

Elastička svojstva kore u sjeverozapadnim Dinaridima određena na temelju analize seizmičkog nemira

Latečki, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:217:884994>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Helena Latečki

ELASTIČKA SVOJSTVA KORE U
SJEVEROZAPADNIM DINARIDIMA ODREĐENA
NA TEMELJU ANALIZE SEIZMIČKOG NEMIRA

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Helena Latečki

Diplomski rad

**Elastička svojstva kore u sjeverozapadnim
Dinaridima određena na temelju analize
seizmičkog nemira**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Josip Stipčević

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2019.

Prvenstveno zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Josipu Stipčeviću na pruženoj prilici, poticaju na samostalni rad i spremnosti da pronade vremena unatoč svim svojim obvezama.

Zahvaljujem Mladenu Živčiću iz *Agencije Republike Slovenije za okolje* na ustupljenim podacima slovenskih seizmoloških postaja.

Sažetak

Da bi se pratile varijacije brzina na području sjeverozapadnih Dinarida, u ovome su radu analizirani desetogodišnji (2009.–2018.) kontinuirani zapisi seizmičkog nemira vertikalnih komponenti seizmograma zabilježenih na ukupno četrnaest postaja. Primijenjena je metoda analize križnih spektara kliznih prozora (engl. skraćeno *MWCS*) od Clarke i sur. (2011) koja se provodi u frekventnoj domeni, a bazira na usporedbi tzv. referentne i višednevne CCF (kratica od engl. *cross-correlation function*; funkcija križne korelacije). Metoda je provedena za četiri frekventna raspona između 0.1 i 2 Hz pri čemu je referentna CCF definirana za čitavi desetogodišnji niz, a višednevne CCF za 90-dnevna razdoblja. Vremenski pomaci δt_i dviju CCF određeni su pomoću križnih-spektara za dio signala koji se odnosi na kodu. Uz pretpostavku da se relativne promjene brzina površinskih Rayleighjevih valova ($\delta v/v$) manifestiraju kao razvlačenje višednevne u odnosu na referentnu CCF, tj. da vrijedi $\delta v/v = -\delta t/t$, dobivene su krivulje promjena brzina koje pokazuju jasne sezonske izmjene minimuma tijekom ljeta i maksimuma tijekom zime. Uočeno je kako se smanjivanjem širine frekventnog raspona gubi sezonski oblik što se objašnjava nedostatkom koherentnih faza koje se koriste u metodi, ali i nekih drugih faktora. Iz tog su razloga provedene dvije dodatne analize kojima se htjelo utvrditi jesu li udaljenosti između postaja i lokacija izvora seizmičkog nemira dominantni uzročnici nestabilnosti sezonskog oblika kod užih frekventnih raspona. Sezonske varijacije brzina imaju uzročnike različitog porijekla i da bi se u potpunosti moglo utvrditi koji je najznačajniji potrebna je detaljnija analiza. Bez obzira na to, da bi se pratile male promjene svojstava sredstva čisto tektonskog porijekla, provedena je jednostavna korekcija sezonskog oblika krivulja $\delta v/v$. Modificirane $\delta v/v$ krivulje uspoređene su s histogramima broja potresa za šest serija koje su se dogodile na području od interesa. U svim je slučajeva primijećena promjena u brzini tijekom razdoblja oko povećane seizmičke aktivnosti. Međutim, da bi se to sa sigurnošću i potvrdilo, potrebno je definirati općenitiji model koji uključuje direktne uzročnike sezonskih promjena brzina kako bi modificirane $\delta v/v$ krivulje u potpunosti odražavale samo promjene mehaničkih svojstava sredstva.

Ključne riječi: Greenova funkcija, metoda analize križnih-spektara, seizmički nemir, sjeverozapadni Dinaridi

Monitoring the elastic properties of the crust in the northwestern Dinarides using ambient seismic noise

Abstract

In order to monitor seismic velocity variations in the northwestern part of Dinarides, ten years (2009–2018) of continuous vertical component recorded on fourteen stations were analyzed and the Moving Window Cross-Spectral Analysis (MWCS) by Clarke et. al. (2011) is employed. MWCS method operates in the frequency domain and is based on the comparison of two waveforms, the reference and the current CCF (cross-correlation function). Basic assumptions are homogeneity of relative velocity changes $\delta v/v$ and its manifestation as a stretching of the current CCF relative to the reference function ($\delta v/v = -\delta t/t$). Therefore, to study velocity changes of surface Rayleigh waves, relative travel time perturbations ($\delta t/t$) between all station pairs have been measured in four different frequency bands between 0.1 and 2 Hz. The reference function was constructed by stacking the one-day CFs over the whole ten year period and current CCFs were obtained by stacking one-day CFs over 90-day period. Only the coda part of the CCFs was used to estimate the velocity changes. On average, between all station pairs in the studied area, a seasonal signal in the relative velocity variation is observed with peaks during winter and troughs during summer time. The stability of the signal decreases with decreasing frequency bandwidth, but generally stays stable with increasing inter-station distance and does not depend on the azimuthal coverage. Other factors such as lack of coherent phases might be the cause of such a behavior of the signal. The seasonality of the signal is a result of several effects and to fully understand which of them is dominant further analysis is needed. Nonetheless, a simple model to correct the seasonality of the signal is made, allowing to track small changes in the mechanical properties of the crust linked to tectonic effects. The corrected $\delta v/v$ time series are compared with the number of earthquakes occurring during six different series of earthquakes. For all of them velocity changes around the time of higher seismic activity are observed. However, to completely validate such a claim, more detailed analysis is required.

Keywords: Green's function, MWCS method, ambient seismic noise, northwestern Dinarides

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Teorijska pozadina	4
2.1	Princip određivanja Greenove funkcije iz seizmičkog nemira	4
2.2	Praćenje promjena brzina seizmičkih valova	6
3	Seizmička aktivnost promatranog područja	8
4	Metoda	10
4.1	Podatci	10
4.1.1	Instrumentalne greške	13
4.2	Metoda analize križnih spektara kliznih prozora (MWCS)	14
4.2.1	Određivanje vremenskog pomaka funkcija križne-korelacije . .	14
4.2.2	Određivanje promjene seizmičkih brzina	16
5	Rezultati i diskusija	18
5.1	Analiza skupa podataka za različite frekventne raspone	18
5.2	Ovisnost promjene brzine o udaljenosti parova postaja	22
5.3	Ovisnost promjene brzine o lokaciji izvora seizmičkog nemira	24
5.4	Interpretacija sezonskih promjena brzina	26
5.5	Modeliranje sezonskih promjena brzina	27
6	Zaključak	44
	Dodaci	45
A	Tablica za poglavlje 5.2	45
B	Tablica za poglavlje 5.3	46
C	Tablice i slike za poglavlje 5.5	47
	Literatura	57

1 Uvod

Kako bi dobili informacije o Zemljinoj unutrašnjosti, seizmolozi izučavaju izolirane događaje kao što su potresi, urušavanja, eksplozije itd. Izvor jednog takvog signala do određene mjere lokaliziran u prostoru i vremenu, pa se odziv sredstva na njegovo djelovanje uobičajeno naziva impulzivnim odzivom (engl. *impulsive response*) ili Greenovom funkcijom (engl. *Green's function*). Općenito se Greenova funkcija može izračunati na temelju analize korelacijskih funkcija tranzijentnog signala (neperiodički signal za koji se može jasno odrediti vrijeme kada je počeo) zabilježenog na seizmološkim postajama. Poznavanje Greenove funkcije omogućuje poznavanje elastičkih svojstava sredstva razmatranog područja za neki određeni trenutak. Ovakvim pristupom vrlo je teško kontinuirano pratiti promjene svojstava sredstva u vremenu, pa je u tu svrhu potrebno koristiti druge metode.

Kvazi-nasumično polje seizmičkog nemira sadrži korisne informacije, pa je osim na prethodno opisan način, Greenovu funkciju moguće dobiti na temelju njegove analize (Aki, 1957). Ovakav pristup tek je u posljednja dva desetljeća doživio veći razvoj i praktičnu primjenu (primjerice u medicinskoj dijagnostici, zvučnoj tomografiji oceana, helioseizmologiji itd.), a poznat je pod nazivom seizmička interferometrija (engl. *seismic interferometry*). Danas se seizmička interferometrija osim na principu analize križnih koherencija (Aki, 1957) provodi i uz korištenje dekonvolucije (Trampert i sur., 1993) ili funkcija križne korelacije (Lobkis i Weaver, 2001), a jedna od njenih najznačajnijih primjena uključuje praćenje promjena fizikalnih svojstava rasjednih, urušnih ili vulkanskih zona na kvazi-kontinuiranoj razini. U ovome je radu seizmička interferometrija bazirana na teoriji koju su 2001. predstavili Lobkis i Weaver.

Praćenje Zemljinog odziva na kvazi-kontinuiranoj razini posljedica je usrednjavanja funkcija križnih korelacija tijekom određenog vremenskog perioda (od par sati do nekoliko mjeseci). Ovakvim se usrednjavanjem omogućuje uočavanje pomaka u vremenu između tzv. referentne i funkcije križne-korelacije koja se odnosi na kraće vremensko razdoblje. Prva istraživanja pomaka u vremenu bila su bazirana na auto-korelaciji zabilježenih signala, a danas se određuju i za parove seizmoloških postaja.

Pomaci u vremenu između dvije funkcije križne korelacije omogućuju procjenu varijacija seizmičkih brzina uz pretpostavku da su one konstantne unutar razmatranog područja. Poupinet i sur. 1984. godine predstavili su metodu u kojoj se procjenjuju pomaci u vremenu između funkcija križnih korelacija parova sličnih potresa (potresi vrlo sličnih magnituda i hipocentara), te varijacije brzina za niz kliznih prozora. Navedena metoda kasnije je prilagođena na zapise seizmičkog nemira (Brenquier i sur., 2008), a u ovome je radu korištena i opisana metoda analize križnih spektara kliznih prozora (engl. *Moving-Window Cross-Spectral Analysis*; MWCS) koju su prvi razvili Ratdomopurbo i Poupinet (1995).

U mnogim je istraživanjima primijećeno da neposredno prije ili poslije snažnih potresa može doći do značajnog smanjenja seizmičke brzine unutar sredstva (npr. Sens-Schönfelder i Wegler, 2006, Ohmi i sur., 2008, Wegler i sur., 2009). Promjene brzina moguće je uočiti kod urušnih ili vulkanskih zona, te na drugim manje seizmički aktivnim područjima kroz duže vremensko razdoblje, primjerice tijekom izmjene godišnjih doba (Nakata i Snieder, 2001). Razmatranje dugoperiodičkih promjena seizmičkih brzina od velikog je interesa jer se njihovim modeliranjem i korigiranjem potencijalno može pratiti odziv Zemljine kore na tektonske sile.

Upravo je iz tog razloga osnovni cilj ovoga rada bio ispitati uočavaju li se promjene seizmičkih brzina u najgornjem dijelu kore na području sjeverozapadnih Dinarida. Na desetogodišnji zapis (2009.–2018.) seizmičkog nemira zabilježenog na ukupno četrnaest postaja, primijenjena je metoda MWCS. Metoda se temelji na proučavanju pomaka u vremenu između funkcija križne korelacije dobivenih za višednevna razdoblja i funkcija čitavog vremenskog niza, a provodi se u frekventnoj domeni. Pomaci u vremenu između dviju funkcija križnih korelacija određuju se na temelju pripadnih faza križnih spektara niza kliznih prozora. Uz pretpostavku da se brzina mijenja homogeno unutar razmatranog područja, varijacije brzina površinskih valova ($\delta v/v$) proporcionalne su s dobivenim vremenskim razlikama. U ovome radu promotreno je kako rezultati dobiveni metodom MWCS ovise o frekventnom rasponu koji se koristi, udaljenosti parova postaja te lokaciji izvora seizmičkog nemira.

Uočene su jasne sezonske varijacije brzina koje su potom modelirane jednostavnim modelom koji uključuje sezonske promjene. Promotreno je postoji li veza između promjene brzine seizmičkih valova i seizmičke aktivnosti razmatranog područja za šest serija potresa koje su se dogodile između 2009. i 2017. godine. Smanjenje vrijednosti $\delta v/v$ koje nastupa prije povećane seizmičke aktivnosti uočeno je za pet od šest serija potresa. Nadalje, u svim je slučajevima nakon početka ili tijekom serije potresa prisutan postupni rast brzine koji moguće odražava "oporavak" sredstva u prvotno stanje. Sve druge promjene brzina koje se mogu uočiti na modificiranim grafovima nije bilo moguće povezati sa seizmičnošću. Iz tog razloga nije u potpunosti utvrđeno jesu li promjene na modificiranim krivuljama brzina zaista tektonskog porijekla.

2 Teorijska pozadina

2.1 Princip određivanja Greenove funkcije iz seizmičkog nemira

Greenova funkcija je impulzivni odgovor nehomogene linearne diferencijalne jednadžbe (definirane na nekoj domeni sa zadanim početnim i rubnim uvjetima) na jediničnu pobudu predstavljenu Diracovom δ -funkcijom. Konvolucija Greenove funkcije $G(x, s)$ i funkcije $f(x)$ daje rješenje $u(x)$ nehomogene diferencijalne jednadžbe $L[u(x)] = f(x)$. Dakle, po definiciji vrijedi: $L[G(x, s)] = \delta(x - s)$. U slučaju kada operator L ima konstantne koeficijente, za Greenovu će funkciju vrijediti: $G(x, s) = G(x - s)$.

Greenova funkcija u frekventnoj domeni zadovoljava jednadžbu oblika

$$\nabla^2 G(\vec{r}, \omega) + k^2 G(\vec{r}, \omega) = \delta(\vec{r}), \quad (2.1)$$

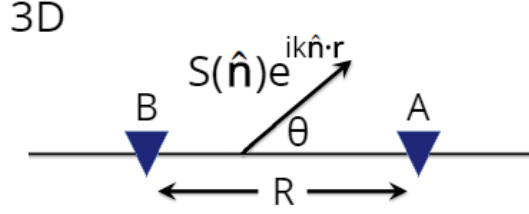
pri čemu je $k = \omega/c$ valni broj, ω kutna frekvencija, \vec{r} vektor položaja, a c brzina rasprostiranja vala. Izraz (2.1) zapravo predstavlja valnu jednadžbu Greenove funkcije koja se često naziva Helmholtzovom jednadžbom. Jednadžba (2.1) i njeno pripadno rješenje u tri dimenzije dano je kao (Snieder, 2004)

$$\frac{\partial^2 G}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial G}{\partial r} + k^2 G(\vec{r}, \omega) = \delta(\vec{r}) \implies G(\vec{r}, \vec{r}_0) = -\frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{|\vec{r}-\vec{r}_0|}. \quad (2.2)$$

U slučaju homogenog sredstva (slika 2.1), za dva prijemnika A i B koji se nalaze na lokacijama $\vec{r}_A = (R, 0, 0)$, $\vec{r}_B = (0, 0, 0)$ i udaljenosti R , valno polje bit će oblika (Snieder i Larose, 2013):

$$u_A = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} S(\theta, \varphi) e^{ikR \cos\theta} d\varphi \sin\theta d\theta, \quad u_B = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} S(\theta', \varphi') e^{ikR \cos\theta'} d\varphi' \sin\theta' d\theta', \quad (2.3)$$

pri čemu S predstavlja spektar amplitude vala za zadanu kutnu frekvenciju ω . Korelacija ova dva signala u frekventnoj domeni dana je kao umnožak $u_A u_B^*$, gdje u_B^* predstavlja kompleksno-konjugiranu vrijednost od u_B . Valovi koji nailaze na prijemnike



Slika 2.1: Prijemnici A i B koji se nalaze na udaljenosti R i na koje nailaze valovi.

moгу se smatrati slučajnim varijablama. Uz pretpostavku da su signali nekorelirani i imaju jednake spektre snage, tj. da vrijedi $\langle S(\theta, \varphi)S^*(\theta', \varphi') \rangle = |S|^2\delta(\theta - \theta')\delta(\varphi - \varphi')$, očekivana vrijednost korelacije $\langle u_A u_B^* \rangle$ će biti oblika

$$\langle u_A u_B^* \rangle = |S|^2 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} e^{ikR\cos\theta} d\varphi \sin\theta d\theta = 2\pi |S|^2 \cdot \frac{(e^{ikR} - e^{-ikR})}{ikR}. \quad (2.4)$$

Izraz (2.4) predstavlja funkciju križne korelacije signala zabilježenog na prijemnicima A i B. Po izrazu (2.2), Greenova funkcija dana je kao $G(R, \omega) = -exp(ikR)/(4\pi R)$. Zamjenom eksponencijalnih funkcija u (2.4) s $G(R, \omega)$, odnosno $G^*(R, \omega)$ dobije se

$$\langle u_A u_B^* \rangle = -\frac{8\pi^2 |S|^2}{ik} (G(R, \omega) - G^*(R, \omega)). \quad (2.5)$$

Jednadžba 2.5 daje vezu između impulzivnog odziva i spektra snage signala. Drugim riječima, razlika kauzalne $G(R, \omega)$ i akauzalne $G^*(R, \omega)$ Greenove funkcije može se izračunati na temelju križne korelacije seizmičkog nemira, a potpuna rekonstrukcija impulzivnog odziva moguća je uz raščlanjivanje članova u razlici $G(R, \omega) - G^*(R, \omega)$. Naravno, određivanje odziva iz seizmičkog nemira moguće je samo ako između razmatranih prijemnika na kojima se bilježe signali zaista postoje nekakvi valovi. U kontekstu seizmičke interferometrije, pošto ne postoje pravi fizički izvori na razmatranim lokacijama, svaka se postaja može smatrati virtualnim izvorom signala koji omogućuje određivanje odziva (Bakulin i Calvert, 2006). Također, jakost signala koji se korelira mora biti veća ili istog reda kao i efekti lokalne atenuacije kako bi dobivena Greenova funkcija zaista predstavljala odziv Zemljine kore na tektonske sile (Snieder i sur., 2007).

2.2 Praćenje promjena brzina seizmičkih valova

Promjene napetosti direktno utječu na elastička svojstva Zemljine kore. Varijacije elastičkih svojstava mogu se odrediti analizom koda valova i mikroseizmičkog nemira zbog njihove osjetljivosti na male perturbacije elastičkih parametara (Aki, 1957). Konkretnije, analizom funkcija križne korelacije seizmičkog nemira (CCF skraćeno od engl. *cross-correlation functions*) moguće je procijeniti promjene brzina površinskih valova na nekom području. U tu se svrhu uspoređuju višednevne i referentna CCF, odnosno mjeri se njihov pomak u vremenu. Višednevne CCF predstavljaju srednjak jednodnevnih CCF određenog broja dana, dok se referentna CCF odnosi na usrednjeno stanje dužeg vremenskog razdoblja (najčešće čitavog perioda za koji se žele procijeniti promjene u seizmičkim brzinama).

Razlikuju se dvije osnovne metode koje omogućuju praćenje promjena seizmičkih brzina:

1. *Passive Image-Interferometry* (Sens-Schönfelder i Wegler, 2006) i
2. *Moving-Window Cross-Spectral Analysis*, MWCS (Ratdomopurbo i Poupinet, 1995).

Prva metoda provodi se u vremenskoj domeni, a nastala je po uzoru na interferometriju koda valova (engl. *Coda wave interferometry*, Snieder, 2006). Druga metoda provodi se u frekventnoj domeni i generalno je bolja jer omogućuje jasno definiranje širine prozora unutar kojeg se računa koherentnost signala korištenog pri procjeni varijacija brzina. Bez obzira na to, obje metode pokazuju sličnu osjetljivost.

MWCS metodu prvi su predstavili Poupinet i sur. (1984). U svome su radu procijenili pomake u vremenu između CCF parova sličnih potresa za niz kliznih prozora. Pri tome su pretpostavili da su promjene brzine konstantne unutar razmatranog područja (jezero Coyote, Kalifornija) i proporcionalne negativnim vrijednostima vremenskih pomaka dviju CCF. MWCS metoda iz 1984. godine danas je prilagođena i primijenjena na funkcije križne korelacije seizmičkog nemira na razne načine. Prvi koji su to napravili bili su Brenguier i sur. (2008), a u ovome je radu korištena metoda MWCS opisana u Clarke i sur. (2011).

Metoda MWCS može se primijeniti na CCF seizmičkog nemira zabilježenog na različitim parovima postajama ili na samo jednoj postaji (ACF skraćeno od engl. *autocorrelation function*). Na početku analize potrebno je definirati minimalno jednu referentnu i nekoliko višednevnih funkcija križnih korelacija. Radi lakšeg računanja, uobičajeno je da se kontinuirani zapis šuma podijeli u manje dijelove (npr. po satima ili danima) na temelju kojih se računaju križne korelacije. Pojedinačne CCF se potom objedinjuju u odgovarajuću cjelinu, pri čemu je potrebno voditi računa da broj funkcija koje čine referentnu CCF (N_{ref}) bude dovoljno veći od broja objedinjenih funkcija koje tvore višednevne CCF (N_{cur}), tj. $N_{ref} \gg N_{cur}$.

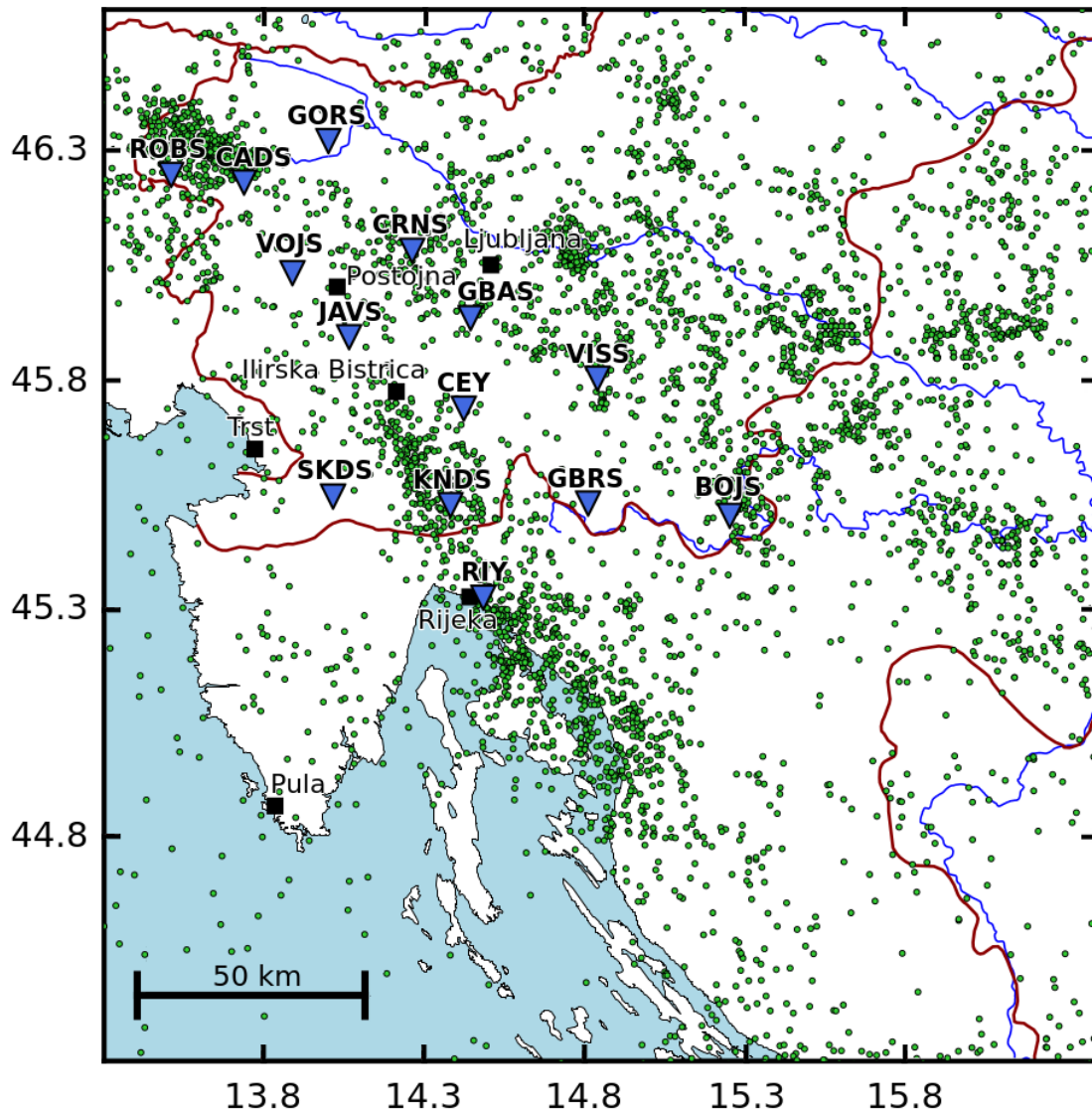
Metoda se provodi u dva glavna koraka. Prvi korak uključuje određivanje vremenskog pomaka između referentne i višednevne CCF za niz preklapajućih vremenskih prozora. U drugome se koraku na temelju dobivenih pomaka u vremenu procjenjuju varijacije brzina za koje se pretpostavlja da su konstantne unutar razmatranog područja. Uspješnost metode ovisi o izboru N_{ref} i N_{cur} , duljini i području preklapanja i ukupnom broju vremenskih prozora koji se koriste u analizi. Pregled uspješnosti metode dan je u radu od Clarke i sur. (2011).

3 Seizmička aktivnost promatranog područja

Područje koje je analizirano u ovome radu karakterizirano je interakcijom južnih i istočnih Alpa, Dinarida i Jadranske mikroploče, a obuhvaća sjeverozapadni dio Vanjskih Dinarida. Jadranska mikroploča se sudara s Europskom na sjeveru (Alpe), podvlači pod Dinaride na sjeveroistoku te rotira oko pola smještenog u zapadnim Alpama suprotno od smjera kazaljke na satu.

