

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek

Helena Latečki

**Varijacije seizmičkih brzina na širem
području Kvarnera određene na temelju
analize seizmičkog nemira**

Zagreb, 2019.

Ovaj rad izađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Josipa Stipčevića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

Popis kratica

$MWCS$	metoda analize križnih-spektara kliznih prozora
ACF	autokorelacijska funkcija
CCF	funkcija križne-korelacije
N_{cur}	broj jednodnevnih CCF koje se odnose na višednevni niz
N_{ref}	broj jednodnevnih CCF koje se odnose na referentni niz
$C(\nu)$	križna-koherencija spektra gustoće CCF
δt	pomak u vremenu između višednevne i referentne CCF
$\delta t/t$	razvlačenje višednevne u odnosu na referentnu CCF
$\delta v/v$	promjena brzine

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Teorijska pozadina	4
2.1	Princip određivanja Greenove funkcije iz seizmičkog nemira	4
2.2	Praćenje promjena seizmičkih brzina	6
3	Seizmička aktivnost promatranog područja	8
4	Metoda i analiza podataka	11
4.1	Podatci	11
4.2	Metoda analize križnih-spektara kliznih prozora (MWCS)	16
4.2.1	Određivanje vremenskog pomaka funkcija križne-korelacije (CCF)	16
4.2.2	Određivanje promjena brzina	18
5	Rezultati i diskusija	20
5.1	Analiza čitavog skupa podataka za različite frekventne raspone . . .	20
5.2	Ovisnost promjena brzina o udaljenosti parova postaja	24
5.3	Interpretacija sezonskih promjena brzina	28
5.4	Modeliranje sezonskih promjena brzina	29
6	Zaključci	37
	Zahvale	38
	Sažetak	43
	Summary	45
A	Dodatak	47

1 Uvod

Klasična seizmologija ponajviše je bazirana na izučavanju tranzijentnih signala, tj. izoliranih događaja (potresi, urušavanja, eksplozije itd.) čiji su izvori do određene mjere lokalizirani u vremenu i prostoru. Odziv sredstva na takav izvor naziva se impulzivnim odzivom (engl. *impulsive response*) ili Greenovom funkcijom (engl. *Green's function*). Greenova funkcija može se odrediti na temelju korelacijskih funkcija tranzijentnog signala. Time se ujedno mogu dobiti informacije o elastičkim svojstvima sredstva između postaja na kojima je signal zabilježen. Međutim, ovakvim je postupkom vrlo teško kontinuirano pratiti vremenske promjene svojstava na nekom području, pa je u tu svrhu potrebno koristiti druge metode.

Poznato je da su korisne informacije sadržane u kvazi-nasumičnom polju seizmičkog nemira (Aki, 1957) i da se osim na uobičajen način, Greenova funkcija može dobiti na temelju analize istog. Ovakav pristup tek je u posljednja dva desetljeća doživio veći razvoj i praktičnu primjenu, ne samo u seizmologiji, nego i u drugim granama znanosti kao što su helioseizmologija, medicinska dijagnostika, zvučna tomografija oceana itd. Metoda određivanja Greenove funkcije koja se bazira na analizi seizmičkog nemira često se naziva metodom seizmičke interferometrije (engl. *seismic interferometry*). Jedna od njezinih najznačajnijih primjena uključuje praćenje Zemljinog odziva na kvazi-kontinuiranoj razini, naročito praćenje promjena fizičkih svojstava rasjednih, urušnih ili vulkanskih zona.

Mogućnost korištenja nemira kao svojevrsnog seizmičkog izvora otvorila je vrata nizu novih spoznaja u seizmologiji. Tako je danas određivanje Greenove funkcije, osim na principu križne-koherencije koju je 1957. predstavio Aki, moguće korištenjem dekonvolucije (Trampert i sur., 1993) ili križne-korelacije (Lobkis i Weaver, 2001). U ovome je radu seizmička interferometrija bazirana na potonjem.

Kvazi-kontinuirano praćenje Zemljinog odziva posljedica je usrednjavanja funkcija križnih-korelacija tijekom određenog vremenskog perioda (od par sati do nekoliko

mjeseci). Usrednjavanje duž vremenskog perioda omogućuje uočavanje vremenskih pomaka između tzv. referentne i funkcije križne-korelacije nekog zadanog perioda. Prva istraživanja pomaka u vremenu bila su bazirana na funkcijama autokorelacije zabilježenih signala, a danas se određuju i za parove seizmoloških postaja. Na temelju razlika u vremenu između dviju funkcija križne-korelacije, moguće je odrediti varijacije seizmičkih brzina uz pretpostavku da su homogene unutar razmatranog područja. Poupinet i sur. 1984. godine predstavili su metodu u kojoj se procjenjuju vremenske razlike 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 brojnim 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). Iznenađne promjene brzina moguće je uočiti kod urušnih ili vulkanskih zona, te na drugim manje seizmički aktivnim područjima kroz duži vremenski period, 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 koji je čisto tektonskog porijekla.

Upravo je iz tog razloga osnovni cilj ovoga rada bio ispitati uočavaju li se promjene seizmičkih brzina u najgornjem dijelu kore na širem području Kvarnera i Istre. U tu je svrhu primijenjena metoda analize križnih-spektara kliznih prozora na trogodišnji zapis (2016. - 2019. godine) seizmičkog nemira zabilježenog na ukupno osam postaja koje se nalaze na području od interesa. MWCS metoda

temelji se na proučavanju pomaka u vremenu između funkcija križne-korelacije dobivenih za višednevna razdoblja i funkcija čitavog vremenskog niza. Provođi se u frekventnoj domeni pri čemu se pomaci u vremenu između dviju funkcija križnih-korelacija određuju na temelju pripadnih faza križnih-spektara niza kliznih prozora. Uz pretpostavku da se brzina mijenja homogeno unutar razmatranog područja, varijacije brzina proporcionalne su s dobivenim vremenskim razlikama. U ovome radu, MWCS metoda primijenjena je za različite frekventne pojaseve od 0.1 do 2 Hz i skupine parova postaja različitih udaljenosti.

Uočene su jasne sezonske varijacije brzina koje su potom modelirane jednostavnim modelom koji uključuje sezonske promjene. Uklanjanjem navedenih promjena dobiveni su grafovi promjena brzina za koje se može smatrati da su čisto tektonskog porijekla. Konačno, promotreno je postoji li korelacija između smanjenja seizmičkih brzina i seizmičke aktivnosti razmatranog područja u razdoblju od 2016. do 2018. godine. Uočeno je smanjenje seizmičkih brzina reda veličine od 0.04% neposredno prije i tijekom serije potresa koja je nastupila u kolovozu 2017. godine. Nagle promjene brzina koje se na modificiranim grafovima mogu uočiti tijekom drugih razdoblja nije bilo moguće povezati sa seizmičnošću.

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. Konvolucija Greenove funkcije $G(x, s)$ i funkcije $f(x)$ daje rješenje $u(x)$ nehomogene diferencijalne jednadžbe $L[u(x)] = f(x)$.

U frekvencijskoj domeni, Greenova će funkcija zadovoljavati jednadžbu oblika

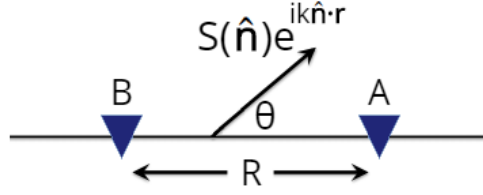
$$\nabla^2 G(\vec{r}, \omega) + k^2 G(\vec{r}, \omega) = \delta(\vec{r}), \quad (1)$$

pri čemu je $k = \omega/c$ valni broj, ω kutna frekvencija, \vec{r} vektor položaja, a c brzina rasprostiranja vala. Izraz (1) zapravo predstavlja valnu jednadžbu Greenove funkcije koja se često naziva Helmholtzovom jednadžbom. Jednadžba (1) i njeno pripadno rješenje u tri dimenzije dano je kao (Snieder, 2004)

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

U slučaju homogenog sredstva koje se razmatra u tri dimenzije (slika 1), za dva prijemnika A i B koji se nalaze na udaljenosti R i lokacijama $\vec{r}_A = (R, 0, 0)$, $\vec{r}_B = (0, 0, 0)$, valno polje bit će oblika (Snieder i Larose, 2013):

$$u_A = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} S(\theta, \varphi) e^{ikR \cos\theta} d\varphi \sin\theta d\theta, \quad u_B = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} S(\theta', \varphi') e^{ikR \cos\theta'} d\varphi' \sin\theta' d\theta', \quad (3)$$



Slika 1: Prijemnici A i B koji se nalaze na udaljenosti R i na koje nailaze valovi.

pri čemu se S odnosi na spektar amplitude vala. Korelacija ova dva signala je u frekventnoj domeni dana umnoškom $u_A u_B^*$, gdje se u_B^* odnosi na kompleksno-konjugiranu vrijednost od u_B . Kako se valovi koji nailaze na prijemnike mogu smatrati slučajnim varijablama, očekivana vrijednost korelacije $\langle u_A u_B^* \rangle$ će, uz pretpostavku da su signali nekorelirani i imaju jednake spektre snage, tj. da vrijedi $\langle S(\theta, \varphi) S^*(\theta', \varphi') \rangle = |S|^2 \delta(\theta - \theta') \delta(\varphi - \varphi')$, biti oblika

$$\langle u_A u_B^* \rangle = |S|^2 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} e^{ikR \cos \theta} d\varphi \sin \theta d\theta = 2\pi \cdot \frac{(e^{ikR} - e^{-ikR})}{ikR}. \quad (4)$$

Izraz (4) predstavlja križnu-korelaciju dvaju navedenih prijemnika. Po izrazu (2), Greenova funkcija dana je kao $G(R, \omega) = -exp(ikR)/(4\pi R)$. Zamjenom eksponencijalnih funkcija u (4) s $G(R, \omega)$, odnosno $G^*(R, \omega)$, slijedi

$$\langle u_A u_B^* \rangle = 8i\pi |S|^2 (G(R, \omega) - G^*(R, \omega)). \quad (5)$$

Dakle, iz poznatog spektra snage signala, kao što je primjerice seizmički nemir, na temelju križne-korelacije moguće je dobiti razliku kauzalne $G(R, \omega)$ i akauzalne $G^*(R, \omega)$ Greenove funkcije. Dobivena razlika $G(R, \omega) - G^*(R, \omega)$ u vremenskoj je domeni ekvivalentna razlici $G(R, t) - G(R, -t)$, a njihovim raščlanjivanjem moguće je u potpunosti rekonstruirati impulzivni odziv.

Naravno, određivanje odziva iz seizmičkog šuma 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).

2.2 Praćenje promjena seizmičkih brzina

Promjena napetosti utječe na elastička svojstva Zemljine kore. Varijacije elastičkih svojstava mogu se mjeriti analizom Zemljinog odziva, naročito analizom kode, mikrotremora i mikroseizmičkog šuma zbog njihove izuzetne osjetljivosti na male perturbacije elastičkih parametara (Aki, 1957). Konkretnije, izučavanjem funkcija križne-korelacije seizmičkog nemira (CCF skraćeno od engl. *cross-correlation functions*), moguće je procijeniti varijacije seizmičkih brzina razmatranog područja. Da bi se te promjene pratile, uspoređuju se višednevne i referentne CCF, tj. određuje se njihov pomak u vremenu. Višednevne CCF obično se definiraju kao srednjak jednodnevnih CCF određenog broja dana, dok se referentna CCF odnosi na usrednjeno stanje dužeg vremenskog niza u promatranom mediju (najčešće čitavog perioda od interesa).

Razlikuju se dva pristupa za 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 premda obje metode pokazuju sličnu

osjetljivost, MWCS ima prednost jer omogućuje jasno definiranje propusnih širina koherentnih signala korištenih pri procjeni varijacija brzina.

Poupinet i sur. 1984. godine predstavili su MWCS metodu kojom je omogućeno preciznije praćenje varijacija seizmičkih brzina. U svome su radu procijenili pomake u vremenu između CCF parova sličnih potresa za niz kliznih prozora. Pretpostavili su da su promjene brzine homogene unutar razmatranog područja (jezero Coyote, Kalifornija) i proporcionalne negativnim vrijednostima vremenskih pomaka. Njihova metoda danas je prilagođena i primijenjena na zapise CCF seizmičkog nemira na različite načine. Prvi koji su to napravili bili su Brenguier i sur. (2008), a u ovome je radu korištena i opisana MWCS metoda po Clarke i sur. (2011).

MWCS metoda primjenjuje se na nizove CCF dijelova zapisa 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, kontinuirani zapis šuma obično se podijeli u manje sekvence (npr. po satima ili danima) na temelju kojih se računaju križne-korelacije. Pojedinačne funkcije potom se objedinjuju u jednu cjelinu, pri čemu mora biti zadovoljen uvjet da je broj funkcija koje čine referentnu CCF (N_{ref}) puno veći od broja objedinjenih funkcija koje tvore višednevne CCF (N_{cur}).

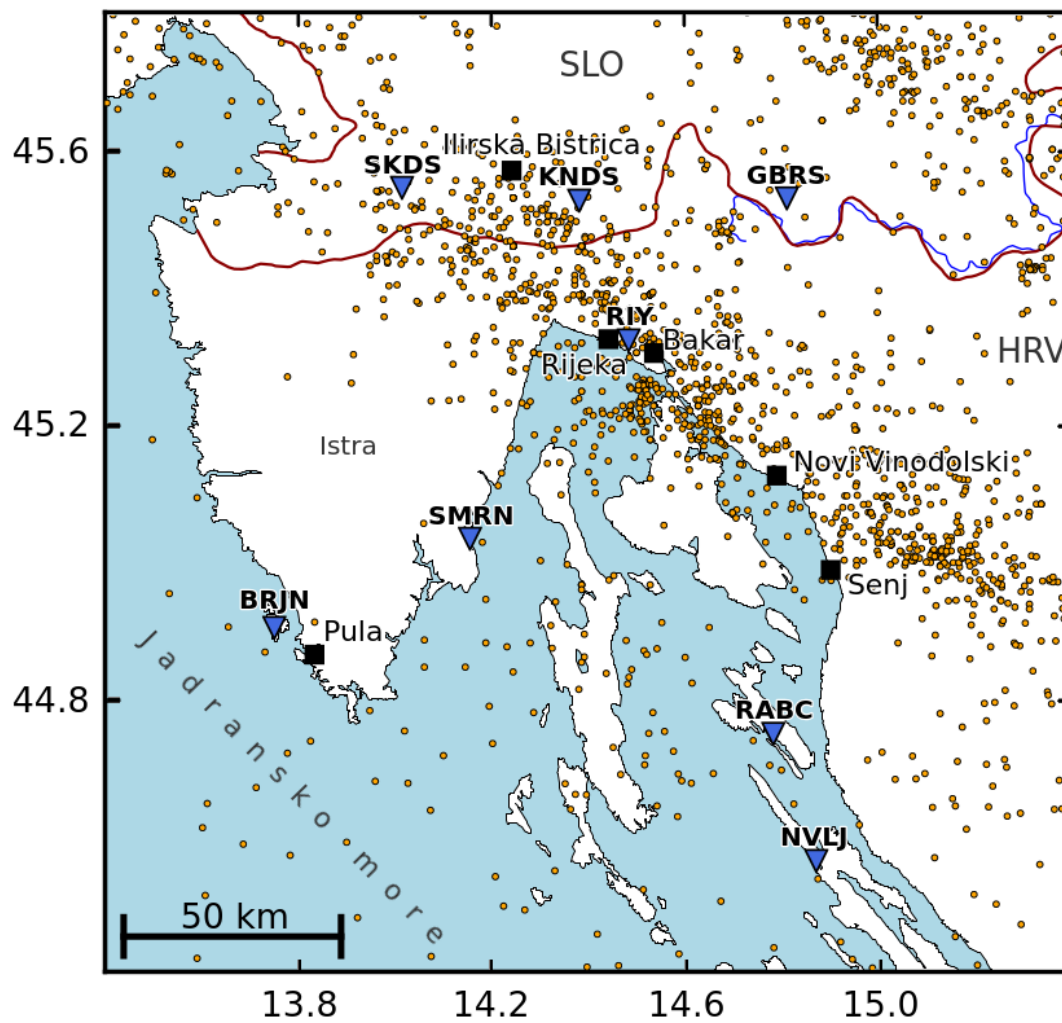
Metoda se provodi u dva glavna koraka. Prvi korak uključuje određivanje vremenskog pomaka između referentne i višednevne CCF za niz preklapajućih vremenskih prozora. Drugi korak se odnosi na procjenu varijacija relativnih brzina pri čemu se pretpostavlja da su promjene seizmičkih brzina homogene unutar razmatranog područja. Ključni koraci koji određuju uspješnost metode su izbor N_{ref} i N_{cur} , duljina i područje preklapanja prozora te ukupni broj vremenskih prozora koji se koristi u analizi. Pregled uspješnosti metode dan je u radu od Clarke i sur. (2011).

