

# Simulacija potresne trešnje za šire dubrovačko područje

---

Latečki, Helena

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

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:217:649264>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Helena Latečki

**SIMULACIJA POTRESNE TREŠNJE ZA ŠIRE  
DUBROVAČKO PODRUČJE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Helena Latečki

# **SIMULACIJA POTRESNE TREŠNJE ZA ŠIRE DUBROVAČKO PODRUČJE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Josip Stipčević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Geophysics

Helena Latečki

# **SEISMIC SHAKING SCENARIOS FOR THE WIDER DUBROVNIK AREA**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
Assoc Prof Josip Stipčević, PhD

Zagreb, 2024

Ova disertacija u potpunosti je napisana na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Geofizičkom odsjeku kao dio doktorskog studija fizike, smjera geofizike. Istraživanje prezentirano u ovom radu dio je projekta DuFAULT, IP-2020-02-3960 (*Karakterizacija i monitoring rasjednog sustava šireg dubrovačkog područja*) i projekta HrZZ-a za mlade istraživače, "Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti". U okviru izrade ovog istraživanja korištena je usluga Napredno računanje Sveučilišta u Zagrebu Sveučilišnog računskog centra (Srce).

Mentor izv. prof. dr. sc. Josip Stipčević je izvanredni profesor na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Geofizičkom odsjeku.

## Informacije o mentoru:

Josip Stipčević diplomirao je na PMF-u u Zagrebu (2006.) i doktorirao 2012. godine na Sveučilištu u Zagrebu. Od 2007. godine radi na Geofizičkom zavodu „Andrija Mohorovičić“ pri Geofizičkom odsjeku PMF-a Sveučilišta u Zagrebu, trenutno u zvanju izvanrednog profesora. Dobitnik je nagrade časopisa *Geophysical Journal International* za najbolji studentski objavljeni rad 2011., te nagrade za mlade istraživače PMF-a 2012. Usavršavao se na *Research School of Earth Sciences* na Australskom nacionalnom sveučilištu u Canberri, te u sklopu nekoliko kraćih inozemnih radionica. Trenutno je ili je bio član Američke geofizičke unije (2007.-2015.), Europske geofizičke unije (2011. do danas), te Američkog seizmološkog društva (2018. do danas). Sudjelovao je u realizaciji više znanstvenih i stručnih projekata, kao suradnik (njih 9) i kao voditelj (njih 2). Do sada je koautor na 29 radova u znanstvenim časopisima s međunarodnom recenzijom, tri konferencijska rada i 31 sažetak u zbornicima domaćih i međunarodnih znanstveno-istraživačkih skupova. Održao je tri pozvana predavanja/seminara na znanstvenim institucijama ili kongresima u inozemstvu. Bio je mentor u jednom radu za Rektorovu nagradu, tri diplomatska rada, dva završena doktorata, a dva doktorata su u završnoj fazi. Glavni znanstveni interes vezan mu je uz proučavanje strukture kore i litosfere na području Dinarida i Jadranskog mora pomoću prostornih i površinskih valova potresa.

## Zahvala

*Najprije želim zahvaliti sebi na ustrajnosti, predanosti i trudu uloženom u pisanje ove disertacije. Ovaj proces ne predstavlja samo vrhunac mog obrazovanja, već i dragocjenu priliku da, kroz kritičko razmišljanje i razvijanje novih analitičkih vještina, ostavim svoj trag u znanosti.*

*Želim izraziti duboku zahvalnost mentoru, izv. prof. dr. sc. Josipu Stipčeviću na ukazanom povjerenju i prilici da pod njegovim vodstvom izradim ovaj rad. Njegova otvorenost za inovacije i stalna podrška bili su ključni za uspjeh ovog istraživanja. Posebnu zahvalnost dugujem i dr. sc. Irene Molinari s Instituta za Geofiziku i Vulkanologiju u Bologni na podršci, savjetima i nesebičnom dijeljenju znanja o metodologiji simulacije potresne trešnje bez kojeg ovog istraživanje ne bi bilo moguće.*

*Želim zahvaliti članovima povjerenstva doc. dr. sc. Ivi Dasović, prof. emeritus. Marijanu Heraku te doc. dr. sc. Davoru Stanku na svim komentarima, sugestijama i prepravkama koje su mi uputili tijekom izrade ovog rada. Njihovo znanje i iskustvo bili su neprocjenjivi u ovom procesu, te sam izuzetno zahvalna na svom uloženom trudu i vremenu.*

*Zahvalu upućujem i suradnicima na projektu DuFAULT za njihov doprinos istraživanju šireg dubrovačkog područja te timsku suradnju koja je bila ključna za uspješnu izradu ovog rada. Zahvaljujem Seizmološkoj službi pri Geofizičkom odsjeku PMF-a na ustupljenim podacima postaja DBR, DBRK, STON i STA, te Republičkom Hidrometeorološkom Zavodu na podacima postaje TREB. Zahvaljujem Sveučilišnom računskom centru Sveučilišta u Zagrebu za ustupanje računalnih resursa potrebnih za izvršavanje simulacija.*

*Veliko hvala mojoj Barbi i Sari, IŽ, LG, MB, BT, PJ, MMB, NM, BM, TBT, JSU, DŠ i MK te ostalim prijateljima i kolegama na motivaciji, savjetima i ohrabrenju tijekom izrade ove disertacije. Bez naših silnih rasprava na kavama i 'sastancima', ovaj rad ne bi bio isti.*

*Za kraj, od srca zahvaljujem svojoj obitelji, posebno mameku, burkiju i jednoj mustri na bezuvjetnoj podršci, razumijevanju i ljubavi koju su mi pružili na ovom putu.*

*U Zagrebu, rujan 2024.*

# Sažetak

Jedan od ciljeva ovoga rada bio je simulirati potresnu trešnju na širem dubrovačkom području. U tu svrhu, najprije je sastavljen približan 3D radni lokalni model građe kore, *DF\_3D*. Model *DF\_3D* sastoji se od tri glavne cjeline: gornje kore, donje kore i plašta; uključuje topografiju i batimetriju te u svakom elementu sadrži informacije o brzinama P- i S-valova te gustoćama sredstva. Novodefinirani model korišten je i uspoređen s lokalnim 1D modelom te regionalnim 3D modelom u deterministički izračunatim simulacijama niskofrekventnih zapisa gibanja tla. Vizualnom provjerom te analizom mjera kvalitete prilagodbe za vršne brzine gibanja, međukorelacije simuliranih i zabilježenih zapisa gibanja tla te vremena trajanja snažne trešnje, ustanovljeno je da je lokalni 3D model građe kore trenutno najprikladniji model za računanje niskofrekventnih simulacija na širem dubrovačkom području. Potom su pomoću hibridne metode, izračunati širokopojasni zapisi gibanja tla za deset umjerenih do jakih potresa. Zapisi su dobiveni sjedinjavanjem odvojeno izračunatih niskofrekventnih i visokofrekventnih doprinosa pomoću, determinističkog i stohastičkog pristupa. Prilikom računanja visokofrekventnih doprinosa definirana je i korištena baza Greenovih funkcija izračunatih za 1D model (*DF\_1D*) koji je izveden iz modela *DF\_3D*. Vizualnom provjerom, analizom mjera kvalitete prilagodbe za vršne brzine gibanja i vremena trajanja snažne trešnje, te analizom vremensko-frekventnih funkcija odstupanja ovojnica i faza simuliranih i zabilježenih zapisa, ostaje nejasno u kolikoj je mjeri hibridni pristup simuliranja širokopojasnih zapisa gibanja tla uspješan na istraživanom području. Za potpuno utvrđivanje njegove primjenjivosti nužni su detaljnija validacija i parametrizacija. Neovisno o tom rezultatu, u svrhu poboljšanja razumijevanja gibanja tla prilikom snažnih potresa na ovom području, provedene su niskofrekventne simulacije Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine. Za ovaj potres simulirano je šest scenarija potresne trešnje korištenjem šest različitih kinematičkih modela konačnih izvora. Za scenarije Velike dubrovačke trešnje definirana je baza simuliranih niskofrekventnih seizmograma i video zapisa simulacija te su analizirane njihove glavne značajke. Validacija scenarija potresne trešnje provedena je na temelju usporedbe simuliranih mjera intenziteta gibanja tla horizontalne vršne brzine gibanja tla, spektralnih akceleracija za periode  $T = 1.0$  s i Ariasovog intenziteta s opaženim makroseizmičkim intenzitetima. Utvrđeno je da kombinacija nejednolike razdiobe pomaka duž rasjedne plohe i bilateralne vremenske simetrije rasjedanja daje najveći korelacijski koeficijent, odnosno, potencijalno najbolje opisuje seizmički izvor Velikog dubrovačkog potresa. Daljnje modeliranje seizmičkog izvora, korištenog modela građe kore, metoda simulacije i validacije, nužni su da bi scenariji potresne trešnje odražavali očekivana svojstva gibanja tla i time doprinijeli boljoj procjeni determinističkog seizmičkog hazarda na širem dubrovačkom području.

**Ključne riječi:** 3D model, Veliki dubrovački potres, simulacija scenarija potresne trešnje



# Extended abstract

## Introduction

The wider Dubrovnik area is characterized by the interaction between the Adriatic microplate and the Dinarides, which lie in the collision zone of the Eurasian and African tectonic plates. The Adriatic microplate, formed by complex tectonic processes over the last 200 million years, played a key role in the evolution of the Mediterranean basin and the adjacent orogens. More specifically, the convergence of the Adriatic microplate and Europe during the Cenozoic created orogens with opposite vergences: the Alps in the north and the Apennines and Dinarides in the south (Handy et al., 2010; 2015). The Dinarides are an active thrust-belt that extends from the Southern Alps in the northwest to the Albanides and Hellenides in the southeast. The Dinarides are generally divided into Internal and External (or Karst) Dinarides. The Dubrovnik area belongs to the south-eastern part of the External Dinarides, which is considered a region with high seismic activity. According to the Croatian earthquake catalog (Herak et al., 1996, updated and revised version), shallow seismic activity (foci down to 30 km depth) mostly occurs parallel to the coast, with two regions of increased activity: The Ston-Dubrovnik region and the Budva-Kotor region. In the past, the Ston-Dubrovnik region was relatively frequently hit by strong earthquakes with intensities above the VII °MCS scale (Herak et al., 1996; Albini, 2004). The most recent seismic activities include the Ston earthquake of 1850 (intensity VIII–IX °MCS scale; Herak et al., 1996; Kuk et al., 2000, Herak i sur., 2024), the Ston-Slano earthquake of 1996 ( $M = 6.0$ ; Markušić et al., 1998, Govorčin i sur., 2020) and the Berkovići earthquake of 2022 ( $M_L = 6.0$ ; Dasović et al., 2024). The most significant earthquake in this area is certainly the Great Dubrovnik Earthquake of 1667, which is also the strongest documented earthquake on the Croatian coast.

On April 6, 1667, at around 8:45 a.m. local time, the wider Dubrovnik area was struck by a catastrophic earthquake, now known as the Great Dubrovnik Earthquake. Although there are no direct seismological measurements or records, the characteristics, properties and consequences of the earthquake are known due to numerous historical documents kept in various archives. Overall, the earthquake caused damage from Shkodër to Makarska and was felt on the western and eastern coasts of the Adriatic Sea, from Constantinople and Smyrna, Albania, to the Gulf of Genoa (Herak et al., 2017). The strongest intensity between IX °EMS98 scale (e.g. Albini, 2015) and IX–X °EMS98 (e.g. Markušić et al., 2017) is attributed to the city of Dubrovnik and several places in its vicinity (Gruž, Rijeka Dubrovačka, Mokošnica and Rožata). As already mentioned, this earthquake is one of the most significant events in the Croatian earthquake catalog, defining the lower limit of seismic hazard assessment for this region (Herak et al., 2011). A reliable assessment of seismic hazard is of utmost importance when it comes to

construction safety. It is based on an understanding of the seismicity and tectonics of the area as well as the ground motion during strong events such as the Great Dubrovnik Earthquake.

When assessing deterministic seismic hazard, it is crucial to accurately describe the seismic sources, wave propagation and local site effects. By simulating ground motions, it is possible to contribute to a better understanding of these components as they form the input (seismic source, 3D model, spatio-temporal parameterization) and the output (ground motion parameters) of such a simulation. There are different approaches for ground motion simulations, ranging from deterministic and stochastic methods to ground motion prediction equations. The foundation for the deterministic approach was laid in the late 1960s with numerical finite-difference methods (FDM) and finite-element methods (FEM) in seismology (Alterman and Karal, 1968; Lysmer and Drake, 1972). With the development of algorithms and the increasing availability of computational resources in the early 1990s, it became possible to solve complex 3D problems using FDM (e.g. Frankel and Vidale, 1992; Olsen et al., 1995; Graves, 1996). Shortly thereafter, the application of FEM (e.g. Bao et al., 1998; Aagaard et al., 2001) and pseudo-spectral methods such as the spectral element method (SEM) and the Galerkin method (e.g. Seriani, 1998; Komatitsch and Vilotte, 1998) were introduced. Today, it is common to use deterministic methods in various global, regional and local ground motion simulations (e.g. Komatitsch et al., 2010; Zhou et al., 2012; Rietmann et al., 2012) as well as in seismic hazard mapping (Graves et al., 2011). However, deterministic methods are still limited to low frequencies, as they require a very detailed description of the medium and the source model, for which often insufficient information is available. Therefore, a hybrid approach is often used in the simulation of broadband ground motion (e.g. Sekiguchi et al., 2008; van Ede et al., 2020; Lee et al., 2020). Such an approach has been previously used in Croatia as well, for the wider Zagreb area (Lokmer et al., 2002; Herak et al., 2004; Latečki et al., 2021). A hybrid approach combines deterministic methods with stochastic simulation methods. Stochastic ground motion simulation methods were introduced by Boore (1983) and the methodology has been further improved and successfully implemented in numerous studies (e.g. Beresnev and Atkinson, 1997; Dan and Sato, 1999; Liu et al., 2004; Graves and Pitarka, 2010; Crempien and Archuleta, 2015; Dang et al., 2021). The principle of all stochastic methods is essentially the same: one of the input parameters (e.g. the properties of the seismic source radiation) is described by a stochastic model, while the other parameters (e.g. wave propagation, scattering effects) are represented by simplified theoretical or empirical models. The main difference to deterministic methods is that the output data set always differs from the previous calculation despite the unchanged input.

As mentioned above, a reliable deterministic seismic hazard assessment is based on the understanding of the ground motions of an earthquake, which can be achieved by numerical simulation method. The focus of this study was on the application of such an approach for the wider Dubrovnik area, one of the most seismically vulnerable regions in

Croatia. With that being said, the main objectives of this study can be summarized in three points: 1) Construct a detailed 3D seismic model of the crust for the wider Dubrovnik area using available geophysical and geological data; 2) Evaluate the applicability of the newly defined model in simulations in comparison to other local and regional models and for different seismic sources; 3) Define a database of simulated seismograms, shakemaps and video visualizations of simulations for different seismic sources in the studied area with emphasis on the characterization of the source for the Great Dubrovnik earthquake.

## Data and methods

One of the objectives of this study was to construct a detailed 3D seismic model of the crust for the wider Dubrovnik area using available data from previous and new studies. The model consists of three main structural units: the upper crust, the lower crust and the mantle. The data on the marker horizons separating the lithologic units within the upper crust were taken from Sečanj et al. (2024). Data on the depth of the Conrad discontinuity, which defines the top of the lower crust, were taken from the regional crustal model *EPcrust* (Molinari and Morelli, 2011). The mantle boundary is defined by the Mohorovičić discontinuity, the depths of which were taken from Stipčević et al. (2020). In addition, the model contains topography and bathymetry derived from the NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 30 m (2013) and EMODnet Bathymetry Consortium (2020) databases, respectively. The original data on structural boundaries, topography and bathymetry were resampled to the required resolution using the bilinear interpolation method. The main structural units of the *DF\_3D* model and the subunits defined within them, represent structures where significant changes in seismic wave velocity and medium density occur. The values of P-wave velocities in the lithologic units of the upper crust were determined using borehole data (Sečanj et al., 2024). The P-wave velocities in the lower crust and mantle were assumed to be constant and derived from a 1D model of the local crustal structure, *Ston\_H08* (model for the southern Adriatic Sea). In each model element, the values of S-wave velocities and density were determined based on P-wave velocities using Brocher relations (Brocher, 2005). For simulation purposes, two additional modifications were made to the *DF\_3D* model: 1) the vertical domain has been extended up to an altitude of 1750 m to adequately account for topography and bathymetry; 2) horizontal smoothing using a Gaussian filter was applied to avoid unwanted effects and artificial reflections in the simulations caused by abrupt jumps in velocity and density values within the model.

For the purpose of validating the models applicability in the simulations, the simulated seismograms were compared with the recorded ground motion of ten earthquakes sourced from the Croatian Catalog of Earthquake Mechanisms (M. Herak, 2023, personal communication). The recordings were obtained from the broadband three-component seismographs DBR (Dubrovnik), DBRK (Dubrovnik – Golubov kamen), STA (Stravča), STON (Ston) of the Croatian Seismic Network (University of Zagreb, 2001; CSN network), DF02 (Bileća), DF04 (Radovčići), DF05 (Šipanska luka) of the semi-permanent instrument

network Du-Net from the DuFAULT project, IP-2020-02-3960 (DN network), and the station TREB (Trebinje) of the Seismic Network of Republika Srpska (Republic Hydrometeorological Service, 2011; WS network). The seismic sources for moderate to strong earthquakes used in the model validation were represented by a simple point source model. The seismic source of the Great Dubrovnik earthquake was represented by a finite-fault model. More specifically, the Great Dubrovnik earthquake was simulated using a total of six different finite-fault models representing a combination of non-uniform or uniform displacement distribution with bilateral, SE-NW (southeast-northwest) unilateral or NW-SE (northwest-southeast) unilateral faulting. Data on the geometry of the fault were obtained from the frontal segment of the Dalmatian thrust fault Du-1 (M. Sećanj, 2023, personal communication). Information on the hypocentral time and magnitude of the Great Dubrovnik earthquake was taken from the Croatian Earthquake Catalog (Herak et al., 1996, updated and revised version). The remaining parameterization required for the simulations was related to the definition of attenuation and amplification factors: 1) The quality factor of the S-waves, which describes the attenuation in a given element of the 3D model, is based on the Olsen empirical relations (Olsen et al., 2013); 2) The exponent in the frequency dependence of the Q-factor for the stations DBRK, STON and STA was taken from the work of Dasović et al. (2012). For the remaining stations, the value of the exponent was chosen to correspond to direct measurements based on the distance to the nearest station; 3) The empirical high frequency spectral decay parameter kappa ( $\kappa$ ) for stations STA and STON was taken from the study by Stanko et al. (2017). For other stations, the  $\kappa$  parameter was estimated using the proxy of  $\kappa$ - $v_{s30}$  relationships from Van Houtte et al. (2011); 4) Direct measurements of the  $v_{s30}$  values for stations STA and STON were taken from Stanko et al. (2017). For the remaining stations, values were taken from the USGS  $v_{s30}$  database (Allen and Wald, 2007), where  $v_{s30}$  values are estimated based on the slope of the topography.

To compute the low-frequency contribution of ground motion (frequencies  $f \leq 1$  Hz), the deterministic Spectral-Element Method (SEM) was utilized, which is implemented in the software packages SPEC-FEM3D Cartesian (Komatitsch et al., 2010, 2016; Patera, 1984) and Salvus (Afanasiev et al., 2019). Low-frequency seismograms were simulated for the time interval  $t \in [0,90]$  s with a time step of  $\Delta t = 0.0015$  s. To test the applicability of the newly defined *DF\_3D* local model, two additional models (local 1D model *Ston\_H08*, regional 3D model *EPcrust*) were used and compared in simulations of ten moderate to strong events. Later, a low-frequency simulation methodology was used to simulate six scenarios for the Great Dubrovnik earthquake using the *DF\_3D* model. Broadband waveforms with frequencies from 0.1 to 10 Hz were simulated using a hybrid approach for the time interval  $t \in [0,90]$  s with a time step of  $\Delta t = 0.01$  s. In the broadband simulations, the high-frequency contribution of ground motion (frequencies  $f > 1$  Hz) was calculated using the semi-stochastic Graves-Pitarka (GP) method (Graves and Pitarka, 2010), which is implemented in the Southern California Earthquake Center Broadband Platform (SCEC; Graves and Pitarka, 2015; Maechling et al., 2015). More precisely, in order to include contributions of both the P- and S-waves, augmented SCEC codes (Graves, 2021,

personal communication) and methodology following Goldberg and Melgar (2020) were used. The Green's functions required for the GP method were calculated using the 1D model *DF\_1D*, which was derived from the *DF\_3D* model. Once obtained, the high-frequency records were merged with the low-frequency records into a single time series following the approach of Hartzell et al. (1999). To test the applicability of the hybrid approach in the wider Dubrovnik area, broadband waveforms were calculated for ten moderate to strong events.

Several validation methods were used in this study to comprehensively evaluate the success of the simulations in reproducing the characteristics of the recorded waveforms. For moderate to strong earthquakes, validation was based on measures of goodness-of-fit (*GOF*; Olsen and Mayhew, 2010) and time-frequency misfit functions (Kristeková et al., 2009). *GOF* values were calculated for the peak ground velocity, the cross-correlation of simulated and recorded ground motion and the duration of strong motion. In addition, globally normalized time-frequency misfit functions of envelopes and phases were used to quantify the similarity and differences between simulated and recorded ground motion records. For the Great Dubrovnik earthquake, validation was performed based on the comparison of observed macroseismic intensity (*MI*; Albini and Rovida, 2016; 2018) and ground motion intensity (*GMI*) measures: Arias intensity (Arias, 1970), peak ground velocity (*PGV*) and spectral accelerations (*SA1.0*) for period  $T = 1.0$  s obtained from the low-frequency simulations. Spearman's rank correlation coefficients were also calculated to test the relationship between *MI* and *GMI*.

## Results and conclusion

The *DF\_3D* model for the wider Dubrovnik area was defined in the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system in zone 33N. It covers an area of 42.31°E–42.94°E in longitude and 17.54°N–18.49°N in latitude, with dimensions of 76.25 km × 67.25 km and extends to a depth of 70 km. The model resolution is 125 m × 125 m × 125 m, with each element containing information on P- and S-wave velocities and the density of the medium. As already mentioned, the model consists of three main structural units: the upper crust, the lower crust and the mantle. In the *DF\_3D* model, the upper crust can be roughly divided into two parts: sediments and carbonates. The sediments comprise Quaternary clastic deposits, Pliocene clastic deposits, and the Miocene-Oligocene-Eocene clastic deposits. The carbonates consist of carbonate rocks from the Eocene to the Upper Triassic age. Below the carbonates, the Conrad discontinuity defines the top of the lower crust. The lower crust extends to the depths of the Mohorovičić discontinuity, which marks the top of the mantle that extends to a depth of 70 km.

Despite some shortcomings of the newly defined 3D model, which mostly stem from the lack of data, the simulations of the low-frequency ground motion contributions indicate its applicability and improvement compared to the other two models (*Ston\_H08* and *EPcrust*). A visual inspection revealed that the amplitudes of most of the simulated

records obtained using the *DF\_3D* model best match the amplitudes of the recorded data. This is consistent with the observations of the *GOF* values for the peak ground velocity – the values are distributed from poor to good, with the most significant improvement observed at stations DBR, DF02, STA, and TREB. For other stations, depending on the event, *GOF* values are mostly either similar to or greater than those of the other two models. Regarding the duration of ground motion, there are visually no significant differences between the three models when looking at the entire record. However, when examining the *GOF* values of the duration of strong ground motions, the newly defined 3D model provides better results for the stations DBRK, DF02, DF04 and TREB. For the remaining stations, the *GOF* values are again either higher or insignificantly different from those of the other two models. Finally, when looking at the *GOF* values of the cross-correlation parameter, it was not possible to determine to what extent the newly defined *DF\_3D* model is better or worse than the other two models when simulating the onset times of arriving phases.

Due to the nature of the data itself, many limitations are to be expected when defining 3D models and seismic sources, conducting and validating simulations. Even in the case of simulations obtained using an ideal model and seismic source, deviations from recorded data will be present because the mathematical models themselves simplify the real physical processes. However, simulations are an extremely useful tool for evaluating ground motion parameters and thus improving deterministic seismic hazard assessment in studied area. As a first step towards this goal, this study has established the applicability of the newly defined 3D model in seismic shaking scenarios in the wider Dubrovnik area based on the analysis of low-frequency simulated ground motion records. It was found that the *DF\_3D* model is currently the most detailed local model representing a very important data set on the structural-geological composition of the studied area. Its further improvement should be based on a more comprehensive set of input data and validation methods.

The next step in this study was to simulate broadband waveforms using a hybrid approach and validate the obtained results. Visual inspection showed that the amplitudes of the vertical component of the simulated records matched the amplitudes of the recorded data relatively well for most event-station pairs. However, the amplitudes of the horizontal components of the simulated records were overestimated in almost all cases, especially in the later phases of the seismograms (after the S-phase). The *GOF* values for the peak ground velocity and the misfit functions of the envelopes were consistent with these observations. A possible reason for this overestimation is the use of simplified models of crustal structure and attenuation, which directly affect the wave propagation through the medium and thus the ground motion amplitudes. Furthermore, the inconsistency in the amplitudes around the S-phase is likely related to the way the amplitude of the S-wave acceleration spectrum is calculated in the GP method. Differences in the duration of ground motion between simulated and recorded seismograms were visually detected from the differences in the shapes of the waveforms. The variability of

*GOF* values from poor to excellent was consistent with the visual observations and indicated the discrepancy between the strong ground motion durations of the simulations and the recorded data. As with the amplitudes, the discrepancy was associated with the crustal and attenuation models used in the simulations. The discrepancy in phase between simulated and recorded data was primarily associated with the fact that the phases of the acceleration spectrum are estimated randomly in the GP method. However, it should be noted that the phase discrepancy could also be partly due to simplified representations of the crustal structure and seismic sources used in the simulations.

From these results, it was concluded that further testing of various parameters using a larger data set is required to determine the applicability of the hybrid simulation method in the studied area. More specifically, the analysis should be extended mainly in terms of the number and spatial distribution of seismic stations that have recorded earthquakes. Earthquakes of larger magnitudes and different focal mechanisms should also be simulated, and several models of crustal structure (1D and/or 3D models) and attenuation should be tested when calculating high-frequency contributions. The method should be further modified with regard to the calculation of P-wave propagation factors and amplification factors.

The final part of this study consisted of simulating different seismic shaking scenarios for the Great Dubrovnik Earthquake using different seismic source models. From the maps of logarithms of the horizontal peak ground velocities, spectral accelerations for  $T = 1.0$  s and the horizontal Arias intensities, it was found that the spatial distribution of the values was not only influenced by the location of the initiation point and the distribution of displacements along the fault plane, but also directly by the 3D crustal model itself. In particular, in areas where carbonate rocks outcrop at the surface, the values were lower than in regions where the crustal model includes sedimentary rocks. These observations are related to the amplification and prolonged duration of ground motion resulting from differences in seismic wave velocities and densities at the interface between two media. Regarding the distribution of displacements along the fault plane, it was found that the range limits of the logarithms of ground motion intensity measures are larger for non-uniform distribution (scenarios 1, 2 and 3) than for uniform distribution (scenarios 4, 5 and 6). This is due to the fact that with non-uniform distribution of displacements, most of the moment is localized in a limited part of the fault, so that certain areas are susceptible to more intense ground motion with larger amplitudes and longer duration. In addition, the distribution of displacements along the fault plane affects the spatial distribution of extreme values of ground motion intensity measures. In the case of a non-uniform distribution, the logarithm values of ground motion intensity measures inland decrease faster with distance from the initiation point than the values achieved in the Dubrovnik coastal area. This is again directly related to the 3D model, i.e. the attenuation and quality factors defined based on the S-wave velocity values of the model.

Regardless of the scenario, the box-plots of the logarithms of the horizontal peak ground velocities, spectral accelerations and the horizontal Arias intensities showed a scatter of logarithm values across the intensities. This was partly attributed to the subjectivity of the definition of  $MI$  as well as to the nature and intrinsic uncertainty of historical reports on earthquake effects. The scattering of the logarithmic values of  $GMI$  in the earthquake scenarios was also related to the fact that the values here were obtained exclusively from low-frequency simulations and not from the broadband waveforms. Although the box-plots indicated that scenario 4 might be the best scenario to represent the source of the Great Dubrovnik Earthquake, the Spearman correlation coefficient derived a different conclusion. In particular, it showed that scenario 1 (bilateral time symmetry, non-uniform distribution of displacements along the fault) results in the best correlation between  $GMI$  and  $MI$  and is therefore the most likely scenario for the Great Dubrovnik Earthquake of 1667. This obtained result was somewhat expected because, although simplified, the non-uniform distribution of displacements along the fault describes the seismic source more realistically than a uniform distribution. Furthermore, the location of the initiation point in scenario 1 is consistent with the previously assumed source location from Herak et al. (1996) that was based on the analysis of observed intensities.

The current results of the earthquake scenarios represent a baseline that needs to be refined and improved on the basis of new findings. This relates primarily to knowledge about the structure of the Earth's crust and the seismic source. More specifically, the modeling of the source should be extended to dynamic modeling in order to physically characterize the properties during the faulting process and thus improve the assessment of ground shaking in an area. In addition to the further development of the definition of the seismic source and the 3D model, the successful execution of historical earthquake scenarios requires an extension of the methods for validating the results. As a first step, the validation could be extended by simulating a more recent earthquake of similar magnitude and/or fault characteristics for which ground motion records are available. The comparison of simulations and recorded data would provide a more qualitative insight into the results, i.e. the applicability of the method and the input parameters for earthquake scenarios in the research area. Nevertheless, with this study, for the first time in Croatia, a database of earthquake scenarios was defined for one of the most significant earthquakes in the Croatian earthquake catalog. The data for each of the six earthquake scenarios can be freely viewed and downloaded at: <https://dubrovnikshakingscenarios.gfz.hr/>. As such (albeit with a certain degree of uncertainty!) they can be used to calculate other measures of ground motion intensity used in deterministic seismic hazard assessment.

**Keywords:** 3D model, Great Dubrovnik Earthquake, seismic shaking scenario simulation



# Sadržaj

Sažetak.....	iii
Extended abstract .....	iv
Introduction .....	iv
Data and methods.....	vi
Results and conclusion .....	viii
1. Uvod.....	1
1.1. Seizmotektonska obilježja istraživanog područja .....	2
1.2. Veliki dubrovački potres.....	7
1.3. Simulacija potresne trešnje .....	8
1.4. Motivacija i ciljevi istraživanja .....	11
2. Podatci.....	13
2.1. Građa i struktura istraživanog područja .....	13
2.2. Seizmogrami zabilježenog gibanja tla i žarišni mehanizmi izvora potresa .....	15
2.3. Podatci za Veliki dubrovački potres .....	18
2.4. Ostala parametrizacija.....	20
3. Metode.....	22
3.1. Metodologija simuliranja gibanja tla.....	22
3.1.1. Karakterizacija seizmičkog izvora.....	24
3.1.2. Simuliranje niskofrekventnog doprinosa gibanja tla ( $f \leq 1$ Hz).....	29
3.1.3. Simulacije visokofrekventnog doprinosa gibanja tla ( $f > 1$ Hz).....	34
3.2. Metode validacije rezultata.....	37
3.2.1. Mjera kvalitete prilagodbe .....	37
3.2.2. Vremensko-frekventne funkcije odstupanja .....	39
3.2.3. Validacija rezultata scenarija trešnje Velikog dubrovačkog potresa.....	41
3.3. Vizualizacija scenarija potresne trešnje .....	43
4. Rezultati.....	45
4.1. Model građe kore istraživanog područja.....	45
4.1.1. 1D lokalni i 3D regionalni modeli građe kore .....	45
4.1.2. 3D lokalni model građe kore .....	47
4.2. Simulacije niskofrekventnih doprinosa s obzirom na model građe kore .....	54
4.3. Simulacije širokopojasnih zapisa gibanja tla umjerenih do jakih potresa .....	63
4.4. Simulacija Velikog dubrovačkog potresa .....	79
5. Diskusija.....	92
5.1. 3D lokalni model građe kore i niskofrekventne simulacije.....	92
5.2. Širokopojasne simulacije.....	96
5.3. Scenariji Velikog dubrovačkog potresa.....	99
6. Zaključak .....	104

Popis literature.....	106
Dodatak A .....	123
A.1. Bilinearna interpolacija .....	123
A.2. Podatci o potresima i postajama .....	124
Dodatak B .....	125
B.1. Metodologija simuliranja niskofrekventnog doprinosa gibanja tla pomoću softvera <i>SPECFEM3D Cartesian</i> .....	125
B.2. Metodologija simuliranja niskofrekventnog doprinosa gibanja tla pomoću softvera <i>Salvus</i> .....	126
B.3. Ulazni parametri za program <i>Fk3.2</i> .....	127
B.4. Računanje vremena trajanja snažne trešnje.....	127
Dodatak C.....	130
C.1. Model <i>Ston_H08</i> .....	130
C.2. Model <i>EPcrust</i> .....	131
C.3. Izgladivanje pomoću Gaussovog filtera .....	131
C.4. Modeli <i>DF_3D</i> i <i>DF_1D</i> .....	133
Dodatak D .....	137
D.1. Simulacije niskofrekventnih doprinosa s obzirom na model građe kore .....	137
D.2. Simulacije širokopojasnih zapisa gibanja tla.....	142
Životopis .....	165
Lista publikacija .....	166
Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima .....	166
Sažetci sa skupova .....	166
Ocjenski radovi i ostale publikacije .....	168

# 1. Uvod

Procjena seizmičkog hazarda temelji se na poznavanju mjera intenziteta gibanja tla kao što su vršna akceleracija, vršna brzina gibanja tla, spektar odziva tla na pobudu i sl. Prilikom procjene ovih mjera tradicionalno se koriste tzv. atenuacijske relacije gibanja tla (npr. Douglas, 2018) koje uvažavaju niz parametara kao što su žarišni mehanizam i magnituda potresa, udaljenost od žarišta, lokalni uvjeti tla, i sl. Ipak, njihova primjenjivost u predviđanju gibanja tla postaje ograničena kada se razmatraju područja koja su karakterizirana kompleksnom geološkom građom. Zato su se u posljednjih nekoliko desetljeća za procjenu mjera intenziteta gibanja tla, posebno pri determinističkoj procjeni hazarda, počele primjenjivati i druge metode, kao što su numeričke metode simulacije potresne trešnje.

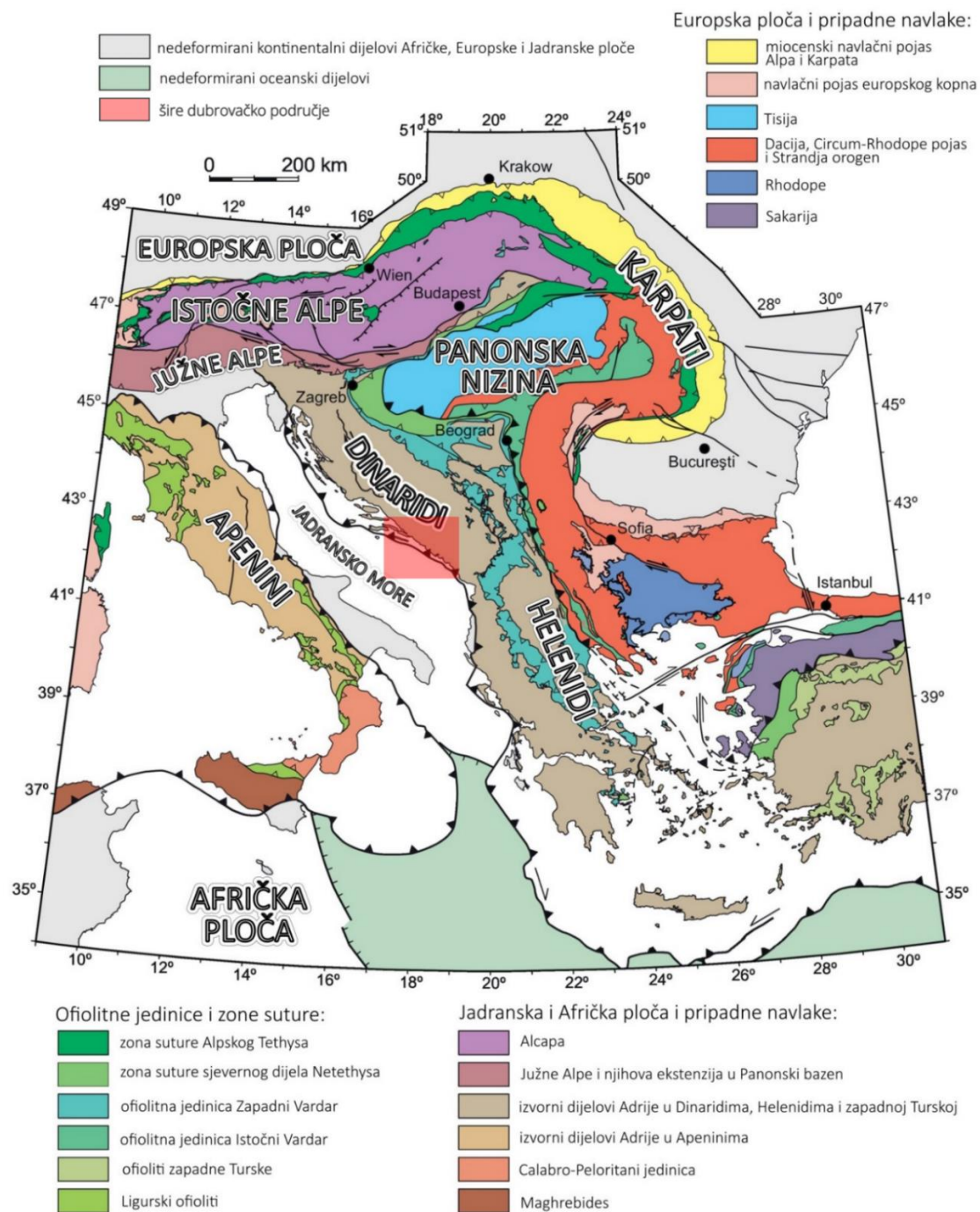
Danas se razlikuje mnogo numeričkih metoda simulacije potresne trešnje i svaka od njih ima određene prednosti i mane. Odabir metode ovisit će o problemu koji se nastoji riješiti, a uspješnost izračunatih simulacija o ulaznom skupu podataka i adekvatnosti opisa fizikalnih procesa. Konkretno, potrebno je što vjerodostojnije opisati seizmički izvor i građu Zemlje istraživanog područja da bi se mogle realistično reproducirati svojstva gibanja tla prilikom potresa. Detaljno poznavanje građe Zemlje i svojstava seizmičkog izvora još je uvijek relativno ograničeno, pa je definiranje modela dovoljno velike rezolucije, a samim time i simuliranja gibanja tla pri višim frekvencijama na deterministički način vrlo zahtjevno. Iz tog se razloga u numeričkim metodama simulacije poseže za tzv. hibridnim pristupom (Liu i sur., 2006; Mai i sur., 2010; Graves i Pitarka, 2010) u kojem se kombiniraju determinističke i stohastičke metode. Hibridni pristup simuliranja širokopojasnih seizmograma pokazao se uspješnim za razna područja (u Hrvatskoj za šire zagrebačko područje; Latečki i sur., 2021), a u ovome je istraživanju primijenjen na šire dubrovačko područje. Šire dubrovačko područje seizmički je najaktivnije područje u Hrvatskoj koje je u prošlosti bilo izloženo relativno čestim i jakim potresima. Najznačajniji od njih svakako je Veliki dubrovački potres iz 1667. godine koji je prouzročio intenzivne štete u široj regiji (Herak i sur., 1996; Albin, 2015). Dosadašnje procjene seizmičkog hazarda ovog područja temeljene su na opaženoj seizmičnosti (instrumentalno zabilježenim potresima i informacijama o povijesnim potresima) te svim dostupnim podatcima o aktivnim rasjedima (Herak i sur., 2011).

Cilj ovog istraživanja jest doprinijeti boljem razumijevanju gibanja tla prilikom potresa, a samim time i procjeni hazarda na temelju simulacija potresne trešnje u Hrvatskoj. Jedan od glavnih dijelova ovog istraživanja odnosi se na sastavljanje i testiranje primjenjivosti približnog radnog 3D modela Zemljine kore u simulacijama niskofrekventnih doprinosa. Pomoću novodefiniranog modela i hibridne metode simulirani su širokopojasni zapisi gibanja tla za umjerene do jake potrese. Validacija rezultata provedena je na temelju usporedbe simuliranih i zabilježenih zapisa i kvalitativne analize raznih mjera intenziteta

gibanja tla. Potom su definirani različiti seizmički izvori kako bi se izračunali scenariji Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine. Na temelju dobivenih rezultata definirana je baza simuliranih seizmograma, karata potresne trešnje te video zapisa simulacija ovisno o načinu na koji je definiran seizmički izvor. Rezultati ovog istraživanja pružaju vrijedan uvid u trenutna saznanja o građi i strukturi šireg dubrovačkog područja, glavnih seizmogenih izvora te primjenjivosti metode numeričke simulacije. Ovo istraživanje načelno prati metodologiju rada Latečki i sur. (2021) u kojem je metoda numeričke simulacije bila primijenjena na šire zagrebačko područje.

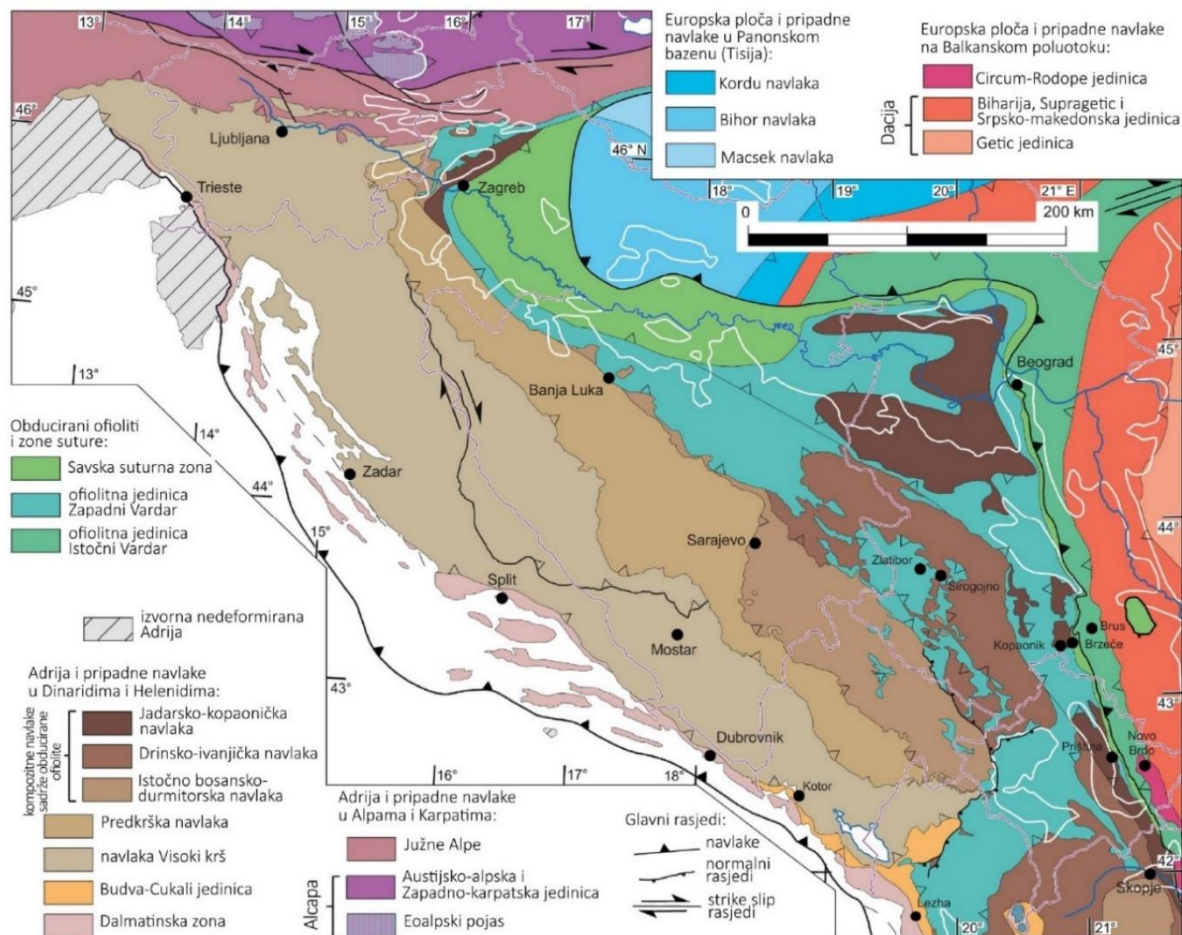
## **1.1. Seizmotektonska obilježja istraživanog područja**

Šire dubrovačko područje okarakterizirano je interakcijom Jadranske mikroploče i Dinarida smještenih na području zone sudara Euroazijske i Afričke ploče (slika 1.1). Jadranska mikroploča, koja se oblikovala kroz složene tektonske procese tijekom posljednjih 200 milijuna godina, igra ključnu ulogu u evoluciji Mediteranskog bazena i susjednih orogena. Njezin tektonski razvoj započinje otvaranjem oceana Neothethys tijekom srednjeg trijasa (Handy i sur., 2010). Tijekom jure, postepenim raspadom superkontinenta Pangee, formira se složeni sustav razlomljenih kontinentalnih fragmenata koji su odijeljeni oceanom (van Hinsbergen i sur., 2020). Zatvaranjem oceana Neotethys i migracijom nekoliko kontinentalnih fragmenata prema sjeveru formira se Jadranska mikroploča. Daljnja migracija prema sjeveru dovodi Jadransku mikroploču u kontakt s Europskom pločom, čime započinje subdukcija. Proces subdukcije rubnih dijelova Jadranske mikroploče sastavljenih od oceanske kore prelazi u proces kolizije kontinentalnih dijelova tijekom starijeg paleogena. Ovime se značajno usporava daljnja migracija Jadranske mikroploče prema sjeveru, pa preostali prostor omogućuje širenje i rotaciju dijela Europskog kontinenta prema jugu (Schmid i sur., 2008; Handy i sur., 2015). Uslijed rotacije, otvara se Zapadni Mediteran te se formiraju Apenini na zapadnoj granici Jadranske mikroploče. Konvergencija Jadranske mikroploče i Europe tijekom kenozoika nadalje stvara orogene suprotnih vergencija: Alpe na sjeveru, te Apenine i Dinaride na jugu (Handy i sur., 2010; 2015). Sjeverni dio Jadranske mikroploče danas se još uvijek okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (os vrtnje smještena je u Zapadnim Alpama; Ustaszewski i sur., 2008; Weber i sur., 2010) i podvlači pod Istočne Alpe i Dinaride (Nocquet i Calais, 2004; Vrabec i sur., 2006). Južni dio Jadranske mikroploče podvlači se pod Helenide (Grenerczy i sur., 2005; Bennett i sur., 2008), a GPS mjerenja brzine pokazuju pomake između 3 i 5 mm/god. u odnosu na europski kontinent. Ostatci Jadranske mikroploče, kao što su njeni oceanski dijelovi (tj. ofioliti), uklopljeni su u nizu formiranih planinskih lanaca te su prisutni duž središnjeg Mediterana. Dijelovi nedeformirane ploče prisutni su ispod Jadranskog mora, istarskog poluotoka te doline rijeke Po (slika 1.2).



**Slika 1.1.** Šire dubrovačko područje (crveni pravokutnik) i tektonske jedinice na području zone sudara Euroazijske i Afričke litosferne ploče između Istočnih Alpa i zapadne Turske prema Schmid i sur. (2020). Preuzeto i doručeno iz Belinić (2020).

Dinaridi su aktivni borano-navlačni pojas koji se proteže od Južnih Alpa na sjeverozapadu do Albanida i Helenida na jugoistoku. Prema sjeveroistoku, Dinaridi prelaze u Panonski bazen, a prijelaznu zonu predstavlja tzv. Savska suturna zona (Schmid i sur., 2008; slika 1.2).



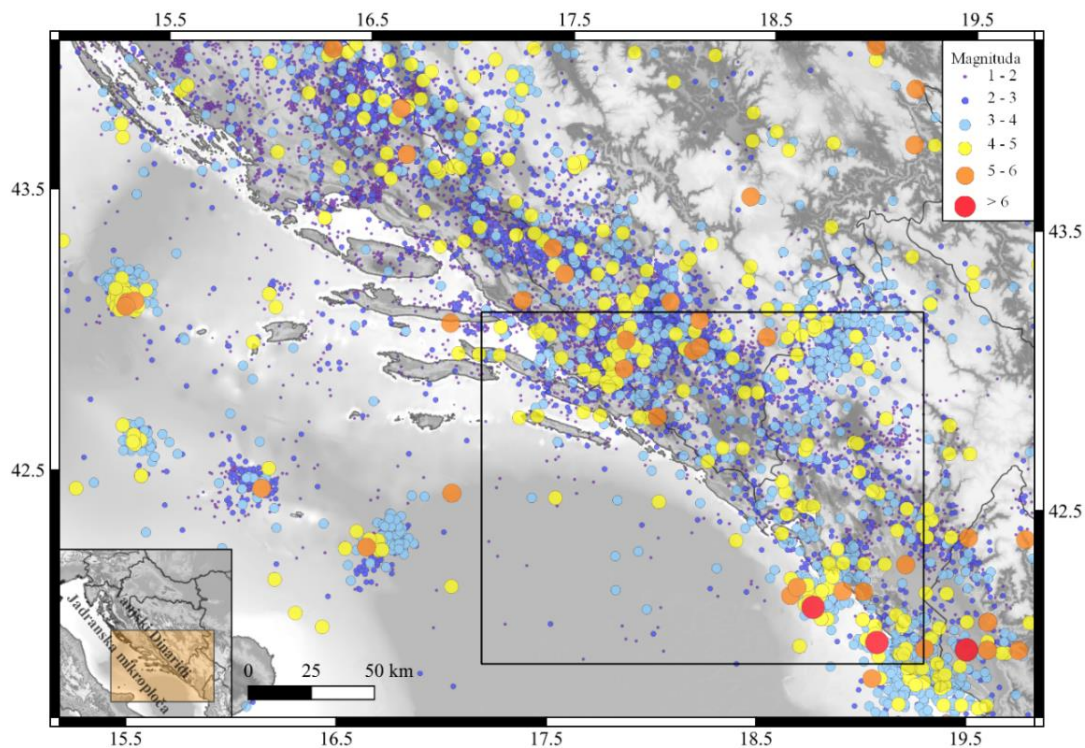
**Slika 1.2.** Tektonske jedinice na području Dinarida i okolice prema Schmid i sur. (2020). Doradena slika preuzeta je iz Belinić (2020).

Njihov nastanak vezan je uz konvergenciju i koliziju Jadranske mikroploče i Europske ploče tijekom mezozoika i kenozoika, te migraciju deformacijske fronte prema jugozapadu (Ustaszewski i sur., 2010). Glavna deformacijska faza Dinarida odvila se tijekom paleogena, a svojstveni sjeverozapadni smjer pružanja i jugozapadna vergencija rasjednih i boranih struktura posljedica su skraćivanja u smjeru sjever-jug, tj. sjeveroistok-jugozapad za vrijeme konačne faze izdizanja tijekom oligocena i miocena (Tomljenović i sur., 2008). Tijekom neogena, u sjevernom dijelu Dinarida te su strukture promijenjene u zapadno pružanje smjera istok-zapad s južnom vergencijom. Danas je kolizija najviše izražena uz istočnu Jadransku obalu u neposrednom podmorju, a manji dio prenosi se dalje u unutrašnjost skoro do prijelaznog područja prema Panonskome bazenu (Bennet i sur., 2008). Dinaridi se generalno mogu podijeliti na Unutrašnje i Vanjske (ili Krške) Dinaride. Unutrašnje Dinaride čine navlake Durmitor, Drina-Ivanjica i Jadar-Kopaonik te jedinica Zapadni Vardar koje su građene od ofiolitnih stijena i stijena akrecijske prizme navučениh preko mezozojskih sedimenata Jadranske mikroploče (Schmid i sur., 2008; slika 1.2). Vanjske Dinaride čine navlačne jedinice Dalmatinska zona, navlaka Budva-Cukali i navlaka Visokog krša koje su pretežno građene od karbonatnih stijena istaloženih tijekom mezozoika i paleogena na Jadranskoj karbonatnoj platformi (Vlahović i sur., 2005; Šumanovac, 2010; slika 1.2). Složena seizmotektonska struktura

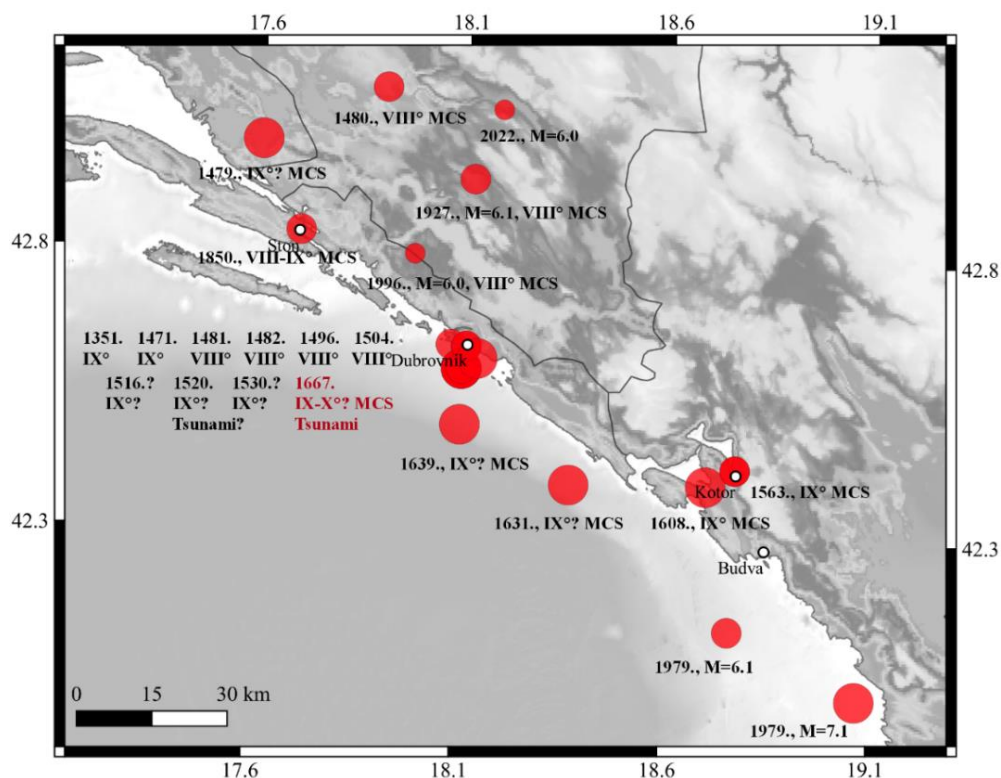
Unutrašnjih Dinarida rezultat je uzastopnih promjena režima naprezanja tijekom miocena, pliocena i kvartara (Prelogović i sur., 1998; Tomljenović i Csontos, 2001). Za razliku od njih, tijekom cijelog razdoblja formiranja Vanjskih Dinarida prevladavao je kompresijski režim naprezanja koji je i danas dominantan na čitavom području Dinarida (Herak i sur., 1995; Ivančić i sur., 2018).