Zapadni dio Slovenije i šire riječko područje, koji su analizirani u ovome radu (slika 3.1), pripadaju sjeverozapadnom dijelu Vanjskih Dinarida. Dinaridi su borano-navlačni pojas koji se pruža od Južnih Alpa na sjeverozapadu do Albanida i Helenida na jugoistoku, a dijele se na Unutarnje i Vanjske. Vanjski Dinaridi su nastali deformacijom sjeveroistočnog dijela Jadranske mikroploče te se uglavnom sastoje od stijena nekadašnje Jadranske karbonatne platforme. Područje Dinarida seizmički je umjereno aktivno s povremenom pojavom snažnih potresa čija su žarišta većinom smještena u gornjoj kori (dubina do 20 km).

Na području od interesa, potresi su uzrokovani dominantno transpresijskim režimom uz lokalnu kompresiju. Rasjedi su uglavnom desni s horizontalnim pomakom (engl. *strike-slip*) pružanja sjeverozapad-jugoistok. Procjene hazarda su relativno visoke, tj. smatra se da se premašivanje 0.25-0.30 g događa s povratnim periodom od 475 godina (SHARE Project, Giardini i sur., 2014). U zapadnoj Sloveniji, lokalno najsnažniji potresi dogodili su se uzduž Idrijskog rasjeda u 16. stoljeću ($M_w = 6.8$), te na prijelazu 20. u 21. stoljeće uzduž rasjeda Ravne ($M_w = 5.6$, 1998. godine i $M_w = 5.2$, 2004. godine; Vičić i sur., 2019). Okolica Rijeke Jake je potrese doživjela u 18. i 19. stoljeću (Herak i sur., 2017, 2018).



Slika 3.1: Prikaz područja od interesa. Crni kvadrati označavaju gradove, a plavi trokuti seizmološke postaje korištene u analizi. Zelenim kružićima prikazani su epicentri potresa $M \geq 2.0$ u razdoblju od 1908. do 2018. godine iz Hrvatskog kataloga potresa.

4 Metoda

Za računanje križnih korelacija seizmičkog šuma, te procjenu promjena brzina površinskih Rayleighjevih valova na području od interesa, u ovome je radu korišten programski paket MSNoise verzija 1.5 (kratica od engl. *Monitoring using Seismic Noise*) kojeg su razvili Lecocq i sur. (2014). Softver je baziran na MWCS metodi po Clarke i sur. (2011). U naredim poglavljima opisani su podatci i cjelokupan postupak kojim su određene varijacije brzina.

4.1 Podatci

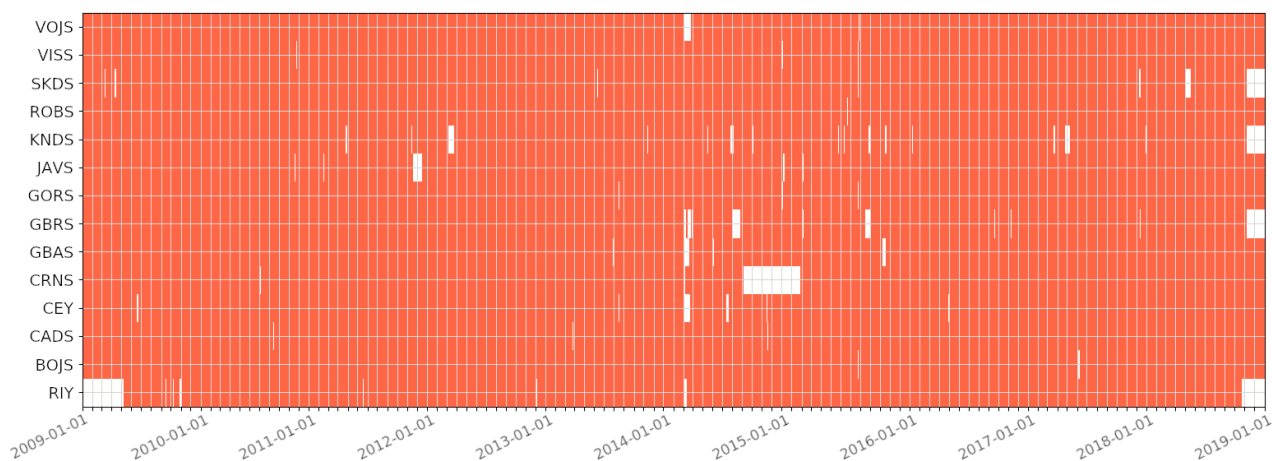
U analizi su korišteni seizmogrami zabilježeni na hrvatskoj postaji RIY i tri-naest slovenskih seizmoloških postaja prikazanih na slici 3.1 i popisanih u tablici 4.1. Sve se postaje nalaze na području sjeverozapadnih Dinarida, a instrumenti pomoću kojih su prikupljeni podatci su širokopojasni trokomponentni seizmografi proizvođača Gürlap, Nanometrics i Streckeisen. Kako bi se pratile promjene brzina površinskih Rayleighjevih valova, analizirani su svi dostupni zapisi seizmičkog nemira vertikalnih komponenti seizmograma desetogodišnjeg razdoblja od 2009. do kraja 2018. godine (slika 4.1).

Podatci svake postaje po potrebi su spojeni ili razdvojeni na dijelove koji tvore jednodnevne zapise. Pri tome su manje praznine (do deset uzoraka) između pojedinačnih dijelova popunjene interpoliranim vrijednostima. Jednodnevni zapisi filtrirani su niskopropusnim (8 Hz) i visokopropusnim filterom (0.01 Hz). Originalno uzorkovanje podataka smanjeno je na 20 Hz pomoću Lanczosove metode (opširnije objašnjenje korištenja Lanczosove metode daju Lecocq i sur., 2014).

Za poboljšanje stabilnosti zapisa nemira u vremenu i uklanjanje određenih nepoželjnih događaja kao što su potresi, eksplozije i sl., prije koreliranja signala provedena je jedno-bitna normalizacija. Jedno-bitnom normalizacijom amplitude zapisa seizmičkog nemira zamjenjuju se pripadnim predznacima i iako je takva operacija nelinearna, faze razmatranih signala (koje su potrebne za računanje CCF) ostaju očuvane (Cupillard i sur., 2011).

Tablica 4.1: Osnovne informacije o seizmološkim postajama korištenim u ovom radu.

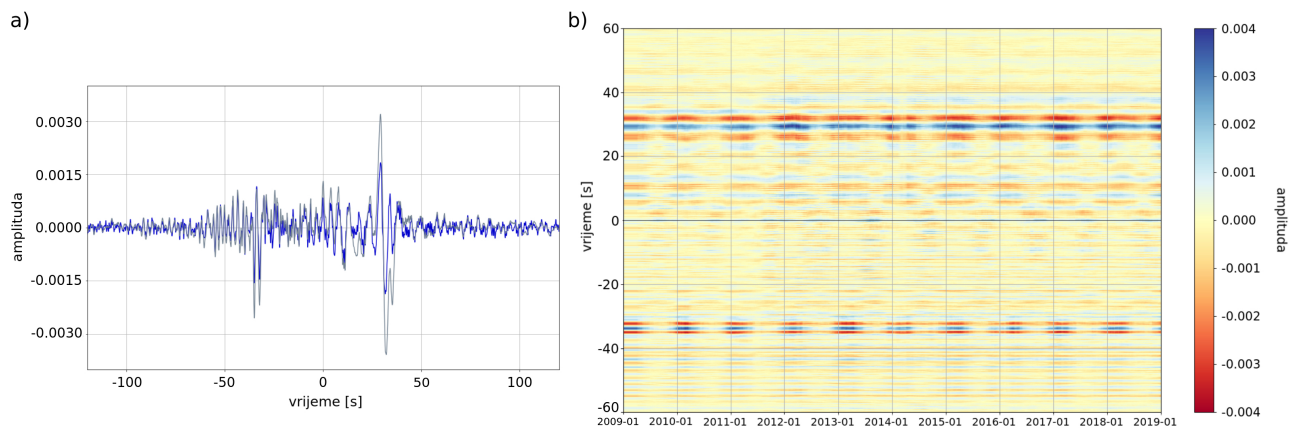
Seizmološka postaja	φ [°N]	λ [°E]	Instrument
Bojanci (BOJS)	45.5043	15.2518	STS2
Čadrg (CADS)	46.2281	13.7368	CMG-3ESP
Cerknica (CEY)	45.7381	14.4221	T120
Črni vrh (CRNS)	46.0807	14.2613	CMG-3ESP
Gornja Brezovica (GBAS)	45.9348	14.4434	CMG-3ESP
Gornja Briga (GBRS)	45.5311	14.8101	CMG-3ESP
Gorjuše (GORS)	46.3174	13.9999	CMG-3T
Javornik (JAVS)	45.8934	14.0643	CMG-3T
Knežji Dol (KNDS)	45.5278	14.3807	STS2
Rijeka (RIY)	45.3251	14.4830	CMG-40T
Robič (ROBS)	46.2445	13.5094	CMG-3ESP
Skadanščina (SKDS)	45.5464	14.0143	STS2
Višnje (VISS)	45.8033	14.8393	CMG-3ESP
Vojsko (VOJS)	46.0322	13.8877	T120



Slika 4.1: Podatci korišteni u analizi: crvenom bojom označena su razdoblja u kojima na seizmološkim postajama postoje podatci.

Nadalje, kako je jakost signala mikrosezmičkog nemira općenito sezonski varijabilna (Stehly i sur., 2006), provedeno je i spektralno izbjeljivanje u frekventnom rasponu od 0.01 do 4 Hz. Spektralnim izbjeljivanjem navedeni se efekti umanjuju, tj. osigurava se da konačni rezultat ovisi samo o promjenama razmatranog sredstva, a ne izvora (Shapiro i sur., 2006).

Dnevne ACF i CCF svih parova postaja dobivene su sjedinjavanjem 30-minutnih funkcija križnih korelacija u 24-satno razdoblje. Funkcije su računane za parove vertikalnih (ZZ) komponenti. Referentna CCF dobivena je sjedinjavanjem čitavog niza funkcija desetogodišnjeg razdoblja ($N_{ref} = 3653$). Kako bi se mogle pratiti promjene brzina, višednevne CCF definirane su kao srednjak od $N_{cur} = 90$ jednodnevnih funkcija. Na slici 4.2 prikazane su višednevna ($N_{cur} = 90$) i referentna CCF za par postaja KNDS–VOJS (a), te pripadni interferogrami višednevnih CCF ($N_{cur} = 90$) čitavog desetogodišnjeg razdoblja za isti par postaja (b).

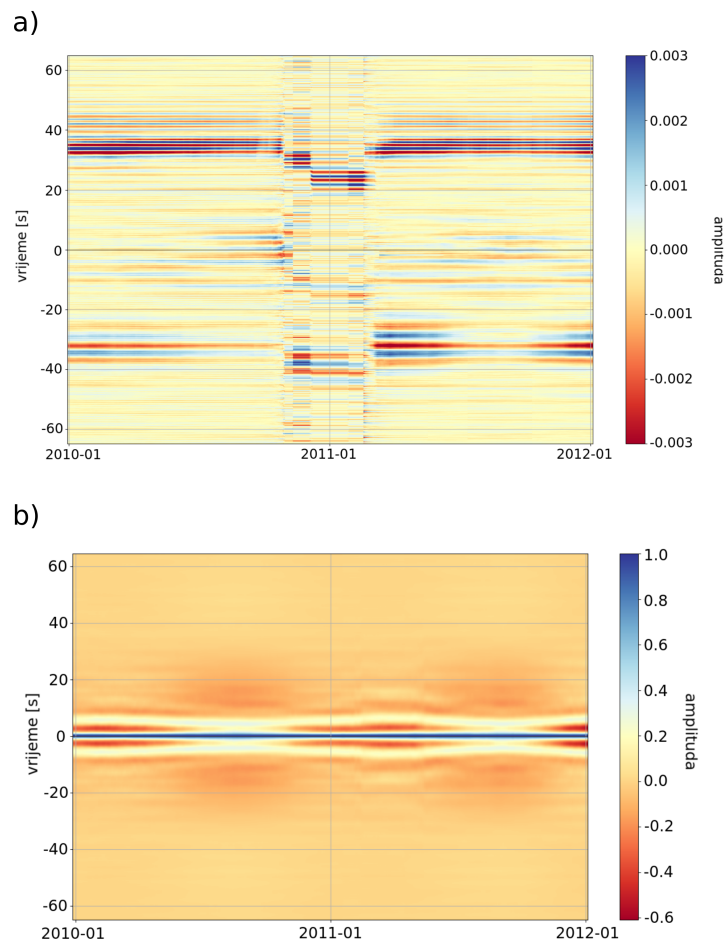


Slika 4.2: a) Višednevna CCF koja se odnosi na razdoblje od 23.3. do 20.6.2010. (plava linija) i referentna CCF desetogodišnjeg niza podataka (siva linija) za par postaja KNDS–VOJS. b) Sve višednevne korelacijske funkcije desetogodišnjeg razdoblja za par postaja KNDS–VOJS.

Iz slike 4.2 (a) se može uočiti da dobivene CCF nisu simetrične - amplitude akauzalnog dijela (negativna vremena) manje su od onih koje se odnose na kauzalni dio (pozitivna vremena). Asimetričnost signala ukazuje na to da je između 2009. i 2019. godine većina energije bila propagirana iz smjera postaje KNDS prema VOJS. Nadalje, oblik kauzalnog i akauzalnog signala nije identičan. Različitost oblika najčešće se pripisuje različitosti spektra nemira koji ovisi o smjeru propagacije (Stehly i sur., 2006). Na slici 4.2 (b) mogu se uočiti promjene u koherentnim fazama koje nastupaju nakon ± 30 s, te sezonske promjene u amplitudama. Maksimumi signala CCF javljaju se u ožujku, a minimumi u rujnu svake godine.

4.1.1 Instrumentalne greške

Interferogrami koji se odnose na postaje uparene sa stanicom RIY pokazuju da na prijelazu 2010. u 2011. godinu dolazi do naglog pomaka u signalu CCF (slika 4.3, a). Ovakav fenomen najvjerojatnije je posljedica poremećenja GPS signala koji je uzrokovao krivu sinkronizaciju vremena postaje RIY u odnosu na pravo vrijeme. Iz tog su razloga podatci postaje RIY, za razdoblje tijekom kojeg se uočava pomak, uklonjeni u daljnjim analizama. Međutim, bitno je napomenuti da se općenito instrumentalne pogreške ovakvoga tipa mogu korigirati ako je poznat vremenski pomak (Stehly i sur., 2007). Nadalje, pomaci u signalima ili neki drugi problemi ne mogu se uočiti ako se razmatraju samo autokorelacijski interferogrami (slika 4.3, b).



Slika 4.3: a) Interferogram para postaja RIY–KNDS. Pomak u signalu se može uočiti za razdoblje između 28.10.2010. i 11.3.2011. godine. Isti takav pomak prisutan je na svim drugim interferogramima koji se odnose na parove s RIY, pa su podatci za to razdoblje uklonjeni u daljnjim analizama. b) Autokorelacijski interferogram postaje RIY. U ovome slučaju se ne uočava pomak u signalu.

4.2 Metoda analize križnih spektara kliznih prozora (MWCS)

Kako bi se pratile promjene seizmičkih brzina razmatranog područja, primijenjena je metoda analize križnih spektara kliznih prozora (MWCS; Clarke i sur., 2011). Metoda se provodi u dva glavna koraka - određivanje pomaka u vremenu između višednevne i referentne CCF te potom varijacija brzina koje su proporcionalne tim pomacima. Kako je osnovna pretpostavka metode homogenost promjena brzina unutar razmatranog područja, dobivene rezultate potrebno je uzeti s određenom dozom nepouzdanosti.

4.2.1 Određivanje vremenskog pomaka funkcija križne-korelacije

Prvi korak pri određivanju pomaka u vremenu je da se višednevne i referentna CCF podijele u segmente definirane nizom preklapajućih vremenskih prozora. Svaki prozor se odnosi na jedno mjerenje pomaka u vremenu δt , a njihove duljine, preklapanje i ukupan broj ovisi o karakteristikama CCF koje se analiziraju. Dobiveni vremenski segmenti potom se centriraju s obzirom na svoju sredinu i modificiraju korištenjem Hannove funkcije. Da bi se odredio pomak u vremenu, razmatra se križni spektar $X(\nu)$ između vremenskog niza referentne i višednevne CCF koji je definiran kao

$$X(\nu) = F_{ref}(\nu) \cdot F_{cur}^*(\nu) = |X(\nu)|e^{i\phi(\nu)}. \quad (4.1)$$

Ovdje F_{ref} i F_{cur} predstavljaju Fourierove transforme referentne i višednevne CCF, ν frekvenciju u Hz, $|X(\nu)|$ amplitudu, a $\phi(\nu)$ fazu križnog spektra. Za računanje pomaka u vremenu između višednevnog i referentnog signala, potrebno je da analizirani prozori dvaju signala u određenoj mjeri budu slični. Sličnost signala kvantitativno se procjenjuje pomoću križne koherencije $C(\nu)$ pripadnih spektara gustoće dviju CCF

$$C(\nu) = \frac{|X(\nu)|}{\sqrt{|F_{ref}|^2 \cdot |F_{cur}|^2}}. \quad (4.2)$$

U izrazu (4.2) crtice nad varijablama predstavljaju izgladivanje koje je postignuto primjenom kosinusnog filtera s poluširinom od 0.1 Hz. Križne koherencije poprimaju vrijednosti između 0 i 1, pri čemu veće vrijednosti odgovaraju većoj sličnosti razmatranih prozora i spektralnih gustoća signala.

Na temelju faze križnog spektra moguće je odrediti pomak u vremenu između višednevne i referentne CCF. Faza $\phi(\nu)$ proporcionalna je s frekvencijom, tj. vrijedi

$$\phi_j = m \cdot \nu_j, \quad m = 2\pi\delta t. \quad (4.3)$$

Za i -ti prozor, vremenski pomak δt_i može se odrediti iz nagiba m dobivenog primjenom linearne regresije na nizu uzoraka $j = l, \dots, h$ unutar raspona frekvencija od interesa. Clarke i sur. (2011) u svojoj metodi prilikom regresije svakoj od križnih faza pridjeljuju težinske faktore w_j . Težinski faktori ovise o križnoj koherenciji koja je dana s izrazom (4.2) i amplitudi križnog spektra, a definirani su kao

$$w_j = \sqrt{\frac{C_j^2}{1 - C_j^2}} \cdot \sqrt{|X_j|}. \quad (4.4)$$

Primjenom metode najmanjih kvadrata s težinama, za nagib m dobije se

$$m = \frac{\sum_{j=l}^h w_j \phi_j \nu_j}{\sum_{j=l}^h w_j \nu_j^2}. \quad (4.5)$$

Pripadna pogreška nagiba e_m dana je kao

$$e_m = \sqrt{\sum_{j=l}^h \left(\frac{w_j \nu_j}{\sum_i w_i \nu_i^2} \right)^2 \sigma_\phi^2}. \quad (4.6)$$

U izrazu (4.6) σ_ϕ^2 predstavlja kvadrat odstupanja $N = (h - l)$ vrijednosti ϕ_j i $m\nu_j$, odnosno

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\sum_j (\phi_j - m\nu_j)^2}{N - 1}. \quad (4.7)$$

Konačno, izraz (4.3) omogućuje određivanje pomaka u vremenu δt između referentne i višednevne CCF, te njegove pripadne pogreške $e_{\delta t}$:

$$\delta t = \frac{m}{2\pi}, \quad e_{\delta t} = \frac{e_m}{2\pi}. \quad (4.8)$$

Ponavljanjem navedenog postupka za sve prozore dobije se N_w vrijednosti δt od kojih svaka odgovara centralnom vremenu t_i i -tog prozora.

Ovdje je potrebno primijetiti da je za zadani raspon frekvencija pogreška $e_{\delta t}$ proporcionalna s e_m , a samim time obrnuto proporcionalna s korijenom broja uzoraka korištenih prilikom regresije (N). Ako su prije Fourierove transformacije praznine analiziranih vremenskih segmenata bile pogrešno interpolirane, procijenjena greška od δt bit će umanjena. Množenjem $e_{\delta t}$ s $\sqrt{N_F}$, gdje je N_F broj nadodanih vrijednosti, moguće je izbjeći krivu procjenu pogreške.

4.2.2 Određivanje promjene seizmičkih brzina

Ako se promjene napetosti na području od interesa mogu smatrati homogenima, tada će i varijacije brzine seizmičkih valova $\delta v/v$ biti homogene. Promjene brzina manifestirat će se kao razvlačenje višednevne CCF u odnosu na referentnu CCF za iznos $-\delta t/t$. Odnosno, tada vrijedi

$$\frac{\delta t}{t} = -\frac{\delta v}{v}. \quad (4.9)$$

Primjenom linearne regresije na izraz 4.9, tj. N_w mjerenja pomaka u vremenu, moguće je odrediti promjene seizmičkih brzina:

$$\delta t_i = a + bt_i, \quad i = 1, \dots, N_w. \quad (4.10)$$

Koeficijent a predstavlja potencijalni instrumentalni drift (Stehly i sur., 2007), dok koeficijent b odgovara omjeru $-\delta v/v$. Njihovi se iznosi određuju primjenom metode najmanjih kvadrata s težinama p_i , pri čemu su težine p_i definirane na temelju procijenjene pogreške pomaka u vremenu funkcija križnih-korelacija, tj. $p_i = 1/e_{\delta t_i}^2$. Iz zahtjeva da je $\sum_i (\delta t_i - a - bt_i)^2$ minimalna, slijedi

$$a = \langle \delta t \rangle - b \langle t \rangle, \quad b = \frac{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle) \delta t_i}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad (4.11)$$

gdje je $\langle t \rangle = \sum p_i t_i / \sum p_i$, $\langle \delta t \rangle = \sum p_i \delta t_i / \sum p_i$.

Pripadni kvadrati pogreška koeficijenata a i b su redom:

$$e_a^2 = \frac{\langle t^2 \rangle}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad e_b^2 = \frac{1}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad (4.12)$$

pri čemu $\langle t^2 \rangle = \sum p_i t_i^2 / \sum p_i$. Stoga se promjena brzine $\delta v/v$ i kvadrat njene pogreške $e_{\delta v/v}^2$ mogu napisati kao

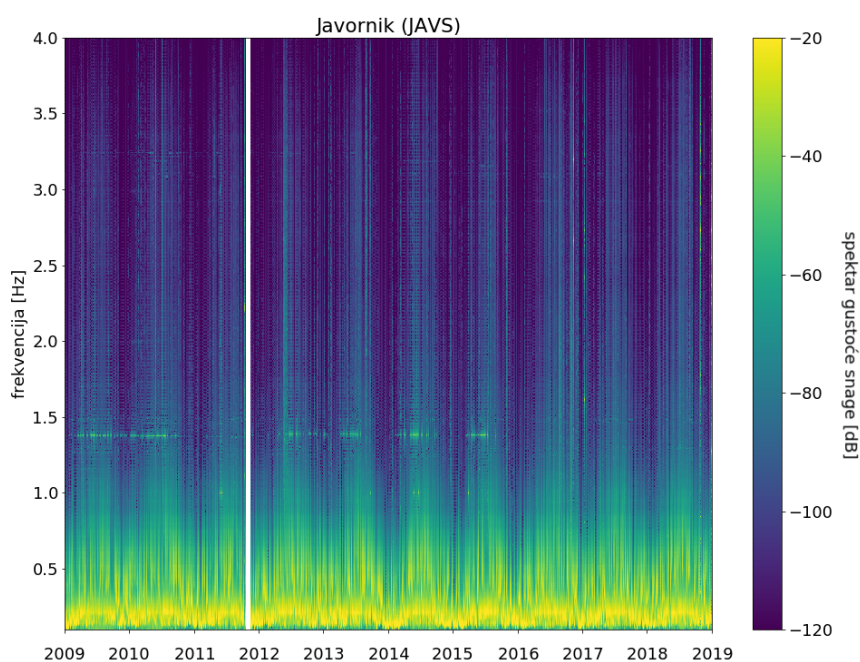
$$\delta v/v = -\frac{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle) \delta t_i}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad e_{\delta v/v}^2 = \frac{1}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}. \quad (4.13)$$

Pogreška promjene brzine $e_{\delta v/v}$ obrnuto je proporcionalna s korijenom broja prozora korištenih prilikom računanja δt_i . Smanjivanjem razmaka između centralnih vremena prozora ili povećavanjem njihovog broja N_w , kvadrat pogreške $e_{\delta v/v}^2$ će biti manji.

5 Rezultati i diskusija

5.1 Analiza skupa podataka za različite frekventne raspone

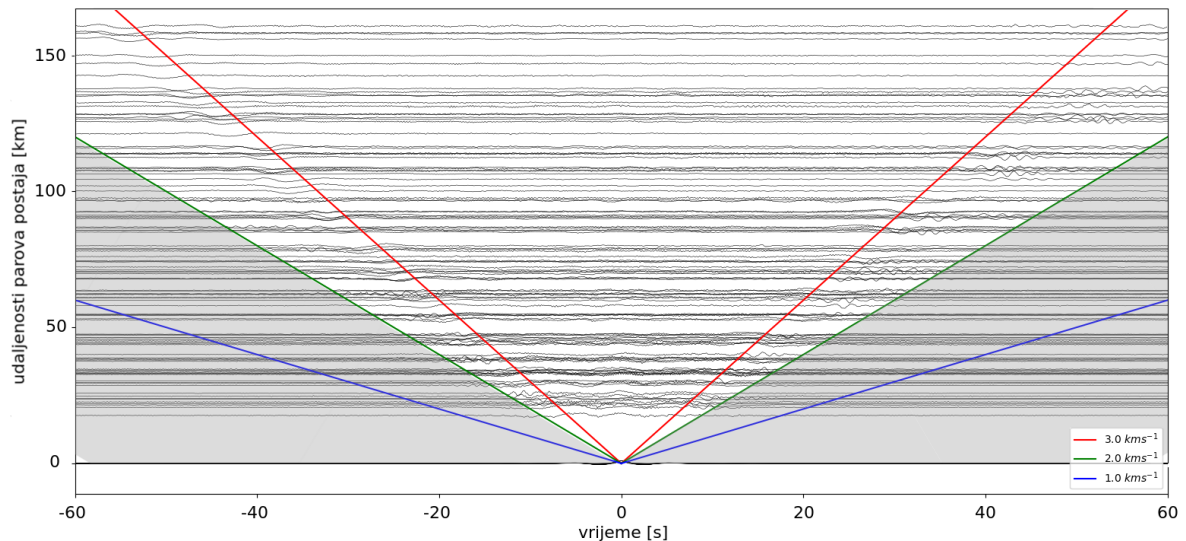
Metoda MWCS primijenjena je na ukupno četrnaest postaja koje se nalaze na području sjeverozapadnih Dinarida. Da bi se razmotrila ovisnost promjena brzina površinskih Rayleighjevih valova ($\delta v/v$) o rasponima frekvencija korištenih u metodi, izračunate ACF i CCF filtrirane su u različitim pojasevima od 0.1 do 2 Hz. Ovakav frekventni raspon odabran je zato što se u njemu javlja tzv. mikroseizmički maksimum (engl. *microseismic peak*, Stehly i sur., 2006). Točnije, ovakvim frekventnim rasponom obuhvaćena je većina mikroseizmičke aktivnosti koja se unutar razmatranog područja može primijetiti do 1 Hz (primjer spektra gustoće snage ACF koji pokazuje mikroseizmičku aktivnost dan je na slici 5.1).



