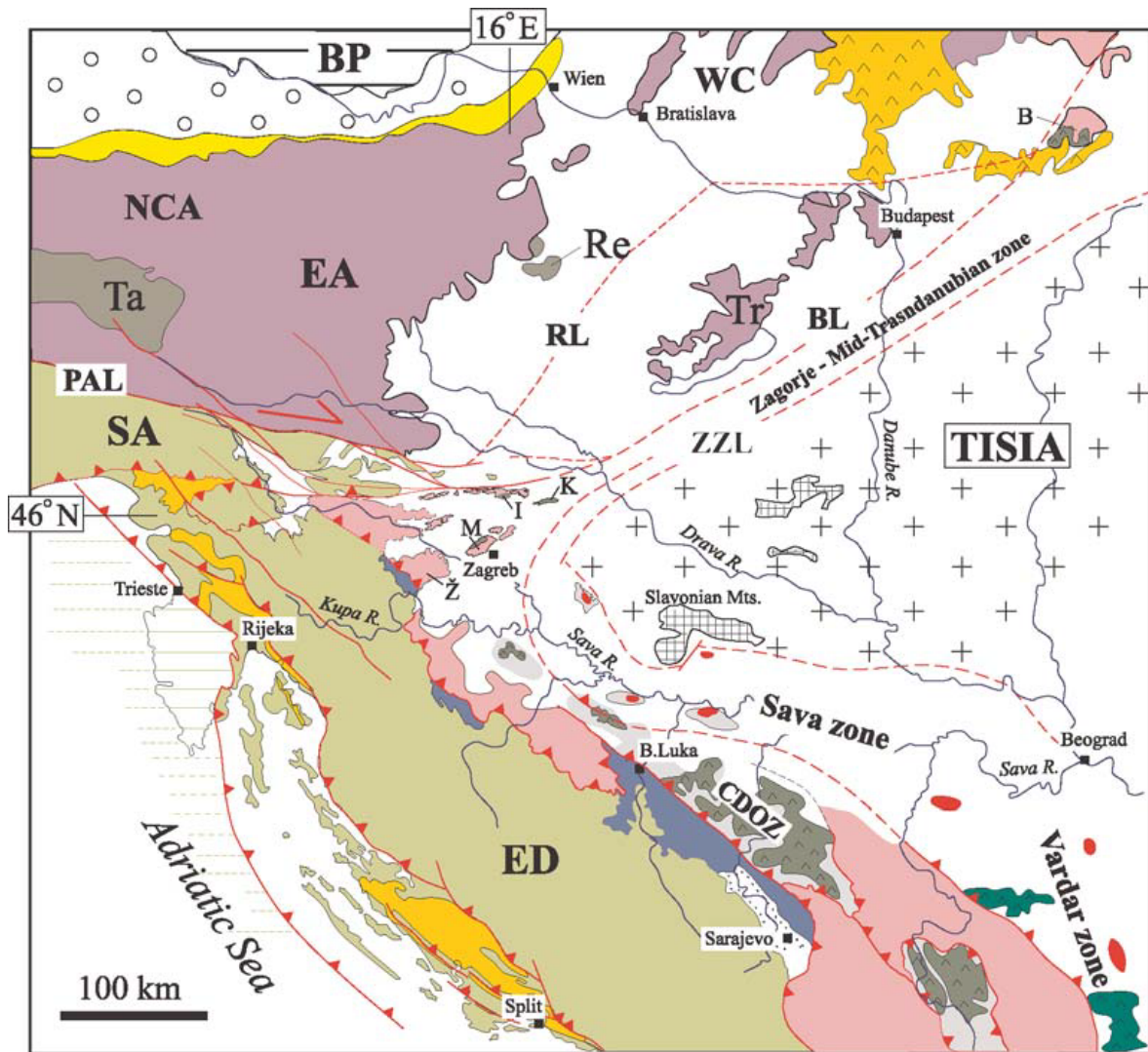
# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Tektonika promatranog područja</i>	1
1.2. <i>Dosadašnja istraživanja</i>	3
1.3. <i>Motivacija i cilj istraživanja</i>	4
<b>2. Teorijska pozadina</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Atenuacija seizmičkih valova</i>	5
2.2. <i>Raspršenje</i>	6
2.3. <i>Koda-valovi</i>	7
2.4. <i>Intrinzična atenuacija</i>	8
<b>3. Metoda i analiza podataka</b>	<b>11</b>
3.1. <i>MuRAT</i>	11
3.2. <i>Metoda normiranja kodom</i>	13
3.3. <i>Postupak tomografije</i>	15
3.4. <i>Podatci</i>	16
<b>4. Rezultati i diskusija</b>	<b>19</b>
4.1. <i>Metoda normiranja kodom</i>	20
4.2. <i>Varijacije ukupne atenuacije izravnih P- i S-valova</i>	22
4.3. <i>Testovi rezolucije</i>	30
<b>5. Zaključak</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>41</b>

# 1. Uvod

## 1.1. *Tektonika promatranog područja*

Dinaridi su dio alpsko-karpatско-dinarskog sustava orogena i protežu se oko 700 km od Južnih Alpa na sjeverozapadu do Helenida na jugoistoku. Ta kompleksna tektonska jedinica nastala je kao posljedica kompresije tijekom kolizije Jadranske mikroploče s Europskom pločom. Dinaridi su podijeljeni na Vanjske i Unutarnje Dinaride. Vanjski Dinaridi sastoje se od tektonskih jedinica nastalih iz istočnog dijela Jadranske mikroploče, a one su većim dijelom sastavljene od plitkomorskih formacija karbonatne platforme nastalih između mezozoika i tercijara (Tomljenović i sur., 2008 i tamo navedene reference, slika 1.1.). Glavna deformacijska faza ovog dijela Dinarida rezultirala je sjeverozapadnim smjerom pružanja i jugozapadnom vergencijom rasjednih i boranih struktura. Vremenski je navedena faza trajala od srednjeg eocena pa sve do ranog miocena, a obilježava ju prijelaz iz karbonatne platforme u sedimente fliša (Tomljenović i sur., 2008). Karbonatna platforma, zbog koje se Vanjski Dinaridi još nazivaju i Krški, na pojedinim je mjestima debljine i preko 8000 m, a sastoji se od karbonatnih naslaga koje predstavljaju relikte nekadašnjih vertikalno posloženih karbonatnih podloga različitih starosti (Vlahović i sur., 2005). Na slici 1.2. prikazan je geološki presjek Dinarida u smjeru NE – SW na kojemu su vidljivi sedimentni slojevi u prvih 12 km dubine. Dubina Mohorovičićeva diskontinuiteta na području Vanjskih Dinarida varira od 40 km na sjeverozapadnom dijelu do 55 km u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida (Stipčević i sur., 2011). U području Dinarida potresi su u pravilu plitki, a česta je pojava slabih potresa s povremenom pojavom umjerenih do snažnih potresa (Ivančić i sur., 2018).



**EXTERNAL DINARIDES (ED) & SOUTHERN ALPS (SA)**

- Imbricated Adriatic plate margin units largely composed of Palaeozoic basement and Mesozoic carbonate platform rocks
- External Dinarides flysch belt
- Undeformed Adriatic foreland

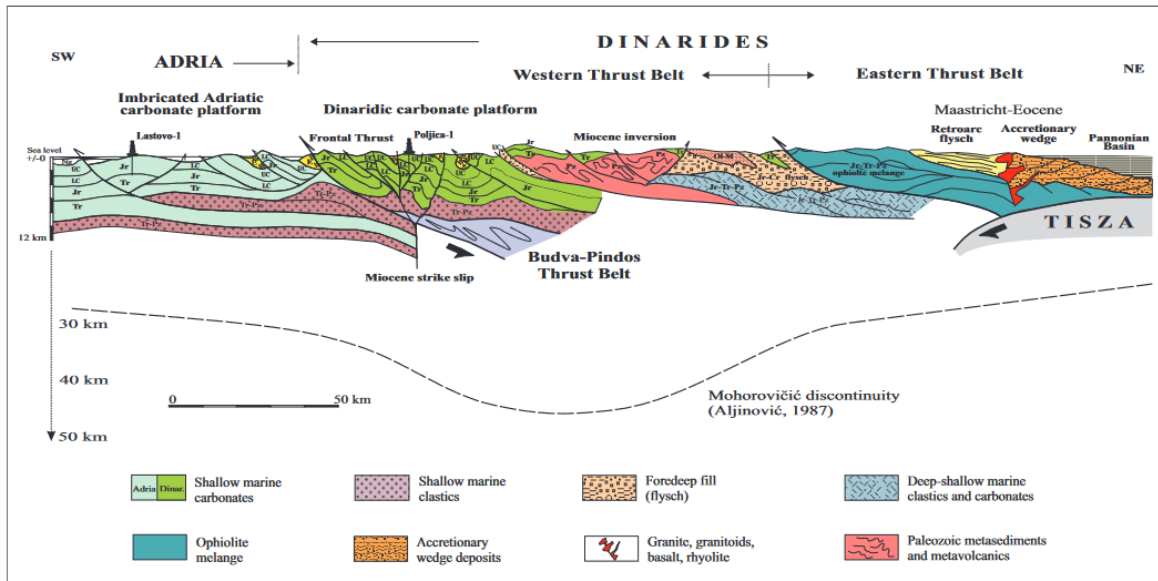
**EASTERN ALPS (EA) & WESTERN CARPATHIANS**

- Austroalpine units: Northern Calcareous Alps (NCA) West Carpathians (WC) and Transdanubian Range (Tr)
- Penninic units: Tauern window (Ta) & Rechnitz (Re)
- Penninic Alpine-Carpathian flysch belt & Helvetic units
- Alpine-Carpathian foredeep
- Neogene volcanic rocks

**INTERNAL DINARIDES**

- Bosnian flysch zone
- Adriatic plate margin units involved in Late Jurassic ophiolite obduction
- Central Dinaridic ophiolite zone (CDOZ)**
  - (a) Ophiolite massifs
  - (b) Jurassic ophiolitic mélangé
- K, I, M, Ž - Kalnik, Ivanščica, Medvednica and Žumberak Mts.**
- Sava-Vardar zone**
  - (a) Cretaceous-Tertiary granodiorite intrusions and
  - (b) Ophiolite massifs
- Neogene-Quaternary fill of the Pannonian basin
- TISIA**
  - Tisia units, (a) covered by Neogene-Quaternary deposits & (b) exposed on the surface
- EUROPEAN FORELAND**
  - Bohemian Promontory (BP)

Slika 1.1. Skica tektonskih zona centralnih Dinarida, jugoistočnih Alpa i panonskog područja (preuzeto iz Tomljenović i sur., 2008).



Slika 1.2. Geološki presjek Dinarida u smjeru NE – SW (preuzeto iz Tari, 2002).

## 1.2. Dosadašnja istraživanja

Dosad je provedeno nekoliko istraživanja atenuacije u Hrvatskoj. Prvo je istraživanje proveo Rovelli (1984) korištenjem koda- $Q$  metode na području Crne Gore koje se dotaknulo i dubrovačkog područja. Zatim su uslijedila istraživanja M. Heraka (1991a; 1991b) u kojima je napravljena analiza koda- $Q$  faktora za Vanjske Dinaride. Pokazalo se da koda- $Q$  faktor raste s frekvencijom i proteklim vremenom te da se stupanj ovisnosti o frekvenciji smanjuje s proteklim vremenom. U Dasović i sur. (2012) provedena je analiza koda- $Q$  faktora za konvergentno područje Dinarida i Jadranske mikroploče, a u Dasović i sur. (2013) za dodirnu zonu Dinarida, Alpa i Panonskog bazena. U oba istraživanja pronađena je dobra korelacija između parametra  $n$  u frekvencijskoj ovisnosti  $Q_c = Q_0 f^n$  i dubine Mohorovičićeva diskontinuiteta. Dasović i sur. (2015) provedli su proširenu metodu normiranja kodom na stanicama središnjih Vanjskih Dinarida. Zabilježena je jaka atenuacija izravnih P- i S-valova s time da su P-valovi više atenuirani. Na otočnim stanicama atenuacija niskih frekvencija velika je te je jače izražena frekvencijska ovisnost  $Q_P$  faktora. U Dasović (2015) provedena je metoda normiranja kodom na području Vanjskih Dinarida. Rezultati su pokazali kako je frekvencijska ovisnost faktora dobrote za P-valove na području središnjih Vanjskih Dinarida jednaka  $Q_P = (84 \pm 3) f^{0.70 \pm 0.02}$ , dok je za S-valove frekvencijska ovisnost jednaka  $Q_S = (107 \pm 7) f^{0.67 \pm 0.03}$ . Računanje doprinosa intrinzične ( $Q_i^{-1}$ ) i atenuacije raspršenja ( $Q_{sc}^{-1}$ ) u ukupnoj atenuaciji S-valova po prvi je puta provedeno u Majstorović i sur. (2017) za područje središnjih Vanjskih Dinarida. Korištena je metoda MLTWA (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis*) temeljena na pretpostavci višestrukog izotropnog raspršenja u homogenom mediju s ravnomjerno raspoređenim raspršivačima. Pokazalo se da je seizmički albedo manji od 0.5 te da kroz sve stanice i frekvencije intrinzična atenuacija dominira nad atenuacijom raspršenja.

MuRAT (engl. *Multi-Resolution seismic Attenuation Tomography*) je Matlab paket za tomografiju seizmičke atenuacije, raspršenja i apsorpcije koji koristi izravne i koda va-

love na različitim frekvencijama. Većina istraživanja u kojima je korišten MuRAT bila je vezana uz vulkanska područja, a od njih izdvojena su samo ona u kojima je korištena metoda normiranja kodom. U De Siena i sur. (2014), korištenjem *MuRAT1.0*, provela se metoda normiranja kodom za izračun i tomografiju atenuacije izravnih valova u području vulkana Vezuva i Sv. Helene. Provela se inverzija u više koraka koja je pokazala stabilnije rezultate u zonama veće heterogenosti kao što je vulkanski stožac. Zaključilo se i kako bi za bolju rezoluciju trebalo uključiti zrake udaljenije od vulkanskog stošca u kojem je zabilježena anomalna koncentracija energije zbog raznih efekata unutar njega. U De Siena i sur. (2014) izračunala se 3D atenuacija izravnih P-valova kod vulkana Sv. Helena, kao i atenuacija kode. Neposredno ispod i oko vulkanskog stošca vidljive su zone velikog raspršenja i atenuacije što bi moglo ukazivati na magmu i zone ispunjene fluidima. U istraživanju kojeg su proveli Prudencio i sur. (2015) proučavala se 3D atenuacija otoka Deception na Antarktici metodom normiranja kodom za izravne P-valove pri čemu se pronašla anomalija visoke atenuacije koja je uzrokovana geotermalnim sustavom visoke temperature na dubini 1 – 3 km. Posebno su zanimljiva dva novija istraživanja koje su objavili: Sketsiou i sur. (2021) i Toker i Şahin (2022) zbog toga što jedina nisu napravljena za vulkansko područje te koriste *MURAT2D* i *MURAT3.0*. U radu Sketsiou i sur. (2021) istražuje se atenuacija izravnih P-valova sustava na sustavu rasjeda Pollino na jugu Italije metodom normiranja kodom. Korišteni su zapisi potresa s glavnih rasjeda te se dobilo očekivano povećanje atenuacije s frekvencijom za seizmički aktivne rasjede, a rezultati su u skladu s hipotezom da su rasjedi u ovom području posljedica dubokih lateralnih migracija fluida. U radu Toker i Şahin (2022) također se primjenjuje metoda normiranja kodom kako bi se dobila atenuacija P- i S-valova na području istočne Anatolije. Pokazalo se da anomalije atenuacije koincidiraju s anomalijama brzine valova. Anomalije atenuacije također su ukazale na četiri već poznate geološke zone.

### ***1.3. Motivacija i cilj istraživanja***

Vanjski Dinaridi vrlo su kompleksno i heterogeno područje s brojnim slojevima sedimentata. Uz prethodno navedena istraživanja atenuacije tog područja, dosad se nije radila tomografija atenuacije. Budući da je MuRAT prvotno namijenjen područjima velike heterogenosti, kao što su vulkani, očekuje se da će njegova primjena biti moguća i za heterogene Vanjske Dinaride. Samim time što navedeno nije vulkansko područje, ne očekuju se vizualno slični rezultati kao za vulkane. Oni često u svom stošcu i oko njega pokazuju velike anomalije atenuacije zbog moguće magme i ostalih fluida te visok stupanj raspršenja koji je nastao tijekom duge povijesti erupcija i taloženja eruptivnih materijala. Također je jedna od razlika istraživanja Vanjskih Dinarida i vulkanskih područja razmještaj postaja, odnosno dimenzija istraživanog područja. Obično su seizmološke postaje postavljene u neposrednoj blizini stošca vulkana pa je cjelokupno područje istraživanja manjih dimenzija u usporedbi s područjem Vanjskih Dinarida gdje su stanice udaljenije pa je samim time i područje istraživanja veće. Cilj je ovog rada vidjeti koliko je MuRAT primjenjiv za područje Vanjskih Dinarida i atenuaciju izravnih valova te što bi se sve moglo u budućim istraživanjima ispraviti vezano uz podatke i ostale ulazne parametre. U slučaju zadovoljavajućih rezultata na području Vanjskih Dinarida mogla bi se također primijeniti i MLTWA metoda kako bi se istražilo raspršenje i intrinzična atenuacija u obliku tomografije.

## 2. Teorijska pozadina

### 2.1. Atenuacija seizmičkih valova

Kada bi Zemlja bila idealno elastično, izotropno i homogeno sredstvo, jedini uzroci smanjenja amplitude elastičkih valova tijekom propagacije kroz Zemlju bili bi geometrijsko rasprostiranje te refleksija i transmisija vala na granici idealnih sredstava. Budući da Zemlja nije idealno elastično tijelo nego je heterogena, amplituda vala smanjivat će se brže zbog različitih dodatnih procesa gubitka energije. Ti procesi mogu biti: trenje među česticama sredstva, međudjelovanje čestica sredstva i fluida u mikropukotinama i raspršenje na heterogenostima. Heterogenosti mogu biti različitih dimenzija, od submikroskopskih do onih veličine nekoliko desetaka kilometara. Uzroci su nehomogenosti razni: svojstva i veličina kristala i minerala, pucanje stijena i nastanak pukotina raznih dimenzija, slojevi sedimentnih stijena, magmatske intruzije, rasjedanje i boranje itd. Seizmički val reagirat će na one heterogenosti koje su svojom veličinom podjednake ili veće od njegove valne duljine.

Atenuacija ili prigušenje jest proces smanjenja amplitude vala, tijekom propagacije, odnosno njegova gubitka energije, a da nije uzrokovan geometrijskim širenjem valne fronte. Atenuacija zajedno s izvorom i svojstvima lokalne podloge određuje oblik i frekvencijski sadržaj seizmograma potresa. Poznavanje atenuacije vrlo je važno kod određivanja seizmičkog hazarda i parametara seizmičkog izvora.

Geometrijsko rasprostiranje jest proces smanjenja amplitude vala zbog povećanja valne fronte tijekom propagacije vala pri čemu energija ostaje jednaka. Geometrijsko rasprostiranje razlikuje se za površinske i prostorne valove. Kod prostornih valova sferna valna fronta širi se od hipocentra u svim smjerovima. Energija je na valnoj fronti površine  $4\pi r^2$ , gdje je  $r$  radijus sferne valne fronte, sačuvana. Prema tome, energija po jedinici valne fronte smanjuje se kao  $1/r^2$ , a amplituda se smanjuje kao  $1/r$ . Valna fronta površinskih valova u prvoj približnosti prstenastog je oblika pa gustoća energije u tom slučaju pada s  $r$ , a amplituda valova s  $\sqrt{r}$  (Stein i Wysession, 2003).

Zemlja je slojevit planet u kojem su vertikalne varijacije primarne, a lateralne varijacije sekundarne. Iako su sekundarne, lateralne varijacije u brzini rasprostiranja vala uzorkuju promjene u gustoći energije što dovodi do smanjenja amplituda seizmičkih valova. Taj se proces zove višestrukost putanja (engl. *multipathing*) i on dovodi do fokusiranja i defokusiranja energije zbog tendencije vala da se lomi prema anomalijama malih brzina (Stein i Wysession, 2003). Višestrukost putanja i geometrijsko rasprostiranje spadaju u elastičke procese koji dovode do smanjenja amplitude. Uz njih, raspršenje je također elastički proces. U neelastičke procese spada intrinzična atenuacija (apsorpcija) koja zajedno s raspršenjem definira pojam seizmičke atenuacije.