Šire dubrovačko područje pripada jugoistočnom dijelu Vanjskih Dinarida. Jugoistočni dio Vanjskih Dinarida smatra se seizmički vrlo aktivnim područjem što je direktna posljedica interakcije Jadranske mikroploče i Dinarida. Prema Hrvatskom katalogu potresa (Herak i sur., 1996, ažurirana i revidirana verzija), plitka seizmička aktivnost (žarišta do 30 km dubine) paralelna je s obalom te se jasno ističu dvije regije povećane aktivnosti: Ston-Dubrovnik i Budva-Kotor (slika 1.3, a). Regije su odvojene uskim područjem smanjene aktivnosti što na regionalnoj skali odgovara tranzicijskoj zoni te interakciji dviju tektonskih jedinica: Jadranske mikroploče na sjeverozapadu te subdukcijske zone Helenida na jugoistoku (Handy i sur., 2019; Schmid i sur., 2020; Schmitz i sur., 2020). Regija Ston-Dubrovnik u prošlosti je bila izložena relativno čestim i jakim potresima intenziteta većih od VII °MCS ljestvice (MCS – Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica; Herak i sur., 1996; Albini, 2004; slika 1.3, b). Najznačajniji potres na ovom području je Veliki dubrovački potres iz 1667. godine koji je ujedno i najsnažniji dokumentirani potres priobalja Hrvatske. Veliki dubrovački potres detaljnije je opisan u sljedećem poglavlju. Recentnija seizmička aktivnost uključuje potres kod Stona iz 1850. godine (intenziteta VIII-IX °MCS; Herak i sur., 1996; Kuk i sur., 2000; Herak i sur., 2024), potres Ston-Slano iz 1996. godine ( $M = 6.0$ ; Markušić i sur., 1998; Govorčin i sur., 2020) te potres kod Berkovića iz 2022. godine ( $M_L = 6.0$ ; Dasović i sur., 2024). Regija Budva-Kotor (Crna Gora) značajnu seizmičku aktivnost bilježi u 16. i 17. stoljeću (Albini, 2004), a od recentne aktivnosti se ističe Crnogorski potres iz 1979. godine ( $M_W = 7.1$ , Benetatos i Kiratzi, 2006). Ovo je ujedno najjači instrumentalno zabilježeni potres na području Vanjskih Dinarida koji je, kao i Veliki dubrovački potres, uzrokovao štetu u čitavoj široj regiji.

a)



b)



**Slika 1.3.** a) Seizmičnost jugoistočnog dijela Vanjskih Dinarida i Jadranske mikroploče. Prikazani su epicentri potresa iz Hrvatskog kataloga potresa (Herak i sur., 1996, ažurirana i revidirana verzija) za koje je nepouzdanost u lokaciji epicentra manja od 3 km. b) Povijesni potresi u regijama Ston-Dubrovnik i Budva-Kotor.

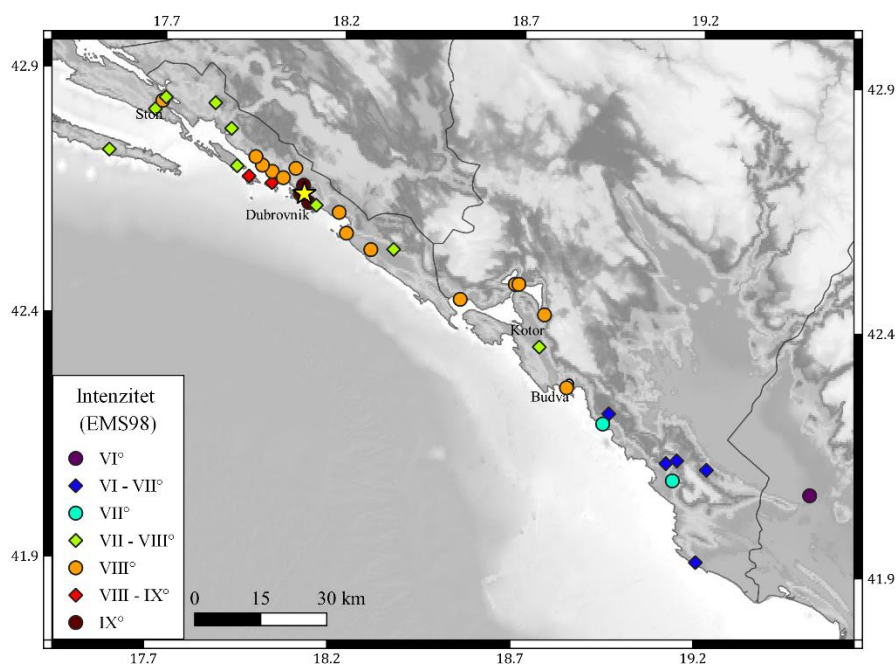


## 1.2. Veliki dubrovački potres

Kao posljedica međudjelovanja Jadranske mikroploče i Dinarida, 6. travnja 1667. godine oko 8 sati i 45 minuta po lokalnome vremenu područje Dubrovnika i šire okolice pogodio je katastrofalan potres, danas znan kao Veliki dubrovački potres. Premda ne postoje direktna seizmološka mjerenja ili zapisi, svojstva, obilježja i posljedice potresa poznate su na temelju brojnih povijesnih dokumenata pohranjenih u različitim arhivima.

Tako se primjerice u povijesnim dokumentima navodi da se uz snažan udarac čula glasna tutnjava koja je popratila potres, te da je sama trešnja potrajala preko petnaest sekundi. Brojne kuće su se odmah počele urušavati i nekoliko tisuća ljudi ostalo je pod ruševinama. Sa Srđa su se otkidale i kotrljale velike stijene prema gradu koji je prekrila gusta prašina. U zemlji su se pojavile pukotine, presušili su bunari, izvori i cisterne, te je dokumentirana i pojava tsunamija. Od teških oštećenja pošteđene su jedino obrambene zidine i tvrđave grada. Nakon potresa uslijedio je niz požara koji su danima harali gradom koji je naposljetku još bio i opljačkan. Pretpostavlja se da je u gradu stradalo oko 2200 ljudi (od ukupno 6000 stanovnika), ali s obzirom na manjak točnih informacija, ovo je i dalje samo gruba procjena. Požari i pljačke jedni su od glavnih razloga zašto je cjelokupni događaj bio tako katastrofalan za Dubrovnik koji se nakon toga unatoč pomoći s raznih strana vrlo dugo i sporo oporavljao, ali više nikada nije ostvario raniji sjaj (za detalje vidi Herak i sur., 2017).

Točan broj stanovnika kao i sam izgled grada Dubrovnika prije potresa je nepoznat. Zato procijenjeni intenzitet i razmjeri štete koju je prouzrokovao ovaj potres variraju od autora do autora. U pravilu Dubrovniku se dodjeljuje intenzitet između IX °EMS98 (EMS98 – Europska makroseizmička ljestvica; npr. Albini, 2015) i IX–X °EMS98 (npr. Markušić i sur., 2017). U Dubrovačkoj Republici, potres je osim samog Dubrovnika napravio velike štete u mjestima Gruž, Rijeka Dubrovačka, Mokošica i Rožata (IX °EMS98). Teško je stradalo i cijelo područje od Stona do Cavtata, te brojna naselja na otocima Lopudu i Koločep (VIII–IX °EMS98). Šteta je bila nešto manja u Malom Stonu, Slanom, Podgori, otoku Šipanu i Mljetu. Osim Dubrovačke Republike, potres je napravio mnogo štete u Kotoru, Budvi, Herceg-Novom, Perastu (VIII °EMS98), Ulcinju, Baru (VII °EMS98) te drugim manjim mjestima na Crnogorskom primorju (Albini, 2015; Albini i Rovida, 2016; 2018). Potres je napravio štetu od Skadra do Makarske, a osjetio se na zapadnoj i istočnoj obali Jadrana, od Carigrada i Smirne, Albanije sve do Genovskog zaljeva (slika 1.4).



**Slika 1.4.** Lokacija epicentra (žuta zvjezdica) i procijenjeni intenziteti Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine prema Albini i Rovida (2016; 2018).

Veliki dubrovački potres jedan je od najznačajnijih potresa u Hrvatskom katalogu potresa koji definira donju granicu za procjenu potresne opasnosti ovog područja (premašivanje horizontalnog vršnog ubrzanja iznosa 0.3 g za tlo tipa A i povratno razdoblje 475 godina; Herak i sur., 2011). Pouzdana procjena potresne opasnosti od iznimne je važnosti za sigurnost gradnje, a temelji se na poznavanju seizmičnosti i tektonike područja te trešnji tla prilikom ovako jakih, ali i rijetkih potresa. Iz tog je razloga u ovom radu provedena simulacija i analiza potresne trešnje uzrokovane Velikim dubrovačkim potresom za različite ulazne parametre kojima bi se taj potres mogao karakterizirati. Dobiveni parametri trešnje uspoređeni su s procijenjenim intenzitetima i na taj je način zaključeno koji od razmatranih scenarija najbolje odgovara stvarnome.

### 1.3. Simulacija potresne trešnje

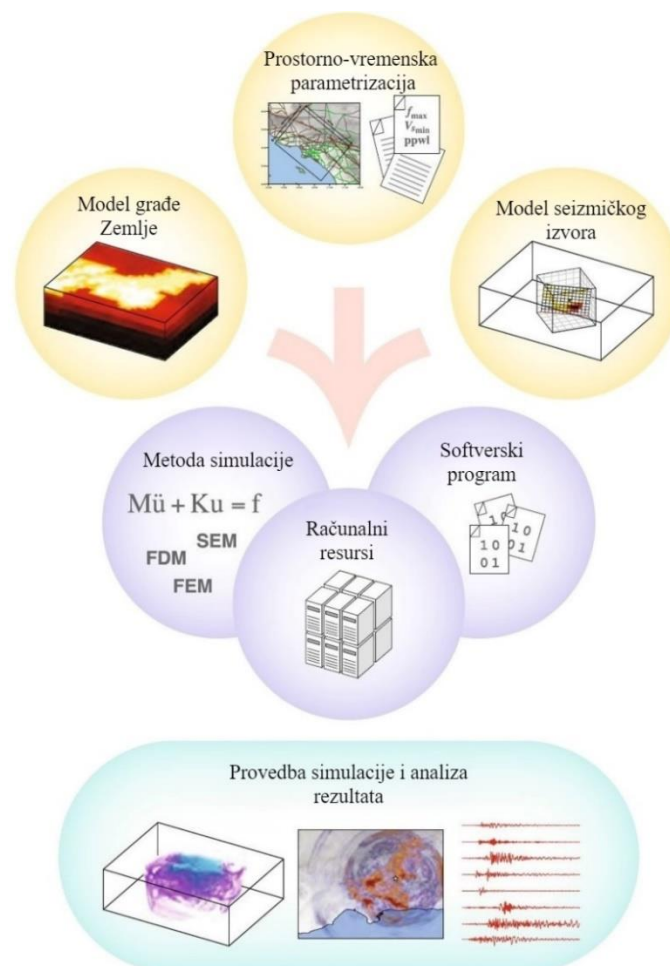
Za simulaciju potresne trešnje postoji nekoliko različitih pristupa, od determinističkih i stohastičkih metoda do atenuacijskih relacija. Ono što im je zajedničko jest cilj procjene parametara trešnje tla (npr. vršne akceleracije, vršne brzine, spektralne akceleracije gibanja tla itd.) na nekom području uzimajući u obzir parametre kao što su magnituda potresa, lokalni uvjeti tla, žarišni mehanizam i sl. Determinističke metode za predviđanje gibanja tla uzrokovanog potresom koriste numeričke metode te modele u kojima su eksplicitno opisani svi razmotreni fizikalni procesi. Za razliku od njih, stohastičke metode i atenuacijske relacije fiziku i svojstva seizmičkog izvora, te propagacijske i lokalne efekte opisuju indirektnim, statističkim modelima.

Počeci determinističkih metoda postavljeni su krajem 1960-ih korištenjem numeričkih metoda konačnih razlika (engl. *Finite-difference methods*; FDM) i konačnih elemenata (engl. *Finite-element methods*; FEM) u seizmologiji (Alterman i Karal, 1968; Lysmer i Drake, 1972). Za razliku od dotadašnjeg analitičkog pristupa, korištenje numeričkih metoda omogućilo je opis rasprostiranja valova kroz heterogeno anizotropno sredstvo, amplifikacijskih efekata te dinamike seizmičkih izvora (Boore, 1972; Smith, 1975). Razvojem algoritma i porastom računalnih resursa, s vremenom je osim 2D problema postalo moguće rješavati i 3D probleme. Prve takve simulacije koje su koristile FDM provedene su početkom 1990-ih (npr. Frankel i Vidale, 1992; Olsen i sur., 1995; Graves, 1996). Nedugo nakon toga, počela je i primjena FEM (npr. Bao i sur., 1998; Aagaard i sur., 2001) te pseudo-spektralnih metoda, kao što su metoda spektralnih elemenata (engl. *Spectral element metode*; SEM) i Galerkinova metoda (npr. Seriani, 1998; Komatitsch i Vilotte, 1998). SEM se pokazala kao jedna od najpraktičnijih metoda koje se primjenjuju u simulacijama na lokalnim, regionalnim i globalnim skalama. Izvorno je razvijena u računalnoj dinamici fluida (Patera, 1984; Maday i Patera, 1989), a kasnije je uspješno prilagođena rješavanju problema rasprostiranja seizmičkih valova (npr. Cohen i sur., 1993; Komatitsch, 1997; Faccioli i sur., 1997; Casadei i Gabellini, 1997; Komatitsch i Tromp, 1999). Porastom računalnih resursa i mogućnosti paralelnog računanja, uslijedio je daljnji razvoj determinističkih metoda i njihove primjene u simulacijama potresne trešnje (npr. Komatitsch i sur., 2010; Zhou i sur., 2012; Rietmann i sur., 2012) te procjeni seizmičkog hazarda (Graves i sur., 2011). Ipak, determinističke metode su i dalje ograničene na niske frekvencije jer zahtijevaju vrlo detaljan opis modela sredstva i izvora za koji često ne postoji dovoljno informacija. Stoga se za simuliranje širokopojasnog gibanja tla nerijetko poseže za tzv. hibridnim pristupom u kojem se uz determinističku metodu kombiniraju i stohastičke metode simulacije.

Stohastičke metode prvi predstavlja Boore (1983) za simulaciju dalekog polja slabih potresa predočenih točkastim modelom. Beresnev i Atkinson (1997; 1998) proširuju dalje ideju stohastičkih simulacija na probleme koji uključuju konačne modele izvora potresa na temelju ranijeg rada od Hartzell (1978) u kojem se jedan takav izvor dijeli na niz točkastih modela. Metodologija stohastičkih simulacija dalje je unaprijeđena i uspješno provedena u brojnim istraživanjima, npr. Dan i Sato (1999), Liu i sur. (2004), Motazedian i Atkinson (2005), Graves i Pitarka (2010), Assatourians i Atkinson (2012), Gusev (2014), Crempien i Archuleta (2015), Dang i sur. (2021). Princip svih stohastičkih metoda je u načelu isti: jedan od ulaznih parametara (npr. svojstva zračenja seizmičkog izvora) opisuje se stohastičkim modelom, dok su preostali (npr. rasprostiranje valova kroz sredstvo, efekti raspršenja) predočeni pojednostavljenom teorijskim ili empirijskim modelom. Glavna razlika u odnosu na determinističke metode jest ta da će izlazni skup podataka ponavljanjem računa uvijek biti drugačiji unatoč nepromijenjenom ulaznom skupu podataka zbog nasumičnosti u stohastičkoj metodi.

Neovisno o korištenoj metodi, metodologija simuliranja potresne trešnje može se sažeti u nekoliko glavnih koraka (shematski prikaz metodologije dan je na slici 1.5):

1. Prostorno-vremenska parametrizacija problema koja podrazumijeva definiciju radne domene (lokalna, regionalna, globalna) i frekvencije/perioda razlučivosti za koju se nastoje provesti simulacije;
2. Definiranje modela i geometrije građe Zemlje istraživanog područja (brzine seizmičkih valova, gustoće, anizotropnost i atenuacijska svojstva, topografija, batimetrija, dodatni fluidni i apsorpcijski slojevi i sl.) i modela seizmičkog izvora potresa (kinematičko ili dinamičko modeliranje, prostorno-vremenska svojstva izvora);
3. Odabir metode (stohastička, deterministička, hibridna) i načina provedbe simulacije (softverski program, računalni resursi);
4. Provedba simulacije i analiza rezultata koja podrazumijeva interpretaciju te validaciju simulirane potresne trešnje (npr. usporedbom sa zabilježenim parametrima trešnje tla).



**Slika 1.5.** Shematski prikaz metodologije simuliranja potresne trešnje. Preuzeto i doradeno iz Taborda i Roten (2015).

Kao što je navedeno, cilj simulacija potresne trešnje jest procjena parametra trešnje tla na nekom području za razmatrati potres. Simuliranjem trešnje tla moguće je dobiti informaciju o gibanju tla na proizvoljnoj lokaciji od interesa, a ne samo mjestima na kojima su postavljeni mjerni instrumenti. Drugim riječima, moguće je definirati virtualnu mrežu seizmoloških postaja i iz nje dobiti zapise gibanja tla ovisno o simuliranome scenariju na svim lokacijama koje prekriva radna domena. Kontrola i analiza ulaznih parametara te same metode omogućuje detaljan uvid u to kako njihova promjena utječe na krajnje rezultate. Konkretno, validacijom na temelju usporedbe sa zabilježenim gibanjem tla moguće je procijeniti prikladnost korištenih metoda te koliko su dobro opisani seizmički izvor i model građe Zemlje korišteni u simulaciji. Konačno, simuliranjem potresne trešnje moguće je procijeniti parametre trešnje tla za sve potencijalne (ne)realistične, (ne)očekivane i povijesne scenarije potresa na istraživanom području. Navedene prednosti simulacija glavna su motivacija ovog istraživanja čiji su ciljevi i hipoteze navedeni u narednom poglavlju.

## **1.4. Motivacija i ciljevi istraživanja**

Prilikom procjene seizmičkog hazarda neophodno je pravilno okarakterizirati seizmičke izvore, te propagacijske i lokalne efekte koji utječu na potresnu trešnju nekog područja. Simulacijom potresne trešnje moguće je doprinijeti poboljšanju razumijevanja ovih komponenti jer upravo one čine ulazni (seizmički izvor, 3D model, prostorno-vremenska parametrizacija) i izlazni (parametri gibanja tla) skup podataka simulacije. Zato je glavna motivacija ovog rada bilo primijeniti takvu metodu na širem dubrovačkom području koje je s izrazito visokim procjenama seizmičkog hazarda jedno od seizmički najugroženijih područja u Hrvatskoj. U simulacijama je korišten skup dostupnih geofizičkih i geoloških podataka iz kojih je bilo moguće sastaviti te potom validirati 3D model. Ovaj model čini polaznu bazu o strukturnoj građi istraživanog područja, a simulacije dobivene korištenjem modela skup podataka o potresnoj trešnji na širem dubrovačkom području. Detaljan opis korištenih podataka dan je u poglavlju 2., a same metodologije simuliranja gibanja tla u poglavlju 3. Rezultati istraživanja nalaze se u poglavlju 4, a njihova diskusija u poglavlju 5. Zaključci istraživanja nalaze se u poglavlju 6.

U skladu s navedenim, postavljeni očekivani ciljevi i hipoteze ovog rada mogu se sažeti kao:

Ciljevi:

1. Na temelju dostupnih podataka i prijašnjih istraživanja, sastaviti približan 3D radni seizmički model kore za šire dubrovačko područje.
2. Evaluirati primjenjivost novodefiniranog modela u simulacijama u odnosu na druge modele i za različite seizmičke izvore.

3. Definirati bazu simuliranih seizmograma, karata potresne trešnje (engl. *shakemaps*) i video vizualizacija simulacija za različite seizmičke izvore na istraživanom području.

Hipoteze:

1. Novodefinirani 3D model reprezentativan je za istraživano područje i primjenjiv u za provedbu realističnih simulacija potresne trešnje.
2. Kombinacija nejednolike razdiobe pomaka duž rasjedne plohe s bilateralnim ili unilateralnim rasjedanjem bolje opisuje seizmički izvor Velikog dubrovačkog potresa od modela u kojem je razdioba pomaka duž rasjedne plohe jednolika.

## 2. Podatci

U narednim poglavljima dan je pregled i opis podataka korištenih za izradu 3D modela te ostalih parametara potrebnih za provedbu i evaluaciju uspješnosti simulacija.

### 2.1. Građa i struktura istraživanog područja

Jedan od ciljeva ovog rada bio je na temelju dostupnih podataka i prijašnjih istraživanja sastaviti približan radni 3D seizmički model kore za šire dubrovačko područje. U tu svrhu korišteni su podatci o topografiji rezolucije 30 m preuzeti iz baze podataka *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 30 m* (2013). Podatci o batimetriji rezolucije 115 m preuzeti su iz baze podataka *EMODnet Bathymetry Consortium* (2020). Za potrebe simulacija, oba skupa podataka su preuzorkovana na rezoluciju od  $0.001^\circ$  (111.2 m) korištenjem bilinearne interpolacije opisane u Dodatku A.

Za potrebe izrade modela, korišteni su podatci o tzv. markirnim horizontima koji odvajaju litološke cjeline unutar gornje kore koja čini jednu od glavnih strukturnih jedinica 3D modela. Horizonti su definirani na temelju listova Osnovne geološke karte SFRJ i Hrvatske, 2D seizmičkih profila i bušotina koje je za korištenje ustupila Agencija za ugljikovodike te rezultata terenskih geoloških istraživanja i strukturnih mjerenja u sklopu projekta DuFAULT, IP-2020-02-3960 (*Karakterizacija i monitoring rasjednog sustava šireg dubrovačkog područja*). Konkretno, izdvojena su četiri markirna horizonta: podina kvartarnih klastičnih naslaga (krovina pliocenskih naslaga), podina pliocenskih klastičnih naslaga (krovina miocenskih naslaga), podina miocensko-oligocensko-eocenskih klastičnih naslaga (krovina karbonata eocensko do gornjotrijaske starosti) i podina karbonata eocenske do gornjotrijaske starosti. Popis literature i detaljan opis obrade samih podataka na temelju kojih su definirani ovi horizonti dostupan je u Sečanjanj i sur. (2024). Originalna lateralna rezolucija podataka preuzorkovana je na 125 m korištenjem bilinearne interpolacije.

Conradov diskontinuitet koji odvaja gornju od donje kore nije u potpunosti jasno definiran na istraživanom području. Ipak, uzet je u obzir radi definiranja granice na kojoj brzine putovanja P-valova ispod baze karbonata postižu vrijednost od  $v_P = 7.0$  km/s. Podatci o dubini Conradovog diskontinuiteta preuzeti su iz regionalnog modela građe kore *EPcrust* (Molinari i Morelli, 2011) koji je detaljnije opisan u poglavlju 4.1.1.

Podatci o dubini Mohorovičićevog diskontinuiteta preuzeti su iz Stipčević i sur. (2020). U njihovom radu dubine su određene na temelju analize funkcije prijelnika P-vala teleseizmičkih potresa. Za potrebe simulacije, originalna lateralna rezolucija od 8.3 km preuzorkovana je na veću od 125 m korištenjem bilinearne interpolacije.

Vrijednosti brzina P-valova u litološkim cjelinama gornje kore koje čine 3D model određene su na temelju podataka iz bušotina Dubravka more-1, Melita 1 i Mirjana 1 opisanih u radu od Sečanjanj i sur. (2024). Brzine P-valova u donjoj kori i plaštu pretpostavljene su konstantnima i uzete na temelju 1D lokalnog modela građe kore opisanog u poglavlju 4.1.1. U svakom elementu modela, vrijednosti brzina putovanja S-valova i gustoća određene su na temelju relacija proporcionalnosti s brzinama P-valova (Brocher, 2005):

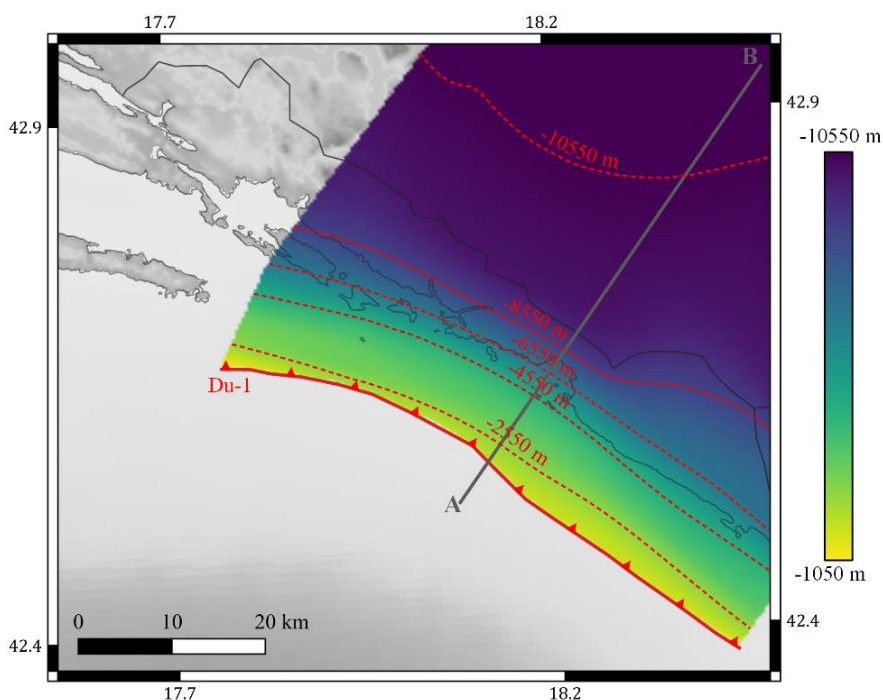
$$\begin{aligned} v_S(\text{km/s}) &= 0.7858 - 1.2344v_P + 0.7949v_P^2 - 0.1238v_P^3 + 0.0064v_P^4, \\ \rho(\text{g/cm}^3) &= 1.6612v_P - 0.4721v_P^2 + 0.0671v_P^3 - 0.0043v_P^4 + 0.000106v_P^5. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Za usporedbu i validaciju niskofrekventnih seizmograma, korišteni su podatci pomoću kojih su sastavljena još dva modela za šire dubrovačko područje. Prvi model sastavljen je na temelju jednodimenzionalnog modela *Ston\_H08*, tj. modela za južni dio Jadrana. Ovaj model redovno se koristi pri relociranju potresa u Hrvatskom katalogu potresa (Herak i sur., 1996, ažurirana i revidirana verzija). Drugi model sastavljen je na temelju trodimenzionalnog regionalnog modela *EPcrust* (Molinari i Moreli, 2011). *EPcrust* je model građe kore reprezentativan za čitavu Europsku ploču. Prekriva područje od sjeverne Afrike do Sjevernog pola (od 20 °N do 90 °N) i od Srednjoatlantskog grebena do Urala (od 40 °W do 70 °E). Model je sastavljen na temelju skupa podataka drugih lokalnih, regionalnih i globalnih modela, te dostupnih geofizičkih i geoloških istraživanja. Lateralna rezolucija modela iznosi 0.5°, pa je za potrebe simulacija model preuzorkovan na gušću mrežu lateralne rezolucije od 125 m korištenjem bilinearne interpolacije opisane u Dodatku A.

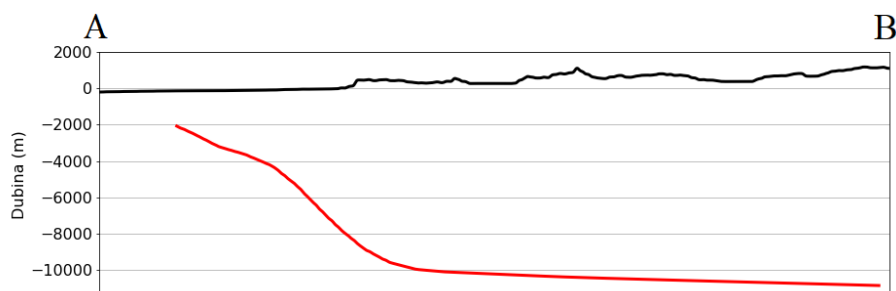
Za simulaciju Velikog dubrovačkog potresa korišten je segment čeonog reversnog rasjeda Dalmatinske navlake Du-1 na kojemu pretpostavljamo da je taj potres nastao. Rasjed Du-1 interpretiran je na temelju 2D seizmičkih profila i klasificiran kao aktivan na temelju niza kriterija kao što su npr. recentna deformacija morskog dna i kvartarnih naslaga, korelacija s razdiobom projiciranih hipocentara potresa i sl. Interpretacija i klasifikacija rasjeda navedena je i opisana u Sečanjanj i sur. (2024). Trag, dubine pojedinih dijelova te jedan profil rasjeda Du-1 prikazani su na slici 2.1. Kao što je navedeno, u ovom istraživanju korišten je jedan dio ovog rasjeda prilikom opisa seizmičkog izvora Velikog dubrovačkog potresa (detalji opisa seizmičkog izvora dani su u poglavlju 3.1.1).



a)



b)



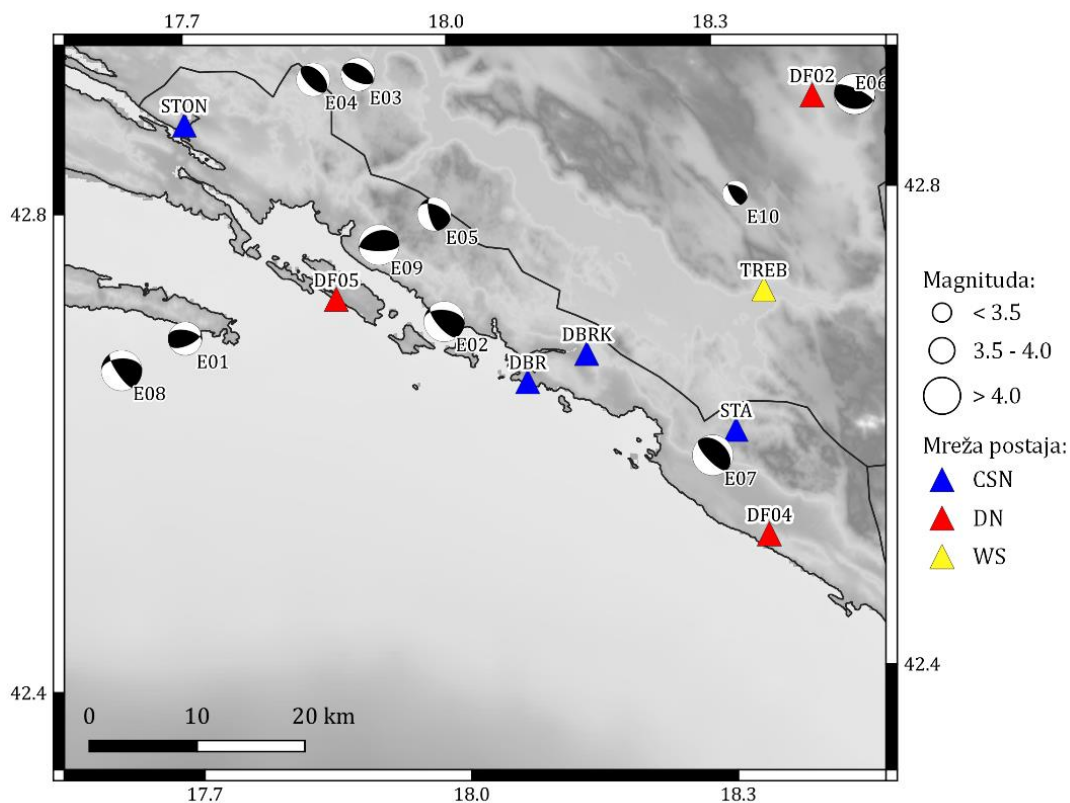
**Slika 2.1.** a) Trag (crvena linija s trokutima) i dubine pojedinih dijelova čeonog rasjeda Dalmatinske navlake Du-1; b) Profil AB – crna linija predstavlja površinu, a crvena rasjed Du-1.

## 2.2. Seizmogrami zabilježenog gibanja tla i žarišni mehanizmi izvora potresa

Radi potvrde uspješnosti simulacija, simulirani seizmogrami uspoređeni sa zabilježenim gibanjem tla za deset potresa. Korišteni su zapisi širokopojasnih trokomponentnih seizmografa Hrvatske seizmološke mreže (Sveučilište u Zagrebu, 2001; mreža CSN), privremene mreže instrumenata Du-Net HrZZ projekta DuFAULT, IP-2020-02-3960 (mreža DN) te jedna postaja Seizmičke mreže Republike Srpske (Republički Hidrometeorološki Zavod, 2011; mreža WS). Popis postaja i osnovne informacije o njima nalaze se u tablici 2.1. Postaje su prikazane na slici 2.2.

**Tablica 2.1.** Osnovne informacije o seizmološkim postajama korištenim u istraživanju:  $\varphi$  – geografska širina,  $\lambda$  – geografska dužina,  $a$  – nadmorska visina.

Mreža	Seizmološka postaja	$\varphi$ (°E)	$\lambda$ (°N)	$a$ (m)
CSN	Dubrovnik (DBR)	42.6473	18.0789	93
	Dubrovnik – Golubov kamen (DBRK)	42.6691	18.1469	293
	Stravča (STA)	42.6008	18.3124	462
	Ston (STON)	42.8716	17.6999	4
DN	Bileća (DF02)	42.8778	18.4137	431
	Radovčići (DF04)	42.5125	18.3456	218
	Šipanska luka (DF05)	42.7217	17.8657	80
WS	Trebinje (TREB)	42.7170	18.3500	300



**Slika 2.2.** Karta postaja (trokuti) i žarišnih mehanizama potresa (projekcije na donju žarišnu hemisferu, engl. *beachball*). Različitim bojama naznačene su mreže postaja, a veličina *beachball-a* odgovara magnitudi potresa. Potresi su naznačeni kao E01 – E10, a njihov opis dan je u tablici 2.2.

Na slici 2.2 prikazane su i lokacije te žarišni mehanizmi za deset potresa koji su korišteni u simulacijama. Potresi su preuzeti iz Hrvatskog kataloga žarišnih mehanizama potresa (M. Herak, 2023., osobna komunikacija) u kojem su žarišni mehanizmi određeni pomoću orijentacije prvog pomaka P-vala. U tablici 2.2. dane su osnovne informacije o potresima

i njihovim mehanizmima. Popis postaja koje su uspješno zabilježile pojedini potres nalazi se u tablici A.1 u Dodatku A.

**Tablica 2.2.** Osnovne informacije o potresima korištenim u istraživanju:  $T_{HYP}$  – hipocentralno vrijeme,  $\varphi$  – geografska širina,  $\lambda$  – geografska dužina,  $h$  – dubina žarišta,  $M$  – magnituda,  $\varphi_1$  – smjer pružanja rasjeda,  $\delta_1$  – nagib rasjeda,  $\lambda_1$  – kut relativnog pomaka (za dvije čvorne plohe, poredane bez odabira preferencijalne plohe).

Oznaka potresa	$T_{HYP}$ (UTC)	$\varphi$ (°E)	$\lambda$ (°N)	$h$ (km)	$M$	$\varphi_1(^{\circ})/\delta_1(^{\circ})/\lambda_1(^{\circ})$
E01	18.4.2006.	42.693	17.693	12	3.90	67/51/67
	19:18:58.9					281/44/116
E02	31.3.2008.	42.700	17.987	11	4.03	277/39/55
	00:14:34.9					139/59/115
E03	14.12.2011.	42.909	17.899	18	4.00	115/51/87
	19:47:13.9					300/39/94
E04	21.4.2012.	42.906	17.848	17	3.80	315/37/89
	21:48:45.2					136/53/91
E05	1.5.2015.	42.790	17.980	13	3.55	293/41/45
	21:25:35.0					166/62/122
E06	8.1.2016.	42.877	18.462	23	4.40	95/25/73
	13:7:39.1					294/66/98
E07	23.12.2016.	42.580	18.285	12	4.40	315/27/89
	23:39:22.5					136/63/91
E08	8.11.2019.	42.668	17.620	10	4.15	267/37/37
	01:26:4.1					146/69/121
E09	24.2.2021.	42.766	17.916	8	4.15	249/29/71
	22:07:16.1					90/63/100
E10	21.3.2022.	42.798	18.322	17	3.08	295/37/61
	15:16:18.6					150/58/110

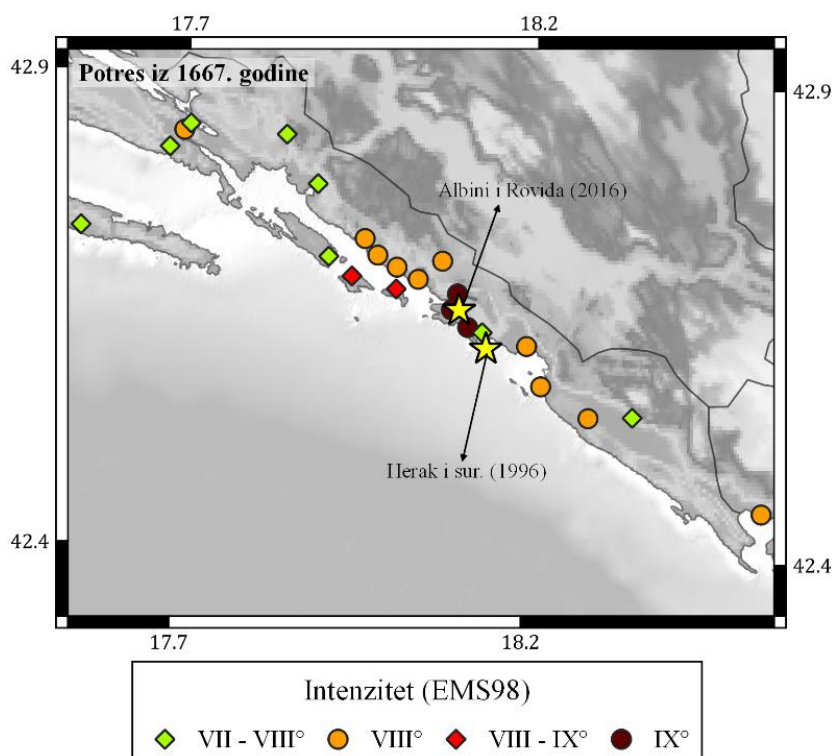
Odabrani su potresi za koje postoje zapisi na bar dvije seizmološke postaje i čija je magnituda  $3.0 \leq M \leq 4.5$  (umjereni do jaki potresi) jer je u tom slučaju, zbog relativno malog područja loma i volumena izvora, izvor potresa moguće prikazati jednostavnim točkastim modelom (engl. *point source*). U slučaju kompleksnije predodžbe geometrije izvora, npr. modelom konačnih izvora/rasjeda (engl. *finite-fault source*), u valnom polju postaje teško odvojiti i razlučiti doprinose izvora od doprinosa rasprostiranja valova kroz sredstvo. Mogućnost razlučivanja ova dva doprinosa važna je za validaciju uspješnosti modela da u simulacijama reproducira zabilježena svojstva i specifičnosti gibanja tla koje proizlaze isključivo iz modela građe kore. Upravo je zato i poželjno koristiti potrese manje magnitude čiji se izvor može prikazati jednostavnim točkastim modelom.

## 2.3. Podatci za Veliki dubrovački potres

Za potrebe provedbe scenarija potresne trešnje uzrokovane Velikim dubrovačkim potresom definirani su ulazni parametri kojima je opisan seizmički izvor te podatci potrebni za provjeru rezultata. Podatci o vremenu nastanka i magnitudi Velikog dubrovačkog potresa preuzeti su iz Hrvatskog kataloga potresa (Herak i sur., 1996, ažurirana i revidirana verzija; tablica 2.3). Podatci o intenzitetima po ljestvici EMS98 koji su korišteni prilikom validacije rezultata preuzeti su iz istraživanja Albini i Rovida (2016; 2018) i prikazani su na slici 2.3.

**Tablica 2.3.** Osnovne informacije o Velikom dubrovačkom potresu:  $T_{HYP}$  – hipocentralno vrijeme,  $\varphi$  – geografska širina,  $\lambda$  – geografska dužina,  $M$  – magnituda.

	$T_{HYP}$ (UTC)	$\varphi$ (°E)	$\lambda$ (°N)	$M$	Izvor
Potres iz 1667. godine	6.4.1667. 07:45:00	42.619	18.138	6.9	Herak i sur. (1996)
	6.4.1667. 07:45:00	42.659	18.098	6.4	Albini i Rovida (2016)



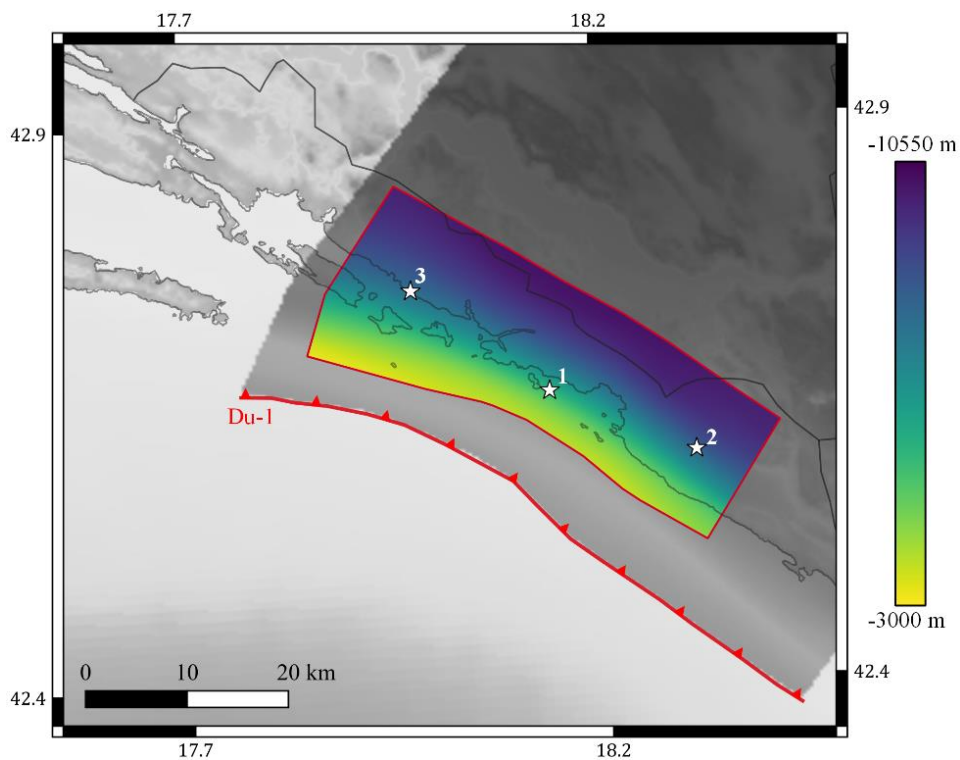
**Slika 2.3.** Karta intenziteta po ljestvici EMS98 za Veliki dubrovački potres iz 1667. godine. Lokacije epicentara dvaju istraživanja naznačene su zvjezdicama.

Za potres iz 1667. godine na slici 2.3 naznačene su dvije potencijalne lokacije epicentra i vrijednosti magnitude (detalji se nalaze u tablici 2.3). U radu od Albini i Rovida (2016)

lokacija epicentra i momentna magnituda određene su iz intenziteta pomoću tzv. metode Boxer (Gasperini i sur., 1999; 2010). U Hrvatskom katalogu potresa (Herak i sur., 1996, ažurirana i revidirana verzija) lokacija epicentra je također procijenjena iz intenziteta istraživanja Albini i Rovida (2016, 2018), ali korištenjem tzv. metode MEEP (kratica od engl. *Macroseismic Estimation of Earthquake Parameters*; Musson i Jimenez, 2008) dok je magnituda određena iz makroseizmičkih podataka (Herak, 1995).

Iz oba je izvora jasno da je magnituda potresa dovoljno velika da se seizmički izvor ne može predočiti jednostavnim točkastim modelom već je potrebno koristiti model konačnih izvora. Za jedan takav izvor potrebno je definirati lokaciju i geometriju rasjeda (parametri  $\varphi_1$ ,  $\delta_1$  i  $\lambda_1$ ), točku inicijacije (točku u kojoj je započelo pucanje rasjeda) te druge parametre kojima je okarakteriziran način pucanja duž rasjedne površine (detalji o ovim parametrima opisani su u poglavlju 3.1.1).

Rasjedna površina Velikog dubrovačkog potresa određena je kao jedan segment čeonog rasjeda Dalmatinske navlake Du-1 koji se aktivirao prilikom samog potresa (M. Sečanj, 2023., osobna komunikacija; slika 2.4).



**Slika 2.4.** Trag (crvena linija s trokutima) i projekcija na površinu (sivi poligon) čeonog rasjeda Dalmatinske navlake Du-1. Skala se odnosi na dubine pojedinih dijelova segmenta korištenog za definiranje modela konačnih izvora (područje unutar crvenog poligona). Zvezdice označavaju lokacije točaka inicijacije za slučaj bilateralnog (1) i unilateralnih (2 i 3) scenarija rasjedanja.

Ukupna rasjedna površina iznosi 748 km<sup>2</sup>, a magnituda procijenjena iz nje korištenjem relacija koje su predložili Wells i Coppersmith (1994) iznosi  $M_W = 6.92$ . S obzirom na to da u svojem radu Albini i Rovida (2016) napominju da je alternativna lokacija epicentra potresa iz 1667. smještena u moru, u ovome je istraživanju za točku inicijacije tzv. bilateralnog rasjedanja korištena lokacija iz Hrvatskog kataloga potresa koja odgovara toj alternativni ( $\varphi = 42.619^\circ\text{E}$ ,  $\lambda = 18.138^\circ\text{N}$ ). Nadalje, kako je točna lokacija točke inicijacije nepoznata, na području aktiviranog segmenta promotrena su još dva slučaja tzv. unilateralnog rasjedanja s proizvoljno odabranim lokacijama točaka inicijacije smještenih na jugoistočnom ( $\varphi = 42.563^\circ\text{E}$ ,  $\lambda = 18.312^\circ\text{N}$ ) i sjeverozapadnom ( $\varphi = 42.711^\circ\text{E}$ ,  $\lambda = 17.975^\circ\text{N}$ ) dijelu segmenta (slika 2.4). Konačno, iz geometrije rasjedne površine usrednjavanjem su određeni parametri  $\varphi_1 = 298^\circ$  i  $\delta_1 = 33^\circ$  (M. Sečanj, 2023., osobna komunikacija). Kut relativnog pomaka krovine u odnosu na podinu pretpostavljen je tako da odgovara čistom reversnom rasjedanju ( $\lambda_1 = 90^\circ$ ) koje je tipično za ovo područje (Herak i sur., 1995).

## 2.4. Ostala parametrizacija

Preostala parametrizacija vezana je uz definiranje atenuacijskih i lokalnih parametara potrebnih za računanje amplifikacijskih faktora.

Za simulacije niskofrekventnih i visokofrekventnih doprinosa, faktor dobrote S-valova kojim se opisuje atenuacija u zadanom elementu 3D modela, odnosno sloju 1D modela, određen je na temelju tzv. Olsenovih empirijskih relacija (Olsen i sur., 2013). Prema Olsenovim relacijama, faktor dobrote S-valova  $Q$  linearno je ovisan o brzini S-valova  $v_s$  i omjer te dvije veličine zove se Olsenov omjer ( $Q/v_s$ ). Tipična vrijednost Olsenovog omjera iznosi 0.02 s/m te je kao takva uzeta i u ovom istraživanju za potrebe definiranja atenuacijskog modela u simulacijama.

Za simulacije visokofrekventnih doprinosa definirani su eksponent  $x$  u izrazu proporcionalnosti  $Q$ -faktora o frekvenciji,  $Q \sim f^x$ , empirijski spektralni parametar  $\kappa$  i prosječna brzina S-valova u prvih 30 m ( $v_{s30}$ ) ovisno o postaji za koju se računaju simulirani seizmogrami. Vrijednosti su popisane u tablici 2.4.

Parametar  $x$  za postaje DBRK, STON i STA određen na temelju koda- $Q$  metode (Aki i Chouet, 1975) preuzet je iz rada Dasović i sur. (2012). Za preostale postaje vrijednost  $x$  uzeta je tako da odgovara direktnom mjerenju po udaljenosti najbliže postaje, dakle:  $x_{DBR} = x_{DBRK}$ ,  $x_{DF02} = x_{DF04} = x_{TREB} = x_{STA}$ , i  $x_{DF05} = x_{STON}$ .

**Tablica 2.4.** Vrijednosti parametara po pojedinim seizmološkim postajama potrebni za izvođenje simulacija visokofrekventnih doprinosa. \* se odnosi na postaje za koje postoji direktno mjerenje parametra.

Seizmološka postaja	$x$	$\kappa$	$v_{s30}$ (m/s)
DBR	0.75	0.024	900
DBRK	0.75*	0.024	900
DF02	0.85	0.065	350
DF04	0.85	0.047	480
DF05	0.82	0.041	540
STA	0.85*	0.017*	1280*
STON	0.82*	0.016*	1390*
TREB	0.85	0.077	300

Parametar  $\kappa$  za postaje STA i STON preuzet je iz rada Stanko i sur. (2017). U radu su vrijednosti parametra određene pomoću metode Anderson i Hough (1984). Za ostale postaje  $\kappa$  je procijenjena iz relacije odnosa  $\kappa$ - $v_{s30}$  koja se temelji na nizu globalnih opažanja i modeliranja Fourierovog spektra (Van Houtte i sur., 2011):

$$\ln(\kappa) = 3.490 - 1.062 \cdot \ln(v_{s30}). \quad (2.2)$$

Direktna mjerenja vrijednosti  $v_{s30}$  za postaje STA i STON preuzete se iz Stanko i sur. (2017). Za preostale postaje vrijednosti su preuzete iz baze USGS  $v_{s30}$  (Allen i Wald, 2007) u kojoj su  $v_{s30}$  vrijednosti procijenjene na temelju nagiba topografije.

# 3. Metode

U narednim poglavljima opisane su metode simulacije, metode validacije i vizualizacije rezultata simulacija korištene u ovome istraživanju.

## 3.1. Metodologija simuliranja gibanja tla

Radi poboljšanja procjene determinističkog seizmičkog hazarda i rizika na nekom području, nerijetko se razmatraju i analiziraju simulirani zapisi gibanja tla. Samim time, u interesu je definirati što robusniju metodu simulacije koja će za što širi raspon frekvencija moći reproducirati glavna svojstva gibanja tla prilikom potresa. Reproducibilnost potresne trešnje ovisit će o detaljnom poznavanju lokalnih svojstava i geoloških struktura tla istraživanog područja te svojstava seizmičkog izvora.

Općeniti pregled i povijesni razvoj metoda simulacija dan je u poglavlju 1.3. Većina današnjih metoda za simulacije širokopojasnog gibanja tla koristi tzv. hibridni pristup (npr. Sekiguchi i sur., 2008; van Ede i sur., 2020; Lee i sur., 2020). U hibridnom se pristupu širokopojasno gibanje tla dobiva sjedinjavanjem odvojeno izračunatog niskofrekventnog ( $f \leq 1$  Hz) i visokofrekventnog ( $f > 1$  Hz) doprinosa. Na frekvencijama manjim od 1 Hz, izvor i efekti rasprostiranja valova kroz sredstvo opisuju se determinističkim modelom čime se nastoji reproducirati generalni oblik i amplituda zabilježenog gibanja. Ovakav pristup simuliranja niskofrekventnih doprinosa pokazao se vrlo uspješnim za područja u kojima je potrebno koristiti 3D model da bi svojstva simulirane trešnje odgovarale zabilježenoj (npr. Süss i Shaw, 2003; Iwata i sur., 2008; Graves i sur., 2011; Molinari i sur., 2015; Ajala i sur., 2019; Bradley i sur., 2020). Na frekvencijama većim od 1 Hz koriste se empirijsko-stohastičke metode (npr. Mai i sur., 2010; Graves i Pitarka, 2010) u kojima se zračenje izvora opisuje stohastičkim, a rasprostiranje valova kroz sredstvo i efekti raspršenja empirijskim modelom. Ovakav pristup simuliranju visokofrekventnih doprinosa potječe od činjenice da dosadašnji deterministički modeli precjenjuju vrijednosti gibanja tla za visoke frekvencije. Uz to, na ovakav se način učinkovito kompenzira nedostatak informacija kojima se opisuje model sredstva i izvora visokofrekventnog doprinosa. Dosadašnji pokušaji primjene hibridnog pristupa u Hrvatskoj su napravljeni samo na području grada Zagreba (Lokmer i sur., 2002; Herak i sur., 2004; Latečki i sur., 2021).