Slika 5.1: Spektar gustoće snage jednodnevnih autokorelacijskih funkcija postaje JAVS u ovisnosti o frekvenciji za desetogodišnje razdoblje.

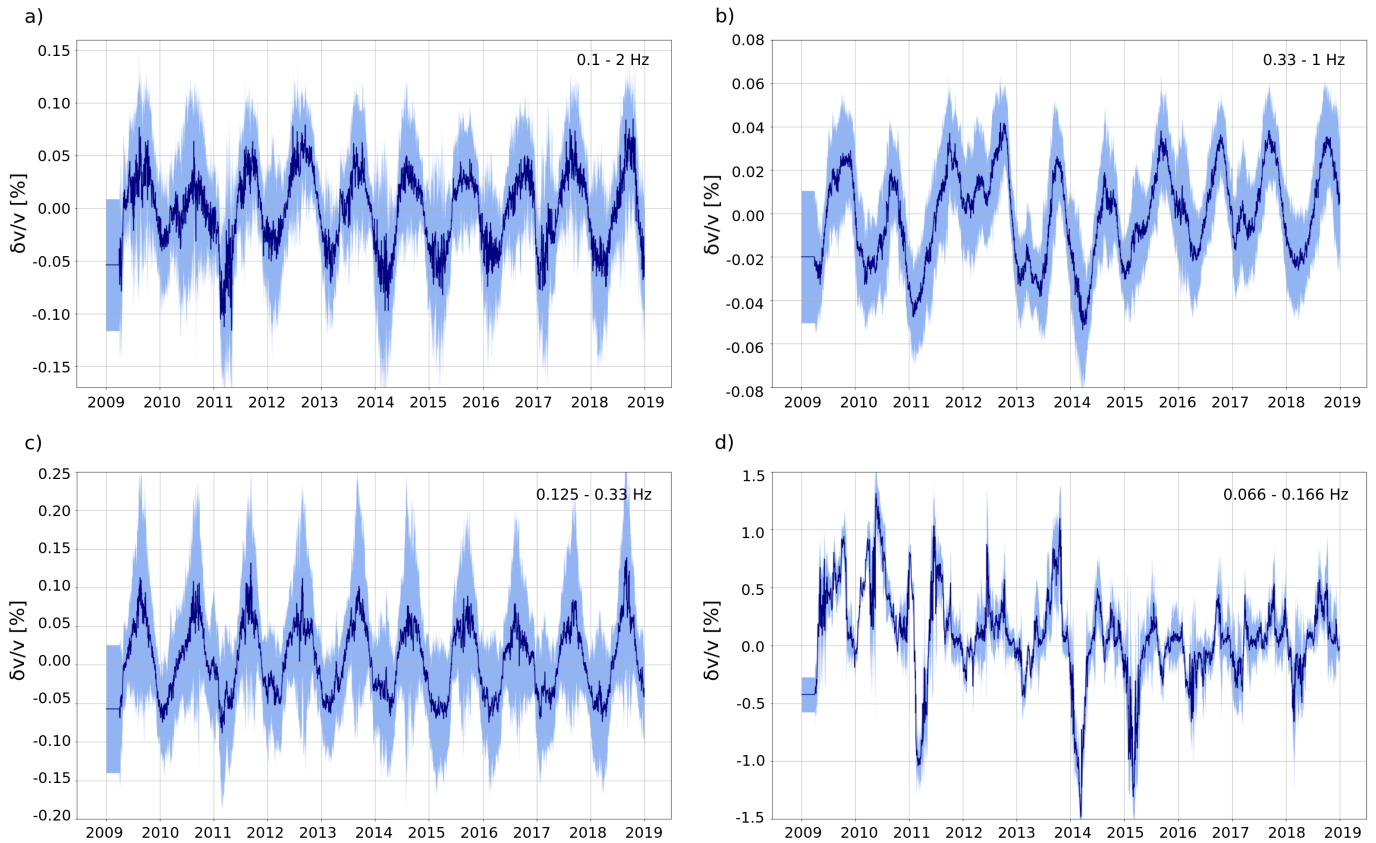
Korišteni su sljedeći frekventni rasponi: 0.1–2 Hz, 0.33–1 Hz, 0.125–0.33 Hz i 0.066–0.166 Hz. Po uzoru na Meier i sur. (2010), faze križnih-spektara određene su za prozore širine $L = 50$ s uz preklapanje od 10 s. Pomaci u vremenu određeni su primjenom linearne regresije na prozore širine 30 s za dio signala koji se odnosi na kodu (slika 5.2) uz minimalnu koherenciju od $C(\nu) \geq 0.55$.

Koda valovi su nekoherentni valovi nastali kao rezultat višestrukog raspršenja seizmičkih valova na heterogenostima u sredstvu. Za razliku od direktnih valova, koda valovi su manje osjetljivi na prostornu raspodjelu izvora i jakost signala mikro-seizmičkog nemira koja je općenito sezonski varijabilna (Hadziioannou i sur., 2009). Upravo je iz tog razloga u metodi korišten koda signal.



Slika 5.2: Referentne CCF svih parova postaja i frekventni raspon od 0.1 do 2 Hz. Crvene, zelene i plave linije predstavljaju brzine valova na temelju kojih je određen početak prozora širine 30 s (sivo naznačeno područje), a koji se odnosi na koda. Kako je za svaki od četiri frekventna raspona brzina od 2 km/s bila dovoljna da se izbjegnu direktni valovi, njome je definiran početak prozora unutar kojeg se primjenjuje linearna regresija.

Na slici 5.3 prikazane su u postotcima medijalne vrijednosti promjena seizmičkih brzina $\delta v/v$ i njihova odstupanja svih parova postaja za četiri frekventna raspona korištena u analizi. Višednevne CCF dobivene su sjedinjavanjem 90-dnevnog niza, pa se prva vrijednost $\delta v/v$ koju je moguće izračunati odnosi upravo na devedeseti dan. Kako se varijacije brzina prvih 90 dana ne mogu odrediti, njihove su vrijednosti izjednačene s prvim postojećim iznosom.

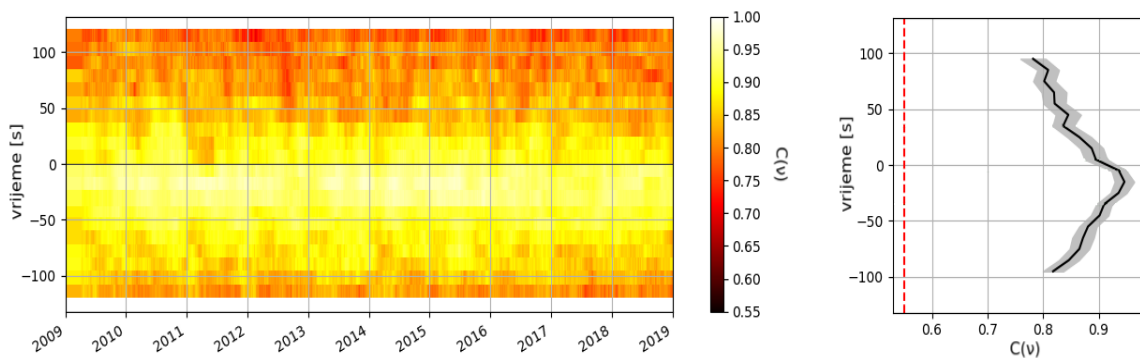


Slika 5.3: Medijalne vrijednosti $\delta v/v$ (tamno plave krivulje) i njihova odstupanja (svijetlo plava naznačena područja) dobivena za frekventni raspon: a) 0.1–2 Hz, b) 0.33–1 Hz, c) 0.125–0.33 Hz i d) 0.066–0.166 Hz.

Jasne sezonske promjene seizmičkih brzina mogu se uočiti za svaki osim posljednjeg (0.066–0.166 Hz) frekventnog raspona. Amplitude sezonskih varijacija brzina reda su veličine oko $\pm 0.07\%$ za raspon 0.1–2 Hz, $\pm 0.04\%$ za 0.33–1 Hz, te $\pm 0.1\%$ 0.125–0.33 Hz. Maksimumi se postižu u devetom, a minimumi u trećem mjesecu. U slučaju frekventnog raspona od 0.066 do 0.166 Hz, sezonski oblik promjena brzina više nije toliko jasan - uz godišnje minimume i maksimume (čije su amplitude preko $\pm 1.0\%$) više je lokalnih ekstrema, pa je iz tog razloga oblik krivulje drugačiji nego u prethodna tri slučaja.

Općenito na stabilnost rezultata i mogućnost uočavanja jasnih sezonskih varijacija utječe nekoliko faktora: koherentnost signala koja je određena vrijednošću $C(\nu)$, udaljenost parova postaja, azimutalna pokrivenost smjera iz kojeg dolazi signal te geološka građa područja. Svi navedeni razlozi mogu doprinosti nestabilnosti konačnog rezultata određenog frekventnog raspona (u ovome slučaju za raspon od 0.066 do 0.166 Hz), pa je poželjno provesti i pripadne analize.

Što se tiče vrijednosti $C(\nu)$ u ovisnosti o korištenom frekventnom rasponu, primijećeno je da se najstabilniji signali (s najvećim koherencijama) javljaju za raspon 0.125–0.33 Hz. Za raspone 0.1–2 Hz i 0.33–1 Hz vrijednosti $C(\nu)$ također su vrlo visoke, pa je zato moguće uočiti sezonske promjene brzina. Signal koji obuhvaća periode između 6 i 15 s (0.066–0.166 Hz) ima manje vrijednosti $C(\nu)$, pa pripadna $\delta v/v$ krivulja ne poprima više oblik s jasnim sezonskim izmjenama ekstremnih vrijednosti. Dakle, stabilnost rezultata, a samim time i mogućnost uočavanja sezonskih varijacija, određena je iznosom $C(\nu)$. Ovdje je još bitno napomenuti da je bez obzira na frekventni raspon, uočeno kako signal koji dolazi iz smjera Atlantskog oceana i Jadranskog mora ima veću koherenciju nego signal koji putuje iz suprotnog smjera (slika 5.4). Drugim riječima, signal koji putuje iz unutrašnjosti prema moru je slabiji, pa su i iznosi $C(\nu)$ manji, jer se njegovi primarni izvori nalaze na većim udaljenostima.



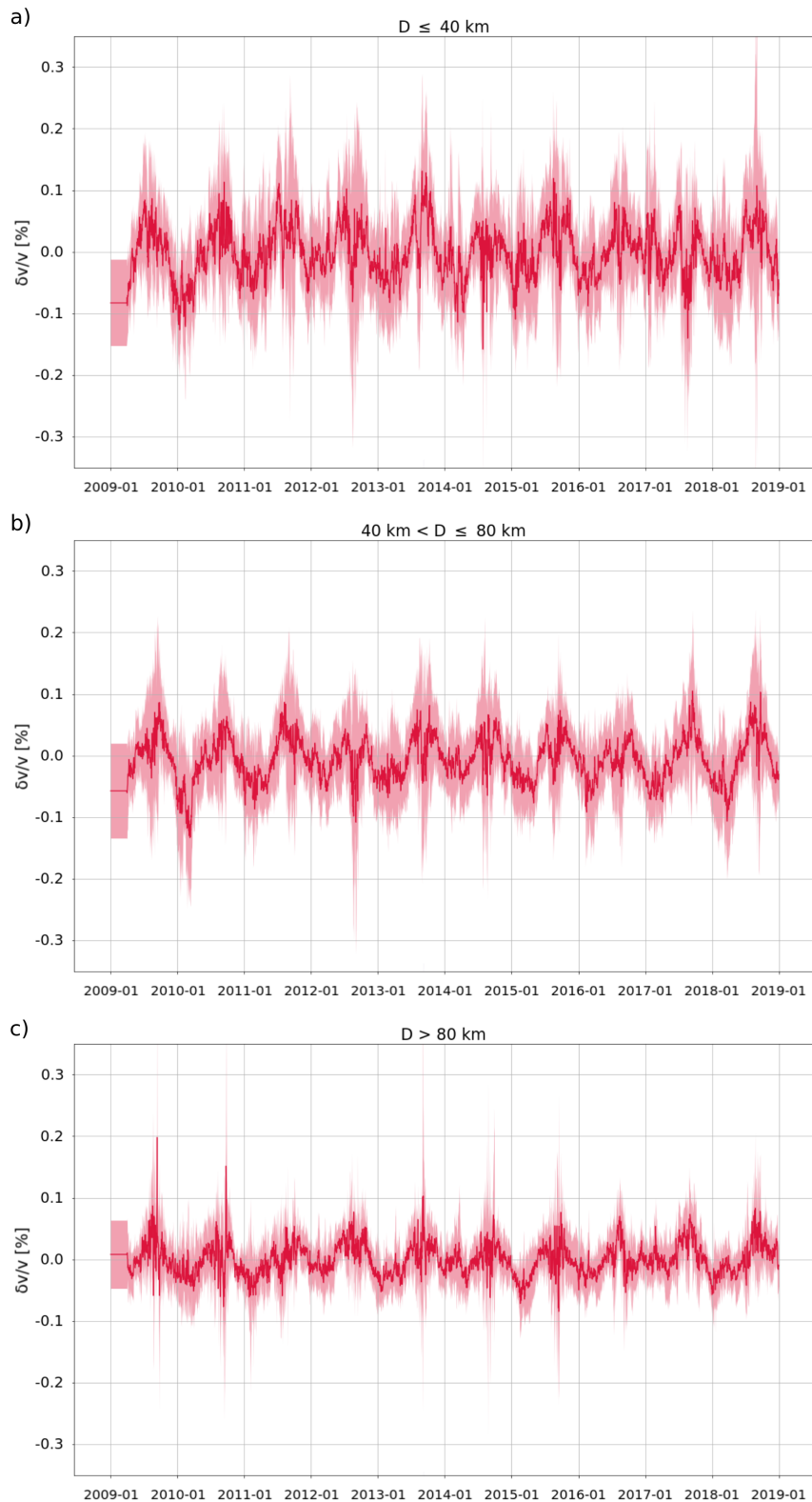
Slika 5.4: Vrijednosti $C(\nu)$ desetogodišnjeg razdoblja (lijevo) i pripadna prosječna vrijednost $C(\nu)$ s odstupanjima (sivo naznačena područja, desno) za par postaja GBAS–SKDS. Crvena crtkana linija predstavlja minimalnu koherenciju koja se uzima u obzir pri računanju $\delta t/t$.

U naredna dva poglavlja promotreno je kako udaljenosti parova postaja te azimutalna pokrivenost smjera iz kojeg dolazi signal (lokacija izvora seizmičkog nemira) utječu na oblik $\delta v/v$ krivulje. Kako postaje koje su korištene u analizi ne prekrivaju geološki različita područja, pripadna analiza ovisnosti rezultata o građi terena nije provedena.

5.2 Ovisnost promjene brzine o udaljenosti parova postaja

Kako bi se promotriala ovisnost promjena brzina o udaljenosti parova postaja, 91 par postaja (svi parovi postaja, ali bez autokorelacije), podijeljeno je u tri skupine. Prvu skupinu čine parovi postaja čije su udaljenosti $D \leq 40$ km, drugu skupinu parovi postaja za koje je $40 \text{ km} < D \leq 80 \text{ km}$ i treću parovi postaja za koje $D > 80 \text{ km}$. U prvoj skupini ukupno je 27, u drugoj 38, a u trećoj 26 parova postaja. Popis parova postaja po grupama nalazi se u tablici A.1 u Dodatku A.

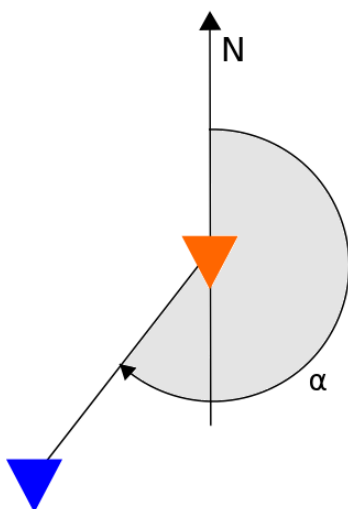
Metoda MWCS provedena je u frekventnom rasponu od 0.125 do 0.33 Hz za 90-dnevne CCF parova postaja. Cjelokupni postupak i ostali parametri korišteni u metodi identični su onima iz prethodne analize. Na slici 5.5 prikazane su dobivene medijalne promjene brzina i pripadna odstupanja prve (a), druge (b) i treće (c) skupine postaja. Dobiveni $\delta v/v$ grafovi vrlo su slični i pokazuju jasne sezonske varijacije. Glavne razlike mogu se uočiti u amplitudama - u slučaju prve grupe postaja, maksimumi i minimumi kreću se između $\pm 0.1\%$, kod druge grupe između $\pm 0.08\%$, te kod treće skupine između $\pm 0.06\%$. Smanjenje amplitude s povećanjem udaljenosti parova postaja u skladu je s rezultatima istraživanja od Meier i sur. (2010). U radu u kojem su razmatrali 861 parova postaja na području Los Angelesa, Meier i sur. zaključili su da se jasne sezonske promjene brzina uočavaju za parove postaja čije su udaljenosti manje od 60 km. Na većim udaljenostima sezonske promjene se ne primjećuju i amplitude postaju sve manje što pripisuju atenuaciji te nedostatku koherentnih faza signala potrebnih za analizu. Nadalje, navode da je za veće udaljenosti parova postaja potrebno definirati višednevne CCF koje se odnose na duže vremensko razdoblje (točnije, više od 60 dana). Kako su u ovoj analizi s desetogodišnjom referentnom CCF uspoređivane 90-dnevne CCF i pošto je za minimalnu koherenciju $C(\nu)$ uzeta vrijednost manja od dobivenih (dakle, nema odbačenih signala), moguće je uočiti sezonske promjene brzina bez obzira na udaljenosti parova postaja. Drugim riječima, za zadane parametre korištene u metodi MWCS, udaljenost parova postaja ne utječe na sezonsku periodičnost krivulje $\delta v/v$.



Slika 5.5: Medijalne vrijednosti $\delta v/v$ (crvene krivulje) i njihova odstupanja (svijetlo crvena naznačena područja) dobivena u frekventnom rasponu 0.125–0.33 Hz za: a) prvu grupu (udaljenosti do 40 km), b) drugu grupu (udaljenosti od 40 km do 80 km) i c) treću grupu (udaljenosti veće od 80 km) parova postaja.

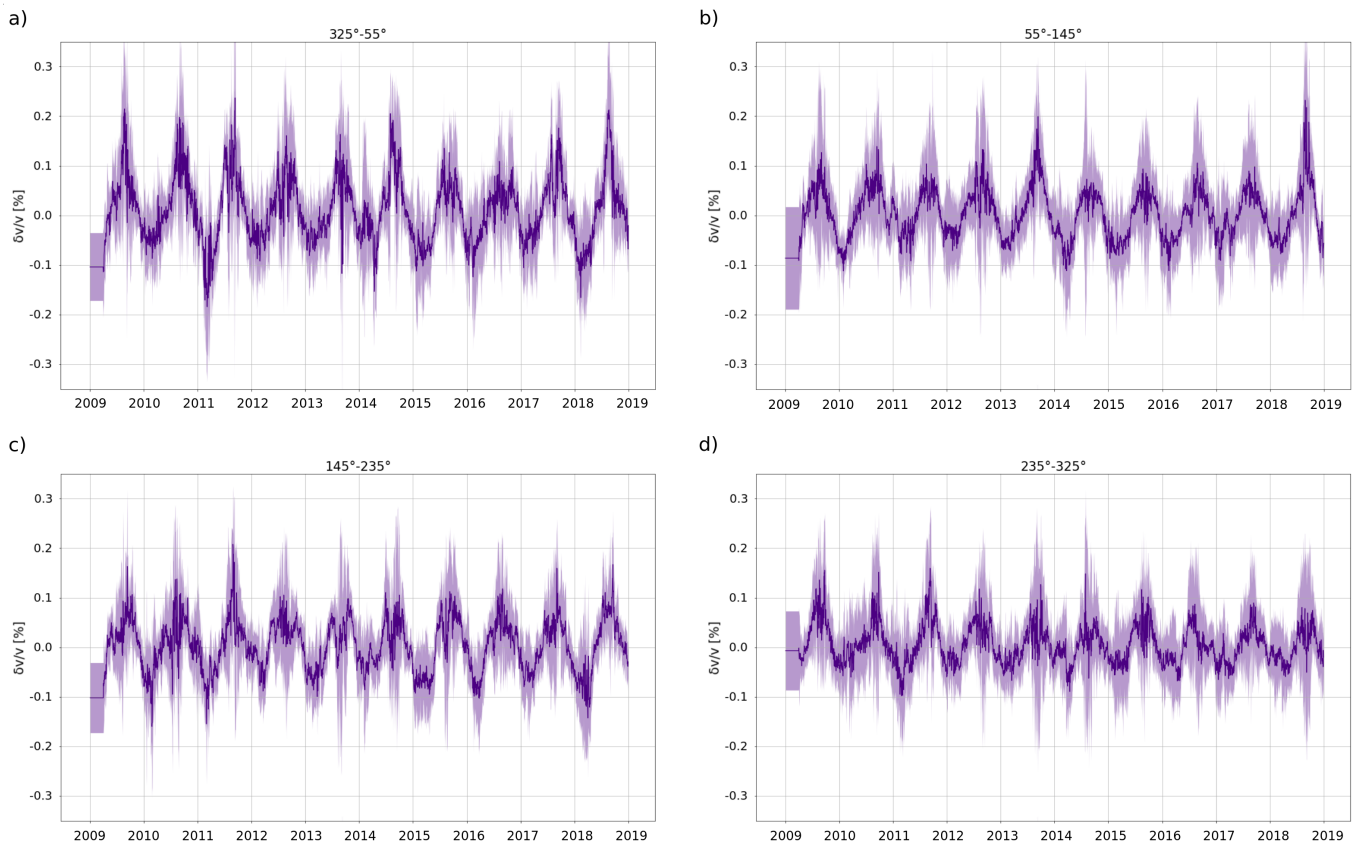
5.3 Ovisnost promjene brzine o lokaciji izvora seizmičkog nemira

Kako bi se promotrila ovisnost promjena brzina o azimutalnoj pokrivenosti smjera iz kojeg dolazi signal, odnosno lokaciji izvora seizmičkog nemira, 91 par postaja (svi parovi postaja, ali bez autokorelacije), podijeljeni su u četiri skupine s obzirom na azimute smjera propagiranja signala: azimuti između 325° – 55° , 55° – 145° , 145° – 235° i 235° – 325° . U prvoj skupini ukupno je 17, u drugoj 26, u trećoj 19, a u četvrtoj 29 parova postaja. Popis parova postaja po grupama nalazi se u tablici B.1 u Dodatku B. Na slici 5.6 prikazan je način određivanja azimuta između postaja.



Slika 5.6: Skica načina na koji je za par postaja određen azimut smjera propagiranja signala. Kut α (azimut smjera iz kojeg dolazi signal) mjeri se od sjevera (N) u smjeru kazaljke na satu kao što je naznačeno sivom bojom - za slučaj na slici azimut plave postaje u odnosu na narančastu iznosio bi oko 220° .

Metoda MWCS provedena je u frekventnom rasponu od 0.125 do 0.33 Hz pri čemu su parametri isti kao i u prethodnoj analizi. Na slici 5.7 prikazane su dobivene medijalne promjene brzina i pripadna odstupanja prve (a), druge (b), treće (c) i četvrte (d) skupine postaja.



Slika 5.7: Medijalne vrijednosti $\delta v/v$ (ljubičaste krivulje) i njihova odstupanja (svijetlo ljubičasta naznačena područja) dobivena u frekventnom rasponu 0.125–0.33 Hz za: a) prvu (azimuti 325°–55°), b) drugu (55°–145°), c) treću (145°–235°) i d) četvrtu grupu (azimuti 235°–325°) parova postaja.

Iz dobivenih grafova može se zaključiti da sezonski oblik krivulje $\delta v/v$ nije uvjetovan smjerom iz kojeg dolazi signal - u sva četiri slučaja mogu se uočiti jasne sezonske varijacije brzina. U slučaju skupina b) (azimuti između 55° i 145°), c) (azimuti između 145° i 235°) i d) (azimuti između 235° i 325°) amplitude $\delta v/v$ poprimaju vrijednosti između $\pm 0.1\%$. Za skupinu parova postaja a) (azimuti između 325° i 55°) amplitude su dvostruko veće. Veće amplitude (reda $\pm 0.2\%$) najvjerojatnije su rezultat činjenice da se u toj skupini glavnina parova odnosi na postaje uparene sa stanicom RIY. Kako je RIY (Rijeka) postaja koja je najbliža primarnom izvoru signala, za očekivati je da će zbog veće jakosti i koherencije signala amplitude $\delta v/v$ krivulje poprimati veće iznose. Dakle, slično kao u slučaju ovisnosti promjena brzina o udaljenosti parova postaja, azimutalna pokrivenost smjera iz kojeg putuje signal utječe na iznos amplitude $\delta v/v$. Sezonski karakter krivulje $\delta v/v$ uzrokovan je promjenama svojstava sredstva, a ne jakošću signala mikro seizmičkog nemira koji je općenito sezonski varijabilan i ovisi o lokaciji izvora seizmičkog nemira (Stehly i sur., 2007).