## 2.2. Raspršenje

S efektom višestrukih putanja povezano je raspršenje seizmičkih valova. Ovisno o tome kakav je odnos veličine heterogenosti u mediju i valne duljine te duljine puta i valne duljine, može se govoriti o raspršenju ili višestrukosti putanja. Kada je heterogenost puno veća od valne duljine, stazu vala promatra se kao zasebnu putanju deformiranu zbog anomalije. Ako su heterogenosti veličinom bliže valnoj duljini, može se govoriti o raspršenju. U slučaju kada su heterogenosti puno manje od valne duljine, možemo govoriti o mediju kojem su ukupna svojstva promijenjena (Stein i Wysession, 2003).

Raspršenje je zapravo elastički proces redistribucije energije vala refleksijom, refrakcijom i konverzijom na heterogenostima u sredstvu. Raspršenje je posebno važno kod proučavanja kontinentalne kore koja se sastoji od mnogo tankih slojeva, ali i heterogenosti različitih veličina koje su rezultat evolucije kontinenta milijunima godina. Te strukture ne utječu na valove valne duljine veće od nekoliko desetaka kilometara, ali na kraće valne duljine mogu utjecati kao Huygensov izvor. Raspršena energija dolazi do prijemnika nakon početnog pulsa koji je putovao najbržim putem po Fermatovu principu. Koda-valovi su dokaz postojanja raspršenja seizmičkih valova i na seizmogramu su vidljivi u obliku repa sastavljena od nekoherentnih oscilacija. Raspršena energija koja dolazi do prijemnika iz različitih smjerova nije polarizirana, za razliku od izravna vala.

Raspršenju se može pristupiti na dva načina: deterministički i statistički. U determinističkom pristupu proučava se medij s mnogo različitih raspršivača, no njega je teško primijeniti zbog velike osjetljivosti valova na detalje te zato što val na svom putu nailazi na velik broj raspršivača, odnosno heterogenosti. U tim slučajevima raspršenju se pristupa statistički gdje relativno mali broj statističkih parametara opisuje prosječna svojstva heterogenog medija te se promatra statistički učinak na valno polje (Aki i Chouet, 1975). Statistički pristup osobito je pogodan za razmatranje kratkoperiodičkih valova na koje snažno utječu mehanizam u žarištu i parametri sredstva. Statistički pristup koristi se i pri promatranju koda-valova.

Razlikuju se četiri propagacijska režima s obzirom na parametre  $ka = 2\pi a/\lambda$  i  $L/a$  pri čemu je  $k$  valni broj,  $a$  srednja dužina raspršivača,  $\lambda$  valna duljina, a  $L$  linearna dimenzija poremećenog područja (Wu i Aki, 1988):

- kvazi-homogeni režim: slučaj kada je  $ka < 0.01$  što znači da je valna duljina puno veća od heterogenosti ( $\lambda \gg a$ ) pa val ne „primjećuje“ heterogenost, a sredstvo se može promatrati kao da je po dijelovima homogeno,
- Rayleighjevo raspršenje: slučaj kada je  $ka \ll 1$  ( $ka < 0.1$ ); valna duljina još je uvijek veća od heterogenosti, ali ne kao u prvom slučaju, a snaga je proporcionalna s  $k^4$ ,
- Mieovo raspršenje (raspršenje velikih kutova): slučaj kada vrijedi  $ka \approx 1$  ( $0.1 < ka < 10$ ) pri čemu su valna duljina i heterogenosti približno jednake,
- raspršenje pod malim kutovima: slučaj kada vrijedi  $ka \gg 1$  što znači da je valna duljina puno manja od heterogenosti, a to uzrokuje raspršenje energije većinom unaprijed te se većinom smatra problemom fokusiranja, difrakcije i interferencije.

Ovdje je najvažnije Mievo raspršenje zbog toga što ono najviše pridonosi nastanku koda-valova. Energija se raspršuje pod velikim kutovima u različitim smjerovima, u odnosu na smjer propagacije primarnog vala, i to najviše pridonosi pojavi atenuacije. Problemu raspršenja standardno se pristupa perturbativnim računom gdje se heterogeno, izotropno elastično sredstvo razlaže na homogeno (referentno, neporemećeno) sredstvo i perturbacije. Perturbativni račun prikladan je za slabu nehomogenost.

### 2.3. *Koda-valovi*

Koda-valovi su nekoherentni valovi uzorkovani superpozicijom uglavnom S-valova, ali i površinskih valova, raspršenih na heterogenostima prema modelu jednostrukog raspršenja unatrag. Koda je dio seizmograma lokalnog potresa u kojem amplitude trnu u vremenu gotovo eksponencijalno. Iako postoji koda P- i S-valova, najčešće se gleda samo koda S-valova jer su na P-kodu superponirane izravne S-faze, a S-koda je općenito i dulja. Za početak kode najčešće se uzima dvostruko vrijeme putovanja S-valova,  $2t_S$ , no nekad se u praksi uzima i  $1.5t_S$ .

Problemu koda-valova pristupa se statistički budući da raspršeno valno polje nastaje raspršenjem unatrag na velikom broju heterogenosti u unutrašnjosti Zemlje, u slučaju unatrag raspršenih valova, što je prvi predložio Aki (1969). Pravo mjesto i vrijeme za traženje unatrag raspršenih valova blizu je hipocentra te dugo nakon prolaska primarnih valova, odnosno u kodi lokalnih potresa. Aki i Chouet (1975) opisali su šest važnih svojstava kode:

1. Ovisnost spektralnog sadržaja seizmograma o prijašnjem putu razlikuje se za različite dijelove seizmograma. Rani dijelovi seizmograma podosta ovise o putanji valova dok se spektri koda-valova na različitim postajama gotovo i ne razlikuju.
2. Za neki lokalni potres (do oko 100 km epicentralne udaljenosti) ukupno trajanje seizmograma gotovo je neovisno o epicentralnoj udaljenosti i azimutu, a ovisno je samo o magnitudi potresa.
3. Spektri snage koda-valova iz različitih lokalnih potresa trnu s vremenom na sličan način i neovisno o udaljenosti i prirodni puta između hipocentra i stanice.
4. Vremensko opadanje spektra snage koda-valova iz točke 3. neovisno je o magnitudi potresa.
5. Amplitude koda-valova ovise o lokalnoj geologiji na području seizmološke postaje (npr. pobuda može biti 5 - 8 puta veća na sedimentu nego granitu).
6. Proučavanje kode na gustom mreži seizmografa ukazuje na to da se ne radi o ravnim valovima koji dolaze iz hipocentra.

Nastanak koda-valova može se opisati pomoću nekoliko modela: model jednostrukog raspršenja unatrag, model izotropnog jednostrukog raspršenja unatrag, model difuzije, model toka energije i model višestrukog raspršenja (Sato i sur., 2012). Model jednostrukog raspršenja unatrag, koji je predložio Aki (1969), najčešće se koristi u praktičnom radu zbog svoje jednostavnosti.

Jedna od najčešćih metoda za određivanje atenuacije jest određivanje  $Q$ -faktora, odnosno  $Q_c$ -faktora, koja se temelji na atenuaciji koda-valova.  $Q_c$  opisuje ukupnu prosječnu atenuaciju cjelokupnog volumena sredstva što znači da to uključuje atenuaciju zbog pretvorbe elastične energije u toplinu (intrinzična atenuacija ili apsorpcija,  $Q_i$ ) i atenuacije zbog redistribucije energije valova zbog raspršenja na heterogenostima ( $Q_{sc}$ ). Stoga za ukupnu atenuaciju vrijedi:

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_{sc}}. \quad (2.1.)$$

Za model jednostrukog raspršenja unatrag razmatra se stvaranje raspršenih valova u homogenom poluprostoru sa slučajno raspoređenim heterogenim elementima. Raspršivači su uniformno raspoređeni. Model se temelji na pretpostavkama da izvor koincidira s mjestom opažanja na površini i da je raspršenje slabo (vrijedi Bornova aproksimacija). Višestruko raspršenje je zanemarivo. U ovom modelu koda-valovi superpozicija su nekoherentnih, unatrag raspršenih prostornih valova. U koda- $Q$  metodi za određivanje faktora dobrote koda-valova,  $Q_c$ , najčešće se koristi model jednostrukog raspršenja unatrag pri čemu se analiziraju visokofrekventni prostorni valovi, odnosno S-koda frekvencija 1 – 30 Hz.  $Q_c$ -faktor dobiven iz lokalnih potresa i navedenih frekvencija koristan je za proučavanje heterogenosti u litosferi dimenzija 0.1 – 10 km.

## 2.4. Intrinzična atenuacija

Intrinzična atenuacija posljedica je konverzije elastične (kinetičke) energije valova u toplinu zbog trenja, viskoznosti ili termoelastičkih procesa. Može se dobiti uvid u intrinzičnu atenuaciju proučavajući prigušen harmonijski oscilator sastavljen od elastične opruge i klipa (Stein i Wysession, 2003). Koristi se drugi Newtonov zakon,  $F = ma$ , kako bi se opisao pomak  $u(t)$  mase  $m$  na opruzi. Bez dodavanja prigušenja u sustav, on bi se zauvijek gibao bez gubitka energije. Prigušenje stvara otpor gibanju, sustav gubi energiju, a tijelo se s vremenom prestane gibati. Jednadžba takvog gibanja glasi

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

pri čemu je  $m$  masa opruge,  $\gamma$  faktor prigušenja,  $k$  konstanta elastičnosti opruge i  $u(t)$  pomak mase. Vlastita frekvencija ovog sustava je  $\omega_0^2 = k/m$ , a faktor prigušenja može se zapisati kao  $\gamma = \omega_0/Q$ . Dijeljenje jednadžbe (2.2.) s masom  $m$  i ubacivanjem kvadrata vlastite frekvencije i faktora prigušenja dobiva se

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

Navedena diferencijalna jednadžba, koja opisuje prigušen harmonijski oscilator, može se riješiti pretpostavkom da je pomak realni dio kompleksnog eksponencijala

$$u(t) = A_0 e^{ipt}, \quad (2.4.)$$

pri čemu je  $p$  kompleksni broj  $p = a + ib$ . To se može zapisati kao

$$u(t) = A_0 e^{-\frac{\omega_0}{2Q}t} e^{i\omega t}, \quad \omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}, \quad (2.5.)$$

pri čemu je  $A_0$  početna amplituda,  $e^{-\frac{\omega_0}{2Q}t}$  atenuacijski faktor uzrokovan trenjem, a  $e^{i\omega t}$  harmonijski dio. Gubitkom energije sustava s vremenom dolazi do smanjenja amplitude i promjene frekvencije osciliranja.

Energija osciliranja proporcionalna je kvadratu amplitude

$$E(t) = \frac{1}{2}kA(t)^2 = \frac{1}{2}kA_0^2 e^{-\frac{\omega_0}{Q}t} = E_0 e^{-\frac{\omega_0}{Q}t}. \quad (2.6.)$$

Faktor dobrote,  $Q$ , veličina je koja mjeri učinak smanjenja amplitude, odnosno gubitka energije zbog neelastičnosti sredstva. Opisuje se kao gubitak energije u jednoj oscilaciji:

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E}, \quad (2.7.)$$

pri čemu je  $\Delta E$  gubitak energije u jednoj oscilaciji, a  $E$  najveća energija deformacije u volumenu sredstva. Atenuacija je obrnuto proporcionalna  $Q$ -faktoru, a on se može odrediti iz nagiba pravca logaritma ovojnice oscilacija:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\omega_0}{2Q}t} \quad \rightarrow \quad \ln A(t) = \ln A_0 - \frac{\omega_0}{2Q}t \quad (2.8.)$$

ili iz omjera dviju susjednih amplituda iste faze:

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{\frac{\omega_0 T}{2Q}} = \left\{ T = \frac{2\pi}{\omega_0} \right\} = e^{\frac{\pi}{Q}} \quad \rightarrow \quad Q = \frac{\pi}{\ln \frac{A_1}{A_2}}. \quad (2.9.)$$

Ovakav model prigušenog harmoničkog oscilatora pretpostavlja linearnu atenuaciju:  $Q \neq Q(A(t))$ . Izvod i opis slučaja kad se u sustav doda vanjska sila ovisna o frekvenciji može se pronaći u Dasović (2015).

Važna razlika između raspršenja i intrinzične atenuacije, koje zajedno čine ukupnu atenuaciju, jest to što se u slučaju raspršenja energija redistribuira, ali nema gubitka energije u ukupnom valnom polju, dok kod intrinzične atenuacije razni mehanizmi pretvaraju elastičnu energiju u toplinu kroz trenje, viskoznost i termalnu relaksaciju. Iako se dosta raspravlja o tome koji proces dominira u ukupnoj atenuaciji i kako ih razdvojiti, najčešće se u istraživanjima proučava ukupna atenuacija (Sato i sur., 2012). Mnogi predloženi modeli intrinzične atenuacije temelje se na relaksacijskim mehanizmima koji imaju karakteristična relaksacijska vremena ovisna o fizičkim dimenzijama elemenata u stijenama. To karakteristično vrijeme vodi prema tome da  $Q^{-1}$  ima šiljak na određenoj frekvenciji te se naglo smanjuje s udalžavanjem od te frekvencije. Pod pretpostavkom da su stijene sastavljene od elemenata različitih dimenzija, atenuacija nastala tim mehanizmima bila bi neovisna o frekvenciji u nekom frekvencijskom rasponu. Kako bi seizmički valovi bili kauzalni, mora postojati ovisnost brzine i intrinzične atenuacije o frekvenciji (Sato i sur., 2012), a to su potvrdila razna laboratorijska i *in-situ* mjerenja. Kod razmatranja mehanizama nastanka intrinzične atenuacije potrebno je gledati modele čije su karakteristične frekvencije u frekvencijskom pojasu promatranih seizmičkih faza da bi se određen model mogao smatrati dominantnim mehanizmom intrinzične atenuacije u tom frekvencijskom pojasu. Svaki model mora biti u skladu s opažanjima

za atenuaciju S-valova koja najveću vrijednost ima u rasponu frekvencija između 0.01 i 0.5 Hz (Sato i sur., 2012).

Velik broj predloženih mehanizama intrinzične atenuacije baziran je na opažanjima da stijene Zemljine kore imaju mikroskopske pukotine i pore koje mogu sadržavati fluide. Te su strukture puno manjih dimenzija od valnih duljina regionalnih seizmičkih faza, a pukotine imaju velik utjecaj na brzinu P- i S-valova kroz stijene. Jedan od dominantnih parametara koji kontrolira frekvencijsku ovisnost mnogih atenuacijskih modela jest omjer širine i duljine pukotine  $d$  (engl. *crack aspect ratio*, Sato et al., 2012).

U Dasović (2015) navedeno je nekoliko kategorija prema kojima se mogu podijeliti mehanizmi atenuacije:

- 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 slično.

Različiti mehanizmi dovodit će do intrinzične atenuacije ovisno o dubini, temperaturi, tlaku, veličini i obliku pukotina, vrsti i količini fluida te frekvencijama što intrinzičnu atenuaciju čini vrlo složenim procesom.

## 3. Metoda i analiza podataka

### 3.1. *MuRAT*

MuRAT (engl. *Multi-Resolution seismic Attenuation Tomography*) je Matlab paket za tomografiju seizmičke atenuacije, raspršenja i apsorpcije koji koristi izravne i koda valove na različitim frekvencijama. MuRAT je kod otvorenog pristupa i uz pripadajuću dokumentaciju dostupan je na GitHub-u (<https://github.com/LucaDeSiena/MuRAT>). Prvu verziju MuRAT-a (*MuRAT1.0*) razvio je Luca De Siena te ju je objavio 2014. godine, a nakon toga uslijedila je verzija *MuRAT2D*. Najnovija verzija, *MuRAT3.0*, objavljena je 2021. godine i služi za prostorni prikaz totalne atenuacije, raspršenja i apsorpcije koristeći informacije iz jednog seizmograma. U ovom radu korištena je verzija *MURAT3.0*. MuRAT je posebno dizajniran za analize i oslikavanje heterogenih struktura u kori (kao što su rasjedni sustavi) te vulkanska područja za koja se dosad najviše koristio.

S obzirom na mehanizam atenuacije koji se želi istraživati, MuRAT nudi tri opcije koje su detaljnije opisane u MuRAT-ovoj dokumentaciji. Može se odrediti atenuacija izravnih P- i S-valova na željenom području za što se koristi metoda normiranja kodom koja je korištena i u ovom radu. Prvi su navedenu metodu primijenjenu u tomografiji opisali Del Pezzo i sur. (2006), a dodatno su ju razvili De Siena i sur. (2009) i De Siena i sur. (2010). Prednost je metode u tome što se uklanjaju efekti izvora i lokalnog tla te što se sve potrebne informacije za korištenje ove metode mogu dobiti iz jednog seizmograma. U primjeni metode određuju se energije izravnih valova što može biti problematično ovisno o frekvenciji, heterogenosti i udaljenosti izvora i prijemnika. Zbog toga je poželjno najprije provjeriti postoji li ovisnost energije izravnih valova o hipocentralnoj udaljenosti, odnosno smanjuje li se logaritam omjera energija izravnih i koda-valova linearno s vremenom. Ovom metodom određuju se faktor dobrote  $Q$  i faktora geometrijskog širenja  $\gamma$ . Druga je opcija istraživanje atenuacije zbog raspršenja kroz kašnjenje maksimalne energije ovojnice od trenutka nastanka potresa ili nailaska P-faze (engl. *peak delay*). Tijekom propagacije, ovojnica vala proširuje se zbog raspršenja i difrakcije. Prednosti su ove metode što se njome mogu dobiti sve informacije iz jednog seizmograma, a dokazana je i osjetljivost na strukturne informacije i geološke granice. Temeljni rad u kojem se primjenjuje proširenje ovojnice je onaj Akija i Choueta (1975). Više o navedenoj metodi i temeljnim pretpostavkama može se pronaći u MuRAT-ovoj dokumentaciji te nekim od znanstvenih radova koji su se bavili navedenom metodom istraživanja atenuacije raspršenja (De Siena i sur., 2016; Sato, 2015). Kao treća opcija u MuRAT-u nudi se analiza apsorpcije kroz atenuaciju kode. Koristi se metoda višestrukih prozora (engl. *Multiple Lapse Time Window Analysis*, skraćeno MLTWA). Analiziraju se tri dijela ovojnice seizmograma lokalnog potresa i uspoređuju s modeliranim vrijednostima kako bi se odredili  $Q_i$  i  $Q_{sc}$ . Prednosti navedene metode su: dokazana osjetljivost na fluide, informacije o strukturama blizu izvora i prijemnika visoke rezolucije, potpun proces inverzije te su, kao i za prijašnje metode, sve informacije dobivene iz jednog seizmograma. Kao i u metodi normiranja kodom, ovdje se koriste koda-valovi. Metoda MLTWA služi za razdvajanje atenuacije raspršenja  $Q_s^{-1}$  i apsorpcije  $Q_i^{-1}$ , a to se provodi kroz određivanje duljine slobodnog puta  $L_e = Q_s^{-1} + Q_i^{-1}$  i seizmičkog albeda  $B_0 = \frac{Q_s^{-1}}{L_e}$ . Više o primjeni ove metode s

programskim paketom MuRAT te prikazom atenuacije kode u prostoru pomoću jezgri (kernela) može se pronaći u MuRAT-ovoj dokumentaciji. Neki su od znanstvenih radova u kojima se primijenila ova metoda: De Siena i sur. (2016), Del Pezzo i sur. (2016), De Siena i sur. (2017), Akande i sur. (2019), Sketsiou i sur. (2020).