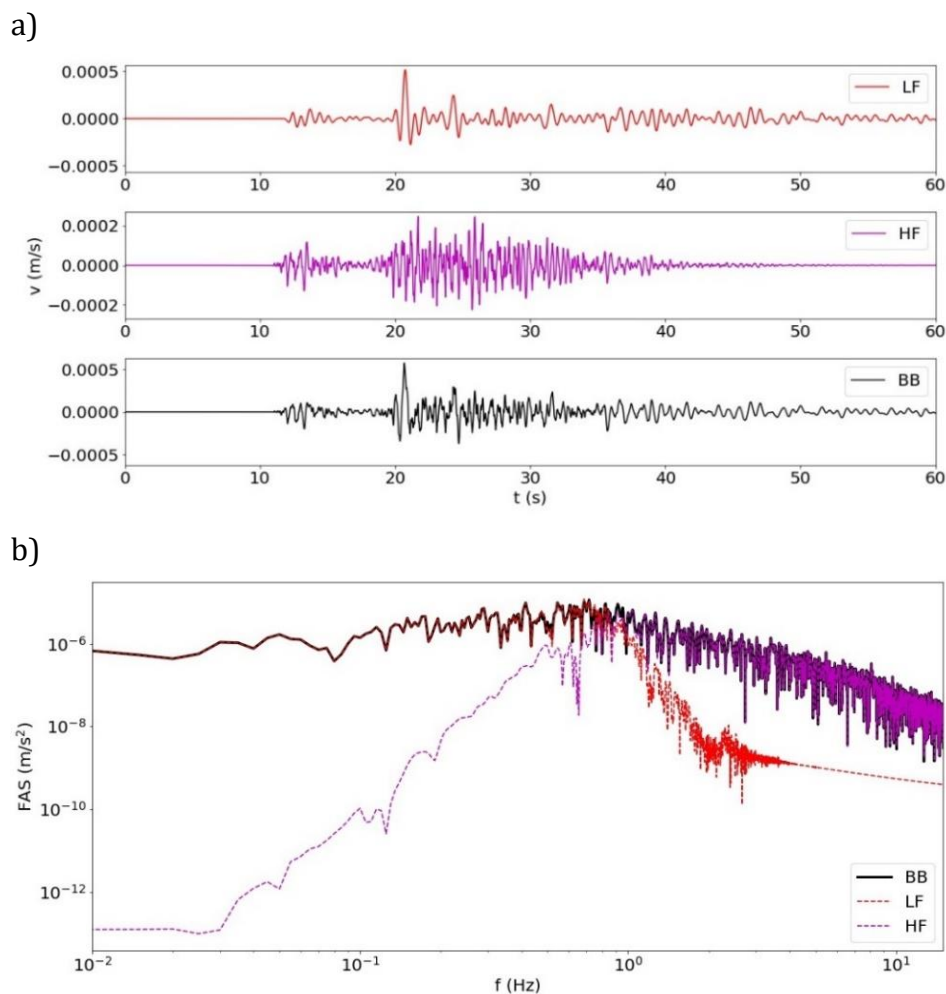
U ovom radu po uzoru na Latečki i sur. (2021) korišten hibridni pristup za računanje širokopojasnih zapisa gibanja tla ( $f \leq 10$  Hz) za potrese navedene u poglavlju 2.2. U narednim poglavljima dan je način na koji su okarakterizirani seizmički izvori te generalni opis metoda za računanje niskofrekventnog i visokofrekventnog doprinosa gibanja tla. Odvojeno dobiveni zapisi sjedinjeni su u jedinstveni vremenski niz kako su predložili



Hartzell i sur. (1999). Ukratko, doprinosi se superponiraju u vremenskoj domeni nakon primjene Butterworthovih filtra četvrtog reda čije su rubne frekvencije  $f_{filt}$  dane kao:

$$f_{filt} = f_B \cdot \exp(\pm 0.0484). \quad (3.1)$$

U izrazu 3.1,  $f_B$  se odnosi na frekvenciju preklapanja dvaju doprinosa, konkretno  $f_B = 1$  Hz. Pozitivni predznak se uzima u slučaju filtriranja niskofrekventnog (niskopropusni filter,  $f_{filt} = 1.05$  Hz), a negativni kod filtriranja visokofrekventnog doprinosa (visokopropusni filter,  $f_{filt} = 0.95$  Hz). Predodžba sjedinjavanja dvaju doprinosa u jedinstveni zapis dana je na slici 3.1.



**Slika 3.1.** a) Niskofrekventni (LF), visokofrekventni (HF) i širokopolasni (BB) simulirani zapisi gibanja brzine tla. b) Amplituda Fourierovog spektra (FAS) simuliranih seizmograma. Zapisi su filtrirani pomoću Butterworthovih filtra četvrtog reda čije su rubne frekvencije dane izrazom 3.1. za frekvenciju preklapanja  $f_B = 1$  Hz.

### 3.1.1. Karakterizacija seizmičkog izvora

Uz model građe kore, karakterizacija i prikaz seizmičkog izvora najvažniji je parametar koji je potrebno definirati da bi se provele simulacije gibanja za neko područje. U ovome radu izvori potresa predloženi su na dva načina, ovisno o tome koriste li se prilikom validacije modela građe kore u simulacijama (umjereni do jaki potresi) ili scenarijima trešnje tla Velikog dubrovačkog potresa.

Seizmički izvori umjerenih do jakih potresa korištenih prilikom validacije modela predloženi su jednostavnim točkastim modelom (dvostrukim parom sila koje djeluju u jednoj točki). Ovakav prikaz izvora koristan je kada je u valnom polju potrebno jasno razlučiti doprinos od rasprostiranja valova kroz sredstvo. Popis korištenih potresa i osnovne informacije o njima nalaze se u poglavlju 2.2. Za svaki od njih točkasti model izvora definiran je u tzv. formatu Harvard CMT (engl. *Centroid-Moment Tensor*; Ekström, 2012). Primjer točkastog modela u formatu CMT dan je na slici 3.2.

PDE	2006	4	18	19	18	58.9	42.6930	17.6930	12.00	3.90	3.90	E01
event name:	E01											
time shift:	0.0000											
half duration:	0.0000											
latorUTM:	42.6930											
longorUTM:	17.6930											
depth:	12.0000											
Mrr:	8.0247309e+21											
Mtt:	-8.7463589e+21											
Mpp:	7.2162803e+20											
Mrt:	7.1380989e+20											
Mrp:	2.6837988e+21											
Mtp:	-1.0062800e+21											

**Slika 3.2.** Primjer prikaza točkastog izvora potresa u formatu CMT. U prvom retku *PDE* označava preliminarne pretpostavke za potres *E01*: godinu, mjesec, dan, sat, minutu i sekundu nastanka potresa, geografsku širinu i dužinu te dubinu žarišta potresa (km), magnitudu prostornih i površinskih valova. Parametar *time shift* označava početak djelovanja izvora u odnosu na hipocentralno vrijeme (s). Parametrom *half duration* definira se vrijeme (s) potrebno da Gaussova vremenska funkcija izvora postigne maksimalnu vrijednost. Parametri *latorUTM* i *lonorUTM* označavaju geografsku širinu i dužinu ili x i y koordinate u projekciji UTM lokacije epicentra potresa. Dubina žarišta *depth* dana je u kilometrima. *Mrr*, *Mtt*, *Mpp*, *Mrt*, *Mrp* i *Mtp* su komponente tenzora momenta (dyn·cm) za zadani potres u sfernom koordinatnom sustavu ( $r, \theta/t, \varphi/p$ ).

Za svaki potres navedene su informacije o hipocentralnome vremenu, lokaciji žarišta, vremenskoj funkciji izvora, magnitudi i tenzoru momenta. S obzirom na to da nisu posebno izračunate, pretpostavlja se da su različito definirane magnitude jednake i za razmatrane potrese dane vrijednostima *M* u tablici 2.2. U skladu s time, iz momentne

magnituda  $M_w = M$  računa se skalarni seizmički moment  $M_0$  u dyn·cm ( $10^{-7}$  N·m) pomoću izraza (Kanamori, 1977):

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 10.7. \quad (3.2)$$

Iz skalarnog seizmičkog momenta i poznatih vrijednosti smjera pružanja rasjeda  $\varphi_1$ , nagiba rasjeda  $\delta_1$ , te kuta relativnog pomaka krovine u odnosu na podinu  $\lambda_1$ , dalje se mogu izračunati komponente momenta tenzora (Aki i Richards, 1980):

$$\begin{aligned} M_{rr} &= M_0 \cdot \sin 2\delta_1 \cdot \sin \lambda_1, \\ M_{tt} &= -M_0 \cdot (\sin \delta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin 2\varphi_1 + \sin 2\delta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \sin^2 \varphi_1), \\ M_{pp} &= M_0 \cdot (\sin \delta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin 2\varphi_1 - \sin 2\delta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \cos^2 \varphi_1), \\ M_{rt} &= -M_0 \cdot (\cos \delta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1 + \cos 2\delta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \sin \varphi_1), \\ M_{rp} &= M_0 \cdot (\cos \delta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin \varphi_1 - \cos 2\delta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \cos \varphi_1), \\ M_{tp} &= -M_0 \cdot (\sin \delta_1 \cdot \cos \lambda_1 \cdot \cos 2\varphi_1 + 0.5 \cdot \sin 2\delta_1 \cdot \sin \lambda_1 \cdot \sin 2\varphi_1). \end{aligned} \quad (3.3)$$

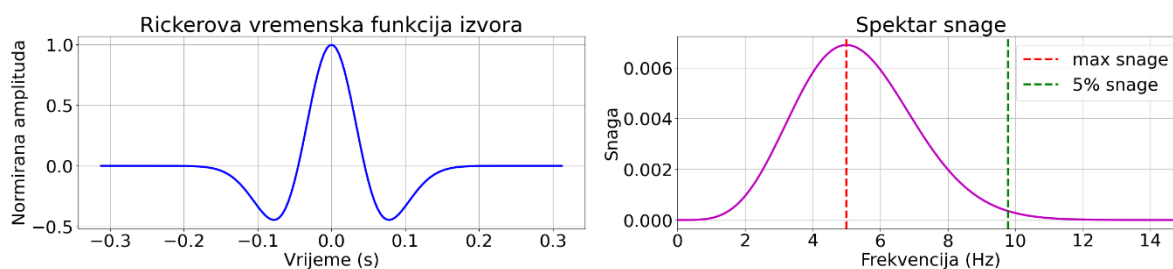
Za točkaste izvore parametar *time shift* postavlja se na vrijednost 0, odnosno pretpostavlja se da izvor počinje djelovati u hipocentralno vrijeme potresa. Parametar *half duration* ovisi o tome kako je definirana vremenska funkcija izvora STF (engl. *Source-Time Function*), tj. promjena momenta. Konkretno, vrijednost će biti različita od nule jedino ako je promjena momenta predočena Gaussijanom. U tom će se slučaju prilikom simulacija automatski provesti korak konvolucije simuliranih seizmograma s Gaussovom funkcijom izvora. Ako se za STF pretpostavlja drugačiji izgled, *half duration* se postavlja na vrijednost 0 i konvolucija sa željenom STF provodi se u postprocesiranju simuliranih seizmograma.

U ovome radu promjena momenta predočena je tzv. Rickerovom funkcijom koja se pokazala vrlo uspješnom u postprocesiranju simuliranih seizmograma za slučajeve kada nisu poznate specifičnosti samih izvora (Gholamy i Kreinovich, 2014). Rickerova STF  $s(t)$  zapravo odgovara drugoj derivaciji Gaussijana:

$$s(t) = (1 - 2t^2\pi^2\omega^2) \cdot \exp(-t^2\pi^2\omega^2). \quad (3.4)$$

U izrazu 3.4,  $t$  je proteklo vrijeme, a  $\omega$  središnja frekvencija, odnosno frekvencija za koju spektar snage Rickerove funkcije postiže svoj maksimum. Primjer Rickerove vremenske funkcije izvora i njenog spektra snage dan je na slici 3.3.

Središnja frekvencija Rickerove funkcije bira se tako da većina energije (snaga  $\geq 5\%$  maksimuma snage) upada u frekventni raspon koji je od interesa za simulacije. Kao generalno pravilo to je pola vrijednosti tražene frekvencije simulacija (npr. Afanasiev i sur., 2019), pa se tako za simulacije do 10 Hz za središnju frekvenciju uzima  $\omega = 5$  Hz.



**Slika 3.3.** Primjer Rickerove vremenske funkcije izvora (lijevo) i njenog spektra snage (desno). Crvenom isprekidanom linijom na spektru je naznačena središnja frekvencija  $\omega$ , odnosno frekvencija za koju snaga postiže maksimum ( $f = 5$  Hz). Zelenom isprekidanom linijom na spektru je naznačena frekvencija na kojoj vrijednost snage nakon maksimuma pada na 5 % ( $f = 9.79$  Hz).

Seizmički izvor Velikog dubrovačkog potresa predložen je modelom konačnih izvora (nizom dvostrukih parova sila koje djeluju duž rasjedne plohe). Ovakva formulacija važna je u slučaju potresa većih magnituda ( $M \geq 5.0$ ) za koje se volumen izvora više ne može zanemariti i aproksimirati točkom. Nadalje, s obzirom na manjak informacija o dinamici samog procesa rasjedanja, u ovome je radu korišten kinematički prikaz modela konačnih izvora.

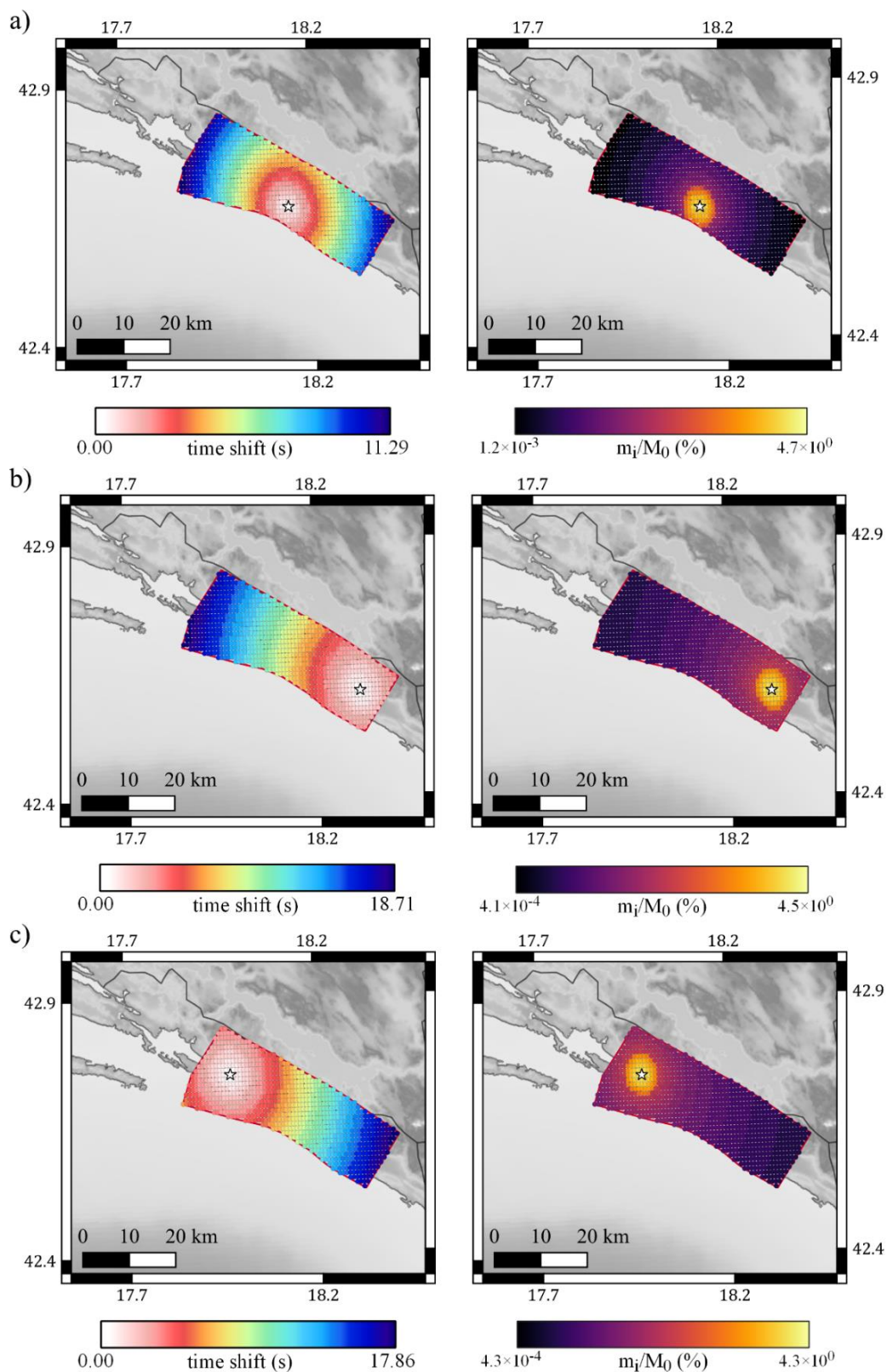
Kod kinematičkih prikaza izvora potrebno je definirati geometriju (parametri  $\varphi_1$ ,  $\delta_1$  i  $\lambda_1$ ) i lokaciju rasjeda, moment tenzor, magnitudu, hipocentar (točku inicijacije) te prostorno-vremensku razdiobu pomaka duž rasjedne plohe. Informacije o prostorno-vremenskoj razdiobi pomaka mogu se procijeniti na temelju inverznih metoda koje koriste direktna geofizička i geološka opažanja nekog potresa. U slučaju povijesnih potresa za koje ne postoje direktna mjerenja, razdiobu pomaka duž rasjeda potrebno je pretpostaviti na temelju drugih poznatih parametara (npr. duljine rasjeda na površini). Najjednostavnija pretpostavka je prostorno jednolika razdioba pomaka duž cijele rasjedne plohe s bilateralnom (rasjedanje započinje u sredini rasjedne plohe i koncentrično se širi konstantnom brzinom) ili unilateralnom (rasjedanje započinje s jedne strane rasjedne plohe) vremenskom simetrijom rasjedanja. Bilo kakva druga, odnosno nejednolika razdioba pomaka i/ili vremenski asimetrično rasjedanje, podrazumijeva poznavanje pojedinosti prilikom samog rasjedanja te se temelji na dinamičkom modeliranju izvora.

U ovom istraživanju Veliki dubrovački potres simuliran je korištenjem ukupno šest različitih modela konačnih izvora koji su kombinacija nejednolike ili jednolike razdiobe pomaka uz bilateralno, JI-SZ (jugoistok-sjeverozapad) unilateralno ili SZ-JI (sjeverozapad-jugoistok) unilateralno rasjedanje. Podatci o geometriji rasjeda, točkama inicijacije i magnitudi iz koje je prema izrazu 3.3. definiran tenzor momenta opisani su u poglavlju 2.3. Za svaki od šest slučajeva, mreža točaka koje čine model konačnih izvora definirana je u odnosu na promatranu točku inicijacije tako da prekriva područje aktiviranog segmenta rasjeda Du-1 s prostornom rezolucijom od 500 m. U skladu s time, za slučaj bilateralnog rasjedanja model sadrži ukupno  $N = 916$  točaka, za unilateralno rasjedanje

JI-SZ  $N = 910$  točaka, a za unilateralno rasjedanje SZ-JI  $N = 920$  točaka. Parametar *time shift* definiran je tako da u točki inicijacije iznosi 0, a u preostalim točkama se računa iz omjera udaljenosti promatrane točke od hipocentra i brzine pucanja rasjeda. Brzina pucanja rasjeda  $v_r$  određena je kao 80% vrijednosti prosječne brzine S-valova na dubinama 5–8 km zadanog 3D modela ( $\overline{v_s} = 3.5$  km/s) i iznosi  $v_r = 2.8$  km/s (vidi Graves i Pitarka, 2010).

Na širem dubrovačkom području do sad nije napravljena niti jedna studija koja se bavi dinamičkim modeliranjem izvora jakih potresa. Stoga je u ovom istraživanju za potrebe analize utjecaja svojstava izvora osim jednolike razdiobe pomaka korišten i jedan model vrlo pojednostavljene nejednolike razdiobe. Konkretno, pretpostavljeno je da je neposrednoj okolini točke inicijacije (udaljenosti do 5 km) oslobođeno 80 % ukupnog seizmičkog momenta (energije) pri čemu veličina pojedinačnih momenata po točkama s udaljenošću prati Gaussovu krivulju. Kod preostalih točaka energija opada s kvadratom udaljenosti od točke inicijacije, a suma pojedinačnih seizmičkih momenata odgovara ostatku 20 % ukupnog momenta. Ukupni skalarni moment  $M_0$  dobiven je sumiranjem pojedinačnih skalarnih momenata  $m_i$  svake točke duž rasjedne plohe te prema izrazu 3.2 za  $M_W = 6.92$  iznosi  $M_0 = 3.02 \times 10^{26}$  dyn-cm. Radijus neposredne okoline od 5 km pretpostavljen je po uzoru na područje najvećih pomaka u modelu konačnih izvora Crnogorskog potresa iz 1979. godine (Benetatos i Kiratzi, 2006) koji je po svojstvima ( $M_W = 7.1$ ,  $\varphi_1 = 300^\circ$ ,  $\delta_1 = 14^\circ$  i  $\lambda_1 = 88^\circ$ ) sličan polaznom pretpostavljenom izvoru Velikog dubrovačkog potresa.

Na slici 3.4 u prostoru su prikazane vrijednosti parametra *time shift* te postotci pojedinačnih momenta segmenata  $m_i$  u odnosu na ukupni skalarni moment  $M_0$  za tri slučaja nejednolike razdiobe pomaka ovisno o točki inicijacije. Za tri slučaja jednolike razdiobe pomaka, parametar *time shift* ponovno ovisi o točki inicijacije kao što je prikazano na slici 3.4, a vrijednosti  $m_i$  dane su kao omjer  $M_0/N$  pri čemu je  $N$  broj točaka duž rasjedne površine. U skladu s time za bilateralno, JI-SZ unilateralno i SZ-JI unilateralno rasjedanje omjeri  $m_i/M_0$  iznose redom: 1.09 %, 1.11 % i 1.09 %.



**Slika 3.4.** Parametar *time shift* i omjer  $m_i/M_0$  za slučaj a) bilateralnog; b) JI-SZ unilateralnog; c) SZ-JI unilateralnog rasjedanja. Bijelom zvjezdicom je naznačena točka inicijacije, a crvenim poligonom rasjedna površina opisana u poglavlju 2.3.

Kao i u slučaju točkastih modela, svi modeli konačnih izvora predočeni su u formatu Harvard CMT (primjer je dan na slici 3.5), a u postprocesiranju simuliranih seizmograma, napravljena je konvolucija s Rickerovom vremenskom funkcijom izvora.

```
PDE 1667 4 6 7 45 0.0 42.711 17.975 7.792 6.92 6.92 DF_FF0
event name: DF_FF0
time shift: 0.0000
half duration: 0.0000
latorUTM: 42.7110
longorUTM: 17.9750
depth: 7.7920
Mrr: -3.0986186e+23
Mtt: -4.5319616e+24
Mpp: 4.8418235e+24
Mrt: 5.1579776e+24
Mrp: -1.0464362e+25
Mtp: 3.5020598e+24
.
.
.
PDE 1667 4 6 7 45 16.3 42.486 18.317 4.204 6.92 6.92 DF_FF740
event name: DF_FF740
time shift: 16.2968
half duration: 0.0000
latorUTM: 42.4860
longorUTM: 18.3170
depth: 4.2040
Mrr: -3.7203653e+19
Mtt: -5.4413128e+20
Mpp: 5.8133494e+20
Mrt: 6.1929408e+20
Mrp: -1.2564067e+21
Mtp: 4.2047582e+20
.
.
.
```

**Slika 3.5.** Primjer prikaza modela konačnih izvora potresa u formatu CMT. U prvom retku *PDE* označava preliminarne pretpostavke za izvor segmenta *DF\_FF0*: godinu, mjesec, dan, sat, minutu i sekundu hipocentralnog vremena, geografsku širinu i dužinu te dubinu žarišta (km), magnitudu prostornih i površinskih valova. Parametar *time shift* označava početak djelovanja izvora u odnosu na hipocentralno vrijeme (s). Parametrom *half duration* definira se vrijeme (s) potrebno da Gaussova vremenska funkcija izvora postigne maksimalnu vrijednost. Parametri *latorUTM* i *lonorUTM* označavaju geografsku širinu i dužinu ili x i y koordinate u UTM projekciji lokacije epicentra izvora na zadnom segmentu. Dubina žarišta *depth* dana je u kilometrima. *Mrr*, *Mtt*, *Mpp*, *Mrt*, *Mrp* i *Mtp* su komponente tenzora momenta (dyn·cm) za zadani izvor u sfernom koordinatnom sustavu ( $r, \theta/t, \varphi/p$ ). Struktura se ponavlja za *N* točaka koje čine model konačnih izvora.

### 3.1.2. Simuliranje niskofrekventnog doprinosa gibanja tla ( $f \leq 1$ Hz)

Za računanje niskofrekventnog doprinosa gibanja tla (frekvencije  $f \leq 1$  Hz) korištena je deterministička metoda spektralnih elemenata SEM (engl. *Spectral-Element Method*) koja je implementirana u softverskim paketima *SPECFEM3D Cartesian* (Komatitsch i sur., 2010, 2016) i *Salvus* (Afanasiev i sur., 2019). SEM je kontinuirana

Galerkinova metoda koja je izvorno razvijena u računalnoj dinamici fluida (Patera, 1984). Danas je uspješno prilagođena te jedna od najprimjerenijih metoda za rješavanje problema rasprostiranja seizmičkih valova kroz sredstvo jer posjeduje vrlo dobra konvergentna svojstva. Nadalje, metoda je pogodna za paralelnu implementaciju na superračunalima i klasterima, te omogućuje računanje na vrlo kompleksnim mrežama elemenata koje uključuju informacije o topografiji i batimetriji te nehomogenosti, anizotropnosti i atenuaciji u 3D sredstvu. U nastavku slijedi kratki pregled metode SEM.

Metoda SEM temelji se na slaboj formulaciji valne jednačbe. Valna jednačba za  $n$ -dimenzionalno sredstvo domene  $\Omega$  i vrijeme  $t \in \langle 0, T \rangle$  dana je kao:

$$\rho \partial_t^2 \mathbf{u} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}. \quad (3.5)$$

U izrazu 3.5  $\rho$  predstavlja gustoću sredstva,  $\mathbf{u}$  polje pomaka,  $\boldsymbol{\sigma}$  tenzor napetosti, a  $\mathbf{f}$  vanjsku silu. Tenzor napetosti prema Hookeovom zakonu linearno je ovisan o polju pomaka:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \nabla \mathbf{u}, \quad (3.6)$$

gdje je  $\mathbf{C}$  matrica konstanta elastičnosti koja za slučaj anizotropnog sredstva ima 21 različitih elemenata, a  $:$  notacija kontrakcije tenzora. Za jedinstveno rješenje jednačbe 3.5, osim Hookeovog zakona trebaju biti zadovoljeni rubni i početni uvjeti:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}}|_{\partial\Omega} = \bar{\boldsymbol{\tau}}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{u}|_{t=0} = \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{x}), \quad (3.7)$$

gdje su  $\bar{\boldsymbol{\tau}}(\mathbf{x})$ ,  $\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x})$  i  $\bar{\mathbf{v}}(\mathbf{x})$  prostorno varijabilna polja napetosti, pomaka i brzina,  $\hat{\mathbf{n}}$  vektor normale na rubovima domene  $\partial\Omega$ . Da bi se dobila slaba formulacija, izraz 3.5 množi se s glatkom tzv. testnom funkcijom  $\mathbf{w}$  i potom integrira po čitavoj domeni:

$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \partial_t^2 \mathbf{u} \, d^n \mathbf{x} = \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}) \, d^n \mathbf{x} + \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \mathbf{f} \, d^n \mathbf{x}, \quad (3.8)$$

gdje  $\mathbf{w}$  ne ovisi o vremenu  $t$ . Primjenom teorema o divergenciji, izraz 3.8 prelazi u:

$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \partial_t^2 \mathbf{u} \, d^n \mathbf{x} = \int_{\partial\Omega} \mathbf{w} \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}}) \, d^{n-1} \mathbf{x} - \int_{\Omega} \nabla \mathbf{w} : \boldsymbol{\sigma} \, d^n \mathbf{x} + \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \mathbf{f} \, d^n \mathbf{x}. \quad (3.9)$$

U izrazu 3.9 mogu se izdvojiti četiri doprinosa: volumni integral gustoće i akceleracije (član mase), površinski integral normalne komponente napetosti (rubni član), volumni integral unutarnjih sila (član krutosti) i volumni integral vanjske sile (član sile). Uz uvjet da je na površini  $\boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}}|_{\partial\Omega} = \mathbf{0}$ , izraz 3.9 prelazi u:



$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \partial_t^2 \mathbf{u} \, d^n \mathbf{x} = - \int_{\Omega} \nabla \mathbf{w} : \boldsymbol{\sigma} \, d^n \mathbf{x} + \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \mathbf{f} \, d^n \mathbf{x}. \quad (3.10)$$

Na ovaj način, rubni uvjet da napetost iščezava na slobodnoj površini je implicitno uključen. Ovo je jedna od glavnih prednosti metode SEM u odnosu na metodu konačnih razlika, posebno u slučaju modeliranja valnog polja na područjima gdje su izraženi efekti topografije i batimetrije te sama domena iskazuje određeni stupanj geometrijske kompleksnosti. Naravno, u izrazu 3.9 moguće je ubaciti bilo koji rubni uvjet za koji površinski integral ne mora nužno iščezavati. To su primjerice rubni uvjeti granica krutih i tekućih domena te bilo kojih unutarnjih diskontinuiteta duž kojih se pretpostavlja da je normalna napetost konstantna ili apsorpcijske granice ( $\Gamma$ ) koje se postavljaju na rubovima radne domene kako simulacije ne bi sadržavale refleksije na njima. U softverskim paketima *SPECFEM3D Cartesian* i *Salvus* koriste se tzv. Clayton-Engquist apsorpcijski rubni uvjeti (1977):

$$\frac{1}{2} \mathbf{C} : (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \cdot \hat{\mathbf{n}} = v_P \rho \partial_t \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} + \sum_k v_S \rho \partial_t \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{t}}_k \text{ na } \Gamma, \quad (3.11)$$

gdje su  $v_P$  i  $v_S$  brzine P- i S-valova,  $\partial_t \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}}$  normalna, a  $\partial_t \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{t}}_k$  tangencijalne komponente brzine valova.

Uz notaciju  $(\mathbf{a}, \mathbf{b})_{\Omega} = \int_{\Omega} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \, d^n \mathbf{x}$  i  $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle_{\partial \Omega} = \int_{\partial \Omega} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \, d^{n-1} \mathbf{x}$ , te primjenu Hookeova zakona (3.6), izraz 3.9 može se zapisati kao:

$$(\rho \partial_t^2 \mathbf{u}, \mathbf{w})_{\Omega} - \langle (\mathbf{C} : \nabla \mathbf{u}) \cdot \hat{\mathbf{n}}, \mathbf{w} \rangle_{\partial \Omega} + (\mathbf{C} : \nabla \mathbf{u}, \nabla \mathbf{w})_{\Omega} = (\mathbf{f}, \mathbf{w})_{\Omega}. \quad (3.12)$$

Slaba formulacija sada glasi: za svaki  $t \in \langle 0, T \rangle$  i svaki  $\mathbf{w} \in V^n$  potrebno je naći  $\mathbf{u}$  za koji je zadovoljen izraz 3.12.  $V$  predstavlja odabrani Galerkinov prostor. Da bi se riješila jednačba 3.12 potrebno je odabrati pogodnu aproksimaciju domene  $V$  konačnom domenom  $V_h \approx V$ . U tu svrhu koristi se Galerkinova metoda u kojoj se testne funkcije  $\mathbf{w}$  i rješenja  $\mathbf{u}$  aproksimiraju setom funkcija  $\boldsymbol{\phi}$  iz istog prostora. Neka je  $\mathfrak{B}$  baza, a  $N$  dimenzija od  $V_h$ . Tada se svaka kontinuirana funkcija  $g$  može prikazati nizom diskretnih vrijednosti  $\boldsymbol{\phi}_j$  i koeficijenata  $F_j$ :

$$g(\mathbf{x}) \approx \sum_{j=1}^N F_j \boldsymbol{\phi}_j(\mathbf{x}). \quad (3.13)$$

Analogno tome, derivacije se mogu aproksimirati kao:

$$\nabla g(\mathbf{x}) \approx \sum_{j=1}^N F_j \nabla \boldsymbol{\phi}_j(\mathbf{x}). \quad (3.14)$$

Preciznost danih aproksimacija uvjetovana je time koliko  $V_h$  dobro opisuje prostor  $V$ . Osim samih funkcija, potrebno je i diskretizirati integrale po volumenu:

$$\int_{\Omega} g(\mathbf{x}) d^n \mathbf{x} \approx \sum_{i=1}^M W_i^{\Omega} \sum_{j=1}^N F_j \phi_j(\mathbf{x}_i), \quad (3.15)$$

i po površini:

$$\int_{\partial\Omega} g(\mathbf{x}) d^{n-1} \mathbf{x} \approx \sum_{i=1}^M W_i^{\partial\Omega} \sum_{j=1}^N F_j \phi_j(\mathbf{x}_i), \quad (3.16)$$

gdje su  $W_i$  težine po točkama integracije  $\mathbf{x}_i$ . U metodi konačnih elemenata domena  $\Omega$  dijeli se na niz nepreklapajućih elemenata, odnosno poddomena  $\Omega_e$  (slika 3.6, a). Aproksimacije funkcija i njihovih integrala uobičajeno se razmatraju u referentnom koordinatnom sustavu  $\xi$  elemenata baze  $\mathfrak{B}$  čija je veza sa stvarnim koordinatama  $\mathbf{x}$  dana Jacobijanom  $\partial\mathbf{x}/\partial\xi$ . Sada izrazi 3.13 – 3.16 prelaze u:

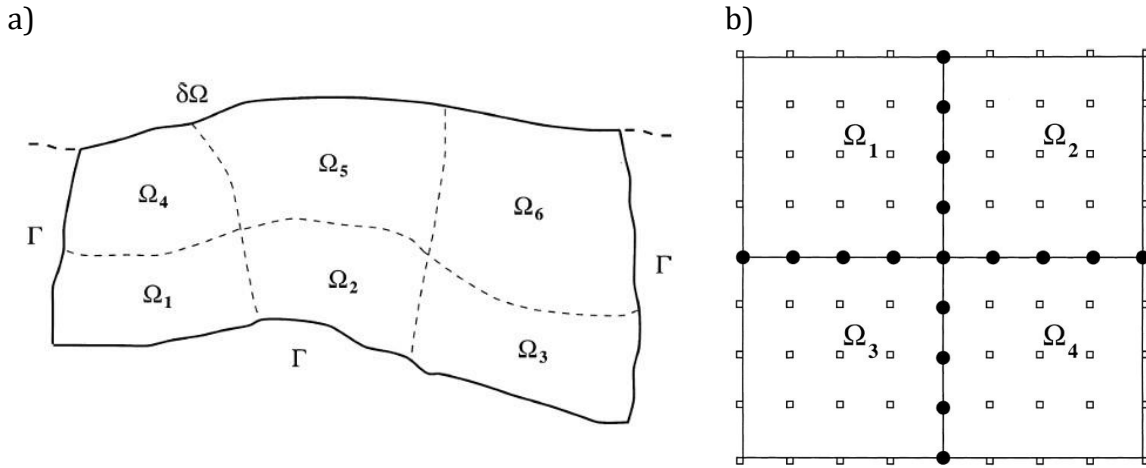
$$g(\mathbf{x}) \approx \sum_{j=1}^N F_j \phi_j(\xi(\mathbf{x})), \quad (3.17)$$

$$\nabla g(\mathbf{x}) \approx \sum_{j=1}^N F_j \frac{\partial}{\partial \xi} \phi_j(\xi(\mathbf{x})) \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{x}}, \quad (3.18)$$

$$\int_{\Omega_e} g(\mathbf{x}) d^n \mathbf{x} \approx \sum_{i=1}^M W_i^{\Omega_e} \sum_{j=1}^N F_j \phi_j(\xi(\mathbf{x}_i)) \left| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_i}^n, \quad (3.19)$$

$$\int_{\partial\Omega_e} g(\mathbf{x}) d^{n-1} \mathbf{x} \approx \sum_{i=1}^M W_i^{\partial\Omega_e} \sum_{j=1}^N F_j \phi_j(\xi(\mathbf{x}_i)) \left| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_i}^{n-1}. \quad (3.20)$$

U metodi SEM, domena se dijeli na niz heksaedarskih nepreklapajućih elemenata koji sačinjavaju mrežu i poštuju geometriju slobodne površine te diskontinuiteta. Veličina elemenata ovisi o fizikalnim svojstvima sredstva i rezoluciji (minimalnom periodu/maksimalnoj frekvenciji razlučivosti) za koju se nastoje simulirati seizmogrami. U pravilu, što su manji elementi, to je manji period razlučivosti simulacija.



**Slika 3.6.** a) Prikaz domene  $\Omega$  na kojoj se traže rješenja valne jednadžbe i zadani model.  $\partial\Omega$  označava slobodnu površinu, a  $\Gamma$  granice apsorpcije. b) Prikaz 2D diskretizacije polinomnog stupnja  $p = 4$  (ukupno 25 GLL točaka u svakom elementu). Preuzeto iz Komatitsch i Tromp (1999).

Na tako definiranoj mreži elemenata, funkcije pomaka diskretizirane su Lagrangeovim polinomima stupnja  $p$  (obično  $p = 4 - 10$ ) na  $(p + 1)^n$  Gauss-Lobatto-Legendrovih (GLL) točaka. Konačno rješenje svakog elementa proizlazi iz ansambla svih pojedinačnih rješenja zato što susjedni elementi sadrže zajedničke GLL točke (slika 3.6, b). Međusobna ovisnost rješenja numerički je najskuplji i najdugotrajniji korak čitave metode SEM.

Ako je  $U$  matrica rješenja svih elemenata na mreži domene, vremenska ovisnost ansambla je:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F, \quad (3.21)$$

pri čemu je  $M$  matrica mase,  $C$  matrica rubnih uvjeta,  $K$  matrica krutosti, a  $F$  matrica sile čitavog sustava elemenata koji proizlaze iz diskretizacije članova u izrazu 3.12. Vrlo poželjno svojstvo metode SEM leži u činjenici da je matrica mase  $M$  dijagonalna, pa je čitavi sustav relativno jednostavno pomicati kroz vrijeme  $t \in \langle 0, T \rangle$ . Drugim riječima, integracija po vremenskoj domeni može se provesti korištenjem numerički nezahtjevnih metoda, kao što je npr. Runge-Kutta iterativna metoda četvrtog stupnja.

Točnost metode SEM prvenstveno je uvjetovana diskretizacijom domene. Veličine koje odražavaju kvalitetu mreže su broj točaka mreže po valnoj duljini  $\mathcal{N} = \tau_0(v/\Delta h)_{min}$  i uvjet stabilnosti rješenja koji je dan Courantovim brojem,  $N_{Cour} = \Delta t(v/\Delta h)_{max}$ .  $\tau_0$  je minimalni traženi period simulacija,  $v$  brzina valova (minimalna S-valova i maksimalna P-valova),  $\Delta h$  prostorni korak, a  $\Delta t$  vremenski korak diskretizacijske metode.

U ovome istraživanju korištena su dva softverska paketa za računanje niskofrekventnih doprinosa gibanja tla, *SPECFEM3D Cartesian* i *Salvus. SPECFEM3D Cartesian* (Komatitsch

i sur., 2010, 2016; Patera, 1984) je nekomercijalni softverski paket u potpunosti napisan u programskom jeziku *Fortran 2003*. *Salvus* (Afanasiev i sur., 2019) je komercijalni softverski paket napisan u programskim jezicima *C++* i *Python*. Oba softvera za paralelno računanje koriste *MPI* sučelje (kratica od engl. *Message Passing Interface*; Pacheco, 1997; MPI Forum, 2009) te se osim za simuliranje rasprostiranja seizmičkih valova na lokalnoj i regionalnoj skali mogu koristiti za izravno modeliranje i tomografiju pomoću seizmičkih valova.

U Dodatku B ukratko je opisana metodologija za svaki od softverskih paketa. Načelno, metodologije su jednake i uključuju korake definiranja radne domene i 3D modela, seizmičkih izvora i prijemnika, te vremensko-frekventnih svojstava simulacija. Glavne razlike softvera leže u načinu optimizacije izrade mreže na kojoj se provodi SEM metoda, a samim time i vremena potrebnog da se izvrše simulacije. U istraživanju su korištena oba softvera ponajviše radi brže provedbe računanja simulacija. Računanje je provedeno korištenjem resursa za računarstvo visokih performansi *Supek* smještenog u Sveučilišnom računskom centru Sveučilišta u Zagrebu.

Simulirani su zapisi potresa na postajama navedenima u poglavljima 2.2. i 2.3. Opis seizmičkih izvora nalazi se u poglavlju 3.1.1. Za model su korišteni lokalni 1D model *Ston\_H08*, regionalni 3D model *EPcrust* te novodefinirani model *DF\_3D* za šire dubrovačko područje opisani u poglavlju 4.1. U svim simulacijama uključene su topografija, batimetrija i atenuacija (opisana u poglavlju 2.4). Simulacije su provedene tako da budu stabilne i obuhvaćaju frekvencije do 1 Hz na prostornoj domeni 42.31 °E – 42.94 °E, 17.54 °N – 18.49 °N, od slobodne površine do dubine 70 km. Vremenska domena definirana je tako da  $t \in [0, 90]$  s ili  $t \in [0, 240]$  s i  $\Delta t = 0.0015$  s.

### 3.1.3. Simulacije visokofrekventnog doprinosa gibanja tla ( $f > 1$ Hz)

Za računanje visokofrekventnog doprinosa gibanja tla (frekvencije  $f > 1$  Hz) korištena je tzv. Graves-Pitarka (GP) semi-stohastička metoda (Graves i Pitarka, 2010) koja je implementirana u platformi *Southern California Earthquake Center Broadband Platform* (SCEC; Graves i Pitarka, 2015; Maechling i sur., 2015). S obzirom na to da metoda GP implementirana u SCEC platformi uključuje jedino doprinose S-valova, u ovome radu korišteni su nadopunjeni SCEC-ovi programski kodovi (Graves, 2021., osobna komunikacija) i metodologija po uzoru na rad Goldberga i Melgara (2020) tako da budu uključeni i doprinosi P-valova. Programi su pisani u programskim jezicima *Python*, *C*, *C++* i *GNU Fortran*.

U GP-metodi zračenje izvora opisano je na stohastički način, a rasprostiranje valova kroz sredstvo i efekti raspršenja predočeni su pojednostavljenim teorijskim modelom (upravo iz ovog dvojakog pristupa metode slijedi sam termin *semi-stohastički*). Pretpostavlja se da se izvor može predočiti jednom ili nizom točaka, tj. segmenata  $i = 1, N$  od kojih svaki od njih doprinosi amplitudi spektra akceleracije  $A$  kao:

$$A_i^{P,S}(f) = \sum_{j=1,M} C_{ij}^{P,S} S_i(f) G_{ij}(f) P(f). \quad (3.22)$$

U izrazu 3.22, sumiranje po  $j$  od 1 do  $M$  odnosi se na različite faze valova koji putuju kroz sredstvo definirano 1D modelom,  $C_{ij}$  je radijacijski faktor,  $S_i$  spektar zračenja izvora,  $G_{ij}$  faktor rasprostiranja valova, a  $P(f)$  faktor atenuacije. Po uzoru na Goldberga i Melgara (2020) amplituda spektra akceleracije  $i$ -tog segmenta  $A_i$  odvojeno se računa za P- i S-valove što je naznačeno gornjim indeksom u izrazu 3.22. Doprinosi  $A_i^P$  i  $A_i^S$  sjedinjuju se u jedinstvenu amplitudu spektra akceleracije  $A_i$  zbrajanjem njihovih inverznih Fourierovih transformata u vremenskoj domeni. Doprinosi se računaju odvojeno prvenstveno zbog različite definicije faktora  $C_{ij}$  ovisno o vrsti vala. U stvarnosti, faktor  $G_{ij}$  također će ovisiti o vrsti vala, ali se u radu Golberga i Melgara (2020) pokazalo dovoljnim da se faktori pretpostave jednakim za oba slučaja.

U izrazu 3.22,  $C_{ij}$  predstavlja tzv. radijacijski faktor definiran kao:

$$C_{ij}^P = \frac{F_S R_{Pij}^P}{4\pi\rho_i v_{Pi}^3}, \quad (3.23)$$

za P-valove, odnosno:

$$C_{ij}^S = \frac{F_S R_{Pij}^S}{4\pi\rho_i v_{Si}^3}, \quad (3.24)$$

za S-valove. U izrazima 3.23 i 3.24,  $F_S = 2$  predstavlja amplifikacijski faktor slobodne površine,  $R_{Pij}^{P,S}$  konično usrednjenu komponentu razdiobe intenziteta zračenja P- ili S-valova,  $\rho_i$  gustoću, a  $v_{Pi}$  i  $v_{Si}$  redom brzinu P- i S-valova sredstva u kojem se nalazi  $i$ -ti segment izvora.

$S_i$  predstavlja spektar zračenja izvora koji je ovisan o frekvenciji  $f$  kao:

$$S_i(f) = \frac{m_i F f^2}{1 + F(f/f_{ci})^2}. \quad (3.25)$$

Ovdje je  $m_i = d_i \mu_i A_T / M_0$  relativni seizmički moment  $i$ -tog segmenta na kojem je došlo do pomaka  $d_i$ .  $A_T$  je ukupna površina izvora, a  $\mu_i$  je modul smicanja sredstva u kojem se nalazi  $i$ -ti segment izvora.  $F$  predstavlja tzv. Frankelov faktor (Frankel, 1995) kojim se skalira rubna frekvencija  $f_{ci}$  svakog segmenta izvora da bi u konačnici suma njihovih seizmičkih momenata  $m_i$  odgovarala ukupnom stvarnom momentu  $M_0$ . Rubna frekvencija  $f_{ci}$  segmenta  $i$  određuje se kao:  $f_{ci} = 2.1 \cdot v_{Ri} / (\alpha_\tau \pi dl)$ , pri čemu je  $v_{Ri} = 0.8 \cdot v_{Si}$  brzina pucanja segmenta izvora procijenjena iz brzine S-valova na segmentu, a  $dl$  prosječna duljina segmenta (za točkaste izvore uzima se  $dl = 1$  km).  $\alpha_\tau$  je konstanta koja iznosi  $\alpha_\tau =$

0.82 za kut nagiba rasjeda  $\delta_l < 45^\circ$ , odnosno  $\alpha_\tau = 1$  za  $\delta_l > 60^\circ$ . Za kutove  $45^\circ \leq \delta_l \leq 60^\circ$ , iznos od  $\alpha_\tau$  je linearno skaliran.

U izrazu 3.22,  $G_{ij}$  predstavlja faktor rasprostiranja valova kroz sredstvo:

$$G_{ij}(f) = \frac{I_i(f)}{r_{ij}} \exp \left[ -\pi f^{1-x} \sum_{k=1,L} \frac{t_{ijk}}{q_{jk}} \right]. \quad (3.26)$$

U izrazu 3.26,  $r_{ij}$  predstavlja duljinu puta koju  $j$ -ta zraka prijeđe od  $i$ -tog segmenta do promatrane točke, a  $I_i$  ukupnu impedanciju za segment  $i$  u zadanom 1D modelu. Sumiranje po  $k$  od 1 do  $L$  odnosi se na dijelove putanje zraka kroz 1D model koji se sastoji od  $k$  slojeva.  $t_{ijk}$  je vrijeme putovanja  $j$ -te zrake kroz  $k$ -ti sloj, a  $q_{jk}$  faktor dobrote S-valova u tom sloju koji opisuje atenuaciju. Uz njega, atenuacija je u izrazu  $G_{ij}$  uračunata kroz eksponent  $x$  koji odgovara eksponentu ovisnosti  $Q$ -faktora o frekvenciji,  $Q = Q_0 f^x$ , pri čemu  $Q_0$  opisuje stupanj heterogenosti sredstva.

Nadalje, u izrazu za amplitudu spektra akceleracije, atenuacija valova kroz sredstvo dana je pomoću faktora  $P(f) = \exp(-\pi \kappa f)$ . Ovdje je  $\kappa$  tzv. empirijski spektralni parametar uveden u radu Anderson i Hough (1984) kao proširenje eksponencijalne formulacije opisivanja visokofrekventne atenuacije S-valova.

Za računanje amplitude spektra akceleracije pomoću metode GP u platformi SCEC, potrebno je definirati ulaznu datoteku koja opisuje seizmički izvor, 1D model, lokacije postaja te vrijednosti parametara  $q_{jk}$ ,  $x$  i  $\kappa$ . Opis seizmičkog izvora dan je u poglavlju 3.1.1., modela  $DF\_1D$  u poglavlju 4.1.2., a postaja u poglavlju 2.2. Podatci o parametrima  $q_{jk}$ ,  $x$  i  $\kappa$  definirani su ovisno o razmatranoj postaji za koju se računaju simulirani seizmogrami, a navedeni su u poglavlju 2.4. Vremenska domena definirana je tako da  $t \in [0, 90]$  s i  $\Delta t = 0.01$  s.

Faza spektra akceleracije svake zrake u GP-metodi procjenjuje se iz nasumično odabranog vremenskog niza Gaussovog bijelog šuma za razmatrane frekvencije od interesa ( $f > 1$  Hz) (vidi Boore, 1983). Slučajan odabir faze spektra opravdan je jer su spoznaje o zračenju izvora za frekvencije iznad 1 Hz ograničene i teško ih je deterministički opisati. Ovaj korak automatski se provodi u platformi SCEC.

Jednom kada su definirani amplituda i faza spektra akceleracije, ukupni spektar se konvoluirao s Greenovim funkcijama izračunatim za zadani 1D model. Greenove funkcije predstavljaju odziv sredstva kroz koje se rasprostiru seizmički valovi. Mogu se izračunati na više načina, a u ovome istraživanju primijenjen je algoritam *Fk3.2* (Zhu, 2014) na temelju tzv. metode FK (engl. *Frequency-wavenumber integration method*). FK-metoda osnovana je na Thomson-Haskellovoj metodi matrice rasprostiranja (Haskell, 1964), a detaljnije su je opisali Zhu i Rivera (2002). Za izračun Greenovih funkcija, u programu

Fk3.2 potrebno je definirati 1D model sredstva, matricu vremena nailazaka P- i S-valova te udaljenosti lokacija od interesa do izvora (Dodatak B). Tako dobivene Greenove funkcije potom se u platformi SCEC konvoluiraju sa spektrom akceleracije iz čega u konačnici proizlaze akceleracije gibanja tla na traženim lokacijama, odnosno postajama. Dobivene akceleracije obuhvaćaju čitavi raspon frekvencija, pa se na kraju filtriraju tako da samo ostanu njihovi visokofrekventni doprinosi ( $f > 1$  Hz).

Zadnji korak metode GP je modeliranje lokalnih efekata tla. Da bi simulirani zapisi odražavali lokalne efekte tla, visokofrekventni doprinosi konvoluirani su s frekvencijski ovisnim nelinearnim amplifikacijskim faktorima izračunatim kako su predložili Campbell i Bozorgnia (2008). U njihovom radu, amplifikacijski faktori se procjenjuju na temelju poznatih tzv.  $vs30$  vrijednosti, tj. prosječnih vrijednosti brzina S-valova u prvih 30 m. U platformi SCEC za provođenje ovog koraka potrebno je samo definirati vrijednosti  $vs30$  ovisno o razmatranoj postaji (vrijednosti su navedene u poglavlju 2.4).

## 3.2. Metode validacije rezultata

Validacija rezultata podrazumijeva detaljnu procjenu uspješnosti simulacija da reproduciraju svojstva zabilježenog valnog polja, odnosno gibanja tla uzrokovanog nekim potresom. Po uzoru na rad Latečki i sur. (2021), u ovom su istraživanju korištene različite metode validacije ovisno o potresima koji su razmatrani. Kod umjerenih do jakih potresa validacija je provedena na temelju mjera kvalitete prilagodbe i vremensko-frekventnih funkcija odstupanja. Kod Velikog dubrovačkog potresa validacija je provedena na temelju usporedbe opaženog makroseizmičkog intenziteta i mjera intenziteta gibanja tla iz simulacija. Pojediniosti o navedenim validacijskim metodama opisane su u narednim poglavljima.

### 3.2.1. Mjera kvalitete prilagodbe

Mjera kvalitete prilagodbe, *GOF* (kratica od engl. *Goodness-of-fit*) nerijetko se koristi kao nadopuna vizualnoj provjeri simuliranih zapisa potresa prilikom validacije rezultata. Vizualna provjera dostatna je za provjeru niskofrekventnih zapisa, ali za kraće periode postaje nepraktična jer su i sami seizmogrami znatno kompleksnijeg izgleda zbog nasumične prirode efekata rasprostiranja valova kroz sredstvo i izvora na tim frekvencijama. *GOF*-vrijednosti daje kvantitativnu procjenu uspješnosti simulacija za cijeli raspon frekvencija. Uobičajeno se računa za standardne mjere intenziteta gibanja tla kao što su vršna akceleracija, vršna brzina, spektar odziva tla na pobudu, vrijeme trajanja trešnje, kumulativna energija, i sl.