3 Seizmička aktivnost promatranog područja

Teritorij Hrvatske nalazi se u širem području konvergentne granice između Afričke i Euroazijske ploče. Uslijed djelovanja Afričke ploče, Jadranska mikroploča sudara se s Europskom na sjeveru (Alpe) i podvlači pod Dinaride na sjeveroistoku. Dinaridi su borano-navlačni pojas koji se pruža od Južnih Alpa na sjeverozapadu do Albanida i Helenida na jugoistoku. Razlikuju se Vanjski i Unutarnji Dinaridi.

Vanjski Dinaridi, koji uključuju šire područje Kvarnera analiziranog u ovom radu, nastali su uslijed deformacije sjeveroistočnog ruba Jadranske mikroploče. Uglavnom se sastoje od stijena nekadašnje Jadranske karbonatne platforme među kojima dominiraju mezozojski karbonati (npr. dolomiti, vapnenci i breče). Područje Dinarida seizmički je umjereno aktivno s povremenom pojavom snažnih potresa čija su žarišta većinom smještena u gornjoj kori (dubina do 30 km). Seizmički aktivno šire područje Kvarnera proteže se od Senja na jugoistoku do Ilirske Bistrice u Sloveniji na sjeveru (slika 2).

Navedeno područje obuhvaća jedno od tri seizmički najaktivnija područja u Hrvatskoj, rasjednu zonu Ilirska Bistrica–Rijeka–Vinodol–Senj. U toj rasjednoj zoni potresi su uglavnom uzrokovani dominantno kompresijskim režimom. Procjene hazarda su relativno visoke (Dodatak, slika 1), tj. smatra se da se premašivanje 0.25 g događa s povratnim periodom od 475 godina (Herak i sur., 2011). Okolica Rijeke jake je potrese doživjela u 18. i 19. stoljeću, a okolica Senja u 17. i 19. stoljeću (pregled i obilježja najznačajnijih povijesnih potresa navedenog područja daju Herak i sur., 2017, 2018).



Slika 2: Prikaz područja od interesa. Crni kvadrati označavaju gradove, a plavi trokuti seizmološke postaje korištene u analizi. Narančastim kružićima prikazani su epicentri potresa $M \geq 2.0$ u razdoblju od 1908. do 2018. godine iz Hrvatskog kataloga potresa.

Područje Istre zapadno od Čićarije i Učke, koje je obuhvaćeno u ovoj analizi, dio je relativno stabilne Jadranske mikroploče i ubraja se u jedno od područja koje broji najmanje potresa u Hrvatskoj. U Hrvatskom katalogu potresa postoji tek jedan potres u Istri s magnitudom iznad 5.0 koji se dogodio u 16. stoljeću i koji je nažalost dvojbene pouzdanosti. Stoga je potresna opasnost ovog područja dominantno određena seizmičnošću susjednih regija, prvenstveno unutar epicentralne zone Ilirska Bistrica-Bakar-Senj. Vjerojatnost da se u bilo kojih 50 godina premaši akceleracija tla od 0.08 do 0.14 g u Istri je 10% (Herak i sur., 2017). Pripadna slika seizmičkog hazarda nalazi se u Dodatku (slika 1).

4 Metoda i analiza podataka

U ovome je radu za računanje CCF seizmičkog šuma i procjenu promjena brzina korišten programski paket MSNoise verzija 1.5 (kratica od engl. *Monitoring using Seismic Noise*). Softver je baziran na MWCS metodi (Clarke i sur., 2011), a razvili su ga Lecocq i sur. 2014. godine.

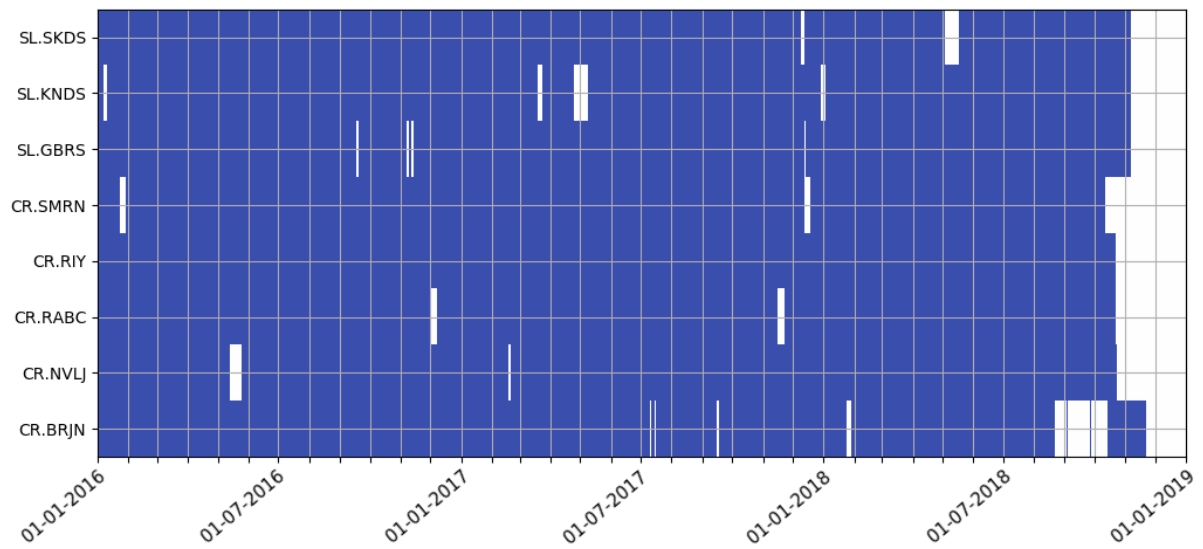
4.1 Podatci

U analizi su korišteni seizmogrami zabilježeni na pet hrvatskih i tri slovenske seizmološke postaje prikazane na slici 2 i popisane u tablici 1. Postaje GBRŠ, KNDS, NVLJ, RABC, RIY i SKDS nalaze se na području sjeverozapada Vanjskih Dinara, a BRJN i SMRN na seizmički manje aktivnom području Istre. Instrumenti pomoću kojih su prikupljeni podatci su širokopojasni trokomponentni seizmografi modela Gürlap i Streckeisen. Analizirani su svi dostupni seizmogrami trogodišnjeg razdoblja od 2016. do 2019. godine (slika 3).

Podatci svake postaje po potrebi su spojeni ili razdvojeni na dijelove koji tvore jednodnevne zapise. Pri tome su manje praznine 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 Lanczos metode (za detalje vidi Lecocq i sur., 2014).

Tablica 1: Osnovne informacije o seizmološkim postajama korištenim u ovom radu.

Mreža	Seizmološka postaja	φ [°N]	λ [°E]	Instrument
CR	Brijuni (BRJN)	44.9057	13.7503	STS2
SL	Gornja Briga (GBRS)	45,5311	14,8101	CMG-3ESP
SL	Knežji Dol (KNDS)	45,5278	14,3807	STS2
CR	Novalja (NVLJ)	44.5635	14.8711	CMG-40T
CR	Rab (RABC)	44.7504	14.7821	CMG-40T
CR	Rijeka (RIY)	45.3251	14.4830	CMG-40T
SL	Skadanščina (SKDS)	45,5464	14,0143	STS2
CR	Sveta Marina (SMRN)	45.0361	14.1549	CMG-40T



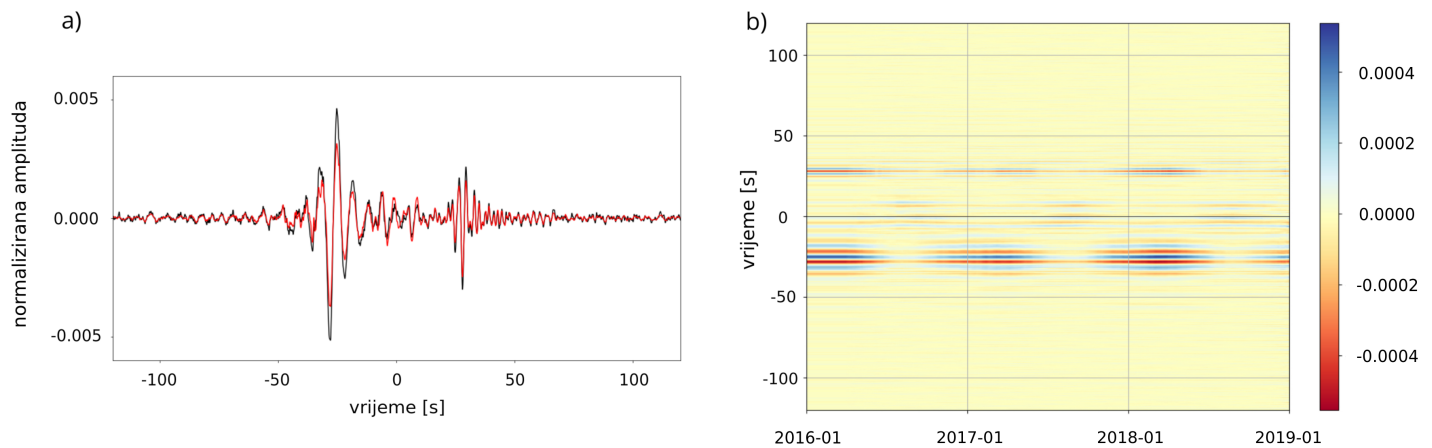
Slika 3: Podatci korišteni u analizi: plavom bojom označena su razdoblja u kojima na seizmološkim postajama postoje podatci.

Kako bi se poboljšala stabilnost zapisa nemira u vremenu i uklonili određeni ne-regularni događaji (potresi, eksplozije i sl.), prije koreliranja signala provodi se jedno-bitna normalizacija. Ovdje se amplitude zapisa zamjenjuju s pripadnim predznacima i premda je sama operacija jako nelinearna, faze razmatranih signala (potrebne za računanje CCF) ostaju očuvane (Cupillard i sur., 2011).

Općenito, jakost signala mikroseizmičkog nemira pokazuje sezonske varijacije (Stehly i sur., 2006). Da bi se umanjili navedeni efekti i osigurala ovisnost konačnih rezultata samo o promjenama razmatranog sredstva, provedeno je spektralno izbjeljivanje u frekventnom rasponu od 0.01 do 4 Hz (Shapiro i sur., 2006).

Dnevne ACF i CCF svih parova postaja dobivene su usrednjavanjem 30 minutnih funkcija križnih-korelacija. Funkcije su računate za parove vertikalnih (ZZ) komponenti. Referentna CCF dobivena je sjedinjavanjem čitavog niza funkcija trogodišnjeg razdoblja. Kako bi se mogle pratiti promjene brzina, višednevne CCF definirane su kao srednjak od $N_{cur} = 90$ jednodnevnih funkcija. Na slici 4 prikazane su višednevna ($N_{cur} = 90$) i referentna CCF za par postaja NVLJ–SMRN (a), te pripadni interferogrami višednevnih CCF ($N_{cur} = 90$) čitavog trogodišnjeg razdoblja za isti par postaja (b).

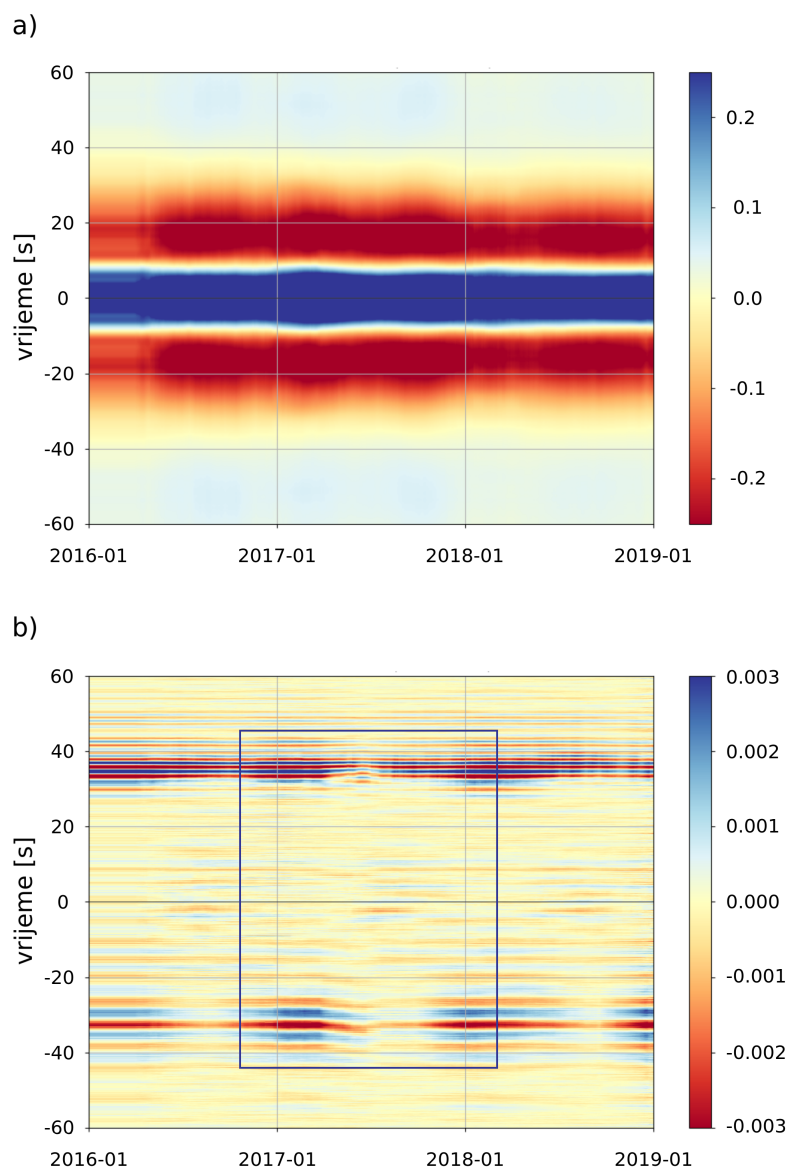
Iz slike 4 (a) može se uočiti da dobivene CCF nisu simetrične - amplitude akauzalnog dijela (negativna vremena) veće su od onih koje se odnose na kauzalni dio (pozitivna vremena). Asimetričnost signala ukazuje na to da je između 2016. i 2019. godine većina energije bila propagirana iz smjera postaje SMRN prema NVLJ. 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).



Slika 4: a) Višednevna CCF koja se odnosi na razdoblje od 1.1. do 1.4.2017. (crna linija) i referentna CCF trogodišnjeg niza podataka (crvena linija) za par postaja NVLJ–SMRN. b) Sve višednevne korelacijske funkcije trogodišnjeg razdoblja za par postaja NVLJ–SMRN.

Na slici 4 (b) već se sada mogu uočiti promjene u koherentnim fazama koje nastupaju nakon ± 25 s, kao i sezonske promjene u amplitudama. Maksimumi signala CCF javljaju se u ožujku, a minimumi u rujnu svake nastupne godine.

Interferogrami koji se odnose na postaje uparene sa stanicom RABC pokazuju da krajem 3. mjeseca 2017. godine dolazi do naglog pomaka u signalu CCF (slika 5, b). Ovakav fenomen najvjerojatnije je posljedica poremećenja GPS signala koji je uzrokovao krivu sinkronizaciju vremena postaje RABC u odnosu na pravo vrijeme. Iz tog je razloga postaja RABC izbačena u daljnjim analizama ovoga rada. Međutim, bitno je napomenuti da se općenito instrumentalne pogreške ovakvoga tipa mogu korigirati ako je poznat vremenski pomak. Nadalje, pomaci u signalima ili neki drugi problemi ne mogu se uočiti ako se razmatraju samo autokorelacijski interferogrami (slika 5, a). Jednostavnu metodu za detektiranje i ispravljanje instrumentalnih problema daju Stehly i sur. (2007).