U slučaju kada se radi istraživanje atenuacije kode ili izravnih valova, MuRAT radi postupak inverzije. U programu su moguća dva pristupa inverziji koje korisnik može odabrati – Tihonovljeva regularizacija i iterativna konjugirana gradijentna metoda najmanjih kvadrata (engl. *iterative conjugate gradient least squares method*, skraćeno CGLS). Za Tihonovljevu regularizaciju koristi se Matlab paket *regtools* koji je razvio Per Christian Hansen (Hansen, 2007). Za CGLS metodu koriste se *IRTools* za iterativnu regularizaciju (Gazzola i sur., 2019). Za inverzije potrebni su parametri regularizacije za svaku frekvenciju. Kako bi se parametri odabrali, program MuRAT izračuna L-krivulju za slučaj Tihonovljeve regularizacije odnosno funkciju gubitka (engl. *cost function*) za slučaj CGLS metode. Detaljnije o Tihonovoj regularizaciji, L-krivulji i odabiru parametra regularizacije na istoj te CGLS metodi može se pronaći u Aster i sur. (2005). CGLS metoda pokazala se boljim odabirom jer nudi više stabilnosti za veće inverzne probleme, a vizualizacija funkcije gubitka dopušta analizu i usporedbu dobivenih parametara regularizacije (Rawlinson i Spakman, 2016). Zbog navedenih je razloga CGLS metoda korištena u ovom radu.

Loše uvjetovani inverzni problemi, koji su česti u seizmologiji, su oni problemi u kojima više od jednog modela zadovoljava opažanja, a ti su modeli često nestabilni s obzirom na male promjene u šumu nastalom od podataka i početnim uvjetima osim ako se ne primijeni regularizacija (Rawlinson i sur., 2014). Regularizacija je stavljanje različitih ograničenja na model, uz ona koja daju podatci, npr. u obliku prigušenja i izgladenosti modela (Rawlinson i Sambridge, 2003). Upravo je stabilnost (robusnost) modela ono prema čemu se teži u seizmičkoj tomografiji, no nju je ponekad teško točno odrediti zbog kombinacija implicitne i eksplicitne regularizacije, slabijeg znanja o podatkovnom šumu, nepouzdanih ulaznih informacija te pojednostavljenja pretpostavki koje se rade u inverziji (npr. aproksimacija zraka, zanemarivanje anizotropije, linearizacija). Stabilnost se procjenjuje analizama osjetljivosti, odnosno sintetičkim testovima koji su prvotno uvedeni kako bi se istražila prostorna rezolucija u većim inverznim problemima te su standardni način ispitivanja rezolucije dobivenih modela. U sintetičkim testovima definira se sintetički model i generira se umjetni skup podataka za taj model koristeći stvarnu raspodjelu izvora i prijemnika. Zatim se provodi inverzija kako bi se dobio rekonstruirani model. Razlika između rekonstruiranog modela i onog sintetičkog daje uvid u rezoluciju koja se postiže određenim skupom podataka. MuRAT radi dvije vrste sintetičkih testova – tzv. *checkerboard* testove i *spike* testove. U *checkerboard* testovima sintetički model definiran je kao alternirajući uzorak pozitivnih i negativnih anomalija (u odnosu na neku referentnu vrijednost) u prostoru zbog čega izgledom podsjeća na šahovnicu. Inverzija takvog ulaznog modela daje uvid u razmazivanje anomalija (engl. *smearing*) u tomografskom rješenju. Regije u kojima je uzorak jasno vidljiv su one u kojima se strukture konačnog modela mogu smatrati dobro određenima, iako se u nekim slučajevima pokazalo da je moguće da su strukture manjih dimenzija *checkerboard* testa bolje razlučene od struktura većih dimenzija (Lévêque i sur., 1993) te da uspješnost rekonstrukcije ulaznog modela varira ovisno o odabranom početnom modelu. Neki od nedostataka *checkerboard* testa uključuju i pružanje isključivo indirektnog dokaza rezolucije i nepouzdanosti, davanje potencijalno pogrešnog dojma o dimenzijama koje mogu biti razlučene testom te dobivanje krive slike strukturne iskrivljenosti i razma-

zanosti koja je prouzročena pokrivenošću podacima. *Spike* testovi razlikuju se od *checkerboard* testova u tome što imaju manji broj anomalija (ili samo jednu), odnosno „šiljaka“, međusobno udaljenijih na mreži.

MuRAT koristi originalni Fortran kod za savijanje zraka u Matlabu (Block, 1991). Zraka se savija tako da minimizira vrijeme putovanja unutar modela brzine od izvora do prijemnika (engl. *ray tracing*).

### 3.2. Metoda normiranja kodom

Metodu normiranja kodom (engl. *coda-normalization method*) za izravne S-valove opisao je Aki (1980). U tom opisu nisu korištene pretpostavke o frekvencijskoj ovisnosti faktora dobrote  $Q$  i spektru izvora potresa. Umjesto toga,  $Q$  se određuje zasebno za različite frekvencije. Kasnije je ta metoda proširena u Yoshimoto i sur. (1993) za izravne P-valove.

Metoda normiranja kodom temelji se na proučavanju omjera spektralnih amplituda izravnih S- i P-valova,  $A_S(f)$  i  $A_P(f)$ , i spektralnih amplituda koda-valova,  $A_c(f, t)$ , pri čemu je  $t$  vrijeme mjereno od trenutka nastanka potresa. Smatra se da je u nekom trenutku  $t_c$  oslobođena energija uniformno raspoređena po volumenu koji obuhvaća izvor. U Sato i sur. (2012) navedeno je nekoliko opažanja koja su potaknula nastanak metode normiranja kodom: duljina seizmograma zabilježena na nekoj seizmološkoj postaji proporcionalna je magnitudi potresa, valovi lokalnih potresa imaju slične ovojnice pojasno-filtriranog signala za vrijeme dvostruko veće od putovanja izravnog S-vala neovisno o udaljenosti izvora i prijemnika.

Za vrijeme ( $t_c$ ) dvostruko veće od vremena putovanja S-vala, spektralna amplituda kode,  $A_c(f, t_c)$ , neovisna je o hipocentralnoj udaljenosti  $r$  i može se pisati kao

$$A_c(f, t_c) = S_S(f)P(f, t_c)G(f, \Psi)I(f), \quad (3.1.)$$

pri čemu je  $f$  frekvencija,  $S_S(f)$  funkcija izvora koja opisuje oblik vala emitiran u izvoru,  $P(f, t_c)$  faktor koji opisuje kako se spektralna amplituda koda-valova smanjuje s proteklom vremenom,  $G(f)$  amplifikacijski faktor koji opisuje utjecaj lokalne podloge ( $\Psi$  je upadni kut zrake na stanici) i  $I(f)$  instrumentalni odziv. Spektralna amplituda kode proporcionalna je spektralnoj amplitudi izravnih S-valova čiji je izraz

$$A_S(f, r) = R_{\theta\phi}S_S(f)r^{-\gamma}I(f)G(f, \Psi)\exp\left(-\frac{\pi f}{Q_S(f)v_S}r\right), \quad (3.2.)$$

pri čemu  $R_{\theta\phi}$  opisuje razdiobu zračenja izvora,  $Q_S$  je faktor dobrote S-vala,  $v_S$  srednja brzina S-vala u mediju,  $r$  udaljenost od izvora do prijemnika, a  $\gamma$  faktor geometrijskog širenja. Atenuacija koda-valova može se izraziti kao

$$P(f, t_c) \simeq t_c^{-n}e^{-2\pi fQ_c^{-1}t_c}, \quad (3.3.)$$

pri čemu je  $n$  eksponent za koji se smanjuje ovojnica, a  $Q_c$ -faktor dobrote kode. Amplituda  $A_c(f, t_c)$  ne uključuje utjecaj razdiobe zračenja izvora. Kako bi se normirala spektralna amplituda S-valova spektralnom amplitudom koda-valova, podijeli se jednadžba (3.2.) jednadžbom (3.1.):



$$\frac{A_S(f, t_c)}{R_{\theta\phi} A_c(f, t_c)} = r^{-\gamma} \frac{G(f, \Psi)}{G(f)} \exp\left(-\frac{\pi f}{Q_S(f) v_S} r\right) \frac{1}{P(f, t_c)}, \quad (3.4.)$$

pri čemu se doprinosi funkcije izvora  $S_S(f)$  i instrumentalnog odziva  $I(f)$  pokrate. Budući da se početni dio kode sastoji od nasumično raspršenih valova, koherentnost i razdioba zračenja izvora se izgube, stoga u slučaju pažljivo odabranog prozora u kojem gledamo kodu vrijedi  $R_{\theta\phi} = 1$  (Sketsiou i sur., 2021). U nekom frekvencijskom pojasu s odabranim vremenom  $t_c$  kao početkom prozora kode,  $P(f, t_c)$  može se u metodi normiranja kodom smatrati konstantnim (Del Pezzo i sur., 2006; Sato i sur., 2012). Logaritmiranjem jednadžbe (3.4.) dobiva se:

$$\ln\left[\frac{A_S(f, t_c)}{A_c(f, t_c)}\right] = \ln(r^{-\gamma}) + \ln\left[\frac{G(f, \Psi)}{G(f)}\right] - \frac{\pi f}{Q_S(f) v_S} r - \ln P(f, t_c). \quad (3.5.)$$

Računanjem  $G(f, \Psi)$  preko velikog broja potresa ukloni se ovisnost o kutu upada  $\Psi$  čime se dobiva  $\frac{\langle G(f, \Psi) \rangle}{G(f)} = 1$ . Jednadžba (3.5.) podijeli se s  $\pi f$  kako bi se dobila konačna jednadžba metode normiranja kodom:

$$\frac{1}{\pi f} \ln\left[\frac{A_S(f, t_c)}{A_c(f, t_c)}\right] = -Q_S^{-1} \frac{r}{v_S} - \gamma \left[\frac{\ln(r)}{\pi f}\right] + K_c(f), \quad (3.6.)$$

pri čemu je  $K_c(f) = \frac{\ln P(f, t_c)}{\pi f}$ . Dobivena linearna jednadžba rješava se za tri nepoznanice ( $\ln P(f, t_c)$ ,  $\gamma$ ,  $Q_S$ ) za što je potrebno odabrati i frekvenciju te znati hipocentralne udaljenosti i srednje brzine P- i S-valova u Zemljinoj kori ( $v_P, v_S$ ). Ako je  $Q_c$  poznat za svaki par izvora i prijemnika, tada se može unaprijed procijeniti  $P(f, t_c)$  koristeći izraz (3.3.). U daljnjem se postupku linearnom regresijom određuju srednji faktor dobrote  $Q_{P,S}$  i faktor geometrijskog širenja  $\gamma$ .

Yoshimoto i sur. (1993) pokazali su da potresi unutar malog intervala magnituda pokazuju jednak spektralni oblik P- i S-valova pa se zbog toga može pisati

$$\frac{S_P(f)}{S_S(f)} \approx konst(f), \quad (3.7.)$$

odnosno

$$A_c(f, t_c) \propto S_S(f) \propto S_P(f). \quad (3.8.)$$

Prethodni izraz ukazuje na to da se može koristiti spektralna amplituda kode i jednadžba (3.6.) kako bi se dobila jednadžba metode normiranja kodom za P-valove:

$$\frac{1}{\pi f} \ln\left[\frac{A_P(f, t_c)}{A_c(f, t_c)}\right] = -Q_P^{-1} \frac{r}{v_P} - \gamma \left[\frac{\ln(r)}{\pi f}\right] + K_c(f). \quad (3.9.)$$

Isto se može zapisati i pomoću energija P- i S-valova te koda-valova:

$$\frac{1}{2\pi f} \ln\left[\frac{E_{P,S}(f, t_c)}{E_c(f, t_c)}\right] + \frac{1}{2\pi f} \ln P(f, t_c) = -\frac{\gamma \ln(r)}{2\pi f} - Q_{P,S}(f)^{-1} t. \quad (3.10.)$$

Taj je način primijenjen u *MURAT3.0*.

Obično se za faktor geometrijskog širenja izravnih valova uzima  $\gamma = 1$ . Ovdje se on računa uz faktor dobrote i time se dobiva uvid u odstupanje od teorije.

U brojnim se istraživanjima na raznim lokacijama pokazalo kako je frekvencijska ovisnost faktora dobrote  $Q$  za izravne P- i S-valove jednaka

$$Q_{P,S}(f) = Q_{0,P,S} f^{n_{P,S}}, \quad (3.11.)$$

pri čemu su  $Q_{0,P} = Q_P(f = f_0 = 1Hz)$  i  $Q_{0,S} = Q_S(f = f_0 = 1Hz)$ . Logaritmiranjem prethodnog izraza dobije se oblik na koji se može primijeniti linearna regresija. Ovakvo izračunati  $Q$ -faktori izravnih valova daju srednju atenuaciju u nekom istraživanom području (Dasović, 2015).

### 3.3. Postupak tomografije

Del Pezzo i sur. (2006) razvili su postupak, kasnije primijenjen u De Siena i sur. (2014), koji se temelji na korištenju formula (3.6.) i (3.9.) kako bi se dobio tomografski izravni model (engl. *forward model*). Iz tih se jednadžbi linearnom regresijom dobiva srednji faktor dobrote izravnog P- ili S-vala  $Q_{P,S}^{-1}$ , faktor geometrijskog širenja  $\gamma$  i  $K_c$ . Kao što je ranije navedeno,  $K_c$  ovisi o  $P(f, t_c)$  koji je konstantan za neki frekvencijski pojas i vrijeme  $t_c$  pa jedina nepoznanica u  $K_c$  ostaje  $Q_c$ . Faktor dobrote koda-valova,  $Q_c$ , dobije se eksperimentalno za svaki par izvora i prijemnika te se koristi za dobivanje faktora dobrote izravnih valova  $Q_{P,S}$ .

Navedeni pretkorak u računu, procjena faktora  $Q_c$ , omogućuje definiranje vektora podataka,  $d_k$ , za svaki put  $k$  između izvora i prijemnika:

$$d_{P,S}^k = \frac{1}{\pi f} \ln \left[ \frac{A_{P,S}^k(f, t_c)}{A_c^k(f, t_c)} \right] - K_c(f, t_c) + \frac{\gamma}{\pi f} \ln(r) + Q_{P,S}^{-1} v_{P,S}^{-1}. \quad (3.12.)$$

Područje koje se proučava podijeli se u mrežu od  $M$  jednako razmaknutih točaka (čvorova). Koriste se jednadžbe (3.6.) i (3.9.) kako bi se dobio izravni model koristeći novi vektor podataka te definiranjem inverzne matrice  $G_{P,S}^{kB}$ :

$$d_{P,S}^k = - \sum_{B=1}^M l_{P,S}^{kB} s_{P,S}^B [\delta(Q_{P,S}^B)^{-1}] = \sum_{B=1}^M G_{P,S}^{kB} [\delta(Q_{P,S}^B)^{-1}], \quad (3.13.)$$

pri čemu  $k$  označava jedan put od izvora do prijemnika, odnosno jednu zraku,  $B$  označava  $B$ -ti blok od ukupno  $M$  blokova kroz koje  $k$ -ta zraka prođe,  $l_{kB}$  je duljina segmenta  $k$ -te zrake koja prolazi kroz  $B$ -ti blok, a  $s_B$  je sporost na segmentu zrake  $l_{kB}$  u  $B$ -tom bloku koja se općenito definira kao  $s(l) = 1/v(l)$ . Ovo se prepoznaje kao inverzni problem koji se u općenitom matričnom obliku može zapisati kao  $\mathbf{d}(\mathbf{f}) = \mathbf{G}\mathbf{m}(\mathbf{f})$  pri čemu je vektor podataka  $d(f)$  definiran u (3.10.), inverzna matrica  $G_{P,S}^{kB}$  je pravokutna matrica u kojoj su elementi umnošci sporosti na određenom segmentu i njegove duljine, a  $\mathbf{m}$  je model koji se želi dobiti, odnosno matrica od jednog stupca u kojoj su elementi varijacije  $\delta(Q_{P,S}^B)^{-1}$  od srednje vrijednosti faktora dobrote  $Q_{P,S}^{-1}$  po blokovima.

Može se pisati da je ukupan faktor dobrote u svakom bloku jednak:

$$(Q_{P,S}^B)^{-1} = (Q_{P,S})^{-1} + \delta(Q_{P,S}^B)^{-1}. \quad (3.14.)$$

Primjenjuje se iterativna konjugirana metoda najmanjih kvadrata za rješavanje inverznog problema.

### 3.4. Podatci

U istraživanju korišteni su seizmogrami deset seizmoloških postaja u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida: Dugi otok (DUGI), Hvar (HVAR), Kijevo (KIJV), Makarska (MAKA), Morići (MORI), Ričice (RICI), Udbina (UDBI), Vinovac (VINV), Vir (VIRC) i Žirje (ZIRJ). U tablici 3.1. navedene su seizmološke postaje, njihove lokacije, instrumenti s kojima su zabilježeni ovdje korišteni potresi i frekvencije uzorkovanja, promatrano razdoblje za svaku stanicu te broj potresa uzet po stanici za metodu normiranja kodom ovisno računa li se atenuacija izravnih P- ili S-valova. Razmatran je poligon površine 13 904 km<sup>2</sup> koji okružuje stanice kako bi se istražilo isključivo područje unutar njega. Uzeti su potresi lokalnih magnituda  $M_L$  većih ili jednakih 2.0 koji su se dogodili u razdoblju između 2015. i 2020. godine. Najveća zabilježena magnituda analiziranih potresa u ovom radu iznosi  $M_L = 4.7$ . Svi korišteni potresi imaju epicentar unutar poligona i hipocentralne udaljenosti između 30 i 130 km. Najveća je dubina potresa 40 km s epicentrom kod otoka Hvara, a većina potresa dogodila se na dubinama između 10 i 20 km. Svi su seizmogrami vizualno pregledani, a odbačeni su oni s prevelikim šumom, odnosno oni kod kojih je zapis bio teško uočljiv zbog šuma te oni koji su sadržavali prethodne ili naknadne potrese i smetnje. Konačan broj seizmograma korišten u MuRAT kodu za izračun atenuacije izravnih P-valova iznosi 844, odnosno 2 532 zapisa budući da su se uzele u obzir sve tri komponente. Za atenuaciju S-valova korišteno je ukupno 762 seizmograma, odnosno 2 286 zapisa. Sa svih je zapisa uklonjen instrumentalni odziv. Naknadno se, u samom MuRAT kodu, odbacuju potresi za koje vrijedi da je omjer signala i šuma ( $SNR$ ) manji ili jednak 2.0 pri čemu je početak mjerenja šuma 3 s nakon početka zapisa do nailaska P-vala. Na slici 3.1. prikazano je područje istraživanja s ocrtanom poligonom, seizmološkim postajama i potresima u različitim veličinama i nijansama boje prema magnitudi, odnosno dubini potresa. Također su označene točke T1 (44°5'34.50"N, 15°38'19.49"E) i T2 (43°35'38.92"N, 16°25'50.58"E) u kojima se uzimaju vertikalni presjeci u smjerovima sjever – jug (S – N) i istok – zapad (W – E). Metoda se provodi za četiri središnje frekvencije  $f_c = 3, 6, 12, 18$  Hz i za svaku frekvenciju bira se parametar regularizacije. Za P-valove parametri regularizacije, ovisno o frekvenciji, redom su 0.8, 0.6, 10 i 3 koji su dobiveni u MuRAT-u minimiziranjem funkcije gubitka, točnije za te parametre funkcija gubitka ima minimum. Za S-valove parametri regularizacije za četiri navedene frekvencije su 9, 3, 0.9 i 0.4.