U ovome radu, procjena vrijednosti *GOF* provedena je kako su predložili Olsen i Mayhew (2010). *GOF*-vrijednost dana je brojem 0–100 i klasificirana su po usklađenosti simuliranih i zabilježenih zapisa (ovisno o rasponu vrijednosti) kao: loša (0–45), osrednja

(46–65), dobra (66–80) i odlična (81–100). Vrijednost se računa pomoću izraza (Olsen i Mayhew, 2003):

$$GOF = 100 \cdot \operatorname{erfcf} \left( \frac{2|sim - rec|}{sim + rec} \right), \quad (3.27)$$

gdje je *erfcf* funkcija greške (engl. *Error function*;  $\operatorname{erfcf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$ ), *sim* mjera intenziteta gibanja tla određena iz simuliranog i *rec* zabilježenog zapisa. Vrijednosti *GOF* određene su za vršne vrijednosti brzina tla *PGV* (kratica od engl. *Peak ground velocity*), međukorelacije simuliranih i zabilježenih zapisa gibanja tla  $C_{corr}$  i vremena trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$  (engl. *Strong motion duration*). *GOF*-vrijednosti spomenutih parametara određene su kao srednjak *GOF*-vrijednosti triju komponenti gibanja u slučaju niskofrekventnih simulacija. Kod širokopojasnih simulacija, *GOF*-vrijednosti su promotrene za svaku komponentu zasebno. *GOF*-vrijednosti međukorelacije  $C_{corr}$  nisu računane prema izrazu 3.27, nego kao umnožak faktora 100 i maksimalne vrijednosti međukorelacijske funkcije dvaju zapisa (čime se efektivno dobiva vrijednost između 0 i 100).

Parametri *PGV*,  $C_{corr}$  i  $t_{Dur}$  odabrani su zato što na relativno jednostavan i praktičan način opisuju glavna svojstva gibanja tla. *PGV* vrijednosti daju informaciju o amplitudi trešnje i računaju se kao maksimum apsolutne vrijednosti vremenskog niza brzine  $v(t)$ , tj.  $PGV = \max|v(t)|$ . Međukorelacija  $C_{corr}$  (engl. *Cross-correlation*) mjeri međusobnu ovisnost podataka dvije funkcije  $f(t)$  i  $g(t)$  i na vremenskom intervalu  $[0, T]$  definira se kao:

$$C_{corr}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t)g(t + \tau)dt, \quad (3.28)$$

Konkretno, u ovome istraživanju međukorelacija odražava koliko su simulirani i zabilježeni zapis odmaknuti u vremenu, odnosno kako se preklapaju njihove nastupne faze. Preklapanje nastupnih faza ukazuje na to koliko je korišten model u simulacijama reprezentativan za razmatrano područje. Iz tog su razloga, kao dodatna validacijska metoda primjenjivosti 3D modela u simulacijama,  $C_{corr}$  računane samo za niskofrekventne doprinose ( $f \leq 1$  Hz). Vrijednosti  $C_{corr}$  izračunate su pomoću gotove *ObsPy* rutine *obspy.signal.cross\_correlation* (Krischer i sur., 2015). Sposobnost modela da reproducira reverberacije i refleksije uzrokovane geološkim strukturama istraživanog područja odražava se kroz duljinu trajanja trešnje koja je predočena parametrom  $t_{Dur}$ . Budući da vrijeme trajanja snažne trešnje nema jednoznačnu/jedinstvenu definiciju, u ovom radu računato je po uzoru na metodu Novikove i Trifunaca (1995). Zbog kompleksnog načina računanja detaljan opis metode dan je u Dodatku B, poglavlje B.4.



### 3.2.2. Vremensko-frekventne funkcije odstupanja

Uz mjere kvalitete prilagodbe, kao dodatni korak prilikom validacije rezultata širokopolasnih zapisa gibanja tla korištene su tzv. vremensko-frekventne funkcije odstupanja (engl. *Time-frequency misfit functions*) dobivene po metodi opisanoj u radu Kristeková i sur. (2009). Konkretno, korištene su globalno normirane vremensko-frekventne funkcije odstupanja ovojnica (tangencijalnih krivulja na nizove amplitudnih šiljaka; *TFEM*) i faza (*TFPM*) koje se koriste za kvantificiranje sličnosti i razlika između simuliranog i zabilježenog zapisa gibanja tla:

$$\begin{aligned} TFEM(t, f) &= \frac{\Delta A(t, f)}{\max_{t, f}\{A_r(t, f)\}}, \\ TFPM(t, f) &= \frac{A_r(t, f)}{\max_{t, f}\{A_r(t, f)\}} \cdot \frac{\Delta\phi(t, f)}{\pi}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

U izrazu 3.29,  $\Delta A(t, f)$  predstavlja razliku ovojnice kontinuirane valične (engl. *wavelet*) transformacije (CWT) simuliranog  $A(t, f)$  i zabilježenog zapisa  $A_r(t, f)$ , a  $\Delta\phi(t, f)$  razliku faza. Globalno normirane vremensko-frekventne funkcije odstupanja koriste se kada ne postoji potreba za usporedbom dvaju signala po pojedinačnim točkama  $(t, f)$  već za njihovim generalnim preklapanjem duž cijele vremensko-frekventne domene. Ovakva usporedba poželjna je prilikom razmatranja simuliranih i zabilježenih zapisa jer ionako nije očekivano savršeno preklapanje dvaju signala zbog nemogućnosti determinističkog modeliranja prirode stvarnog gibanja tla.

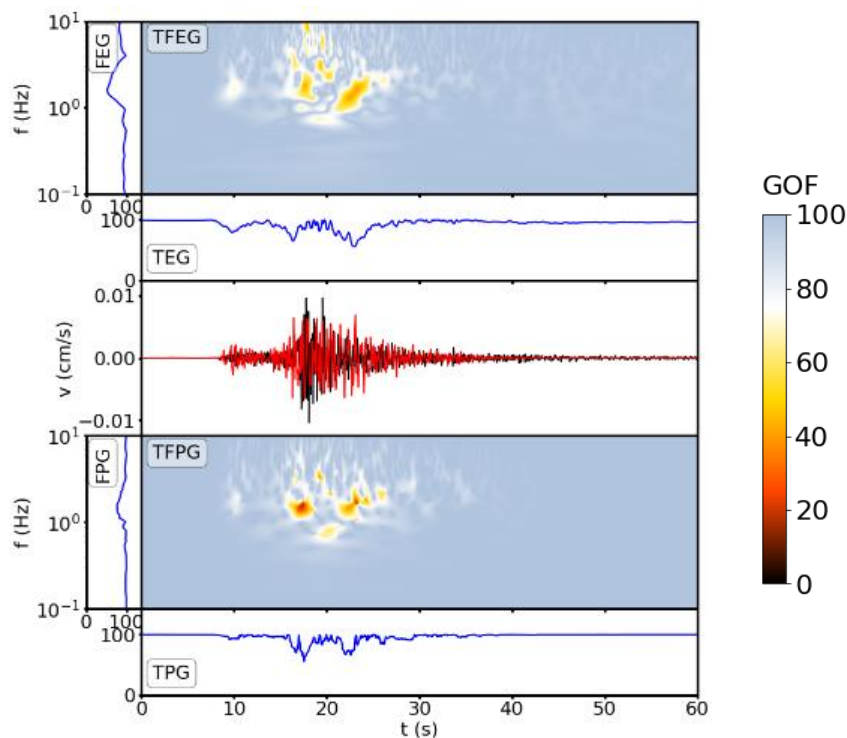
Iz funkcija se računaju mjere kvalitete prilagodbe i to na sljedeći način: ako je CWT simuliranog zapisa dan kao  $W(t, f)$ , a zabilježenog kao  $W_r(t, f)$ , globalno normirane funkcije vremenske ovisnosti ovojnice (*TEM*) i faze (*TPM*), te globalno normirane frekventne ovisnosti ovojnice (*FEM*) i faze (*FPM*) definiraju se kao:

$$\begin{aligned} TEM(t) &= \frac{\sum_f |W_r| \cdot \frac{|W| - |W_r|}{|W_r|}}{\max_t\{\sum_f |W_r|\}}, \\ TPM(t) &= \frac{\sum_f |W_r| \cdot \frac{1}{\pi} \text{Arg} \left[ \frac{|W|}{|W_r|} \right]}{\max_t\{\sum_f |W_r|\}}, \\ FEM(f) &= \frac{\sum_t |W_r| \cdot \frac{|W| - |W_r|}{|W_r|}}{\max_f\{\sum_t |W_r|\}}, \\ FPM(f) &= \frac{\sum_t |W_r| \cdot \frac{1}{\pi} \text{Arg} \left[ \frac{|W|}{|W_r|} \right]}{\max_f\{\sum_t |W_r|\}}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Iz funkcija u izrazima 3.29 i 3.30 mogu se izračunati pripadne funkcije mjera kvalitete prilagodbe:

$$\begin{aligned}
 TFEG(t, f) &= 100 \cdot \exp(-|TFEM(t, f)|), \\
 TFPG(t, f) &= 100 \cdot (1 - |TFPM(t, f)|), \\
 TEG(t) &= 100 \cdot \exp(-|TEM(t)|), \\
 TPG(t) &= 100 \cdot (1 - |TPM(t)|), \\
 FEG(f) &= 100 \cdot \exp(-|FEM(f)|), \\
 FPG(f) &= 100 \cdot (1 - |FPM(f)|).
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

Funkcije *TFEG* (engl. *Time-frequency envelope goodness-of-fit*), *TFPG* (engl. *Time-frequency phase goodness-of-fit*), *TEG* (engl. *Time envelope goodness-of-fit*), *TPG* (engl. *Time phase goodness-of-fit*), *FEG* (engl. *Frequency envelope goodness-of-fit*) i *FPG* (engl. *Frequency phase goodness-of-fit*) dane su brojevima 0–100 u vremenskoj i/ili frekventnoj domeni. Klasificirane su po usklađenosti simuliranih i zabilježenih zapisa (ovisno o rasponu vrijednosti) kao: loše (0–45), osrednje (46–65), dobre (66–80) i odlične (81–100). Primjer funkcija *TFEG*, *TFPG*, *TEG*, *TPG*, *FEG* i *FPG* izračunatih kako su predložili Kristeková i sur. (2009) dan je na slici 3.7. U ovome radu funkcije su razmatrane odvojeno za svaku od tri komponente.



**Slika 3.7.** Funkcije mjera kvalitete prilagodbe za ovojnicu (*TFEG*, *TEG*, *FEG*) i fazu (*TFPG*, *TPG*, *FPG*) simuliranog (crvena) i zabilježenog (crna) zapisa brzina dobivene iz globalno normiranih vremensko-frekventnih funkcija odstupanja vertikalne komponente para potres-postaja E04-STA. Skala (*GOF*) se odnosi na funkcije *TFEG* i *TFPG*.

### 3.2.3. Validacija rezultata scenarija trešnje Velikog dubrovačkog potresa

S obzirom na to da za Veliki dubrovački potres ne postoje zabilježeni zapisi gibanja tla, validacija rezultata provedena je na temelju usporedbe opaženih makroseizmičkih intenziteta ( $MI$ ) preuzetih iz istraživanja Albini i Rovida (2016; 2018; vidi poglavlje 2.3) i mjera intenziteta gibanja tla ( $GMI$ ) izračunatih iz simulacija. Empirijske relacije koje daju odnos između makroseizmičkog intenziteta i mjera intenziteta gibanja tla dane su u brojnim istraživanjima (npr. Neumann, 1954; Gutenberg i Richter, 1956; Wald i sur., 1999; Atkinson, 2001; Faenza i Michelini, 2010; itd). Generalna pretpostavka je da su makroseizmički intenziteti linearno proporcionalni logaritmu vrijednosti  $GMI$  za određeni raspon frekvencija, te se stoga na temelju izmjerenih  $GMI$  mogu procijeniti za sve lokacije na kojima postoje vrijednosti  $GMI$  i obratno.

Zbog nedostatka informacija o parametrima potrebnim za provedbu visokofrekventnih simulacija, u ovome radu proporcionalnost je razmotrena za tri  $GMI$  veličine određene samo iz niskofrekventnih simuliranih zapisa gibanja tla: Ariasov intenzitet ( $I_A$ ; Arias, 1970), vršnu brzinu ( $PGV$ ) i spektar odziva za akceleraciju za period  $T = 1.0$  s ( $SA1.0$ ).

Ariasov intenzitet za komponentu  $x$  definira se kao:

$$I_{Ax} = \frac{2\pi}{g} \int_0^{t_{Dur}} a_x^2(t) dt, \quad (3.32)$$

gdje je  $a_x$  pripadna akceleracija komponente  $x$ ,  $t_{Dur}$  vrijeme trajanja snažne trešnje, a  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> ubrzanje sile teže. Vrijeme trajanja snažne trešnje izračunato je pomoću metode od Novikove i Trifunaca (1995) koja je detaljno opisana u Dodatku B, poglavlju B.4.

Vršna brzina ( $PGV$ ) komponente  $x$  dana je kao:

$$PGV_x = \max|v_x(t)|, \quad (3.33)$$

gdje je  $v_x$  pripadna brzina komponente  $x$ . Spektralna akceleracija  $SA1.0$  predstavlja maksimalnu elongaciju akceleracije jednostavnog prigušenog oscilatora s jednim stupnjem slobode za vlastiti period  $T = 1.0$  s. Maksimalna elongacija akceleracije  $\max|\ddot{u}(t)|$ , računa se iz rješenja diferencijalne jednadžbe:

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -a(t), \quad (3.34)$$

gdje je  $\zeta$  prigušenje,  $\ddot{u}(t)$  akceleracija,  $\dot{u}(t)$  brzina,  $u(t)$  pomak oscilatora s vlastitom kružnom frekvencijom  $\omega = 2\pi/T$  pod utjecajem vanjske pobude  $a(t)$ . Prilikom rješavanja diferencijalne jednadžbe, pretpostavljeno je prigušenje  $\zeta = 5\%$  kritičnoga. Vrijednosti  $a(t)$  uzete su iz niskofrekventnih simuliranih akcelerograma ( $f \leq 1$  Hz).

U radu nije korištena nijedna konkretna empirijska relacija koja povezuje opažene makroseizmičke intenzitete i procijenjene mjere intenziteta gibanja tla, već je na temelju koeficijenta korelacije promotreno vrijedi li i u kojoj mjeri njihova proporcionalnost. Prvi razlog tome je nepostojanje empirijske relacije za istraživano područje, a drugi činjenica da su *GMI* vrijednosti određene samo iz niskofrekventnih simulacija. Po uzoru na radove Campbell i Bozorgnia (2008) te Bozorgnia i Campbell (2016), između makroseizmičkog intenziteta *MI* i vrijednosti *A*, *PGV* i *SA1.0* pretpostavljena je proporcionalnost:

$$\begin{aligned} MI &\propto \log(A_{horz}), \\ MI &\propto \log(PGV_{horz}), \\ MI &\propto \log(SA1.0_{horz}). \end{aligned} \quad (3.35)$$

U izrazu 3.35,  $A_{horz}$  je zbroj Ariasovih intenziteta komponenata sjever-jug (N-S) i istok-zapad (E-W), dok su  $PGV_{horz}$  i  $SA1.0_{horz}$  izračunati kao  $PGV_{horz} = \sqrt{PGV_{NS}^2 + PGV_{EW}^2}$  i  $SA1.0_{horz} = \sqrt{SA1.0_{NS}^2 + SA1.0_{EW}^2}$ , pri čemu indeksi NS i EW predstavljaju komponente N-S i E-W.

Za kvantificiranje proporcionalnosti u izrazu 3.35, izračunati su tzv. Spearmanovi koeficijenti korelacije  $r_s$  (Spearman, 1904). Spearmanov koeficijent korelacije definiran je kao:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (3.36)$$

gdje je  $n$  broj parova podataka, a  $d_i = R(X_i) - R(Y_i)$  razlika između rangova vrijednosti para podataka  $(X_i, Y_i)$ . S obzirom na to da se svaka vrijednost u skupu podataka zamjenjuje svojim rangom (pozicijom) u poretku, Spearmanov koeficijent koristi se za procjenu monotonih odnosa između varijabli, bilo da su linearni ili ne. Spearmanov koeficijent poprima vrijednost između  $\pm 1$  pri čemu  $r_s = 1$  odgovara savršenoj korelaciji (kako se jedna varijabla povećava, druga varijabla također raste i to na dosljedan način), a  $r_s = -1$  antikorelaciji (kako se jedna varijabla povećava, druga varijabla se dosljedno smanjuje). Vrijednosti  $r_s$  izračunate su pomoću gotove *SciPy* rutine `scipy.stats.spearmanr` (Virtanen i sur., 2020).

Na temelju vrijednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije između veličina *MI* i *GMI*, u ovome je istraživanju za pojedini scenarij potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa zaključeno vrijedi li i u kolikoj mjeri odnos dan izrazom 3.35.

### 3.3. Vizualizacija scenarija potresne trešnje

Osnovne informacije o scenarijima potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa za šest različitih modela konačnih izvora navedene su u tablici 3.1, a vizualizacija samih scenarija dostupna je na stranici: <https://dubrovnikshakingscenarios.gfz.hr/>.

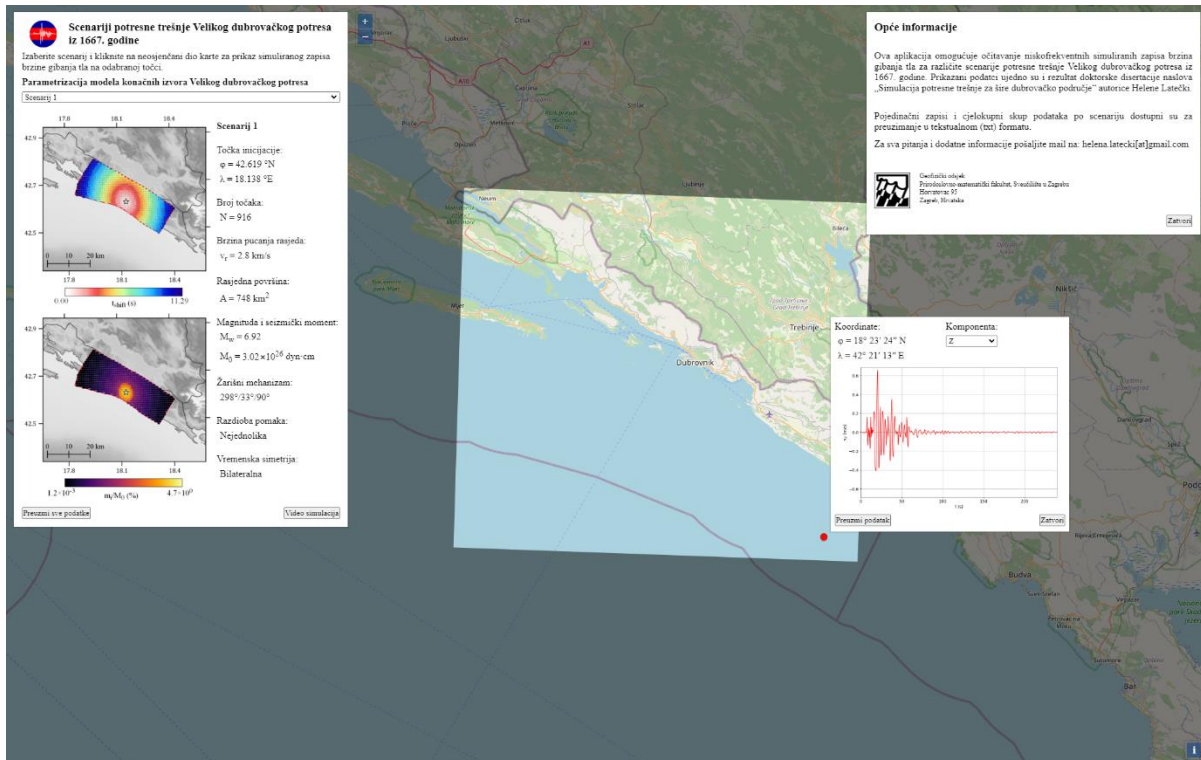
**Tablica 3.1.** Osnovne informacije o scenarijima potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa.

	Točka inicijacije	Broj točaka u modelu konačnih izvora	Razdioba pomaka	Vremenska simetrija
Scenarij 1	42.619 °E, 18.138 °N	916	Nejednolika	Bilateralna
Scenarij 2	42.563 °E, 18.312 °N	910	Nejednolika	Unilateralna (JI-SZ)
Scenarij 3	42.711 °E, 17.975 °N	920	Nejednolika	Unilateralna (SZ-JI)
Scenarij 4	42.619 °E, 18.138 °N	916	Jednolika	Bilateralna
Scenarij 5	42.563 °E, 18.312 °N	910	Jednolika	Unilateralna (JI-SZ)
Scenarij 6	42.711 °E, 17.975 °N	920	Jednolika	Unilateralna (SZ-JI)

Slike potrebne za izradu video zapisa simulacija dobivene su pomoću modula *xcreate\_movie\_shakemap\_AVS\_DX\_GMT* implementiranog unutar softvera *SPECFEM3D Cartesian*, verzija 4.0.0 (Komatitsch i sur., 2010, 2016; Patera, 1984) te softvera *Paraview*, verzija 5.11.0 (Ahrens i sur., 2005). Konačni video zapisi napravljeni su pomoću softvera *Movavi Video Editor*, verzija 24.3.0 (Movavi, 2024). Video zapisi simulacija odvojeno prikazuju istočnu, sjevernu i vertikalnu komponentu brzine gibanja tla, te normu brzine gibanja tla (korijen zbroja kvadrata pojedinačnih komponenti) na površini Zemlje za prvih 240 s potresnog scenarija. Mreža virtualnih postaja uključuje 20385 postaja s međusobnim razmakom od 500 m.

Internetska stranica (slika 3.8) napisana je HTML standardom i sastoji se od statičkih datoteka koje se poslužuju preko poslužitelja *NGINX* (Reese, 2008). Ova stranica ujedno je i aplikacija koja korisnicima omogućuje da za izabrani scenarij i odabranu točku na karti očitaju i/ili preuzmu niskofrekventni simulirani zapis brzine gibanja tla. Za svaki scenarij ukratko je opisana parametrizacija seizmičkog izvora te je dostupna poveznica na video zapis simulacije. Osim pojedinačnih zapisa, korisniku je omogućeno preuzimanje svih simuliranih zapisa brzine gibanja tla na mreži virtualnih postaja koje prekrivaju cijelu radnu domenu. Zbog navedene diskretizacije lokacija postaja mreže, odabirom željene

lokacije na interaktivnoj karti korisniku se prikazuje zapis brzine gibanja tla virtualne postaje koja je udaljenošću najbliža odabranoj točki.



Slika 3.8. Slika zaslona internetske stranice *dubrovnikshakingscenarios.gfz.hr*.

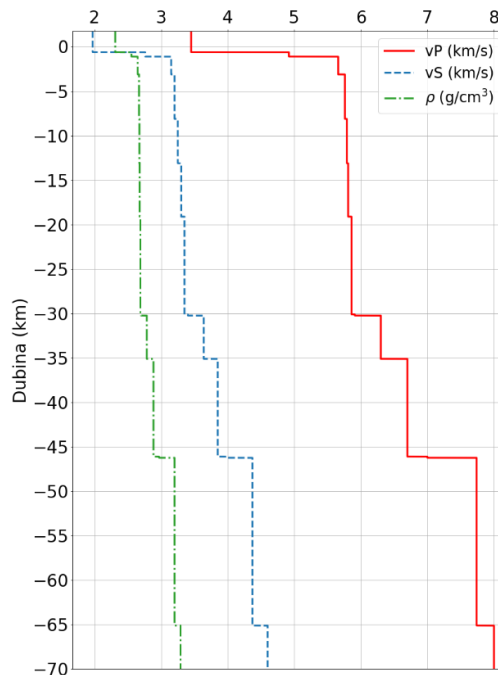
# 4. Rezultati

## 4.1. Model građe kore istraživanog područja

Model građe kore jedan je od najvažnijih ulaznih parametara potrebnih za simuliranje potresa. U ovome radu, na temelju dostupnih podataka i drugih istraživanja sastavljen je novi približni radni lokalni 3D model građe kore istraživanog područja. Njegova iskoristivost u kontekstu provedbe simulacija testirana je usporedbom s druga dva modela, lokalnim jednodimenzionalnim i regionalnim trodimenzionalnim modelom čiji je postupak sastavljanja opisan u narednom potpoglavlju. Također, u ovome poglavlju detaljno je opisan i sam novodefinirani 3D model građe kore za šire dubrovačko područje.

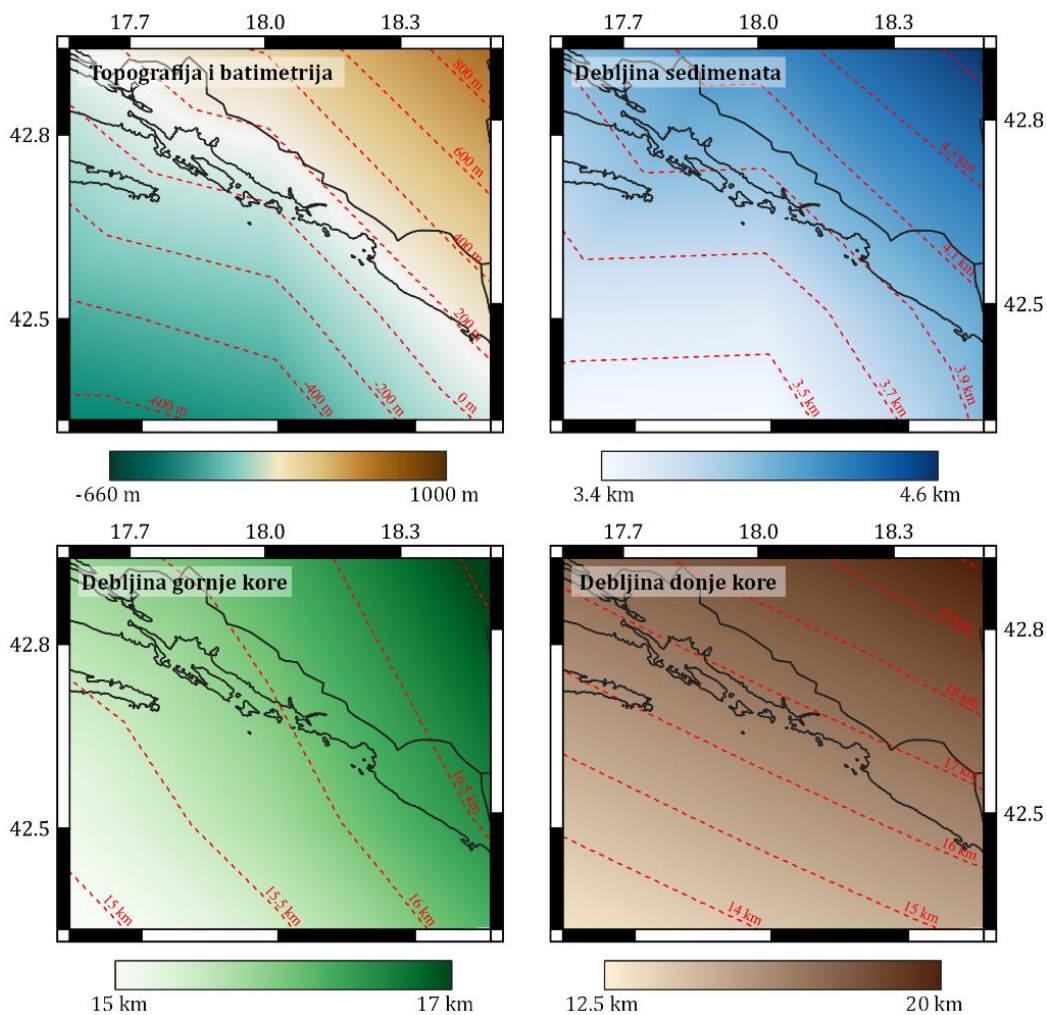
### 4.1.1. 1D lokalni i 3D regionalni modeli građe kore

Kao osnova prilikom sastavljanja jednodimenzionalnog modela građe kore šireg dubrovačkog područja korišten je model *Ston\_H08* (model za južni dio Jadrana). Model *Ston\_H08* sadrži informacije o brzinama P- i S-valova te se sastoji od trinaest slojeva iznad poluprostora. Za potrebe simulacija, model je dopunjen do 1750 m nadmorske visine i definiran tako da završava na 70 km dubine (zbog geometrije 3D domene u niskofrekventnim simulacijama). Vrijednosti gustoća određene su na temelju Brocherovih relacija (2005) iz brzina P-valova (vidi jednadžbe 2.1). Vrijednosti pojedinih parametara u modelu *Ston\_H08* dane su u tablici C.1, a sam model predočen je slikom 4.1.



**Slika 4.1.** Brzine P- ( $v_P$ ) i S-valova ( $v_S$ ) te gustoća ( $\rho$ ) u modelu *Ston\_H08* (model je dopunjen do 1750 m nadmorske visine). Vrijednosti su navedene u tablici C.1.

Kao osnova prilikom sastavljanja regionalnog trodimenzionalnog modela korišten je model *EPcrust* (Molinari i Moreli, 2011). Izvorno, model se sastoji od tri glavne strukturne jedinice: sedimenti, gornja kora i donja kora. Granice između njih definirane su na temelju topografije i batimetrije te debljina pojedinih jedinica (slika 4.2). Također, u krovini svake strukturne jedinice definirane su vrijednosti brzina P- i S-valova te gustoća sredstva (slika C.1). Model ne posjeduje informacije o vertikalnim gradijentima vrijednosti brzina valova i gustoća sredstva. Stoga su za potrebe simulacija unutar pojedinih strukturnih jedinica te vrijednosti uzete kao konstantne, dok je na granicama definiran jednostavni linearni gradijent (postupni prijelaz iz jedne u drugu jedinicu u debljini od 3 km) kako bi se izbjegle umjetne refleksije od simulacija. Nadalje, ispod donje kore nadodana je strukturna jedinica plašt do dubine od 70 km u kojoj je uzeta konstantna vrijednost brzine P-valova od 8 km/s. Vrijednosti brzina S-valova i gustoća u plaštu su procijenjene na temelju Brocherovih relacija (Brocher, 2005). Također, model je dopunjen do nadmorske visine od 1750 m koristeći pretpostavku da su vrijednosti od stvarne topografije i batimetrije do 1750 m konstantne. Dopuna modela napravljena je zbog geometrije 3D domene u niskofrekventnim simulacijama.



**Slika 4.2.** Topografija i batimetrija (ujedno i krovina sedimenata) te debljine glavnih strukturnih jedinica modela *EPcrust*. Izvorne vrijednosti debljina preuzorkovane su na gušću mrežu od 125 m.

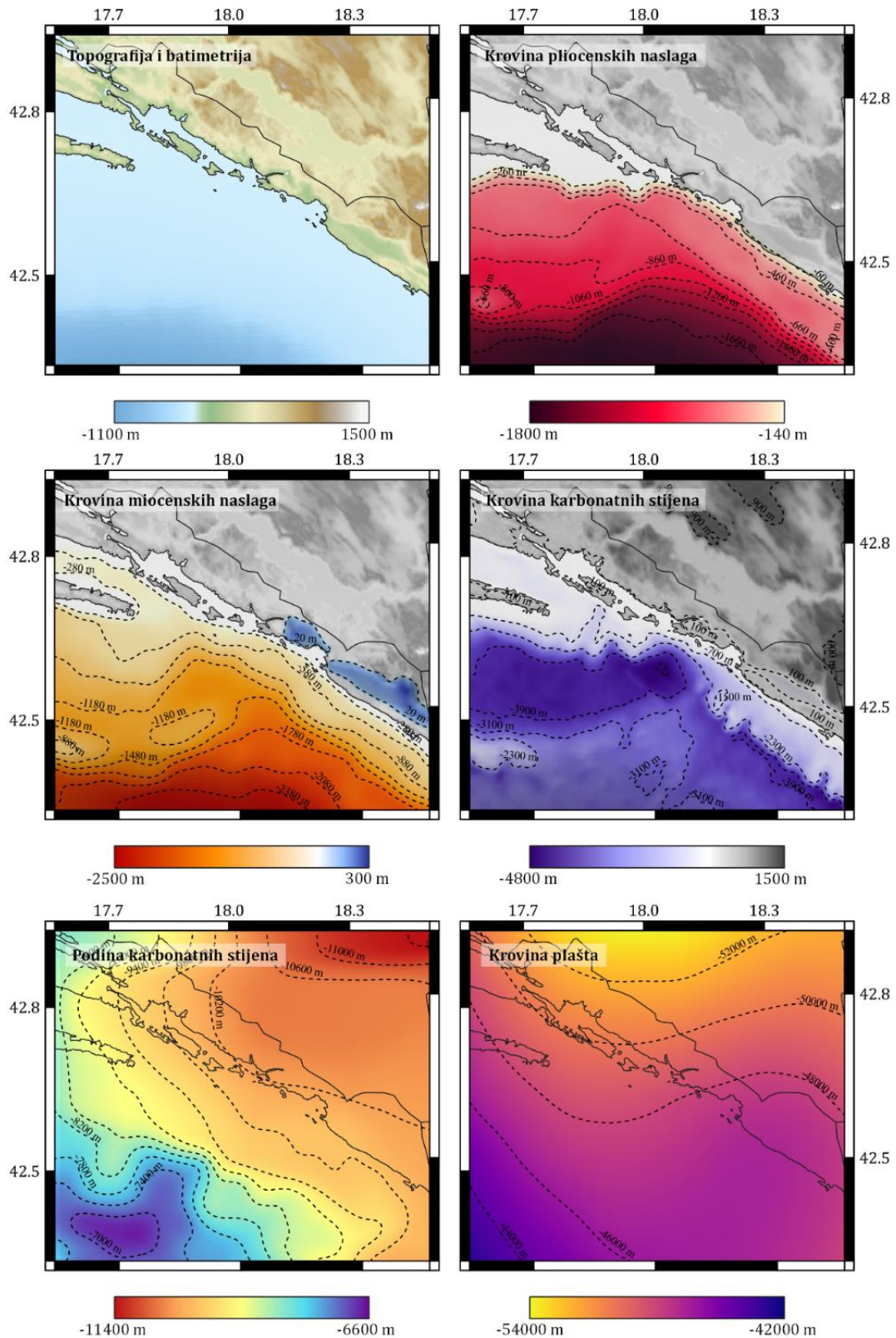


#### 4.1.2. 3D lokalni model građe kore

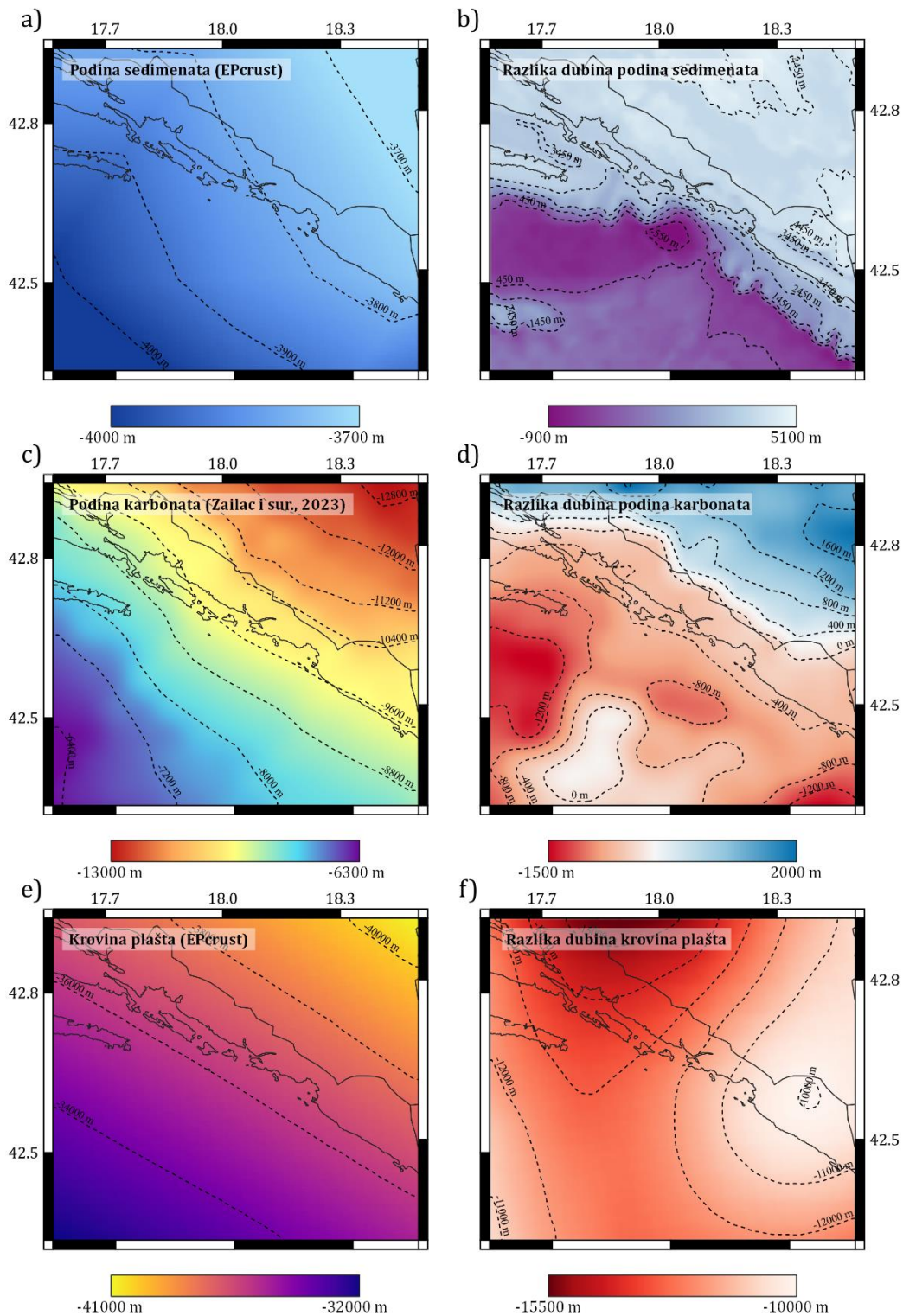
Opis podataka potrebnih za izradu 3D modela građe kore za šire dubrovačko područje (*DF\_3D*) nalazi se u poglavlju 2.1. Model je definiran u UTM (engl. *Universal Transverse Mercator*) koordinatnome sustavu u zoni 33N. Prekriva područje 42.31 °E – 42.94 °E geografske širine i 17.54 °N – 18.49 °N geografske dužine, (površina od 76.25 km × 67.25 km) te seže do dubine od 70 km. Dubine su izražene *negativnim* iznosom pripadne vertikalne koordinate (npr. dubina 30 km izražena je i na slikama prikazana kao –30 km). Rezolucija modela iznosi 125 m × 125 m × 125 m i svaki element sadržava informaciju o brzini P- i S-valova te gustoći sredstva.

Model čine tri glavne strukturne jedinice: gornja kora, donja kora i plašt. Granice između i unutar ovih strukturnih jedinica prikazane su na slici 4.3 U modelu *DF\_3D*, gornja kora se ugrubo može podijeliti na dva dijela, sedimente i karbonate. Sedimente čine kvartarne klastične naslage, pliocenske klastične naslage te miocensko-oligocensko-eocenske klastične naslage. Ove jedinice odvojene su redom pomoću markiranih horizonta: krovina pliocenskih naslaga, krovina miocenskih naslaga i krovina karbonatnih naslaga (ujedno i podina sedimenata). Karbonate čine karbonatne stijene eocensko do gornjotrijaske starosti. Ispod karbonatnih stijena eocensko do gornjotrijaske starosti, Conradovim diskontinuitetom definirana je krovina donje kore. Granica plašta definirana je Mohorovičićevim diskontinuitetom, a sam plašt u modelu seže do dubine od 70 km. Ovako sastavljen model generalno se slaže s dva do sada najreprezentativnija regionalna modela koji prekrivaju istraživano područje. Ipak, zbog veće rezolucije te načina na koji su definirane pojedine granice unutar samog lokalnog modela, prisutne su i određene razlike.

Konkretno, u usporedbi s regionalnim modelom *EPcrust* (Molinari i Moreli, 2011), model *DF\_3D* u gornjoj kori uz sedimente uključuje i karbonate. Nadalje, sedimenti ne prekrivaju čitavu radnu domenu, nego su prisutni na području mora i vrlo uskom kopnenom segmentu. Dubine podine sedimenata u modelu *EPcrust* (slika 4.4, a) u globalu su veće od dubina podine sedimenata modela *DF\_3D*. Iz tog razloga, a i činjenice da na mjestima u modelu *DF\_3D* ne postoje sedimenti, razlike u dubinama podina ovih dvaju modela iznose i do 5 km (slika 4.4, b). Sedimenti u modelu *DF\_3D* jedino su deblji (do 900 m) na relativno uskom području u moru, 10-ak km jugozapadno od Dubrovnika. Krovina donje kore modela *DF\_3D* definirana je Conradovim diskontinuitetom preuzetim iz modela *EPcrust*. S druge strane, njena podina, koja je ujedno i krovina plašta, u odnosu na krovinu plašta modela *EPcrust* (slika 4.4, e) poprima drugačije vrijednosti dubina. U modelu *DF\_3D* dubine su duž cijele domene veće nego što je u slučaju modela *EPcrust*. Razlike dubina (slika 4.4, f) najmanje su na području Konavla, a najveće sjeverno od Šipana prema unutrašnjosti.



**Slika 4.3.** Granice glavnih strukturalnih jedinica koje čine model građe kore za šire dubrovačko područje (model *DF\_3D*). Različitim obojanim skalama prikazane su dubine pojedinih markiranih horizonata.



**Slika 4.4.** a) Dubine podine sedimenata modela *EPcrust* (Molinari i Moreli, 2011); b) Razlike u dubinama podina sedimenata modela *DF\_3D* i *EPcrust*; c) Dubine podine karbonata referentnog seizmičkog modela za područje Dinarida (Zailac i sur., 2023); d) Razlike u dubinama podina karbonata modela *DF\_3D* i referentnog seizmičkog modela za područje Dinarida; e) Dubine krovine plašta modela *EPcrust*; f) Razlike u dubinama krovina plašta modela *DF\_3D* i *EPcrust*.

Drugi regionalni model, tzv. referentni seizmički model kore za područje Dinarida (Zailac i sur., 2023), na istraživanom području ne uključuje sedimente, ali sadrži informacije o dubinama podine karbonata (slika 4.4, c). Apsolutna vrijednost razlika dubina podina dvaju modela na mjestima iznosi do 2 km (slika 4.4, d). Na gotovo čitavom području mora i dubrovačkog primorja, dubine podine karbonata regionalnog modela manje su u odnosu na model *DF\_3D*. Kako se što više ide prema unutrašnjosti Dinarida, za dubine podina karbonata dvaju modela vrijedi obratno. Referentni seizmički model za područje Dinarida nema jasno definiranu granicu donje kore kao što je u slučaju modela *EPcrust* i *DF\_3D*. Granica između kore i plašta definirana je Mohorovičićevim diskontinuitetom na isti način (istim skupom podataka) kao što je u slučaju donje kore i plašta modela *DF\_3D*.

Glavne strukturne jedinice modela *DF\_3D*, te podjedinice u njima definirane su tako da predstavljaju strukture u kojima dolazi do bitne promjene u brzini seizmičkih valova i gustoći sredstva. U sedimentima i karbonatima brzina linearno raste s dubinom, a rasponi (tablica 4.1.) su temeljeni na bušotinskim mjerenjima opisanim u poglavlju 2.1. Kvartarne klastične naslage su najsporiji i najrastresitiji sloj u modelu. Na površini se nalaze iznad krovine pliocenskih naslaga te mjestimično iznad krovine miocenskih naslaga gdje izostaju pliocenske klastične naslage (usko područje između Pelješca i Mljeta, potez Mokošica-Cavtat-Gruda-Molunat). Ispod kvartarnih klastičnih naslaga smješten je slijed pliocenskih pa potom/ili miocensko-oligocensko-eocenskih klastičnih naslaga nešto većih brzina i gustoća. Ispod sedimenata, slijedi sloj karbonatnih stijena eocensko do gornjotrijaske starosti većih brzina i gustoća. Osim što prekrivaju cijelu domenu ispod sedimenata, karbonati izviru na površinu na mjestima na kojima izostaju kvartarne klastične naslage. Ostatak gornje kore, koji je definiran podinom karbonatnih stijena i Conradovim diskontinuitetom, čini sloj izmjene karbonata s permo-trijaskim klastičnim naslagama nešto manjih brzina u odnosu na same karbonate na tim dubinama. Nadalje, u ostatku gornje kore pretpostavljen je linearni rast vrijednosti brzina valova s dubinom do krovine donje kore (Conradovog diskontinuiteta). U donjoj kori i plaštu pretpostavljena je konstantna vrijednost brzina P-valova. Na dnu donje kore, neposredno iznad Mohorovičićevog diskontinuiteta, definiran je jednostavni linearni gradijent (postupni prijelaz iz jedne u drugu jedinicu debljine 3 km) kako bi se u simulacijama izbjegle umjetne refleksije.

Za potrebe simulacija, napravljene su još dvije modifikacije modela *DF\_3D*. Prvo, vertikalna domena čitavog modela dopunjena je do nadmorske visine od 1750 m da bi se pravilno prikazale i topografija i batimetrija koje ovise o razlučivosti ulaznih podataka, ali i gustoći same mreže koja se koristi u simulaciji niskofrekventnih doprinosa (vidi detalje u poglavlju 3.1.2). Konkretno, model je dopunjen tako da za svaku točku od stvarne nadmorske visine površine do 1750 m vrijednosti P- i S-valova ostaju konstantnima. Drugo, model je dodatno horizontalno izgladen primjenom Gaussovog filtera opisanog u Dodatku C. Ovaj korak napravljen je kako bi se izbjegli nepoželjni efekti i umjetne refleksije u simulacijama od naglih skokova u vrijednostima parametara koji čine model.

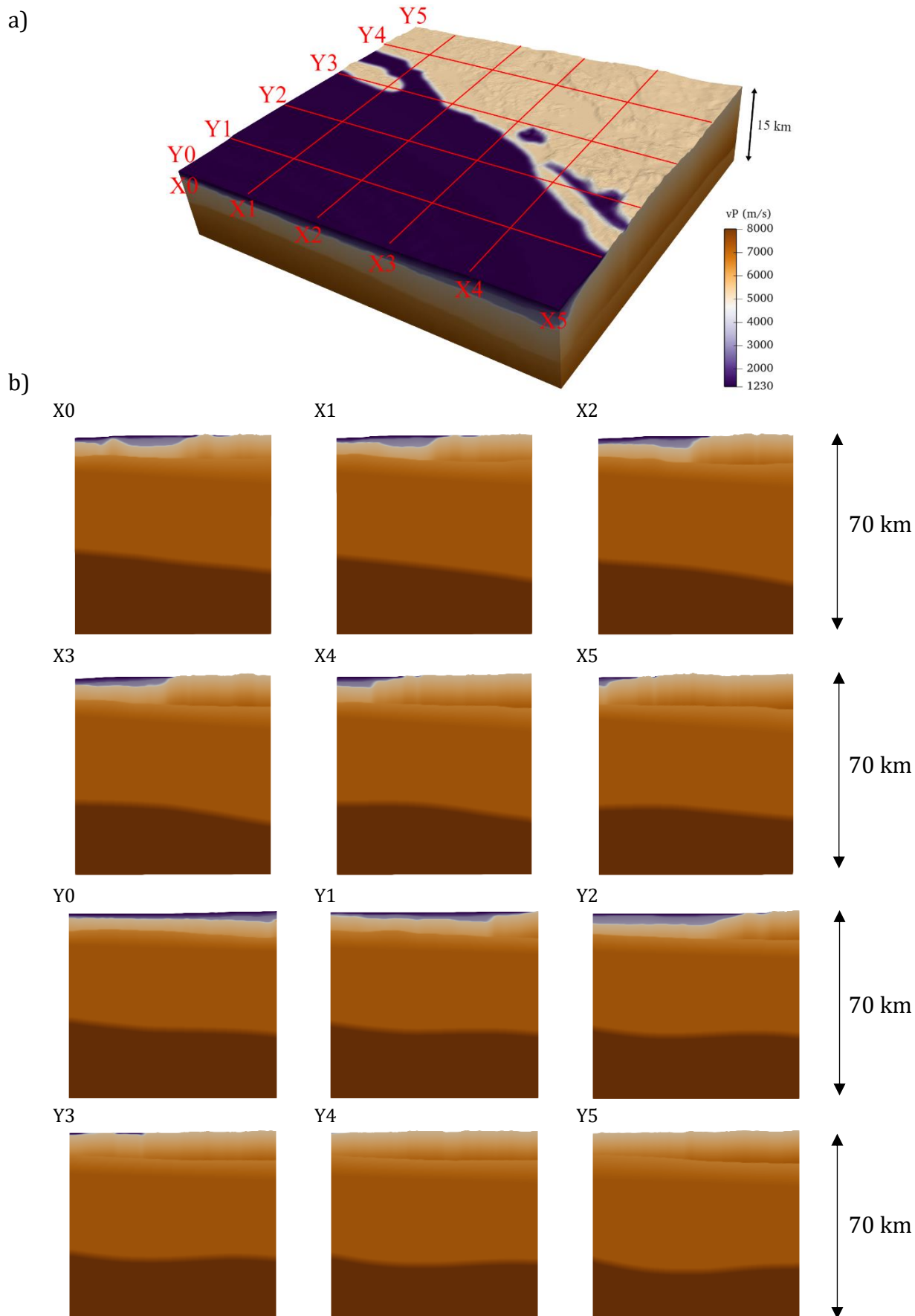
**Tablica 4.1.** Rasponi vrijednosti brzina P-valova ( $v_P$ ) i njihove pripadne debljine ( $\Delta h$ ) za pojedine cjeline definirane unutar modela građe kore šireg dubrovačkog područja *DF\_3D*.

Litološka cjelina	$v_P$ (km/s)	$\Delta h$ (km)
Kvartarne klastične naslage	1.23 – 2.47	1.5
Pliocenske klastične naslage	2.25 – 2.67	1.5
Miocensko-oligocensko-eocenske klastične naslage	2.92 – 3.53	4.0
Karbonatne stijene eocensko do gornjotrijaske starosti	5.18 – 7.00	12.5
Ostatak gornje kore	6.30 – 7.00	/
Donja kora	7.00	/
Plajt	8.00	/

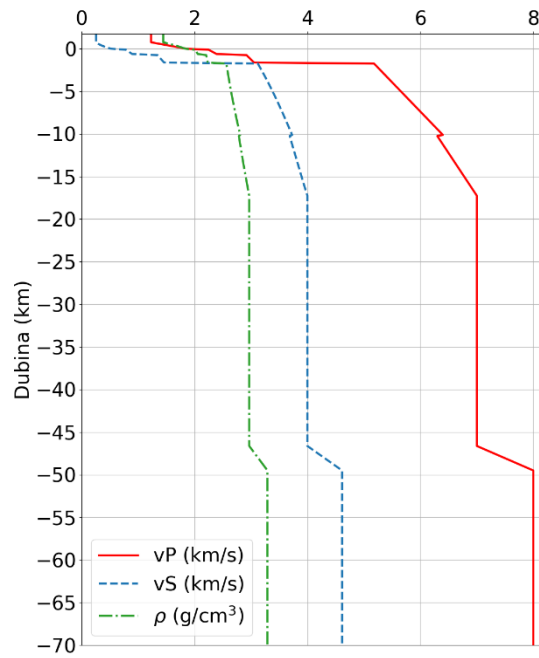
Prvih 15 km modela *DF\_3D* te vertikalnih presjeka cijelog modela korištenog u niskofrekventnim simulacijama (s izrezanom topografijom i batimetrijom) prikazano je slikom 4.5. 3D prikaz cijelog modela dan je na slikama C.3, C.4 i C.5 u Dodatku C. Model *DF\_3D* dostupan je na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:627949> (pristupljeno 31. siječnja 2024).

Za računanje visokofrekventnog doprinosa gibanja tla definiran je i novi 1D model građe kore (model *DF\_1D*). Model *DF\_1D* napravljen je usrednjavanjem vrijednosti parametara iz modela *DF\_3D* i to tako da sadrži dubine pojedinih strukturnih jedinica na lokacijama na kojima se nalaze postaje i seizmički izvori popisani u poglavlju 2.2. i prikazani na slici 2.2. Na ovaj način, 1D model vjerodostojnije opisuje svojstva sredstva između seizmičkih izvora i postaja, što je posebno važno da bi se pravilno mogle izračunati prve faze P- i S-valova. Na slici 4.6 prikazan je model *DF\_1D* dobiven usrednjavanjem iz modela *DF\_3D*, a konkretne vrijednosti fizikalnih veličina popisane su u tablici C.2. koja se nalazi u Dodatku C.

Vrijednosti brzina valova i gustoća u prvih 5 km modela *DF\_1D* značajno su manje u odnosu na model *Ston\_H08*. Na dubini od oko 10 km u modelu *DF\_1D* uočljiv je skok s većih na nešto manje vrijednosti što odgovara granici prijelaza karbonata u sloj koji čini njihova izmjena s permo-trijaskim klastičnim naslagama. Nadalje, za razliku od modela *Ston\_H08*, model *DF\_1D* sadrži informacije o gradijentima svojstava sredstva područja za koje je reprezentativan. Grafički prikaz usporedbe brzina P- i S-valova, te gustoća dvaju modela dan je na slici C.6 u Dodatku C.