5.4 Interpretacija sezonskih promjena brzina

Općenito, sezonske promjene seizmičkih brzina mogu biti uzrokovane promjenama svojstava sredstva razmatranog područja ili izvora mikroseizmičkog šuma. Promjene u svojstvima sredstva mogu uzrokovati razni čimbenici kao što su temperatura zraka, količina oborine, razina podzemne vode ili mora i dr.

Hillers i sur. (2015) u svome su istraživanju promotrili kako razni meteorološki faktori, kao što su tlak i temperatura zraka, brzina vjetra te količina oborine, utječu na varijacije seizmičkih brzina u blizini San Jacinto rasjeda. Zaključili su da je glavni uzročnik promjena $\delta v/v$ promjena temperature zraka - promjene temperature zraka, osim što mijenjaju svojstva najgornjeg dijela kore, mogu inducirati varijaciju termoelastičkih napetosti do dubina 15 - 22 km (Berger, 1975). Sezonske varijacije termoelastičkih napetosti (napetosti koje ovise o površinskoj temperaturi, elastičkim i termalnim parametrima i dr. efektima kao što su npr. heterogenost sredstva i topografija) direktno utječu na vrijednosti seizmičkih brzina, pa je stoga za očekivati da će i njihov godišnji hod biti periodičan.

Međutim, mnogi drugi radovi (npr. Wegler i sur., 2009, Lecocq i sur., 2017, Wang i sur., 2017) navode kako su hidrološki čimbenici glavni uzročnici sezonskih izmjena ekstremnih vrijednosti promjena brzina površinskih valova ($\delta v/v$). Količina oborine, razina podzemne vode ili mora utječu na vrijednosti promjena brzina dubina nekoliko stotina metara. Konkretnije, povećana količina oborine umanjuje vrijednosti seizmičkih brzina, pa je za očekivati da će se minimumi postizati za dio godine s najvećom količinom oborine (Wang i sur., 2017).

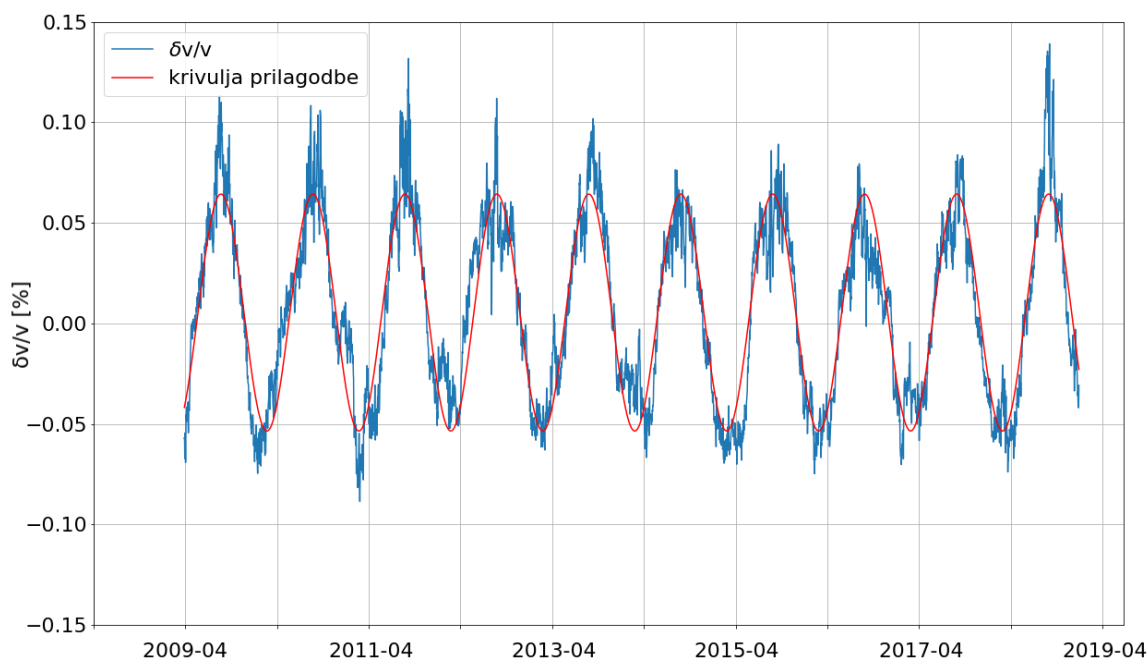
Bez obzira na to koji je čimbenik glavni, može se reći da je sezonski karakter vrijednosti promjena brzina seizmičkih valova $\delta v/v$ rezultat superpozicije mnogobrojnih faktora. Kada bi se navedeni karakter uklonio, moglo bi se omogućiti praćenje malih promjena mehaničkih svojstava kore direktno povezanih s tektonikom analiziranog područja. Iz tog je razloga u ovome radu napravljen jednostavan model koji uklanja sezonski karakter krivulje $\delta v/v$ ne uzimajući pri tom u obzir nijedan od ranije navedenih uzročnika sezonskih varijacija.

5.5 Modeliranje sezonskih promjena brzina

Za uklanjanje sezonskog oblika promjena seizmičkih brzina definirana je funkcija $f(t)$ trigonometrijskog oblika s četiri parametra koji najbolje opisuju dobivene rezultate:

$$f(t) = a \cdot \cos(b \cdot t + c) + d \quad (5.1)$$

Parametar a predstavlja amplitudu, b kutnu frekvenciju, c početnu fazu, a d srednju vrijednost funkcije $f(t)$. Modeliranje je napravljeno za krivulju promjena brzina površinskih Rayleighjevih valova ($\delta v/v$) svih parova postaja i frekventni raspon 0.125–0.33 Hz (slika 5.8).



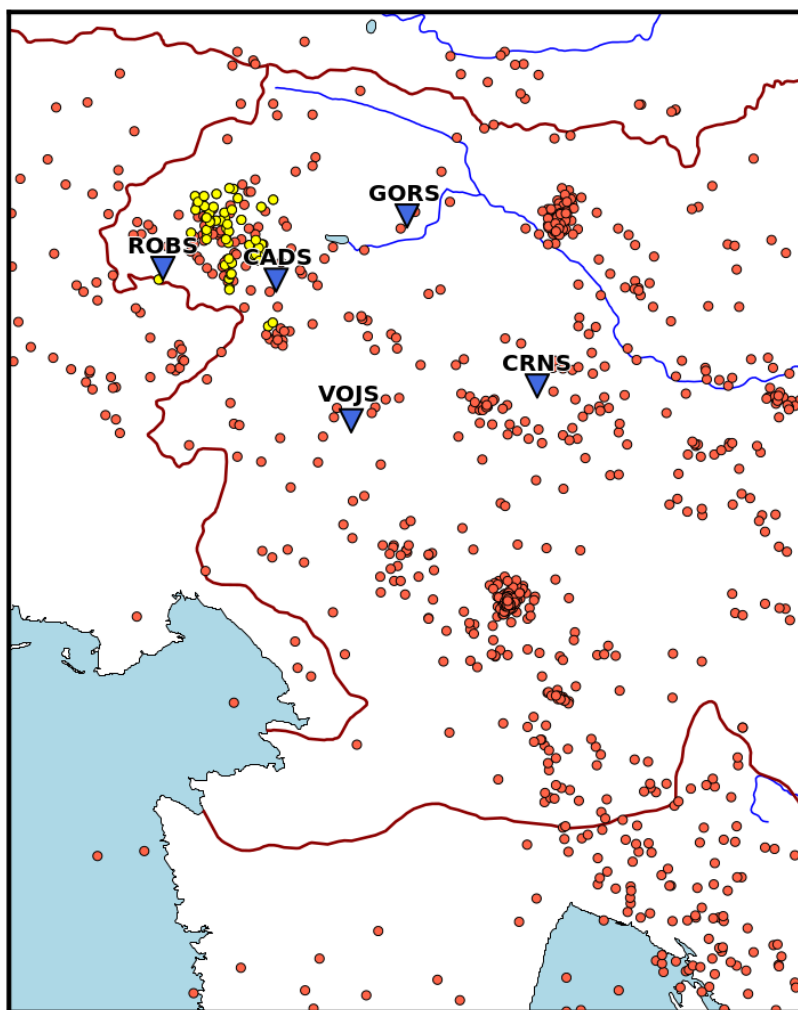
Slika 5.8: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na čitavo analizirano područje i frekventni raspon 0.125–0.33 Hz.

Za parametre je dobiveno: $a = 0.0589$, $b = 0.0171 \text{ s}^{-1}$, $c = -2.4824$ i $d = 0.0054$. Krivulja prilagodbe pretpostavlja varijacije brzine reda otprilike $\pm 0.06\%$. Uz očekivana odstupanja na manjoj vremenskoj skali, od ove amplitude ponajviše odskoču ekstremne vrijednosti. Osim potencijalnih promjena mehaničkih svojstava kore, ovo je vjerojatno posljedica jednostavnosti modela. Ekstremne vrijednosti tih uzročnika mogu se bitno razlikovati od jedne do druge godine, pa je i za očekivati da će krivulja $\delta v/v$, koja prati njihov trend, pokazivati slična odstupanja za različite go-

dine. Pomoću parametra b moguće je odrediti period sezonskog oblika krivulje $\delta v/v$. Točnije, period T računa se kao $T = 2\pi/b$ i u ovome slučaju on iznosi 367.4 dana. Preostala dva parametra, c i d u ovakvom su modelu zapravo samo pomoćni faktori koji pomiču trigonometrijsku funkciju duž horizontale/vertikale tako da ona najbolje prati krivulju $\delta v/v$. Inače, parametar c predstavljao bi pomak u fazi između krivulje $\delta v/v$ i krivulje uzročnika sezonskog oblika $\delta v/v$ kojim se ona modificira. Wang i sur. (2017) u svome su radu dobili pomak u fazi od 35 dana između godišnjih promjena temperature zraka i promjena seizmičkih brzina na području Japana. Parametar d optimizirao bi vertikalni položaj jedne krivulje u odnosu na drugu tako da je srednje odstupanje nula.

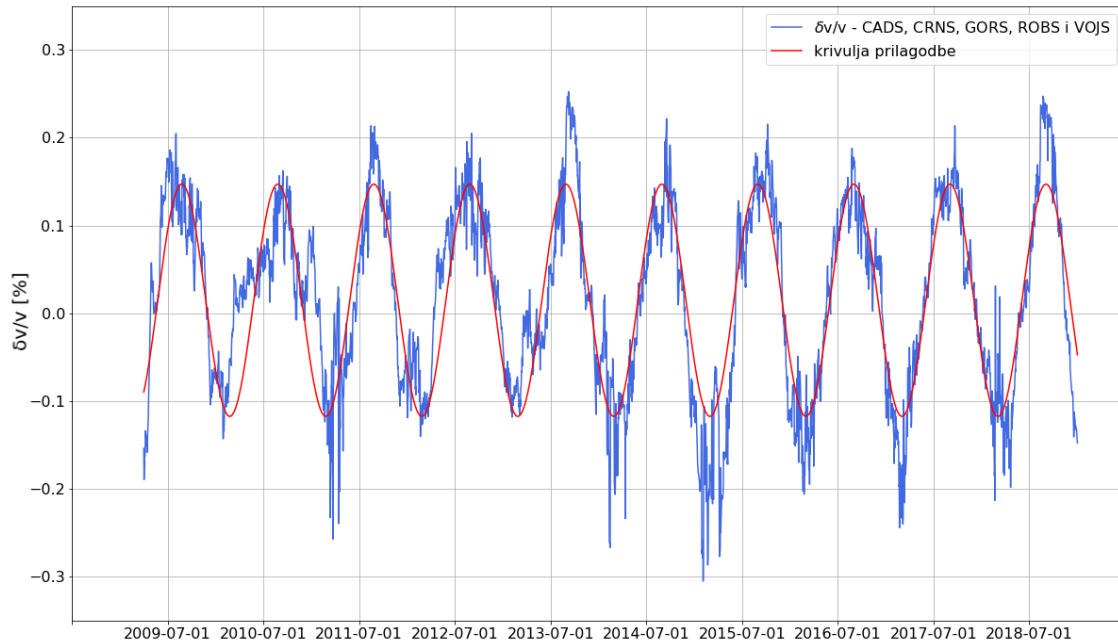
Da bi se uklonio sezonski oblik krivulje $\delta v/v$, od nje je potrebno oduzeti ranije dobivenu krivulja prilagodbe. Nova, modificirana krivulja $\delta v/v$ više ne bi trebala iskazivati jednogodišnju periodičnost i pretpostavlja se da bi njene amplitude trebale odražavati promjene svojstava sredstva. Kako bi se utvrdilo jesu li promjena u amplitudi $\delta v/v$ i seizmička aktivnost povezane, promotreno je ukupno šest serija potresa koje su se dogodile na istraživanom području između 2009. i 2017. godine. Za svaku seriju nacrtan je histogram broja potresa za petodnevna razdoblja. Pri tome su uzeti svi dostupni događaji iz Hrvatskog kataloga potresa unutar poligona koji obuhvaća epicentre serije potresa.

Prva serija potresa od interesa dogodila se u 12. mjesecu 2009. godine (glavni potres magnitude $M = 2.1$ dogodio se 26.12.2009. u 6h 43min 25.6s na lokaciji $\varphi = 46.345^\circ$, $\lambda = 13.574^\circ$) i prikazana je žutim kružićima na slici 5.9. Na slici 5.9 naznačeni su i epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 7. mjeseca 2009. do kraja 6. mjeseca 2010. godine (crveni kružići) te pet seizmoloških postaja (CADS, CRNS, GORS, ROBS i VOJS) koje prekrivaju područje oko serije potresa, a korištene su u radu.



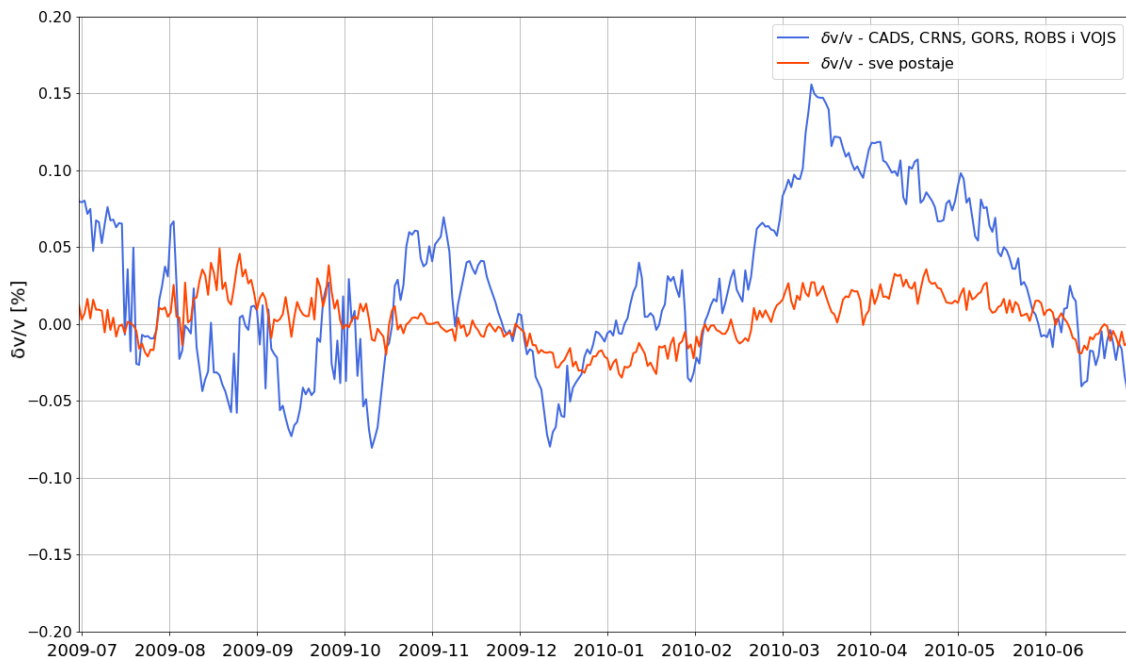
Slika 5.9: Epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 7. mjeseca 2009. do kraja 6. mjeseca 2010. godine (crveni kružići) i serije potresa koja se dogodila u 12. mjesecu 2009. godine (žuti kružići). Plavim trokutićima naznačene su postaje korištene u metodi MWCS.

Za navedene postaje metoda MWCS provedena je u kao i u slučaju kada se razmotre svi parovi postaja (90-dnevne CCF, frekventni raspon 0.125–0.33 Hz, koda signal). Na dobivenu $\delta v/v$ krivulju prilagođena je funkcija definirana izrazom (5.1). Polazna $\delta v/v$ krivulja te krivulja prilagodbe prikazane su na slici 5.10, a parametri koji se dobe iznose: $a = 0.1322$, $b = 0.0171 \text{ s}^{-1}$, $c = -2.4821$ i $d = 0.0149$. Navedeni postupak ponovljen je i u svim drugim razmatranjima serija potresa.



Slika 5.10: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na područje koje uključuje seriju potresa iz prosinca 2009.

Na slici 5.11 uspoređene su modificirane $\delta v/v$ krivulje svih parova postaja i parova pet postaja koje prekrivaju područje oko promatrane serije potresa za razdoblje od početka 7. mjeseca 2009. godine do kraja 6. mjeseca 2010. godine.

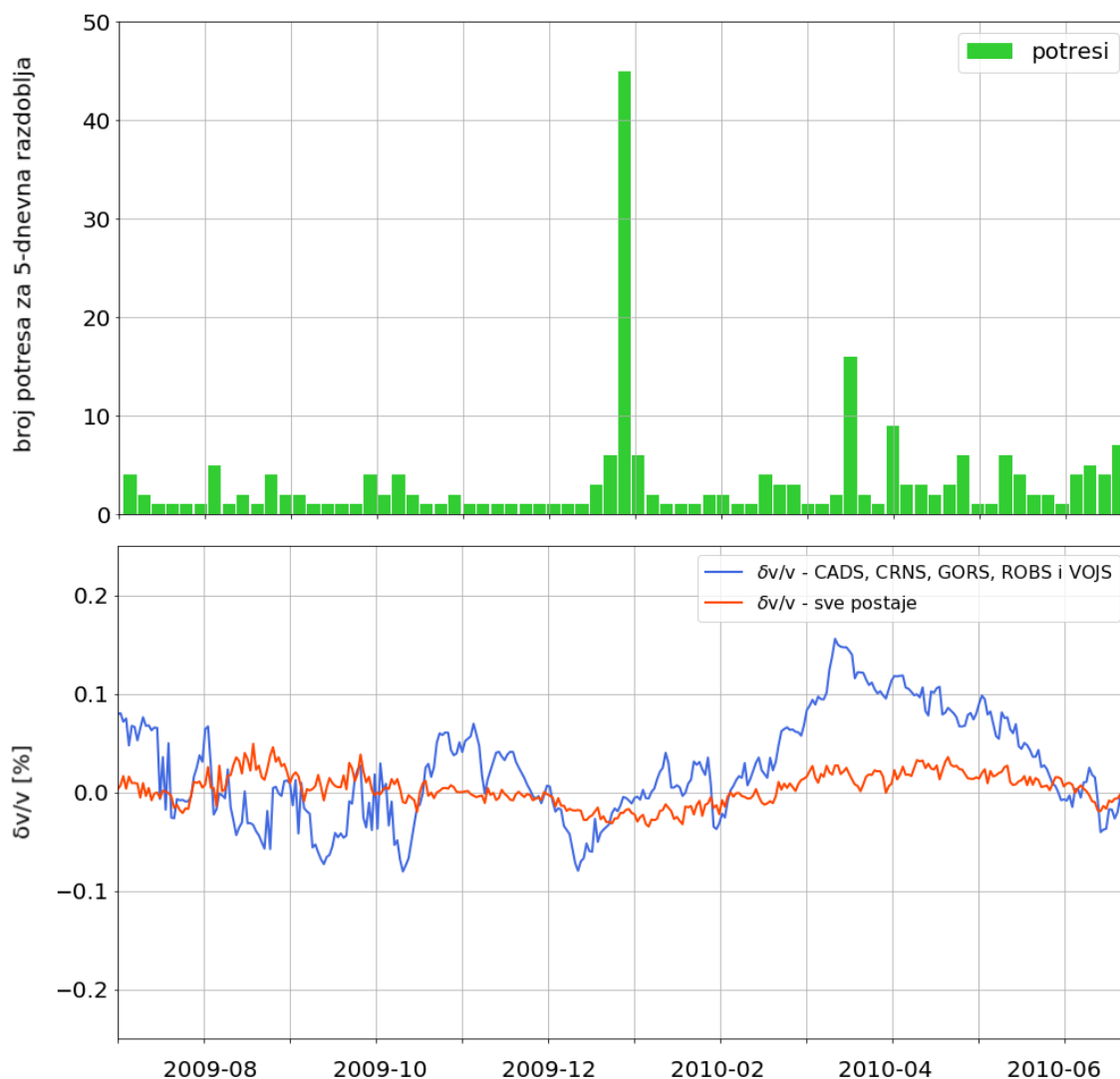


Slika 5.11: Modificirane $\delta v/v$ krivulje koje se odnose na čitavo analizirano područje i područje koje uključuje seriju potresa iz prosinca 2009.

Iz slike 5.11, ali i dobivenog koeficijenta a , jasno se vidi da su amplitude varijacija brzine veće kada se uzmu u obzir parovi postaja na manjim udaljenostima što je u skladu s rezultatima ranije provedene analize. Isti zaključak o odnosu amplituda krivulja $\delta v/v$ samo pet parova i svih parova postaja vrijedi za preostalih pet analiza serija potresa. Sam oblik krivulje dosta se razlikuje, ali se u oba slučaja može primijetiti smanjenje vrijednosti $\delta v/v$ koje nastupa prije sredine 12. mjeseca 2009. i potom postupni rast u sljedeća tri mjeseca. Da bi se utvrdilo jesu li promjene u amplitudi $\delta v/v$ povezane sa seizmičnošću, modificirane $\delta v/v$ krivulje uspoređene su s petodnevni brojem potresa za razdoblje i područje od interesa koje je prikazano na slici C.1 u Dodatku C. Pripadna tablica s koordinatama tog područja (tablica C.1), te pojedinačne slike modificiranih $\delta v/v$ krivulja uspoređenih s brojem potresa (slika C.2) također se nalaze u Dodatku C.

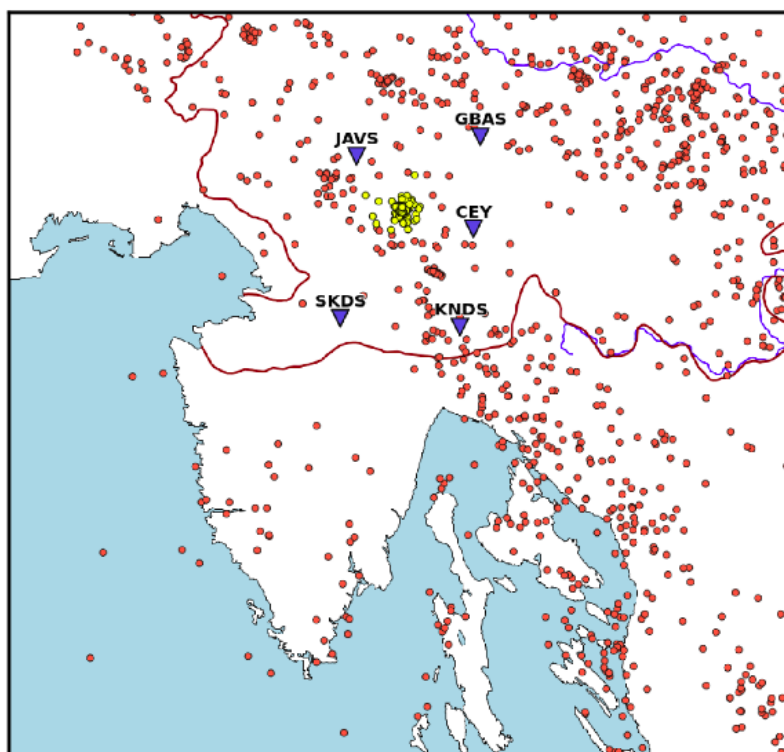
Usporedbom histograma broja potresa s modificiranom $\delta v/v$ krivuljom (slika 5.12), može se uočiti smanjenje brzine reda -0.12% za postaje CADS, CRNS, GORS, ROBS i VOJS (mjeseca dana prije serije potresa) i -0.08% za sve parove postaja (tri-četiri mjeseca prije serije potresa). Ovo je u skladu s rezultatima mnogih drugih istraživanja u kojima je također primijećeno da je negativna promjena seizmičke brzine korelirana s pojačanom seizmičkom aktivnošću razmatranog područja. Općenito će i pojedinačni, ali snažni potresi (uglavnom magnitude $M_w \geq 5.5$) uzrokovati nagli pad vrijednosti seizmičke brzine. Međutim, na slici 5.12 takvi nagli padovi brzina mogu se uočiti do sredine 10. mjeseca 2009. godine i početkom veljače 2010. godine. Kako na razmatranom području za spomenuta razdoblja nije bilo značajnijih potresa, pripadni padovi brzina vjerojatno su posljedica jednostavnosti modela ili nekog drugog procesa koji nije uzet u obzir. Postupni pad brzine koji započinje u ožujku 2010. godine također je najvjerojatnije posljedica nekog drugog faktora. Uzme li se sve u obzir, smanjenje brzine koji se primjećuje prije početka serije potresa, ne mora nužno biti povezano s povećanom seizmičkom aktivnošću.

Na slici 5.12 može se uočiti i postupni rast brzine koji počinje sredinom prosinca 2009. i prisutan je kroz sljedeća tri mjeseca. Ukupni porast vrijednosti $\delta v/v$ za postaje CADS, CRNS, GORS, ROBS i VOJS iznosi 0.22% , a za sve parove postaja 0.06% . Ako amplitude modificirane $\delta v/v$ krivulje zaista odražavaju promjene svojstava sredstva, ovakav trend promjene brzine predstavljao bi "oporavak" sredstva u njegovo prvotno stanje.