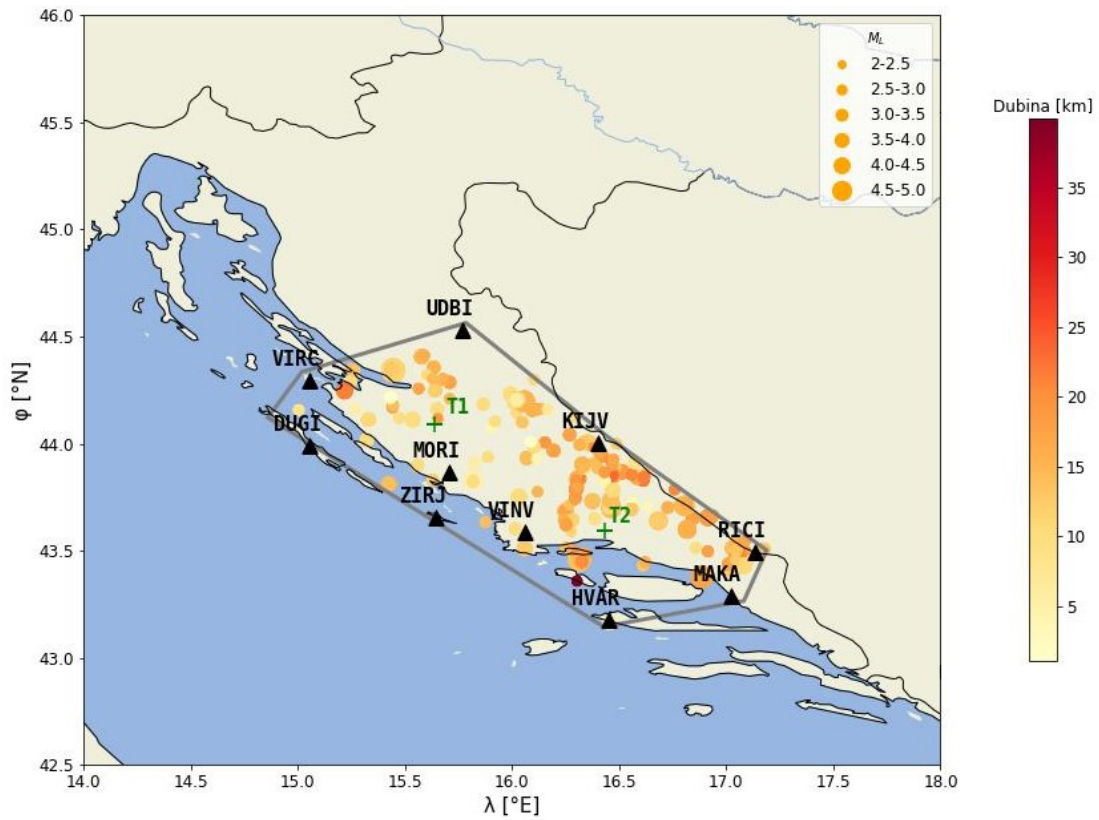
U program MuRAT može se učitati 1D ili 3D model brzina, ovisno o tome koji je dostupan. Ovdje se koristio Balkanski model brzina (B.C.I.S., 1972) koji je 1D i prema kojem su brzine valova u prvom sloju  $v_P = 5.8$  km/s i  $v_S = 3.45$  km/s do dubine 30 km, u drugom sloju  $v_P = 6.65$  km/s i  $v_S = 3.85$  km/s do dubine 40 km te  $v_P = 8.0$  km/s i  $v_S = 4.55$  km/s ispod dubine od 40 km. MuRAT uzima 1D model i proširuje ga u „lažni“ 3D model.

Sve informacije potrebne za primjenu metode normiranja kodom mogu se dobiti iz zapisa potresa određivanjem nastupa P- i S-faze ( $t_P, t_S$ ), duljine prozora P- i S-vala u kojem se računa energija ( $t_L$ ), vrijeme nastanka potresa ( $t_0$ ), početak kode ( $t_c$ ) i duljina prozora u kojem se mjeri energija kode ( $t_w$ ). Vremena nastupa P- i S-faza rezultat su analiza programom *SANDI* i preuzeta iz arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a. Kao početak mjerenja energije koda-valova uzima se  $t_c = 55$  s, a trajanje prozora  $t_w = 5$  s. Kod izravnih valova za duljinu prozora uzima se  $t_L = 4$  s kako bi se izbjegao ulazak S-faze u prozor za P-valove.

Kako bi se provela inverzija potrebno je područje istraživanja podijeliti u mrežu s pažljivo odabranim razmakom između čvorova kako bi rezolucija bila zadovoljavajuća. Odabrana je mreža gdje razmaci između čvorova, odnosno dimenzije blokova iznose  $23.2 \times 11.24 \times 4.5$  km.

**Tablica 3.1:** Oznake seizmoloških stanica, njihove lokacije i instrumenti, frekvencije uzorkovanja, razdoblje u kojem su zabilježeni seizmogrami te brojevi korištenih potresa za računanje atenuacije izravnih P- i S-valova.

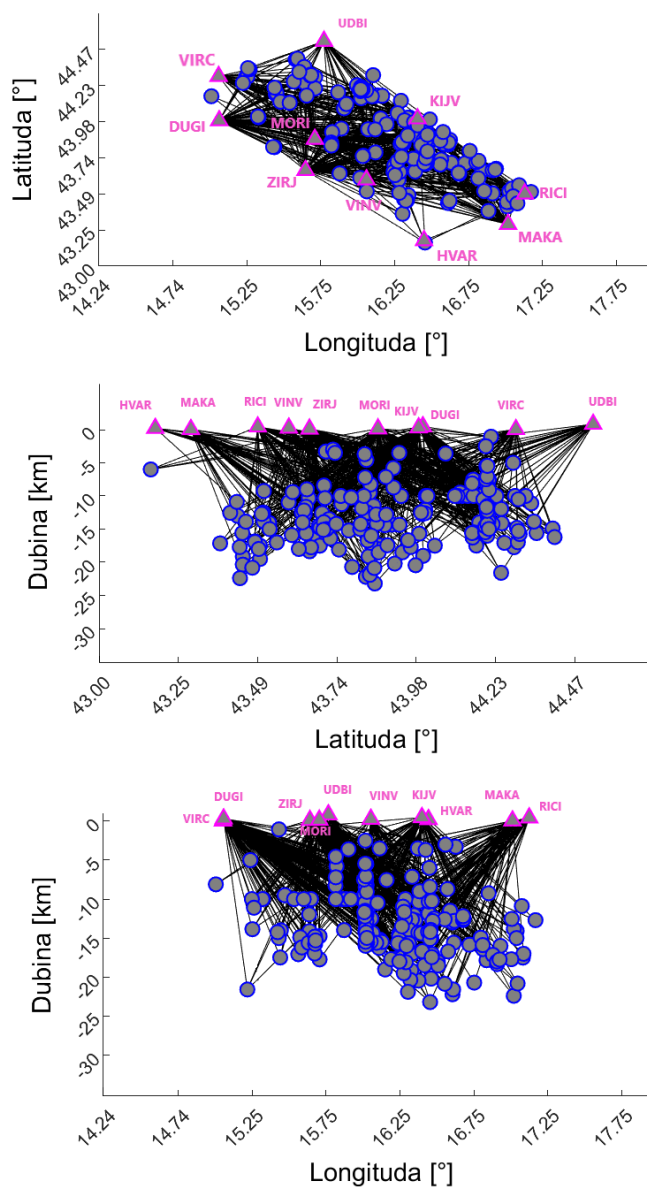
Postaja	Lokacija	Instrument	$f_S[Hz]$	Razdoblje	$N_P$	$N_S$
DUGI	43°59'30.48"N, 15°3'28.44"E	CMG-3ESPC	50	2015. – 2020.	129	121
HVAR	43°10'39.18"N, 16°26'56.18"E	STS-2, CMG-40TD	20, 50	2016. – 2020.	56	48
KIJV	44°0'17.58"N, 16°24'16.91"E	CMG-40T, CMG-3ESPC	50	2015. – 2020.	98	95
MAKA	43°17'15.76"N, 17°1'10.83"E	CMG-6TD	50	2015. – 2020.	54	46
MORI	43°51'57.66"N, 15°42'26.27"E	CMG-3ESPC	50	2015. – 2020.	152	137
RICI	43°29'39.84"S, 17°7'58.80"E	CMG-3ESPC	50	2016. – 2020.	69	58
UDBI	44°31'53.12"N, 15°46'9.66"E	CMG-40T	50	2015. – 2020.	49	42
VINV	43°35'25.80"N, 16°3'28.08"E	STS-2, CMG-40T	50	2016. – 2020.	67	63
VIRC	44°17'32.99"N, 15°3'14.23"E	CMG-40T	50	2016. – 2020.	63	60
ZIRJ	43°39'15.32"N, 15°38'38.01"E	LE-3D/20s	50	2015. – 2020.	107	92



**Slika 3.1.** Karta seizmoloških postaja (crni trokuti), epicentara potresa (kružići) prikazanih po dubini (nijanse crvene boje) te magnitudi (veličina kružića) unutar poligona za koji se radi analiza (siva linija).

## 4. Rezultati i diskusija

MuRAT koristi metodu savijanja i praćenja zrake prema odabranom modelu brzina. Duljine zraka i duljine segmenata zraka u svakom bloku spremaju se i koriste dalje u inverziji. Na slici 4.1. prikazan je primjer zraka korištenih u metodi normiranja kodom izravnih P-valova za frekvenciju 18 Hz. Prikazani su izvori potresa i seizmološke postaje te zrake između njih.



**Slika 4.1.** Prikaz žarišta i epicentara potresa, postaja te staza valova prema metodi savijanja i praćenja zraka.

## 4.1. Metoda normiranja kodom

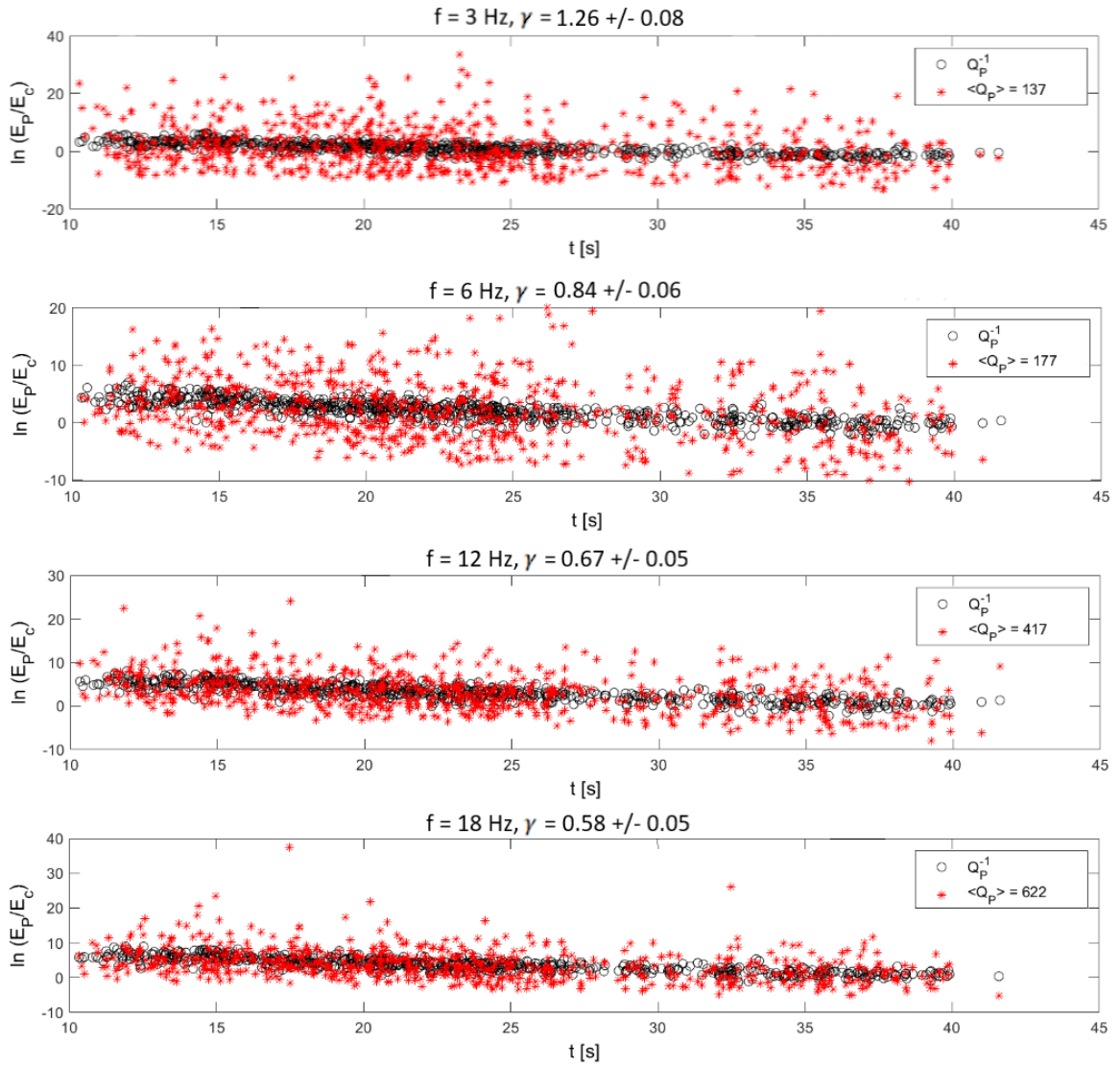
Prije provođenja metode normiranja kodom za atenuaciju izravnih valova korisno je provjeriti smanjuje li se energija izravnih valova linearno s hipocentralnom udaljenošću, odnosno vremenom putovanja vala. Prikazan je logaritam normalizirane spektralne energije (iz jednadžbe 3.10.) izravnih valova u ovisnosti o vremenu putovanja vala za izravne P-valove (slika 4.2.) i S-valove (slika 4.3.) te za četiri središnje frekvencije. Na grafu su crnim kružićima prikazani izračunati logaritmi normalizirane spektralne energije za parametre  $Q_{P,S}^{-1}$ , a crveno je prikazano teorijsko ponašanje logaritma normalizirane energije za faktor dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle$  usrednjen na cijelom području istraživanja. Može se primijetiti linearno smanjenje logaritma normalizirane energije s proteklom vremenom (crni kružići). Uspoređivanjem dobivenih podataka s teorijskima može se vidjeti kako za veće frekvencije izračunati podatci sve manje odstupaju od teorijskih za obje vrste izravnih valova.

Za svaku je frekvenciju inverzijom dobiven i faktor geometrijskog širenja  $\gamma$  (tablica 4.1.). Budući da se obično pretpostavlja da je  $\gamma = 1$  za izravne valove, može se vidjeti odstupanje od teorijske vrijednosti te samim time i procijeniti točnost parametara dobivenih inverzijom. Faktor geometrijskog širenja  $\gamma$  primjetno se smanjuje s povećanjem frekvencije, odnosno veće je odstupanje faktora  $\gamma$  od vrijednosti 1 za veće frekvencije. Najmanje odstupanje od teorijske vrijednosti je za  $f = 3$  Hz za S-valove, dok je najveće odstupanje za  $f = 18$  Hz za S-valove. Također je zanimljivo za primijetiti kako se vrijednosti faktora geometrijskog širenja za veće frekvencije približavaju vrijednosti  $\gamma = 0.5$  što je jednako vrijednosti geometrijskog širenja površinskih valova. To bi sugeriralo da se za veće frekvencije prevladavaju viši modovi površinskih valovi.

Generalno se može zaključiti kako se dobivene srednje vrijednosti faktora dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle$  (tablica 4.1.) povećaju s frekvencijama, iako je za S-valove na 6 Hz vidljivo odstupanje. U Dasović (2015) dobivene su frekvencijske ovisnosti faktora dobrote za izravne P- i S-valove na području središnjih Vanjskih Dinarida:  $Q_P = (84 \pm 3)f^{0.70 \pm 0.02}$ ,  $Q_S = (107 \pm 7)f^{0.67 \pm 0.03}$ . Ubace li se ovdje korištene četiri središnje frekvencije u prethodne izraze dobiju se srednji faktori dobrote (u tablici 4.1. označeni s  $\langle Q_{P,S} \rangle_D$ ) na promatranom području za te frekvencije. Usporedbom srednjih faktora dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle$  dobivenih u MuRAT-u s faktorima dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle_D$  izračunatih prema izrazima dobivenim u Dasović (2015), može se zaključiti kako odstupanja tih vrijednosti nisu velika unatoč različitim ulaznim parametrima i podacima. Razlike u vrijednostima mogu se objasniti korištenjem potpuno različitog skupa podataka (drugačije postaje i potresi) te uzimanjem različitih vrijednosti za faktor geometrijskog širenja (u Dasović (2015) koristi se  $\gamma = 1$ ).

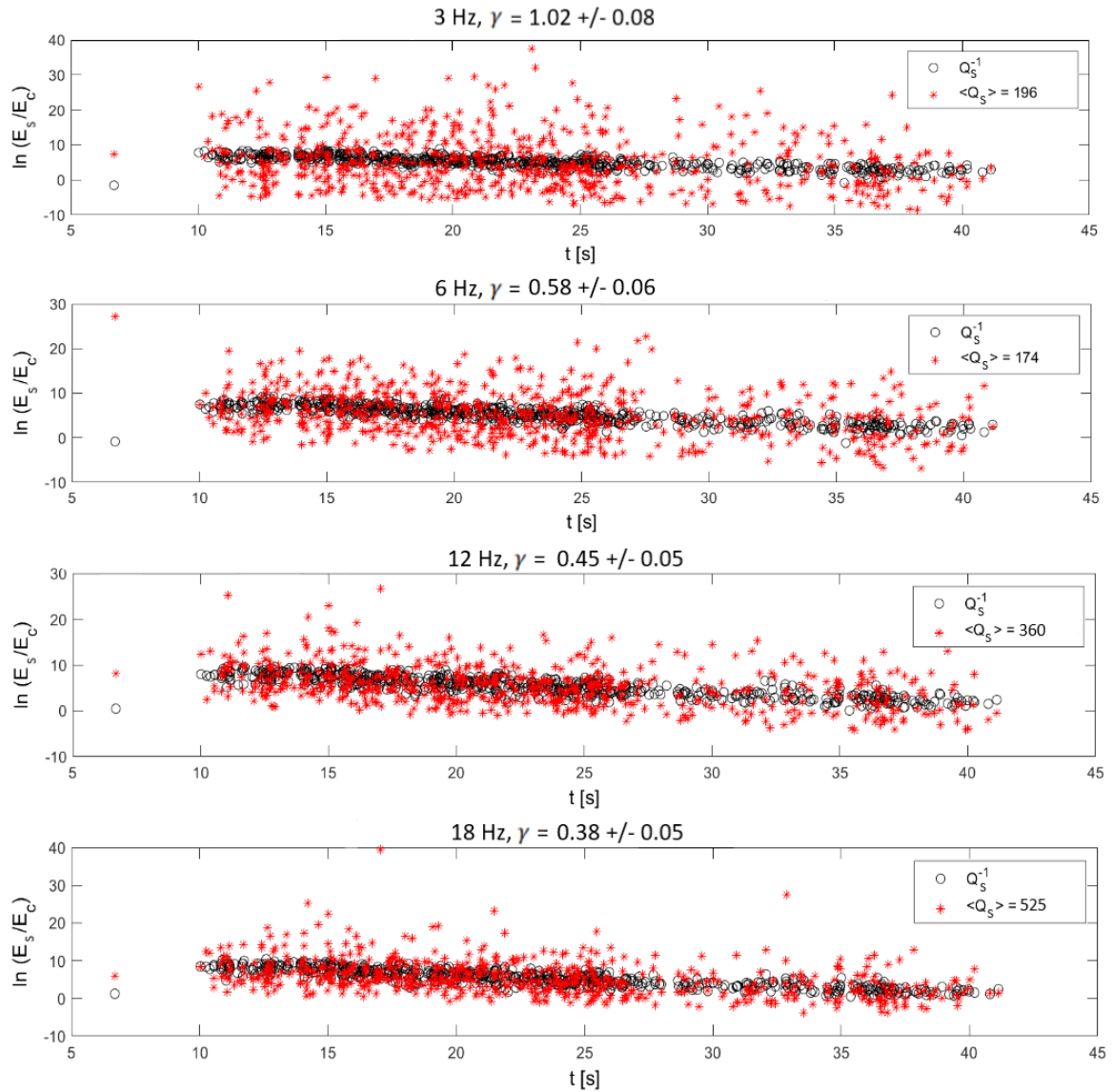
**Tablica 4.1:** Dobiveni faktori geometrijskog širenja  $\gamma_{P,S}$  te njihove nepouzdanosti, srednji faktori dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle$  i srednji faktori dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle_D$  izračunati prema izrazima  $Q_P = (84 \pm 3)f^{0.70 \pm 0.02}$ ,  $Q_S = (107 \pm 7)f^{0.67 \pm 0.03}$  dobivenima u Dasović (2015) za četiri središnje frekvencije.