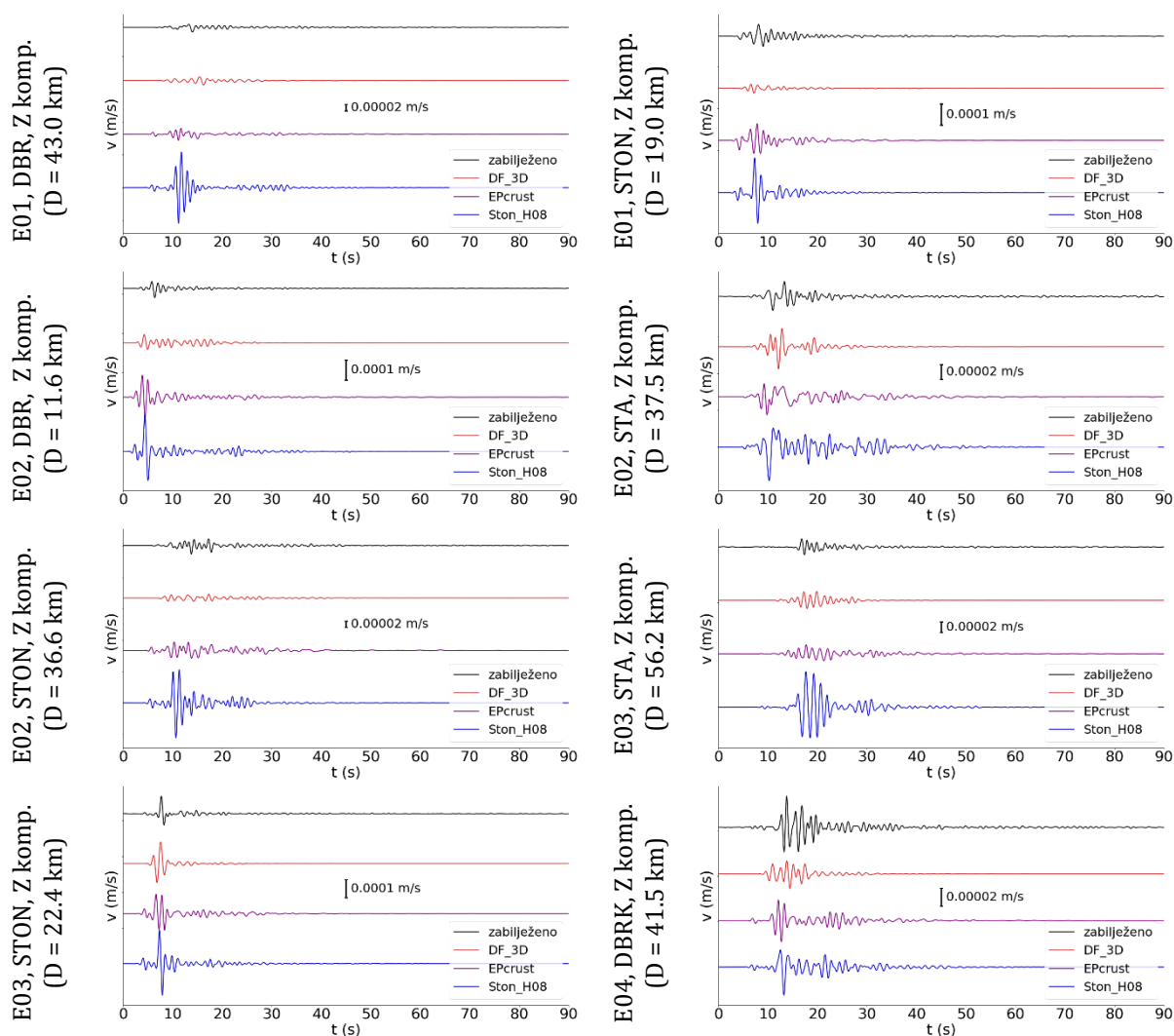
**Slika 4.5.** a) Prvih 15 km modela *DF\_3D*; b) Presjeci X0-X5, Y0-Y5 kroz cijeli model (prikaz cijelog modela dan je na slici C.3 u Dodatku C). Bojom su naznačene brzine P-valova ( $v_P$ ).



**Slika 4.6.** Brzine P- ( $v_P$ ) i S-valova ( $v_S$ ) te gustoća ( $\rho$ ) u modelu *DF\_1D* dobivenom usrednjavanjem iz 3D modela. Vrijednosti su navedene u tablici C.2.

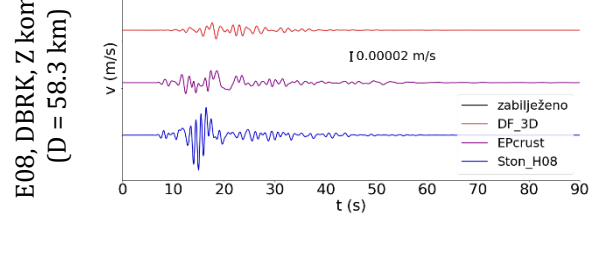
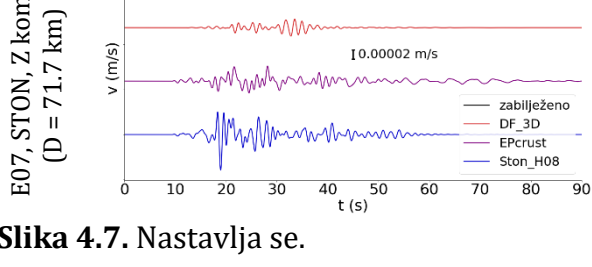
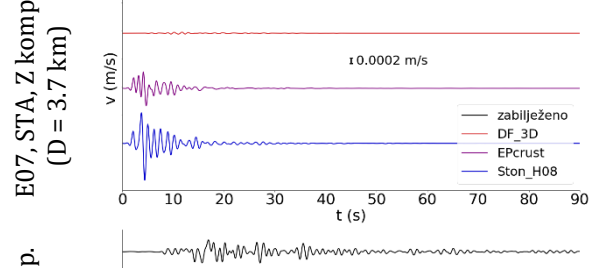
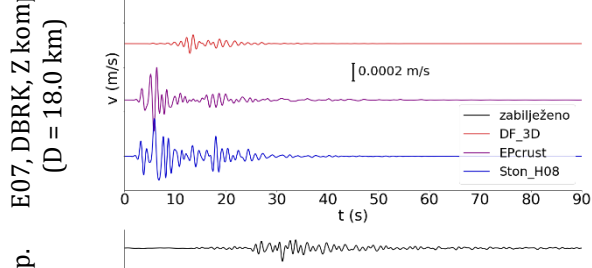
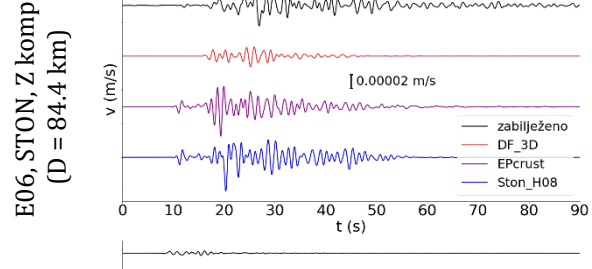
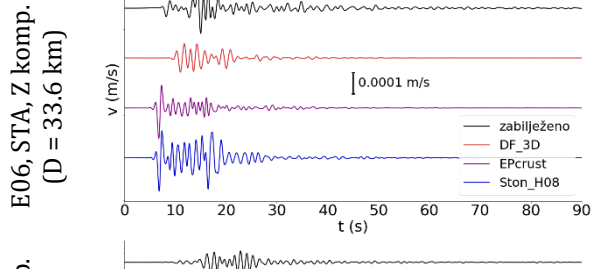
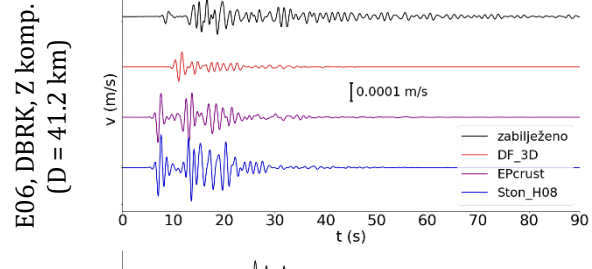
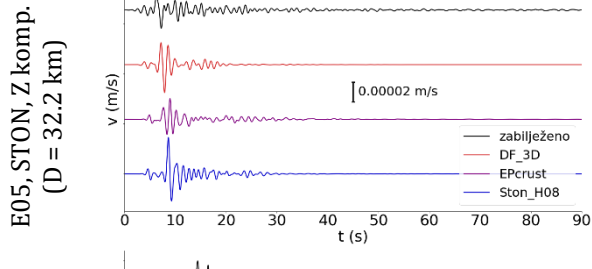
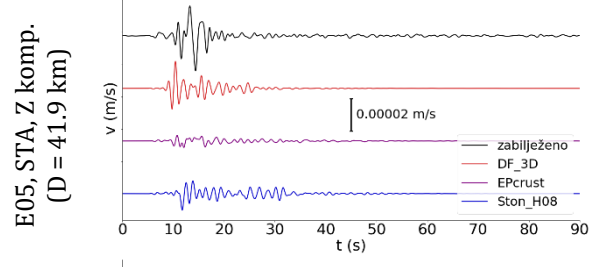
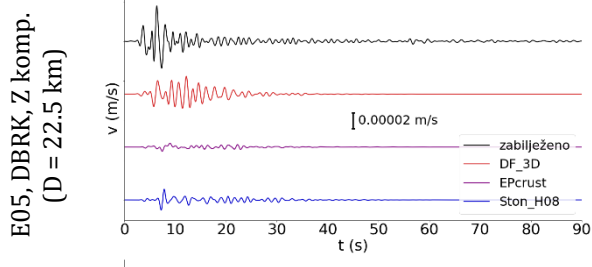
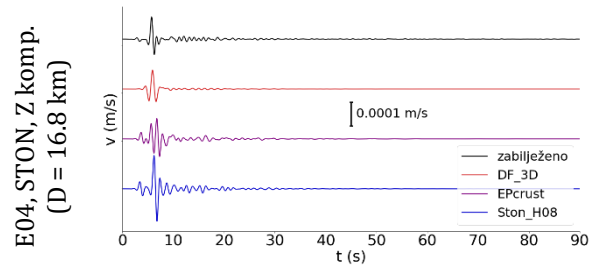
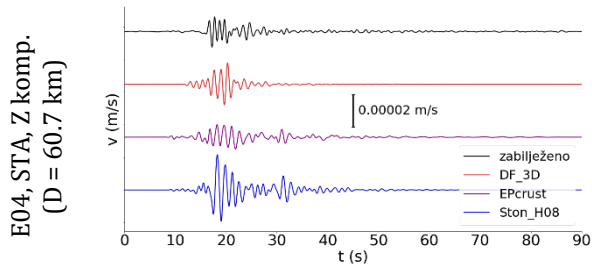
## 4.2. Simulacije niskofrekventnih doprinosa s obzirom na model građe kore

Simulirani su niskofrekventni seizmogrami frekvencija do 1 Hz za vrijeme  $t \in [0, 90]$  s i vremenski korak  $\Delta t = 0.0015$  s za postaje i potrese navedene u tablicama 2.1 i 2.2. Metoda simuliranja niskofrekventnih doprinosa detaljno je opisana u poglavlju 3.1.2. Korištena su tri modela (*Ston\_H08*, *EPcrust* i *DF\_3D*; opisi modela dani su poglavljima 4.1.1. i 4.1.2.) kako bi se testirala primjenjivost i uspješnost novodefiniranog 3D lokalnog modela u simulacijama. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 4.7, D.1 i D.2.

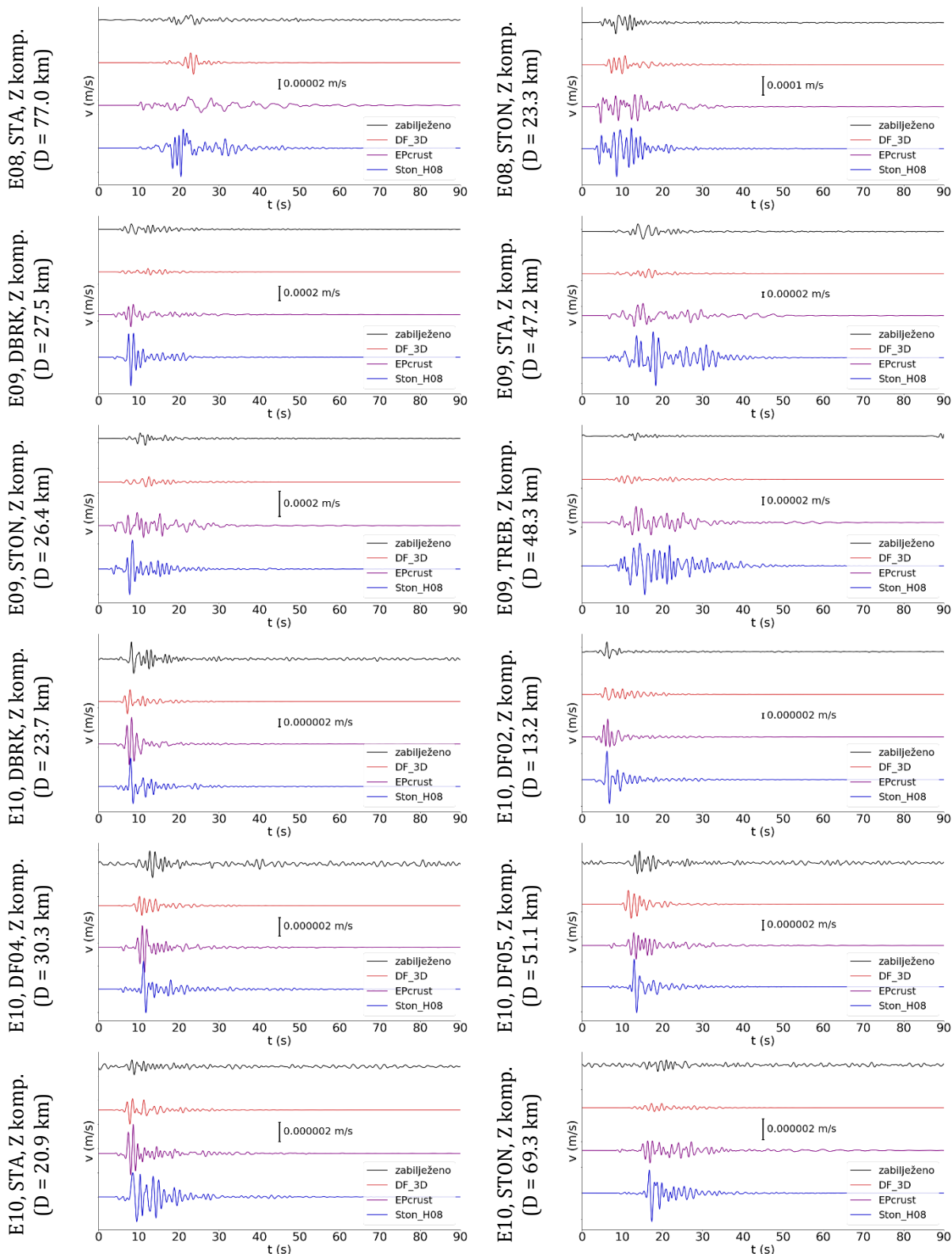


**Slika 4.7.** Vertikalne komponente (Z komp.) niskofrekventnih ( $f \leq 1$  Hz) zapisa zabilježene (crno) i simulirane (crveno – model *DF\_3D*, ljubičasto – model *EPcrust* i plavo – model *Ston\_H08*) brzine gibanja tla po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 1 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost promatrane postaje od potresa.





Slika 4.7. Nastavlja se.



**Slika 4.7.** Nastavlja se.

Na slikama 4.7, D.1 i D.2 prikazane su redom vertikalna (Z), istočna (E) i sjeverna (N) komponenta niskofrekventnog zapisa zabilježene i simulirane brzine gibanja tla. Svi podaci su obrađeni na način da budu usporedivi u daljnjim analizama. Prvo, zabilješnim seizmogramima uklonjen je instrumentalni odziv. Zatim su simulirani seizmogrami preuzorkovani na frekvenciju uzorkovanja kojom je pojedina postaja zabilježila potres

(tablica A.1). Konačno, svi zapisi su filtrirani pomoću širokopojasnog Butterworthovog filtera četvrtog reda između 0.1 i 1 Hz. U nastavku je opisana vizualna provjera seizmograma parova potres-postaja kako bi se utvrdila primjenjivost i uspješnost pojedinih modela u niskofrekventnim simulacijama. Iz analize je uklonjena postaja TREB (Trebinje) za potres E10 zbog neadekvatno zabilježenog zapisa za frekvencije manje od 1 Hz.

Zapisi simulirani modelom *EPcrust* i *Ston\_H08* oblikom su slični jedan drugome, dok se seizmogrami simulirani modelom *DF\_3D* vidljivo razlikuju u odnosu na njih. Ovo je na neki način i očekivano s obzirom na to da 3D model sadrži najviše informacija ne samo o lateralnoj heterogenosti, već i o vertikalnim promjenama pojedinih fizikalnih parametara u strukturnim jedinicama modela. Drugim riječima, građa kore prema modelu *DF\_3D* se bitno razlikuje od građe kore prema modelima *Ston\_H08* i *EPcrust*. Građa kore direktno uvjetuje efekte rasprostiranja valova kroz sredstvo, te samim time i na konačni oblik zabilježenog valnog polja. Regionalni model *EPcrust* i lokalni 1D model *Ston\_H08* u ovome su slučaju dovoljno slični, pa su iz tog razloga i same razlike u seizmogramima između njih manje. Ipak, na slikama se može uočiti vrlo bitna razlika u amplitudama simuliranih zapisa ovih dvaju modela. Konkretno, model *Ston\_H08* uvijek rezultira najvećim amplitudama neovisno o razmatranoj postaji, potresu ili komponenti gibanja. Ovo je najvjerojatnije rezultat prevelike amplifikacije koja proizlazi iz samih vrijednosti brzina i gustoća u modelu.

Vizualno, amplitude simuliranih zapisa dobivene korištenjem modela *DF\_3D* većinom su najusklađenije s amplitudama zabilježenih zapisa kod sve tri komponente. U slučaju vertikalne (Z) komponente ovo je posebice uočljivo za parove potres-postaja: E01-DBR, E02-DBR, STA i STON, E03-STON, E04-STON, E07-DBRK, STA i STON, E08-STA i STON, E09-DBRK, STA, STON, TREB i E10-DBRK, DF02, DF04, DF05, STA i STON gdje druga dva modela precjenjuju amplitudu, te E05-DBRK i STA gdje druga dva modela podcjenjuju amplitudu u odnosu na *DF\_3D* model. Kod istočne (E) komponente amplitude vizualno bolje odgovaraju u slučajevima: E01-DBR, E02-DBR, E03-STA, E06-STON, E07-DBRK i STA, E08-DBRK i STA, E09-DBRK, STA i TREB i E10-DBRK, DF02 i STON gdje druga dva modela precjenjuju amplitudu. Kod sjeverne (N) komponente amplitude vizualno bolje odgovaraju u slučajevima: E01-DBR i STON, E02-STA, E03-STA i STON, E04-STA, E07-DBRK i STA, E08-DBRK, STA i STON, E09-STON i TREB, i E10-DF02, DF04 i STA gdje preostala dva modela precjenjuju amplitudu.

Ipak, u pojedinim slučajevima amplitude simuliranih zapisa dobivene korištenjem modela *DF\_3D* su podcijenjene u odnosu na amplitude zabilježenih zapisa, te druga dva modela daju bolje rezultate. Kod komponente Z ovo se uočava za parove potres-postaja: E01-STON, E04-DBRK, E06-DBRK, STA i STON. Kod E komponente amplitude su podcijenjene u slučajevima: E02-STA i STON, E04-DBRK, E05-STON, E06-DBRK i STA i E08-STON. Kod komponente N amplitude su podcijenjene u slučajevima: E02-DBR, E04-DBRK, E05-DBRK, E06-DBRK, E08-STON i E10-DBRK i DF05. Dodatno, kod sve tri komponente model *DF\_3D* za potres E06 podcjenjuje amplitudu P-faze, odnosno početka seizmograma: kod

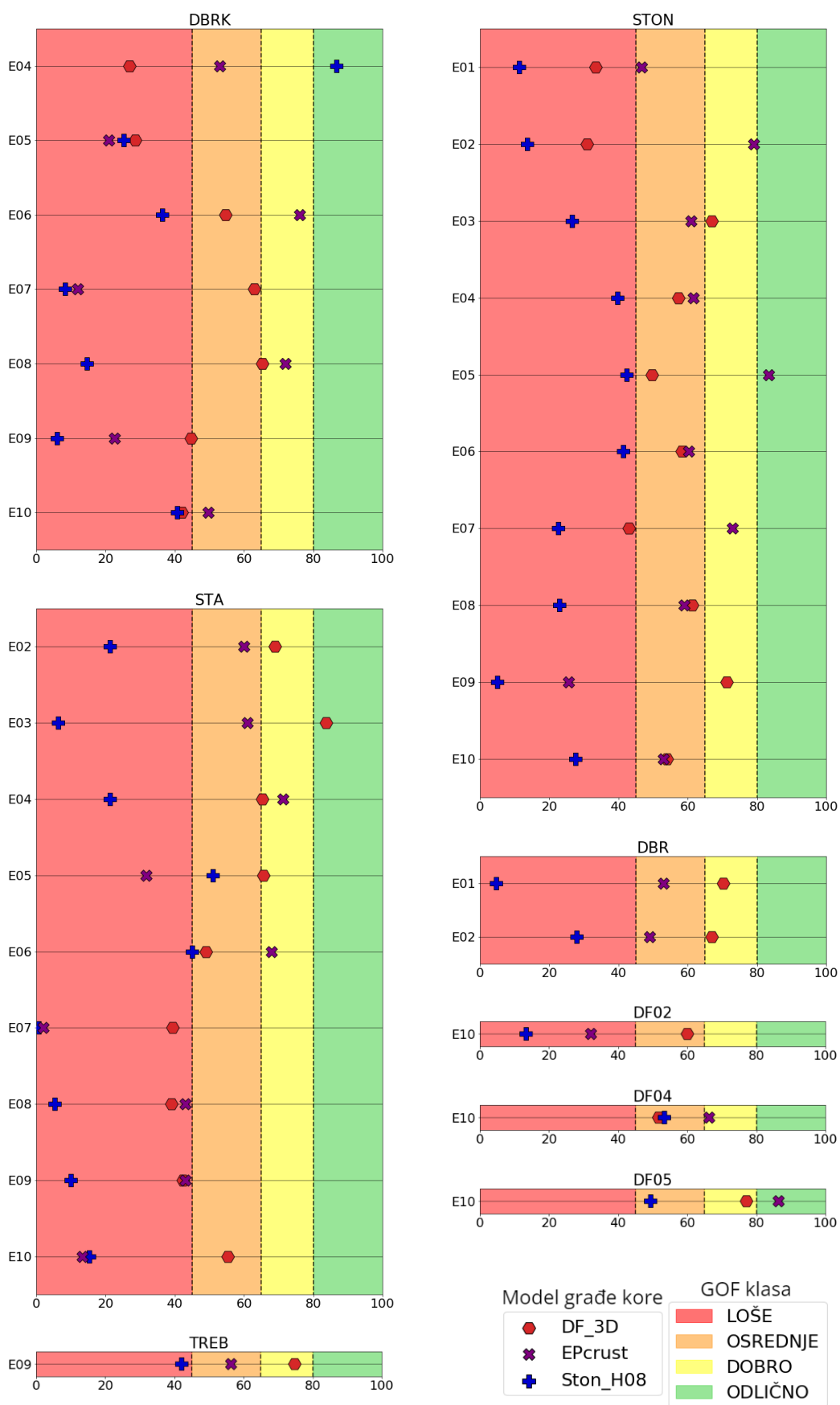
komponente Z ovo se uočava na postajama DBRK, STA i STON, kod komponente E na postajama DBRK i STA, a kod komponente N samo na postaji DBRK. Sličan efekt svojevrsnog nedostatka energije na početku zapisa može se još uočiti za model *DF\_3D* i komponentu N slučaja E03-STA. Simulirani seizmogrami dobiveni korištenjem modela *Ston\_H08* i *EPcrust* ne pokazuju ovaj problem u navedenim slučajevima.

S obzirom na duljinu trajanja trešnje, između tri modela u pravilu i nema nekih znatnih razlika što je posljedica činjenice da sve postaje imaju vrlo slične lokalne uvjete tla koji na to i utječu. Vizualno, simulacije modela s modelom *DF\_3D* po duljini trajanja trešnje manje odgovaraju zabilježenim zapisima od druga dva modela: kod komponente Z u slučajevima E02-DBR, E04-STON i E08-STA; kod komponente E u slučaju E04-STA; kod komponente N u slučajevima E05-DBRK, E08-DBRK i E09-STA. Simulacije sva tri modela u slučajevima E10-DBRK, DF04, DF05, STA i STON vizualno ne odgovaraju zabilježenim zapisima jer zabilježeno gibanje tla sadrži dugoperiodički šum koji je vjerojatno posljedica utjecaja valova Jadranskog mora.

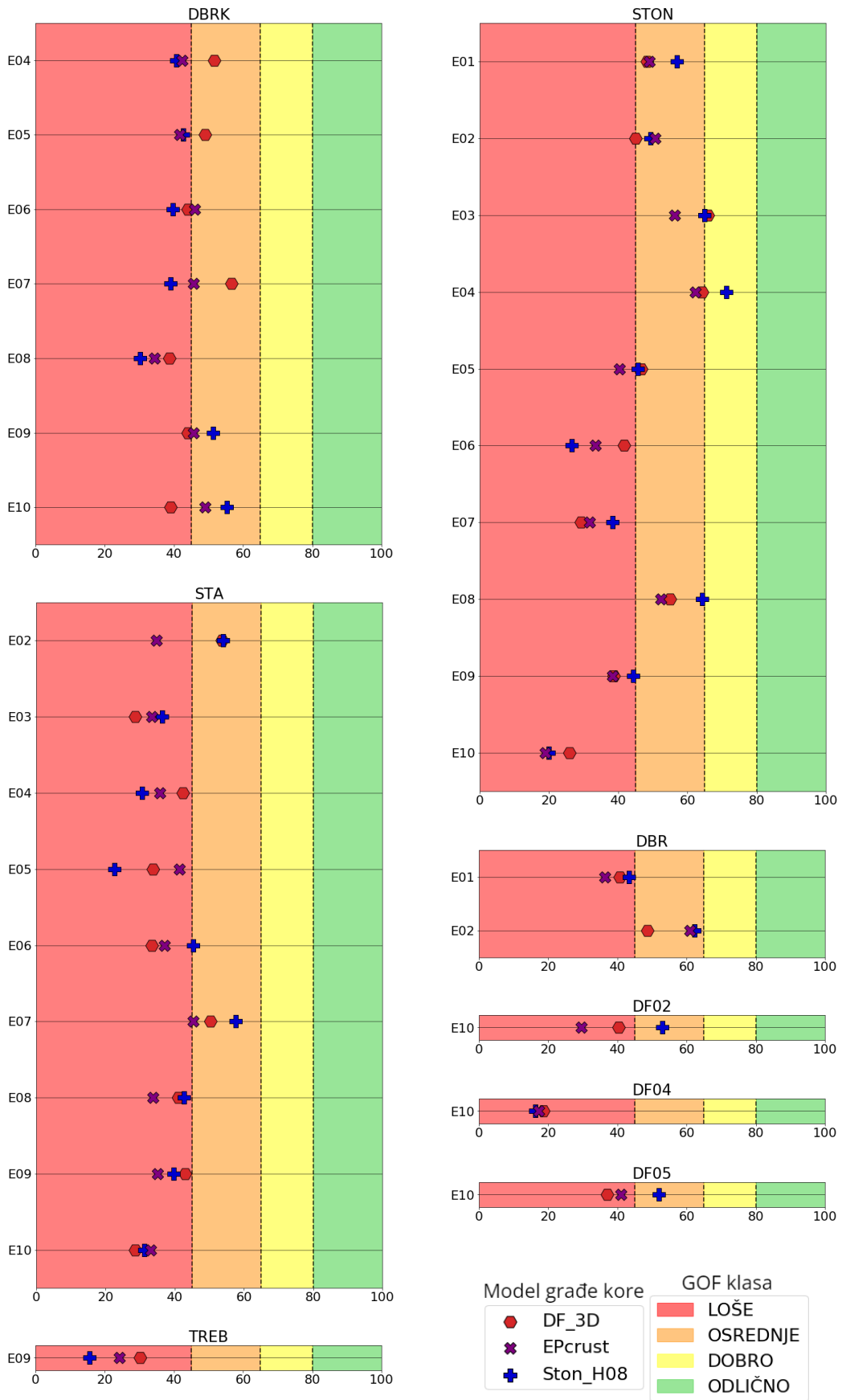
Kao nadopuna vizualne provjere simuliranih niskofrekventnih seizmograma, provedena je dodatna validacijska metoda rezultata. Konkretno, izračunate su mjere kvalitete prilagodbe (*GOF*) za vršne vrijednosti brzina tla *PGV*, međukorelacije simuliranih i zabilježenih zapisa gibanja tla  $C_{corr}$  te vremena trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$ . Metoda računanja *GOF* vrijednosti spomenutih parametara opisana je u poglavlju 3.2.1. Na slici 4.8 prikazani su dobiveni rezultati. S obzirom na to da je glavni cilj bilo ustvrditi u kojoj je mjeri novodefinirani 3D model uspješno reproducirao očekivana svojstva gibanja tla, u nastavku su primarno opisane dobivene *GOF* vrijednosti za simulacije modela *DF\_3D* i njihov odnos naspram vrijednosti druga dva modela.

Na slici 4.8, a) prikazane su dobivene vrijednosti *GOF* za parametar *PGV* koji daje informaciju o amplitudi trešnje. U slučaju postaje DBR, za oba potresa E01 i E02, vrijednosti su dobre i veće u odnosu na one koje proizlaze iz simulacija modela *Ston\_H08* i *EPcrust*. Kod postaje DBRK, vrijednosti su loše do dobre te u većini slučajeva ili slične ili veće naspram vrijednosti druga dva modela. Iznimka su potres E04 gdje je vrijednost *GOF* modela *DF\_3D* značajno manja od vrijednosti *GOF* druga dva modela te potres E06 gdje je vrijednost *GOF* modela *DF\_3D* manja od vrijednosti *GOF* modela *EPcrust*. DF02 ima osrednju vrijednost koja je veća naspram vrijednosti *GOF* druga dva modela. DF04 ima osrednju vrijednost, a DF05 dobru – za obje postaje vrijednost *GOF* je manja od vrijednosti *GOF* modela *EPcrust*, ali veća od vrijednosti *GOF* modela *Ston\_H08*. Kod postaje STA, vrijednosti su loše do odlične, te za skoro sve slučajeve ili slične ili veće naspram vrijednosti druga dva modela. Iznimka je potres E06 u kojem model *EPcrust* ima veću vrijednost *GOF*. Postaja STON, slično kao i STA, za sve potrese uvijek ima veće vrijednosti *GOF* za model *DF\_3D* nego za model *Ston\_H08* te su one loše do dobre. Naspram modela *EPcrust*, vrijednosti *GOF* modela *DF\_3D* su u pola slučaja veće, a u pola slučaja manje. TREB ima dobru vrijednost *GOF* koja je veća naspram *GOF* vrijednosti druga dva modela.

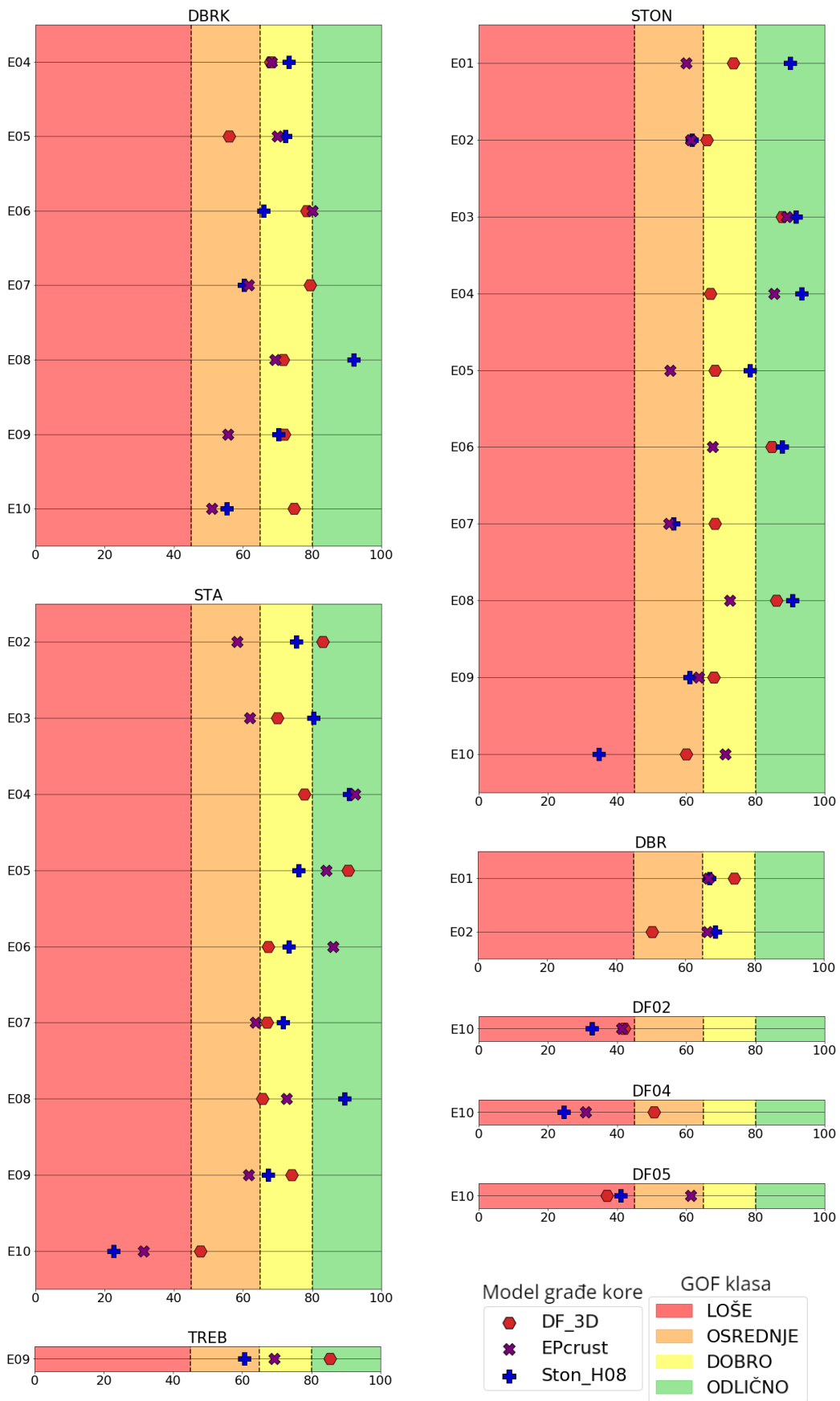
### a) Vršna brzina gibanja PGV



b) Međukorelacija  $C_{corr}$



c) Vrijeme trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$



◀ **Slika 4.8.** Vrijednosti mjere kvalitete prilagodbe  $GOF$  za: a) vršnu brzinu gibanja  $PGV$ ; b) međukorelaciju  $C_{corr}$ ; c) vrijeme trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$  niskofrekventnih ( $f \leq 1$  Hz) zapisa brzine gibanja tla različitih modela građe kore po parovima potres-postaja. Bojom su naznačene klase vrijednosti  $GOF$ .

Na slici 4.8, b) prikazane su vrijednosti  $GOF$  za parametar  $C_{corr}$  koji odražava koliko se preklapaju nastupne faze simuliranih i zabilježenih zapisa. Neovisno o razmatranoj postaji i potresu, za sva tri modela vrijednosti  $GOF$  su podjednako loše do osrednje (izuzev postaje STON koja ima i nekoliko dobrih vrijednosti). Razlike između  $GOF$  vrijednosti od modela do modela iznose između 1 i 15 bodova. Najveće razlike prisutne su u slučaju parova potres-postaja: E02-STA, E05-STA i E10-DF02. Modeli  $Ston\_H08$  i  $DF\_3D$  po parovima potres-postaja podjednako poprimaju najviše najvećih vrijednosti, dok model  $EPcrust$  najveće vrijednosti  $GOF$  poprima samo u slučajevima E02-STON, E05-STA i E06-DBRK.

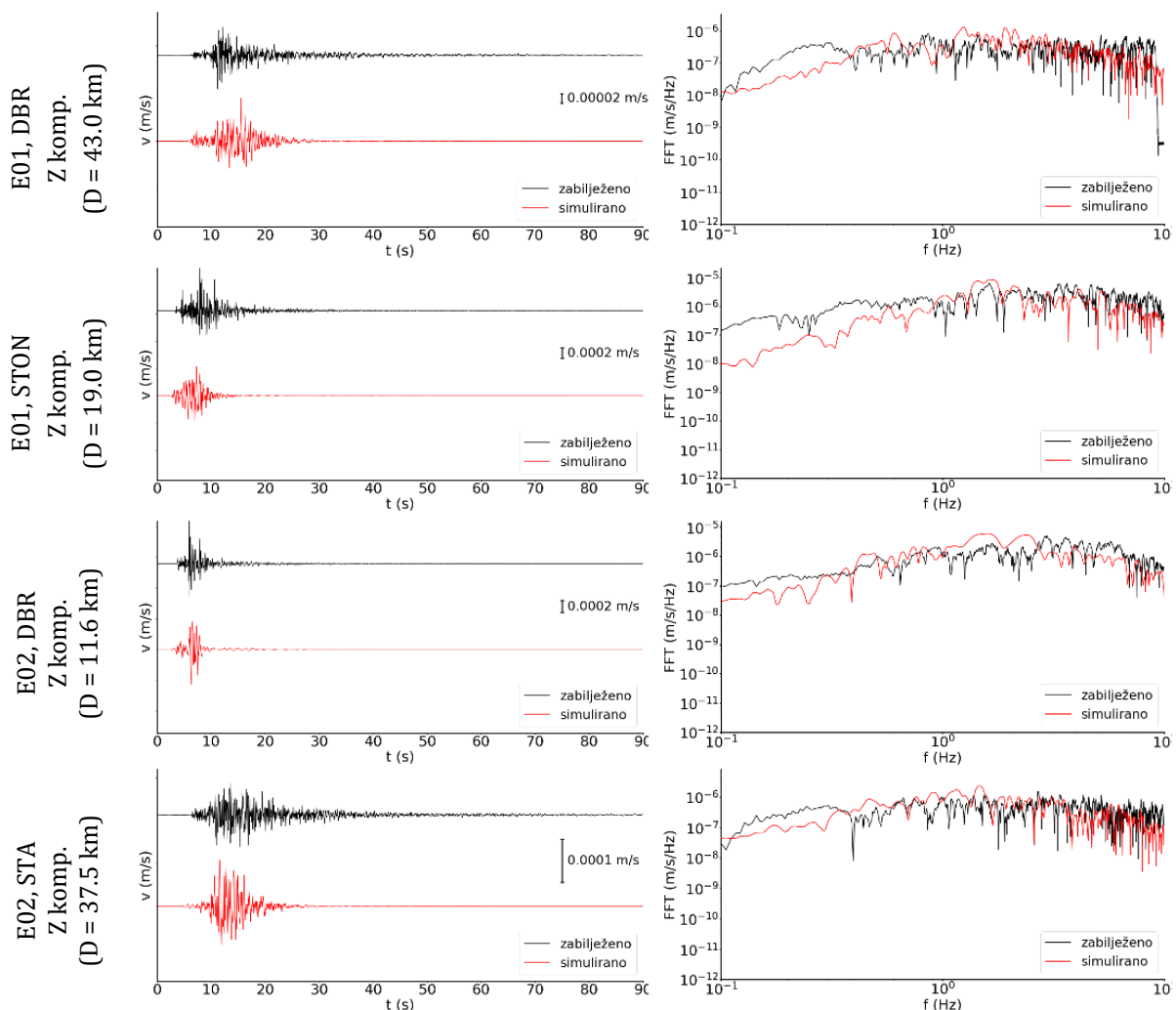
Na slici 4.8, c) prikazane su vrijednosti  $GOF$  za parametar  $t_{Dur}$  koji odražava sposobnost modela da reproducira reverberacije i refleksije uzrokovane geološkim strukturama istraživanog područja. U slučaju postaje DBR, vrijednosti su osrednje i dobre te za potres E01 veće u odnosu na one koje proizlaze iz simulacija modela  $Ston\_H08$  i  $EPcrust$ . Kod postaje DBRK, vrijednosti su osrednje do dobre te u većini slučajeva ili slične ili veće naspram vrijednosti druga dva modela. DF02 ima lošu vrijednost, a DF04 osrednju. Za obje postaje vrijednost  $GOF$  je veća od  $GOF$  vrijednosti druga dva modela. DF05 ima lošu vrijednost  $GOF$  koja je manja naspram modela  $EPcrust$ . Kod postaja STA i STON, vrijednosti su osrednje do odlične, te za većinu slučajeva ili slične ili veće naspram vrijednosti druga dva modela. TREB ima odličnu vrijednost koja je veća naspram vrijednosti  $GOF$  druga dva modela. Za potres E10 prisutne su generalno manje vrijednosti  $GOF$  parametra  $t_{Dur}$  za postaje DF02, DF04, DF05, STA i STON neovisno o korištenom modelu. Ovo je direktno povezano s time što je na zabilježenim zapisima prisutan dugoperiodički šum koji je utjecao na računanje vremena trajanja snažne trešnje. Točnije, dobiveno vrijeme je dulje od stvarnoga, pa je i sama usporedba s vremenima dobivenim za simulirane zapise na neki način otežana.

S obzirom na epicentralnu udaljenost, vrijednosti  $GOF$  parametara  $PGV$ ,  $C_{corr}$  i  $t_{Dur}$  ne pokazuju nikakvu konkretnu ovisnost, npr. proporcionalnost ili linearnost. Vrijednosti su ujednačeno raspodijeljene unutar raspona vrijednosti: od 23 do 89 za parametar  $PGV$ ; od 16 do 53 za  $C_{corr}$ ; te od 46 do 91 za  $t_{Dur}$ . Jedine iznimke su povećane vrijednosti  $GOF$  međukorelacijskih funkcija parova potres-postaja: E03-STON (71), E04-STON (81) i E07-DBRK (67) čije su epicentralne udaljenosti 15-25 km te smanjena vrijednost za parametar  $t_{Dur}$  i slučaj E10-DF05 ( $GOF = 36$ ). Vrijednosti  $GOF$  sva tri parametra također su neovisne o magnitudi te ujednačeno raspodijeljene unutar spomenutih raspona vrijednosti.

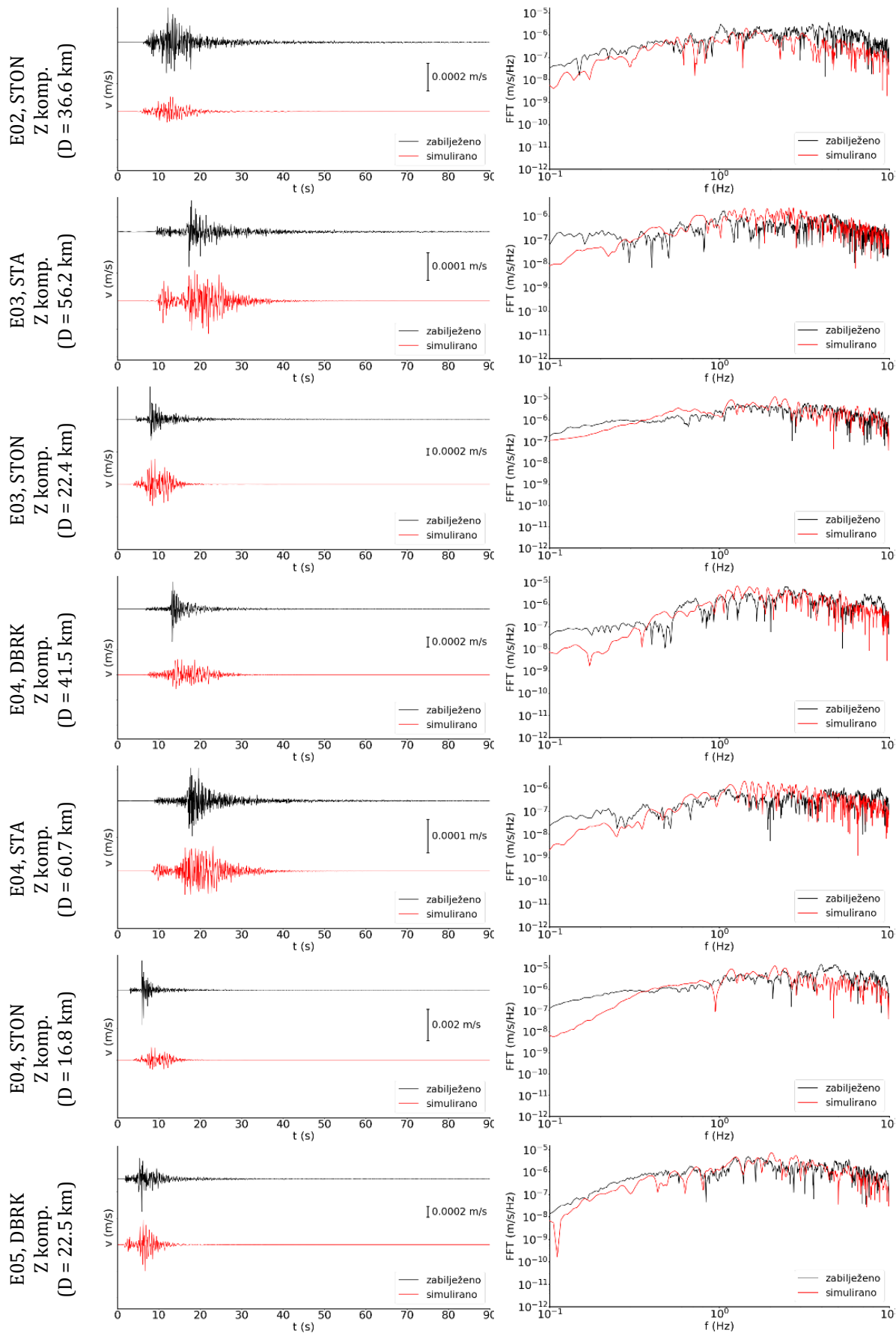


### 4.3. Simulacije širokopolasnih zapisa gibanja tla umjerenih do jakih potresa

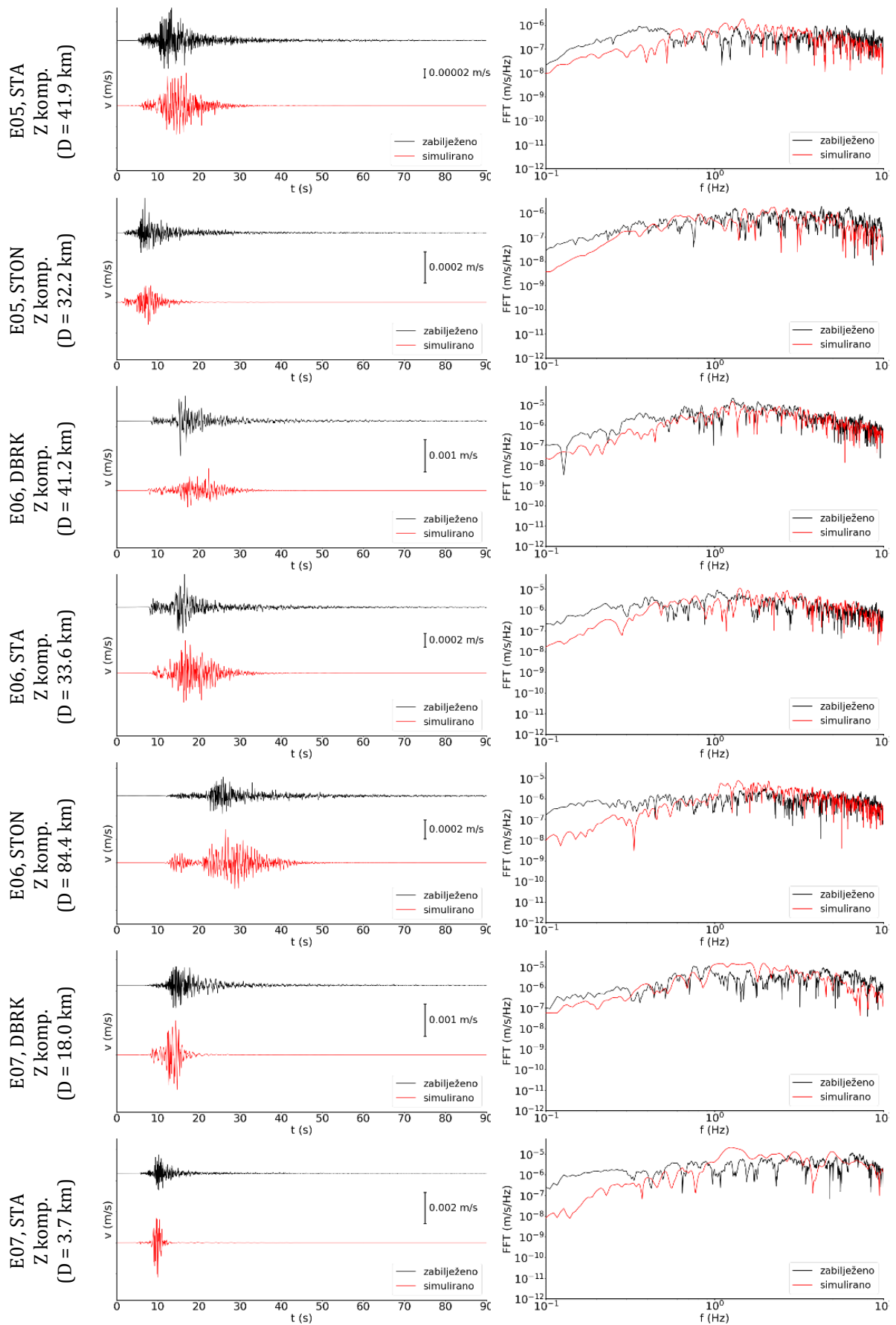
Pomoću hibridne metode simulirani su širokopolasni seizmogrami frekvencija od 0.1 do 10 Hz za vrijeme  $t \in [0, 90]$  s i vremenski korak  $\Delta t = 0.01$  s za postaje i potrese navedene u tablicama 2.1 i 2.2. Metodologija simuliranja širokopolasnih zapisa gibanja tla detaljno je opisana u poglavlju 3.1. Širokopolasni zapisi dobiveni su sjedinjavanjem odvojeno izračunatih niskofrekventnih i visokofrekventnih doprinosa. Prilikom simuliranja niskofrekventnog doprinosa, korišten je 3D lokalni model  $DF\_3D$ , dok je za potrebe simuliranja visokofrekventnog doprinosa korišten 1D model  $DF\_1D$ . Oba modela opisana su u poglavlju 4.1.2. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 4.9, D.3 i D.4.



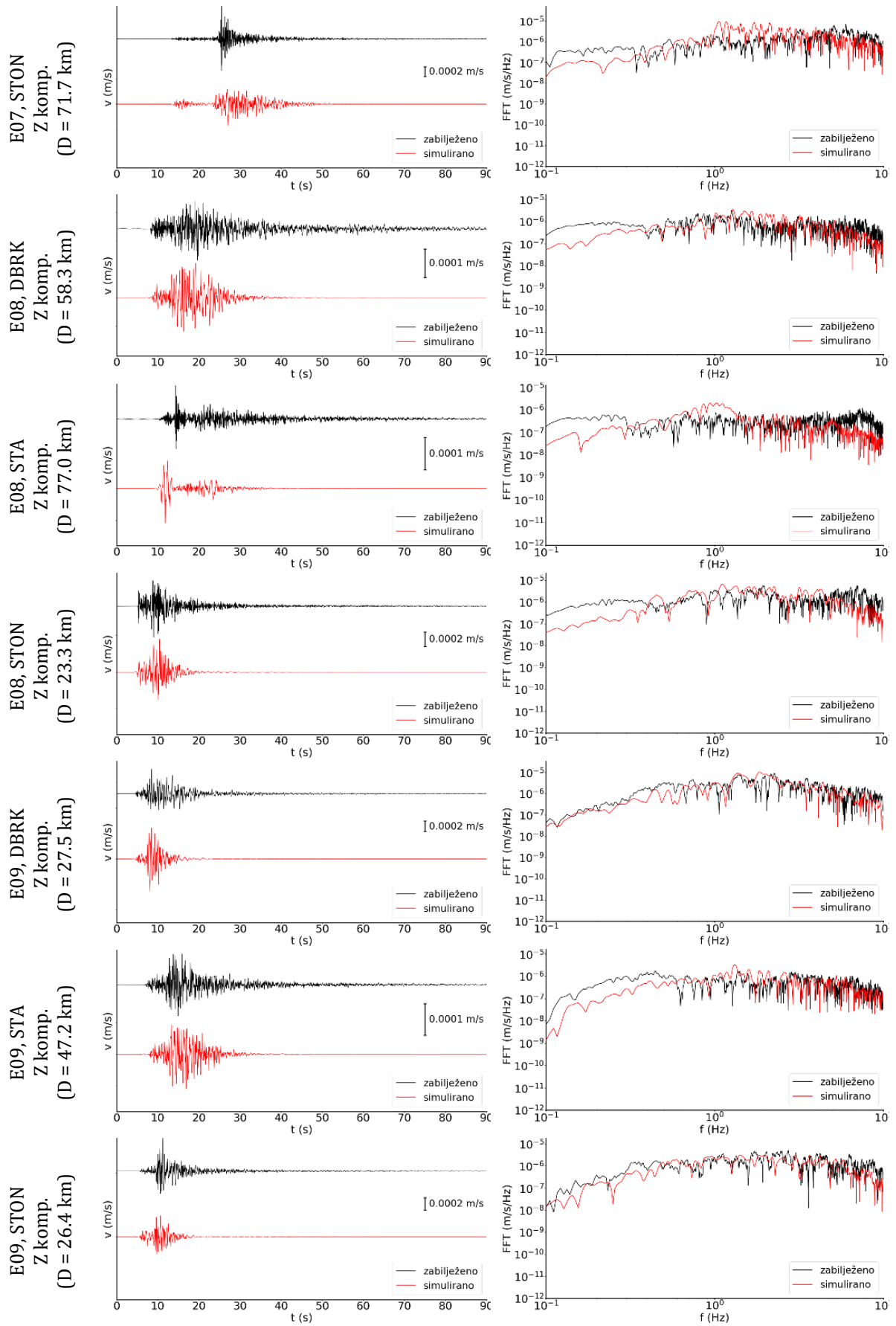
**Slika 4.9.** Zapisi brzine gibanja tla (lijevo) te pripadni Fourierovi spektri (desno) vertikalne komponente (Z komp.) zabilježenog (crno) i simuliranog (crveno) podatka po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 10 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost promatrane postaje od potresa.