Slika 5: a) Autokorelacijski interferogram postaje RABC b) interferogram para postaja RABC–KNDS. Plavim pravokutnikom označeno je razdoblje za kojeg dolazi do pomaka signala CCF. Isti pomak u signalu uočava se na svim postajama uparenim s RABC.

4.2 Metoda analize križnih-spektara kliznih prozora

(MWCS)

Kako bi se pratile sezonske varijacije 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 promjena brzina koje su proporcionalne s tim pomacima. Osnovna pretpostavka metode je homogenost promjena brzina unutar razmatranog područja, pa je dobivene rezultate potrebno uzeti s određenom dozom nepouzdanosti.

4.2.1 Određivanje vremenskog pomaka funkcija križne-korelacije (CCF)

Prvi korak pri određivanju pomaka u vremenu je da se višednevne i referentna CCF podijele na niz preklapajućih prozora. Pri tome se svaki prozor odnosi na jedno mjerenje pomaka u vremenu δt . Općenito će duljine prozora, njihovo preklapanje i ukupan broj ovisiti o karakteristikama CCF koje se analiziraju.

Svaki vremenski segment centrirana se oko svoje sredine i potom modificira korištenjem Hannove funkcije. Križni-spektar $X(\nu)$ između prozora vremenskog niza referentne i višednevne CCF određen je kao

$$X(\nu) = F_{ref}(\nu) \cdot F_{cur}^*(\nu) = |X(\nu)|e^{i\phi(\nu)}, \quad (6)$$

pri čemu su F_{ref} i F_{cur} pripadni Fourierovi transformi, a ν frekvencija u Hz. $|X(\nu)|$ predstavlja amplitudu, dok je $\phi(\nu)$ faza križnog-spektra. Kako bi se izračunao pomak u vremenu između višednevnog i referentnog signala, potrebno je da osim vremenskog pomaka, analizirani prozori dvaju signala budu slični. Sličnost prozora kvantitativno se procjenjuje pomoću križne-koherencije $C(\nu)$ pripadnih spektra gustoće

$$C(\nu) = \frac{|\overline{X(\nu)}|}{\sqrt{|F_{ref}|^2 \cdot |F_{cur}|^2}}. \quad (7)$$

U izrazu (7) ravne linije nad varijablama predstavljaju izgladivanje koje je postignuto primjenom kosinusnog filtera s poluširinom od 0.1 Hz. Križne-koherencije poprimaju vrijednosti između nula i jedan, 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

$$\phi_j = m \cdot \nu_j, \quad m = 2\pi\delta t. \quad (8)$$

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 (7) i amplitudi križnog-spektra, a definirani su kao

$$w_j = \sqrt{\frac{C_j^2}{1 - C_j^2}} \cdot \sqrt{|X_j|}. \quad (9)$$

Primjenom metode najmanjih kvadrata s težinama za nagib m dobije se

$$m = \frac{\sum_{j=l}^h w_j \phi_j \nu_j}{\sum_{j=l}^h w_j \nu_j^2}. \quad (10)$$

Pripadna pogreška nagiba e_m dana je s

$$e_m = \sqrt{\sum_{j=l}^h \left(\frac{w_j \nu_j}{\sum_i w_i \nu_i^2} \right)^2 \sigma_\phi^2}. \quad (11)$$

U izrazu (11) σ_ϕ^2 predstavlja kvadrat nepreklapanja $N = (h-l)$ vrijednosti i nagiba m , odnosno

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\sum_j (\phi_j - m\nu_j)^2}{N-1}. \quad (12)$$

Jednadžba (8) omogućuje određivanje pomaka u vremenu δt između referentne i višednevne CCF, te njegove pripadne pogreške $e_{\delta t}$:

$$\delta t = \frac{m}{2\pi}, \quad e_{\delta t} = \frac{e_m}{2\pi}. \quad (13)$$

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 promjena brzina

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

$$\frac{\delta t}{t} = -\frac{\delta v}{v}. \quad (14)$$

Primjenom linearne regresije na N_w mjerenja pomaka u vremenu dviju CCF danih izrazom (14), moguće je odrediti promjene seizmičkih brzina:

$$\delta t_i = a + bt_i, \quad i = 1, \dots, N_w. \quad (15)$$

Ovdje se koeficijent a odnosi na potencijalni instrumentalni drift (Stehly i sur., 2007), dok koeficijent b odgovara omjeru $-\delta v/v$. Koeficijenti a i b određuju se primjenom metode najmanjih kvadrata s težinama p_i . Težine p_i definirane su 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

$$a = \langle \delta t \rangle - b \langle t \rangle, \quad b = \frac{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle) \delta t_i}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad (16)$$

pri čemu $\langle t \rangle = \sum p_i t_i / \sum p_i$, $\langle \delta t \rangle = \sum p_i \delta t_i / \sum p_i$. Pripadni kvadrati pogreška koeficijenata a i b su redom:

$$e_a^2 = \frac{\langle t^2 \rangle}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad e_b^2 = \frac{1}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad (17)$$

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

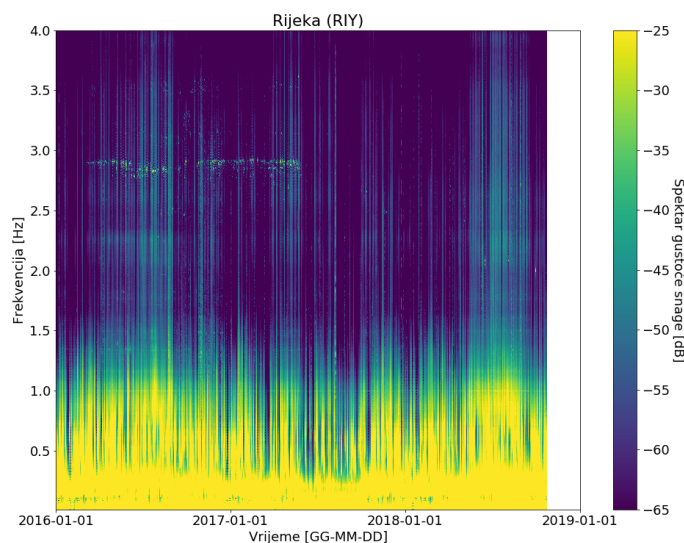
$$\delta v/v = -\frac{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle) \delta t_i}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}, \quad e_{\delta v/v}^2 = \frac{1}{\sum_i p_i (t_i - \langle t \rangle)^2}. \quad (18)$$

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

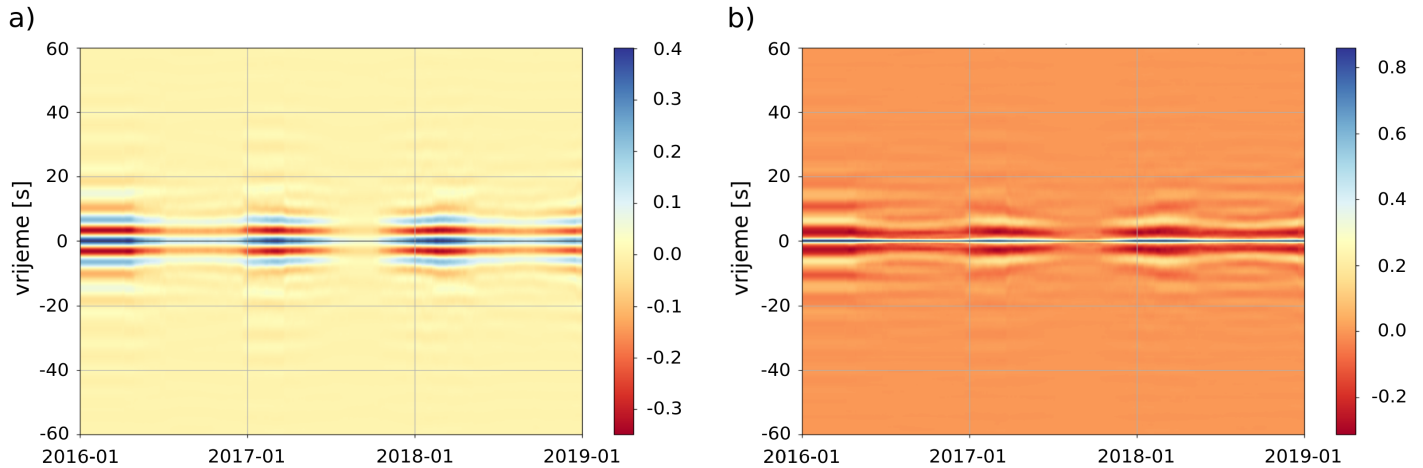
5.1 Analiza čitavog skupa podataka za različite frekventne raspone

MWCS metoda primijenjena je na četiri hrvatske (BRJN, NVLJ, RIY i SMRN) i tri slovenske postaje (GBRS, KNDS i SKDS). Kako bi se razmotrila ovisnost $\delta v/v$ 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. mikrosezmički maksimum (engl. *microseismic peak*, Stehly i sur., 2006). Točnije, ovakvim frekventnim rasponom obuhvaćena je većina mikrosezmičke aktivnosti koja se unutar razmatranog područja može primijetiti do 1 Hz (primjer spektra gustoće snage ACF koji pokazuje mikrosezmičku aktivnost dan je na slici 6).



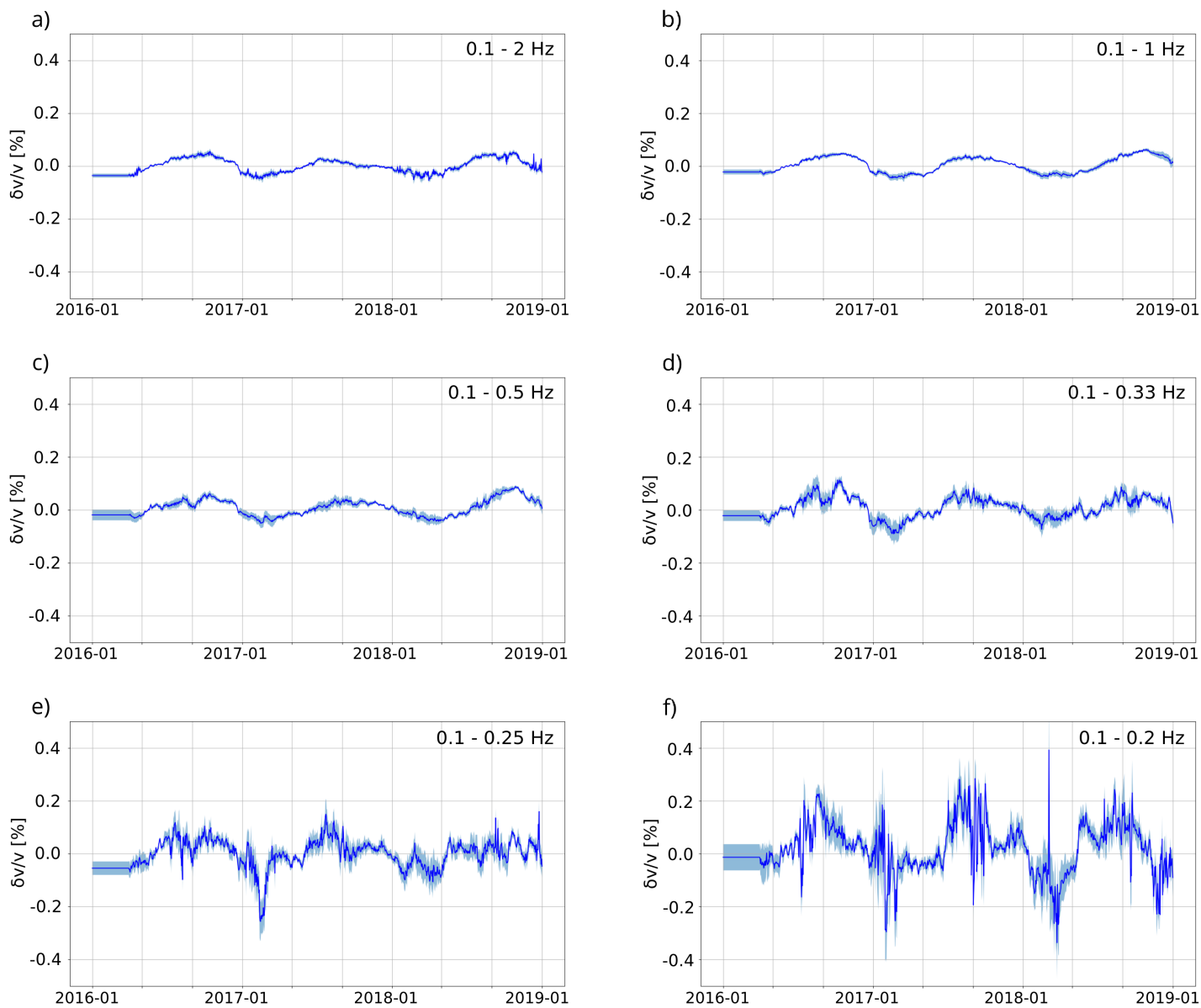
Slika 6: Spektar gustoće snage jednodnevnih autokorelacijskih funkcija postaje RIY u ovisnosti o frekvenciji za trogodišnje razdoblje.

Korišteni su sljedeći frekventni rasponi: 0.1 - 2, 0.1 - 1, 0.1 - 0.5, 0.1 - 0.33, 0.1 - 0.25 i 0.1 - 0.2 Hz. 90-dnevne autokorelacijske funkcije ZZ komponenti postaje RIY za dva različita frekventna raspona prikazane su na slici 7. Već se sada mogu uočiti sezonske promjene u amplitudama - maksimumi signala u 3. i minimumi u 9. mjesecu.



Slika 7: Interferogrami 90-dnevnih autokorelacijskih funkcija postaje RIY za frekventni raspon 0.1 - 0.2 Hz (a) i 0.1 - 2 Hz (b).

Od svih križnih-faza korištenih u linearnoj regresiji, uzete su samo one čija je $C(\nu) \geq 0.65$. Po uzoru na Meier i sur. (2010) analizirani su prozori širine $L = 5 \cdot T_{max} = 50$ s (T_{max} odgovara gornjoj granici raspona perioda korištenih u analizi) uz preklapanje od 10 s. Na slici 8, u postocima su prikazane usrednjene krivulje $\delta v/v$ svih parova postaja i njihove pripadne pogreške dobivene za šest različitih frekventnih raspona. Kako su višednevne CCF dobivene sjedinjavanjem 90-dnevnog niza, prva vrijednost $\delta v/v$ koja se može izračunati upravo se odnosi na devedeseti dan. Dakle, varijacije brzina prethodnih 90 dana se ne mogu odrediti, pa su njihove vrijednosti izjednačene s prvim postojećim iznosom.

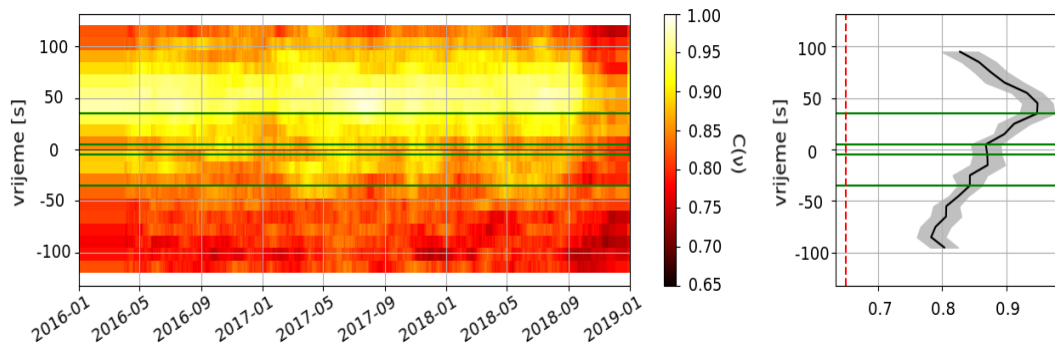


Slika 8: Usrednjene vrijednosti $\delta v/v$ (tamnije plave linije) i njihova odstupanja (svijetlo plava naznačena područja) dobivene za frekventni raspon: a) 0.1 - 2 Hz, b) 0.1 - 1 Hz, c) 0.1 - 0.5 Hz, d) 0.1 - 0.33 Hz, e) 0.1 - 0.25 Hz i f) 0.1 - 0.2 Hz. Iste, ali uvećane slike nalaze se u Dodatku.