$f$ [Hz]	$\gamma_P \pm \sigma_\gamma$	$\langle Q_P \rangle$	$\langle Q_P \rangle_D$	$\gamma_S \pm \sigma_\gamma$	$\langle Q_S \rangle$	$\langle Q_S \rangle_D$
3	$1.26 \pm 0.08$	137	181	$1.02 \pm 0.08$	196	223
6	$0.84 \pm 0.06$	177	294	$0.58 \pm 0.06$	174	355
12	$0.67 \pm 0.05$	417	478	$0.45 \pm 0.05$	360	566
18	$0.58 \pm 0.05$	622	635	$0.38 \pm 0.05$	525	742



**Slika 4.2.** Logaritam normirane spektralne energije izravnih P-valova u ovisnosti o proteklom vremenu za četiri središnje frekvencije.





**Slika 4.3.** Logaritam normirane spektralne energije izravnih S-valova u ovisnosti o proteklom vremenu.

## 4.2. Varijacije ukupne atenuacije izravnih P- i S-valova

Provedena je inverzija te su dobivene varijacije atenuacije  $\Delta Q_{P,S}^{-1}$  za četiri središnje frekvencije  $f_c = 3, 6, 12, 18$  Hz. Na slici 4.4. prikazane su varijacije atenuacije izravnih P-valova na tri različite dubine (0, 10 i 20 km) te četiri frekvencije. Isto je napravljeno i za S-valove (slika 4.5.). Varijacije su izračunate s obzirom na srednju vrijednost  $\langle Q_{P,S} \rangle$  izračunatu za cijelo područje za svaku frekvenciju. Nijanse crvene boje na slikama označavaju područja pozitivnih vrijednosti varijacija atenuacije, odnosno područja veće atenuacije u odnosu na srednju vrijednost za cijelo promatrano područje, dok nijanse plave boje označavaju područja manje atenuacije od prosječne.

Za P-valove (slika 4.4.) na 3 Hz kontrasti u varijaciji atenuacije su najveći. Na površini i na dubini 20 km za 3 Hz pozitivne varijacije (jača atenuacija) djeluju kao da su

umetnute u područja slabije atenuacije (negativnih varijacija). Kontrasti su također veliki na 20 km na svim frekvencijama gdje su uočljive izmjene točaka velikih negativnih i pozitivnih varijacija. Na dubini 20 km ispod postaje VIRC vidljiva je pozitivna anomalija za frekvencije 6, 12 i 18 Hz, ali nije vidljiva na tom mjestu za 3 Hz.

Za S-valove (slika 4.5.) veliki su kontrasti u varijaciji atenuacije na 20 km za sve frekvencije jednako kao i za P-valove. Općenito, dobro je slaganje lokacija pozitivnih i negativnih varijacija atenuacije P- i S-valova. Na površini se može izdvojiti područje zapadno od postaje UDBI gdje je vidljiva velika negativna varijacija atenuacije za 6, 12 i 18 Hz koja nije vidljiva za 3 Hz.

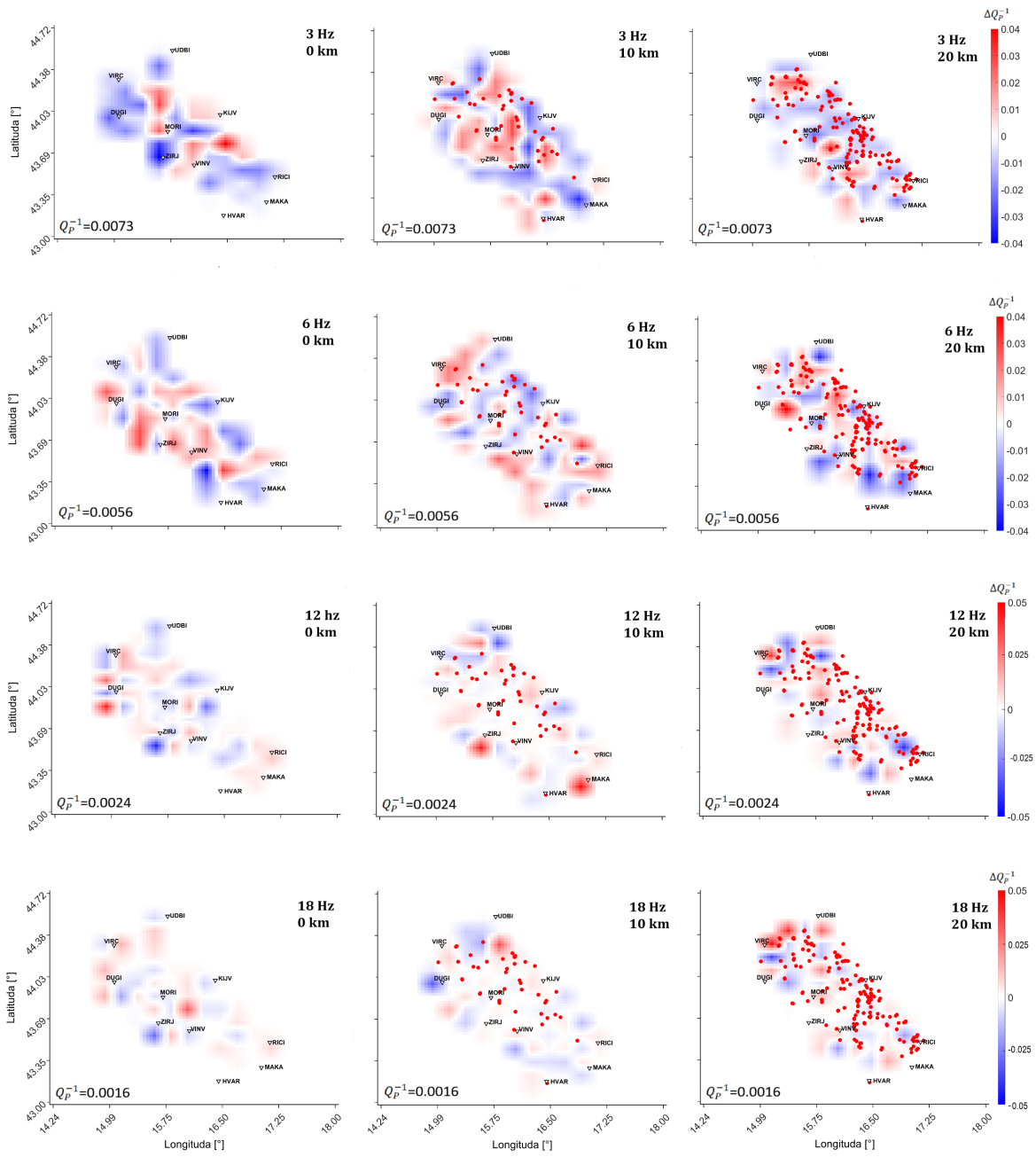
Za dvije točke T1(44°5'34.50"N, 15°38'19.49"E) i T2 (43°35'38.92"N, 16°25'50.58"E) označene zeleno na slici 3.1. uzimaju se vertikalni presjeci u smjerovima S – N i W – E. Ti su vertikalni presjeci prikazani na način da se gledaju posebno smjerovi W – E (longituda) te S – N (latituda) za obje točke. Na slikama vertikalnih presjeka vidljivo je kako su varijacije razlučive do otprilike 25 km dubine.

Za P-valove točka T1, koja je sjevernije, pokazuje veće kontraste u anomalijama atenuacije. Za presjek u smjeru W – E (slika 4.6.) najveće odstupanje atenuacije vidljivo je na oko 25 km ispod postaje DUGI za 6 Hz. Točka T2, koja je južnije, pokazuje izdužene anomalije koje se protežu od površine u dubinu (slika 4.7.). To je posebno uočljivo za frekvenciju 3 Hz gdje se lateralno izmjenjuju područja pozitivnih i negativnih varijacija.

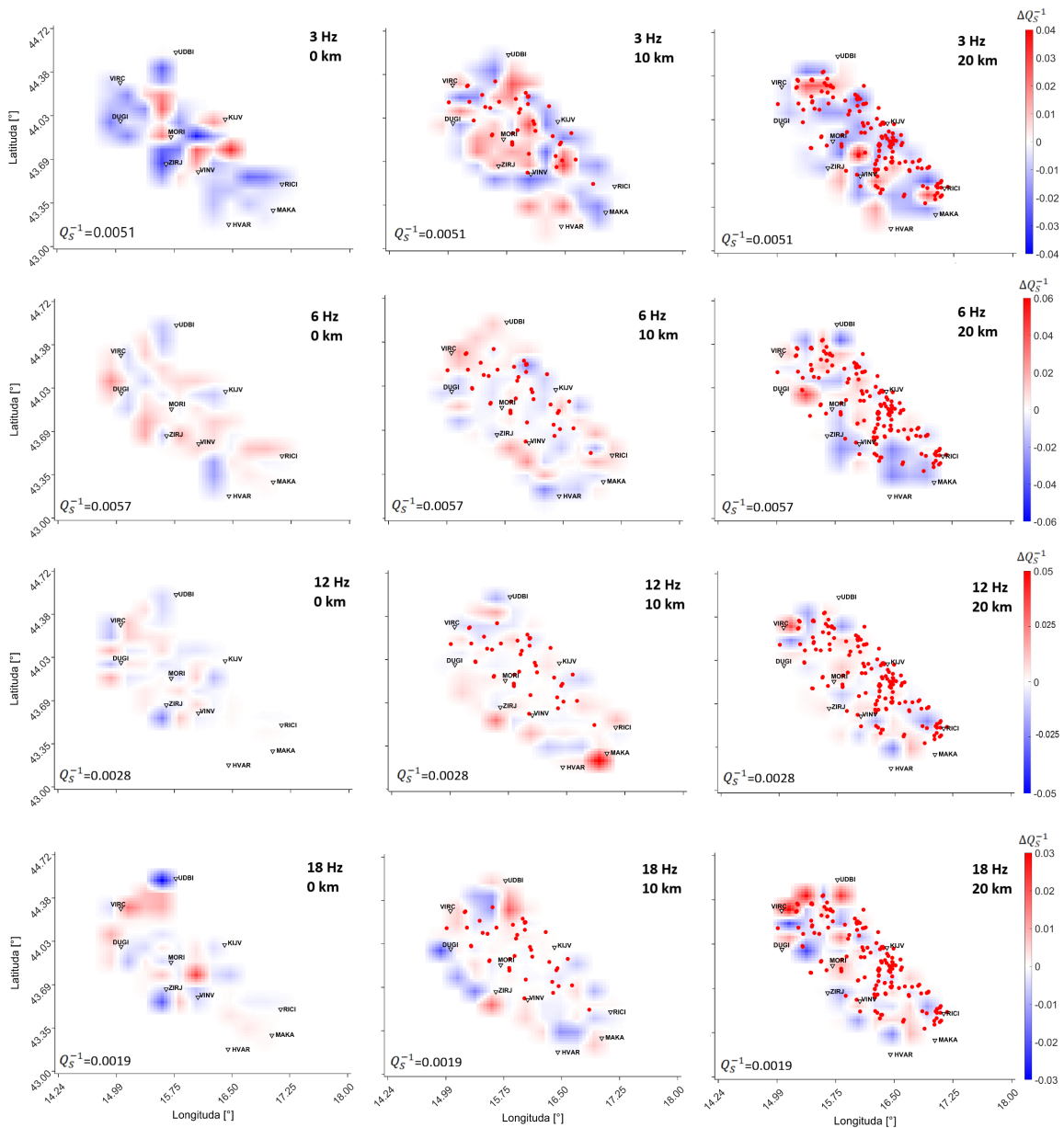
Na slici 4.8. prikazan je presjek u smjeru S – N za P-valove. Tu je također moguće vidjeti visoke i niske anomalije atenuacije koje se protežu u dubinu i lateralno izmjenjuju.

Zbog velike heterogenosti promatranog područja nije neobična dobivena veća lateralna izmjena pozitivnih i negativnih varijacija atenuacije. Budući da je područje građeno od vapnenaca i naslaga sedimenata, moguće brojne pukotine različitih dimenzija utječu na ukupnu atenuaciju izravnih valova, a posebno u gornjoj kori gdje su pukotine ispunjene često fluidima.

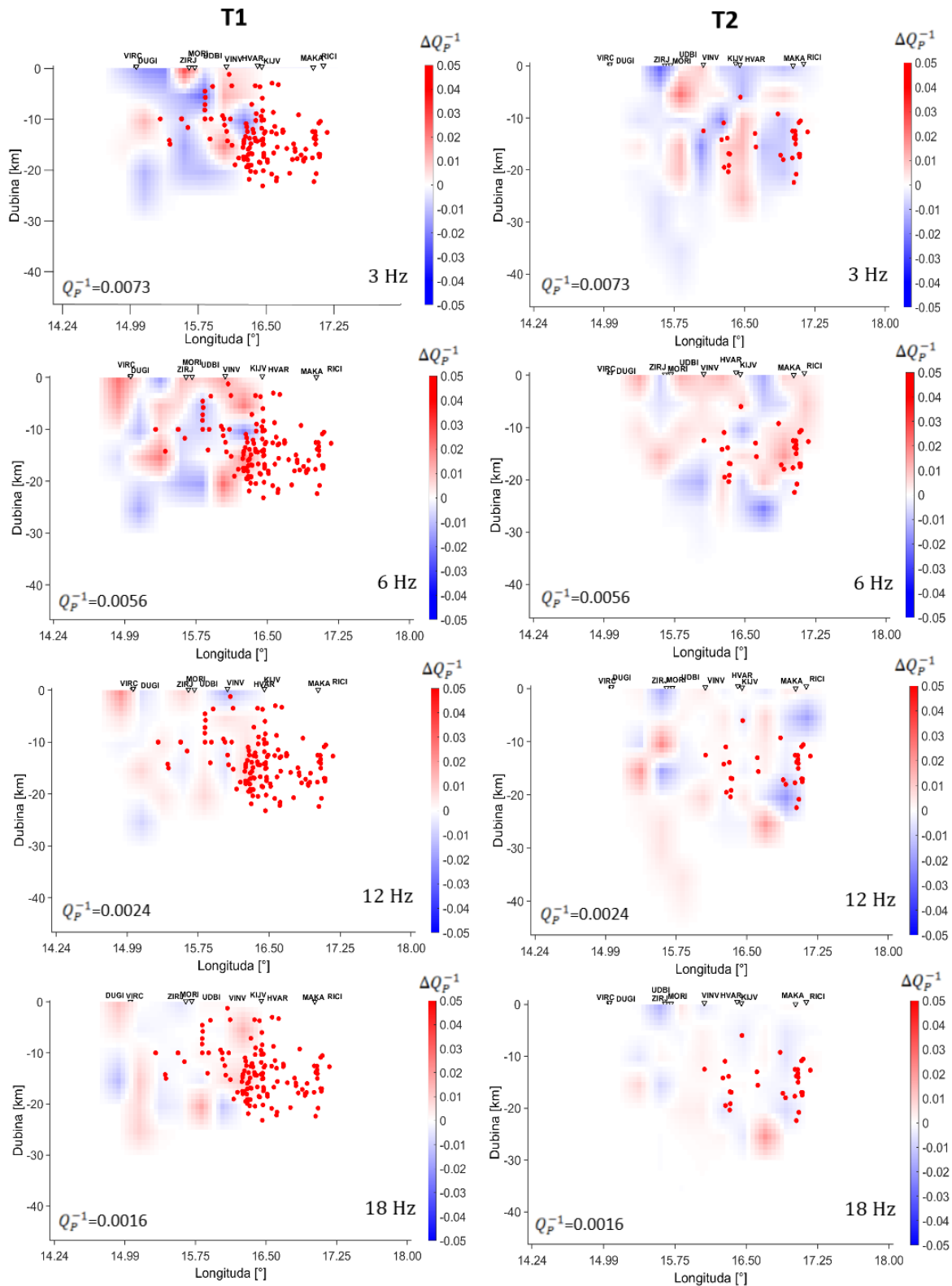
Razlučivost varijacija do dubine od 25 km može se objasniti gustoćom zraka u tom prostoru. Kako bi rješenja bila što točnija, stabilnija i rezolucija veća, potrebno je imati što bolju pokrivenost i gustoću zraka u cjelokupnom području istraživanja. Također veliku ulogu imaju gustoća i broj seizmoloških postaja. Za stabilnija i točnija rješenja varijacija atenuacije na području središnjih Vanjskih Dinarida korisno bi bilo povećati broj analiziranih potresa na tom području i imati bolju prostornu razdiobu žarišta, a bilo bi dobro i uzeti u obzir potrese s epicentrima izvan proučavanog poligona kako bi pokrivenost zrakama bila što bolja. U ovom se istraživanju koristio jednostavan 1D model brzina pa i to utječe na rezultate. Svakako bi bolji i precizniji model brzina doveo do realnijih rješenja. Također bi bilo korisno napraviti geološku interpretaciju dobivenih varijacija atenuacije na području središnjih Vanjskih Dinarida, no to je izvan dosega ovog rada.



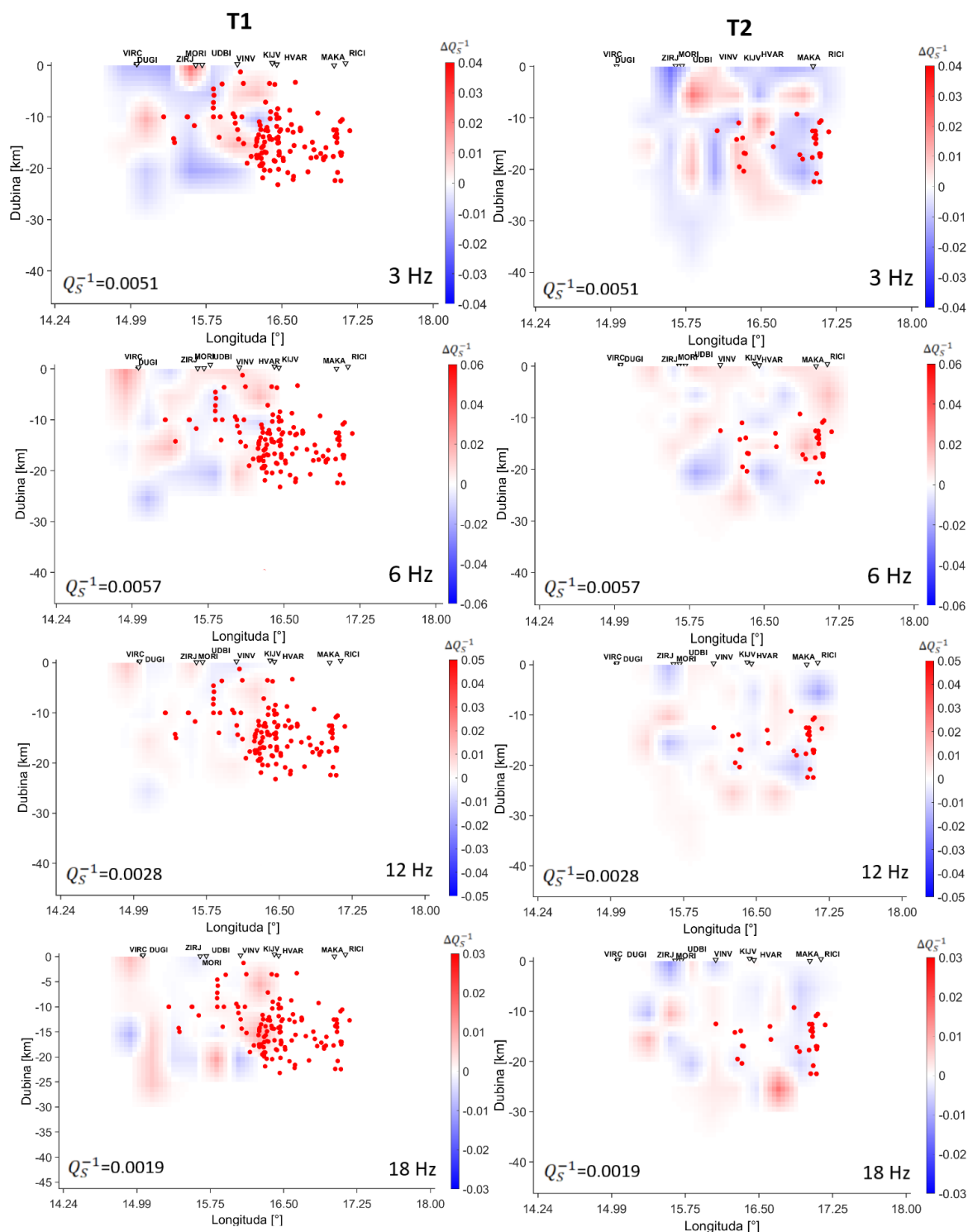
**Slika 4.4.** Varijacije atenuacije izravnih P-valova za četiri središnje frekvencije i tri različite dubine navedene u gornjem desnom kutu svake slike. U donjem lijevom kutu svake slike prikazana je srednja atenuacija  $Q_p^{-1}$  cijelog područja za određenu frekvenciju.