Slika 5.12: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi promjene brzine koji se odnose na čitavo analizirano područje te područje koje uključuje seriju potresa iz prosinca 2009.

Druga serija potresa od interesa trajala je od 1. do sredine 3. mjeseca 2010. godine (glavni potres magnitude $M = 4.05$ dogodio se 15.1.2010. u 14h 20min 54s na lokaciji $\varphi = 45.791^\circ$, $\lambda = 14.206^\circ$) i prikazana je žutim kružićima na slici 5.13. Na slici 5.13 naznačeni su i epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 8. mjeseca 2009. do kraja 5. mjeseca 2010. godine (crveni kružići) te pet seizmoloških postaja (CEY, GBAS, JAVS, KNDS i SKDS) koje prekrivaju područje oko serije potresa.

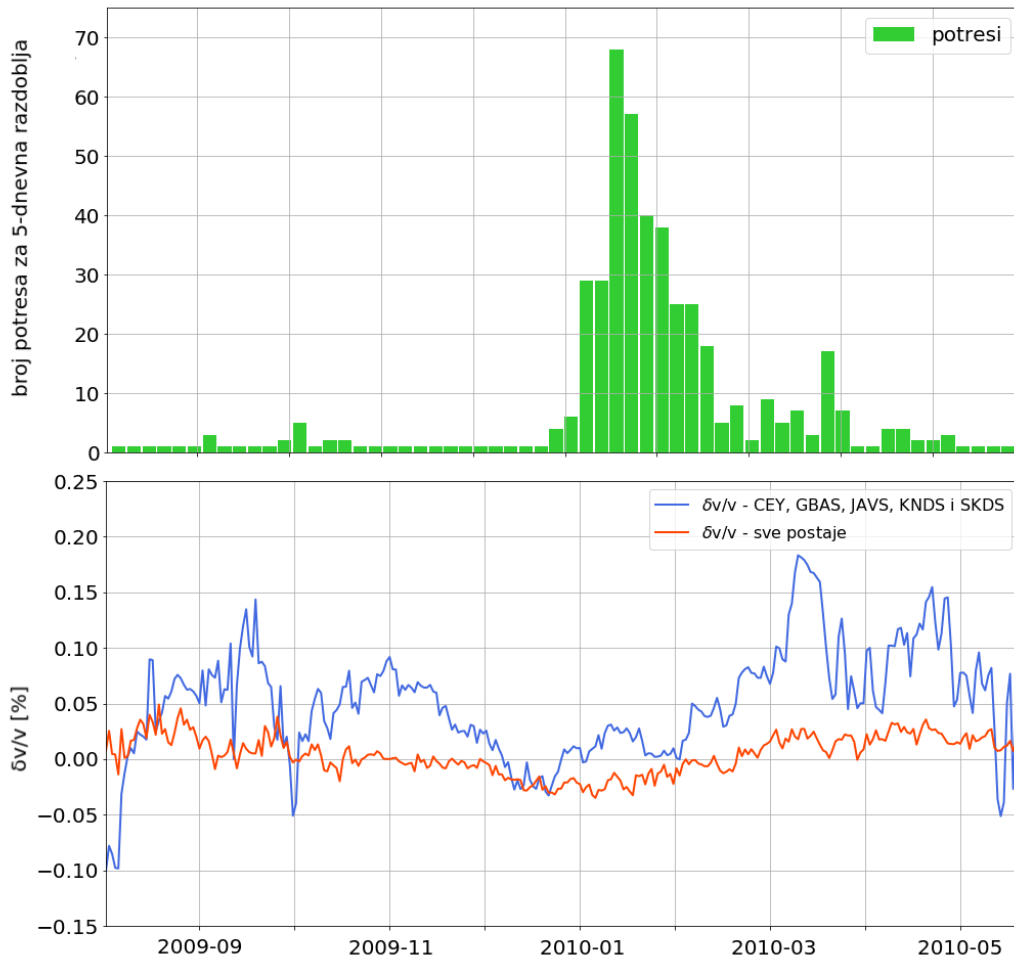


Slika 5.13: Epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 8. mjeseca 2009. do kraja 5. mjeseca 2010. godine (crveni kružići) i serije potresa koja je trajala od 1. do 4. mjeseca 2010. godine (žuti kružići). Plavim trokutićima naznačene su postaje korištene u metodi MWCS.

Izračunata $\delta v/v$ krivulja i krivulja prilagodbe prikazane su na slici C.3 u Dodatku C, pri čemu parametri funkcije dane s izrazom (5.1) iznose: $a = 0.1274$, $b = 0.0171 \text{ s}^{-1}$, $c = -2.3925$ i $d = 0.0143$.

Modificirane $\delta v/v$ krivulje za razdoblje i područje od interesa prikazane su na slici C.4, Dodatak C. Slika (slika C.5) i tablica s koordinatama tog područja (tablica C.2), te pojedinačne slike modificiranih $\delta v/v$ krivulja uspoređenih s brojem potresa (slika C.6) također se nalaze u Dodatku C.

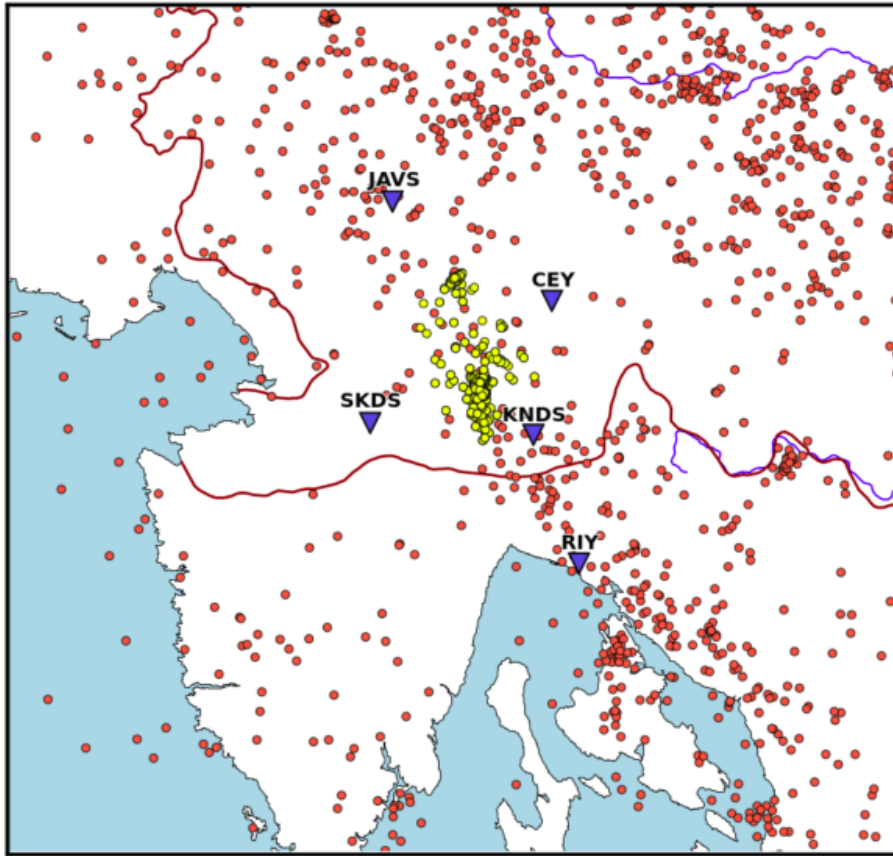
Usporedbom broja potresa s modificiranom $\delta v/v$ krivuljom (slika 5.14), može se uočiti smanjene brzine reda -0.12% za postaje CEY, GBAS, JAVS, KNDS i SKDS (dva mjeseca prije serije potresa) i -0.07% za sve parove postaja (četiri mjeseca prije serije potresa). Kroz sljedeća tri mjeseca prisutan je postupni rast vrijednosti $\delta v/v$ reda 0.20% za postaje CEY, GBAS, JAVS, KNDS i SKDS, te 0.06% za sve parove postaja. Ipak, kako se na slici 5.14 mogu uočiti smanjenje i porast vrijednosti $\delta v/v$ istog reda veličine kao i u razdoblju oko serije potresa, dotične promjene ne moraju nužno biti povezane sa seizmičnošću.



Slika 5.14: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi promjene brzine koji se odnose na čitavo analizirano područje te područje koje uključuje seriju potresa koja je trajala od 1. do sredine 3. mjeseca 2010.

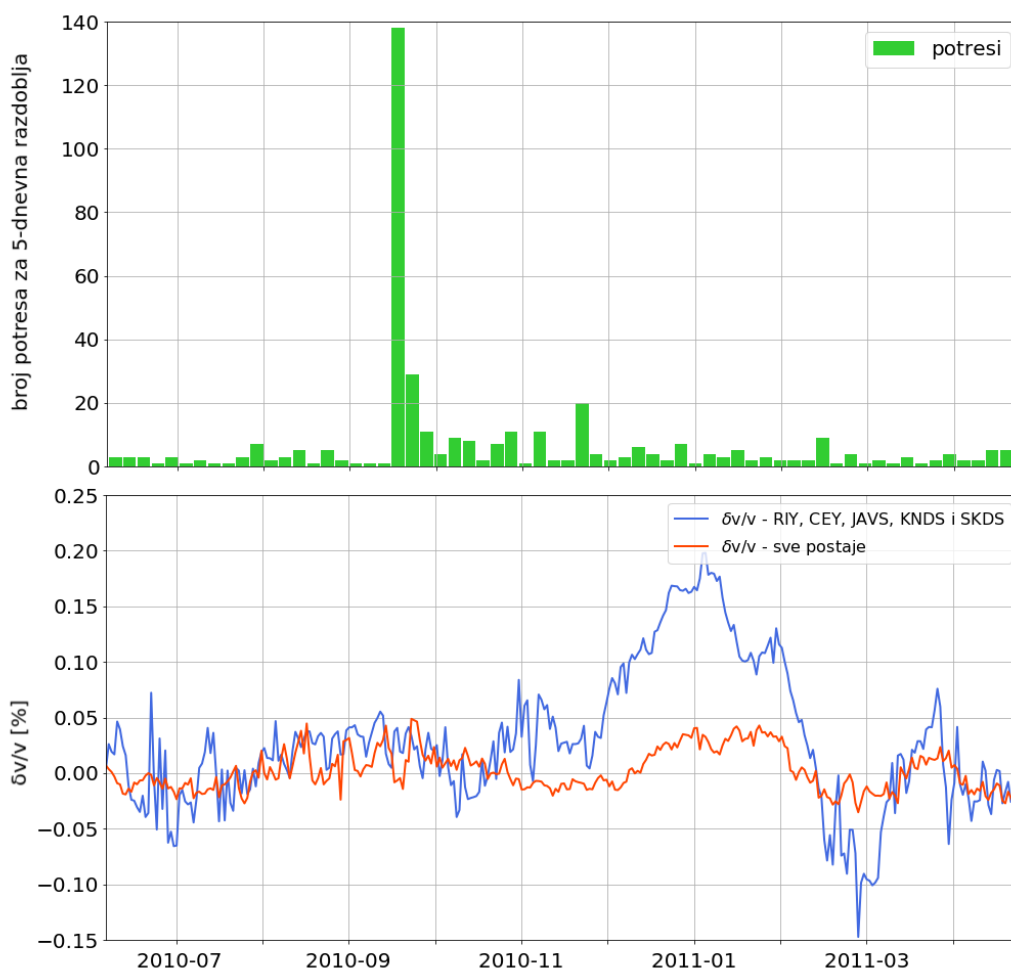
Treća serija potresa trajala je od 9. do 12. mjeseca 2010. godine (glavni potres magnitude $M = 3.85$ dogodio se 15.9.2010. u 2h 21min 17.6s na lokaciji $\varphi = 45.609^\circ$, $\lambda = 14.266^\circ$) i prikazana je žutim kružićima na slici 5.15. Na slici 5.15 naznačeni su i epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 6. mjeseca 2010. do kraja 4. mjeseca 2011. godine (crveni kružići) te pet seizmoloških postaja (CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS) koje prekrivaju područje oko serije potresa.

Izračunata $\delta v/v$ krivulja i krivulja prilagodbe prikazane su na slici C.7 u Dodatku C. Parametri krivulje prilagodbe iznose: $a = 0.1557$, $b = 0.0171 \text{ s}^{-1}$, $c = -2.4219$ i $d = 0.0188$. Modificirane $\delta v/v$ krivulje za razdoblje i područje od interesa prikazane su na slici C.8, Dodatak C. Slika (slika C.9) i tablica s koordinatama tog područja (tablica C.3), te pojedinačne slike modificiranih $\delta v/v$ krivulja uspoređenih s brojem potresa (slika C.10) također se nalaze u Dodatku C.



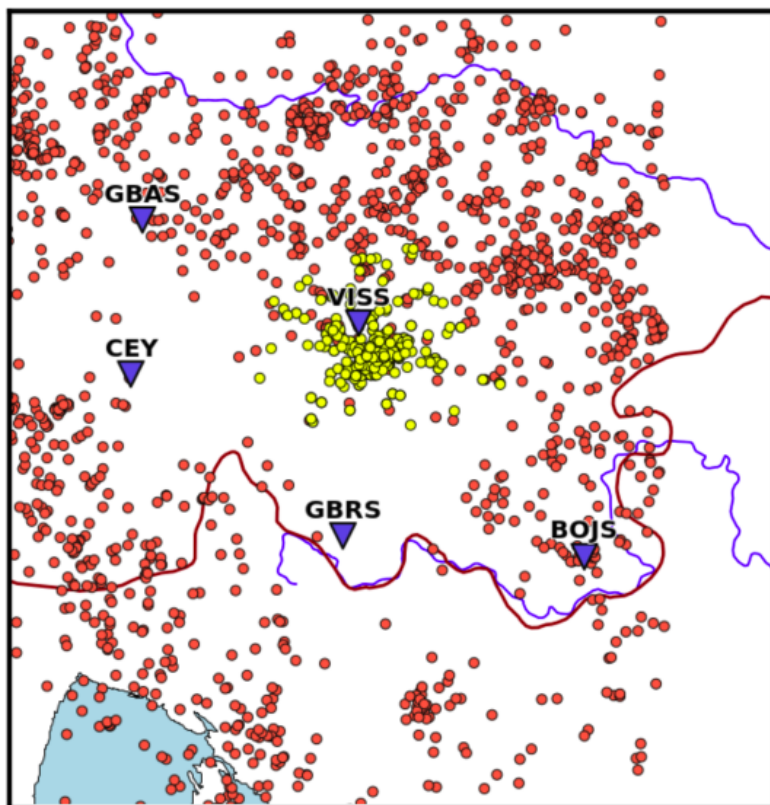
Slika 5.15: Epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 6. mjeseca 2010. do kraja 4. mjeseca 2011. godine (crveni kružići) i serije potresa koja je trajala od 9. do 12. mjeseca 2010. godine (žuti kružići). Plavim trokutićima naznačene su postaje korištene u metodi MWCS.

Na krivulji promjena brzina $\delta v/v$ koja se odnosi na postaje CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS i sve parove postaja nema jasno uočljivog pada brzine prije početka serije potresa kao u prethodna dva slučaja. U slučaju postaja CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS, mjesec dana nakon početka serije potresa, pa sve do siječnja 2011. godine, prisutan je porast vrijednosti $\delta v/v$. Za spomenuto razdoblje brzina se ukupno povećala za 0.24% što moguće upućuje na "oporavak" svojstava sredstva nakon oslobađanja nakupljene energije elastičkih deformacija (tj. početka rasjedanja). Krivulja $\delta v/v$ koja se odnosi na sve parove postaja tijekom čitavog vremenskog razdoblja od interesa pokazuje varijacije istog reda (oko $\pm 0.06\%$), pa nije moguće utvrditi postoji li veza između seizmičke aktivnosti i promjena vrijednosti $\delta v/v$.



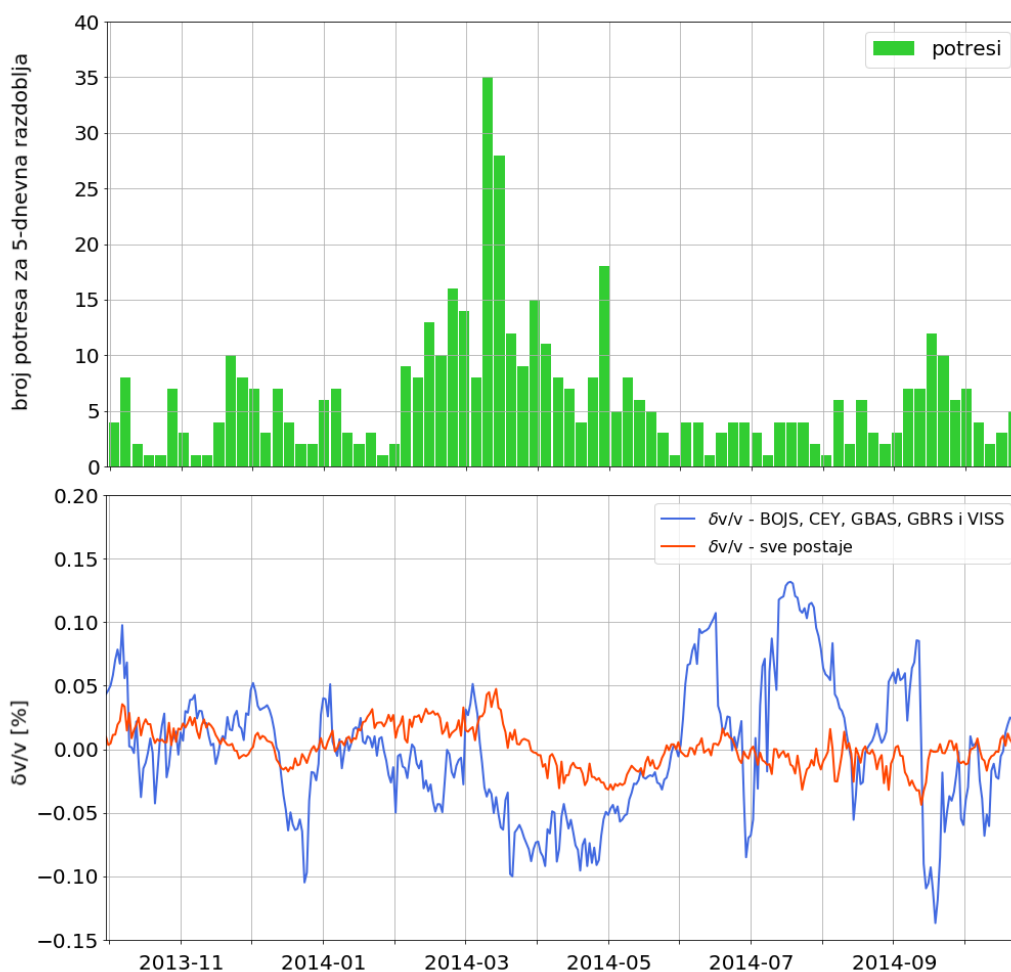
Slika 5.16: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi promjene brzine koji se odnose na čitavo analizirano područje te područje koje uključuje seriju potresa koja je trajala od 9. do 12. mjeseca 2010.

Četvrta serija potresa trajala je od 2. do 6. mjeseca 2014. godine (glavni potres magnitude $M = 4.17$ dogodio se 13.3.2014. u 17h 31min 59.3s na lokaciji $\varphi = 45.751^\circ$, $\lambda = 14.851^\circ$) i prikazana je žutim kružićima na slici 5.17. Na slici 5.17 naznačeni su i epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 10. mjeseca 2013. do kraja 10. mjeseca 2014. godine (crveni kružići) te pet seizmoloških postaja (BOJS, CEY, GBAS, GBRS i VISS) koje prekrivaju područje oko serije potresa. Izračunata $\delta v/v$ krivulja i krivulja prilagodbe prikazane su na slici C.11 u Dodatku C. Parametri krivulje prilagodbe iznose: $a = 0.1735$, $b = 0.0171 \text{ s}^{-1}$, $c = -2.3283$ i $d = 0.0205$. Modificirane $\delta v/v$ krivulje za razdoblje i područje od interesa prikazane su na slici C.12, Dodatak C. Slika (slika C.13) i tablica s koordinatama tog područja (tablica C.4), te pojedinačne slike modificiranih $\delta v/v$ krivulja uspoređenih s brojem potresa (slika C.14) također se nalaze u Dodatku C.



Slika 5.17: Epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od 10. mjeseca 2013. do kraja 10. mjeseca 2014. godine (crveni kružići) i serije potresa koja je trajala od 2. do 6. mjeseca 2014. godine (žuti kružići). Plavim trokutićima naznačene su postaje korištene u metodi MWCS.

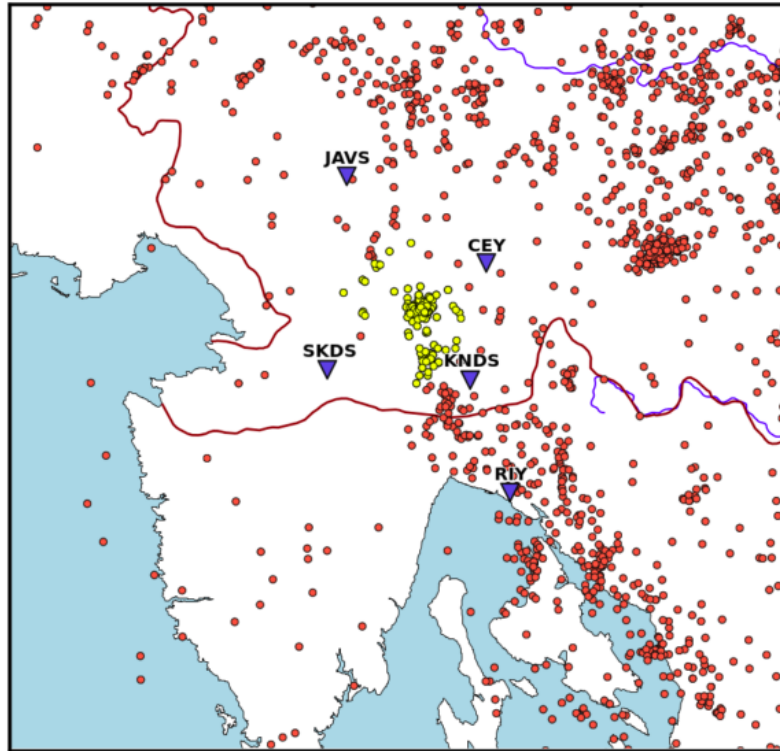
Usporedbom histograma broja potresa s modificiranim $\delta v/v$ krivuljama (slika 5.18), može se uočiti smanjene brzine reda -0.20% za postaje BOJS, CEY, GBAS, GBRS i VISS, te -0.08% za sve parove postaja. Pad brzine u slučaju prve krivulje traje od siječnja do travnja, dok vrijednosti krivulje $\delta v/v$ svih parova postaja postupno padaju od ožujka do svibnja 2014. godine. Pad brzine koji se može uočiti od sredine lipnja do srpnja 2014. godine za postaje BOJS, CEY, GBAS, GBRS i VISS moguće da je povezan s idućom serijom potresa koja se dogodila relativno blizu. Za ostale negativne promjene vrijednosti $\delta v/v$ nije utvrđeno porijeklo, pa je teško s potpunom sigurnošću reći jesu li takve varijacije direktno uvjetovane pojačanom seizmičkom aktivnošću. S druge strane, krivulja promjena brzina za postaje BOJS, CEY, GBAS, GBRS i VISS pokazuje ranije uočen trend postupnog rasta vrijednosti $\delta v/v$ koji je prisutan od travnja do sredine lipnja 2014. godine. Ukupni porast vrijednosti $\delta v/v$ za navedeno razdoblje iznosi 0.21% .



Slika 5.18: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi promjene brzine koji se odnose na čitavo analizirano područje te područje koje uključuje seriju potresa koja je trajala od 2. do 6. mjeseca 2014.

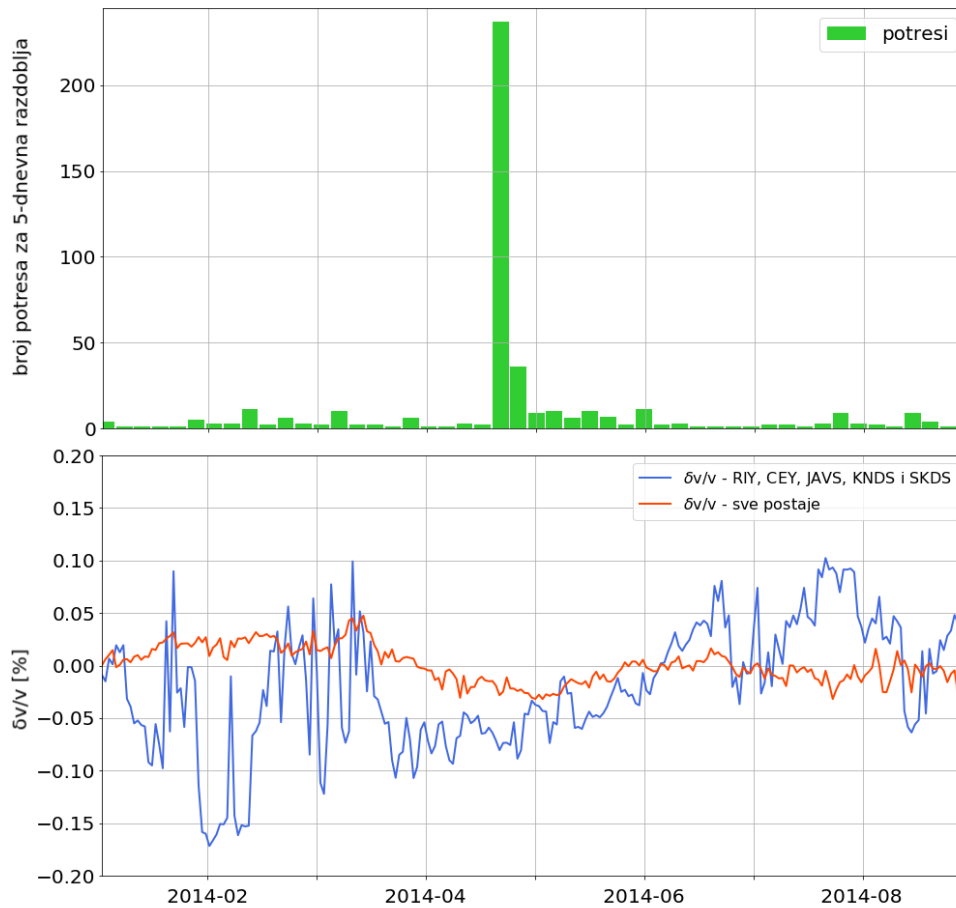
Peta serija potresa trajala je od 4. do 7. mjeseca 2014. godine (glavni potres magnitude $M = 4.72$ dogodio se 22.4.2014. u 8h 58min 27.5s na lokaciji $\varphi = 45.664^\circ$, $\lambda = 14.272^\circ$) i prikazana je žutim kružićima na slici 5.19. Na slici 5.19 naznačeni su i epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od početka 1. do kraja 8. mjeseca 2014. godine (crveni kružići) te pet seizmoloških postaja (CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS) koje prekrivaju područje oko serije potresa.