Generalno gledano, za svaki frekventni raspon koji je korišten u analizi moguće je uočiti sezonske promjene seizmičkih brzina. Amplitude varijacija veće su za poja-seve manjih frekvencija: reda veličine oko $\pm 0.3\%$ za raspon 0.1 - 0.2 Hz, $\pm 0.25\%$ za 0.1 - 0.25 Hz, $\pm 0.1\%$ za 0.1 - 0.33 Hz, te $\pm 0.05\%$ u preostala tri slučaja. Maksimumi se postižu u devetom, a minimumi u trećem mjesecu. Međutim, za manje intervale frekvencija korištenih u MWCS metodi (naročito 0.1 - 0.25 i 0.1 - 0.2 Hz), sezonski oblik više nije toliko jasan - promjene varijacija brzina su izraženije, lokalni ekstremi učestaliji, a standardne devijacije veće. Rast standardnih devijacija može se pripisati povećanju nestabilnosti signala korištenih u analizi za frekvencije ispod 1 Hz (Hadziioannou i sur., 2009). Kako bi se utvrdila stabilnost rezultata promotrene su koherencije signala svih parova postaja za svaki raspon frekvencija korišten u analizi. Ponajprije, bez obzira na frekventni raspon, uočeno je da signal koji dolazi iz smjera Atlantskog oceana i Jadranskog mora ima veću koherenciju nego signal koji putuje iz suprotnog smjera (slika 9). Drugim riječima, signal koji putuje iz unutrašnjosti prema moru je slabiji (iznosi $C(\nu)$ su manji) jer se njegovi primarni izvori nalaze na većim udaljenostima.

Što se tiče vrijednosti $C(\nu)$ u ovisnosti o korištenom frekventnom rasponu, primijećeno je da se najstabilniji signali (s najvećim koherencijama) javljaju za raspone 0.1 - 2, 0.1 - 1 i 0.1 - 0.5 Hz. Za raspon 0.1 - 0.33 Hz vrijednosti $C(\nu)$ također su vrlo visoke i stoga je moguće uočiti sezonske promjene brzina. Signali koji obuhvaćaju periode između 4 - 10 s (0.1 - 0.25 Hz) i 5 - 10 s (0.1 - 0.2 Hz) općenito imaju manje vrijednosti $C(\nu)$, pa pripadne krivulje varijacija brzina više ne poprimaju oblik s jasnim sezonskim izmjenama ekstremnih vrijednosti. Dakle, stabilnost rezultata, a samim time i mogućnost uočavanja sezonskih varijacija, određena je iznosom $C(\nu)$.

Osim koherencije signala bitnu ulogu pri računanju imat će i drugi faktori. Prvi od njih je činjenica da su u analizi obuhvaćena dva različita područja. Također,



Slika 9: Vrijednosti $C(\nu)$ trogodišnjeg razdoblja (lijevo) i pripadna prosječna vrijednost $C(\nu)$ s odstupanjima (sivo naznačena područja, desno) za par postaja BRJN–GBRS. Zelene linije odnose se na vremenske intervale korištene pri računanju $\delta t/t$, a crvena crtkana linija na minimalnu koherenciju koja se uzima u obzir.

razmatrani parovi postaja nalaze se na različitim udaljenostima (od 20 do 130 km) i za svaku pojedinačnu postaju azimutalna pokrivenost je drugačija. Svi navedeni razlozi mogu doprinositi nestabilnosti konačnog rezultata određenog frekventnog raspona (u ovome slučaju, za raspone 0.1 - 0.25 i 0.1 - 0.2 Hz), pa je poželjno provesti i pripadne analize. U ovome je radu promotreno kako udaljenosti parova postaja utječu na konačni rezultat. Preostale dvije analize nisu provedene jer je broj korištenih postaja nedovoljan da bi se dobili adekvatni i smisleni rezultati.

5.2 Ovisnost promjena brzina o udaljenosti parova postaja

Kako bi se promotrla ovisnost promjena brzina o udaljenosti parova postaja, sedam korištenih postaja podijeljeno je u dvije skupine:

1. BRJN (Brijuni), NVLJ (Novalja), RIY (Rijeka) i SMRN (Sveta Marina);
2. GBRS (Gornja Briga), KNDS (Knežji Dol), RIY (Rijeka) i SKDS (Skadanišćina).

Tablica 2: Prva skupina postaja i iznosi križnih-koherencija između parova postaja.

$C_{min}(\nu)$	BRJN	NVLJ	RIY	SMRN
BRJN	0.83	0.78	0.78	0.79
NVLJ	0.78	0.80	0.80	0.77
RIY	0.78	0.80	0.82	0.77
SMRN	0.79	0.77	0.77	0.83

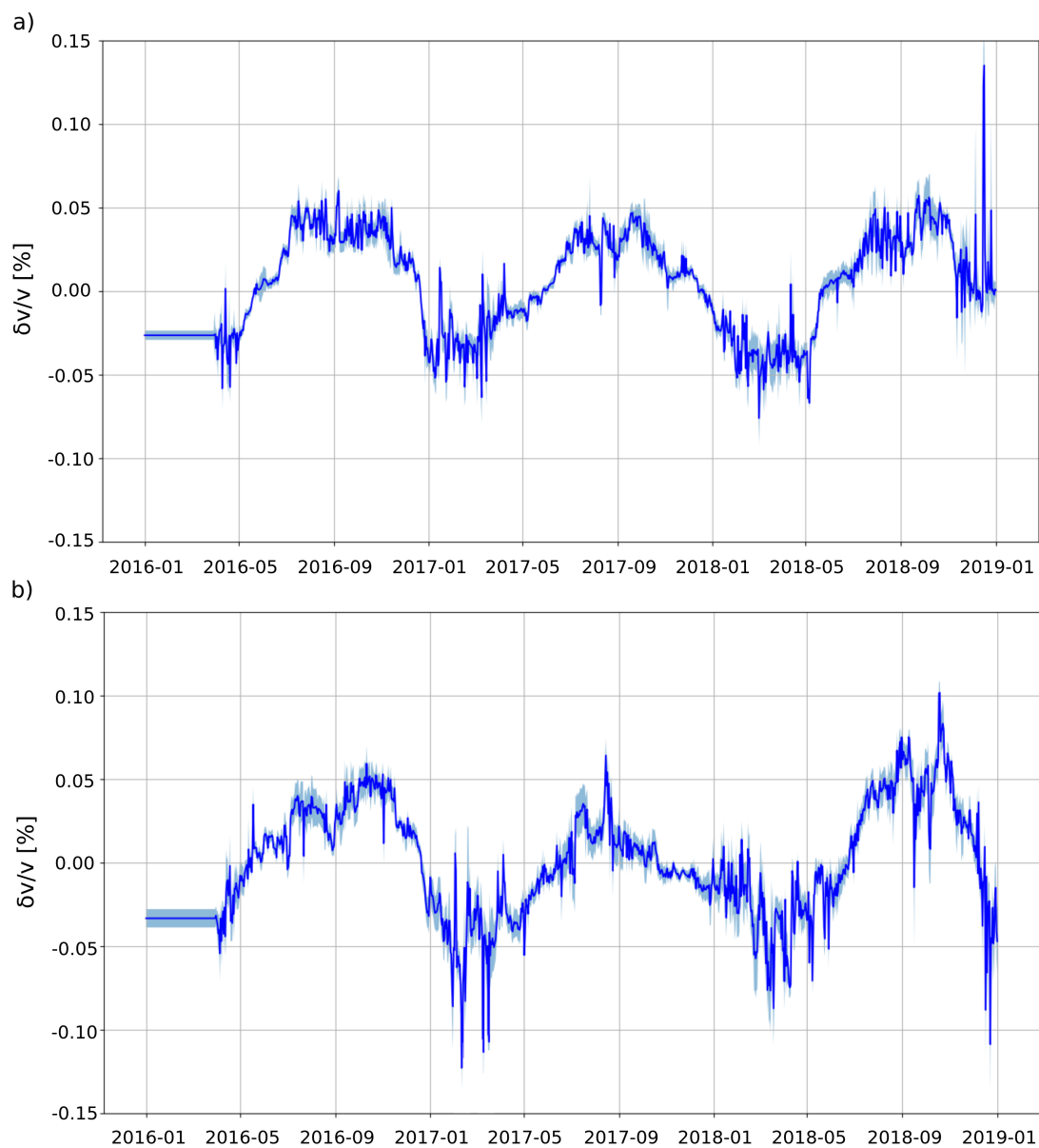
Tablica 3: Druga skupina postaja i iznosi križnih-koherencija između parova postaja.

$C_{min}(\nu)$	GBRS	KNDS	RIY	SKDS
GBRS	0.77	0.82	0.79	0.80
KNDS	0.82	0.79	0.81	0.79
RIY	0.79	0.81	0.82	0.81
SKDS	0.80	0.79	0.81	0.79

Udaljenosti postaja prve skupine kreću se između 40 i 100 km, a druge između 20 i 60 km. Nadalje, postaje su podijeljene na način tako da razdvajaju dvije geografske cjeline korištene u kasnijoj analizi ovoga rada.

Analiza je provedena u frekventnom rasponu od 0.1 do 2 Hz za 90 dnevne ACF i CCF parova postaja. Za računanje ACF i CCF ponovno su korištene samo vertikalne (ZZ) komponente seizmograma. U MWCS metodi analizirani su prozori duljine 50 s uz preklapanje od 10 s i minimalnu vrijednost $C(\nu) = 0.65$. Na slici 10 prikazane su dobivene promjene brzina i pripadne pogreške prve (a) i druge (b) grupe postaja.

U tablicama 2 i 3 prikazane su minimalne križne-koherencije dobivene prilikom analize kojima se kvantitativno procjenjuje sličnost signala referentne i višednevnih CCF. Generalno nema velikih razlika između $C_{min}(\nu)$ postaja prve i druge skupine, pa se može smatrati da je u oba slučaja analiziran otprilike jednak broj CCF. Razlike u broju višednevnih CCF rezultat su nedostatka podataka duž nekih razdoblja. Ovo je ujedno i razlog zašto se na slici 10 (a) krajem 2018. godine javlja nagli skok vrijednosti $\delta v/v$. Naime, krajem 2018. godine, jedino je stanica BRJN imala podatke (slika 3). Dobivene vrijednosti $\delta v/v$ tog razdoblja rezultat su jedino autokorelacijskih funkcija postaje BRJN, pa je i za očekivati da će značajno odstupati od preostalih vrijednosti.



Slika 10: Usrednjene vrijednosti $\delta v/v$ (tamnije plave linije) i njihova odstupanja (svijetlo plava naznačena područja) dobivene u frekventnom rasponu 0.1 - 2 Hz za: a) prvu grupu (udaljenosti 40 - 100 km) i b) drugu grupu (udaljenosti 20 - 60 km) 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 $\pm 0.05\%$. Kod druge skupine postaja, maksimumi koji se javljaju u 9. mjesecu dosežu vrijednosti od 0.05% , ali su zato minimumi izraženiji i popraćeni naglim padovima vrijednosti preko -0.10% . Veći broj šiljaka, te nazubljenost $\delta v/v$ krivulje također je izraženija u slučaju druge skupine postaja. Ovo je najvjerojatnije direktna posljedica geografske različitosti obuhvaćenih područja. Naime, potencijalni uzročnici sezonskog karaktera $\delta v/v$ krivulje (koji su navedeni u idućem poglavlju ovoga rada) mogu se značajno razlikovati ovisno o geografskom položaju. Te varijacije odražavat će se na promjenama brzina, pa je i za očekivati da će postojati razlike između $\delta v/v$ grafova.

U drugim istraživanjima uočeno je kako za veće udaljenosti postaja više nije moguće dobiti jasne sezonske promjene seizmičkih brzina. Meier i sur. (2010) u svome radu razmatraju 861 parova postaja na području Los Angelesa koje grupiraju po udaljenostima 0 - 20, 20 - 40, 40 - 60, 60 - 80, 80 - 100 i >100 km. Zaključuju da je sezonske promjene brzina moguće dobiti samo za parove postaja čije su udaljenosti do 60 km. Na većim udaljenostima promjene se ne primjećuju i to pripisuju atenuaciji te nedostatku koherentnih faza signala potrebnih za takvu 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 trogodišnjom 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.

5.3 Interpretacija sezonskih promjena brzina

Dobivene sezonske promjene seizmičkih brzina općenito mogu odražavati promjene svojstava sredstva razmatranog područja ili izvora koji generiraju nemir. Na promjene u svojstvima sredstva mogu utjecati razni čimbenici, ponajprije temperatura zraka, količina oborine, te razina podzemne vode ili mora. Od svih navedenih faktora, u mnogim se istraživanjima (npr. Hillers i sur., 2015; Wang i sur., 2017) kao glavni uzročnik promjena $\delta v/v$ navodi promjena temperature zraka. Promjene temperature zraka, osim što izmjenjuju svojstva najgornjeg dijela kore, mogu inducirati varijacije termoelastičnih napetosti do dubina 15 - 22 km (Berger, 1975). Sezonske varijacije termoelastičnih napetosti direktno utječu na vrijednosti seizmičkih brzina, pa je stoga za očekivati da će i njihov godišnji hod biti periodičan. Preostali hidrološki čimbenici uglavnom dodatno produbljuju ili umanjuju sezonske izmjene ekstremnih vrijednosti $\delta v/v$. Tako će npr. povećana količina oborine ili razina podzemne vode umanjiti vrijednosti seizmičkih brzina. Promjene razine mora također su korelirane s promjenama $\delta v/v$ (Wang i sur., 2017), dok drugi meteorološki faktori, kao što su tlak zraka i brzina vjetra, uglavnom nisu (Hillers i sur., 2015).

Dakle, sezonski karakter vrijednosti $\delta v/v$ rezultat je superpozicije mnogobrojnih čimbenika. Uklanjanjem i korigiranjem navedenog karaktera, moglo bi se omogućiti praćenje vrlo malih promjena mehaničkih svojstava kore direktno povezanih s tektonikom razmatranog 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.