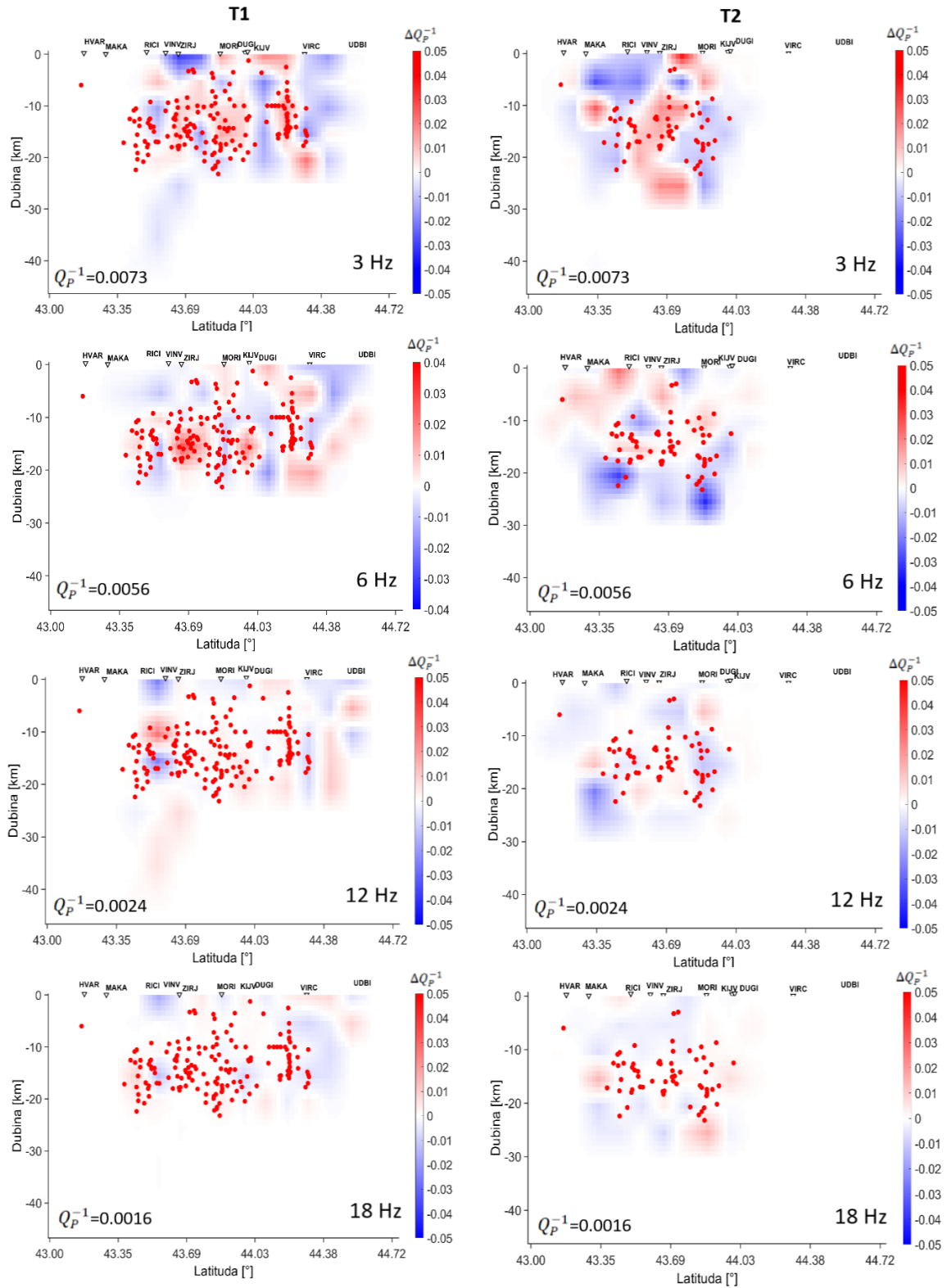
**Slika 4.5.** Varijacije atenuacije izravnih S-valova za četiri središnje frekvencije i tri različite dubine navedene u gornjem desnom kutu svake slike. U donjem lijevom kutu svake slike prikazana je srednja atenuacija  $Q_s^{-1}$  cijelog područja za određenu frekvenciju.



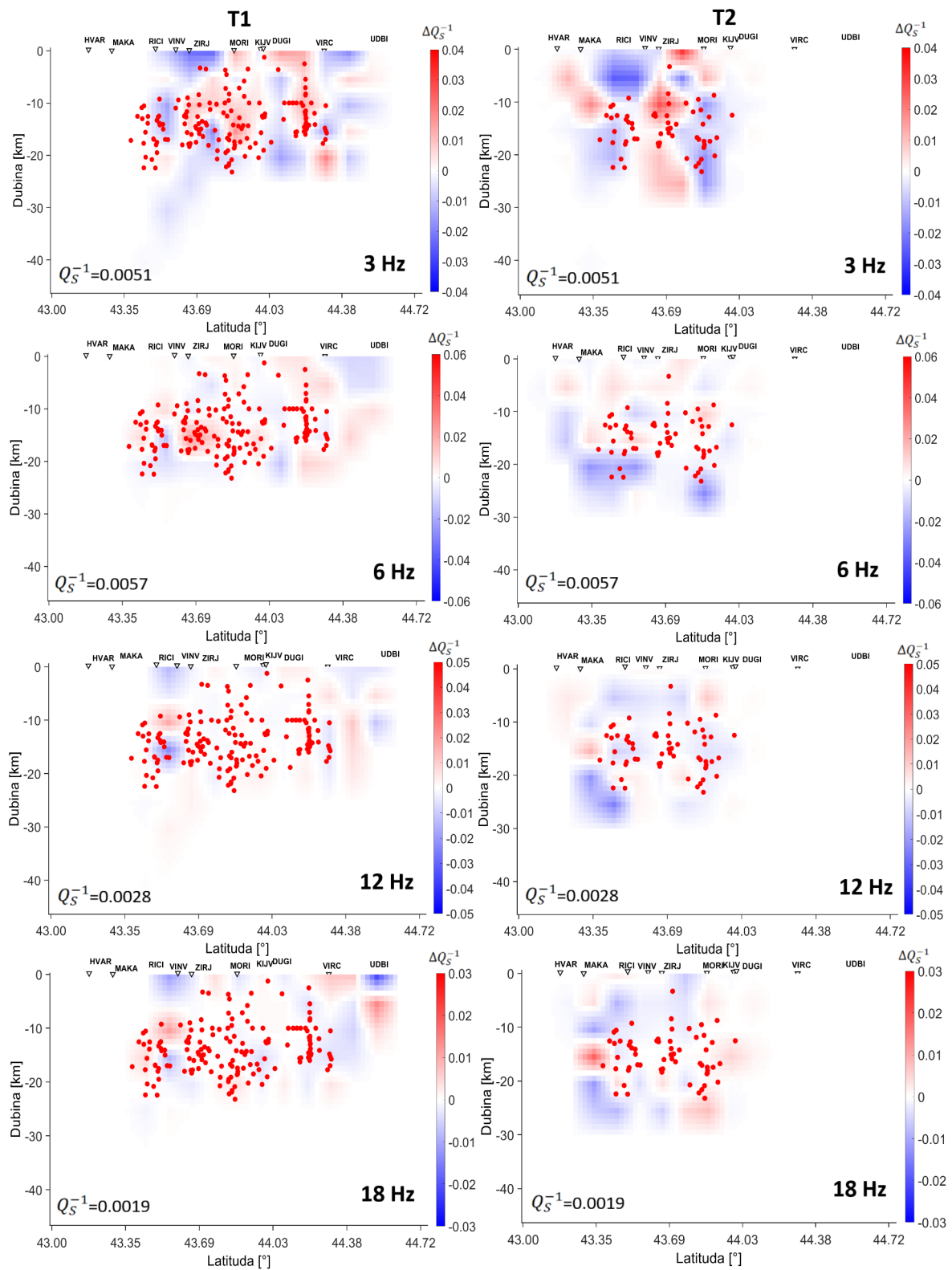
**Slika 4.6.** Varijacije atenuacije izravnih P-valova za četiri središnje frekvencije i vertikalni presjek u smjeru W – E na dvije točke unutar poligona (T1 i T2). U donjem lijevom kutu svake slike prikazana je srednja atenuacija  $Q_P^{-1}$  cijelog područja za određenu frekvenciju.



Slika 4.7. Varijacije atenuacije izravnih S-valova za četiri središnje frekvencije i vertikalni presjek u smjeru W – E na dvije točke unutar poligona (T1 i T2). U donjem lijevom kutu svake slike prikazana je srednja atenuacija  $Q_s^{-1}$  cijelog područja za određenu frekvenciju.



**Slika 4.8.** Varijacije atenuacije izravnih P-valova za četiri središnje frekvencije i vertikalni presjek u smjeru S – N na dvije točke unutar poligona (T1 i T2). U donjem lijevom kutu svake slike prikazana je srednja atenuacija  $Q_P^{-1}$  cijelog područja za određenu frekvenciju.



Slika 4.9. Varijacije atenuacije izravnih S-valova za četiri središnje frekvencije i vertikalni presjek u smjeru S – N na dvije točke unutar poligona (T1 i T2). U donjem lijevom kutu svake slike prikazana je srednja atenuacija  $Q_S^{-1}$  cijelog područja za određenu frekvenciju.



### 4.3. Testovi rezolucije

Provedeni su *checkerboard* i *spike* testovi kako bi se procijenile granice dobre rezolucije u promatranom području. Cilj je uspješno rekonstruirati raspored anomalija pretpostavljenih u ulaznom modelu sintetičkog testa.

Slike 4.11. – 4.15. pokazuju *checkerboard* test proveden za P- i S-valove i sve četiri frekvencije. Slike 4.10. i 4.11. pokazuju rezultate testa po dubinama (0, 10, 20 km), slike 4.12. i 4.13. pokazuju W – E presjek, a slike 4.14. i 4.15. pokazuju S – N presjek u točki T1. Ulazni model *Checkerboard* testa pokazuje izmjenične visoke i niske vrijednosti varijacija atenuacije. Ulazni model (input) prikazan je na slikama s lijeve strane, a s desne strane rezultati su *checkerboard* testa (output). Dimenzije anomalija u ulaznom *checkerboard* modelu jednake su  $46.4 \times 22.48 \times 9$  km što bi značilo da je duljina anomalije u svakom smjeru jednaka dvostrukoj duljini razmaka čvorova (u tom smjeru) mreže kojim se podijelilo područje istraživanja za postupak inverzije.

Na slikama 4.10. i 4.11., koje pokazuju horizontalni presjek, može se vidjeti kako je najbolja rezolucija unutar poligona kojim smo ograničili područje proučavanja što se moglo i očekivati. Prema stanicama, koje su blizu rubova poligona, rezolucija se smanjuje te dobiven model pokazuje mutnoću i razmazan je – ne raspoznaje se pravilan uzorak anomalija. Najveće područje dobre rezolucije dobiveno je na dubini od 10 km, a tamo je ujedno i najbolja razlučivost anomalija velikih i malih vrijednosti. To se može objasniti time što se većina hipocentara nalazi na dubinama od 10 do 20 km stoga je područje na 10 km najbolje pokriveno zrakama što daje bolju rezoluciju i stabilnije rješenje. Područje na dubini 20 km je također dobre rezolucije, no samo područje te rezolucije nije veliko kao na 10 km dubine. Na površini se na jugoistočnom dijelu poligona može primjetiti veća mutnoća, razmazanost i loša reprodukcija pravilnog uzorka anomalija iz ulaznog modela. Rezolucija za 3 Hz lošija je nego za ostale frekvencije, posebno na površini i dubini 20 km gdje se ne raspoznaje pravilan uzorak anomalija. To se može objasniti premalim dimenzijama blokova mreže za tu frekvenciju, a i manjom gustoćom te nepovoljnom razdiobom zraka na tim dubinama. Iako se mreža pažljivo birala kako bi za svaku frekvenciju dobivena dva parametra regularizacije, bili približnog iznosa, to se nije ostvarilo za frekvenciju 3 Hz izravnih P-valova gdje su se ti parametri poprilično razlikovali. Provedene dvije regularizacije izračunaju parametre za koje funkcija gubitka ima minimum. Poželjno je dobiti ta dva parametra približno jednaka i jedan od tih iznosa uvrstiti kao ulazni parametar u MuRAT.

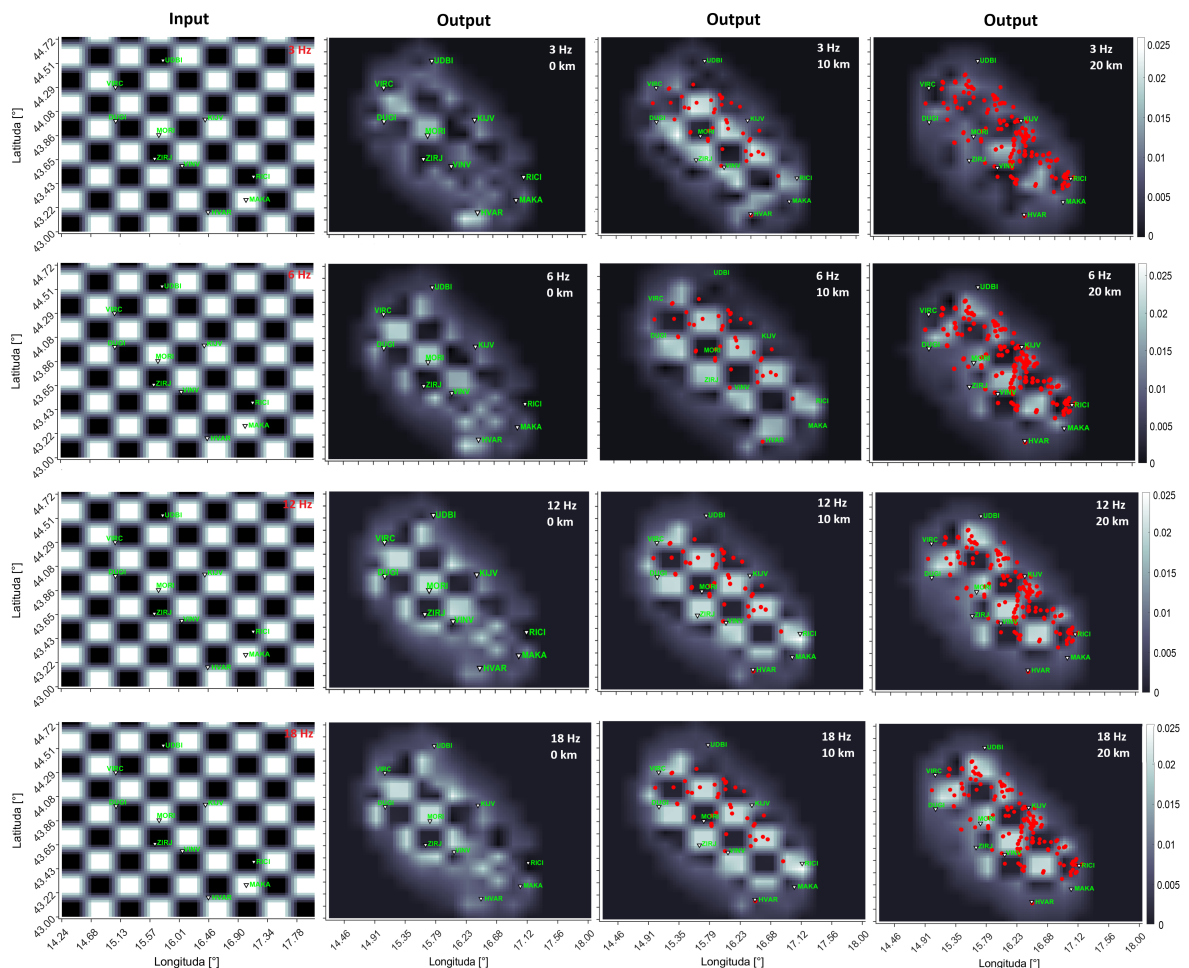
Na slikama 4.12. – 4.15. prikazani su *checkerboard* testovi za P- i S-valove za vertikalne presjeke u smjerovima W – E i S – N u točki T1. Vidi se kako je rezolucija dobra do dubine od otprilike 25 km. To je područje najbolje pokriveno zrakama (vidi sliku 4.1.) pa se tu i očekuju najstabilniji rezultati i bolja rezolucija.

Prikazani su još i *spike* testovi za vertikalne presjeke (slike 4.16. i 4.17.) u točki T1. U ulaznom modelu za cijelo područje zadana je vrijednost nula osim jedne anomalije vrijednosti 0.02 koja se proteže od dubine 10 km do površine. Želi se vidjeti koliko dobro izlazni model reproducira tu anomaliju. Rezultati su za P- i S-val skoro za sve frekvencije dobri osim za frekvenciju 3 Hz koja pokazuje nestabilnija rješenja. Anomalija je dobro reproducirana, no ostatak područja je pod utjecajem te anomalije, odnosno ima povećane vrijednosti na cijelom području.

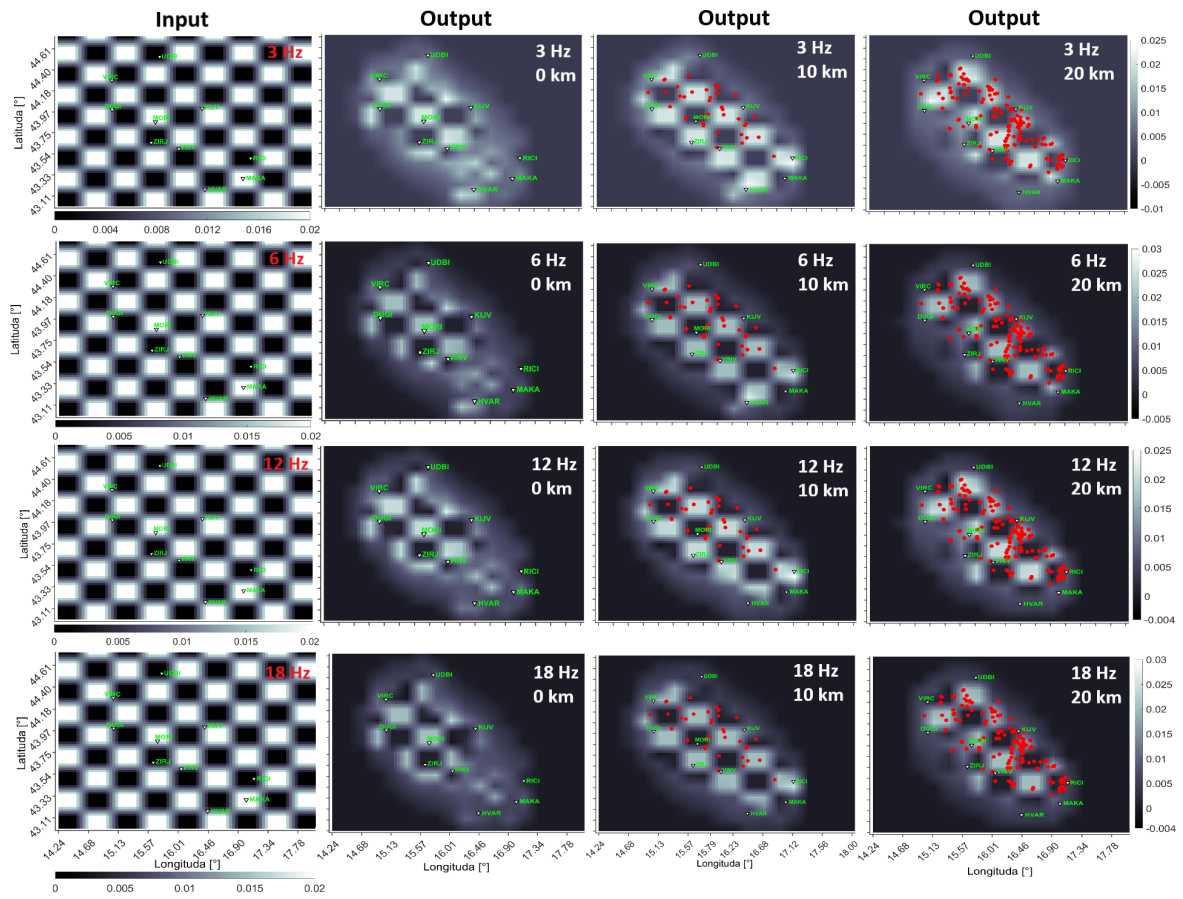
Kao što je već spomenuto u poglavlju *Metoda i analiza podataka*, *checkerboard* testovi imaju određene nedostatke zbog kojih ih je dobro raditi uz još jedan test rezolucije.