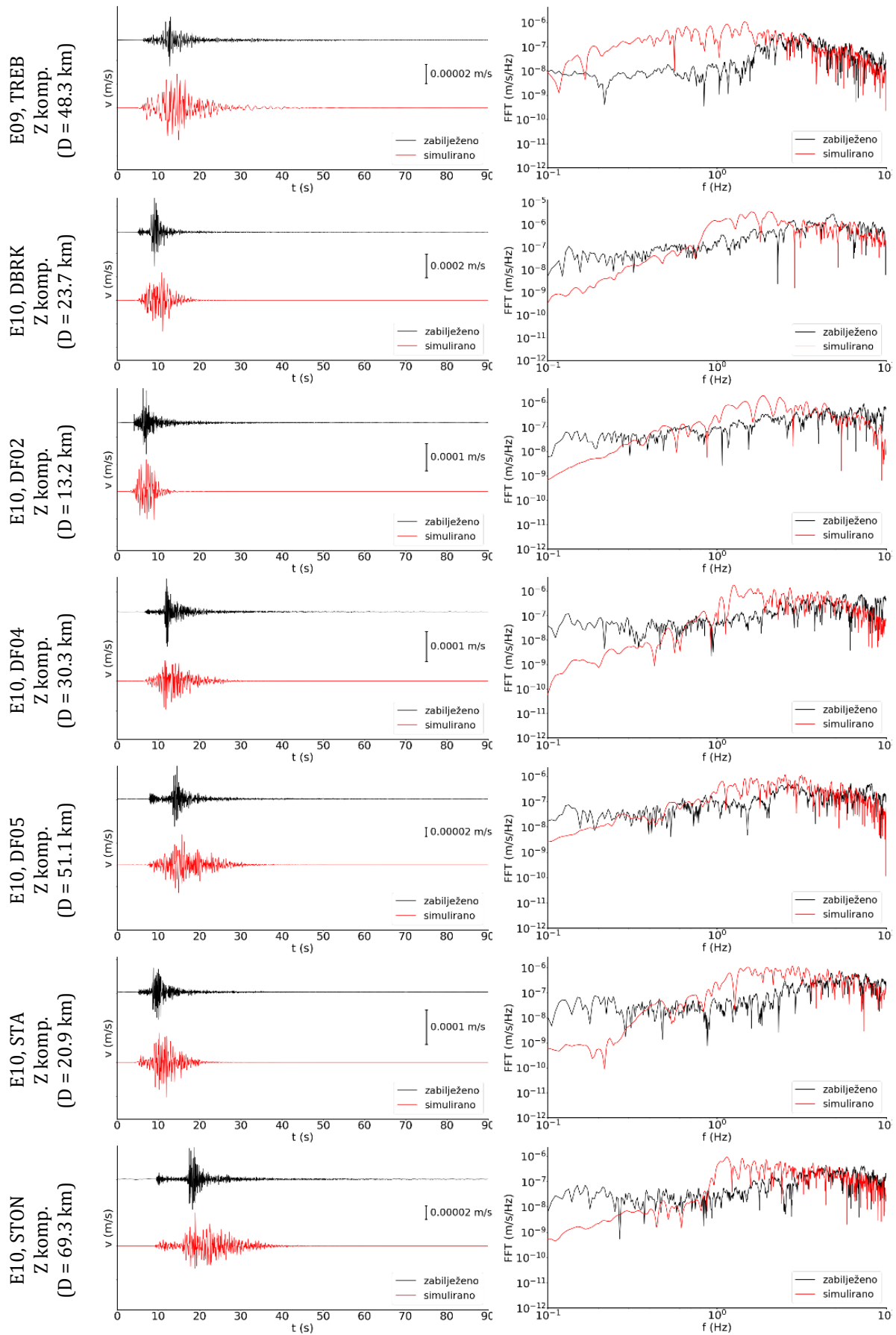
Slika 4.9. Nastavlja se.



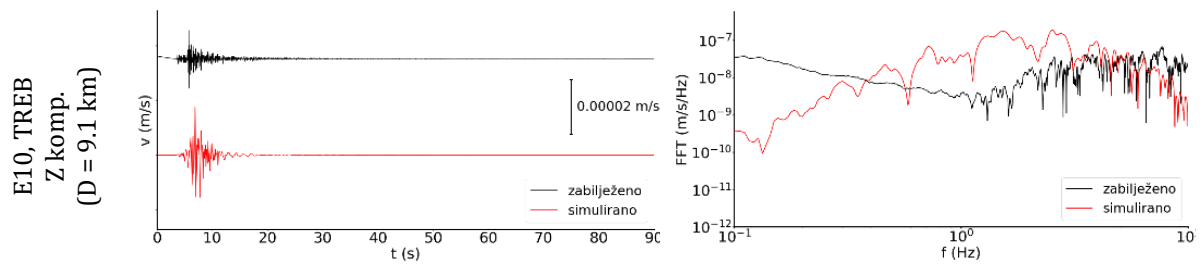
Slika 4.9. Nastavlja se.



Slika 4.9. Nastavlja se.



Slika 4.9. Nastavlja se.



**Slika 4.9.** Nastavlja se.

Na slikama 4.9, D.3 i D.4 prikazane su redom vertikalna (Z), istočna (E) i sjeverna (N) komponenta širokopojasnog zapisa zabilježene i simulirane brzine gibanja tla te pripadni Fourierovi spektri. Svi podatci najprije su obrađeni na način da budu usporedivi u daljnjim analizama. Zabilježenim seizmogramima uklonjen je instrumentalni odziv, a simulirani seizmogrami su preuzorkovani na frekvenciju uzorkovanja kojom je pojedina postaja zabilježila potres (tablica A.1). Svi zapisi filtrirani su pomoću širokopojasnog Butterworthovog filtera četvrtog reda između 0.1 i 10 Hz. U nastavku je opisana vizualna provjera seizmograma i Fourierovih spektara parova potres-postaja radi evaluacije uspješnosti hibridnih simulacija.

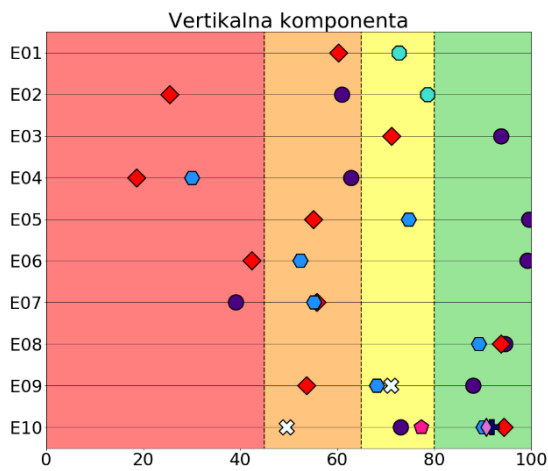
Vizualno, amplitude simuliranih zapisa postaje DBR odgovaraju zabilježenima za sve tri komponente i oba potresa E01 i E02. Isto vrijedi za postaju DBRK i većinu razmatranih potresa. Iznimke su precijenjene amplitude simulacija horizontalnih komponenti iza S-faze potresa E04, E06 i E07, precijenjene amplitude svih triju komponenti simulacija potresa E09 te precijenjena amplituda simulirane istočne komponente za potres E10. U slučaju postaja DF02, DF04 i DF05, amplitude simulacija su također precijenjene na horizontalnim komponentama gibanja tla, dok se vertikalne komponente relativno dobro slažu sa zabilježenima. Simulirana vertikalna komponenta postaje STA za većinu potresa odgovara zabilježenim zapisima, dok su horizontalne komponente u pravilu precijenjenih amplitude u kasnijim dijelovima seizmograma (iza S-faze). Iznimka su potres E03 gdje na vertikalnoj komponenti amplituda simulacija premašuje amplitudu zabilježenog zapisa oko P-faze te potres E07 gdje su amplitude simulacija svih triju komponenti precijenjene. Ističe se još i simulirana vertikalna komponenta potresa E08 na kojoj kao da nedostaje visokofrekventni doprinos u hibridnom seizmogramu. Nadalje, u ovom potresu na sve tri komponente paket velike energije rani u odnosu na onaj koji se opaža na početku zabilježenog zapisa. Simulirana vertikalna komponenta postaje STON za većinu potresa odgovara zabilježenim zapisima, dok su horizontalne komponente u pravilu precijenjenih amplitude u kasnijim fazama seizmograma. Iznimke su potresi E02 i E04 kod kojih je simulirana vertikalna komponenta podcijenjena u odnosu na zabilježenu, te potres E06 gdje su sve tri simulirane komponente precijenjenih amplitude. Kod potresa E01 i E05, simulirane horizontalne komponente precijenjuju amplitude i na početku zapisa (oko P-faze). Amplitude simulacija postaja TREB precijenjene su za sve tri komponente i oba potresa E09 i E10.

Neovisno o razmatranoj komponenti, simulirani i zabilježeni seizmogrami oblikom se vizualno ponajviše razlikuju u načinu na koji amplitude trnu u kodama seizmograma. Konkretno, amplitude simuliranih zapisa presporo trnu u odnosu na zabilježene zapise u slučajevima parova potres-postaja: E01-DBR, E03-STA i STON, E04-DBRK, STA i STON, E06-DBRK i STON, E07-STON, E09-TREB te E10-DF04, DF05, STA, STON i TREB. S druge strane, u odnosu na zabilježene zapise amplitude prebrzo trnu u simulacijama parova potres-postaja: E01-STON, E02-DBR, STA i STON, E05-DBRK i STON, E07-DBRK i STA, E08-DBRK, STA i STON, E09-DBRK, STA i STON te E10-DF02. Način opadanja amplituda s vremenom povezan je s atenuacijom – atenuacija je nedostatna kada amplitude trnu presporo, odnosno prevelika ako trnu prebrzo. Nadalje, oblik seizmograma povezan je i s duljinom trajanja snažne trešnje – vrijeme će biti to dulje što je atenuacija manja i obratno. Drugim riječima, duljine trajanja trešnje simuliranih i zabilješnih zapisa usporedive su na sličan način kao i sam oblik seizmograma.

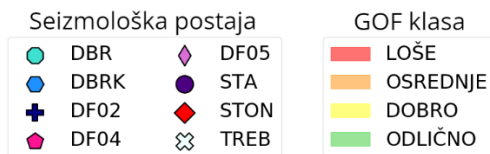
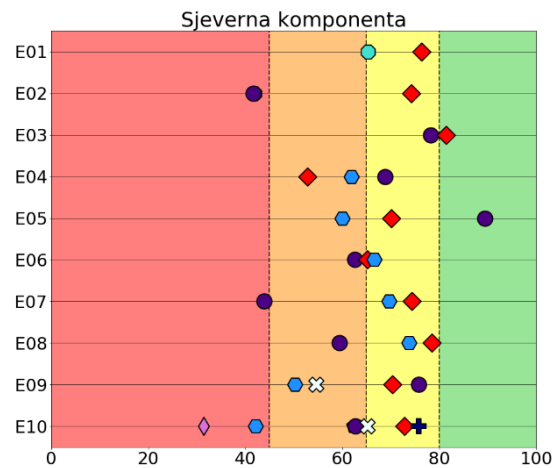
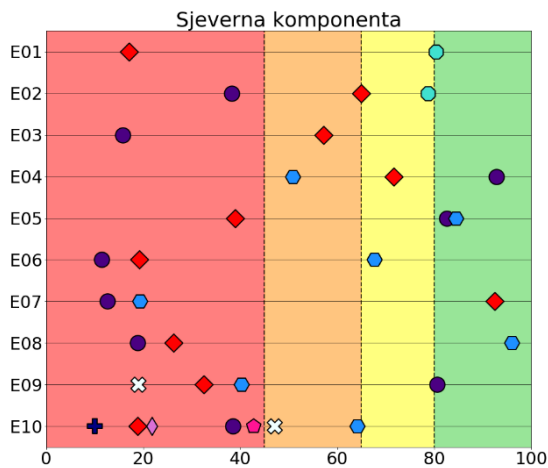
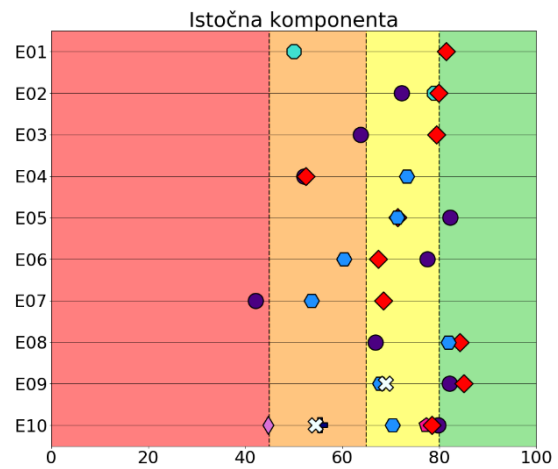
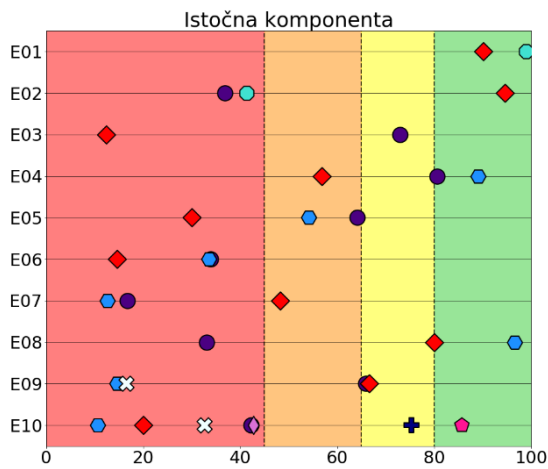
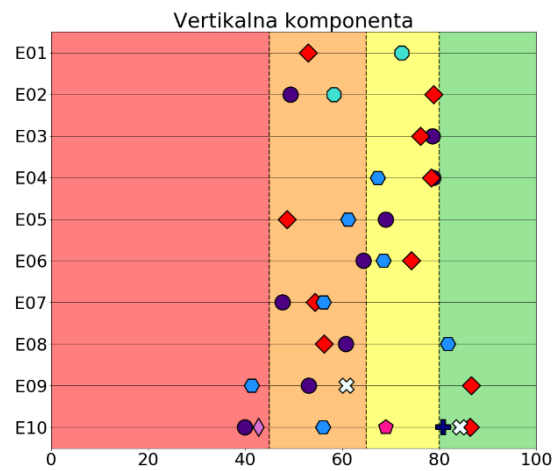
U slučaju Fourierovih spektara, vizualno se može uočiti da su amplitude niskofrekventnog dijela simuliranog signala svih triju komponenti podcijenjene u odnosu na amplitudu spektra zabilješnog zapisa za većinu parova potres-postaja: E01-DBR i STON, E02-STA, E04-DBRK, E05-DBRK, STA i STON, E06-DBRK, STA i STON, E07-DBRK, STA i STON, E08-DBRK, STA i STON te E10-DBRK, DF02, DF04, DF05, STA, STON i TREB. Amplitude visokofrekventnog dijela signala (frekvencije 1–3 Hz) precijenjene su na horizontalnim simuliranim komponentama postaje STA za potrese E03 i E07, te postaje STON za potrese E03, E04, E06, E07 i E08. Kod potresa E10, amplitude Fourierovih spektara triju komponenti simuliranih zapisa precijenjene su u visokofrekventnom dijelu signala (frekvencije 1–5 Hz) kod svake postaje. Kod potresa E09, postaja TREB u skladu s opažanjima u poglavlju 4.2., pokazuje neslaganje spektara u niskofrekventnim doprinosima, dok su amplitude Fourierovih spektara simulacija visokofrekventnih doprinosa precijenjene na frekvencijama 1–3 Hz. Podcijenjene amplitude simulacija visokofrekventnog dijela signala mogu se opaziti za slučajeve vertikalne komponente postaje STON i potrese E03 te E08. Za kraj, na nekim parovima potres-postaja, Fourierov spektar simulacija je izglađen u odnosu na Fourierov spektar zabilješnih zapisa: E02-DBR (samo visokofrekventni dio signala) te E07-DBR i STA (čitavi zapis).

Kao nadopuna vizualne provjere simuliranih širokopojasnih seizmograma, provedena je dodatna validacijska metoda rezultata. Konkretno, izračunate su mjere kvalitete prilagodbe (*GOF*) za vršne vrijednosti brzina tla *PGV* i vremena trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$ . Metoda računanja vrijednosti *GOF* spomenutih parametara opisana je u poglavlju 3.2.1. Na slici 4.10 prikazani su dobiveni rezultati.

a) Vršna brzina gibanja  $PGV$



b) Vrijeme trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$



**Slika 4.10.** Mjere kvalitete prilagodbe  $GOF$  za: a) vršnu brzinu gibanja; b) vrijeme trajanja snažne trešnje širokopojasnih ( $0.1 \leq f \leq 10$  Hz) zapisa vertikalne, istočne i sjeverne komponente brzine gibanja tla po parovima potres-postaja. Bojom su naznačene klase vrijednosti  $GOF$ .

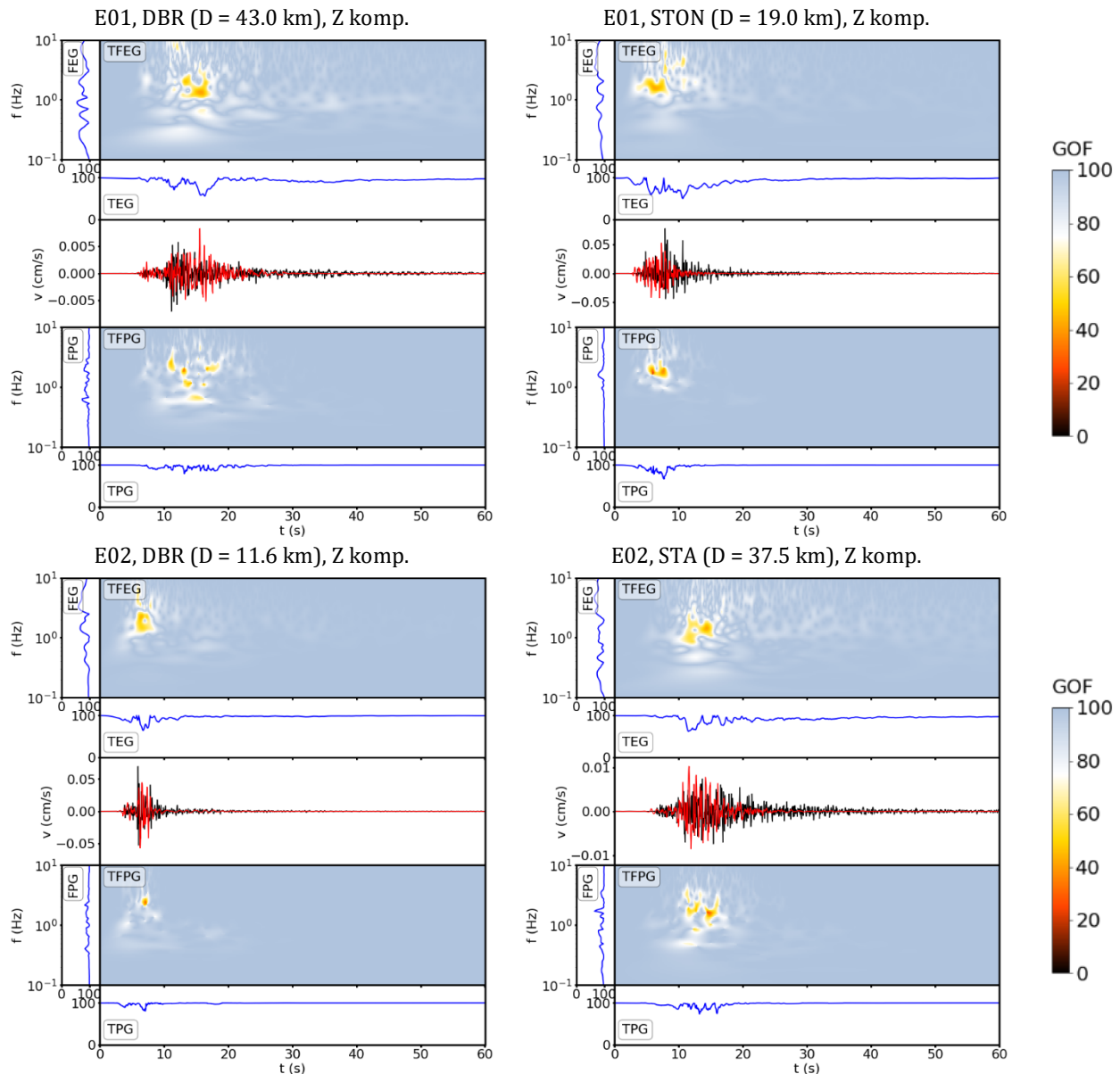


Na slici 4.10, a) prikazane su dobivene vrijednosti *GOF* za parametar *PGV* vertikalne (Z), istočne (E) i sjeverne (N) komponente brzine gibanja tla. U slučaju postaje DBR, za oba potresa E01 i E02, vrijednosti su dobre za komponente Z i N. Komponenta E ima lošu ocjenu za potres E01, a odličnu za potres E02. Kod postaje DBRK, vrijednosti su loše do odlične na svakoj od tri komponente, a komponenta E ima najviše loših vrijednosti. DF02 za Z i E komponentu postiže redom odličnu i dobru ocjenu, a za N lošu *GOF* ocjenu. DF04 za E i Z komponentu postiže redom odličnu i dobru ocjenu, a za N lošu. Postaja DF05 postiže za sve tri komponente lošu vrijednost. Kod postaje STA, komponenta Z u pravilu ima osrednje do odlične ocjene (iznimka je loša vrijednost za potres E07). Komponente N i E postižu loše do odlične vrijednosti, te je od tri komponente, najviše loših vrijednosti za N. Postaja STON, neovisno o razmatranoj komponenti, postiže vrijednosti *GOF* za *PGV* od loših do odličnih. TREB za komponentu Z ima redom dobru i osrednju ocjenu za potrese E09 i E10. Komponente N i E su loše u slučaju potresa E09, te loše i osrednje redom u slučaju potresa E10. Sumirano, istočna i sjeverna komponenta imaju više loših vrijednosti u odnosu na vertikalnu komponentu. Ovo je posebno uočljivo za potres E10 gdje se vrijednosti komponenti E i N u pravilu grupiraju oko loših, a kod vertikalne od dobrih do odličnih. Iznimka je u slučaju potresa E04, gdje horizontalne komponente E i N imaju veće vrijednosti od vrijednosti *GOF* vertikalne komponente.

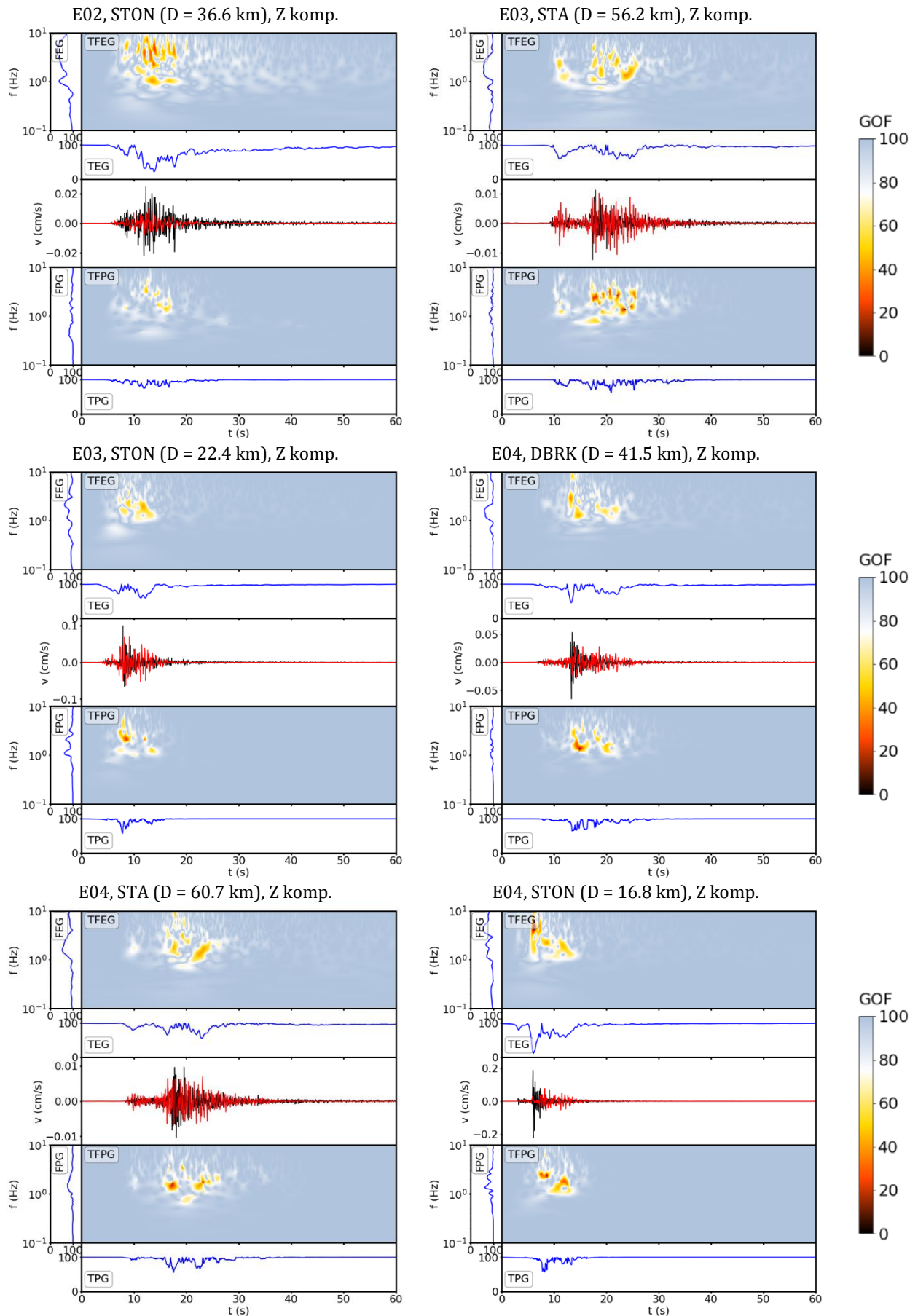
Na slici 4.10, b) prikazane su vrijednosti *GOF* za parametar  $t_{Dur}$  vertikalne (Z), istočne (E) i sjeverne (N) komponente brzine gibanja tla. U slučaju postaje DBR, vrijednosti su osrednje i dobre, a iznimka je loša vrijednost komponente N za potres E02. Kod postaje DBRK, vrijednosti su osrednje do odlične. Komponente Z i N imaju po jednu lošu vrijednost i to za potrese E09 i E10 redom. DF02 za Z komponentu ima odličnu ocjenu, za N dobru, a za E osrednju. Postaja DF04 za komponente Z i E ima dobre vrijednosti, a za N osrednju. DF05 ima lošu vrijednost *GOF* za sve tri komponente. Kod STA, komponente E i N imaju loše do odlične vrijednosti, a Z loše do dobre. Najmanje vrijednosti postižu se za potres E07, a kod komponente Z i N niske vrijednosti još su i u slučaju potresa E10 i E02, redom. Postaja STON kod svih triju komponenti postiže osrednje do odlične ocjene. Kod TREB, N i E imaju osrednje i dobre vrijednosti, a Z osrednju za E09 te odličnu za potres E10. Gledajući sve potrese, kod svih triju komponenti ocjene variraju od loših do odličnih, stoga da je najviše odličnih vrijednosti prisutno na istočnoj komponenti. Za razliku od *GOF* vrijednosti parametra *PGV*, vrijednosti *GOF* parametra  $t_{Dur}$  uvijek se grupiraju na sličan način za neki potres neovisno o komponenti koja se razmatra.

S obzirom na epicentralnu udaljenost i magnitudu razmatranog potresa, vrijednosti *GOF* parametara *PGV* i  $t_{Dur}$  ne pokazuju nikakvu očitu ovisnost. Vrijednosti su ujednačeno raspodijeljene unutar raspona vrijednosti: za parametar *PGV* od 19 do 100 za komponentu Z, od 11 do 99 za E te od 3 do 96 za N te za parametar  $t_{Dur}$  od 39 do 86 za komponentu Z, od 42 do 85 za E te od 42 do 89 za N. Jedina iznimka je manja vrijednost *GOF* u slučaju postaje DF05 na komponenti N ( $GOF = 32$ ).

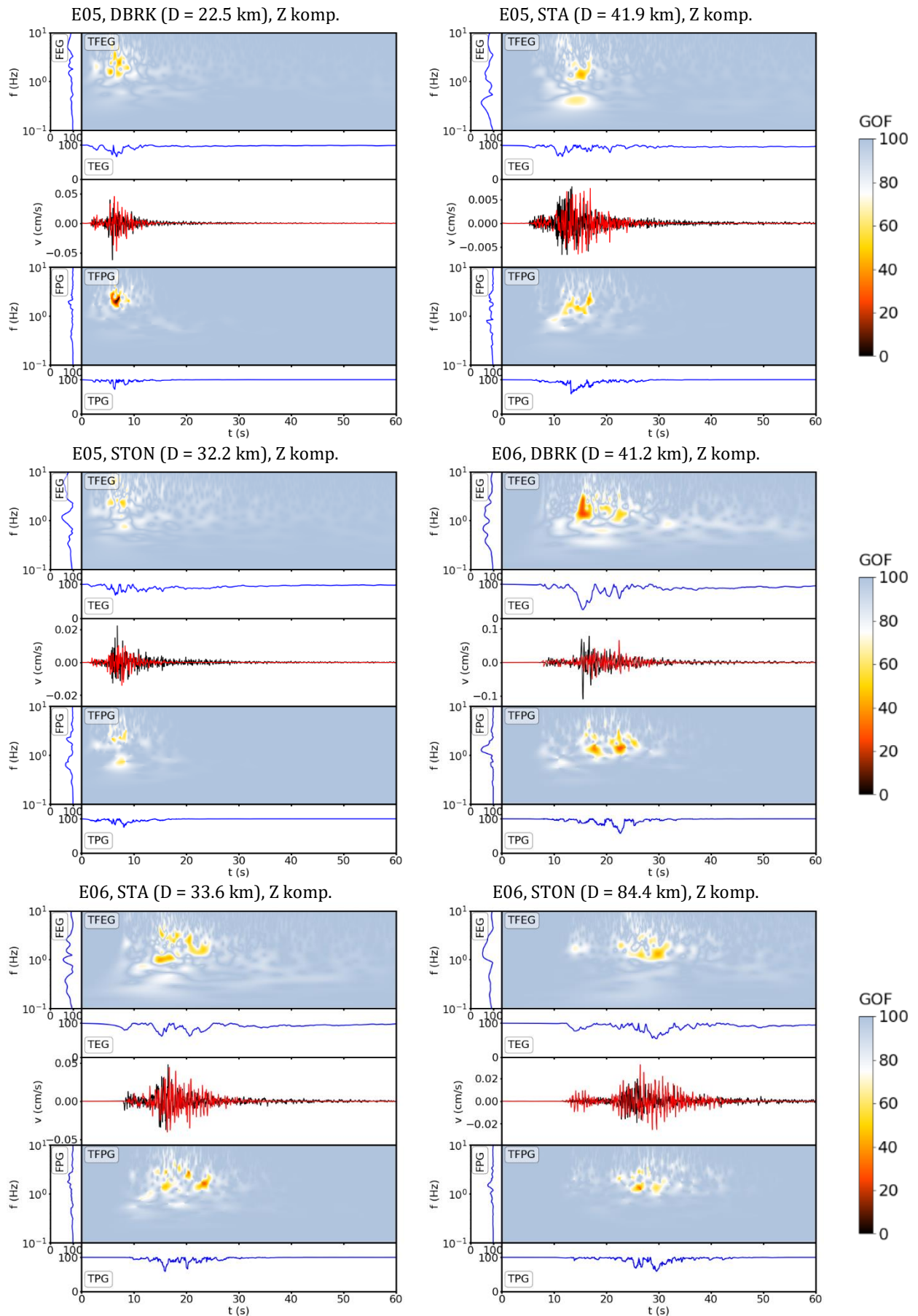
Uz mjere kvalitete prilagodbe, kao drugi korak validacije rezultata širokopojsnih zapisa gibanja tla korištene su globalno normirane vremensko-frekventne funkcije odstupanja ovojnica i faza opisane u poglavlju 3.2.3. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 4.11, D.5 i D.6.



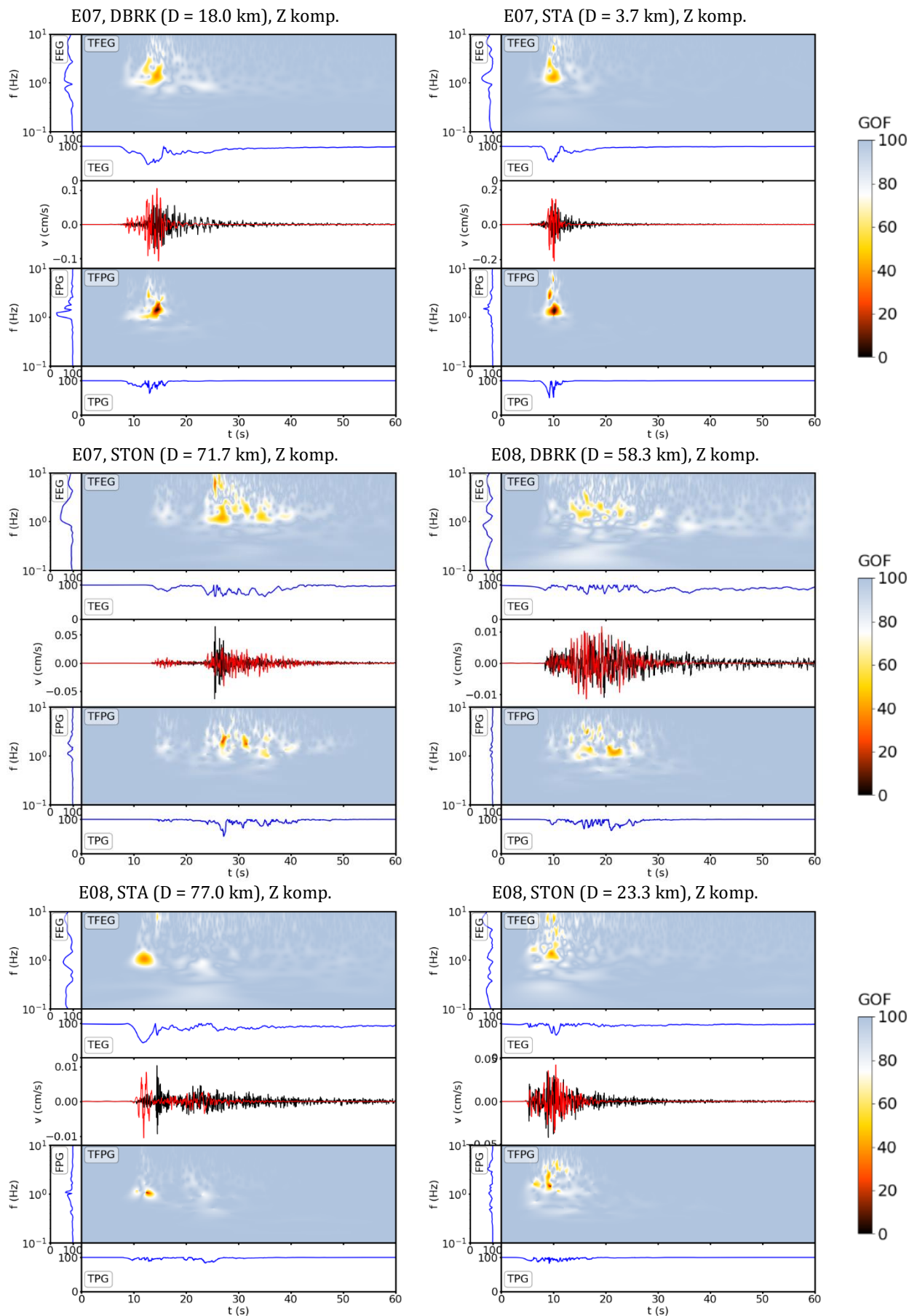
**Slika 4.11.** Funkcije mjera kvaliteta prilagodbe *TFEG*, *TFPG*, *TEG*, *TPG*, *FEG* i *FPG* vertikalne komponente (Z komp.) zabilježenog (crno) i simuliranog (crveno) podatka po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 10 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost potresa i promatrane postaje. Skalom 0–100 i bojom naznačene su vrijednosti *GOF* pojedine funkcije.



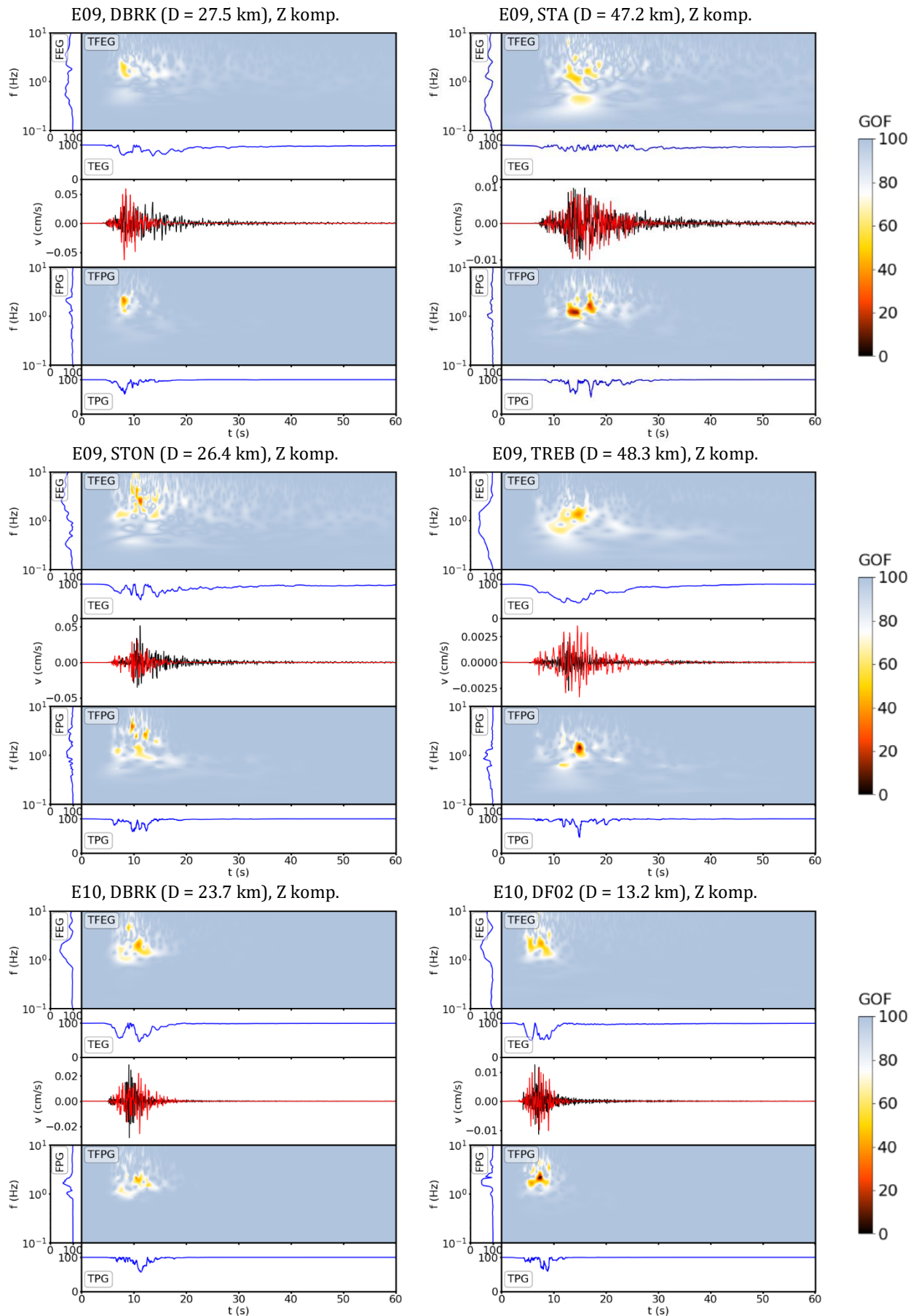
Slika 4.11. Nastavlja se.



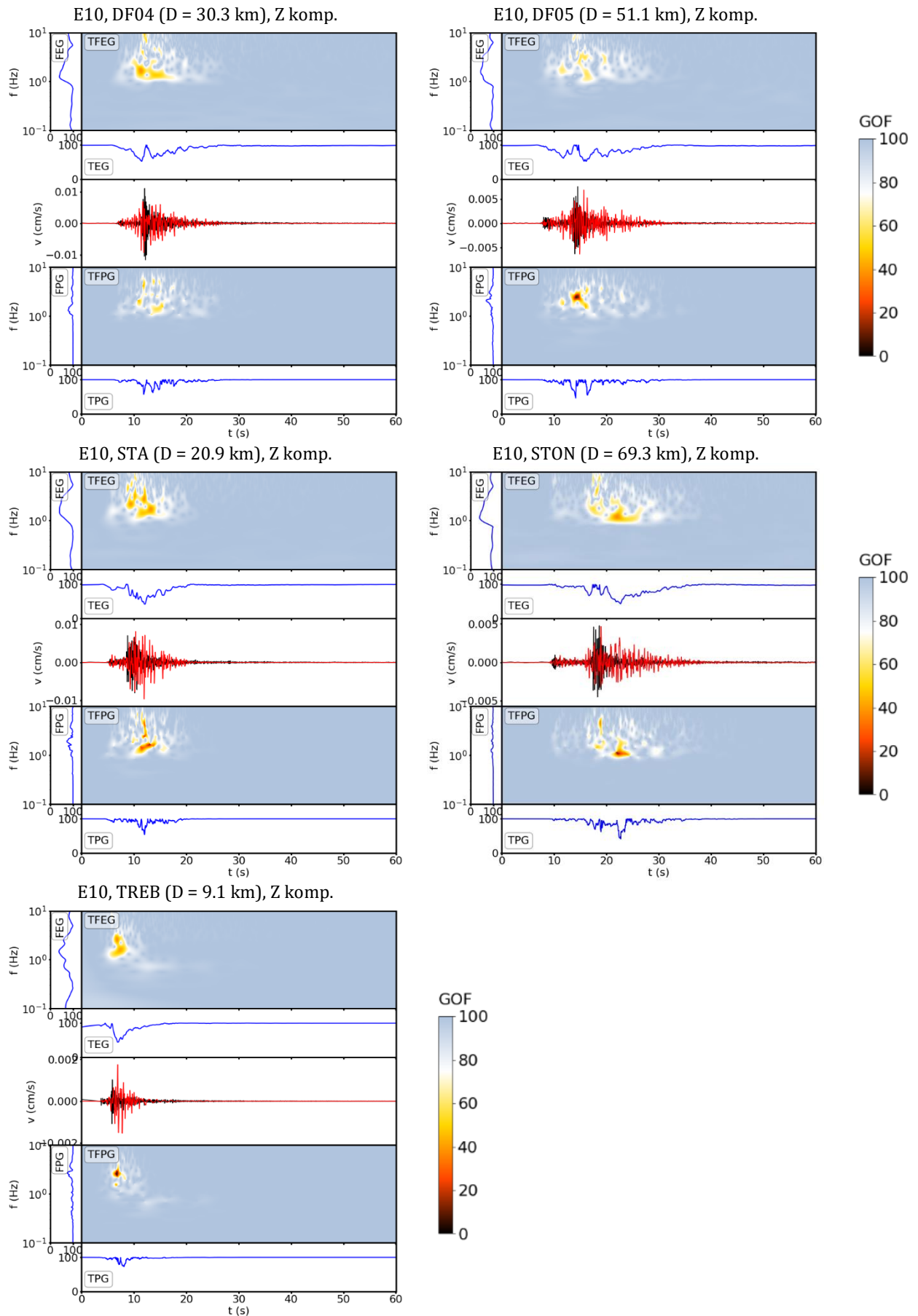
Slika 4.11. Nastavlja se.



Slika 4.11. Nastavlja se.



Slika 4.11. Nastavlja se.



Slika 4.11. Nastavlja se.

Na slikama 4.11, D.5 i D.6 prikazane su funkcije mjera kvalitete prilagodbe *TFEG*, *TFFG*, *TEG*, *TPG*, *FEG* i *FPG* vertikalne (Z), istočne (E) i sjeverne (N) komponente brzine gibanja tla. U nastavku su odvojene opisane vrijednosti *GOF* funkcija ovojnica i faza po postajama. Kod ovojnica se promatraju vrijednosti *GOF* funkcija mjera kvaliteta prilagodbe u vremenskoj domeni (*TEG*), frekventnoj domeni (*FEG*) i vremensko-frekventnoj domeni (*TFEG*). Analogno, kod faza to su funkcije mjera kvalitete prilagodbe u vremenskoj domeni (*TPG*), frekventnoj domeni (*FPG*) i vremensko-frekventnoj domeni (*TFFG*).

U slučaju postaje DBR ovojnica vertikalne i sjeverne komponente imaju smanjene vrijednosti *GOF* u kasnijim fazama seizmograma (iza S-faze) za frekvencije 1–3 Hz. Kod ovojnica istočne komponente vrijednosti su također manje u kasnijim fazama, ali za širi raspon frekvencija, konkretno 2–10 Hz. Kod sve tri komponente, vrijednosti *GOF* funkcija kvaliteta prilagodbe ovojnica su veće od 40. Kod postaje DBRK, manje vrijednosti *GOF* (koje su i dalje veće od 40) kod ovojnica svih triju komponenti se uočavaju nakon nailaska S-faze za frekvencije 1–4 Hz. Kod potresa E06, komponente E i N postižu nešto manje vrijednosti *GOF* i za frekvencije 0.7–0.9 Hz. Niža donja granica vrijednosti *GOF* kod ovojnica komponente Z uočava se za potres E06 ( $GOF > 20$ ), a kod komponenta E i N za potres E08 ( $GOF > 30$ ). Vrijednosti *GOF* ovojnica svih triju komponenti u slučaju postaje DF02 uvijek su veće od 40, a najmanje vrijednosti uočavaju se nakon nailaska S-faze za frekvencije 1–4 Hz. Kod postaje DF04, vrijednosti *GOF* ovojnica svih triju komponenti uvijek su veće od 30, a najmanje vrijednosti uočavaju se nakon nailaska S-faze za frekvencije 1–2 Hz. Vrijednosti *GOF* ovojnica komponenta Z i E postaje DF05 uvijek su veće od 60. Kod komponente N donji prag je niži, te je  $GOF > 30$ . Kod sve tri komponente manje vrijednosti *GOF* uočavaju se iza S-faze za frekvencije 1–5 Hz. U slučaju postaje STA ovojnica triju komponenti za većinu potresa imaju manje vrijednosti *GOF* ( $GOF > 30$ ) u kasnijim fazama seizmograma (iza S-faze) za frekvencije 1–5 Hz. Kod potresa E03 i E08 i komponentu Z, manje vrijednosti *GOF* uočljive su još i na samom početku zapisa seizmograma (oko P-faze). Manje vrijednosti *GOF* uočljive su i u slučaju vertikalne komponente za potres E05 i frekvencije 0.4–0.5 Hz, te sjeverne komponente za potres E08 i frekvencije 1–8 Hz. Kod postaje STON ovojnica svih triju komponenti za većinu potresa imaju manje vrijednosti *GOF* ( $GOF > 30$ ) u kasnijim fazama seizmograma i čitavi visokofrekventni dio. Donji pragovi vrijednosti *GOF* ( $GOF > 20$ ) najmanji su u slučaju potresa E02 i E07. Kod potresa E01, E03 i E06 donji pragovi vrijednosti *GOF* su nešto veći ( $GOF > 40$ ) te se manje vrijednosti uočavaju za frekvencije 1–3 Hz. Kod komponente Z, manje vrijednosti *GOF* ( $GOF > 50$ ) uočavaju se i za niže frekvencije, konkretno 0.7–0.9 Hz. Smanjene vrijednosti *GOF* ovojnica uočljive su i na samom početku zapisa (oko P-faze) u slučaju komponente E i potres E04 te komponente N i potres E03. U slučaju postaje TREB, vrijednosti *GOF* ovojnica vertikalne i istočne komponente čitavog zapisa najmanje su za frekvencije 0.4–3 Hz. Kod sjeverne komponente, vrijednosti su niže samo u kasnijim fazama seizmograma (iza S-faze) za frekvencije 1–3 Hz. Kod potresa E10, manje vrijednosti *GOF* funkcija kvaliteta prilagodbe komponenta Z, N i E uočljive su samo za kasnije faze seizmograma i frekvencije 1–4 Hz. Kod sve tri komponente i oba potresa, vrijednosti *GOF* funkcija kvaliteta prilagodbe ovojnica veće su od 40.



Vrijednosti *GOF* funkcija kvaliteta prilagodbe faza postaje DBR kod svih triju komponenti poprimaju manje vrijednosti ( $GOF > 20$ ) u kasnijim fazama seizmograma (iza S-faze) za frekvencije 1–5 Hz. U slučaju potresa E01 i komponente Z, vrijednosti su još niže za frekvencije 0.7–0.9 Hz. Vrijednosti *GOF* faza postaje DBRK za većinu potresa i sve tri komponente poprimaju niže vrijednosti ( $GOF > 20$ ) u kasnijim fazama seizmograma za frekvencije 1–3 Hz. Kod potresa E05 manje vrijednosti uočljive su za frekvencije 2–5 Hz, a kod potresa E10 za frekvencije 1–4 Hz. Kod potresa E06 i komponentu N, manje vrijednosti *GOF* prisutne su još i na početku seizmograma (kod P-faze). U slučaju postaja DF02 i DF05, manje vrijednosti *GOF* funkcija kvaliteta prilagodbe faza ( $GOF > 20$ ) kod svih triju komponenti uočljive su za frekvencije 2–4 Hz i cijeli zapis. Kod postaje DF04, manje vrijednosti *GOF* ( $GOF > 40$ ) također su uočljive na čitavom zapisu kod sve tri komponente, ali za frekvencije 1–4 Hz. Vrijednosti *GOF* faza postaje STA za većinu potresa i sve tri komponente poprimaju niže vrijednosti ( $GOF > 20$ ) u kasnijim fazama seizmograma za frekvencije 1–5 Hz. Kod potresa E07 manje vrijednosti uočljive su za frekvencije 1–9 Hz, a kod potresa E08 za frekvencije 1–3 Hz. Kod potresa E03 i komponente Z i E, manje vrijednosti *GOF* faza prisutne su još i na početku seizmograma (kod P-faze). Kod postaje STON faze svih triju komponenti za većinu potresa imaju manje vrijednosti *GOF* ( $GOF > 20$ ) u kasnijim fazama seizmograma i za frekvencije 1–8 Hz. Kod Z komponente, manje vrijednosti *GOF* uočavaju se i za niže frekvencije, konkretno 0.7–0.9 Hz. Smanjene vrijednosti *GOF* faza uočljive su i na samom početku zapisa (oko P-faze) kod svih triju komponenti i potrese E01, E02, E07 te E08. U slučaju postaje TREB, vrijednosti *GOF* funkcija kvaliteta prilagodbe faza najmanje ( $GOF > 20$ ) su u kasnijim fazama seizmograma (iza S-faze) za frekvencije 1–3 Hz i potres E09, odnosno 1–5 Hz i potres E10. Kod potresa E09, manje vrijednosti *GOF* uočljive su još i na komponenti Z za potres E09 te frekvencije 0.7–0.9 Hz.

#### 4.4. Simulacija Velikog dubrovačkog potresa

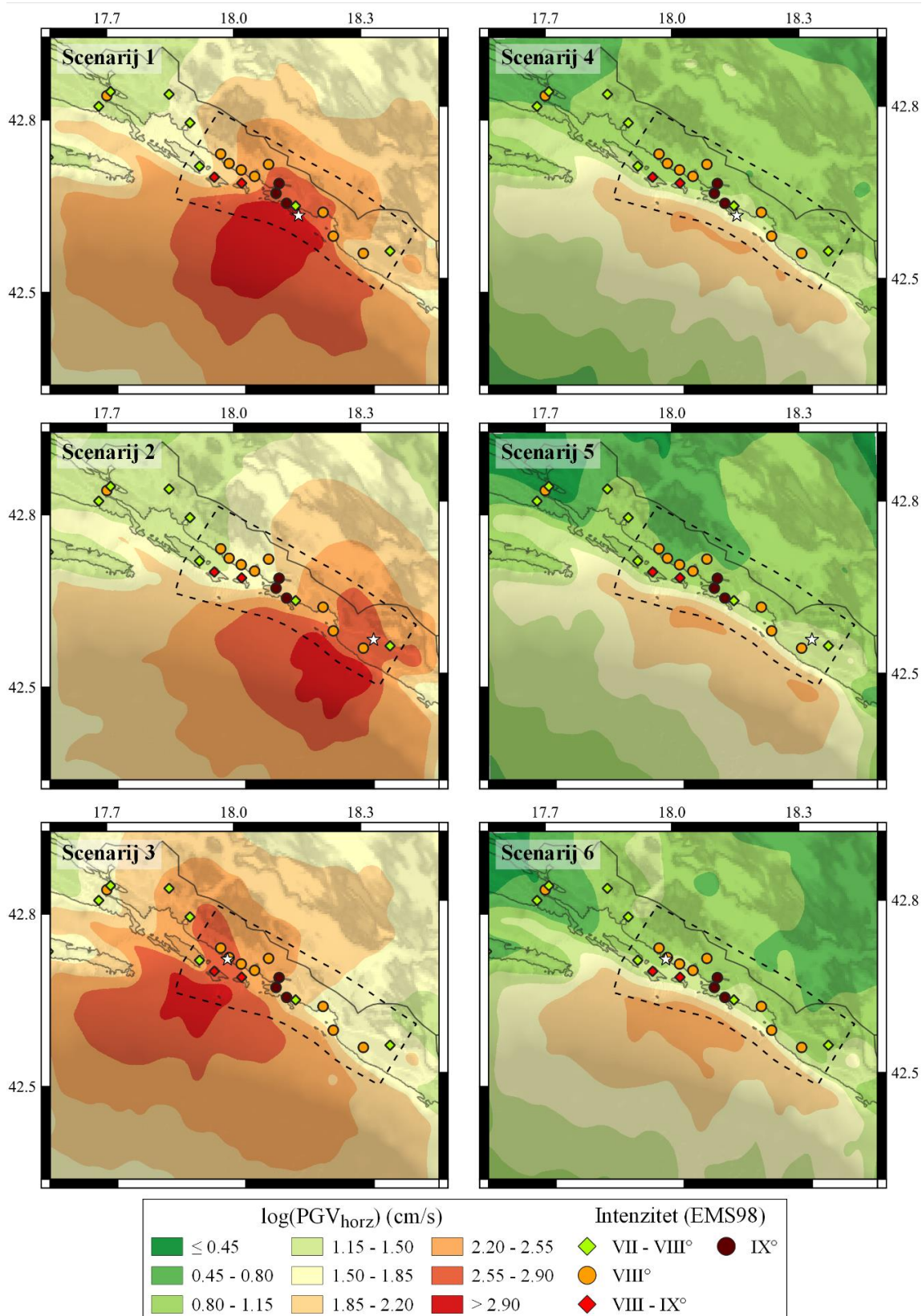
Veliki dubrovački potres simuliran je korištenjem ukupno šest različitih modela konačnih izvora opisanih u poglavlju 3.1.1. Svaki od modela izvora odnosi se na jedan scenarij potresne trešnje čije su osnovne informacije navedene u tablici 3.1. Za svaki od scenarija simulirani su niskofrekventni seizmogrami frekvencija do 1 Hz za vrijeme  $t \in [0, 240]$  s i vremenski korak  $\Delta t = 0.0015$  s. Seizmogrami su simulirani na mreži od 20385 virtualnih postaja koje prekrivaju cijelu radnu domenu i čiji je međusobni razmak 500 m. Za simuliranje potresne trešnje korišten je model *DF\_3D* te deterministička metoda spektralnih elemenata opisana u poglavlju 3.1.2.