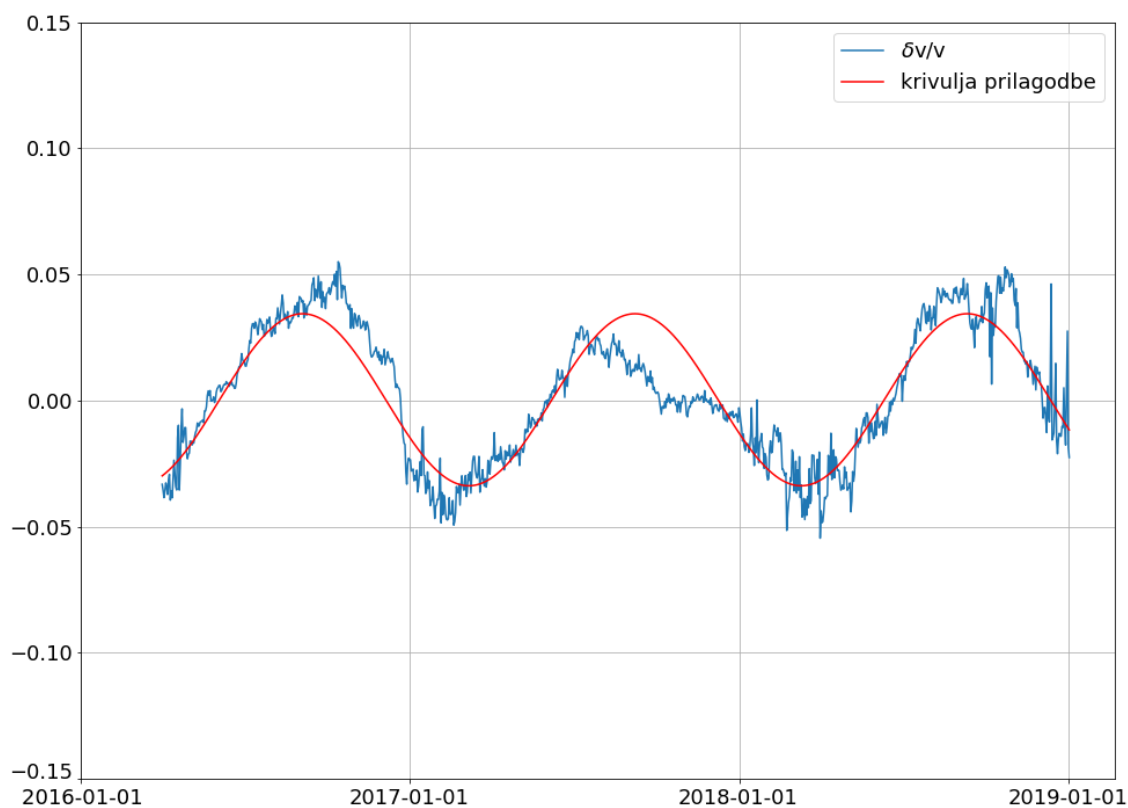
5.4 Modeliranje sezonskih promjena brzina

Kako bi se uklonio sezonski oblik promjena brzina, definirana je funkcija $f(x)$ trigonometrijskog oblika s četiri parametra koji najbolje opisuju dobivene rezultate:

$$f(x) = a \cdot \cos(b \cdot x + c) + d \quad (19)$$

Ovdje bi parametar a predstavljao amplitudu, b period, c horizontalni, a d vertikalni pomak funkcije $f(x)$. Modeliranje je najprije napravljeno za $\delta v/v$ krivulju koja se odnosi na sve parove postaja čitavog područja i frekventni raspon 0.1 - 2 Hz za koji se zna da daje vrlo stabilne rezultate (slika 11).

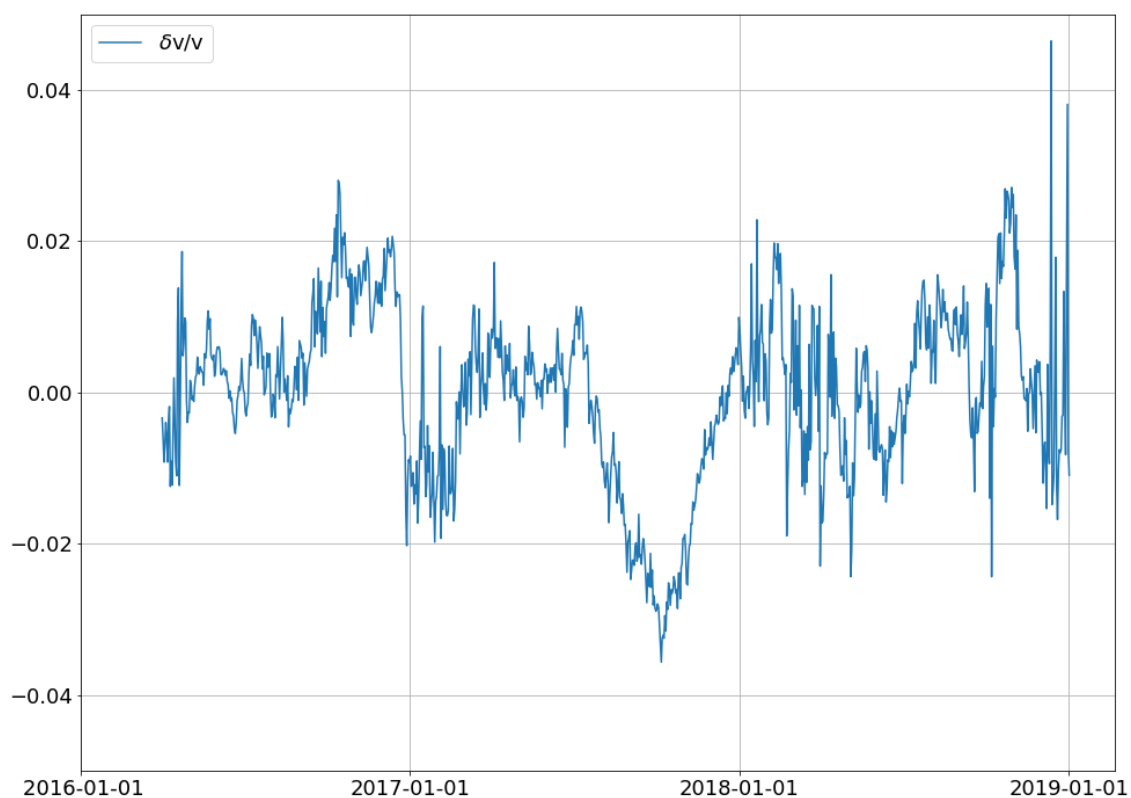
Za parametre je dobiveno: $a = -0.034115$, $b = 0.017048$, $c = 0.486001$ i $d = 0.000289$. Krivulja prilagodbe pretpostavlja varijacije brzine reda otprilike $\pm 0.03\%$. Uz očekivana odstupanja na manjoj vremenskoj skali, od ove amplitude ponajviše odskaču ekstremne vrijednosti. Osim potencijalnih 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 godine. 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 368 dana. Preostala dva parametra, c i d u ovakvome 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 su im ekstremne vrijednosti simetrično položene u odnosu na horizontalu.



Slika 11: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na čitavo analizirano područje i frekventni raspon 0.1 - 2 Hz.

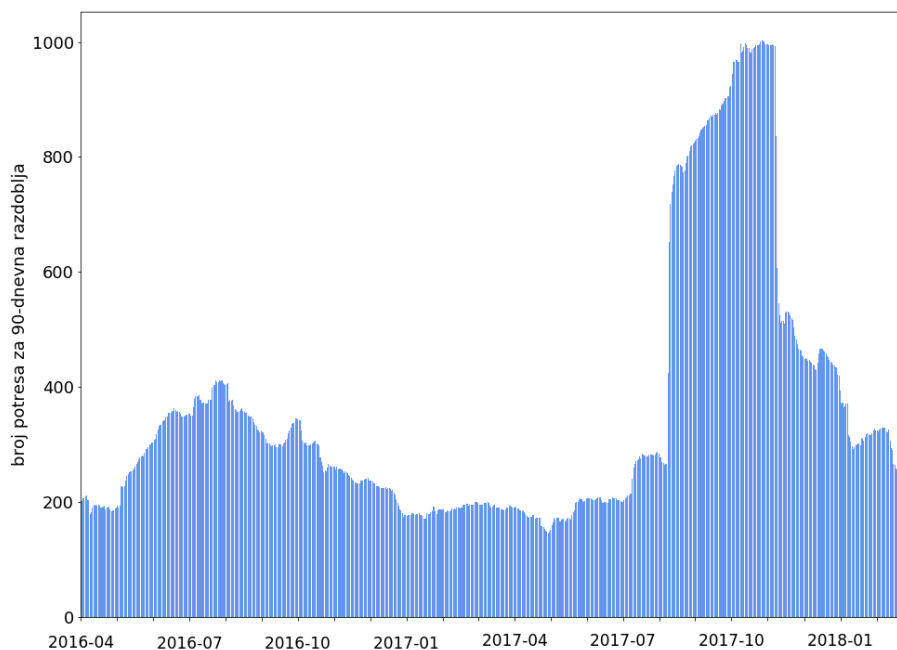
Kako bi se uklonio sezonski oblik krivulje $\delta v/v$, od nje je oduzeta ranije dobivena krivulja prilagodbe (slika 12). Nova, modificirana krivulja $\delta v/v$ više ne iskazuje jednogodišnju periodičnost. Amplitude su manje u odnosu na prvotne, ali istog reda veličine. Od ekstrema se ponajviše ističu nagli pad brzine krajem 2016./početkom 2017. godine te postupno smanjenje brzine od lipnja do kraja rujna 2017. Odstupanje maksimuma 2016. godine sa slike 11 sada se iskazuje kao porast $\delta v/v$.

Kao što je ranije navedeno, ovakva odstupanja mogu imati vrlo različite uzročnike, pa je potrebno provesti dodatnu analizu kojim bi se utvrdilo njihovo porijeklo. Iz tog je razloga promotren Hrvatski katalog potresa, točnije broj potresa koji se dogodio na području naznačenom na slici 5 u Dodatku u razdoblju između travnja 2016. i veljače 2018. godine. Pripadna tablica s koordinatama tog područja (tablica 1), te stupićasti dijagrami broja potresa 2016. i 2017. godine prikazani su na slikama 6 i 7 koje se također nalaze u Dodatku.



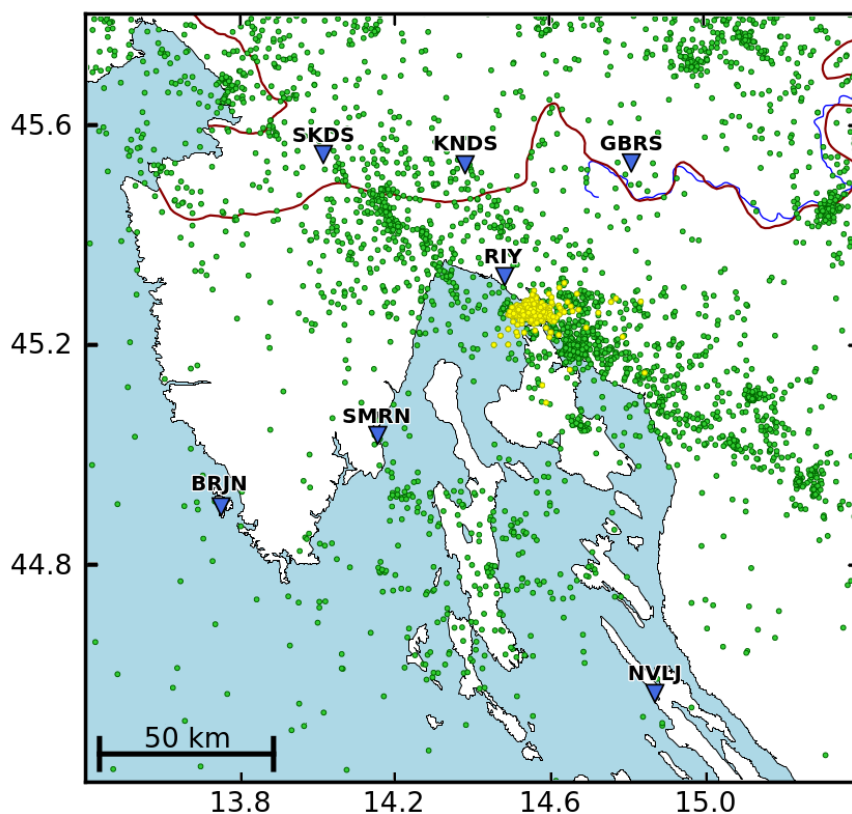
Slika 12: Modificirana $\delta v/v$ krivulja koja se odnosi na čitavo analizirano područje i frekventni raspon 0.1 - 2 Hz.

S obzirom na to da su u MWCS metodi s referentnom uspoređivane višednevne CCF 90-dnevnog niza, na sličan je način određen broj potresa svakog dana. Točnije, za svaki je dan zbrojen ukupan broj potresa koji se dogodio unazad devedeset dana. Dobiveni dijagram broja potresa za 90-dnevna razdoblja nalazi se na slici 13, a epicentri potresa prikazani su na slici 14.



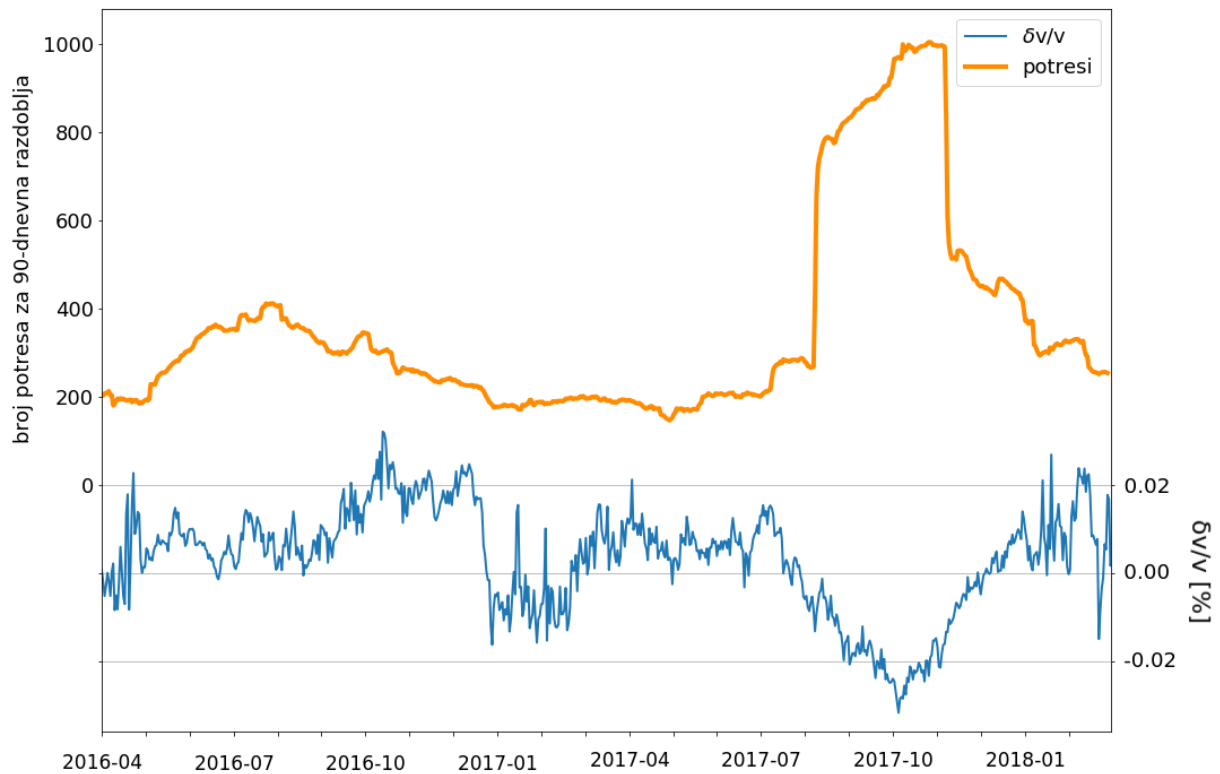
Slika 13: Stupićasti dijagram broja potresa za 90-dnevna razdoblja.

Usporedi li se razdioba potresa s modificiranom $\delta v/v$ krivuljom (slika 15), moguće je uočiti korelaciju između povećanog broja potresa u kolovozu 2017. godine i smanjena brzine. Točnije, smanjenje brzine reda 0.04% započinje otprilike mjesec dana prije serije potresa koja se dogodila u kolovozu 2017. 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.



Slika 14: Epicentri potresa unutar razmatranog područja u razdoblju od 2016. do 2018. godine (zeleni kružići). Žutom bojom označeni su epicentri serije potresa koja se dogodila u kolovozu 2017. Plavi trokuti predstavljaju seizmološke postaje korištene u analizi.

Općenito će i pojedinačni, ali snažni potresi (uglavnom magnitude $M_w \geq 5.5$) uzrokovati nagli pad vrijednosti seizmičke brzine. Na slici 15 takav nagli pad može se uočiti krajem 2016. godine. Međutim, kako na razmatranom području u to doba nije bilo značajnijih potresa, ovaj pad brzine vjerojatno je posljedica jednostavnosti modela ili nekog drugog procesa koji nije uzet u obzir.



Slika 15: Krivulja koja opisuje broj potresa 90-dnevnih razdoblja i modificirani $\delta v/v$ graf čitavog skupa podataka.