Kako su korištene iste postaje kao i u slučaju treće serije potresa, krivulja prilagodbe (slika C.7, Dodatak C) i njeni parametri ostali su nepromijenjeni. Modificirane $\delta v/v$ krivulje za razdoblje i područje od interesa prikazane su na slici C.15, Dodatak C. Slika (slika C.9) i tablica s koordinatama tog područja (tablica C.3), te pojedinačne slike modificiranih $\delta v/v$ krivulja uspoređenih s brojem potresa (slika C.16) također se nalaze u Dodatku C.



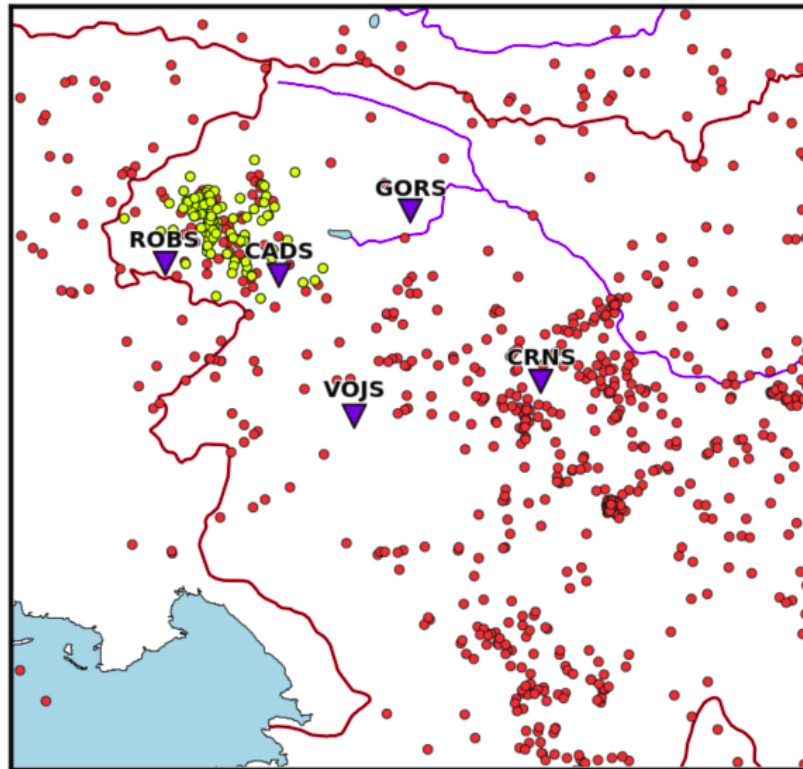
Slika 5.19: Epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od 1. do kraja 8. mjeseca 2014. godine (crveni kružići) i serije potresa koja je trajala od 4. do 7. mjeseca 2014. godine (žuti kružići). Plavim trokutićima naznačene su postaje korištene u metodi MWCS.

Usporedi li se histogram broja potresa s modificiranim $\delta v/v$ krivuljama (slika 5.20), moguće je uočiti smanjene brzine reda -0.20% za postaje CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS, te -0.08% za sve parove postaja prije početka serije potresa. Pad brzine u slučaju prve krivulje prisutan samo pola mjeseca prije početka travnja, dok se vrijednosti krivulje $\delta v/v$ svih parova postaja postupno smanjuju do svibnja. Nagle promjene brzina koje se mogu uočiti na $\delta v/v$ krivulji pet parova postaja prije početka serije potresa, krajem lipnja i sredinom kolovoza istog su reda veličine kao i smanjenje vrijednosti brzine prije početka serije potresa, pa je ponovno teško utvrditi odražavaju li takve varijacije zaista promjene svojstava sredstva neposredno prije početka rasjedanja. Nadalje, za postaje CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS od početka travnja, pa sve do sredine lipnja, može se uočiti postupan rast vrijednosti $\delta v/v$ reda 0.17% . U slučaju krivulje promjena brzina svih parova postaja, od svibnja do sredine lipnja, brzina se ukupno poveća za 0.05% .



Slika 5.20: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi promjene brzine koji se odnose na čitavo analizirano područje te područje koje uključuje seriju potresa koja je trajala od 4. do 7. mjeseca 2014.

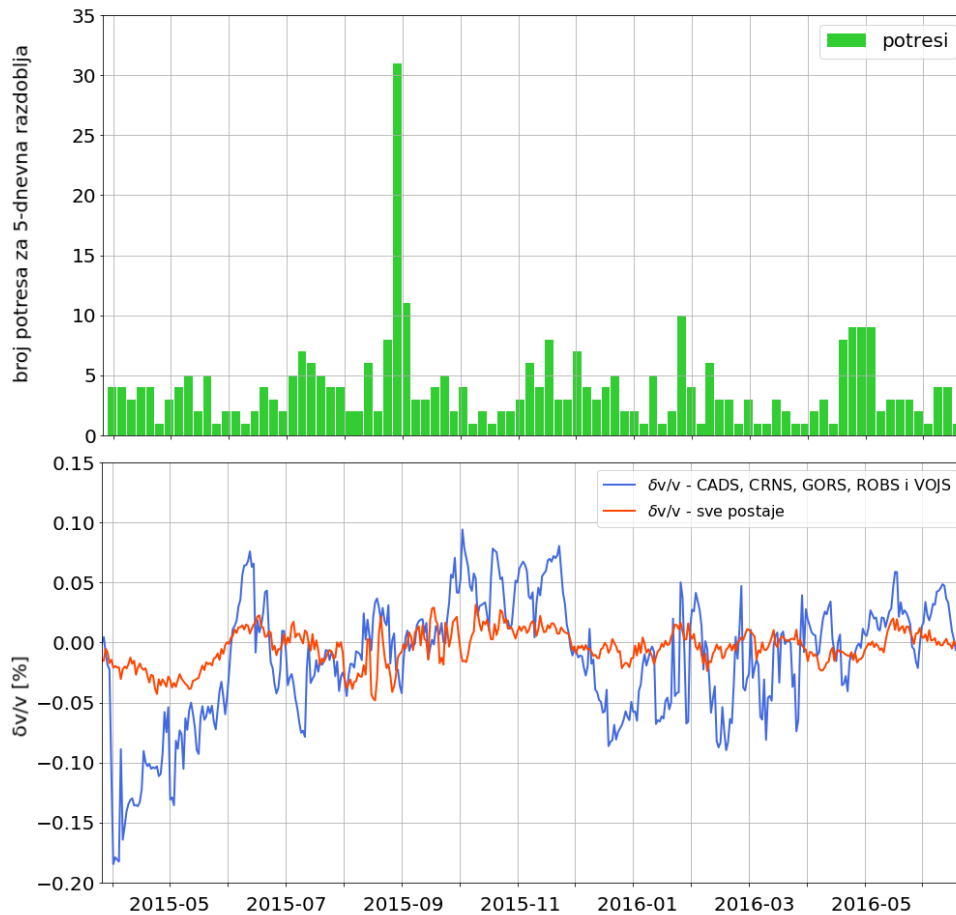
Šesta serija potresa obuhvaća dvije manje - jednu koja je trajala od 8. do 10. mjeseca 2015. (glavni potres magnitude $M = 2.16$ dogodio se 23.9.2015. u 1h 53min 9.2s na lokaciji $\varphi = 46.345^\circ$, $\lambda = 13.546^\circ$) i drugu koja počinje krajem 11. mjeseca 2015., a završava krajem 2. mjeseca 2016. godine (glavni potres magnitude $M = 2.38$ dogodio se 15.12.2015. u 5h 6min 17.6s na lokaciji $\varphi = 46.323^\circ$, $\lambda = 13.622^\circ$). Te dvije manje serije prikazane su žutim kružićima na slici 5.21, dok su epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od 4. mjeseca 2015. do kraja 6. mjeseca 2016. godine naznačeni crvenim kružićima. Na istoj slici prikazno je i pet seizmoloških postaja (CEY, JAVS, KNDS, RIY i SKDS) koje prekrivaju područje od interesa.



Slika 5.21: Epicentri svih potresa koji su se dogodili u razdoblju od 4. mjeseca 2015. do kraja 6. mjeseca 2016. godine (crveni kružići) i dvije serije potresa između 8. mjeseca 2015. i 2. mjeseca 2016. godine (žuti kružići). Plavim trokutićima naznačene su postaje korištene u metodi MWCS.

Kako su korištene iste postaje kao i u slučaju prve serije potresa, krivulja prilagodbe (slika 5.10) i njeni parametri ostali su nepromijenjeni. Modificirane $\delta v/v$ krivulje za razdoblje i područje od interesa prikazane su na slici C.17, Dodatak C. Slika (slika C.1) i tablica s koordinatama tog područja (tablica C.1), te pojedinačne slike modificiranih $\delta v/v$ krivulja uspoređenih s brojem potresa (slika C.18) također se nalaze u Dodatku C.

Na slici 5.22 mogu se uočiti dva pada brzine koja su se javila tijekom šeste serije potresa - jedan koji traje od sredine lipnja do sredine srpnja, te drugi koji traje od sredine studenog do kraja 2015. godine. U oba slučaja za postaje CADS, CRNS, GORS, ROBS i VOJS smanjenje brzine iznosi -0.14% , dok se za sve parove postaja vrijednost brzine ukupno smanji za -0.04% . Između ta dva razdoblja, može se uočiti rast vrijednosti $\delta v/v$ reda 0.17% za postaje CADS, CRNS, GORS, ROBS i VOJS i 0.07% za sve parove postaja. Za spomenutih pet postaja, generalno rastuć trend vrijednosti $\delta v/v$ može se uočiti i nakon početka 2015. godine.



Slika 5.22: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi promjene brzine koji se odnose na čitavo analizirano područje te područje koje uključuje dvije manje serije potresa između 8. mjeseca 2015. i 2. mjeseca 2016.

U pet od ukupno šest promotrenih serija potresa (1., 2., 4., 5., i 6.), na krivuljama koje se odnose na samo pet postaja, moguće je uočiti smanjenje vrijednosti brzine površinskih Rayleighjevih valova koje nastupa prije povećane seizmičke aktivnosti. S druge strane, u svih šest serija primijećen je trend postupnog rasta iznosa brzine kroz nekoliko mjeseci koji nastupa nakon početka ili tijekom serije potresa. Sličan postupni rast vrijednosti $\delta v/v$ primijećen je i u drugim radovima (npr. Liu i sur., 2018, Brenguier i sur., 2008) i za njega se smatra da je povezan s promjenom režima napetosti u području oko rasjeda duž kojeg je došlo do oslobađanja nakupljene energije elastičke deformacije. Međutim, kako su na svim krivuljama prisutne i druge varijacije brzina čije porijeklo nije poznato (a istog reda veličine kao i promjene u razdoblju oko serije potresa), teško je sa sigurnošću utvrditi jesu li spomenute promjene brzina (smanjenje prije i rast nakon početka serije potresa) direktno povezane s tektonskom aktivnošću i promjenama u sredstvu.

Na krivuljama varijacija brzina koje se odnose na sve parove postaja, promjene vrijednosti $\delta v/v$ u razdoblju oko serije potresa manje su uočljive nego u slučaju kada se promatra samo pet postaja. Ovo je i za očekivati jer dotične varijacije brzina odražavaju usrednjeno stanje čitavog područja koje je analizirano, a ne samo u okolini serije potresa.

Dakle, da bi se s prvotnih $\delta v/v$ krivulja oduzeo signal sezonskih promjena, primijenjen je jednostavan model dan izrazom (5.1). Nije u potpunosti utvrđeno da li modificirane krivulje promjena brzina zaista odražavaju male promjene mehaničkih svojstava kore povezanih s tektonikom razmatranog područja. Za pouzdanije rezultate potrebna su dodatna modeliranja koja uključuju direktne uzročnike sezonskog karaktera krivulja promjena brzina. Korištenjem većeg broja postaja koje se nalaze na manjim udaljenostima, analizom preostalih komponenti seizmograma te namještanjem parametara korištenih u metodi MWCS vjerojatno bi se dobile puno stabilnije $\delta v/v$ krivulje koje bi nakon modeliranja bile još bolje povezane sa seizmotektonskim uzrocima promjene $\delta v/v$. Nadalje, takve modificirane krivulje potrebno je promotriti tijekom dužeg razdoblja (više od godinu dana kao što je napravljeno u ovome radu) kako bi se eventualne promjene brzina zaista mogle pripisati određenom događaju (jednom potresu ili seriji potresa).

6 Zaključak

Da bi se promotriale promjene brzina seizmičkih valova ($\delta v/v$) na području sjeverozapadnih Dinarida, primijenjena je metoda MWCS po uzoru na Clarke i sur. (2011). Osnovna pretpostavka metode je da su promjene brzina homogene unutar razmatranog područja i proporcionalne s pomakom u vremenu između višednevnih i referentne CCF. Metoda je primijenjena na desetogodišnje zapise (2009.–2018.) vertikalnih komponenti seizmograma i ukupno 14 postaja: BOJS, CADS, CEY, CRNS, GBAS, GBRs, GORS, JAVS, KNDS, RIY, ROBS, SKDS, VISS i VOJS. Analiza je provedena u 4 frekventna raspona (0.1–2 Hz, 0.33–1 Hz, 0.125–0.33 Hz i 0.066–0.166 Hz) i za sve parove postaja.

Uočeno je da se smanjivanjem raspona frekvencija gubi jasan sezonski oblik što je posljedica nedostatka koherentnih signala i potencijalno nekih drugih faktora kao što su udaljenosti između parova postaja te azimutalna pokrivenost smjera iz kojeg dolazi signal. Iz tog su razloga provedene dvije dodatne analize kojom se provjerava navedena ovisnost. Primijećeno je da za zadane parametre korištene u metodi MWCS udaljenosti parova postaja te lokacija izvora seizmičkog nemira nisu glavni uzročnik nedostatka sezonske periodičnosti.

Dobivene sezonske varijacije općenito odražavaju promjene svojstava sredstva uzrokovane raznim čimbenicima. Kako bi se utvrdilo koji su to točno čimbenici, potrebna je detaljnija analiza. Ipak, da bi se uklonio sezonski oblik i time omogućilo praćenje malih promjena svojstava kore tektonskog porijekla, definiran je vrlo jednostavan model korekcije koji prati jednogodišnju izmjenu ekstremnih vrijednosti $\delta v/v$.

Modificirane $\delta v/v$ uspoređene su s histogramima broja potresa za šest različitih serija potresa koje su se dogodile na području od interesa između 2009. i 2017. godine. Za većinu od njih smanjenje brzine može se uočiti prije povećane seizmičke aktivnosti nakon čega kroz tri do četiri mjeseca slijedi postupni rast vrijednosti $\delta v/v$. Navedeni porast brzine moguće da odražava "oporavak" svojstava sredstva u prvotno stanje. Da bi sa sigurnošću potvrdilo jesu li primijećene promjene brzina direktno povezane sa seizmičnošću razmatranog područja, potrebno je definirati općenitiji model koji uključuje direktne uzročnike sezonskih promjena brzina. S takvim modelom, modificirane $\delta v/v$ krivulje trebale bi u potpunosti odražavati promjene mehaničkih svojstava sredstva.

Dodaci

Dodatak A Tablica za poglavlje 5.2

Tablica A.1: Popis parova postaja korištenih u analizi ovisnosti promjena seizmičkih brzina o udaljenosti između uparenih postaja.

$D \leq 40$ km	$40 \text{ km} < D \leq 80$ km	$D > 80$ km
BOJS–GBRS, CADS–GORS, CADS–ROBS, CADS–VOJS, CEY–CRNS, CEY–GBAS, CEY–GBRS, CEY–JAVS, CEY–KNDS, CEY–SKDS, CEY–VISS, CRNS–GBAS, CRNS–GORS, CRNS–JAVS, CRNS–VOJS, GBAS–JAVS, GBAS–VISS, GBRS–KNDS, GBRS–VISS, GORS–ROBS, GORS–VOJS, JAVS–SKDS, JAVS–VOJS, KNDS–SKDS, RIY–GBRS, RIY–KNDS, ROBS–VOJS	BOJS–CEY, BOJS–GBAS, BOJS–KNDS, BOJS–VISS, CADS–CEY, CADS–CRNS, CADS–GBAS, CADS–JAVS, CADS–SKDS, CEY–GORS, CEY–VOJS, CRNS–GBRS, CRNS–KNDS, CRNS–ROBS, CRNS–SKDS, CRNS–VISS, GBAS–GBRS, GBAS–GORS, GBAS–KNDS, GBAS–SKDS, GBAS–VOJS, GBRS–JAVS, GBRS–SKDS, GORS–JAVS, JAVS–KNDS, JAVS–ROBS, JAVS–VISS, KNDS–VISS, KNDS–VOJS, RIY–BOJS, RIY–CEY, RIY–GBAS, RIY–JAVS, RIY–SKDS, RIY–VISS, SKDS–VISS, SKDS–VOJS, VISS–VOJS	BOJS–CADS, BOJS–CRNS, BOJS–GORS, BOJS–JAVS, BOJS–ROBS, BOJS–SKDS, BOJS–VOJS, CADS–GBRS, CADS–KNDS, CADS–VISS, CEY–ROBS, GBAS–ROBS, GBRS–GORS, GBRS–ROBS, GBRS–VOJS, GORS–KNDS, GORS–SKDS, GORS–VISS, KNDS–ROBS, RIY–CADS, RIY–CRNS, RIY–GORS, RIY–ROBS, RIY–VOJS, ROBS–SKDS, ROBS–VISS

Dodatak B Tablica za poglavlje 5.3

Tablica B.1: Popis parova postaja korištenih u analizi ovisnosti promjena brzina o azimutalnoj pokrivenosti smjera iz kojeg dolazi signal.

325°–55°	55°–145°	145°–235°	235°–325°
CEY–CRNS, CEY–GBAS, CEY–GORS, GBRS–VISS, KNDS–VISS, KNDS–VOJS, RIY–CADS, RIY–CEY, RIY–CRNS, RIY–GBAS, RIY–GBRS, RIY–GORS, RIY–JAVS, RIY–KNDS, RIY–VISS, RIY–VOJS, SKDS–VOJS	CADS–CEY, CADS–CRNS, CADS–GBAS, CADS–GBRS, CADS–GORS, CADS–VISS, CEY–GBRS, CEY–GBRS, CEY–VISS, CRNS–GBAS, CRNS–GBRS, CRNS–VISS, GBAS–VISS, GORS–GBAS, GORS–VISS, JAVS–CEY, JAVS–GBAS, JAVS–VISS, ROBS–CEY, ROBS–GBAS, ROBS–VISS, ROBS–VOJS, SKDS–CEY, SKDS–VISS, VOJS–CEY, VOJS–GBAS	CADS–JAVS, CADS–KNDS, CADS–SKDS, CADS–VOJS, CEY–KNDS, CRNS–JAVS, CRNS–KNDS, CRNS–SKDS, GBAS–GBRS, GBAS–KNDS, GBAS–SKDS, GORS–JAVS, GORS–KNDS, GORS–SKDS, GORS–VOJS, JAVS–KNDS, JAVS–ROBS, JAVS–SKDS, ROBS–SKDS	BOJS–CADS, BOJS–CEY, BOJS–CRNS, BOJS–GBAS, BOJS–GBRS, BOJS–GORS, BOJS–JAVS, BOJS–KNDS, BOJS–ROBS, BOJS–SKDS, BOJS–VISS, BOJS–VOJS, CADS–ROBS, CRNS–GORS, CRNS–ROBS, CRNS–VISS, GBRS–GORS, GBRS–JAVS, GBRS–KNDS, GBRS–ROBS, GBRS–SKDS, GBRS–VOJS, GORS–ROBS, JAVS–VOJS, KNDS–ROBS, KNDS–SKDS, RIY–ROBS, RIY–SKDS, VISS–VOJS

Dodatak C Tablice i slike za poglavlje 5.5

Tablica C.1: Koordinate vrhova područja za koje su uzeti potresi prve i šeste serije.

	1	2	3	4
φ [°N]	45.2911	46.5184	46.0877	45.9026
λ [°E]	13.3852	13.8192	14.4399	13.6187

Tablica C.2: Koordinate vrhova područja za koje su uzeti potresi druge serije.

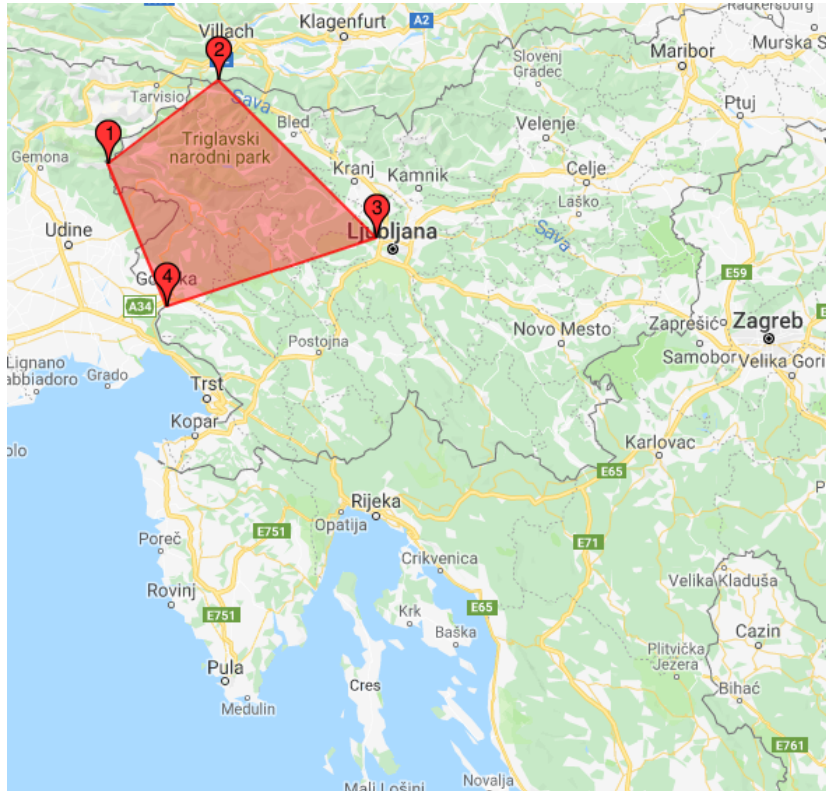
	1	2	3	4
φ [°N]	45.9375	46.0425	45.4031	45.5006
λ [°E]	13.9567	14.6292	14.5297	13.8208

Tablica C.3: Koordinate vrhova područja za koje su uzeti potresi treće i pete serije.

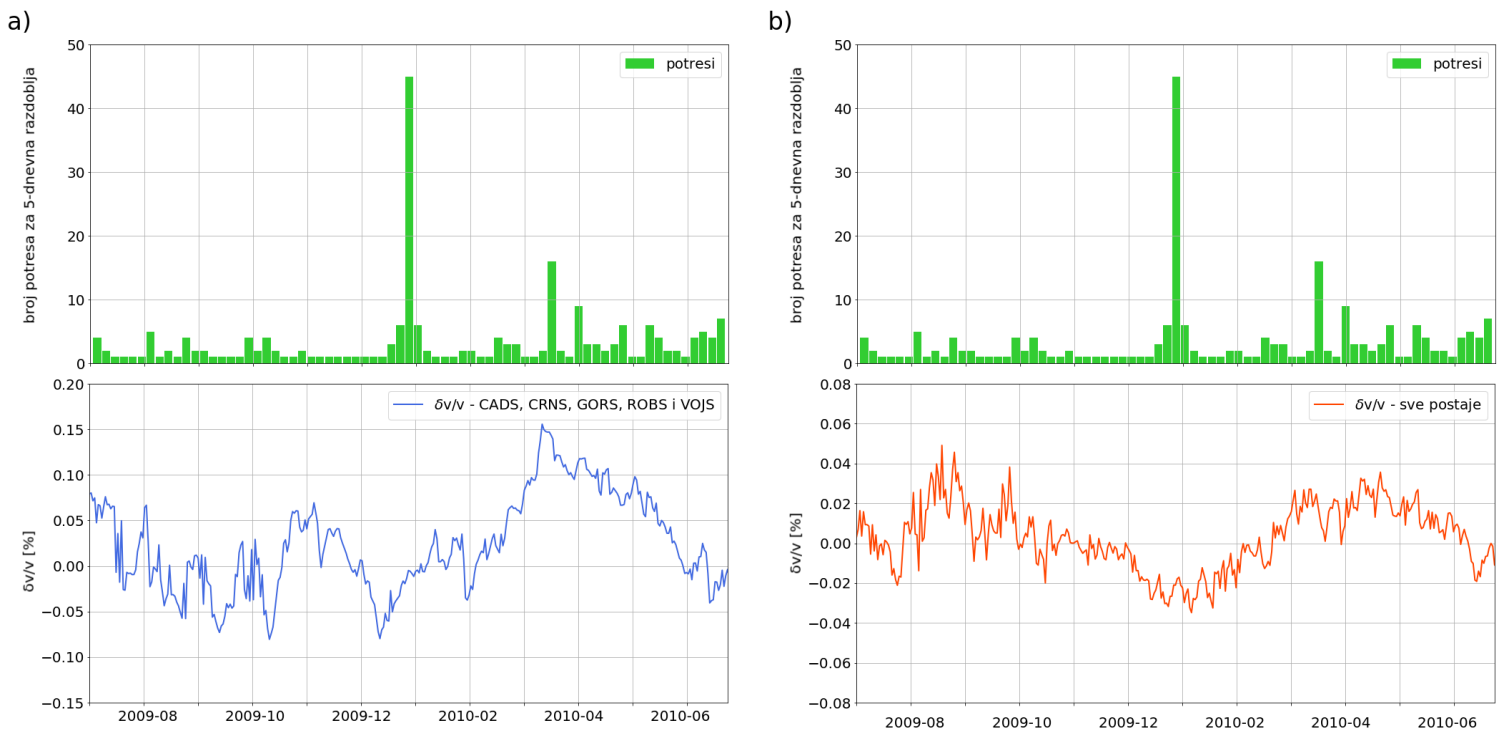
	1	2	3	4
φ [°N]	45.9500	45.7464	45.2414	45.4789
λ [°E]	14.0206	14.5136	14.5706	13.8925

Tablica C.4: Koordinate vrhova područja za koje su uzeti potresi četvrte serije.