U ovome poglavlju valja imati na umu da će zbog činjenice da su korišteni samo niskofrekventni doprinosi, a ne širokopojasni zapisi, sva opažanja biti u određenoj mjeri kompromitirana (za više detalja vidi poglavlje 5.3). Niskofrekventni seizmogrami i video zapisi simulacija za svaki od šest scenarija dostupni su na stranici <https://dubrovnikshakingscenarios.gfz.hr/> kao što je navedeno u poglavlju 3.3. Iz niskofrekventnih simuliranih seizmograma izračunate su vrijednosti horizontalne vršne

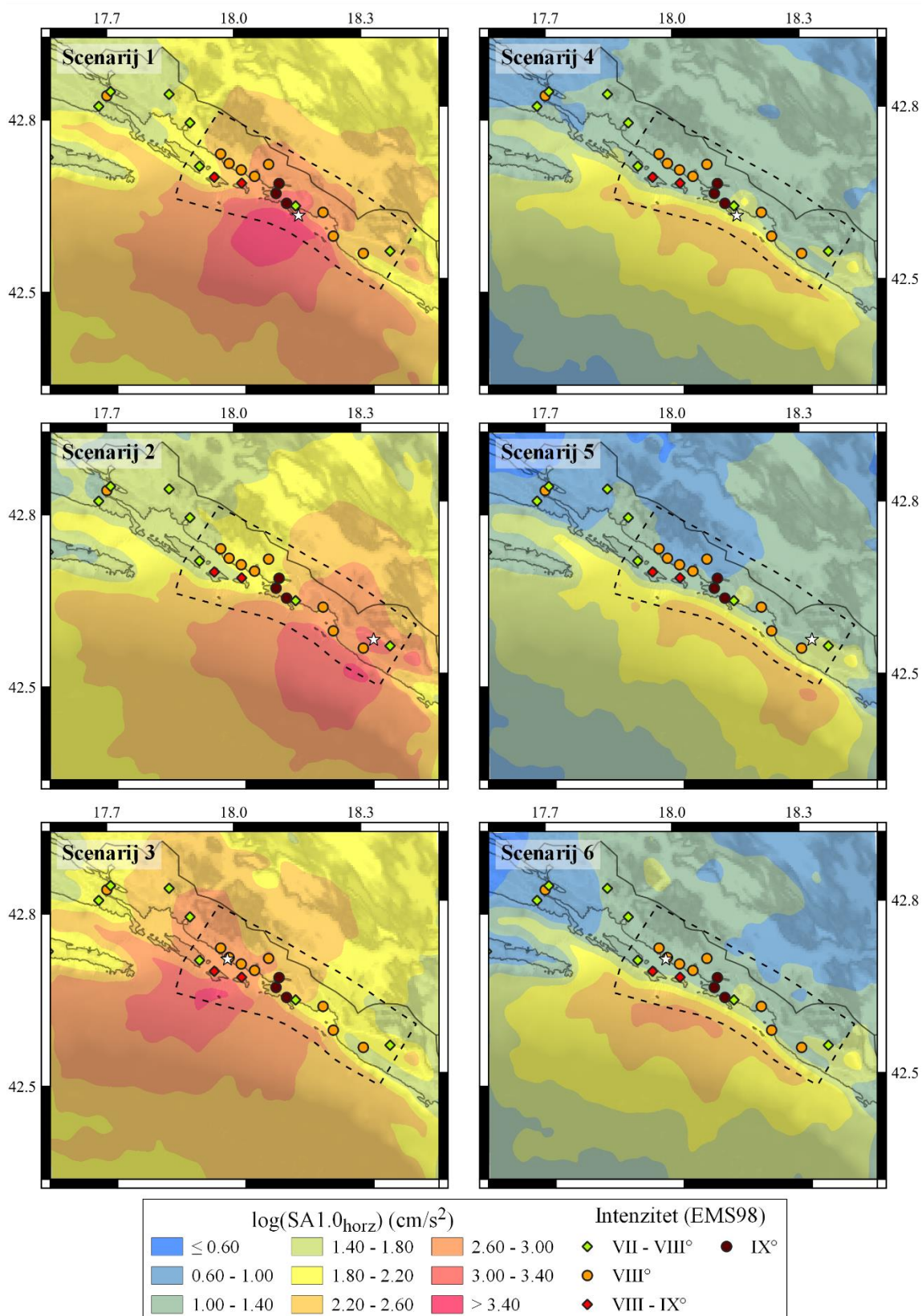
brzine gibanja tla ( $PGV_{horz}$ ), spektralne akceleracije ( $SA1.0_{horz}$ ) te ukupni horizontalni Ariasov intenzitet ( $A_{horz}$ ) na način kako je opisano u poglavlju 3.2.3. S obzirom na to da je u cilju provjeriti u kolikoj mjeri između opaženih makroseizmičkih intenziteta i ovih dvaju mjera intenziteta gibanja tla vrijedi odnos dan izrazom 3.31, izračunate su i nacrtane karte dekadskih logaritama  $\log(PGV_{horz})$ ,  $\log(SA1.0_{horz})$  i  $\log(A_{horz})$ . Karte po scenarijima potresne trešnje prikazane su na slikama 4.12, 4.13 i 4.14.

Na slici 4.12 prikazani su dekadski logaritmi horizontalnih vršnih brzina gibanja tla niskofrekventnih simuliranih seizmograma po scenarijima potresne trešnje. Razdioba ekstremnih vrijednosti dobivenih logaritama ponajprije ovisi o vremenskoj simetriji samog rasjedanja, odnosno lokaciji točke inicijacije. Konkretno, najveće vrijednosti postižu se jugozapadno od same točke inicijacije i to na području mora gdje korišteni 3D model uključuje sedimente, tj. slojeve manjih brzina. U slučaju scenarija s nejednolikom razdiobama pomaka duž rasjedne plohe (scenariji 1, 2 i 3), povećane vrijednosti  $\log(PGV_{horz})$  prisutne su i u unutrašnjosti kopna (sjeveroistočno te u okolici same točke inicijacije), ali se smanjuju puno brže s obzirom na udaljenost promatrane lokacije i točke inicijacije. Kod scenarija gdje je pomak duž rasjedne plohe jednolik (scenariji 4, 5 i 6), ekstremne vrijednosti  $\log(PGV_{horz})$  postižu se samo na području mora. Minimalne i maksimalne vrijednosti logaritama manje su u slučaju scenarija s jednolikom nego scenarija s nejednolikom razdiobom pomaka. Kod scenarija 1, 2 i 3 vrijednosti logaritama se kreću, redom, u intervalima [1.25, 3.47], [1.06, 3.12] te [1.29, 3.13]. Kod scenarija 4, 5 i 6, logaritmi vršnih brzina gibanja poprimaju vrijednosti iz intervala [0.50, 2.31], [0.25, 2.36] te [0.16, 2.40]. U skladu s rasponima vrijednosti logaritama, horizontalne vršne brzine gibanja tla veće su u slučaju scenarija s nejednolikom razdiobom pomaka duž rasjedne plohe.

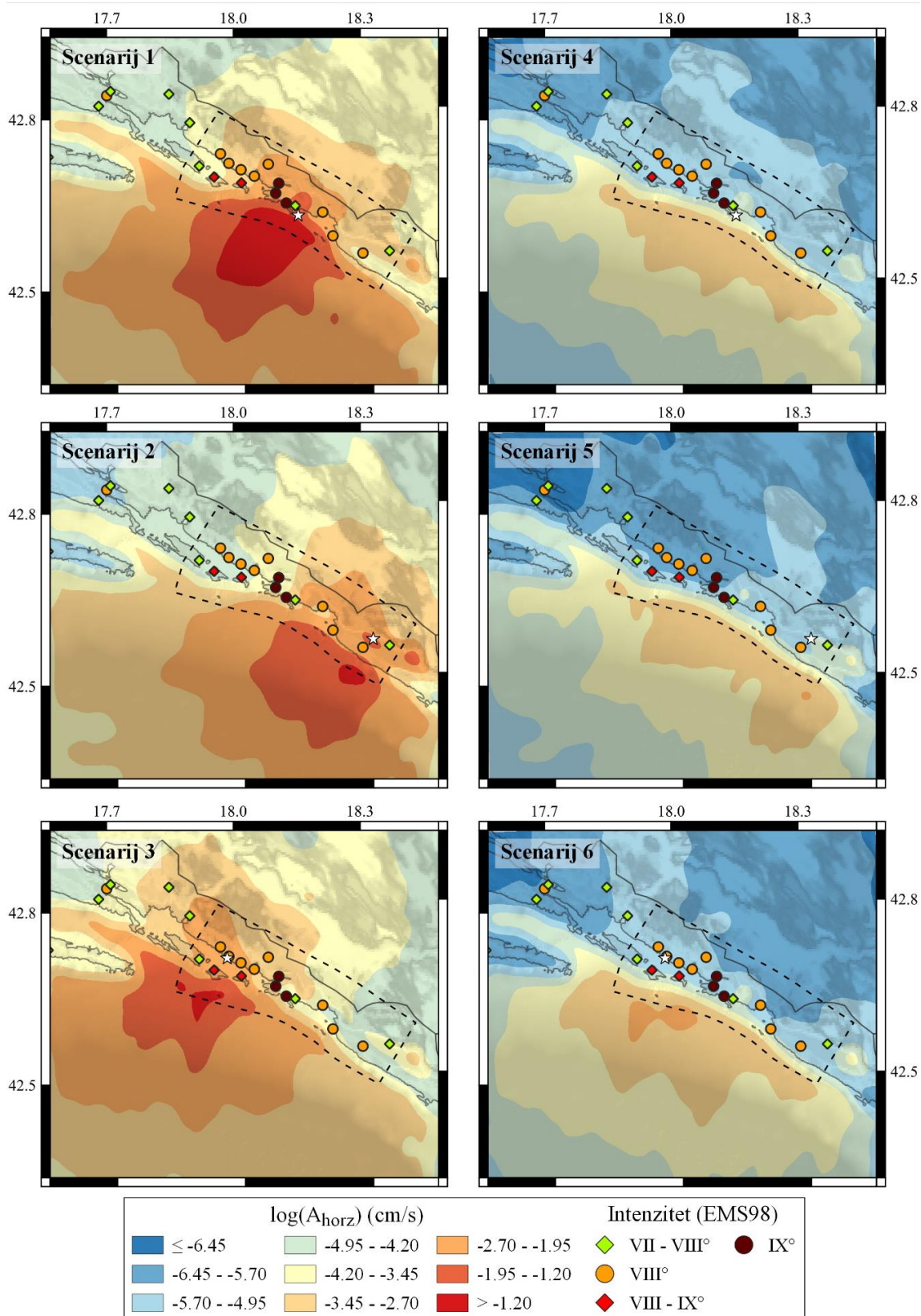
Na slici 4.13 prikazani su dekadski logaritmi horizontalnih spektralnih akceleracija za period  $T = 1.0$  s niskofrekventnih simuliranih seizmograma po scenarijima potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine. Razdioba ekstremnih vrijednosti logaritama  $\log(SA1.0_{horz})$  ponovno ovisi i o vremenskoj simetriji samog rasjedanja i o razdiobi pomaka duž rasjedne plohe. Kod svih šest scenarija potresne trešnje, najveće vrijednosti postižu se jugozapadno od točke inicijacije. Povećane vrijednosti  $\log(SA1.0_{horz})$  prisutne su u okolici te sjeveroistočno od točke inicijacije u slučaju scenarija 1, 2 i 3. Kod ovih scenarija, vrijednosti na kopnu brže opadaju brže s povećanjem udaljenosti promatrane lokacije i točke inicijacije. Manje granične vrijednosti logaritama prisutne su u slučaju scenarija s jednolikom razdiobom pomaka. Kod scenarija 1, 2 i 3 vrijednosti se kreću, redom, u intervalima [1.52, 3.74], [1.32, 3.46] te [1.36, 3.47]. Kod scenarija 4, 5 i 6, vrijednosti su iz intervala [0.66, 2.60], [0.41, 2.61] te [0.37, 2.72]. Kao i horizontalne vršne brzine, horizontalne spektralne akceleracije veće su u slučaju scenarija s nejednolikom razdiobom pomaka duž rasjedne plohe.



**Slika 4.12.** Karte logaritma vršne brzine gibanja  $PGV_{horz}$  za šest scenarija potresne trešnje (vidi tablicu 3.1) Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine te opaženi intenziteti po ljestvici EMS98. Lokacija točke inicijacije naznačena je bijelom zvjezdicom. Poligonom isprekidane linije naznačen je segment rasjeda Du-1 korištenog prilikom definiranja modela konačnih izvora.



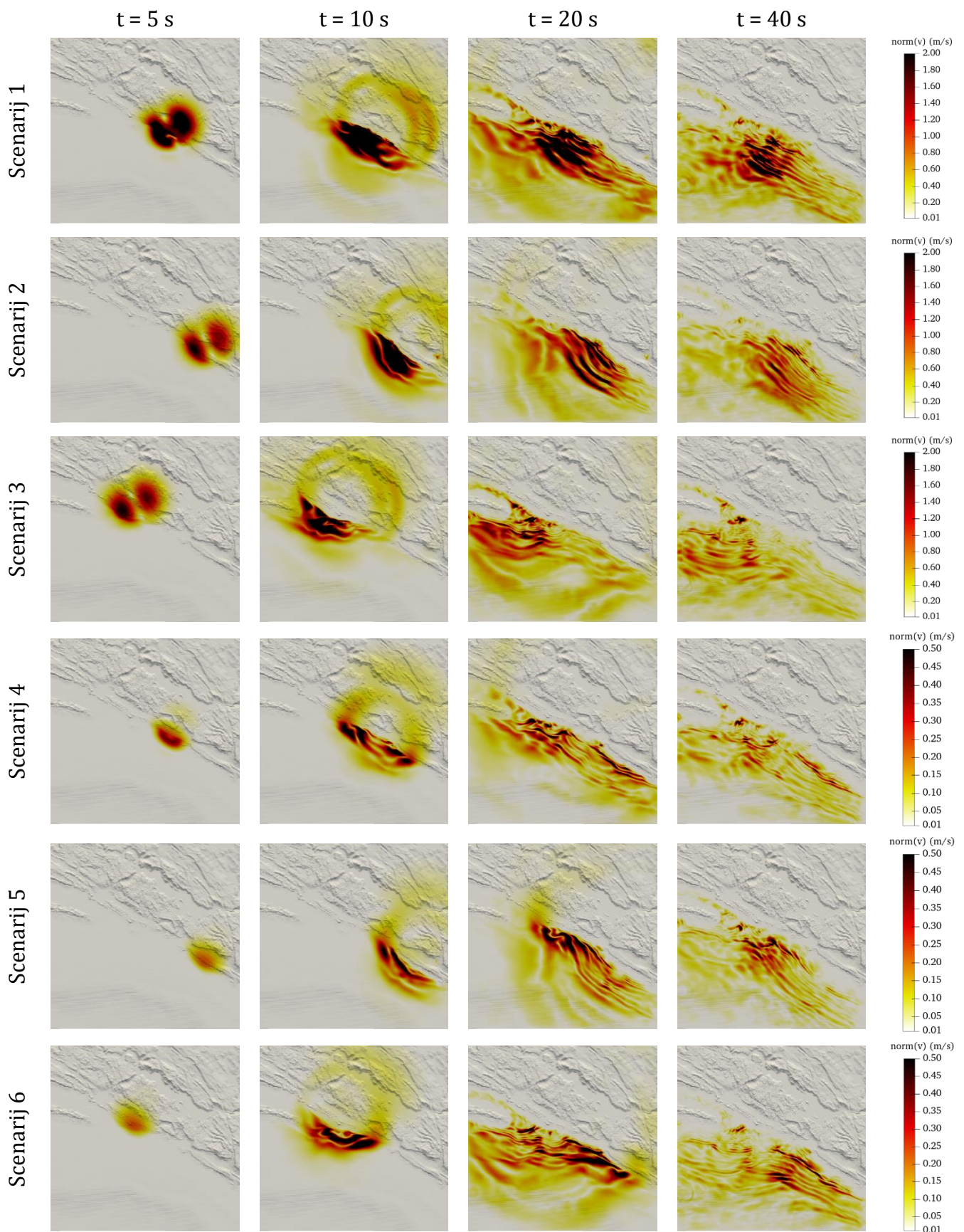
**Slika 4.13.** Karte logaritma spektralne akceleracije  $SA_{1.0_{horz}}$  za šest scenarija potresne trešnje (vidi tablicu 3.1) Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine te opaženi intenziteti po EMS98 ljestvici. Lokacija točke inicijacije naznačena je bijelom zvjezdicom. Poligonom isprekidane linije naznačen je segment rasjeda Du-1 korištenog prilikom definiranja modela konačnih izvora.



**Slika 4.14.** Karte logaritma Ariasovog intenziteta  $A_{horz}$  za šest scenarija potresne trešnje (vidi tablicu 3.1) Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine te opaženi intenziteti po EMS98 ljestvici. Lokacija točke inicijacije naznačena je bijelom zvjezdicom. Poligonom isprekidane linije naznačen je segment rasjeda Du-1 korištenog za definiranje modela konačnih izvora.

Na slici 4.14 prikazani su dekadski logaritmi horizontalnih Ariasovih intenziteta niskofrekventnih simuliranih seizmograma po scenarijima potresne trešnje. Slično kao i u slučaju razdioba ekstremnih vrijednosti  $\log(PGV_{horz})$  te  $\log(SA1.0_{horz})$ , razdioba ekstremnih vrijednosti logaritama  $\log(A_{horz})$  ovisi i o vremenskoj simetriji samog rasjedanja i o razdiobi pomaka duž rasjedne plohe. Najveće vrijednosti postižu se jugozapadno od točke inicijacije za svih šest scenarija potresne trešnje. U slučaju scenarija 1, 2 i 3 povećane vrijednosti  $\log(A_{horz})$  prisutne su i u unutrašnjosti kopna, tj. u okolici i sjeveroistočno od točke inicijacije, te brže trnu kako se povećava udaljenost promatrane lokacije i točke inicijacije. Granične vrijednosti logaritama manje su u slučaju scenarija s jednolikom razdiobom pomaka. Kod scenarija 1, 2 i 3 vrijednosti se kreću, redom, u intervalima  $[-4.95, -0.52]$ ,  $[-5.23, -1.06]$  te  $[-4.99, -1.09]$ , a kod scenarija 4, 5 i 6, vrijednosti su iz intervala  $[-6.65, -2.82]$ ,  $[-6.95, -2.68]$  te  $[-6.91, -2.47]$ . U skladu s rasponima vrijednosti logaritama, horizontalni Ariasovi intenziteti veći su u slučaju scenarija s nejednolikom razdiobom pomaka duž rasjedne plohe. S obzirom na to da se Ariasovi intenziteti računaju iz integrala kvadrata akceleracija zapisa za vremena trajanja snažne trešnje, veće vrijednosti odgovarat će i duljem trajanju snažne trešnje gibanja tla. Drugim riječima, kod scenarija s nejednolikom razdiobom pomaka trešnja je i većeg intenziteta i duljeg trajanja naspram scenarija s jednolikom razdiobom.

Isječci iz video zapisa scenarija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa prikazani su na slici 4.15. Točnije prikazane su norme brzine gibanja tla (duljina vektora, odnosno korijeni zbroja kvadrata pojedinačnih komponenti gibanja) na površini Zemlje za 5, 10, 20 i 40 s nakon hipocentralnog vremena. Čitavi video zapisi simulacija norme brzina, te zasebnih komponenti gibanja, dostupni su na ranije spomenutoj internetskoj stranici. Norma brzine odražava ukupnu brzinu kojom se širi valna fronta, a u svim scenarijima to širenje ovisi o lokaciji točke inicijacije, tj. vremenskoj simetriji rasjedanja. Razdiobe vrijednosti norma brzina u skladu su s razdiobama vrijednosti logaritama mjera intenziteta gibanja tla. Kroz vrijeme trešnja ostaje disproporcionalno intenzivnija na području dubrovačkog primorja nego na kopnu, odnosno na mjestima gdje 3D model sadrži karbonatne stijene. Kod scenarija s nejednolikom razdiobom pomaka duž rasjedne plohe, amplitude norme brzine su četiri puta veće naspram amplituda scenarija s jednolikom razdiobom. Nadalje, ekstremi vrijednosti u prvih 5 s prisutni su s obje strane od točke inicijacije, a ne samo jugozapadno od točke inicijacije kao što je u slučaju scenarija 4, 5 i 6.



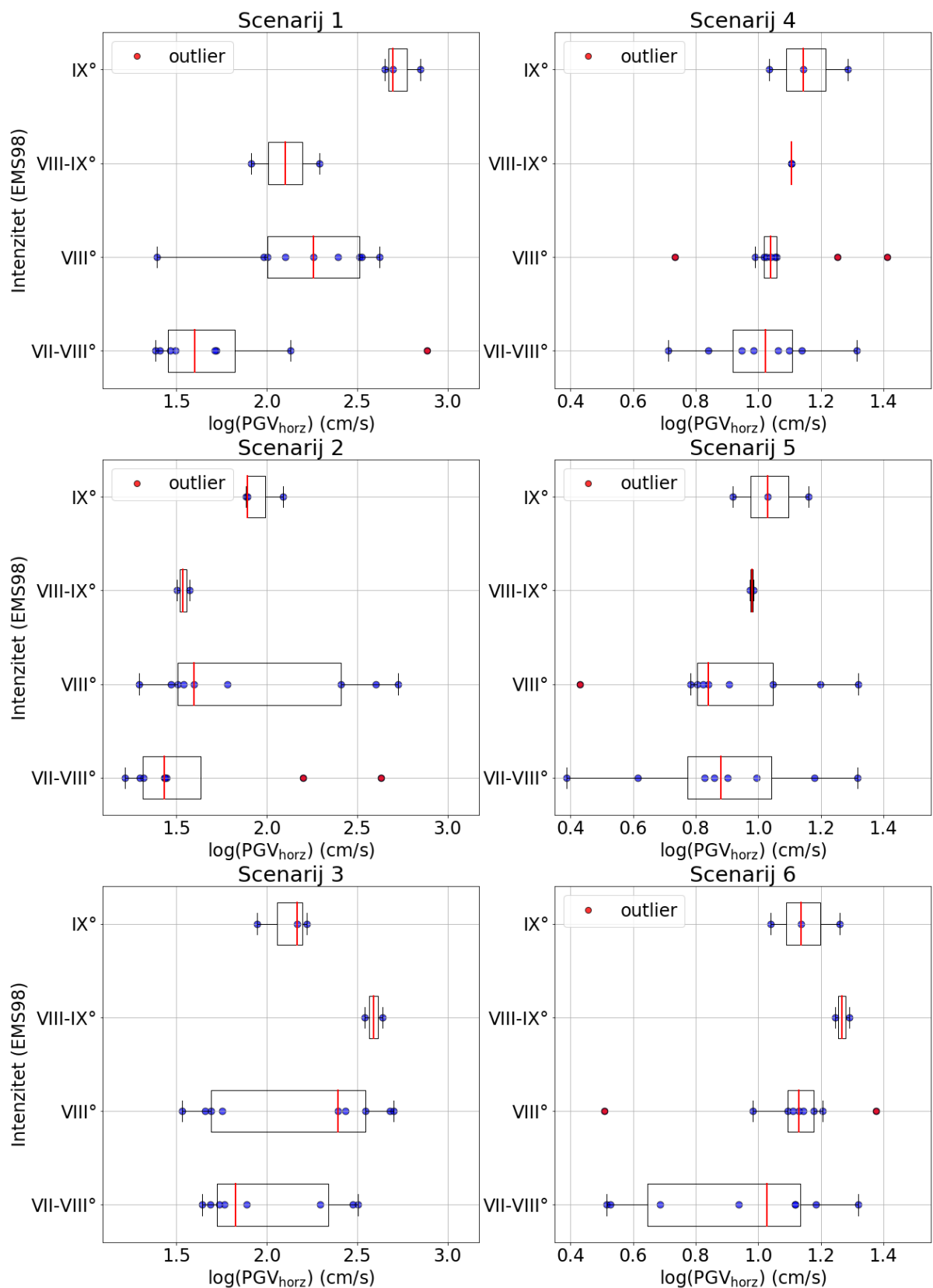
**Slika 4.15.** Isječci iz video zapisa za šest scenarija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa (vidi tablicu 3.1). Prikazane su norme brzine širenja valne fronte.

Nastavno na razmatranje odnosa danog izrazom 3.31, na lokacijama opaženih makroseizmičkih intenziteta izračunati su logaritmi horizontalne vršne brzine gibanja tla, horizontalnih spektralnih akceleracija za period  $T = 1.0$  s i horizontalnih Ariasovih intenziteta. Vrijednosti i pripadni pravokutni dijagrami prikazani su na slikama 4.16, 4.17 i 4.18.

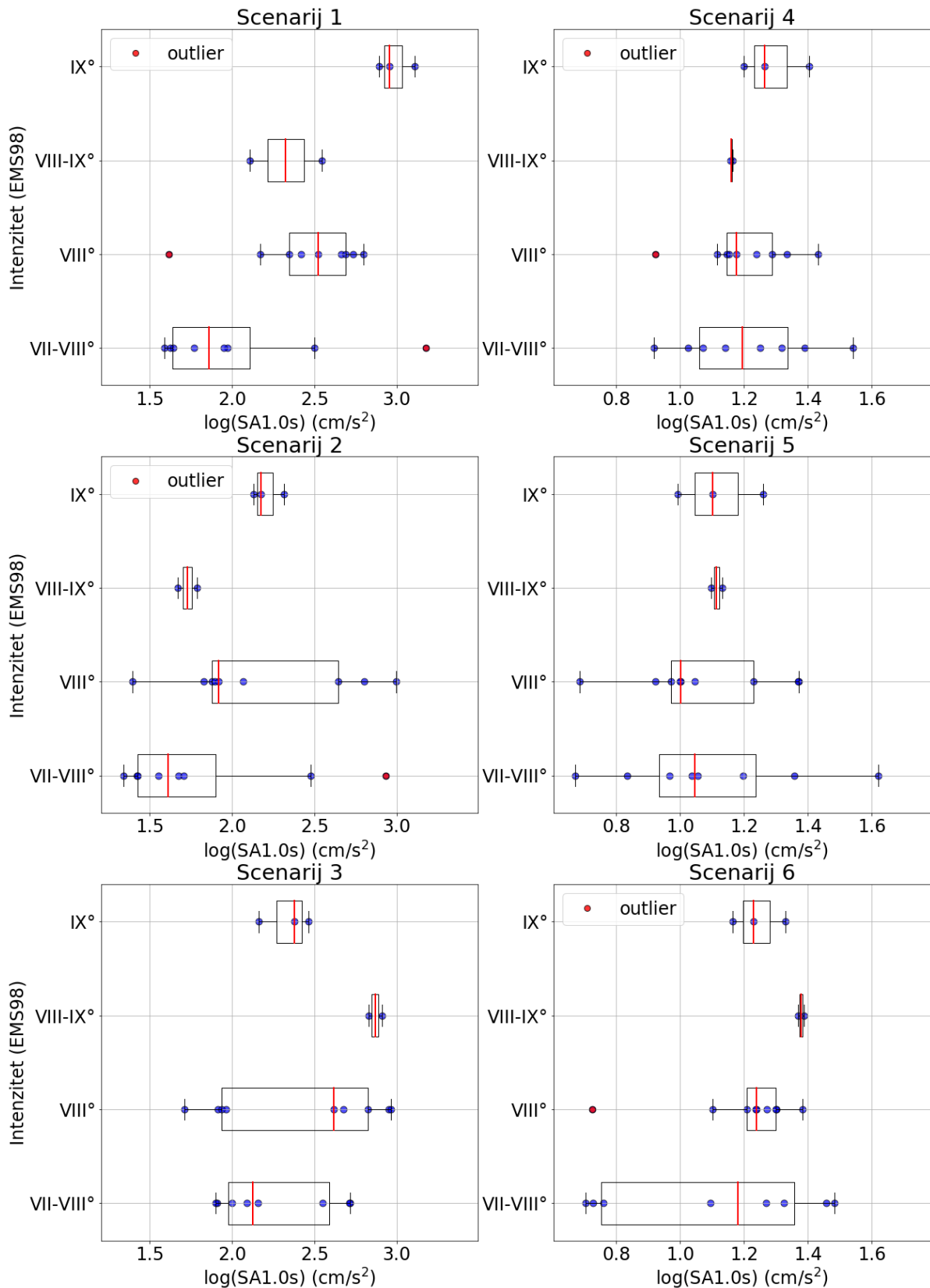
Na slici 4.16 prikazani su pravokutni dijagrami (engl. *Box-and-whiskers plots*) vrijednosti  $\log(PGV_{horz})$  u ovisnosti o opaženim intenzitetima za šest scenarija potresne trešnje. Neovisno o scenariju, iz širine pravokutnih dijagrama i tzv. *whiskera* (linije izvan pravokutnika kojima su naznačene vrijednosti koje se nalaze unutar 1.5 interkvartilnog raspona; interkvartilni raspon je razlika između 75. percentila i 25. percentila, koja mjeri širinu srednjih 50 % podataka u skupu) može se uočiti raspršenost vrijednosti logaritama po intenzitetima. Ovo je na neki način i očekivano s obzirom na subjektivnost prilikom procjene makroseizmičkog intenziteta, pa stoga za isti makroseizmički intenzitet vršna brzina gibanja tla može poprimati niz vrijednosti iz određenog raspona (veći raspon odgovara širem pravokutniku i obratno). Generalno medijani bi trebali biti veći za veću vrijednost intenziteta kao što je u slučaju scenarija 4. U slučaju scenarija 1 i 2, medijan  $\log(PGV_{horz})$  veći je za intenzitet VIII °EMS98 nego za intenzitet VIII-IX °EMS98. Kod scenarija 3 i 6 odstupanje od monotonog rasta medijana vršne brzine gibanja tla s intenzitetom može se uočiti za intenzitete VIII-IX °EMS98 i IX °EMS98, a kod scenarija 5 za intenzitete VII-VIII °EMS98 i VIII °EMS98. Konačno, stršećim vrijednostima (*outlierima*) predočeni su podatci koji se nalaze izvan raspona obuhvaćenog *whiskerima*. U svim scenarijima izuzev scenarija 3, *outlieri* su prisutni u slučaju ili intenziteta VII-VIII °EMS98 (vrijednosti su veće od 1.5 interkvartilnog raspona; scenariji 1 i 2) ili intenziteta VIII °EMS98 (vrijednosti su i veće i manje od 1.5 interkvartilnog raspona; scenariji 4, 5 i 6).

Na slici 4.17 za šest scenarija potresne trešnje prikazani su pravokutni dijagrami vrijednosti  $\log(SA1.0_{horz})$  u ovisnosti o makroseizmičkim intenzitetima. Iz širine pravokutnika i duljine *whiskera* može se uočiti da su rasponi vrijednosti logaritama širi u slučaju intenziteta VII-VIII °EMS98 i VIII °EMS98 kod svih šest scenarija. Kod svih scenarija dolazi do određenog odstupanja od monotonosti veze medijana logaritama i opaženih intenziteta. U slučaju scenarija 1 i 2, medijan  $\log(SA1.0_{horz})$  veći je za intenzitet VIII °EMS98 nego za intenzitet VIII-IX °EMS98. Kod scenarija 3, 5 i 6 medijani su veći za intenzitet VIII-IX °EMS98 nego za intenzitet IX °EMS98. Dodatno, kod scenarija 4 i 5 medijalne vrijednosti su veće za intenzitet VII-VIII °EMS98 nego za intenzitet VIII °EMS98. Isto kao i kod vršnih brzina gibanja tla, u svim scenarijima izuzev scenarija 3 i 5 prisutni su *outlieri*. U slučaju intenziteta VII-VIII °EMS98 vrijednosti *outliera* su veće od 1.5 interkvartilnog raspona (scenariji 1 i 2), a za intenzitet VIII °EMS98 vrijednosti *outliera* su manje od 1.5 interkvartilnog raspona (scenariji 1, 4 i 6).

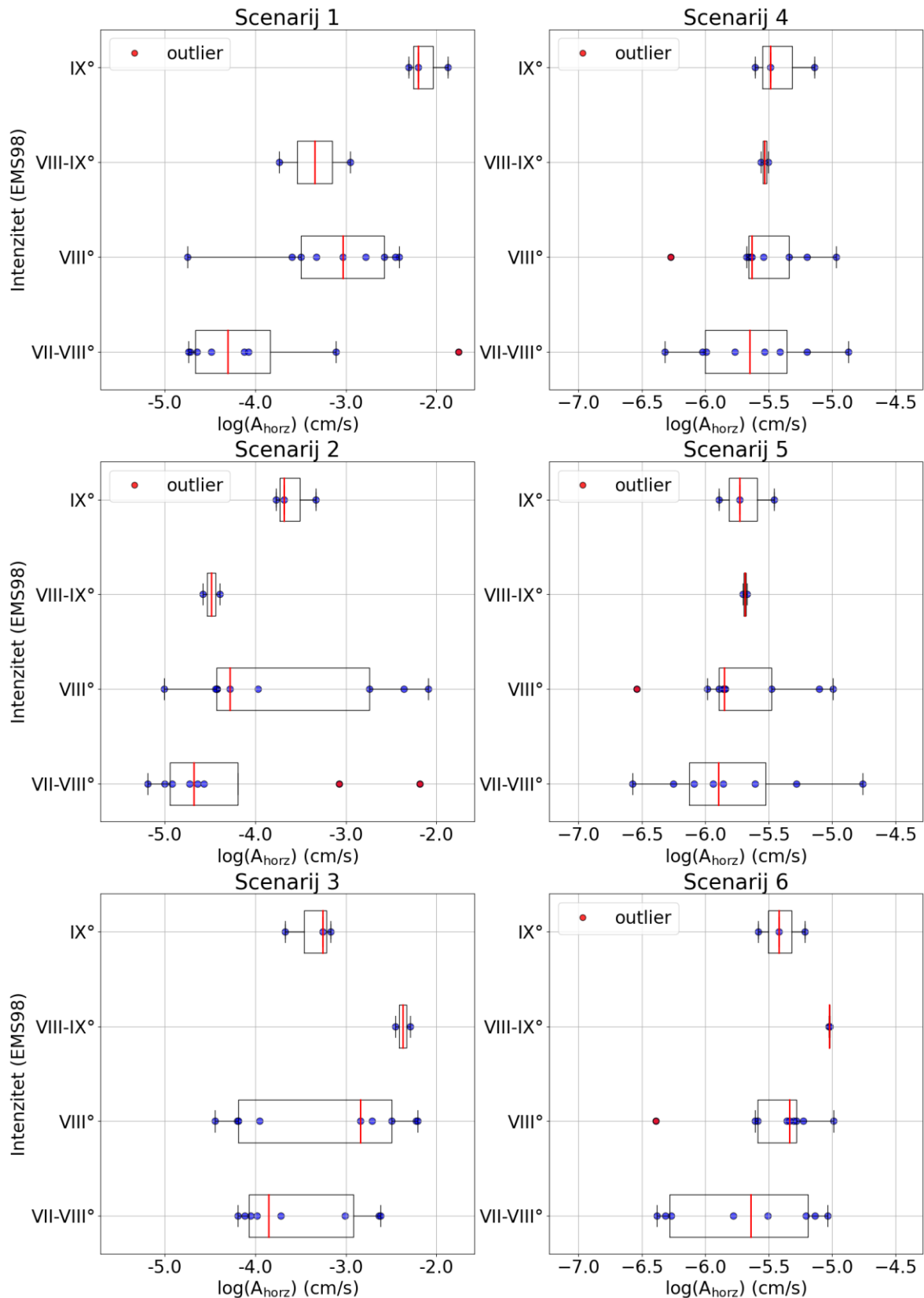




**Slika 4.16.** Pravokutni dijagrami logaritma horizontalnih vršnih brzina gibanja  $\log(PGV_{horz})$  za šest scenarija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine (vidi tablicu 3.1). Plavim kružićima naznačene su vrijednosti po točkama opaženih intenziteta po EMS98 ljestvici, a crvenim kružićima pripadne stršeće vrijednosti (*outlieri*). Crvena linija označava medijan.



**Slika 4.17.** Pravokutni dijagrami logaritma horizontalnih spektralnih akceleracija  $\log(SA_{1.0_{horz}})$  za šest scenarija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine (vidi tablicu 3.1). Plavim kružićima naznačene su vrijednosti po točkama opaženih intenziteta po EMS98 ljestvici, a crvenim kružićima pripadne stršeće vrijednosti (*outlieri*). Crvena linija označava medijan.



**Slika 4.18.** Pravokutni dijagrami logaritma horizontalnih Ariasovih intenziteta  $\log(A_{horz})$  za šest scenarija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine (vidi tablicu 3.1). Plavim kružićima naznačene su vrijednosti po točkama opaženih intenziteta po EMS98 ljestvici, a crvenim kružićima pripadne stršeće vrijednosti (*outlieri*). Crvena linija označava medijan.

Na slici 4.18 prikazani su pravokutni dijagrami vrijednosti  $\log(A_{horz})$  u ovisnosti o makroseizmičkim intenzitetima za šest scenarija potresne trešnje. Ponovno, iz širine pravokutnika i duljine *whiskera*, opaža se raspršenost podataka, tj. varijabilnost raspona vrijednosti logaritma horizontalnog Ariasovog intenziteta ovisno o razmatranome opaženom intenzitetu. Medijani također očekivano uglavnom rastu s većim intenzitetima, a pojedinačna odstupanja od ovog očekivanja prisutna su u svim scenarijima osim u četvrtom. U slučaju scenarija 1 i 2, medijan  $\log(A_{horz})$  veći je za intenzitet VIII °EMS98 nego za intenzitet VIII-IX °EMS98. Kod scenarija 3, 5 i 6 medijani su veći za intenzitet VIII-IX °EMS98 nego za intenzitet IX °EMS98. Isto kao i kod vršnih brzina gibanja tla, te spektralnih akceleracija, u svim scenarijima izuzev scenarija 3 prisutni su *outlieri*. U slučaju intenziteta VII-VIII °EMS98 vrijednosti *outliera* su veće od 1.5 interkvartilnog raspona (scenariji 1 i 2), a za intenzitet VIII °EMS98 vrijednosti *outliera* su manje od 1.5 interkvartilnog raspona (scenariji 4, 5 i 6).

Premda se iz slika 4.16, 4.17 i 4.18 vizualno može naslutiti u kojem su razmjeru vrijednosti *MI* i logaritmi parametara  $PGV_{horz}$ ,  $SA1.0_{horz}$  i  $A_{horz}$  korelirani, provedena je dodatna kvantitativna analiza radi sveobuhvatnijeg razumijevanja dobivenih rezultata. Konkretno, izračunati su Spearmanovi koeficijenti korelacije *rs* između *MI* i logaritama vrijednosti *GMI*. Vrijednosti koeficijenata *rs* po scenarijima potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine navedene su u tablici 4.2. Ovdje ponovno valja imati na umu da je sva analiza napravljena na temelju niskopropusno filtriranih simuliranih seizmograma, što može znatno utjecati na očekivane korelacijske veze između vrijednosti *MI* i *GMI* (za detalje vidi poglavlje 5.3).

**Tablica 4.2.** Spearmanovi koeficijenti *rs* između opaženih makroseizmičkih intenziteta (*MI*) i logaritma horizontalne vršne brzine gibanja tla ( $PGV_{horz}$ ), spektralne amplitude za 1.0 s ( $SA1.0_{horz}$ ) i horizontalnog Ariasovog intenziteta ( $A_{horz}$ ) za šest scenarija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa.

	$rs (MI \sim \log(PGV_{horz}))$	$rs (MI \sim \log(SA1.0_{horz}))$	$rs (MI \sim \log(A_{horz}))$
Scenarij 1	0.566	0.566	0.556
Scenarij 2	0.393	0.332	0.369
Scenarij 3	0.259	0.265	0.255
Scenarij 4	0.316	0.155	0.206
Scenarij 5	0.209	0.117	0.195
Scenarij 6	0.347	0.167	0.268

Veća vrijednost koeficijenta *rs* odgovara više monotonij vezi između *MI* i *GMI*, tj. da s porastom vrijednosti *GMI* raste i vrijednost *MI*. Ovakav odnos dvaju mjera najizraženiji je u slučaju scenarija 1 (tablica 4.2). Kod korelacije *MI* i  $\log(PGV_{horz})$  vrijednost *rs* scenarija 1 više je od 1.4 puta veća nego za scenarij 2, tj. 1.6 puta naspram scenarija 6. Idući po vrijednosti *rs* za parametar  $PGV_{horz}$  su scenariji 4 i 3. Kod korelacije *MI* i  $\log(SA1.0_{horz})$  vrijednost *rs* scenarija 1 veća je 1.7 puta nego za scenarij 2, tj. 2.1 puta naspram scenarija

3. Idući po vrijednosti za parametar  $SA1.0_{horz}$  su scenarij 3 i 6. Kod korelacije MI i  $\log(A_{horz})$   $rs$  je u slučaju prvog scenarija 1.5 puta veća nego za scenarij 2, te dvostruko veća nego za scenarij 6. Za parametar  $A_{horz}$  idući po  $rs$  vrijednosti su scenariji 3 i 4. Za sve tri GMI, najmanja vrijednost Spearmanovog koeficijenta korelacije postiže se u slučaju scenarija 5.

# 5. Diskusija

## 5.1. 3D lokalni model građe kore i niskofrekventne simulacije

U poglavlju 4.1.2 opisan je i prikazan novodefinirani lokalni 3D model građe kore (*DF\_3D*) za šire dubrovačko područje. Njegova iskoristivost u kontekstu provedbe niskofrekventnih simulacija testirana je i uspoređena s 1D lokalnim modelom brzina (*Ston\_H08*) i regionalnim 3D modelom (*EPcrust*), a dobiveni rezultati predstavljeni su u poglavlju 4.2. U nastavku je osvrt na model *DF\_3D* i njegovu primjenjivost prilikom računanja niskofrekventnih simuliranih zapisa gibanja tla.

Kao što je navedeno, glavne strukturne jedinice i njihove podjedinice u modelu su definirane tako da predstavljaju strukture u kojima dolazi do znatne promjene u brzini seizmičkih valova. I dok su granice struktura na većim dubinama relativno dobro poznate i istražene (ponajprije dubine Mohorovičićevog diskontinuiteta), za jasno definiranje granica i struktura u gornjim slojevima modela prisutan je problem nedostatka podataka potrebnih za njihovo definiranje. Četiri markirna horizonta koja čine gornju koru izdvojena su na temelju korelacije 107 2D-seizmičkih profila i tri bušotine smještene u dubrovačkom primorju između sjeverozapadne obale Mljeta i granice s Crnom Gorom (Sećanj i sur., 2024). Interpretacija ovakvih seizmičkih podataka u određenoj mjeri je subjektivna jer ovisi o iskustvu, znanju i osobnim preferencijama stručnjaka koji ih interpretira. Ova subjektivnost uvjetovana je i kvalitetom podataka – na primjer, prisutnost šuma, loša rezolucija ili nepotpunost podataka može otežati interpretaciju i dovesti do manje kvalitetnih procjena. Nepotpunost podataka ponajviše je prisutna u obalnom i kopnenom dijelu istraživanog područja za koja ne postoje seizmički profili već samo strukturno-geološka i sedimentološko-stratigrafska opažanja na diskretnim mjernim točkama na površini. Radi razumijevanja paleogeografskih odnosa, tektonske evolucije i dinamike reljefa, ovi podatci korelirani su s preostalim seizmičkim profilima. Međutim, interpolacija i ekstrapolacija koje se primjenjuju prilikom korelacije uvode dodatnu dozu nepouzdanosti, te je interpretirane markirne horizonte potrebno razmatrati s određenim oprezom naspram stvarne strukturno-geološke slike. Konkretno, markirni horizonti ne uključuju egzaktne granice koje bi odražavale rasjedne sustave, prebačene, deformirane i sve druge kompleksne strukture koje su prisutne u građi istraživanog područja. Gornji dio kore u modelu zato je nužno pojednostavljen je naspram stvarne građe Zemlje, a upravo je taj dio najvažniji da bi se ispravno simulirali efekti rasprostiranja seizmičkih valova lokalnih potresa. Isto tako, donji dio kore u modelu definiran je Conradovim diskontinuitetom preuzetim iz regionalnog modela *EPcrust* (Molinari i Morelli, 2011). Time je u 3D model uvedena još jedna veličina koja nije dovoljno precizno definirana, a utječe na oblik simuliranog zapisa gibanja tla.

Osim nepouzdanosti granica podjedinica i jedinica koje čine gornju koru, u modelu *DF\_3D* nepouzdanost je uvedena i kroz vrijednosti brzina seizmičkih P- i S-valova, te gustoća. Rasponi vrijednosti ovih fizikalnih veličina temelje se na rasponima vrijednosti brzina P-valova određenih iz podataka triju bušotina smještenih na području dubrovačkog primorja (Sećanj i sur., 2024). Ponajviše su problematične vrijednosti brzina dobivene za dubine na kojima se nalazi podina karbonatnih stijena – s obzirom na to da samo jedna bušotina seže do tih dubina, teško je utvrditi da li se u sloju izmjene karbonata s permotrijaskim klastičnim naslagama vrijednosti brzina značajno razlikuju od ostatka karbonata duž čitave domene ili samo u pojedinim segmentima. Na obalnom i kopnenom dijelu, koje većinski čine karbonati, također ne postoje direktna mjerenja. Stoga su vrijednosti brzina temeljene na bušotinskim podacima što nije idealno jer se uslijed djelovanja tlaka i temperature vrijednosti brzina u karbonatima smještenima ispod drugih naslaga u pravilu razlikuju od brzina u karbonatima koji izviru na površinu. Osim nedostatka informacija o lateralnim promjenama, ovaj vrlo mali skup podataka direktnih mjerenja dodatno je problematičan jer ne sadrži informaciju o porastu vrijednosti pojedine fizikalne veličine s dubinom. Primjerice, gornji slojevi sedimentata u pravilu su rastresitiji od ostatka, pa je i sama ovisnost brzine P-valova nelinearna s dubinom. Modeliranje ovakvih promjena brzina s dubinom napravljeno je u slučaju 3D modela *MAMBo* za dolinu rijeke Po (Molinari i sur., 2015) i modela za šire zagrebačko područje (Latečki i sur., 2021) gdje je pretpostavljeno da su gradijenti u prvih 500 m veći nego u ostatku razmatrane sedimentne jedinice. Ipak, kako se ne bi uvele dodatne pretpostavke i nepouzdanosti, u gornjoj kori modela *DF\_3D* pretpostavljen je jednostavan linearni gradijent porasta brzina s dubinom. Po uzoru na lokalni 1D model brzina južnog dijela Jadrana *Ston\_H08* i regionalni model *EPcrust*, u donjoj kori i plaštu pretpostavljeno je da se vrijednosti brzina i gustoća ne mijenjaju značajno s dubinom, tj. da su konstantne. U novim varijantama modela svakako bi trebalo u ovim strukturnim jedinicama uvažiti i gradijente fizikalnih veličina s dubinom kao što je npr. napravljeno u regionalnom referentnom modelu za područje Dinarida (Zailac i sur., 2023).

Sljedeći nedostatak modela *DF\_3D* odnosi se na činjenicu da su brzine S-valova i gustoće izvedene iz brzina P-valova pomoću Brocherovih relacija (Brocher, 2005), a ne na temelju direktnih mjerenja. Brocherove relacije vrijede za zasićena tla i stijene čije su  $v_P > 1.5$  km/s. U ovome slučaju to znači da su brzine S-valova i gustoće najgornjih slojeva kvartarnih klastičnih naslaga (čije su  $v_P$  veće od 1.23 km/s) izvedene pomoću modela koji ih u nekoj mjeri ili podcjenjuje ili precjenjuje. Dobivene vrijednosti brzina S-valova i gustoća su ipak unutar očekivanih raspona (0.2–0.4 km/s, 1.37–1.63 g/cm<sup>3</sup>; Jones i Oldenburg, 2007).

Rezolucija modela primarno ovisi o ulaznom skupu podataka od kojih je model sastavljen i o strukturama koje se u njemu nastoje opisati. U ovome istraživanju, rezolucija je temeljena na podacima markiranih horizonta te veličini ćelija potrebnoj da se pojedini slojevi koje odvajaju prilikom generiranja mreže u metodi SEM mogu dobro definirati. Podatci su preuzorkovani korištenjem bilinearne interpolacije radi njezine

jednostavnosti i brzine izvođenja. Nadalje, kao dodatna modifikacija modela provedeno je horizontalno izgladivanje pomoću Gaussovog filtera. Obje ove tehnike mogu bitno utjecati na izgled 3D modela, te samim time i na krajnji rezultat simulacija. Stoga bi valjalo testirati različite vrste interpolacije i izgladivanja modela te utvrditi koje su od njih najprikladnije da bi u konačnici model građe kore bio reprezentativan za istraživano područje i primjenjiv u simulacijama.

Unatoč svim navedenim nedostacima i ograničenjima novodefiniranog 3D modela, simulacije niskofrekventnih doprinosa gibanja tla ukazuju na njegovu primjenjivost i napredak naspram druga dva modela. Vizualnom provjerom utvrđeno je da su amplitude većine simuliranih zapisa dobivenih korištenjem modela *DF\_3D* najbolje usklađene s amplitudama zabilježenih seizmograma. U slučaju manjeg slaganja, amplitude simuliranih zapisa naspram druga dva modela i zabilježenih zapisa su podcijenjene. Ovo je moguće posljedica deamplifikacijskih efekata koji se mogu pojaviti na granici dvaju različitih sredstava (konkretno karbonata velikih brzina u krovini i sloja izmjene karbonata s permo-trijaskim klastičnim naslagama manjih brzina u podini) i/ili atenuacijskih svojstava sredstva (npr. kad je cijela putanja zrake kroz karbonate koji značajno prigušuju energiju valova i amplitudu). Ovo je u skladu s opažanjima vrijednosti *GOF* za parametar *PGV* koji daje informaciju o maksimalnoj amplitudi trešnje. Vrijednosti su raspodijeljene od loših do dobrih, a najizraženije poboljšanje može se uočiti kod postaja DBR, DF02, STA i TREB. Kod ostalih postaja, ovisno o potresu, vrijednosti *GOF* su većinom ili slične ili veće nego za druga dva modela. Sumirano, iz ovoga se može zaključiti da je novodefinirani model *DF\_3D* trenutno najpogodniji model pomoću kojeg se uspješno mogu simulirati amplitude gibanja tla za frekvencije manje od 1 Hz na širem dubrovačkom području.

Što se tiče duljine trajanja trešnje, vizualno ne postoje velike razlike između triju modela kada se promatra cijeli zapis. Međutim, kada se promotre vrijednosti *GOF* koje se odnose na duljinu trajanja snažne trešnje, novodefinirani 3D model za postaje DBRK, DF02, DF04 i TREB daje bolje rezultate. Kod preostalih postaja, vrijednosti *GOF* ponovno su ili veće ili ne odstupaju značajno od vrijednosti *GOF* druga dva modela. Za sve potrese vrijednosti *GOF* se kreću od osrednjih do odličnih. Jedino se kod potresa E10 pojavljuje nekoliko loših vrijednosti. Kao što je navedeno u poglavlju 4.2, kod ovog je potresa i postaja DBRK, DF02, DF05, STA i STON duljina trajanja trešnje simuliranih zapisa svih triju modela podcijenjena u odnosu na duljinu trajanja trešnje zabilježenih zapisa uslijed prisutnosti dugoperiodičkog šuma na stvarnom zapisu. Stoga je važno napomenuti da dobivene vrijednosti *GOF* nisu nužno reprezentativne te bi prilikom njihove usporedbe treba biti oprezan. Ipak, kada se sve objedini po potresima i postajama, može se zaključiti da je model *DF\_3D* trenutno najprikladniji model kojim se može reproducirati duljina trajanja potresne trešnje na postajama koje se nalaze na istraživanom području.