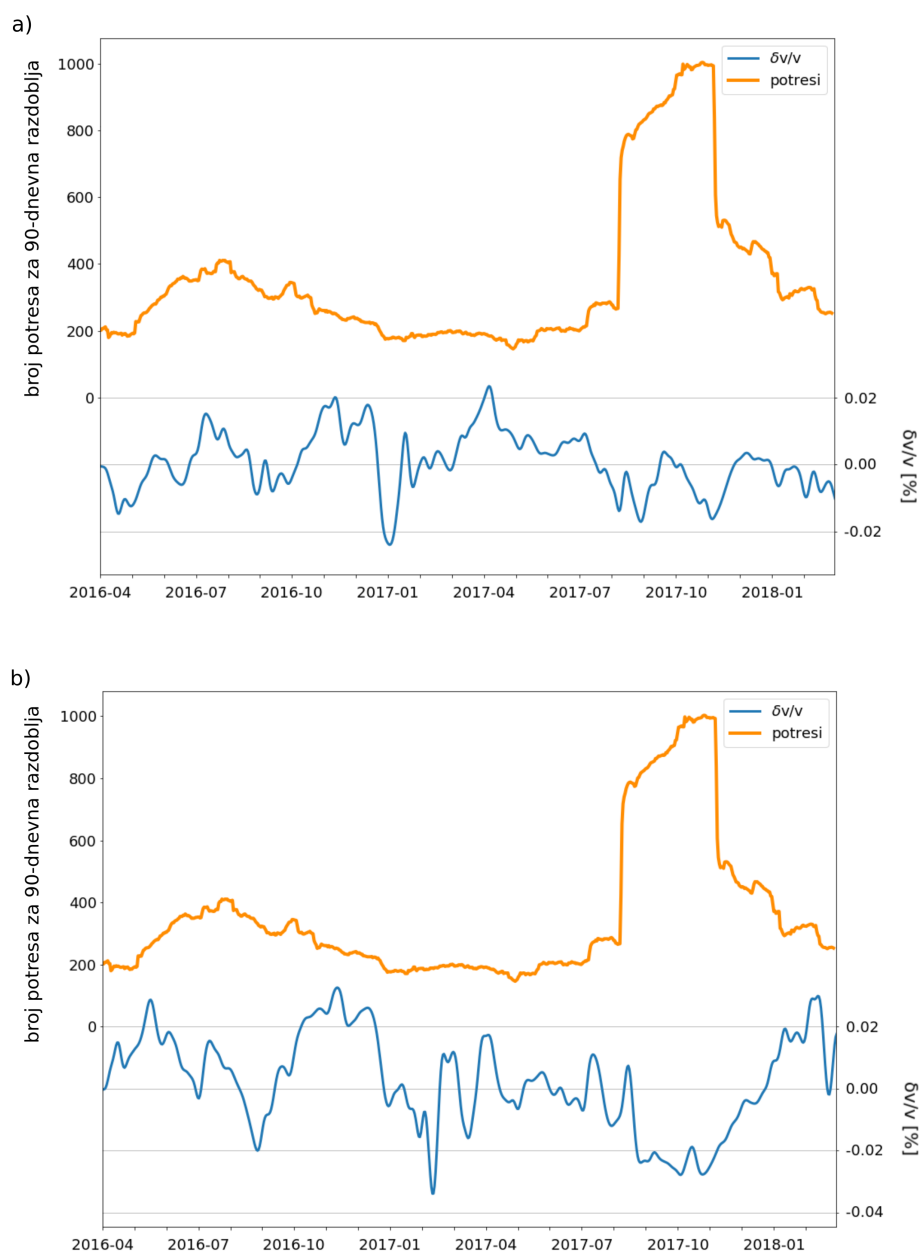
Kako bi se potvrdila korelacija između postupnog smanjenja brzine prije serije potresa u kolovozu 2017. godine, modificirane su i na isti način s brojem potresa uspoređene $\delta v/v$ krivulje frekventnog raspona 0.1 - 2 Hz dviju skupina postaja. Kao i u ranijoj analizi, prvu skupinu čine stanice BRJN, NVLJ, RIY i SMRN, a drugu postaje GBRS, KNDS, RIY i SKDS. Na ovaj način, odvojene su dvije geografske cjeline koje prekrivaju područje na kojem se nalaze epicentri serije potresa iz 2017. godine. Točnije, postaje prve skupine obuhvaćaju šire područje nego postaje druge skupine, ali su zato uglavnom i udaljenije (sve osim RIY) od epicentralne zone od interesa.

Krivulje prilagodbe, vrijednosti parametara i modificirani $\delta v/v$ grafovi prikazani su u tablici 2, te na slikama 8 - 10 koje se nalaze u Dodatku. Na slici 16 zajedno su prikazane modificirane $\delta v/v$ krivulje i broj potresa 90-dnevnih razdoblja prve skupine (a) i druge skupine (b) postaja.

Ponovno se uočava postupni pad brzine od oko 0.04% prije serije potresa koja se dogodila tijekom kolovoza 2017. godine. Nagli pad početkom iste godine također je prisutan na oba grafa, ali on je najvjerojatnije posljedica nekih drugih faktora koji utječu na oblik krivulje $\delta v/v$.

Na slici 16 (b) se može još uočiti i smanjenje brzine povezano s razdobljem povećane seizmičke aktivnosti od svibnja do rujna 2016. godine. Ova korelacija se ne uočava tako jasno na drugim grafovima jer su udaljenosti parova postaja i geografska pokrivenost područja različita. Drugim riječima, s obzirom na to da su udaljenosti parova postaja 2. skupine manje, dobivena $\delta v/v$ krivulja bolje odražava prave promjene sredstva obuhvaćenog područja. Također, ove se postaje bolje slažu s područjem unutar kojeg su izdvajani potresi, pa je za očekivati da će se moći uočiti povezanost povećane seizmičke aktivnosti i promjena brzina.

Dakle, oduzimanjem signala sezonskih promjena s prvotnih krivulja $\delta v/v$, omogućeno je praćenje manjih promjena mehaničkih svojstava kore uglavnom povezanih s tektonikom razmatranog područja. Naravno, dodatna modeliranja su potrebna kako bi se dobili pouzdaniji rezultati. Također, korištenjem većeg broja postaja koje se nalaze na manjim udaljenostima, analizom preostalih komponenti seizmograma te promjenom parametara korištenih u MWCS metodi (ponajprije minimalne $C(\nu)$) vjerojatno bi se dobile puno stabilnije $\delta v/v$ krivulje koje bi nakon modeliranja bile još bolje povezane sa seizmotektonskim uzrocima promjene $\delta v/v$.



Slika 16: Krivulja koja opisuje broj potresa 90-dnevnih razdoblja i modificirani izgladeni $\delta v/v$ graf: a) postaja BRJN, NVLJ, RIY i SMRN; b) GBRS, KNDS, RIY i SKDS.

6 Zaključci

Kako bi se promotriale promjene seizmičkih brzina na širem području Kvarnera i Istre, primijenjena je MWCS metoda 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. MWCS metoda primijenjena je na trogodišnje zapise (2016. - 2019.) vertikalnih komponenti seizmograma i ukupno 7 postaja: BRJN, NVLJ, GBRS, KNDS, RIY, SKDS i SMRN. Metoda je provedena i na postaji RABC, ali s obzirom na to da je kod nje primijećen neuobičajen skok u signalu, odbačena je u daljnjim analizama. Analiza je provedena u 6 frekventnih raspona (0.1 - 2, 0.1 - 1, 0.1 - 0.5, 0.1 - 0.33, 0.1 - 0.25 i 0.1 - 0.2 Hz) i za sve parove postaja. Uočeno je da se smanjivanjem raspona frekvencija gubi jasan sezonski oblik što se objašnjava nedostatkom koherentnih signala i nekim drugim faktorima. Jedan od njih je udaljenost između parova postaja, pa je iz tog razloga provedena dodatna analiza koja provjerava tu ovisnost. Primijećeno je da za zadane parametre korištene u MWCS metodi, udaljenosti parova postaja nisu glavni uzročnik nedostatka sezonske periodičnosti. Smatra se da dobivene sezonske varijacije 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 $\delta v/v$ potom su uspoređene s brojem potresa koji su se dogodili na području od interesa. Uočen je postupni pad brzina (reda 0.04%) prije serije potresa koja je nastupila u kolovozu 2017. Korelacija između povećane seizmičke aktivnosti i smanjenja brzina potencijalno se može uočiti i u razdoblju od svibnja do rujna 2016. Da bi se to sa sigurnošću i potvrdilo, potrebno je definirati općenitiji model koji uključuje direktne uzročnike sezonskih promjena brzina.

Zahvale

Prvenstveno zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Josipu Stipčeviću na pruženoj prilici, poticaju na samostalni rad i spremnosti da pronađe vremena unatoč svim svojim obvezama. Također, zahvaljujem doc. dr. sc. Ivi Dasović na pomoći i savjetima koje je uputila za izradu ovoga rada.

Zahvaljujem Mladenu Živčiću iz *Agencije Republike Slovenije za okolje* na ustupljenim podacima sa seizmoloških postaja Gornja Briga, Knežji Dol i Skadanščina.

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), 'Postseismic 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.
- 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., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S. i Sović, I. (2011), 'Republika Hrvatska, Karta potresnih područja '. <http://seizkarta.gfz.hr/> (pristupljeno 10. veljače 2019).
- Herak, M., Živčić, M., Sović, I., Cević, 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.
- 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.
- 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.
- 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.

Sažetak

U brojnim istraživanjima pokazano je da se Greenova funkcija, koja opisuje odziv sredstva, može dobiti pomoću analize funkcija križne-korelacije (CCF) seizmičkog nemira zabilježenog na mreži seizmoloških postaja. Ovime se omogućuje praćenje promjena elastičkih svojstava sredstva tijekom vremena, ponajprije promjena seizmičkih brzina.

U ovome radu, kako bi se navedene promjene mogle pratiti, korištena je metoda analize križnih-spektara kliznih prozora (engl. *Moving Window Cross-Spectral Analysis*; MWCS) od Clarke i sur. (2011). MWCS metoda provodi se u frekventnoj domeni čime se omogućuje jasno definiranje granica koherentnog signala koji se koristi pri procjeni varijacija brzina. Metoda se bazira na usporedbi referentne i višednevne CCF dobivene usrednjavanjem redom dužeg i kraćeg vremenskog razdoblja od interesa. Varijacije brzina procjenjuju se na temelju vremenskih pomaka δt_i dviju CCF koji se određuju pomoću križnih-spektara razmatranih vremenskih segmenata u frekventnome rasponu od interesa. Osnovna pretpostavka metode je prostorna homogenost $\delta v/v$ koja se manifestira kao razvlačenje višednevne u odnosu na referentnu CCF ($\delta v/v = -\delta t/t$).

Kako bi se pratile varijacije brzina na širem području Kvarnera i Istre, u ovome su radu analizirani trogodišnji (2016. - 2019.) zapisi seizmičkog nemira vertikalnih komponenti seizmograma zabilježenih na ukupno osam postaja (pet hrvatskih: BRJN, NVLJ, RABC, RIY i SMRN; te tri slovenske: GBRS, KNDS, SKDS). Usprkos vrlo različitoj raspodjeli seizmičnosti, u nijednoj od ove dvije regije tijekom promatranog perioda nije zabilježen jači potres ($M_w \geq 5.5$) koji bi mogao uzrokovati promjenu elastičkih svojstava. Stoga je glavni cilj ovoga rada bio pratiti sezonske varijacije istih. U tu su svrhu izračunate CCF i ACF za razne frekventne raspone između 0.1 i 2 Hz. Referentna CCF dobivena je sjedinjavanjem čitavog

trogodišnjeg niza jednodnevnih funkcija, a višednevne CCF definirane su za 90-dnevna razdoblja. Kako su interferogrami postaja uparenih sa stanicom RABC iskazivali nagle pomake u vremenu zbog kvara na GPS prijemniku, navedena postaja uklonjena je iz daljnjih analiza.

Za čitavo područje i sve parove postaja, dobiveni $\delta v/v$ grafovi iskazuju jasne sezonske izmjene minimalnih vrijednosti tijekom ljeta i maksimuma tijekom zime. Uočeno je kako se smanjivanjem širine frekventnog raspona gubi sezonski oblik krivulje. Ovo se objašnjava nedostatkom koherentnih faza koje se koriste u MWCS metodi, ali i nekih drugih faktora kao što su azimutalna pokrivenost, geografska različitost područja i udaljenost između parova postaja. Iz tog je razloga provedena dodatna analiza kojom se htjelo utvrditi da udaljenosti između parova postaja nisu dominantan uzročnik nestabilnosti sezonskog oblika kod užih frekventnih raspona. Sezonske varijacije imaju uzročnike različitog porijekla i da bi se u potpunosti moglo reći koji je od njih najznačajniji, potrebna je detaljnija analiza. Bez obzira na to, provedena je jednostavna korekcija sezonskog oblika krivulja $\delta v/v$ koja ne uzima u obzir nijedan od potencijalnih uzročnika takvog karaktera, a opet generalno omogućuje praćenje vrlo malih promjena mehaničkih svojstava čisto tektonskog porijekla. Da bi se ustanovilo postoji li korelacija između povećane seizmičke aktivnosti i smanjenja brzine, modificirane $\delta v/v$ krivulje uspoređene su s brojem potresa koji su se dogodili na području od interesa. Korelacija je primijećena za razdoblje koje je prethodilo seriji potresa u kolovozu 2017. Daljnje modeliranje i detaljnija analiza potrebna su za sigurnije utvrđivanje postoji li veza između povećane seizmičke aktivnosti i smanjenja brzina razmatranog područja.

Ključne riječi: određivanje Greenove funkcije, MWCS metoda, seizmički nemir, sezonske promjene seizmičkih brzina, korekcija sezonskog oblika

Summary

Seismic velocity variation in the wider Kvarner area determined from ambient noise analysis

Helena Latečki

It has been shown that the surface wave Green's function can be extracted by cross-correlating or autocorrelating ambient seismic noise recorded at one or more seismic stations. This allows for estimation of time variation of elastic properties, such as seismic velocity changes $\delta v/v$.

In this study, to monitor such changes, the Moving Window Cross-Spectral Analysis (MWCS) by Clarke et. al. (2011) is employed. MWCS method operates in the frequency domain which allows for a clear definition of coherent signal bandwidth in the correlation functions. It uses two waveforms, the reference and the current cross-correlation functions (CCFs), obtained by averaging daily CCFs over a longer and respectively shorter period of time. Seismic velocity variations in the medium are estimated from the time delays δt_i between the two CCFs. The time delays are calculated using the cross-spectrum of the windowed wavefront segments in the frequency domain of interest. Basic assumptions of MWCS method are homogeneity of $\delta v/v$ and its manifestation as a stretching of the current CCF relative to the reference function ($\delta v/v = -\delta t/t$).