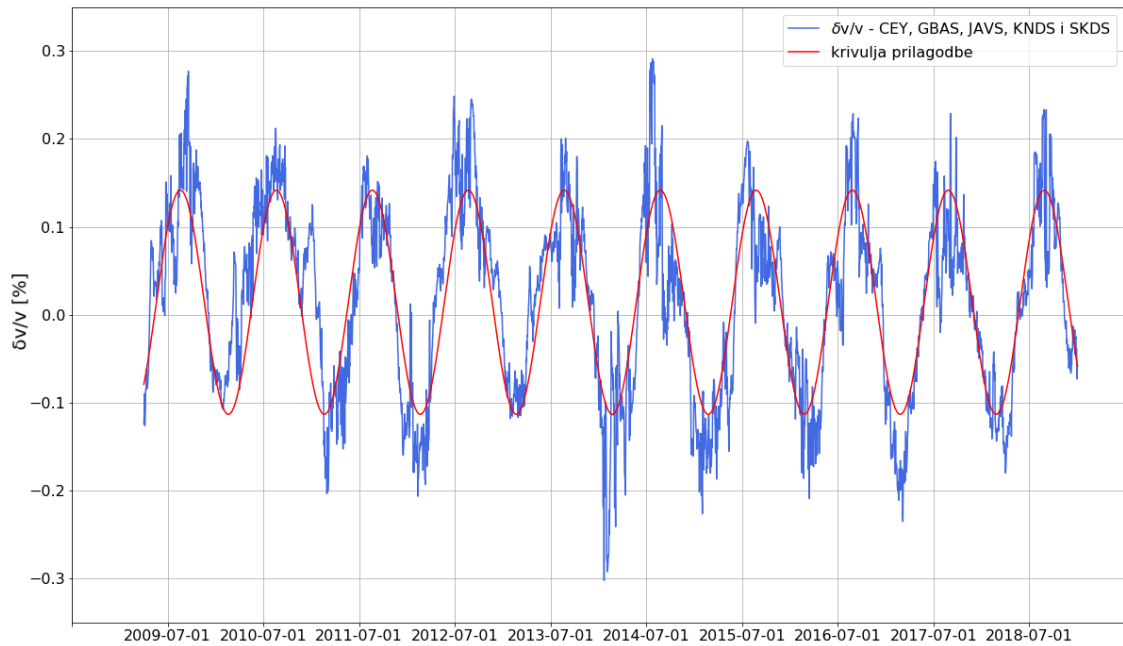
	1	2	3	4
φ [°N]	45.9886	45.9094	45.4156	45.5497
λ [°E]	14.4119	15.0797	15.4133	14.3694



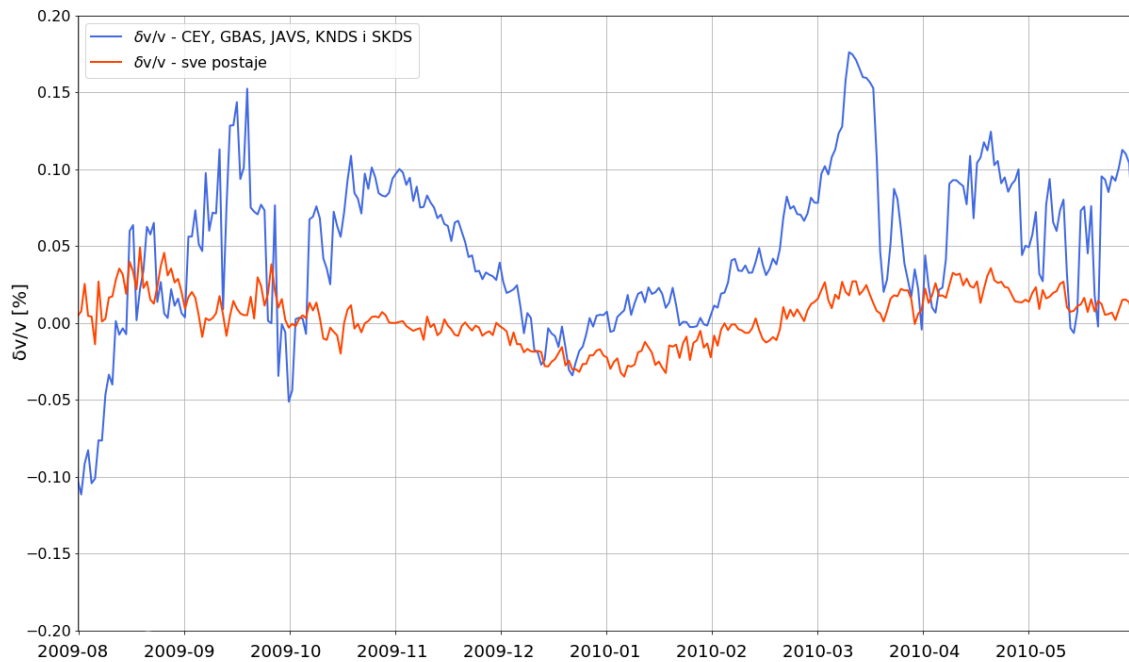
Slika C.1: Područje za koje su uzeti potresi prve i šeste serije (slika je preuzeta sa stranice <https://earthexplorer.usgs.gov>).



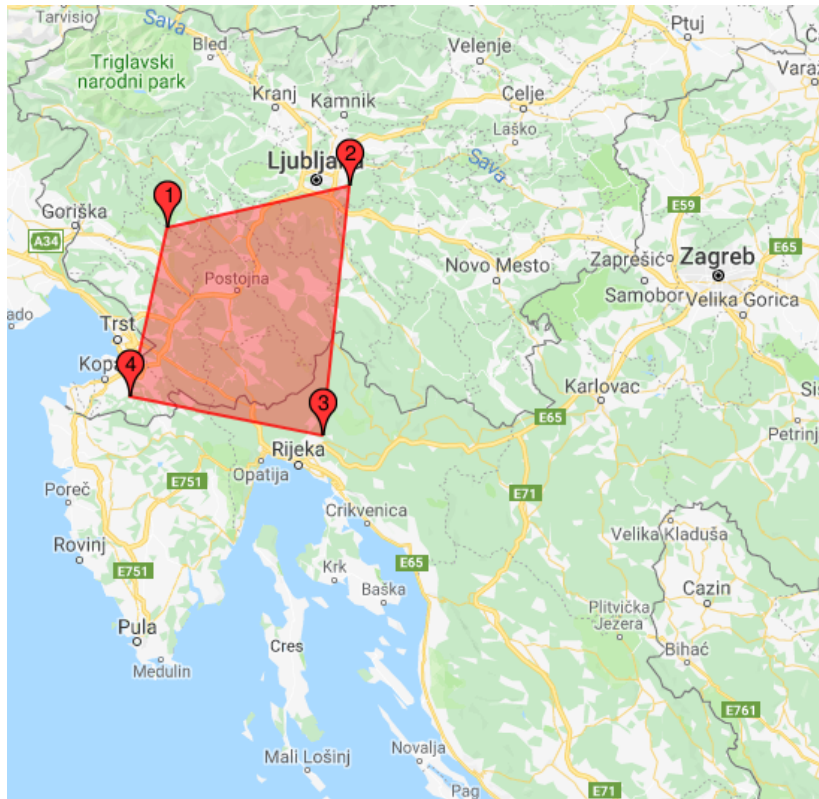
Slika C.2: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi koji se odnose na: a) područje koje obuhvaća prvu seriju potresa; b) čitavo analizirano područje.



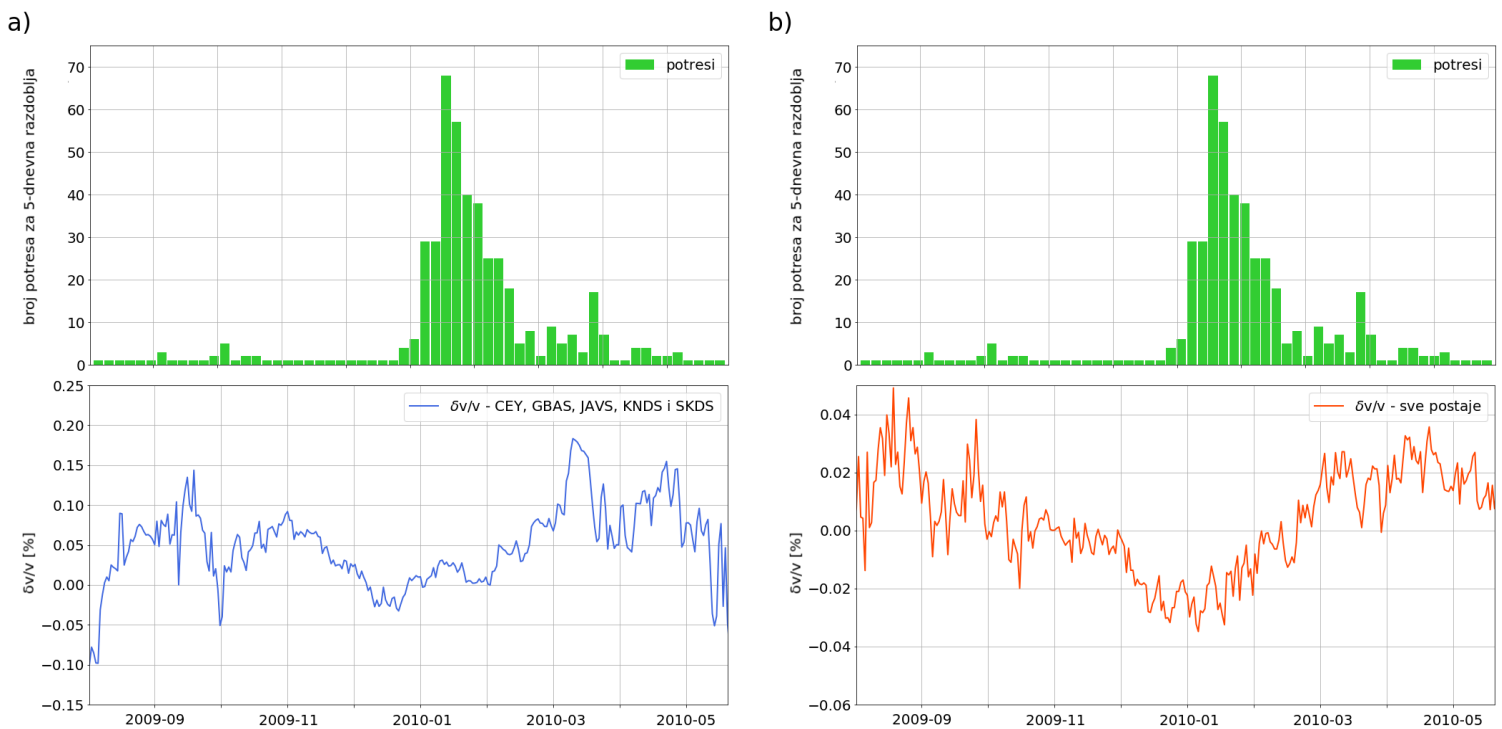
Slika C.3: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na područje koje uključuje drugu seriju potresa.



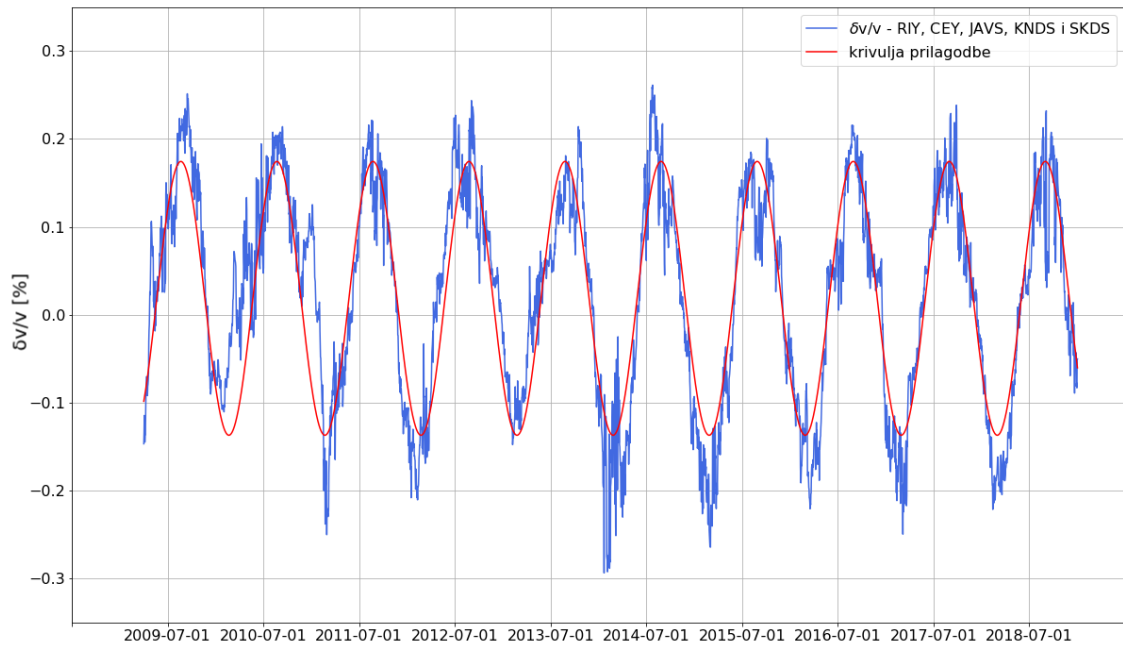
Slika C.4: Modificirane $\delta v/v$ krivulje koje se odnose na čitavo analizirano područje i područje koje uključuje drugu seriju potresa.



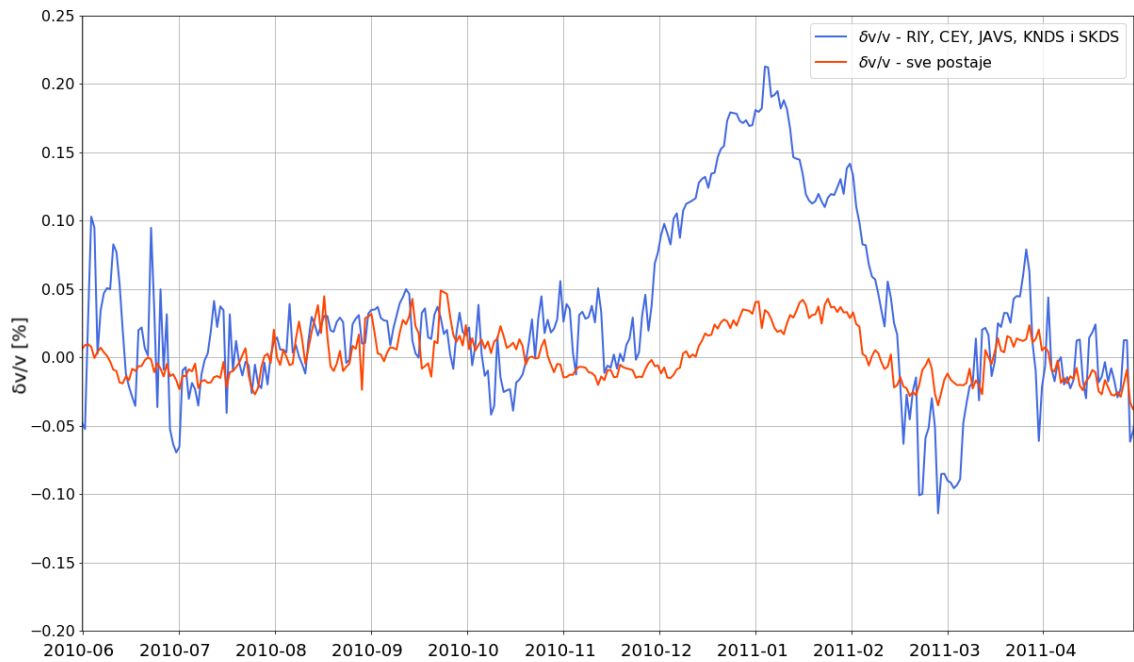
Slika C.5: Područje za koje su uzeti potresi druge serije (slika je preuzeta sa stranice [https:// earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov)).



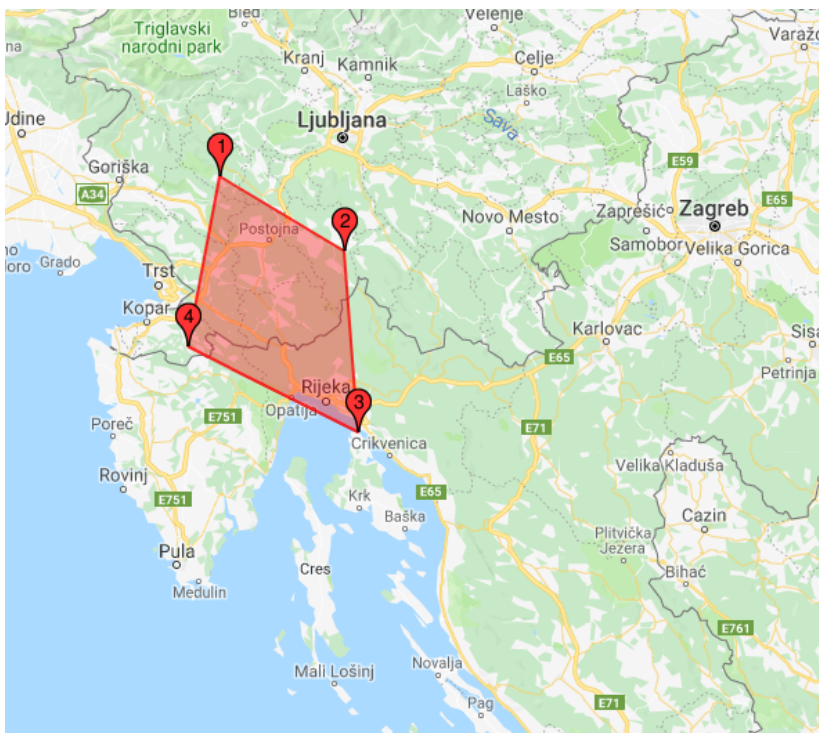
Slika C.6: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi koji se odnose na: a) područje koje obuhvaća drugu seriju potresa; b) čitavo analizirano područje.



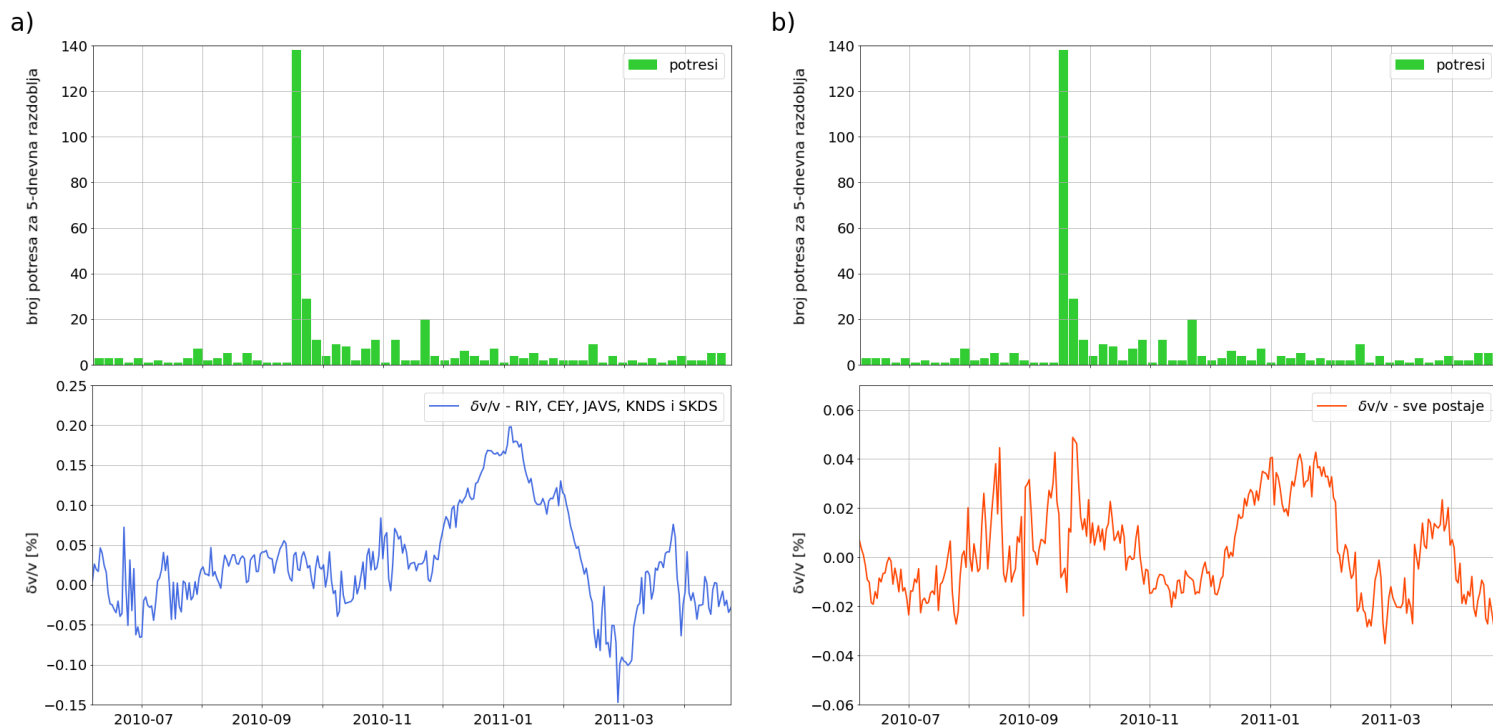
Slika C.7: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na područje koje uključuje treću i petu seriju potresa.



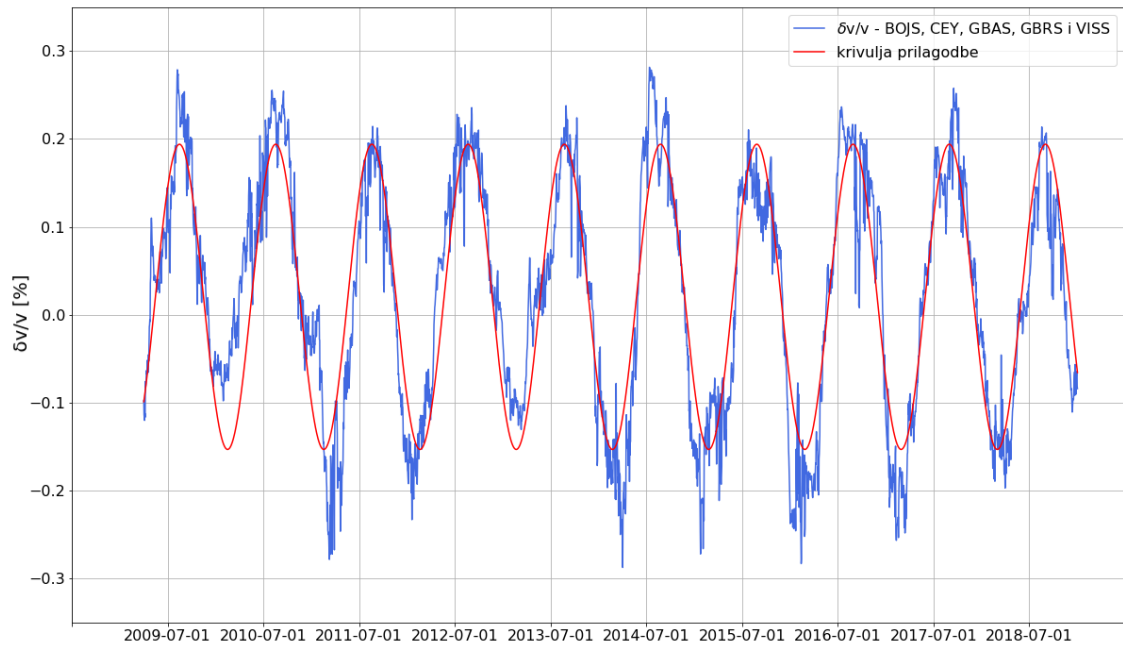
Slika C.8: Modificirane $\delta v/v$ krivulje koje se odnose na čitavo analizirano područje i područje koje uključuje treću seriju potresa.