Neki od tih nedostataka su što daju samo indirektno dokaze mjera pouzdanosti kao što je rezolucija, mogu varirati ovisno o ulaznom modelu te često prikazuju amplitude manjima nego što jesu. Prema Rawlinson i Spakman (2016), analize osjetljivosti trebale bi detektirati manjak rezolucije te se pokazalo kako su *spike* testovi učinkovitiji u tome jer se pomoću njih lakše određuju područja gdje su anomalije jače razmazane. Za bolju interpretaciju mutnoće i razmazanosti rezultata potrebno je u ulaznom modelu *spike* testa postaviti veći broj anomalija velikih vrijednosti razmaknutih u prostoru.

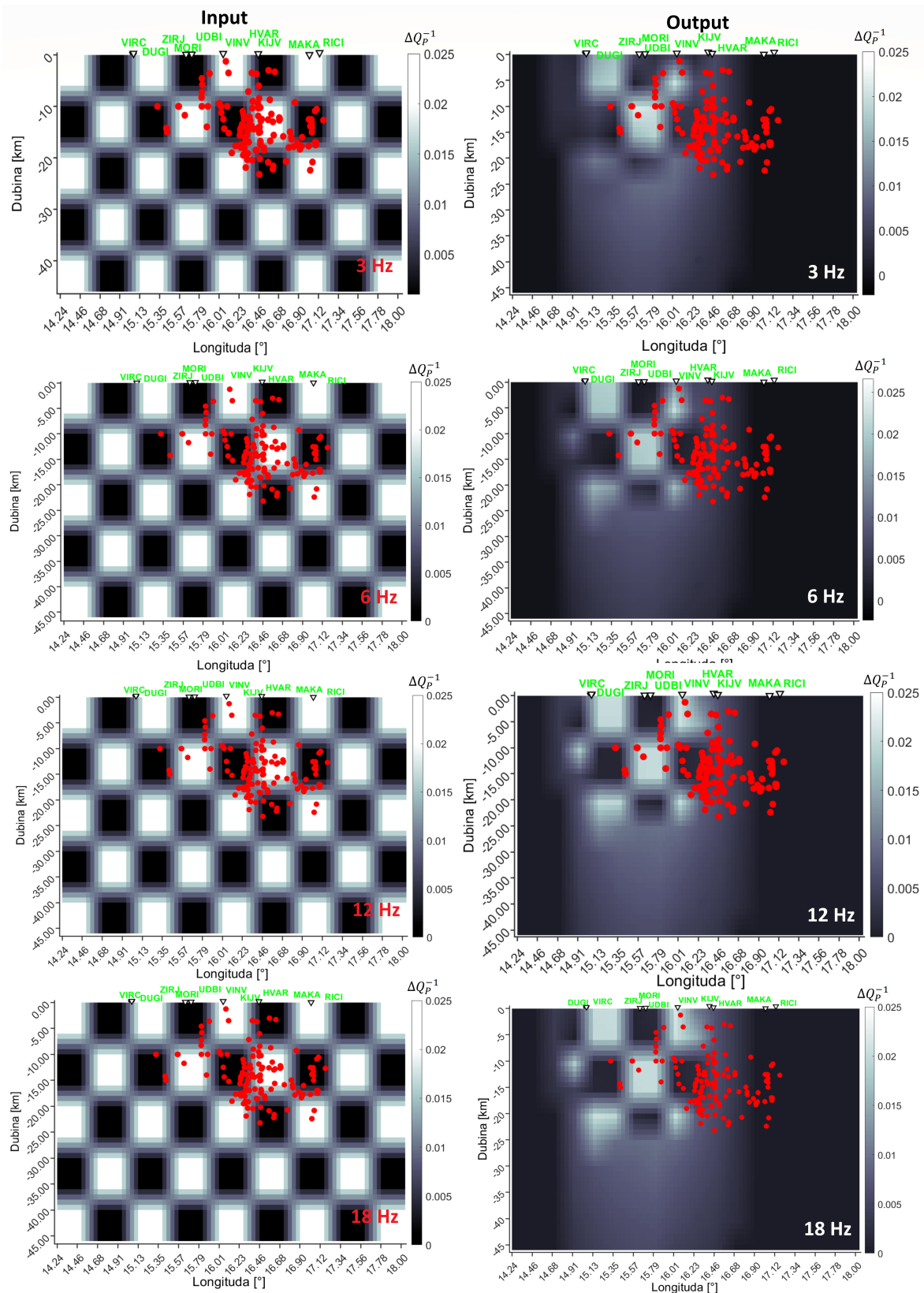
Ovo je istraživanje pokazalo kako bi za bolje rezultate bilo potrebno analizirati veći broj potresa. Na kvalitetu rezultata bitno utječe prostorna razdioba žarišta potresa i seizmoloških postaja. Povećanje broja zraka ne znači nužno veću rezoluciju (Rawlinson i sur., 2014) ako se uzimaju potresi s bliskim žarištima. Zbog toga bi bilo poželjno imati bolju raspodjelu žarišta potresa te uzimati i potrese s epicentrima izvan označenog područja kako bi dobili veći broj zraka iz svih smjerova. Također bi se u daljem istraživanju bilo poželjno više posvetiti definiranju mreže točaka u inverznom postupku i regularizaciji, a bilo bi korisno i upotrijebiti bolji model brzina. Primjena ove metode na području središnjih Vanjskih Dinarida svakako ima smisla, a njezinim bi se poboljšanjem mogli dobiti zanimljivi rezultati.



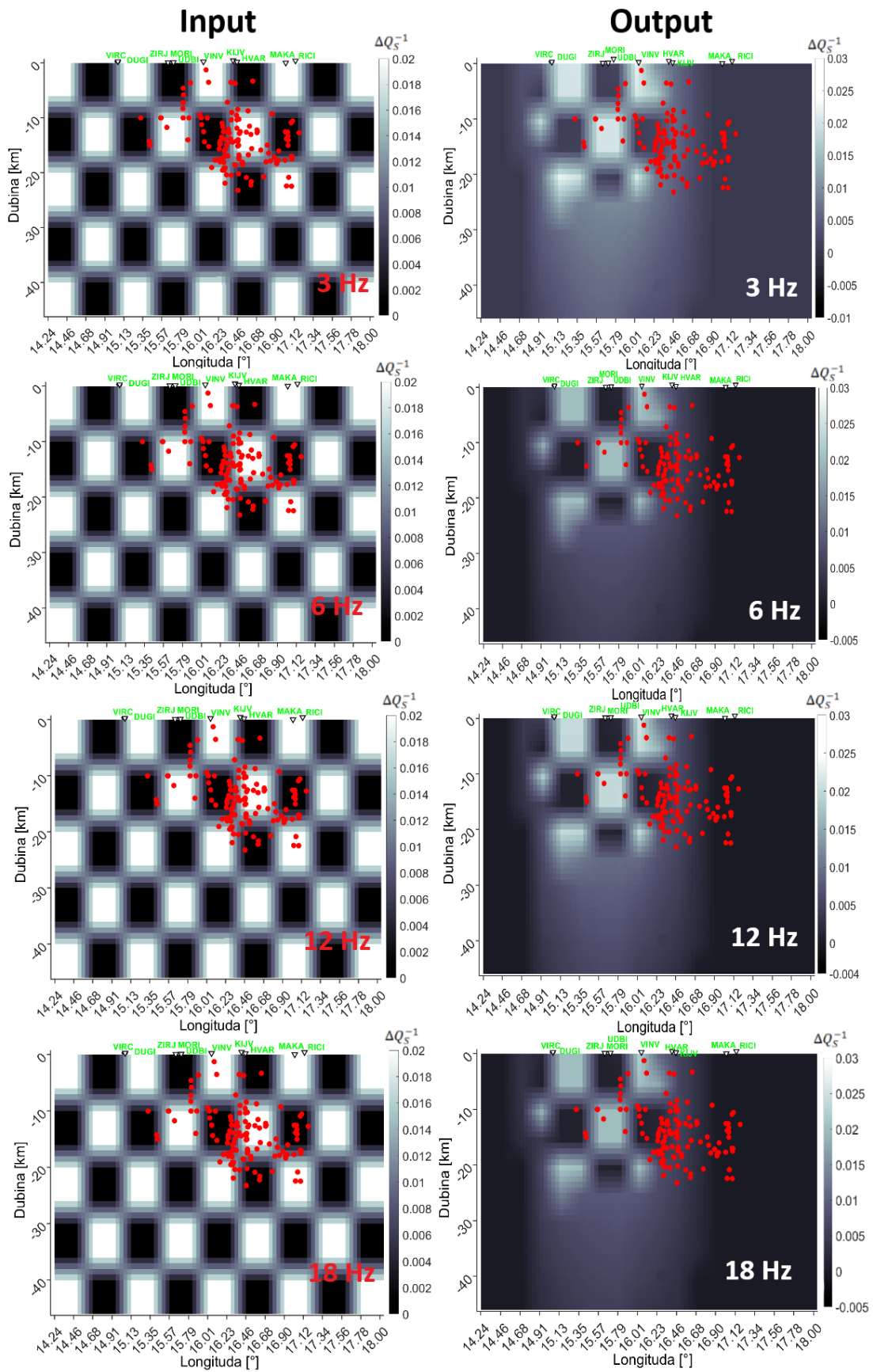
**Slika 4.10.** Ulaz (lijevo) i izlaz (desno) *checkerboard* testa horizontalnih presjeka na tri dubine (0, 10, 20 km) te za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz) P-valova.



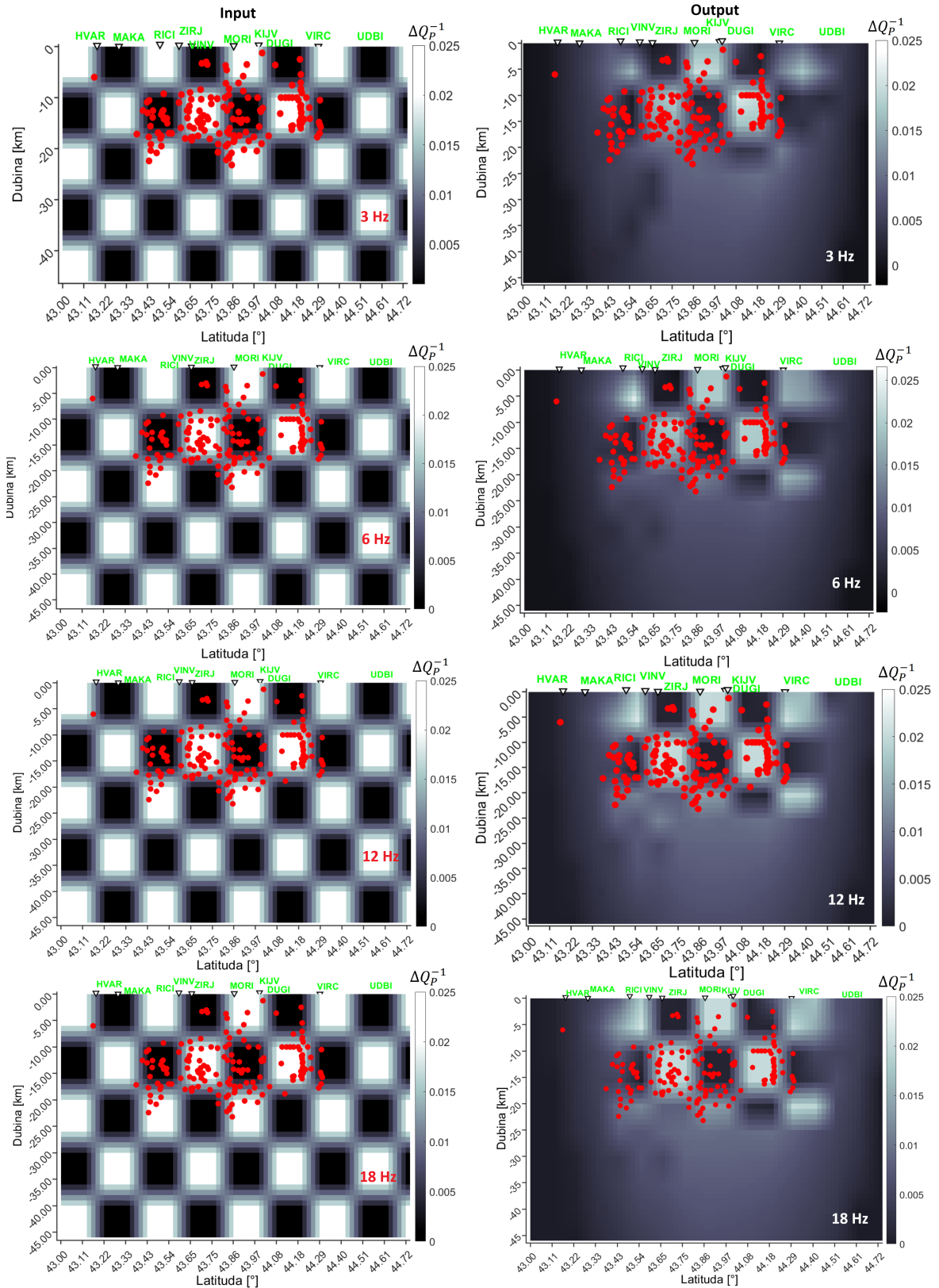
Slika 4.11. Ulaz (lijevo) i izlaz (desno) *checkerboard* testa horizontalnih presjeka na tri dubine (0, 10, 20 km) te za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz) S-valova.



Slika 4.12. Ulaz (lijevo) i izlaz (desno) checkerboard testa za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz) i vertikalni presjek u smjeru W – E za P-valove (u točki T1).

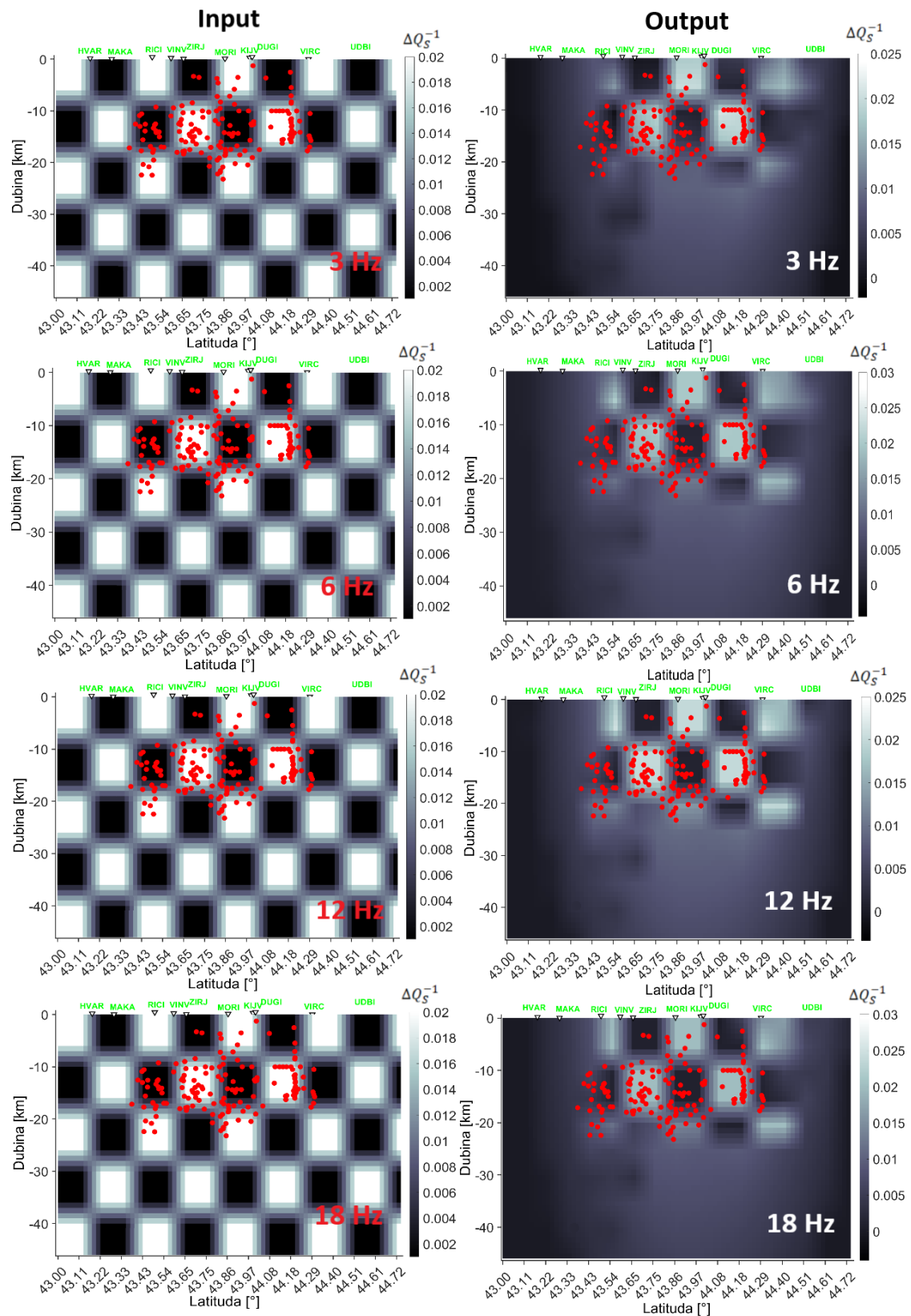


Slika 4.13. Ulaz (lijevo) i izlaz (desno) checkerboard testa za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz) i vertikalni presjek u smjeru W – E za S-valove (u točki T1).