In order to measure velocity variations within the wider Kvarner region and Istria, three years (2016. - 2019.) of vertical component recorded on eight stations (five Croatian: BRJN, NVLJ, RABC, RIY and SMRN; and three Slovenian: GBRS, KNDS and SKDS) were analyzed. Although these two regions have different seismic activity levels, neither of them experienced strong earthquakes ($M_w \geq 5.5$) during the analyzed period which could induce a significant variation in seismic

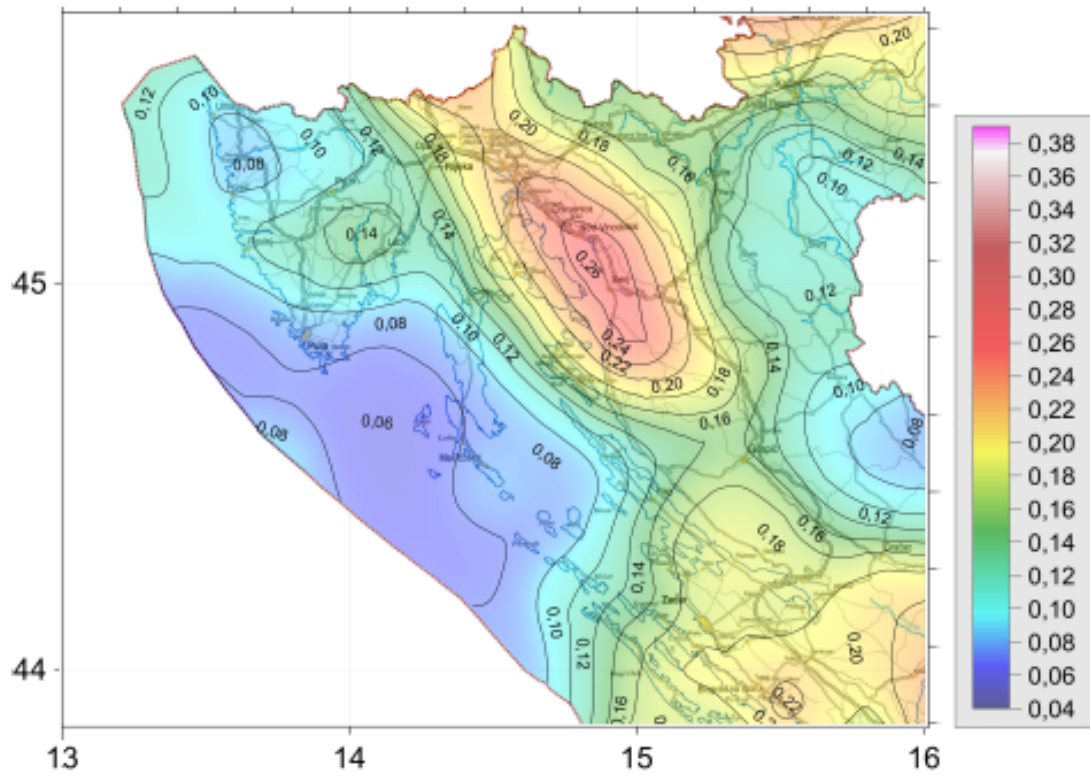
velocities. So, the main goal of this study was to monitor temporal changes of $\delta v/v$. In order to do that, relative travel time perturbations between all station pairs have been measured in the various frequency bands between 0.1 - 2 Hz. The reference function was constructed by stacking the one-day correlations over the whole three year period and current CCFs were obtained by stacking one-day correlations over 90 day period. Since it has been observed that station RABC had instrumental time error it was removed from further analysis.

On average, between all inter-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 observed signal decreases with decreasing width of the frequency, but generally stays stable with increasing inter-station distance. Other factors, such as lack of coherent phases, different geographical properties and azimuthal coverage might be the cause of such a behavior of the signal.

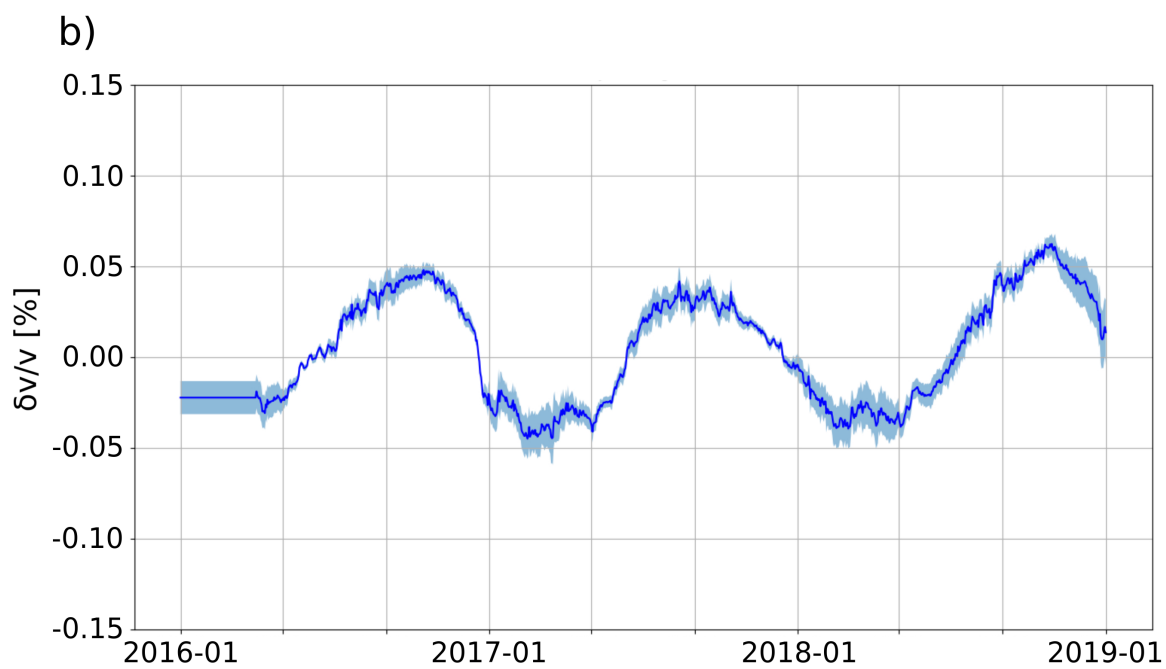
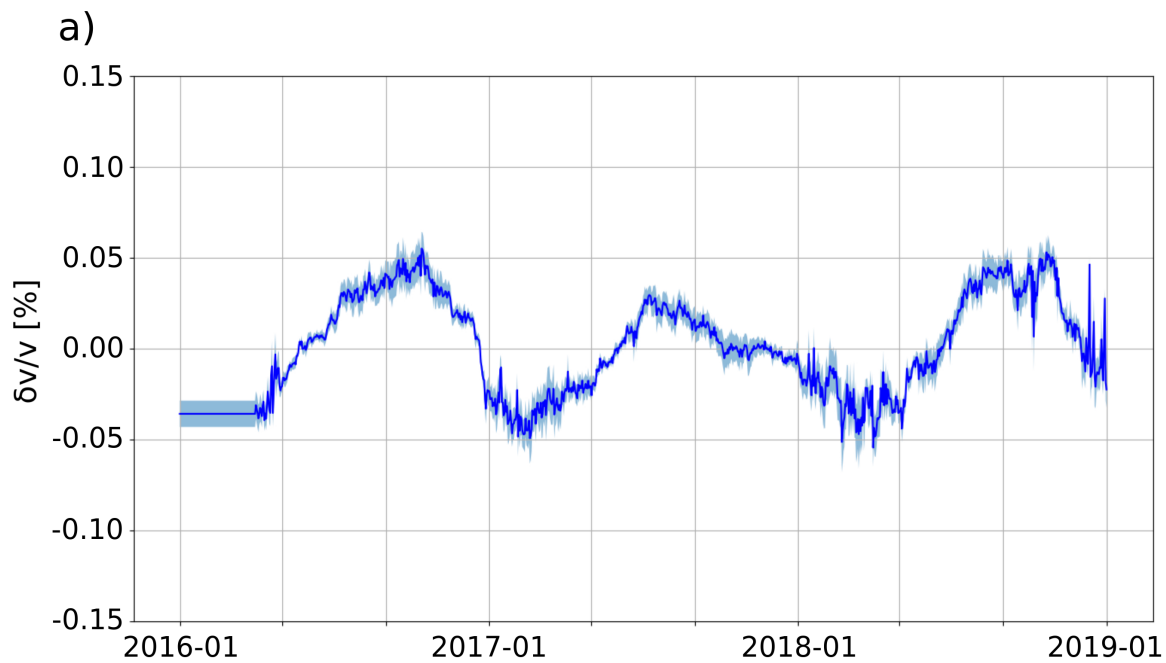
The seasonality of the signal is a result of several effects. To fully understand which of these is dominant, further analysis is required going beyond the scope of this work. Nonetheless, a simple model to correct the seasonality of the signal is made, allowing to track small changes in the mechanical properties of the crust linked to tectonic effects. The corrected $\delta v/v$ time series are then compared with the number of earthquakes occurring between 2016. and 2018. in the studied area. Correlation between the two is observed: a decrease of seismic velocity right before series of earthquakes in August of 2017. To completely validate such a claim, more detailed analysis is needed.

Keywords: Green function extraction, MWCS method, ambient seismic noise, seasonal velocity changes, correction of seasonality of the signal

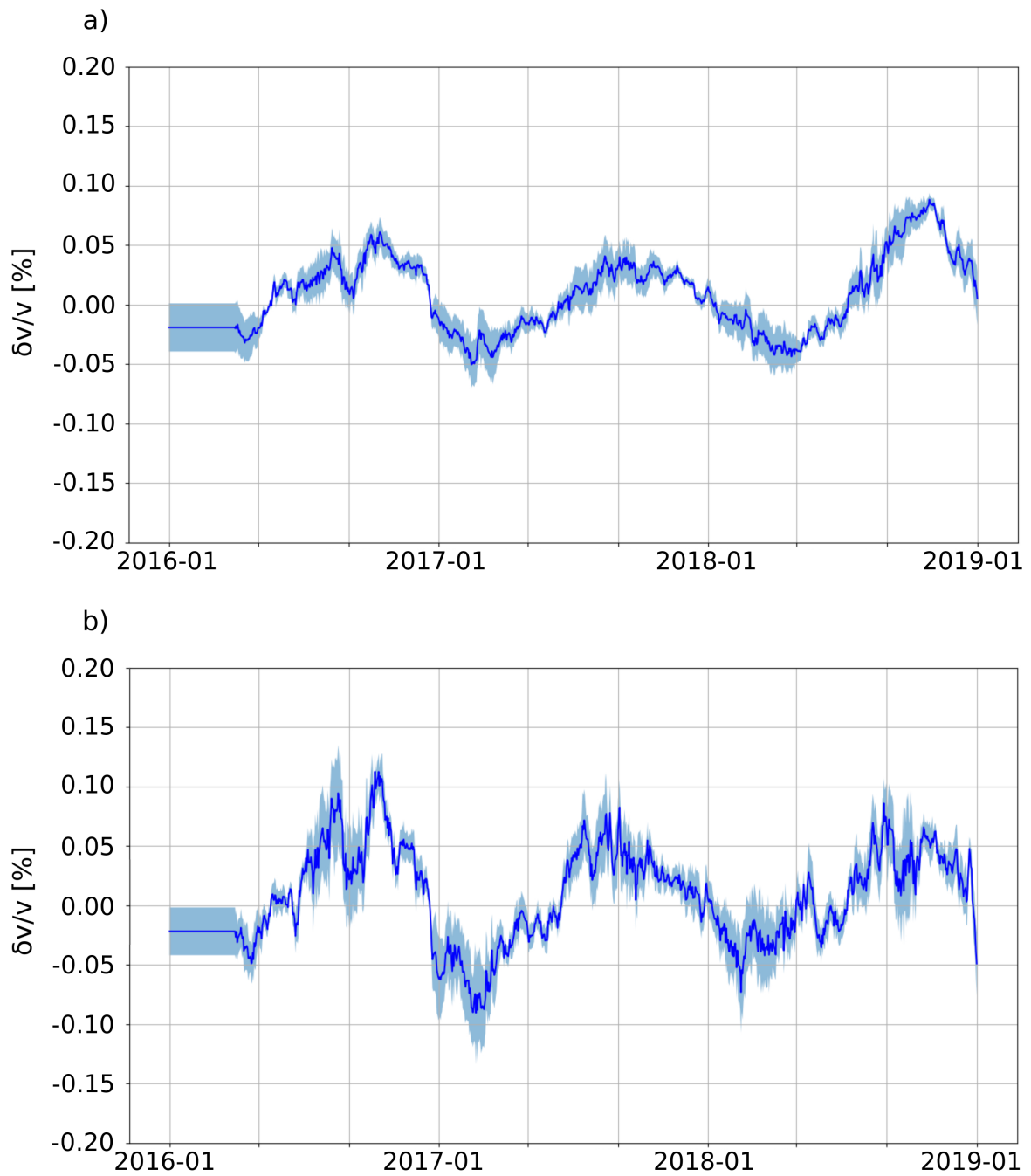
A Dodatak



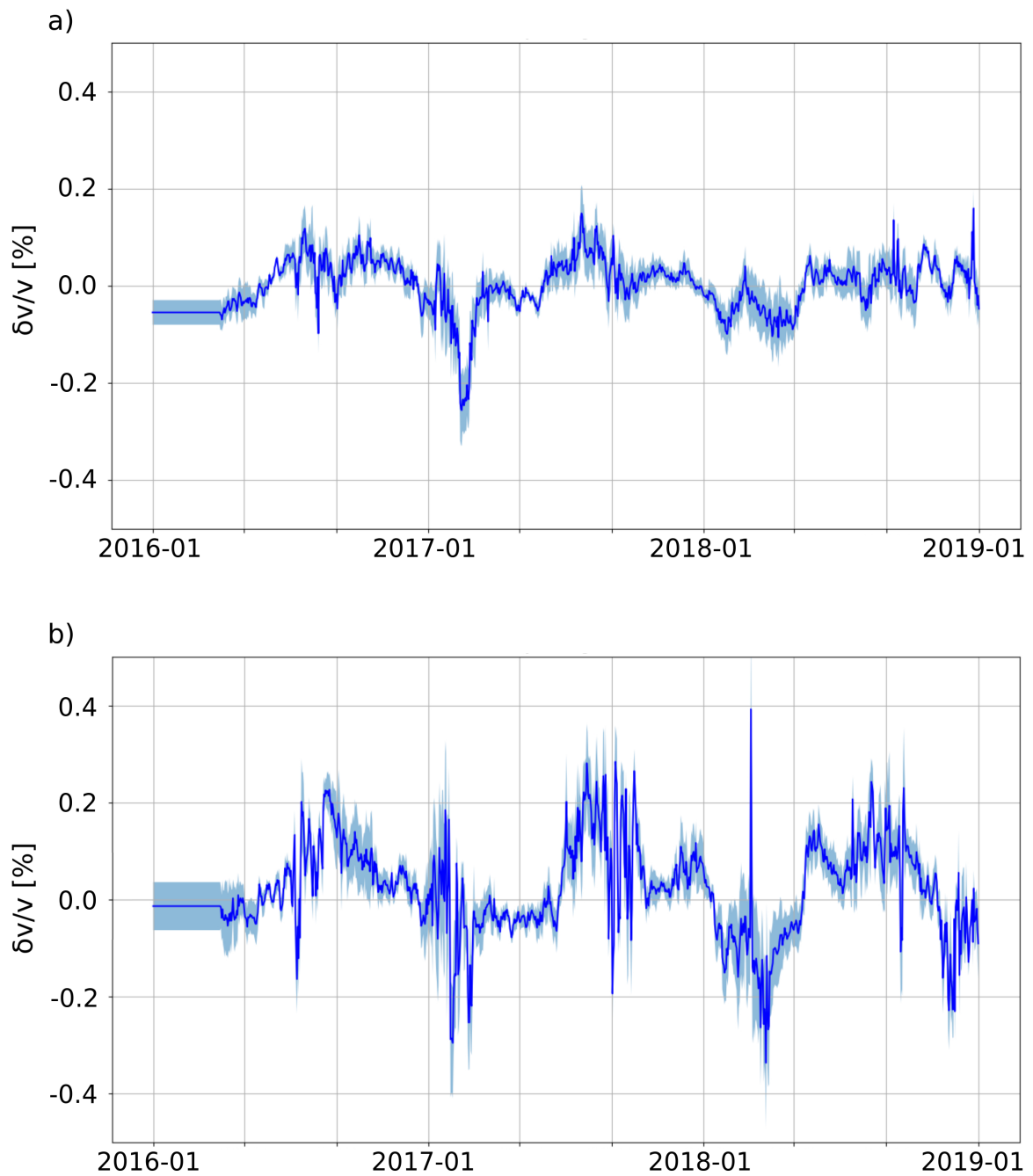
Slika 1: Karta seizmičnosti dijela Hrvatske za povratni period od 475 godina (preuzeto od Herak i sur., 2011).



Slika 2: Usrednjene vrijednosti $\delta\nu/\nu$ (tamnije plave linije) i njihova odstupanja (svijetlo plava naznačena područja) dobivene razmatranjem svih parova postaja u frekventnom rasponu: a) 0.1 - 2 Hz i b) 0.1 - 1 Hz.