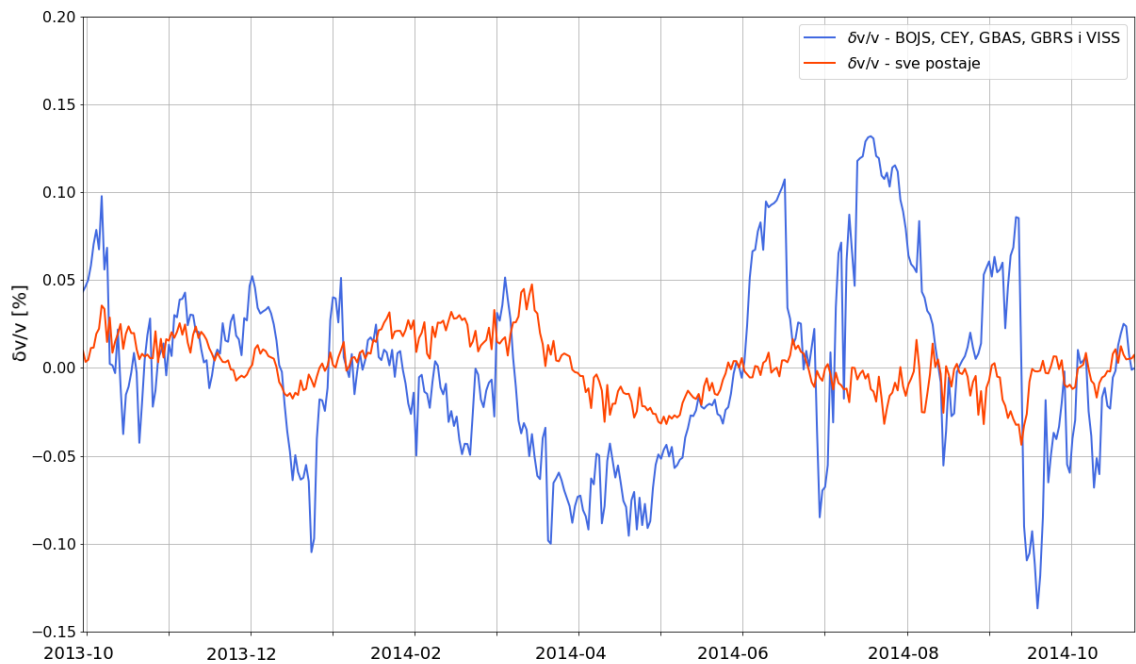
Slika C.9: Područje za koje su uzeti potresi treće i pete serije (slika je preuzeta sa stranice [https:// earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov)).



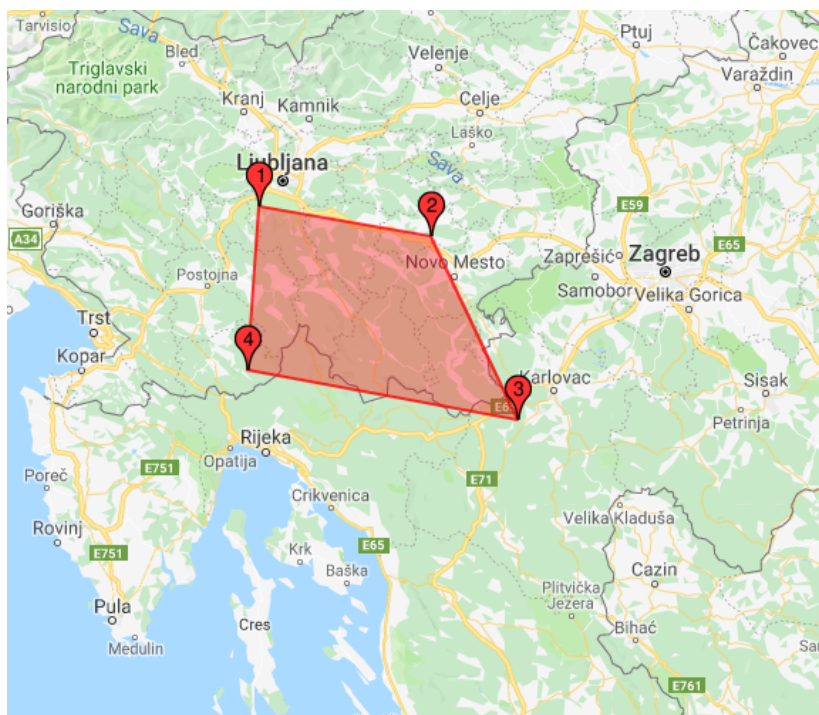
Slika C.10: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi koji se odnose na: a) područje koje obuhvaća treću seriju potresa; b) čitavo analizirano područje.



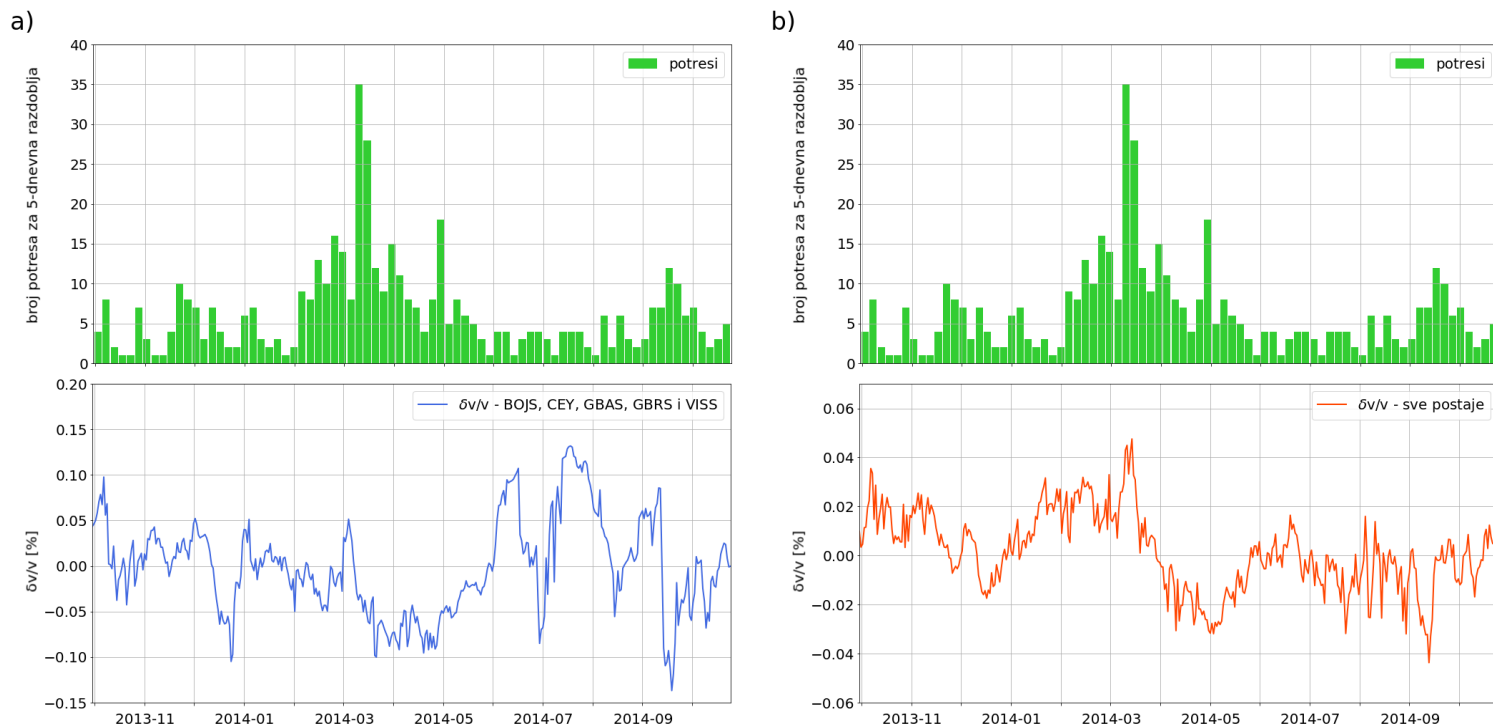
Slika C.11: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na područje koje uključuje četvrtu seriju potresa.



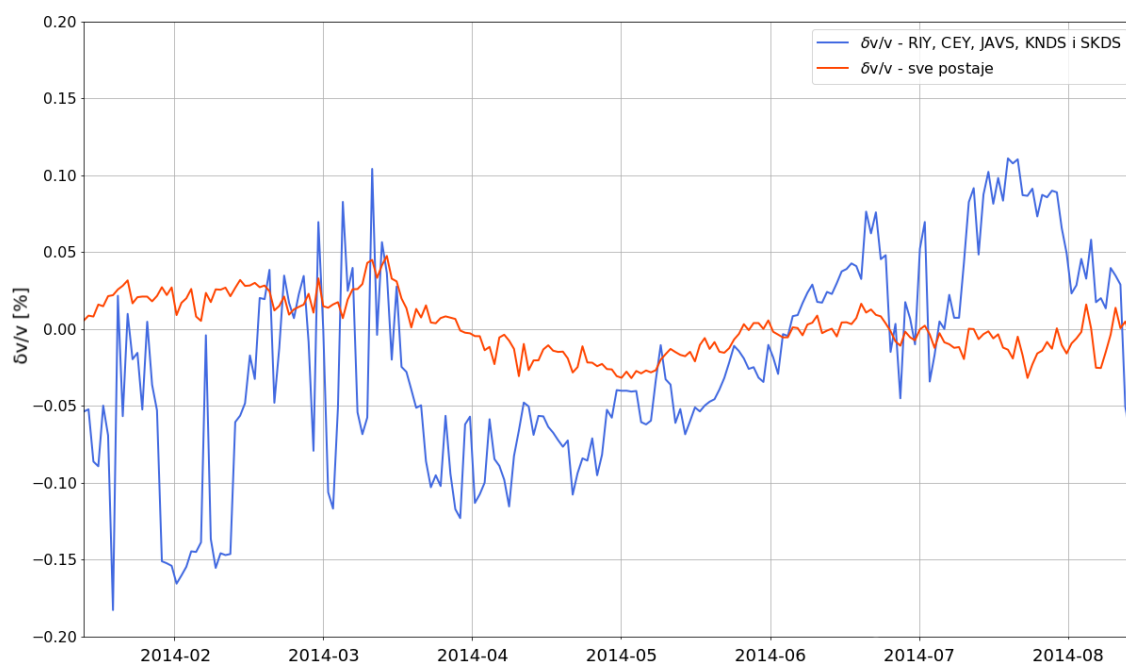
Slika C.12: Modificirane $\delta v/v$ krivulje koje se odnose na čitavo analizirano područje i područje koje uključuje četvrtu seriju potresa.



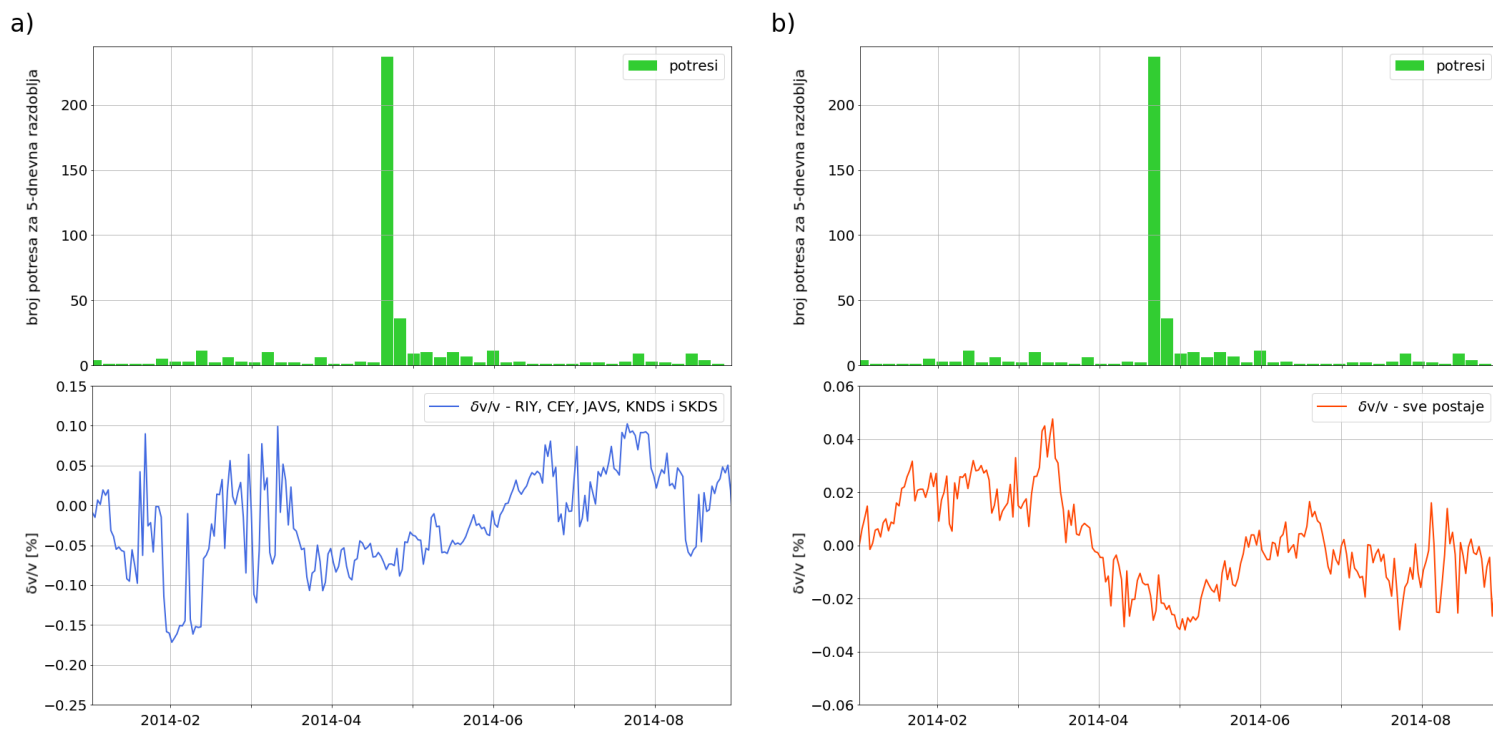
Slika C.13: Područje za koje su uzeti potresi četvrte serije (slika je preuzeta sa stranice [https:// earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov)).



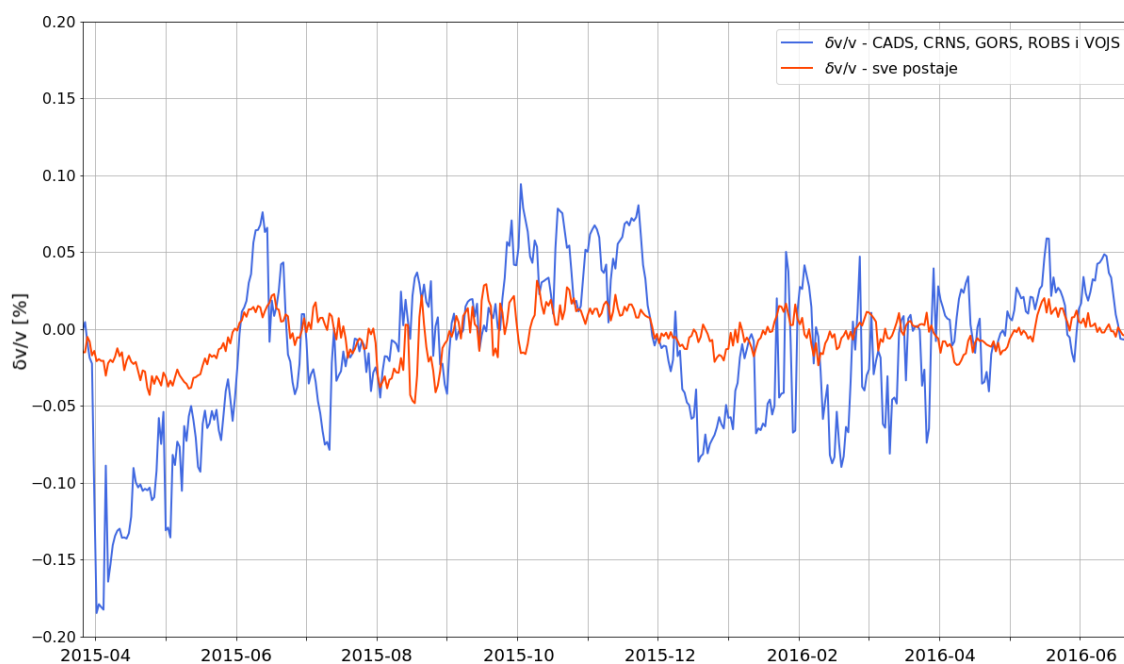
Slika C.14: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi koji se odnose na: a) područje koje obuhvaća četvrtu seriju potresa; b) čitavo analizirano područje.



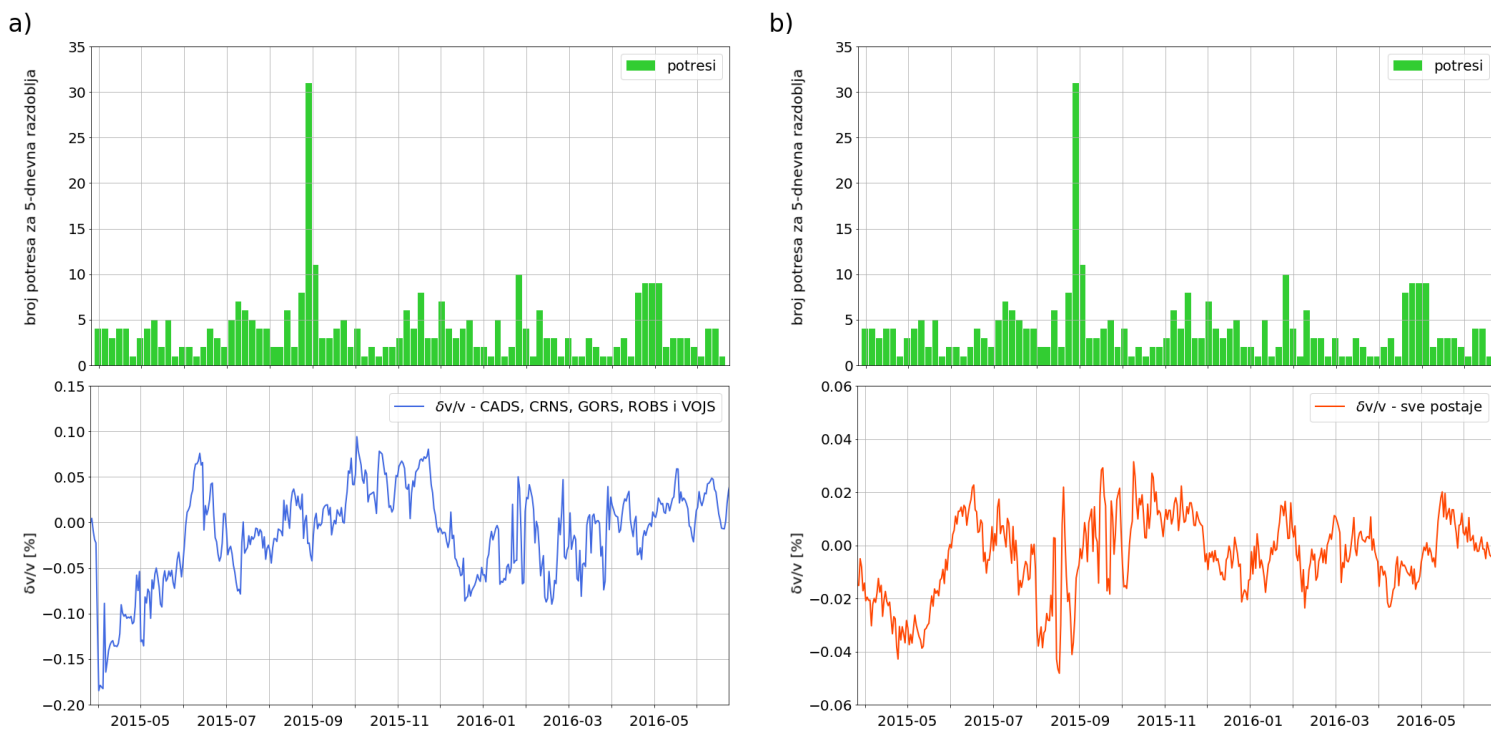
Slika C.15: Modificirane $\delta v/v$ krivulje koje se odnose na čitavo analizirano područje i područje koje uključuje petu seriju potresa.



Slika C.16: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi koji se odnose na: a) područje koje obuhvaća petu seriju potresa; b) čitavo analizirano područje.



Slika C.17: Modificirane $\delta v/v$ krivulje koje se odnose na čitavo analizirano područje i područje koje uključuje šestu seriju potresa.



Slika C.18: Histogram broja potresa za petodnevna razdoblja i modificirani grafovi koji se odnose na: a) područje koje obuhvaća šestu seriju potresa; b) čitavo analizirano područje.

Literatura

- Aki, K. (1957), 'Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors', *Bull. of the Earthquake Res. Inst.* **35**, 415–456.
- Bakulin, A. i Calvert, R. (2006), 'The virtual source method: Theory and case study', *Geophysics* **71**, SI139–SI150.
- Berger, J. (1975), 'A note on thermoelastic strains and tilts', *Journal of Geophysical Research* **80**(2), 274–277.
- Brenguier, F., Campillo, M., Hadziioannou, C., Shapiro, N. i Larose, E. (2008), 'Post-seismic relaxation along San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations', *Science* **321**, 1478–1481.
- Clarke, D., Zaccarelli, L., Shapiro, N. M. i Brenguier, F. (2011), 'Assessment of resolution and accuracy of the Moving Window Cross Spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise', *Geophysical Journal International* **186**, 867–882.
- Cupillard, P., Stehly, L. i Romanowicz, B. (2011), 'The one-bit noise correlation: a theory based on the concepts of coherent and incoherent noise', *Geophysical Journal International* **184**(3), 1397–1414.
- Giardini, D., Woessner, J. i Danciu, L. (2014), 'Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource'.
- Hadziioannou, C., Larose, E., Coutant, O., Roux, P. i Campillo, M. (2009), 'Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation: Laboratory experiments', *The Journal of the Acoustical Society of America* **125**(6), 3688–3695.
- Herak, D., Sović, I., Cecić, I., Živčić, M., Dasović, I. i Herak, M. (2017), 'Historical seismicity of the Rijeka region (northwest External Dinarides, Croatia) - Part I: Earthquakes of 1750, 1838, and 1904 in the Bakar epicentral area', *Seismological Research Letters* **88**(3), 904–915.
- Herak, M., Živčić, M., Sović, I., Cecić, I., Dasović, I., Stipčević, J. i Herak, D. (2018), 'Historical seismicity of the Rijeka region (northwest External Dinarides, Croatia) -

- Part II: The Klana earthquakes of 1870', *Seismological Research Letters* **89**(4), 1524–1536.
- Hillers, G., Ben-Zion, Y., Campillo, M. i Zigone, D. (2015), 'Seasonal variations of seismic velocities in the San Jacinto fault area observed with ambient seismic noise', *Geophysical Journal International* **202**(2), 920–932.
- Lecocq, T., Caudron, C. i Brenguier, F. (2014), 'MSNoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes Using Ambient Seismic Noise', *Seismological Research Letters* **85**(3), 715–726.
- Lecocq, T., Longuevergne, L., Pedersen, H. A., Brenguier, F. i Stammer, K. (2017), 'Monitoring ground water storage at mesoscale using seismic noise: 30 years of continuous observation and thermo-elastic and hydrological modeling', *Scientific Reports* **7**(14241).
- Liu, Z., Huang, J. i Qi, J. (2018), 'Ambient Noise Monitoring of Seismic Velocity Around the Longmenshan Fault Zone From 10 Years of Continuous Observation', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (123), 8979–8994.
- Lobkis, O. i Weaver, R. (2001), 'On the Emergence of the Green's Function in the Correlations of Diffuse Field', *The Journal of the Acoustical Society of America* **110**, 3011–3017.
- Meier, U., Brenguier, F. i Shapiro, N. M. (2010), 'Detecting seasonal variations in seismic velocities within Los Angeles basin from correlations of ambient seismic noise', *Geophysical Journal International* **181**(3), 985–996.
- Nakata, N. i Snieder, R. (2001), 'Estimating near-surface shear wave velocities in Japan by applying seismic interferometry to KiK-net data', *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **117**, B01308.
- Ohmi, S., Hirahara, K., Wada, H. i Ito, K. (2008), 'Temporal variations of crustal structure in the source region of the 2007 Noto Hanto Earthquake, central Japan, with passive image interferometry', *Earth Planets Space* **60**, 1069–1074.
- Poupinet, G., Ellsworth, W. i Frechet, J. (1984), 'Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras faults, California', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **89**, 5719–5731.

- Ratdomopurbo, A. i Poupinet, G. (1995), 'Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia)', *Geophysical Research Letters* **22**(7), 775–778.
- Sens-Schönfelder, C. i Wegler, U. (2006), 'Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia', *Geophysical Research Letters* **33**, 1–5.
- Shapiro, N. M., Ritzwoller, M. H. i Bensen, G. D. (2006), 'Source location of the 26 sec microseism from cross-correlations of ambient seismic noise', *Geophysical Research Letters* **33**(18), L18310.
- Snieder, R. (2004), *A guided tour of mathematical methods for the physical sciences*, 2nd ed.: Cambridge University Press.
- Snieder, R. (2006), 'Retrieving the Green's function of the diffusion equation from the response to a random forcing', *Phys. Rev. E* **74**, 046620.
- Snieder, R. i Larose, E. (2013), 'Extracting Earth's elastic wave response from noise measurements', *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **41**, 183–206.
- Snieder, R., Wapenaar, K. i Wegler, U. (2007), 'Unified Green's function retrieval by cross-correlation; connection with energy principles', *Phys. Rev. E* **75**, 036103.
- Stehly, L., Campillo, M. i Shapiro, N. M. (2006), 'A study of the seismic noise from its long-range correlation properties', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **111**(B10306).
- Stehly, L., Campillo, M. i Shapiro, N. M. (2007), 'Traveltime measurements from noise correlation: stability and detection of instrumental time-shifts', *Geophysical Journal International* **171**, 223–230.
- Trampert, J., Cara, M. i Frogneux, M. (1993), 'SH propagator matrix and Q_s estimates from borehole- and surface-recorded earthquake data', *Geophysical Journal International* **112**, 290–299.
- Vičič, B., Aoudia, A., Javed, F., Foroutan, M. i Costa, G. (2019), 'Geometry and mechanics of the active fault system in western Slovenia', *Geophysical Journal International* **217**(3), 1755–1766.

- Wang, Q., Brenguier, F., Campillo, M., Lecointre, A., Takeda, T. i Aoki, Y. (2017), 'Seasonal Crustal Seismic Velocity Changes Throughout Japan', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **122**(10), 7987–8002.
- Wegler, U., Nakahara, H., Sens-Schönfelder, C., Korn, M. i Shiomi, K. (2009), 'Sudden drop of seismic velocity after the 2004 Mw 6.6 mid-Niigata earthquake, Japan, observed with Passive Image Interferometry', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **114**, B06305.