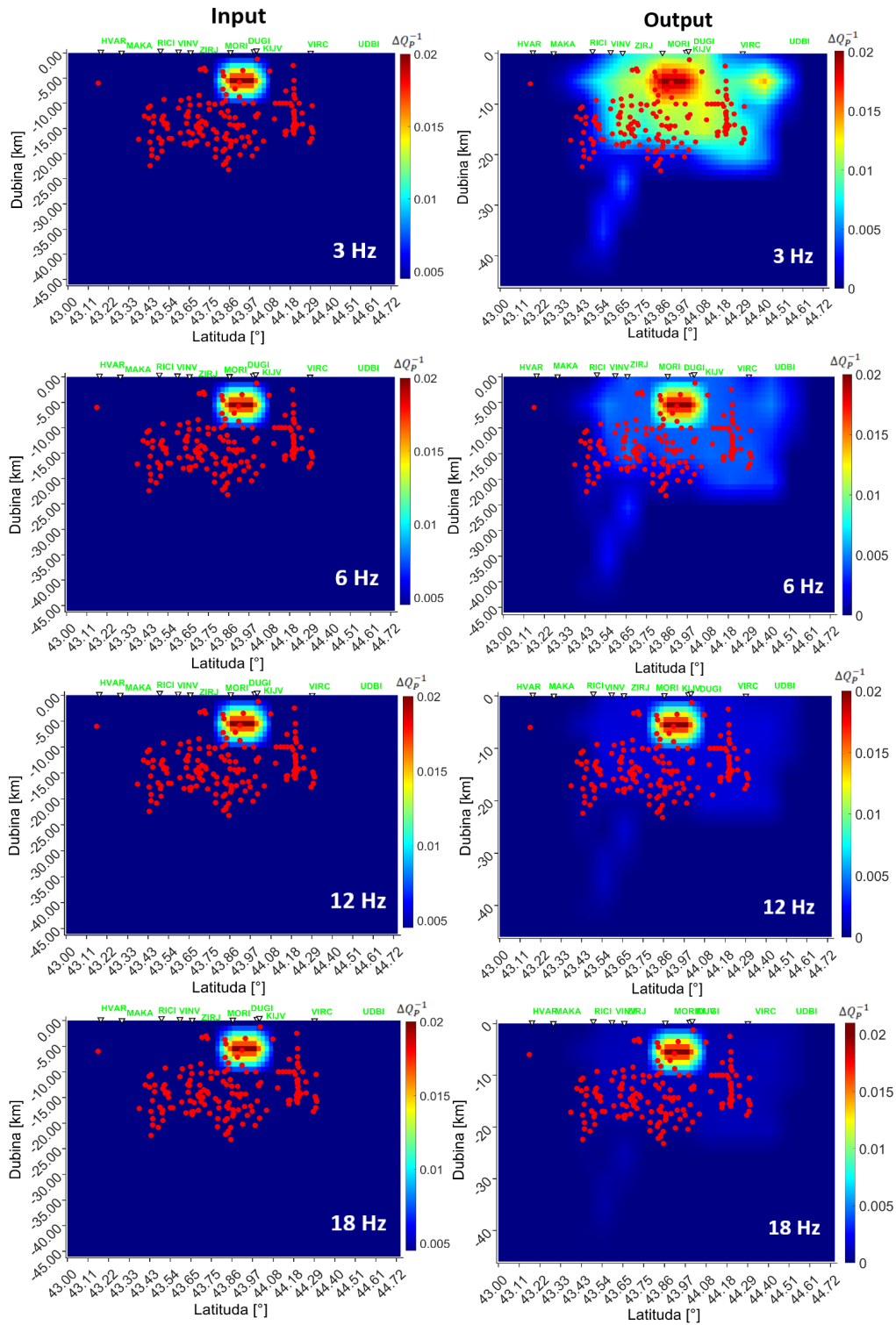


**Slika 4.14.** Ulaz (lijevo) i izlaz (desno) *checkerboard* testa za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz) i vertikalni presjek u smjeru S – N za P-valove (u točki T1).



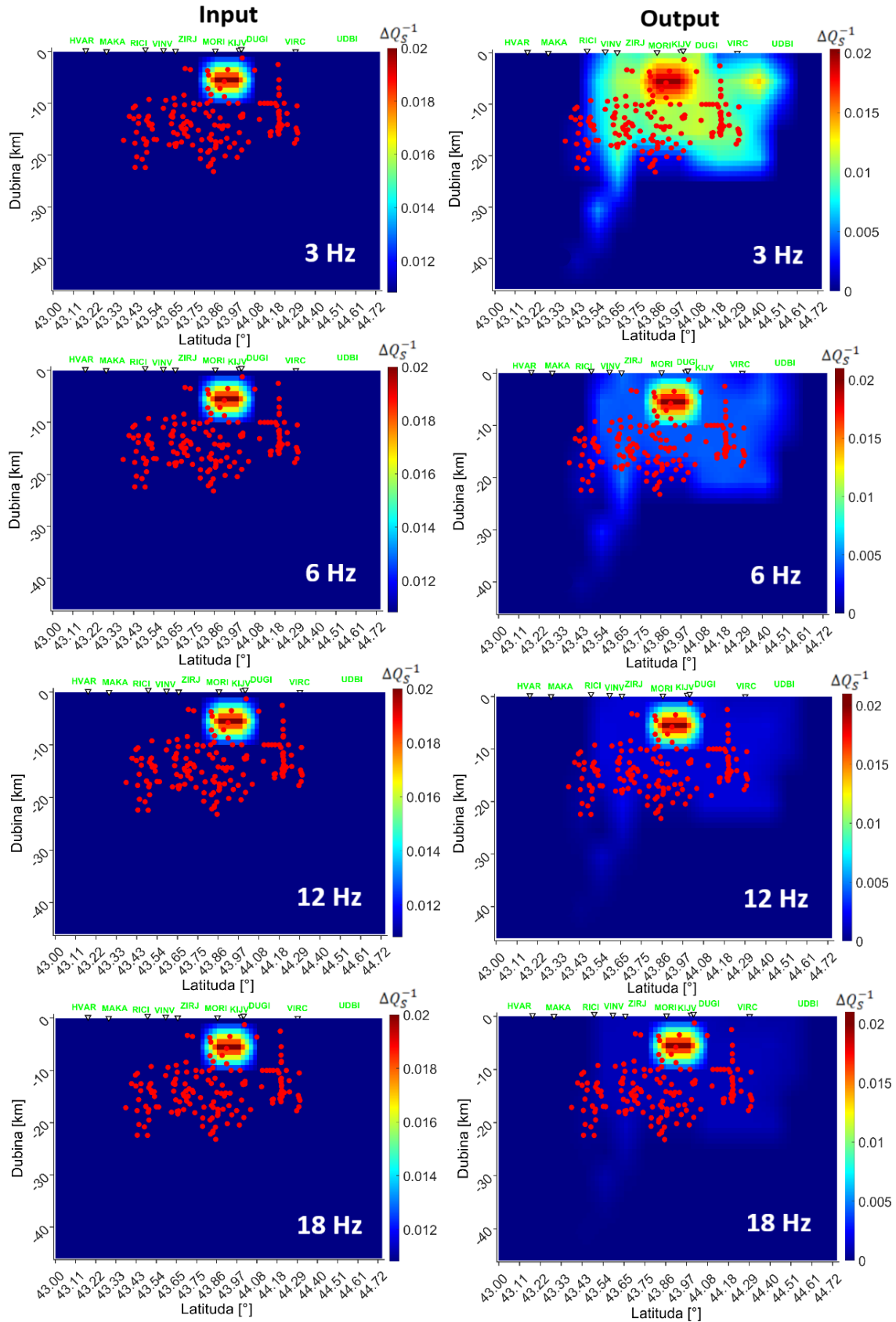


Slika 4.15. Ulaz (lijevo) i izlaz (desno) *checkerboard* testa za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz) i vertikalni presjek u smjeru S – N za S-valove (u točki T1).



**Slika 4.16.** *Spike* test za P-valove za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz). Ulazni model (lijevo) prikazuje prostor čija vrijednost je 0 i jednu visoku anomaliju koja se proteže od 10 km dubine do površine. Desno je prikazan izlazni model.





**Slika 4.17.** *Spike* test za S-valove za četiri središnje frekvencije (3, 6, 12, 18 Hz). Ulazni model (lijevo) prikazuje prostor čija vrijednost je 0 i jednu visoku anomaliju koja se proteže od 10 km dubine do površine. Desno je prikazan izlazni model.

## 5. Zaključak

Područje središnjih Vanjskih Dinarida izrazito je heterogeno i dosadašnjim istraživanjima atenuacije na ovom području potvrđena je visoka atenuacija izravnih prostornih valova. U ovom radu primijenjen je MuRAT – Matlab paket za prostorni prikaz atenuacije, raspršenja i apsorpcije koji koristi izravne i koda-valove na različitim frekvencijama. Cilj ovog rada bio je vidjeti koliko je MuRAT primjenjiv za područje Vanjskih Dinarida i što bi se moglo u daljnjim istraživanjima unaprijediti kako bi rezultati bili precizniji. Provedena je metoda normiranja kodom te inverzija kako bi se dobili parametri varijacije atenuacije  $\Delta Q_{P,S}^{-1}$  i faktori geometrijskog širenja  $\gamma$ . Za inverziju područje se podijelilo u prostornu mrežu čime su se dobili blokovi dimenzija  $23.2 \times 11.24 \times 4.5$  km. Metoda se provodila za izravne P- i S-valove te za četiri središnje frekvencije  $f_c = 3, 6, 12, 18$  Hz. Korišteno je ukupno 844 seizmograma potresa za atenuaciju P-valova te 762 za atenuaciju izravnih S-valova.

Računali su se logaritmi normiranih spektralnih energija izravnih valova u ovisnosti o proteklom vremenu. Vidljiv je linearni pad logaritama normiranih energija s vremenom, a razlika između izračunatih i teorijskih vrijednosti smanjuje se s frekvencijom pri čemu su teorijske vrijednosti dobivene za faktor dobrote  $Q$  usrednjen za cijelo područje. Dobivene vrijednosti faktora  $\gamma$  smanjuju se povećanjem frekvencije i za P-valove kreću se od  $\gamma_P(3 \text{ Hz}) = 1.26 \pm 0.08$  do  $\gamma_P(18 \text{ Hz}) = 0.58 \pm 0.05$ , a za S-valove  $\gamma_S(3 \text{ Hz}) = 1.02 \pm 0.08$  do  $\gamma_S(18 \text{ Hz}) = 0.38 \pm 0.05$ . Može se vidjeti kako su za male frekvencije faktori  $\gamma$  najbliži vrijednosti  $\gamma = 1$  koja se standardno uzima za prostorne valove, dok se povećanjem frekvencije faktor  $\gamma$  približava vrijednosti  $\gamma = 0.5$  što je pretpostavka za površinske valove, a to sugerira da za veće frekvencije prevladavaju površinski valovi.

Dobivene srednje vrijednosti faktora dobrote  $\langle Q_{P,S} \rangle$  povećavaju se s frekvencijama i one su uspoređene s vrijednostima izračunatim iz izraza za frekvencijsku ovisnost faktora dobrote u području središnjih Vanjskih Dinarida dobivenih u Dasović (2015). Vrijednosti  $\langle Q_P \rangle$  kreću se od 137 (za 3 Hz) do 622 (za 18 Hz), a one izračunate prema izrazima iz Dasović (2015) su 181 (za 3 Hz) i 635 (za 18 Hz). Isto tako, za S-valove dobivene su vrijednosti  $\langle Q_S \rangle$  od 196 (za 3 Hz) do 525 (za 18 Hz) dok su vrijednosti izračunate prema Dasović (2015) dobivene 223 (za 3 Hz) i 742 (za 18 Hz). Unatoč različitom skupu podataka (analizirani potresi i postaje), različitim ulaznim parametrima te različitim vrijednostima faktora geometrijskog širenja u ove dvije metode, dobivene srednje vrijednosti faktora dobrote  $Q$  ne razlikuju se znatno.

Dobivene varijacije atenuacije izravnih valova u prostoru pokazuju da je rezolucija dobra do 25 km dubine gdje je velika pokrivenost zrakama te unutar razmatranog poligona. Uzorci varijacija atenuacije P- i S-valova u skladu su za sve frekvencije i dubine. Na vertikalnim presjecima mogu se vidjeti u dubinu izdužena područja visokih i niskih varijacija atenuacije. Posebno je uočljiva dubina od 20 km gdje su u horizontalnom presjeku vidljivi veliki kontrasti visokih i niskih anomalija. Dobivene srednje vrijednosti faktora dobrote te varijacije atenuacije u prostoru ukazuju na veliku heterogenost i atenuaciju područja što je u skladu s dosadašnjim istraživanjima atenuacije Vanjskih Dinarida.

Provedeni su testovi rezolucije – *checkerboard* i *spike* testovi. *Checkerboard* testovi

provedeni su na svim frekvencijama za vertikalne i horizontalne presjeke. Provođenjem testova rezolucije dobio se uvid u stabilnost rješenja i rezoluciju modela. Pokazalo se kako je rezolucija najbolja u području unutar poligona i na dubinama do 25 km jer je tamo najveća pokrivenost zrakama. Za frekvenciju od 3 Hz izlazni modeli pokazuju veću mutnoću i razmazanost od ostalih pa se može zaključiti kako su rješenja za 3 Hz najmanje stabilna. To se može objasniti premalim dimenzijama blokova za tu frekvenciju. *Spike* testovi pokazali su dobro reproduciranu anomaliju na svim frekvencijama osim 3 Hz gdje je ostatak područja pod većim utjecajem anomalije. Za bolje rezultate i bolju detekciju nedostataka u rezoluciji preporuča se korištenje *spike* testova s većim brojem anomalija. Kako bi se dobila realnija rješenja bilo bi poželjno imati veći broj potresa s dobrom prostornom razdiobom žarišta (a i žarištima izvan poligona) čime bi se dobila bolja pokrivenost zrakama u cijelom području. Potrebno je više se posvetiti definiranju mreže točaka u inverznom postupku i regularizaciji te upotrijebiti bolji model brzina.

## Literatura

- Akande, W. G., L. De Siena, i Q. Gan (2019). Three-dimensional kernel-based coda attenuation imaging of caldera structures controlling the 1982-84 Campi Flegrei unrest. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 381, 273–283.
- Aki, K. (1969). Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of Geophysical Research* 74(2), 615–631.
- Aki, K. (1980). Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 21(1), 50–60.
- Aki, K. i B. Chouet (1975). Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects. *Journal of Geophysical Research* 80(23), 3322–3342.
- Aster, R. C., C. H. Thurber, i B. Borchers (2005). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Number v. 90 in International Geophysics Series. Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Press.
- Block, L. (1991). *Joint Hypocenter-Velocity Inversion of Local Earthquake Arrival Time Data in Two Geothermal Regions* /. Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Dasović, I. (2015). *Atenuacija Seizmičkih Valova u Području Dinarida*. Ph. D. thesis, University of Zagreb, Zagreb, Croatia.
- Dasović, I., M. Herak, i D. Herak (2012). Attenuation of coda waves in the contact zone between the Dinarides and the Adriatic Microplate. *Studia Geophysica et Geodaetica* 56(1), 231–247.
- Dasović, I., M. Herak, i D. Herak (2013). Coda-Q and its lapse time dependence analysis in the interaction zone of the Dinarides, the Alps and the Pannonian basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 63, 47–54.
- Dasović, I., M. Ruščić, D. Herak, i M. Herak (2015). Attenuation of high-frequency body waves in the crust of the Central External Dinarides. *Journal of Seismology* 19(4), 849–860.
- De Siena, L., A. Amoroso, E. D. Pezzo, Z. Wakeford, M. Castellano, i L. Crescentini (2017). Space-weighted seismic attenuation mapping of the aseismic source of Campi Flegrei 1983-84 unrest. *Geophysical Research Letters*.
- De Siena, L., M. Calvet, K. Watson, A. Jonkers, i C. Thomas (2016). Seismic scattering and absorption mapping of debris flows, feeding paths, and tectonic units at Mount St. Helens volcano. *Earth and Planetary Science Letters* 442, 21–31.
- De Siena, L., E. Del Pezzo, i F. Bianco (2010). Seismic attenuation imaging of Campi Flegrei: Evidence of gas reservoirs, hydrothermal basins, and feeding systems. *Journal of Geophysical Research* 115(B9), B09312.
- De Siena, L., E. Del Pezzo, F. Bianco, i A. Tramelli (2009). Multiple resolution seismic attenuation imaging at Mt. Vesuvius. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 173(1-2), 17–32.

- De Siena, L., C. Thomas, i R. Aster (2014). Multi-scale reasonable attenuation tomography analysis (MuRAT): An imaging algorithm designed for volcanic regions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 277, 22–35.
- De Siena, L., C. Thomas, G. P. Waite, S. C. Moran, i S. Klemme (2014). Attenuation and scattering tomography of the deep plumbing system of Mount St. Helens. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(11), 8223–8238.
- Del Pezzo, E., F. Bianco, L. De Siena, i A. Zollo (2006). Small scale shallow attenuation structure at Mt. Vesuvius, Italy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 157(3–4), 257–268.
- Del Pezzo, E., J. Ibañez, J. Prudencio, F. Bianco, i L. De Siena (2016). Absorption and scattering 2-D volcano images from numerically calculated space-weighting functions. *Geophysical Journal International* 206(2), 742–756.
- Gazzola, S., P. C. Hansen, i J. G. Nagy (2019). IR Tools: A MATLAB package of iterative regularization methods and large-scale test problems. *Numerical Algorithms* 81(3), 773–811.
- Hansen, P. C. (2007). Regularization Tools version 4.0 for Matlab 7.3. *Numerical Algorithms* 46(2), 189–194.
- Herak, M. (1991a). Lapse-time dependent Qc-spectra observed in the Dinarides region (Yugoslavia). pp. 10.
- Herak, M. (1991b). *Modeliranje Kode Lokalnih Potresa*. Ph. D. thesis, University of Zagreb, Zagreb, Croatia.
- Ivančić, I., D. Herak, M. Herak, I. Allegretti, T. Fiket, K. Kuk, S. Markušić, S. Prevotnik, I. Sović, I. Dasović, i J. Stipčević (2018). Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. *Geofizika* 35(1), 69–98.
- Lévêque, J.-J., L. Rivera, i G. Wittlinger (1993). On the use of the checker-board test to assess the resolution of tomographic inversions. *Geophysical Journal International* 115(1), 313–318.
- Majstorović, J., T. Belinić, D. Namjesnik, I. Dasović, D. Herak, i M. Herak (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.
- Prudencio, J., L. De Siena, J. M. Ibañez, E. Del Pezzo, A. García-Yeguas, i A. Díaz-Moreno (2015). The 3D Attenuation Structure of Deception Island (Antarctica). *Surveys in Geophysics* 36(3), 371–390.
- Rawlinson, N., A. Fichtner, M. Sambridge, i M. K. Young (2014). Seismic Tomography and the Assessment of Uncertainty. In *Advances in Geophysics*, Volume 55, pp. 1–76. Elsevier.
- Rawlinson, N. i M. Sambridge (2003). Seismic traveltime tomography of the crust and lithosphere. In *Advances in Geophysics*, Volume 46, pp. 81–198. Elsevier.

- Rawlinson, N. i W. Spakman (2016). On the use of sensitivity tests in seismic tomography. *Geophysical Journal International* 205(2), 1221–1243.
- Rovelli, A. (1984). Seismic Q for the lithosphere of the Montenegro region (Yugoslavia): Frequency, depth and time windowing effects. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 34(3), 159–172.
- Sato, H. (2015). Envelope broadening and scattering attenuation of a scalar wavelet in random media having power-law spectra. *Geophysical Journal International* 204(1), 386–398.
- Sato, H., M. C. Fehler, i T. Maeda (2012). *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth : Second Edition*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sketsiou, P., L. De Siena, S. Gabrielli, i F. Napolitano (2021). 3-D attenuation image of fluid storage and tectonic interactions across the Pollino fault network. *Geophysical Journal International* 226(1), 536–547.
- Sketsiou, P., F. Napolitano, A. Zenonos, i L. De Siena (2020). New insights into seismic absorption imaging. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 298, 106337.
- Stein, S. i M. Wysession (2003). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. pp. 515.
- Stipčević, J., H. Tkalčić, M. Herak, S. Markušić, i D. Herak (2011). Crustal and uppermost mantle structure beneath the External Dinarides, Croatia, determined from teleseismic receiver functions: Crustal structure in the External Dinarides. *Geophysical Journal International* 185(3), 1103–1119.
- Tari, V. (2002). Evolution of the northern and western Dinarides: A tectonostratigraphic approach. *Stephan Mueller Special Publication Series 1*, 223–236.
- Toker, M. i Ş. Şahin (2022). Upper- to mid-crustal seismic attenuation structure above the mantle wedge in East Anatolia, Turkey: Imaging crustal scale segmentation and differentiation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 329–330, 106908.
- Tomljenović, B., L. Csontos, E. Márton, i P. Márton (2008). Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia. *Geological Society, London, Special Publications* 298(1), 145–167.
- Vlahović, I., J. Tišljarić, I. Velić, i D. Matičec (2005). Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220(3-4), 333–360.
- Wu, R.-S. i K. Aki (1988). Introduction: Seismic wave scattering in three-dimensionally heterogeneous earth. 128, 6.
- Yoshimoto, K., H. Sato, i M. Ohtake (1993). Frequency-Dependent Attenuation of *P* and *S* Waves In the Kanto Area, Japan, Based On the Coda-Normalization Method. *Geophysical Journal International* 114(1), 165–174.

MuRAT: <https://github.com/LucaDeSiena/MuRAT>

B.C.I.S. (1972): *Tables des temp de propagation des ondes séismiques (Hodochrones) pour la region des Balkans*, Manuel d'utilisation, Bureau Central International de Séismologie, Strasbourg.