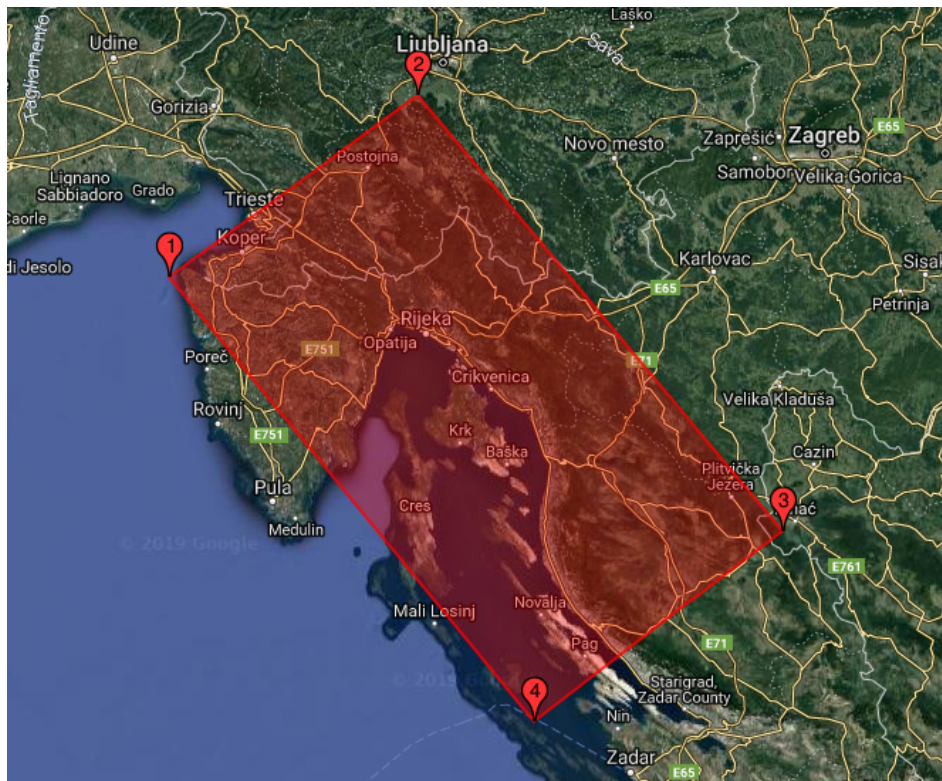
Slika 3: Usrednjene vrijednosti $\delta v/v$ (tamnije plave linije) i njihova odstupanja (svijetlo plava naznačena područja) dobivene razmatranjem svih parova postaja u frekventnom rasponu: a) 0.1 - 0.5 Hz i b) 0.1 - 0.33 Hz.



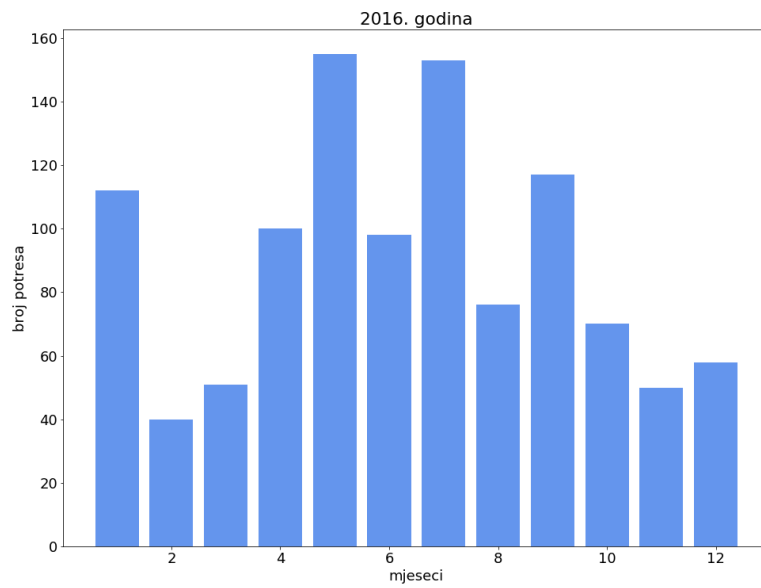
Slika 4: Usrednjene vrijednosti $\delta v/v$ (tamnije plave linije) i njihova odstupanja (svijetlo plava naznačena područja) dobivene razmatranjem svih parova postaja u frekventnom rasponu: a) 0.1 - 0.25 Hz i b) 0.1 - 0.2 Hz.

Tablica 1: Koordinate vrhova područja za koje su uzeti potresi u razdoblju od travnja 2016. do kraja veljače 2018. godine.

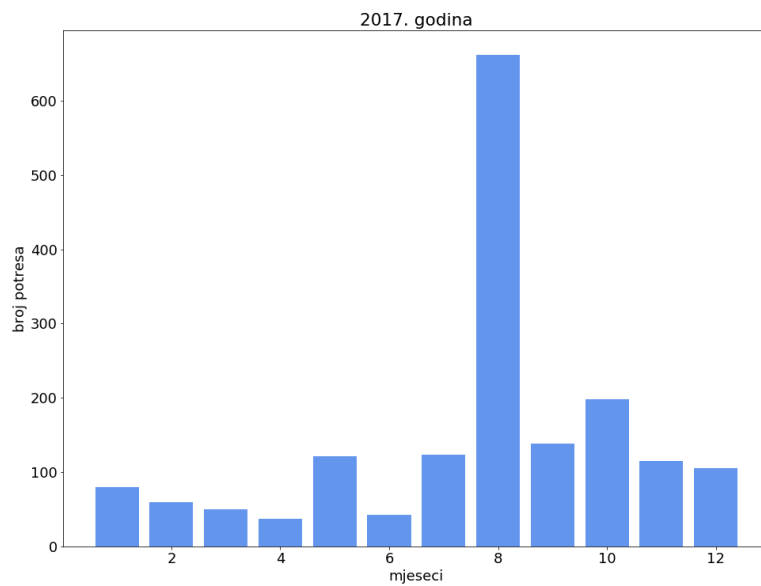
	1	2	3	4
φ [°N]	45.4791	45.9699	44.7859	44.2612
λ [°E]	13.4493	14.4106	15.8177	14.8564



Slika 5: Područje za koje su uzeti potresi u razdoblju od travnja 2016. do kraja veljače 2018. godine (slika je preuzeta sa stranice [https:// earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov)).



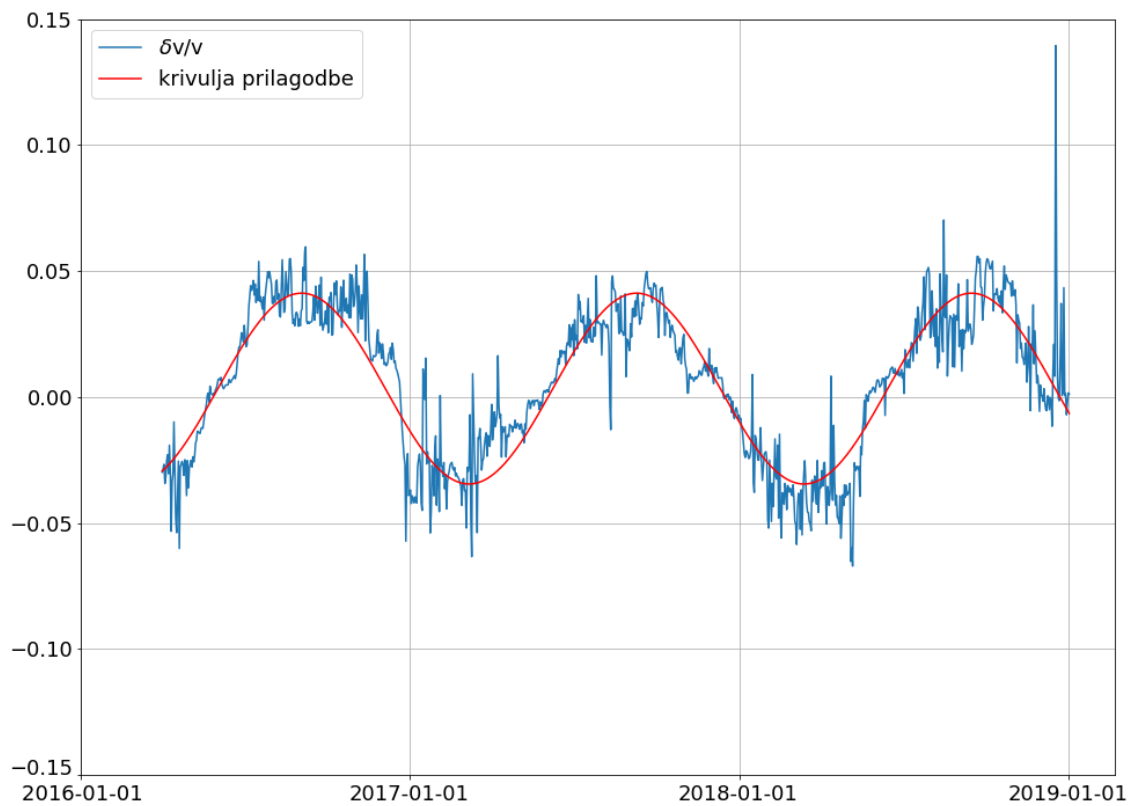
Slika 6: Stupićasti dijagram broja potresa po mjesecima za 2016. godinu.



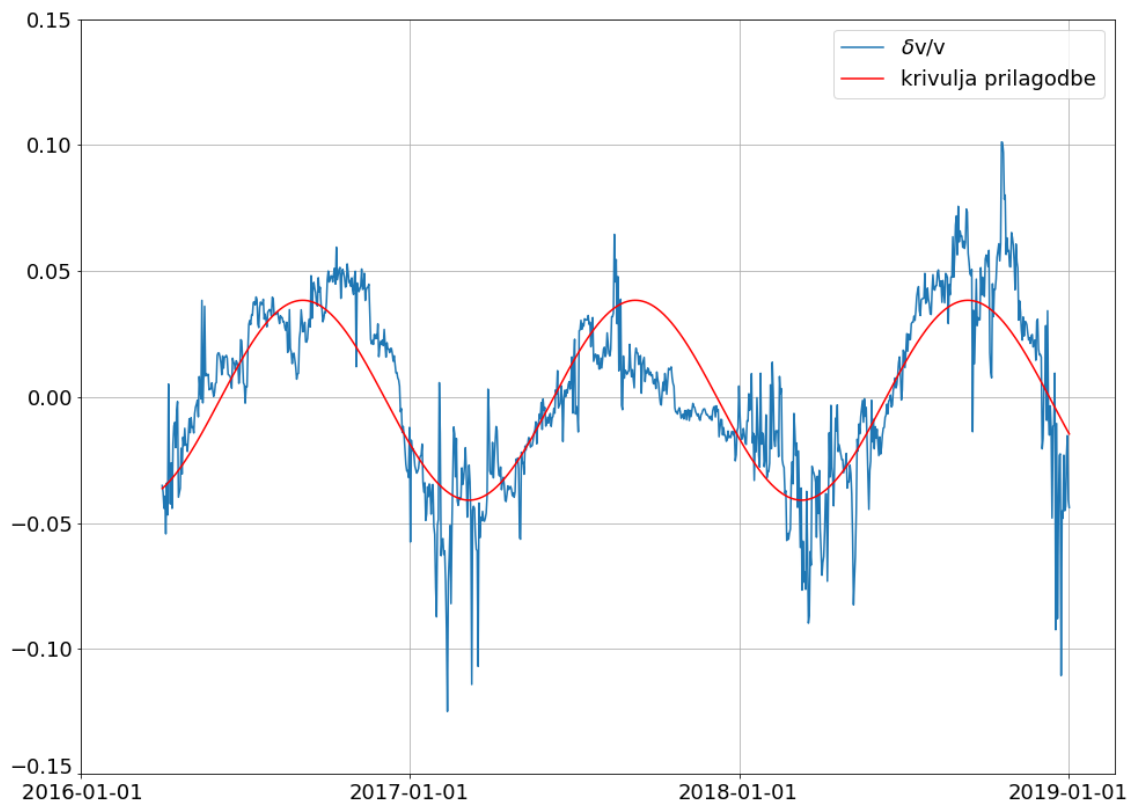
Slika 7: Stupićasti dijagram broja potresa po mjesecima za 2017. godinu.

Tablica 2: Vrijednosti parametra krivulje prilagodbe postaja 1. i 2. skupine.

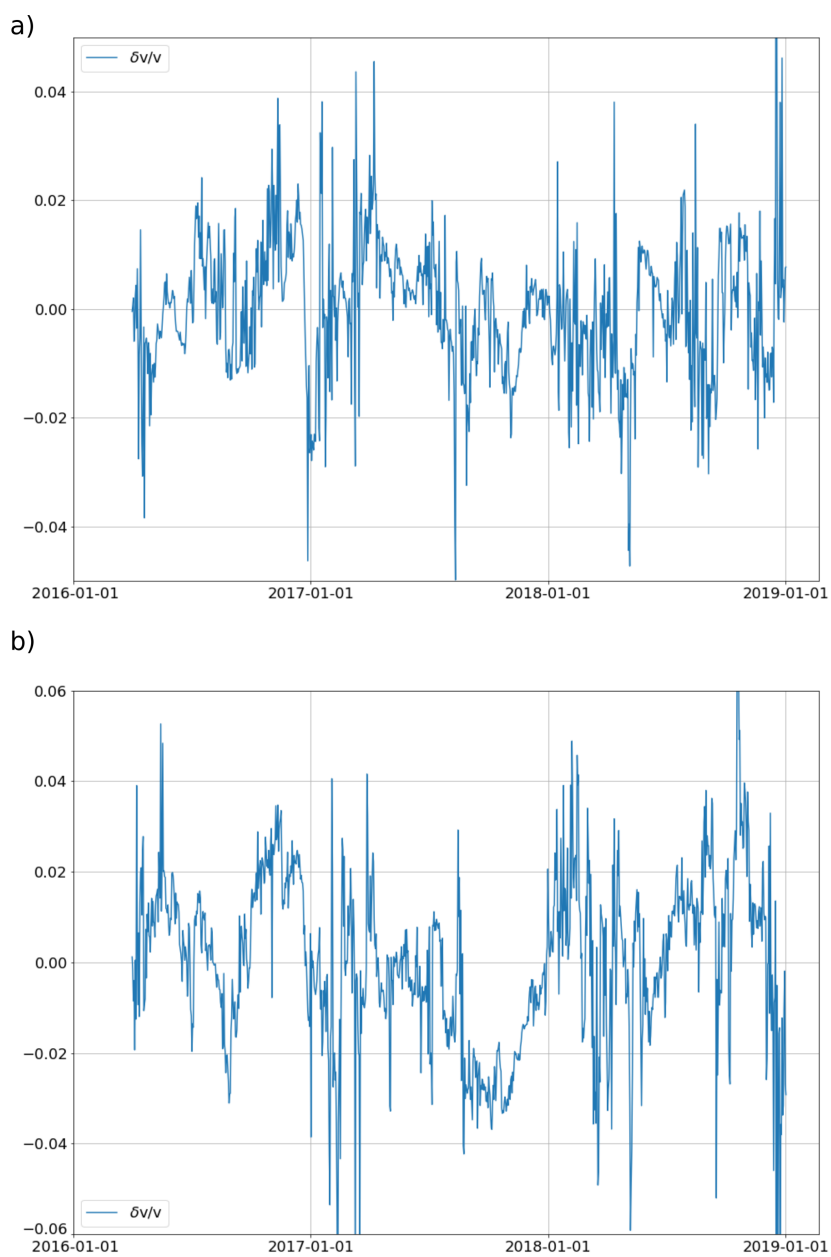
postaje	a	b	c	d
BRJN, NVLJ, RIY, SMRN	-0.037880	0.016914	0.526686	0.003334
GBRS, KNDS, RIY, SKDS	-0.039671	0.017035	0.486366	-0.001281



Slika 8: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na postaje BRJN, NVLJ, RIY i SMRN i frekventni raspon 0.1 - 2 Hz.



Slika 9: Modeliranje $\delta v/v$ krivulje koja se odnosi na postaje GBRS, KNDS RIY i SKDS i frekventni raspon 0.1 - 2 Hz.



Slika 10: Modificirana $\delta v/v$ krivulja koja se odnosi na frekventni raspon 0.1 - 2 Hz
i: a) postaje BRJN, NVLJ, RIY i SMRN; b) postaje GBRS, KNDS, RIY i SKDS.