Posljednji parametar kojim se nastojala utvrditi primjenjivost 3D modela u simulacijama jest međukorelacija. Vrijednosti *GOF* međukorelacije se neovisno o modelu kreću od loših



do osrednjih uz neznčajne razlike. Relativno male razlike u vrijednostima *GOF* između modela ukazuju na to da se nastupne faze simuliranih zapisa različitih modela po prilici na isti način ne poklapaju s fazama na zabilježenim zapisima. Drugim riječima, manje vrijednosti *GOF* proizlaze iz činjenice da se uspoređuju različite faze na seizmogramima jer npr. nailasci na simulacijama ili rane ili kasne u odnosu na zabilježene faze. Ovo je potencijalno povezano s načinom na koji je definiran seizmički izvor, konkretno njegove lokacije hipocentra i/ili samog hipocentralnog vremena. Zato razmatranjem vrijednosti *GOF* parametra međukorelacije nije bilo moguće utvrditi koliko novodefinirani model *DF\_3D* uspješnije ili manje uspješno od druga dva modela simulira vremena nastupnih faza na seizmogramima.

Kao što je navedeno u poglavlju 4.2, vrijednosti *GOF* triju promatranih parametara ne pokazuju direktnu povezanost s epicentralnom udaljenošću ili magnitudom razmatranog potresa. Kada bi se npr. veće vrijednosti *GOF* postizale samo za potrese malih magnituda, dalo bi se zaključiti da je model primjenjiv jedino u slučaju scenarija slabih potresa. S druge strane kada bi se npr. veće vrijednosti *GOF* postizale samo za veće epicentralne udaljenosti, dalo bi se zaključiti da se pomoću modela mogu dobro simulirati efekti dalekog polja, ali ne i bliskog polja. U ovome istraživanju takve zaključke je nemoguće donijeti zbog međusobne neovisnosti spomenutih veličina. Povezanost između veličina najvjerojatnije nije opažena zbog relativno malog skupa podataka (seizmograma) korištenog prilikom validacije modela.

Validacija primjenjivosti modela u simulacijama valjana je ako je skup podataka koji se pri tome koristi dostatan. U ovome slučaju, taj skup bi svakako trebalo dodatno proširiti ovisno o broju postaja i potresa. Konkretno, mreža samih postaja trebala bi biti gušća i pokrivati cijelu radnu domenu. Tako bi se usporedbom simulacija sa zabilježenim zapisima mogle kvantificirati vrijednosti *GOF* za veličine  $PGV$ ,  $C_{corr}$  i  $t_{Dur}$  na nizu lokacija te dobiti pouzdanija informacija o tome koliko je model zaista reprezentativan za istraživano područje. Ovo se posebno odnosi na obalno područje i dubrovačko primorje za koje ne postoji niti jedno direktno mjerenje gibanja tla koje bi se koristilo prilikom validacije. U kontekstu broja potresa, skup podataka bi trebalo proširiti tako da obuhvaća potrese većih magnituda i različitih žarišnih mehanizama. Mogućnost ispunjenja ovog zahtjeva ovisit će o karakteristikama seizmičnosti istraživanog područja, odnosno prostorno-vremenskoj razdiobi žarišta te dominantnim režimima naprezanja. U pravilu se ovome problemu može doskočiti jednostavnim proširenjem domene modela – npr. kada bi se model *DF\_3D* prema sjeveru proširio za 20 km (do 43.14 °N), obuhvatili bi se potresi iz recentne serije kod Berkovića koja sadrži i potrese s normalnim mehanizmom rasjedanja i magnitude veće od 5.5 (Dasović i sur., 2024).

Osim proširenja skupa podataka, validaciju 3D modela trebalo bi provesti tako da se uspoređi više različitih varijanti samog modela. Kao što je ranije navedeno, nepouzdanosti koje potječu od ulaznih podataka i tehnika korištenih prilikom definiranja modela utjecat će na krajnji rezultat simulacija. Usporedbom primjenjivosti modela koji su konstruirani

iz istog skupa podataka, ali uz određene modifikacije, omogućio bi se odabir verzije modela koji na najpouzdaniji i najvjerodostojniji način opisuje građu istraživanog područja. Uz to, dobio bi se dodatan uvid u kolikoj mjeri određene modifikacije modela (npr. dubine i međusobne granice strukturnih jedinica, iznosi i promjene fizikalnih veličina unutar njih i sl.) utječu na krajnje rezultate.

Sva navedena ograničenja i nedostaci očekivani su prilikom definiranja 3D modela, seizmičkih izvora, provođenja te validacije simulacija zbog prirode samih podataka. Čak i u slučaju da su simulacije dobivene korištenjem najrealističnije definiranog modela i seizmičkog izvora, odstupanja od zabilježenih zapisa bit će prisutna zbog toga što su i sami matematički i fizikalni modeli pojednostavljenije stvarnih procesa. Ipak, simulacije su izrazito koristan alat prilikom procjene parametara trešnje tla, a samim time i poboljšanja procjene determinističkog seizmičkog hazarda na nekom području. Kao prvi korak u tom smjeru, u ovome je istraživanju na temelju analize niskofrekventnih simuliranih zapisa gibanja tla utvrđena primjenjivost novodefiniranog 3D modela u scenarijima potresne trešnje na širem dubrovačkom području. Unatoč svojim nedostacima, utvrđeno je da je model *DF\_3D* trenutno najpotpuniji lokalni model koji predstavlja važan polazni skup podataka o strukturno-geološkoj građi istraživanog područja. Njegovo daljnje unaprjeđenje potrebno je temeljiti na opsežnijem skupu ulaznih podataka te korištenih metoda validacije.

## 5.2. Širokopojasne simulacije

U poglavlju 4.3 prikazani su i opisani rezultati hibridne metode simuliranja širokopojasnih seizmograma za deset umjerenih do jakih potresa.

Vizualnom provjerom utvrđeno je da su amplitude vertikalne komponente simuliranih zapisa za većinu parova potres-postaja relativno dobro usklađene s amplitudama zabilježenih seizmograma. Amplitude horizontalnih komponenti simuliranih zapisa gotovo su u svim slučajevima precijenjene i to ponajviše u kasnijim dijelovima seizmograma (nakon S-faze). U skladu s ovim opažanjima su i dobivene vrijednosti *GOF* za vršne brzine gibanja *PGV* te opažanja koja proizlaze iz funkcija mjera kvaliteta prilagodbe ovojnica (*TEG*, *FEG* i *TFEG*). U slučaju komponente E i N gibanja, loše vrijednosti *GOF* su direktno povezane s precijenjenim amplitudama na simuliranim seizmogramima. Nadalje, smanjene vrijednosti *GOF* se na funkcijama mjera kvalitete prilagodbe uočavaju u kodi što je ponovno u skladu s činjenicom da su na tim dijelovima seizmograma amplitude precijenjene. Uz to, funkcije *FEG* i *TFEG* ukazuju da se neslaganje simuliranih i zabilježenih ovojnica uglavnom događa za frekvencije veće od 1 Hz. Slično se opaža kada se promotre i Fourierovi spektri – amplitude pojedinih parova potres-postaja precijenjene su samo u visokofrekventnom dijelu doprinosa ukupnom gibanju. Podcijenjene amplitude Fourierovih spektara uočavaju se uglavnom u niskofrekventnom dijelu doprinosa što je u skladu s opažanjima opisanim u poglavlju 4.2. Na temelju svega navedenog za zaključiti je da su precijenjene amplitude horizontalnih komponenti

proizašle iz simulacija visokofrekventnog dijela doprinosa gibanja tla. Jedan od mogućih razloga tome jest činjenica da su u simulacijama korišteni znatno pojednostavljeni modeli građe kore i atenuacije koji direktno utječu na faktor rasprostiranja valova kroz sredstvo, a samim time i amplitude gibanja. Dodatno, neslaganje amplituda oko S-faze moguće da proizlazi iz načina računanja i sjedinjavanja odvojenih doprinosa P- i S-faza amplitude spektra akceleracije u stohastičkoj metodi GP.

Razlike u duljini trajanja trešnje simuliranih i zabilježenih seizmograma vizualno se mogu opaziti iz razlika samih valnih oblika, konkretno iz razlika povezanih s načinom na koji amplitude seizmograma trnu s vremenom. U slučaju kada amplitude simuliranih zapisa presporo trnu u odnosu na zabilježene seizmogramе, duljine trajanja trešnje su precijenjene. U slučaju kada amplitude trnu brže, duljine trajanja trešnje bit će podcijenjene. U skladu s time iznosit će i vrijednosti *GOF* dobivene za parametar duljine trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$ . Varijabilnost vrijednosti *GOF* od loših do odličnih ukazuje na to u kolikoj su mjeri duljine trajanja trešnje simulacija i zabilježenih zapisa međusobno neusklađene. Neusklađenost oblika seizmograma povezana je s korištenim modelom građe kore te osobito s pretpostavljenim atenuacijskim modelom. S obzirom na to da su lokalni uvjeti svih postaja i većine razmatranih potresa u ovom istraživanju relativno slični, za bolje slaganje oblika seizmograma potencijalno bi trebalo koristiti drugačije definiran 1D model prilikom simuliranja visokofrekventnih doprinosa gibanja tla. Konkretno, budući da na lokacijama postaja i potresa u pravilu izostaju sedimenti, valjalo bi koristiti model koji ih ne uključuje. Time bi dobiveni 1D model bolje opisivao svojstva sredstava između postaja i potresa. Efekti koji proizlaze od rasprostiranja valova (npr. višestruke refleksije i konverzije vrste valova, frekventna ovisnost prigušenja, itd.) kroz sredstvo također bi pouzdanije odgovarali stvarnim, pa bi i same simulacije oblikom bile više usklađene sa zabilježenim zapisima. Dodatno, faktori koji utječu na oblik valnog polja bili bi bolje definirani da je i sama atenuacija cjelovitije opisana (a ne iz indirektnih i nepotpunih veličina).

Iz funkcija mjera kvalitete prilagodbe faza (*TPG*, *FPG* i *TFFPG*) jasno se može uočiti da se manje vrijednosti *GOF* postižu za frekvencije između 1 i 5 Hz neovisno o razmatranoj komponenti gibanja ili paru potres-postaja. Neusklađenost faza između simuliranih i zabilježenih zapisa prvenstveno je uvjetovana time što su faze spektra akceleracije u metodi GP nasumično procijenjene iz vremenskog niza Gaussovog bijelog šuma. I premda se ovime nastoji kompenzirati nedostatak spoznaja o zračenju seizmičkog izvora, nedeterminističkim opisom dodatno se otežava validacija rezultata. Svaka nanovo izračunata simulacija dobivena stohastičkim pristupom razlikovat će se prethodne, tj. izlazni skup podataka promijenit će se neovisno o tome mijenja li se ili ne ulazni skup. Samim time zaključci doneseni na temelju usporedbe simuliranih i zabilježenih zapisa bit će podložni promjenama (npr. veća neusklađenost faza nanovo izračunatih simulacija i zabilježenih zapisa mogla bi biti prisutna za frekvencije između 5 i 10 Hz). Validacija rezultata potencijalno se može poboljšati tako da se razmatraju statistička svojstva seta usporedbi simulacija i zabilježenih zapisa. Međutim, valja napomenuti da neusklađenost

faza djelomično proizlazi i iz činjenice da je u simulacijama korišten pojednostavljeni prikaz građe kore i seizmičkog izvora. Nailasci pojedinih faza na simulacijama uvijek će se razlikovati u odnosu na zabilježene faze zbog odstupanja modela građe Zemlje i seizmičkih izvora od stvarnih.

Slično kao i u slučaju niskofrekventnih simulacija, vrijednosti *GOF* i funkcije mjera kvalitete prilagodbe ovojnica te faza ne pokazuju povezanost s epicentralnom udaljenošću ili magnitudom potresa. Povezanost među veličinama bilo bi moguće ispitati kada bi razmatrani skup podataka (broj parova potres-postaja) bio veći. Tako je primjerice u istraživanju Leeja i suradnika (2022) na temelju hibridnih simulacija 148 umjerenih do jakih potresa opaženo da su za magnitude manje od  $M \leq 4.0$  vrijednosti vršnih akceleracija podcijenjene, tj. da metoda daje bolje rezultate za potrese većih magnituda. U istom istraživanju provedene su dodatne analize u kojima se ispitala ovisnost dobivenih rezultata o putanji zrake kroz sredstvo te specifičnim lokalnim uvjetima tla (konkretno vrijednostima *vs30*) da bi se utvrdilo koliko su širokopojasne simulacije uspješne i vjerodostojne. Ispitivanje različitih parametara na većem skupu podataka od iznimne je važnosti za utvrđivanje primjenjivosti same metode hibridne simulacije na istraživanom području. U daljnjem radu analizu bi trebalo dodatno proširiti ponajprije s obzirom na broj i raspodjelu seizmoloških postaja koje su zabilježile potrese (tako da se pokrije i područje dubrovačkog primorja). Po uzoru na druge radove (npr. Cultrera i sur., 2010; Imperatori i Mai, 2012; Lu i Ben-Zion, 2022; Zhiwei i sur., 2023), valjalo bi simulirati potrese većih magnituda i različitih žarišnih mehanizama, te prilikom računanja visokofrekventnog doprinosa testirati više modela građe kore (1D i/ili 3D modela) i atenuacije. Razmatranjem ovisnosti rezultata o nepouzdanostima i vrijednostima *vs30* dobio bi se uvid u to jesu li ili ne amplifikacijski faktori metode GP prikladni za modeliranje lokalnih uvjeta tla na istraživanom području. Nadalje, amplifikacijski faktori mogli bi se izračunati na temelju drugih parametara (npr. dubine za koju S-valovi premašuju iznos od 800 m/s i/ili impedancije S-valova) s obzirom na to da su razna istraživanja pokazala da *vs30* ponekad ne odražava dovoljno dobro amplifikacijske efekte (vidi Mazanec i sur., 2024. i reference ondje). Što se same metode GP tiče, trebalo bi ju dodatno modificirati, konkretno u slučaju računanja faktora rasprostiranja P-valova. Time bi se potencijalno umanjila odstupanja simuliranih P-faza od zabilježenih koja se opažaju za pojedine slučajeve parova potres-postaja.

S obzirom na sve navedeno, ostaje nejasno u kolikoj je mjeri hibridni pristup simuliranja širokopojasnih zapisa gibanja tla primjenjiv na istraživanom području. Ipak, važno je napomenuti da je ovo prva takva analiza i temelj koji će uz potpuniju parametrizaciju i proširenu validaciju zasigurno doprinijeti boljem razumijevanju svojstava potresne trešnje na širem dubrovačkom području.

### 5.3. Scenariji Velikog dubrovačkog potresa

U poglavlju 4.4 prikazani su i opisani rezultati simulacija Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine. Simulirano je ukupno šest niskofrekventnih scenarija ovisno o definiciji seizmičkog izvora koji je opisan u poglavlju 3.1.1. U nastavku je dan osvrt na rezultate te njihovu validaciju koja se temeljila na usporedbi opaženih makroseizmičkih intenziteta i procijenjenih parametara trešnje tla.

Iz karata dekadskih logaritama horizontalnih vršnih brzina gibanja tla (slika 4.12), horizontalnih spektralnih akceleracija za period  $T = 1.0$  s (slika 4.13) i horizontalnih Ariasovih intenziteta (slika 4.14) može se opaziti da na prostornu razdiobu vrijednosti, osim položaja točke inicijacije i razdiobe pomaka duž rasjedne plohe, direktno utječe i sam 3D model građe Zemlje. Konkretno, na područjima gdje na površinu izvira karbonatne stijene vrijednosti su niže naspram onih koje se postižu u predjelima u kojima model građe kore uključuje sedimentne stijene. Ovo je posebno uočljivo za otok Mljet – između njega i ostatka kopna nalazi se usko područje sedimentnih stijena (potez od Pelješca do Lopuda) gdje dolazi do amplifikacije (veće vrijednosti  $PGV_{horz}$  i  $SA1.0_{horz}$ ) i produljenja trajanja trešnje (veće vrijednosti  $A_{horz}$ ); s druge strane, zbog karbonata koji prevladavaju na otoku Mljetu i kopnu, trešnja je kraćeg trajanja i manjih amplituda. Amplifikacija i produljenje trajanja trešnje posljedica su razlika brzina seizmičkih valova i gustoća na granici dvaju sredstava, sedimentata u krovini te karbonata u podini. Valovi iz sredstva veće brzine i gustoće (karbonati) prelaze u sredstvo manjih brzina i gustoća (sedimenti) i usporavaju, pa im zbog očuvanja energije rastu amplitude. Nadalje, zbog razlika u sredstvima valovi mogu ostati zarobljeni između njih te uslijed niza refleksija produljiti trajanje trešnje na površini. Navedeni efekti bit će izraženiji što su razlike među sredstvima veće, tj. što su brzine i gustoće karbonata veće od brzina i gustoća sedimentata. S druge strane, na mjestima gdje seizmički valovi putuju kroz karbonate i sloj izmjene karbonata s permo-trijaskim klastičnim naslagama ispod njih dogodit će se suprotno, odnosno doći će do deamplifikacije i skraćivanja trajanja trešnje.

Što se razdiobe pomaka duž rasjedne plohe tiče, opaženo je da su granične vrijednosti raspona logaritama mjera intenziteta gibanja tla veće u slučajevima nejednolikih razdioba (scenariji 1, 2 i 3) nego kod jednolikih razdioba (scenariji 4, 5 i 6). Ovo je posljedica činjenice da je kod nejednolike razdiobe pomaka većina momenta lokalizirana unutar ograničenog dijela rasjeda, pa su pojedini dijelovi podložni intenzivnijoj trešnji većih amplituda i duljeg trajanja. S druge strane, kod jednolikih razdioba pomaka energija nije lokalizirana i moment svakog segmenta manji je od maksimalnog pojedinačnog momenta nejednolike razdiobe. Samim time, svaki od točkastih izvora u širem epicentralnom području će osloboditi manje energije i uzrokovati slabiju trešnju koja je kraćeg trajanja. Nadalje, razdioba pomaka duž rasjedne površine utjecat će na sam izgled prostorne razdiobe ekstremnih vrijednosti mjera intenziteta gibanja. Kod jednolike razdiobe ekstremi su prisutni samo na području dubrovačkog primorja, a kod nejednolike razdiobe

uočavaju se na obje strane rasjeda, odnosno i jugozapadno i sjeveroistočno od točke inicijacije. U slučaju nejednolike razdiobe, vrijednosti logaritama mjera intenziteta gibanja tla na kopnu opadaju brže s obzirom na udaljenost promatrane lokacije i točke inicijacije od vrijednosti logaritama koje se postižu na području dubrovačkog primorja. Ovo je ponovno direktno povezano sa samim 3D modelom, tj. atenuacijom i faktorima dobrote koji su definirani na temelju vrijednosti brzina S-valova iz modela. Na kopnu prevladavaju karbonati velikih brzina S-valova, pa će utjecaj atenuacije biti veći i amplitude valova će biti manje što oni dulje putuju kroz sredstvo (s povećanjem udaljenosti od točke inicijacije). Na području dubrovačkog primorja nalaze se sedimenti puno manjih brzina u odnosu na karbonate, pa su samim time slabije izraženi efekti atenuacije (gubitak i preraspodjela energije seizmičkih valova uslijed geometrijskog širenja fronte, raspršenja, neelastičnosti sredstva i sl). S obzirom na način na koji je definirana, atenuaciju bi trebalo dodatno testirati za svaki od šest scenarija potresne trešnje. Konkretno, trebalo bi testirati utječe li (npr. Savage i sur., 2010) ili ne (npr. Latečki i sur., 2021) promjena Olsenovog omjera (Olsen i sur., 2013) značajno na atenuaciju.

Svi navedeni efekti koji proizlaze iz 3D modela i/ili seizmičkog izvora, a utječu na razdiobu vrijednosti mjera intenziteta gibanja, također će utjecati i na izgled vrijednosti norme brzina (slika 4.15). Tako će, uslijed efekta amplifikacije i produljenja trajanja trešnje, te manje izražene atenuacije, brzine valne fronte kroz vrijeme uvijek biti značajno veće na području dubrovačkog primorja (gdje su sedimenti) nego na otocima i kopnu (koji su primarno građeni od karbonata). Nejednolika razdioba pomaka duž rasjedne plohe rezultirat će generalno većim amplitudama na komponentama seizmograma naspram amplituda zapisa gibanja dobivenih pomoću modela seizmičkog izvora s jednolikom razdiobom. Drugim riječima, korijen zbroja kvadrata pojedinačnih amplituda triju komponenti gibanja bit će veći, a kako je upravo to definicija norme brzine, njezine maksimalne vrijednosti će u skladu s time biti veće u slučaju nejednolike razdiobe.

Neovisno o scenariju, pravokutni dijagrami logaritama horizontalnih vršnih brzina gibanja tla (slika 4.16), horizontalnih spektralnih akceleracija za periode  $T = 1.0$  s (slika 4.17) i horizontalnih Ariasovih intenziteta (slika 4.18) ukazuju na raspršenost vrijednosti logaritama po intenzitetima. U poglavlju 4.4, ovo je djelomično pripisano subjektivnosti i načinu na koji se određuju makroseizmički intenziteti. Makroseizmički intenziteti ( $MI$ ) pridijeljeni su i odražavaju utjecaj gibanja tla za određeno naselje ili neki njegov dio koje može obuhvatiti niz lokacija čija se geomorfološka, geološka i topografska svojstva mogu bitno razlikovati. S druge strane, vrijednosti mjera intenziteta gibanja tla ( $GMI$ ) odnose se na neposrednu blizinu mjerne točke jer direktno ovise o lokalnom utjecaju tla. Razlika u prostornoj pridijeljenosti veličina  $MI$  i  $GMI$  ujedno je i razlog zašto su za pojedinu  $MI$  vrijednosti  $GMI$  toliko varijabilne (vidi Gomez-Capera i sur., 2020. i reference ondje). Raspršenost vrijednosti logaritama  $GMI$  kod scenarija potresne trešnje također je u velikoj mjeri i posljedica činjenice da su ovdje promotrene vrijednosti dobivene isključivo iz niskofrekventnih simulacija. Raspršenost bi potencijalno bila manja da su vrijednosti dobivene iz simulacija koje uključuju i kratke periode koji značajno utječu na vrijednosti

*GMI* te njihovu prostornu varijabilnost (npr. Aagaard i sur., 2008). Ovo je posebno očekivano za Ariasov intenzitet jer se niskopropusnim filtriranjem izbacuje glavni doprinos jakoj trešnji (koji je prisutan za  $f > 1.0$  Hz), čime se znatno utječe i na njezino očekivano trajanje. Ovaj efekt jači je što je epicentralna udaljenost manja, dok se na većim udaljenostima smanjuje zbog jače atenuacije visokih frekvencija, te produljenja trajanja trešnje zbog višestrukih refleksija i reverberacija dugoperiodičkih valova. Dakle, važno je napomenuti da će zbog načina na koji su u ovom radu izračunate vrijednosti *GMI* (samo iz niskofrekventnih doprinosa), doći do određenog odstupanja njihovih raspona vrijednosti te korelacijskih odnosa s *MI*. Nadalje, da su vrijednosti određene iz širokopojasnih simulacija, opaženi makroseizmički intenziteti mogli bi se usporediti s tzv. simuliranim seizmičkim intenzitetima kao što je napravljeno npr. u radu Liu i sur. (2023). Ipak, u danom trenutku dobiveni rezultat je najbolji mogući te ukazuje na očekivanu pozitivnu korelaciju veličina *GMI* i *MI* za pojedine scenarija potresne trešnje.

U slučajevima kada su vrijednosti logaritama veličina *GMI* svrstane kao stršeće vrijednosti (tzv. *outlieri*) radi se o značajnijem odstupanju od ostatka raspona vrijednosti za pojedini opaženi intenzitet. Iznosi *outliera* proizlaze iz utjecaja definicije seizmičkog izvora i geoloških struktura u 3D modelu na simulacije. Tako primjerice kod jednolikih razdioba pomaka na rasjedu (scenariji 4, 5 i 6) na lokacijama Čilipi i Cavtat logaritmi vrijednosti *GMI* za intenzitet VIII °EMS98 postižu veće, a kod Stona manje vrijednosti od 1.5 interkvartilnog raspona. Čilipi i Cavtat smješteni su na lokacijama koje u modelu *DF\_3D* uključuju kvartarne klastične naslage taložene iznad karbonata (potez Mokošica-Cavtat-Gruda-Molunat), dok se Ston nalazi na karbonatima. Kombinacija definicije seizmičkog izvora i građe sredstva (koja zbog rezolucije modela nije u potpunosti prikladno opisana) uvjetuje tome da dolazi do prevelike (Čilipi i Cavtat) ili nedostatne (Ston) amplifikacije te predugog (Čilipi i Cavtat) ili prekratkog (Ston) trajanja trešnje. Slično se opaža i u slučaju nejednolike razdiobe pomaka na rasjedu (scenariji 1 i 2). Vrijednosti *GMI* za intenzitete VII-VIII °EMS98 premašuju 1.5 interkvartilnog raspona na lokacijama Sveti Jakov u Višnjici i Pridvorje koji su smješteni na mjestima gdje su taložene kvartarne klastične naslage. Ponovno dolazi do prevelike amplifikacije i produljenja trešnje, a samim time premašivanja određenog raspona vrijednosti logaritama parametara *PGV*, *SA1.0* i Ariasovog intenziteta.

Premda bi se iz pravokutnih dijagrama scenarija 4 (bilateralna vremenska simetrija, jednolika razdioba pomaka duž rasjeda) za parametre  $PGV_{horz}$  i  $A_{horz}$  dalo naslutiti da upravo takva definicija seizmičkog izvora rezultira najboljom linearnom proporcionalnošću veličina *GMI* i *MI*, Spearmanov koeficijent korelacije upućuje na drugačiji zaključak. Točnije, upućuje da se kod scenarija 1 (bilateralna vremenska simetrija, nejednolika razdioba pomaka duž rasjeda) postiže najbolja korelacija veličina *GMI* i *MI* te da je stoga to najvjerojatniji, odnosno najprikladniji scenarij kojim se može predočiti Velika dubrovačka trešnja iz 1667. godine. Rasponi vrijednosti *GMI* i korelacije s *MI* nešto su manje od onih koje se citiraju u radovima gdje su vrijednosti *GMI* izračunate za puno opaženo valno polje (npr. Ardeleanu i sur., 2020; Gomez-Capera i sur., 2020).

Drugi najvjerojatniji scenarij je scenarij 2 koji također uključuje nejednoliku razdiobu pomaka duž rasjeda. Dobiveni rezultati na neki način su i očekivani jer će, premda pojednostavljena, nejednolika razdioba pomaka duž rasjeda realističnije opisivati seizmički izvor od jednolike. Rasjedanje započinje u relativno malom i ograničenom prostoru na mjestu gdje je nakupljena napetost premašila čvrstoću stijene. Početna pukotina nastavlja se nejednoliko širiti u prostoru i vremenu zbog nehomogenosti svojstava sredstva, a zaustavlja se u trenutku kad napetost više ne premašuje čvrstoću stijene. Upravo je zbog ove nejednolikosti i nehomogenosti potrebno prilikom modeliranja seizmičkog izvora koristiti modele s nejednolikim razdiobama (Mikumo i Miyatake, 1978). Izuzev načina na koji je definirana razdioba pomaka duž rasjeda, Spearmanov koeficijent korelacije prvog scenarija značajno je veći naspram koeficijentata preostalih scenarija i zbog same točke inicijacije. Konkretno, lokacija točke inicijacije odgovara s pretpostavljenoj lokaciji izvora iz Herak i sur. (1996) koja je dobivena na temelju analize razdiobe opaženih intenziteta. Stoga je za očekivati da će lokacija dobivena na takav način i u drugim metodama (u ovome slučaju metodi numeričke simulacije potresne trešnje) rezultirati najboljim preklapanjem opaženih intenziteta s procijenjenim parametrima trešnje tla. Kombinacija lokacije točke inicijacije, efekata od 3D modela te definicije razdiobe pomaka duž rasjedne plohe utjecat će na krajnju razdiobu vrijednosti logaritama veličina *GMI*. U skladu s time, Spearmanovi koeficijenti poprimit će razne vrijednosti ovisno o scenariju potresne trešnje. Najveći koeficijent *rs* govorit će o tome koja je od tih kombinacija najbolja, a najmanji koja je najgora. U ovome slučaju, najmanju vrijednost *rs* daje kombinacija svojstava seizmičkog izvora scenarija 5 (JI-SZ unilateralna simetrija, jednolika razdioba pomaka duž rasjeda), tj. scenarij 5 je najmanje vjerojatan scenarij kojim bi se mogla predočiti Velika dubrovačka trešnja.

Rezultati scenarija potresne trešnje trenutno su svojevrsna polazna baza koju je potrebno doradivati i unaprijediti na temelju novih saznanja. To se ponajprije odnosi na saznanja o građi Zemljine kore i seizmičkog izvora. Kao što je navedeno u poglavlju 5.1, 3D model definiran na temelju više podataka i manje nepouzdanosti nužan je za računanje niskofrekventnih simulacija koje odgovaraju zabilježenom i očekivanom gibanju tla. S obzirom na to da se u scenarijima potresne trešnje jasno ocrtava utjecaj 3D modela na mjere intenziteta gibanja tla, za očekivati je da će njegovim unaprjeđenjem sami scenariji odražavati uvedena poboljšanja te biti vjerodostojniji. Nadalje, dodatnim modeliranjem seizmičkog izvora valjalo bi ispitati i druge scenarije kako bi se s većom sigurnošću moglo utvrditi koji od njih odgovara Velikoj dubrovačkoj trešnji. U tom kontekstu, modeliranje bi trebalo proširiti na dinamičko modeliranje kako bi se fizikalno okarakterizirana svojstva prilikom procesa rasjedanja i time poboljšala procjena gibanja tla na nekom području (npr. Graves i sur., 2011; Rodgers i sur., 2020; Oral i Satriano, 2021). Dinamičko modeliranje seizmičkog izvora zahtjeva saznanja o početnim uvjetima koji su doveli do rasjedanja (npr. razdioba napetosti, čvrstoća stijene, geometriju rasjedne površine itd.) i koji se mogu definirati pomoću određenih inverznih metoda te direktnih geofizičkih i geoloških mjerenja. U slučaju kad nisu poznati, dinamičko modeliranje može se provesti tako da se testira niz mogućih početnih uvjeta i njihovih kombinacija. Slično je



napravljeno u radu Li i sur. (2023) gdje se različito definiranim dinamičkim modelima izvora rasjedne zone Húsavík-Flatey (Island) nastojalo utvrditi koji od njih daje najprikladnije rezultate u simulacijama. Samim time, utvrđeni su i najprikladniji početni uvjeti te način na koji ih je dalje potrebno modificirati da bi se u konačnici dobio dobar prikaz dinamičkog modela rasjedanja. Osim daljnjeg razvijanja definicije seizmičkog izvora i 3D modela, za uspješno izvođenje scenarija potresne trešnje povijesnih potresa za koje ne postoje zabilježeni zapisi, potrebno je proširiti i metode validacije rezultata. Najjednostavnije, validaciju je moguće proširiti tako da se simulira recentni potres slične magnitude i/ili svojstava mehanizma rasjedanja za koji postoje zapisi gibanja tla. Usporedbom simulacija i zabilježenih zapisa dobio bio se kvalitativniji uvid u rezultate, tj. primjenjivosti metode i ulaznih parametara za scenarije potresne trešnje na istraživanom području (kako povijesnih potresa tako i svih potencijalnih koji se mogu dogoditi u budućnosti). U kontekstu ovog istraživanja, proširenje validacije moglo bi se provesti uključivanjem glavnog potresa magnitude  $M = 6.0$  iz recentne serije potresa kod Berkovića (Dasović i sur., 2024). Za to bi najprije trebalo proširiti radnu domenu 3D modela građe kore, kao što je diskutirano u poglavlju 5.1.

Bez obzira na trenutne nedostatke koji proizlaze iz definicije modela građe kore, seizmičkog izvora i validacije, ovim je istraživanjem po prvi puta u Hrvatskoj definirana baza scenarija potresne trešnje jednog od najznačajnijih potresa u Hrvatskom katalogu potresa. Podatci za svaki od šest scenarija potresne trešnje javno su dostupni za pregledavanje i preuzimanje na stranici: <https://dubrovnikshakingscenarios.gfz.hr/>. Kao takvi (ali uz određenu dozu nepouzdanosti!) mogu poslužiti za procjenu nekih drugih mjera intenziteta gibanja tla (npr. vršnih akceleracija gibanja tla i spektralnih odziva za periode veće od 1 s) koje se koriste prilikom procjene determinističkog seizmičkog hazarda.

## 6. Zaključak

Razvoj, dostupnost i porast računalnih resursa krajem prošlog stoljeća omogućili su korištenje novih metoda u seizmologiji, među koje spadaju i numeričke simulacije potresne trešnje. Metode numeričkih simulacija danas se uspješno provode u brojnim istraživanjima koja se bave globalnim, regionalnim i lokalnim modeliranjem gibanja tla za širok raspon frekvencija. Simuliranje potresne trešnje pružilo je dublje razumijevanje uzroka i posljedica potresa, te same strukture i građe Zemlje na istraživanom području. I premda su još uvijek prisutni brojni izazovi i problemi da bi simulirani scenariji potresne trešnje bili realistični, ovakav pristup procjeni i karakterizaciji gibanja tla u budućnosti se će zasigurno igrati veliku ulogu prilikom procjene determinističkog seizmičkog hazarda.

Ova doktorska disertacija predstavlja analizu mogućnosti primjene metoda numeričkih simulacija na širem dubrovačkom području koje se ubraja u jedno od seizmički najaktivnijih područja u Hrvatskoj. Na temelju već postojećih te novih rezultata geoloških i geofizičkih istraživanja razvijen je prvi približan radni 3D model građe kore istraživanog područja. Uz to, definirana je prva baza simuliranih zapisa gibanja tla za jedan od najznačajnijih potresa u Hrvatskoj, Veliki dubrovački potres iz 1667. godine. Opsežnije, u skladu s postavljenim ciljevima, provedeno doktorsko istraživanje predstavlja znanstveni doprinos u hrvatskoj seizmologiji kroz sljedeće stavke:

- i. Na temelju dostupnih podataka i informacija sastavljen je 3D model građe kore za šire dubrovačko područje (*DF\_3D*); Napravljene su vizualna provjera i kvalitativna validacija primjenjivosti novodefiniranog modela u simulacijama niskofrekventnih doprinosa gibanja tla na temelju usporedbe zabilježenih i simuliranih seizmograma deset umjerenih i jakih potresa; Primjenjivost i uspješnost modela u simulacijama za istraživano područje uspoređena je s primjenjivošću lokalnog 1D modela *Ston\_H08* i regionalnog 3D modela građe kore *EPcrust*.
- ii. Primijenjena je hibridna metoda za računanje širokopojasnih zapisa gibanja tla na širem dubrovačkom području što je ujedno jedan od prvih pokušaja primjene takve metode na području Hrvatske; Provedene su vizualna provjera i kvalitativna validacija rezultata na temelju usporedbe zabilježenih i simuliranih zapisa gibanja tla deset umjerenih i jakih potresa; U kontekstu provedbe hibridne metode i računanja visokofrekventnog doprinosa gibanja tla, definirana je baza Greenovih funkcijama izračunatih za 1D model (*DF\_1D*) koji je izveden iz modela *DF\_3D*.
- iii. Napravljene su prvi pokušaji karakterizacije seizmičkog izvora Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine korištenjem ukupno šest različitih kinematičkih modela konačnih izvora; Validacija scenarija potresne trešnje provedena je na temelju usporedbe simuliranih mjera intenziteta gibanja tla i

opaženih makroseizmičkih intenziteta; Utvrđeno je koja od testiranih kombinacija razdiobe pomaka i vremenske simetrije rasjedanja najbolje opisuje seizmički izvor; Definirana je baza simuliranih niskofrekventnih seizmograma i video zapisa simulacija za šest scenarija Velike dubrovačke trešnje.

Glavni rezultati ovog doktorskog istraživanja također se mogu sažeti u tri stavke:

- i. Na temelju analize niskofrekventnih simuliranih zapisa gibanja tla i usporedbe s drugim modelima, utvrđeno je da je novodefinirani model trenutno najprikladniji model za izvođenje scenarija potresne trešnje na širem dubrovačkom području. Model *DF\_3D* trenutno je najpotpuniji lokalni model koji uključuje i objedinjuje sva dostupna geološka i geofizička saznanja o strukturno-geološkoj građi istraživanog područja. Daljnje unaprjeđenje modela, prvenstveno njegove rezolucije i domene koju prekriva, potrebno je temeljiti na opsežnijem skupu ulaznih podataka. Uz modifikacije 3D modela i dodatne validacijske metode, potrebno je proširiti skup podataka zabilježenih zapisa gibanja tla kako bi se sa što većom pouzdanošću moglo utvrditi koliko je model reprezentativan za istraživano područje i primjenjiv za provedbu realističnih simulacija potresne trešnje.
- ii. Iz dobivenih rezultata vrlo je teško sa sigurnošću utvrditi u kolikoj je mjeri hibridni pristup simuliranja širokopojasnih zapisa gibanja tla s trenutnom parametrizacijom primjenjiv na širem dubrovačkom području. Međutim, valja uzeti u obzir da je ovo jedna od prvih takvih analiza koja će uz proširenu validaciju i potpuniju parametrizaciju (veći skup ulaznih podataka, nadogradnja metode simulacije visokofrekventnih doprinosa gibanja tla) doprinijeti boljem razumijevanju svojstava gibanja tla na istraživanom području.
- iii. Rezultati simulacija potresne trešnje Velikog dubrovačkog potresa iz 1667. godine predstavljaju svojevrsnu bazu scenarija gibanja tla na širem dubrovačkom području u slučaju vrlo jakog potresa. Od šest ispitanih kombinacija, Velika dubrovačka trešnja najbolje je predočena korištenjem modela seizmičkog izvora s nejednolikom razdiobom pomaka duž rasjedne plohe i bilateralnim rasjedanjem. Daljnje modeliranje i unaprjeđenje opisa seizmičkog izvora, korištenog modela građe kore, metoda simulacije i u konačnosti validacije rezultata, nužno je da bi scenariji potresne trešnje odražavali realistična očekivana svojstva gibanja tla i time doprinijeli boljoj procjeni determinističkog seizmičkog hazarda.

Navedeni rezultati ukazuju da primjena numeričkih metoda na širem dubrovačkom području iziskuje vrlo kompleksno modeliranje strukture Zemlje i seizmičkih izvora da bi simulirana potresna trešnja odražavala svojstva realističnih scenarija te bila iskoristiva u procjeni determinističkog seizmičkog hazarda. Ipak, trenutna saznanja i zaključci koji su proizašli iz ovoga rada predstavljaju vrlo važan prvi korak prema praktičnoj i uspješnoj primjeni ovakvih metoda na istraživanom području, te Hrvatskoj općenito.

# Popis literature

1. Aagaard, B.T., Hall, J.F., Heaton, T.H. (2001): Characterization of near source ground motions with earthquake simulations. *Earthquake Spectra*, 17(2), 177–207.
2. Aagaard, B.T., Brocher, T.M., Dolenc, D., Dreger, D., Graves, R.W., Harmsen, S., Hartzell, S., Larsen, S., Zoback, M.L. (2008): Ground-Motion Modeling of the 1906 San Francisco Earthquake, Part I: Validation Using the 1989 Loma Prieta Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(2), 989–1011. <https://doi.org/10.1785/0120060409>.
3. Afanasiev, M., Boehm, C., van Driel, M., Krischer, L., Rietmann, M., May, D. A., Knepley, M. G., Fichtner, A. (2019): Modular and flexible spectral-element waveform modelling in two and three dimensions. *Geophysical Journal International*, 216(3), 1675–1692. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy469>.
4. Ahrens, J.P., Geveci, B., Law, C.C. (2005): ParaView: An End-User Tool for Large-Data Visualization. *The Visualization Handbook*.
5. Ajala, R., Persaud, P., Stock, J.M., Fuis, G.S., Hole, J., Goldman, M., Scheirer, D. (2019): Three-dimensional basin and fault structure from a detailed seismic velocity model of Coachella Valley, Southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5), 4728–4750. <https://doi.org/10.1029/2018JB016260>.
6. Aki, K., Chouet B. (1975): Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects.
7. Aki, K., Richards, P. (1980): *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. Freeman, San Francisco.
8. Albini, P. (2014): A survey of the past earthquakes in the Eastern Adriatic (14th to early 19th century). *Annals of Geophysics*.
9. Albini, P. (2015): *The Great Dalmatia Earthquake (An In-Depth Case Study)*. Springer, 95.

10. Albin, P., Rovida, A. (2016): From written records to seismic parameters: the case of the 6 April 1667 Dalmatia earthquake. *Geoscience Letters*, 3, 30. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0063-2>.
11. Albin, P., Rovida, A. (2018): Earthquakes in southern Dalmatia and coastal Montenegro before the large 6 April 1667 event. *Journal of Seismology*, 22, 721–754. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9730-4>.
12. Allen, T.U., Wald, D.J. (2007): Topographic slope as a proxy for seismic site-conditions (vs30) and amplification around the globe. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2007-1357, 69.
13. Alterman, Z., Karal, F.C. (1968): Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 367–398.
14. Anderson, J.G., Hough, S.E. (1984): A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 1969–1993.
15. Ardeleanu, L., Neagoe, C., Ionescu, C (2020): Empirical relationships between macroseismic intensity and instrumental ground motion parameters for the intermediate-depth earthquakes of Vrancea region, Romania. *Natural Hazards*, 103, 2021–2043. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04070-0>.
16. Arias, A. (1970): A measure of earthquake intensity. In: Hansen RJ (ed) *Seismic design for nuclear power plants*. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, 438–469.
17. Assatourians, K., Atkinson, G. (2012): EXSIM12: A Stochastic Finite-Fault Computer Program in FORTRAN. <http://www.seis toolbox.ca> (pristupljeno 29. studenog 2023).
18. Atkinson, G.M. (2001): Linking historical intensity observations with ground-motion relations foreastern North America, *Seismological Research Letters*, 72, 560–574.
19. Bao, H., Bielak, J., Ghattas, O., Kallivokas, L.F., O'Hallaron, D.R., Shewchuk, J.R., Xu, J. (1998): Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 152(1–2), 85–102.

20. Belinić, T. (2020): Struktura litosfere i astenosfere ispod Dinarida na temelju seizmograma dalekih potresa. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:061075>.
21. Benetatos, C., Kiratzi, A. (2006): Finite-fault slip models for the 15 April 1979 (Mw 7.1) Montenegro earthquake and its strongest aftershock of 24 May 1979 (Mw 6.2). *Tectonophysics*, 421 (1–2), 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.04.009>.
22. Bennett, R.A., Hreinsdóttir, S., Buble, G., Bašić, T., Bačić, V., Marjanović, M., Casale, G., Gendaszek, A., Cowan, D. (2008): Eocene to present subduction of southern Adria mantle lithosphere beneath the Dinarides. *Geology* 36, 1, 3–6.
23. Beresnev, I.A., Atkinson, G.M. (1997): Modeling finite-fault radiation from the  $\omega$ n spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(1), 67–84.
24. Beresnev, I.A., Atkinson, G.M. (1998): FINSIM—a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismological Research Letters*, 69(1), 27–32. <https://doi.org/10.1785/gssrl.69.1.27>.
25. Boore, D.M. (1972): Finite difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials. In: Bolt BA (ed) *Methods in computational physics*, vol 11. Academic Press, New York.
26. Boore, D.M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 1865–1894.
27. Bozorgnia, Y., Campbell, K.W. (2016): Ground Motion Model for the Vertical-to-Horizontal (V/H) Ratios of PGA, PGV, and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 32(2), 951–978. <https://doi.org/10.1193/100614eqs151m>.
28. Bradley, B., Tarbali, K., Lee, R., Motha, J., Bae, S., Polak, V., Zhu, M., Schill, C., Patterson, J., Lagrava, D. (2020): Cybershake NZ v19.5: New Zealand simulation-based probabilistic seismic hazard analysis. *Proceedings of the 2020 New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference*.
29. Brocher, T.M. (2005): Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2081–2092.

30. Campbell, K. W., Bozorgnia, Y. (2008): NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, *Earthquake Spectra*, 24, 139–172.
31. Casadei, F., Gabellini, E. (1997): Implementation of a 3D Coupled Spectral Element Solver for Wave Propagation and Soil-Structure Interaction Simulations. Ispra, Italy: European Commission Joint Research Center Report EUR17730EN.
32. Clayton, R. Engquist, B. (1977): Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67 (6), 1529–1540. <https://doi.org/10.1785/BSSA0670061529>.
33. Cohen, G., Joly, P., Tordjman, N. (1993): Construction and Analysis of Higher-Order Finite Elements with Mass Lumping for the Wave Equation. In *Proceedings of the Second International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*, edited by R. Kleinman, 152–60. SIAM, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
34. Crempien, J.G.F., Archuleta, R.J. (2015): UCSB Method for Simulation of Broadband Ground Motion from Kinematic Earthquake Sources. *Seismological Research Letters*, 86 (1), 61–67. <https://doi.org/10.1785/0220140103>.
35. Cultrera, G., Cirella, A., Spagnuolo, E., Herrero, A., Tinti, E., Pacor, F. (2010): Variability of Kinematic Source Parameters and Its Implication on the Choice of the Design Scenario. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), 941–953. <https://doi.org/10.1785/0120090044>.
36. Dan, K., Sato, T. (1999): A semi-empirical method for simulating strong ground motions based on variable-slip rupture models for large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 36–53.
37. Dang, P., Liu, Q., Xia, S., Ma, W. (2021): A stochastic method for simulating near-field seismograms: Application to the 2016 Tottori earthquake. *Earth and Space Science*, 8, e2021EA001939. <https://doi.org/10.1029/2021EA001939>.
38. Dasović, I., Herak, M., Herak, D. (2012): Attenuation of coda waves in the contact zone between the Dinarides and the Adriatic Microplate. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56, 231–247. <https://doi.org/10.1007/s11200-010-0077-8>.

39. Dasović, I., Herak, M., Herak, D., Latečki, H., Sećanj, M., Tomljenović, B., Cvijić-Amulić, S., Stipčević, J. (2024): The Berkovići (BIH) ML = 6.0 earthquake sequence of 22 April 2022 – seismological and seismotectonic analyses. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230253>.
40. Douglas, J. (2018): *Ground motion prediction equations 1964-2018*. Glasgow: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde.
41. Ekström, G., Nettles, M., Dziewoński, A.M. (2012): The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.
42. EMODnet Bathymetry Consortium (2020): *EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2020)*. Dostupno na: <https://doi.org/10.12770/bb6a87dd-e579-4036-abe1-e649cea9881a> (pristupljeno 14. travnja 2022).
43. Faccioli, E., Maggio, F., Paolucci, R., Quarteroni, A. (1997): 2D and 3D Elastic Wave Propagation by a Pseudo-Spectral Domain Decomposition Method. *Journal of Seismology*, 1, 237–51.
44. Faenza L., Michelini A. (2010): Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap. *Geophysical Journal International*, 180, 1138–1152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04467.x>.
45. Frankel, A. (1995): Simulating strong motions of large earthquakes using recordings of small earthquakes: the Loma Prieta mainshock as a test case. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 1144–1160.
46. Frankel, A., Vidale, J. (1992): A three-dimensional simulation of seismic waves in the Santa Clara Valley, California, from a Loma Prieta aftershock. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(5), 2045–2074.
47. Gasperini, P., Vannucci, G., Tripone, D., Boschi, E. (2010): The location and size of historical earthquakes using the attenuation of macroseismic intensity with distance. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 2035–2066.
48. Gholamy, A., Kreinovich, V. (2014): *Why Ricker Wavelets Are Successful in Processing Seismic Data: Towards a Theoretical Explanation*. Departmental Technical Reports (CS). 861. [https://scholarworks.utep.edu/cs\\_techrep/861](https://scholarworks.utep.edu/cs_techrep/861).



49. Goldberg, D.E., Melgar, D. (2020): Generation and Validation of Broadband Synthetic P Waves in Semistochastic Models of Large Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110 (4), 1982–1995. <https://doi.org/10.1785/0120200049>.
50. Gomez-Capera, A.A., D'Amico, M., Lanzano, G., Locati, M., Santulin, M. (2020): Relationships between ground motion parameters and macroseismic intensity for Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 5143–5164. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00905-0>.
51. Govorčin, M., Herak, M., Matoš, B., Pribičević, B., Vlahović, I. (2020): Constraints on Complex Faulting during the 1996 Ston–Slano (Croatia) Earthquake Inferred from the DInSAR, Seismological, and Geological Observations. *Remote Sensing*, 12, 1157. <https://doi.org/10.3390/rs12071157>.
52. Graves, R., Jordan, T., Callaghan, S., Deelman, E., Field, E., Juve, G., Kesselman, C., Maechling, P., Mehta, G., Milner, K., Okaya, D., Small, P., Vahi, K. (2011): CyberShake: a physics-based seismic hazard model for Southern California. *Pure Applied Geophysics*, 168(3–4), 367–381.
53. Graves, R.W. (1996): Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(4), 1091–1106.
54. Graves, R.W., Jordan, T.H., Callaghan, S., Deelman, E., Field, E.H., Juve, G., Kesselman, C., Maechling, P., Mehta, G., Milner, K., Okaya, D., Small, P., Vahi, K. (2011): CyberShake: A Physics-Based Seismic Hazard Model for Southern California. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 367–381. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0161-6>.
55. Graves, R.W., Pitarka, A. (2010): Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A), 2095–2123.
56. Graves, R.W., Pitarka, A. (2015): Refinements to the Graves and Pitarka (2010) Broadband Ground - Motion Simulation Method. *Seismological Research Letters*, 86(1), 75–80. <https://doi.org/10.1785/0220140101>.
57. Grenerczy, G., Sella, G., Stein, S., Kenyeres, A. (2005): Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. *Geophysical Research Letters*, 32, 16.

58. Gusev, A.A. (2014): Doubly Stochastic Earthquake Source Model: "Omega-Square" Spectrum and Low High-Frequency Directivity Revealed by Numerical Experiments. *Pure Applied Geophysics*, 171 (10), 2581–2599. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0764-9>.
59. Gutenberg, B., Richter, C.F. (1956): Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, 105.
60. Handy, M.R., Schmid, S.M., Bousquet, R., Kissling, E., Bernoulli, D. (2010): Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological–geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *Earth-Science Reviews*, 102(3), 121–158.
61. Handy, M.R., Ustaszewski, K., Kissling, E. (2015): Reconstructing the Alps-Carpathians-Dinarides as a key to understanding switches in subduction polarity, slab gaps and surface motion. *International Journal of Earth Sciences*, 104(1), 1–26.
62. Handy, M.R., Giese, J., Schmid, S.M., Pleuger, J., Spakman, W., Onuzi, K., Ustaszewski, K. (2019): Coupled crust-mantle response to slab tearing, bending, and rollback along the dinaride-hellenide orogen. *Tectonics*, 281(2), 11. <https://doi.org/10.1029/2019TC005524>.
63. Hartzell, S., Harmsen, S., Frankel, A., Larsen, S. (1999): Calculation of broadband time histories of ground motion: comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 1484–1504.
64. Hartzell, S.H. (1978): Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophysical Research Letters*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.1029/gl005i001p00001>.
65. Haskell, N.A. (1964): Radiation pattern of surface waves from point sources in a multi-layered medium. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54, 377–393.
66. Herak, D. (1995): Razdioba brzina prostornih valova potresa i seizmičnost šireg područja Dinare. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu.
67. Herak, M., Herak, D., Markušić, S. (1995): Fault-plane solutions for earthquakes (1956-1995) in Croatia and neighbouring regions. *Geofizika*, 12, 43–56.
68. Herak, M., Herak, D., Markušić, S. (1996): Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia 1908-1992. *Terra Nova*, 8, 86-94.

69. Herak, M., Lokmer, I., Vaccari, F., Panza, G. (2004): Linear amplification of horizontal strong ground motion in Zagreb (Croatia) for a realistic range of scaled point sources. *Pure and Applied Geophysics*, 161, 1021–1040.
70. Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I. (2011): Karte potresnih područja Republike Hrvatske. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek; Hrvatski zavod za norme. Dostupno na: <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php> (pristupljeno 15. kolovoza 2022).
71. Herak, D., Herak, M., Vrkić, I. (2017): Velika trešnja, seizmičnost i potresna opasnost na širem dubrovačkom području. *Dubrovnik: časopis za književnost i znanost XXVIII*, 1, 5–18.
72. Herak, D., Herak, M., Vrkić, I. (2023): The Earthquake of 13 April 1850 near Ston, Croatia: Macroseismic Analyses. *Seismological Research Letters*, 95(2A), 1043–1056. <https://doi.org/10.1785/0220230299>.
73. Imperatori, W., Mai, P.M. (2012): Sensitivity of broad-band ground-motion simulations to earthquake source and Earth structure variations: an application to the Messina Straits (Italy). *Geophysical Journal International*, 188(3), 1103–1116, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05296.x>.
74. Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I., Stipčević, J. (2018): Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. *Geofizika*, 35, 69–98.
75. Iwata, T., Kagawa, T., Petukhin, A., Ohnishi, Y. (2008): Basin and crustal velocity structure models for the simulation of strong ground motions in the Kinki area, Japan. *Journal of Seismology*, 12, 223–234.
76. Jones F.H.M., Oldenburg, D.W. (2007): *Geophysics for Practicing Geoscientists: Physical Properties, Seismic Velocity*. University of British Columbia, Department of Earth and Ocean Sciences. <https://gpg.geosci.xyz> (pristupljeno 11. travnja 2024).
77. Komatitsch, D. (1997): *Méthodes Spectrales Et Éléments Spectraux Pour l'équation de l'élastodynamique 2D Et 3D En Milieu Hétérogène (Spectral and Spectral-Element Methods for the 2D and 3D Elastodynamics Equations in Heterogeneous Media)*. Doktorska disertacija, Paris, Francuska: Institut de Physique du Globe.

78. Komatitsch, D., Erlebacher, G., Göldeke, D., Michéa, D. (2010): High-Order Finite-Element Seismic Wave Propagation Modeling with MPI on a Large GPU Cluster. *Journal of Computational Physics*, 229(20), 7692–7714, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.06.024>.
79. Komatitsch, D., Erlebacher, G., Göldeke, D., Michéa, D. (2010): High-order finite-element seismic wave propagation modeling with MPI on a large GPU cluster. *Journal of Computational Physics*, 229(20), 7692–7714.
80. Komatitsch, D., Tromp, J. (1999): Introduction to the Spectral-Element Method for 3-D Seismic Wave Propagation. *Geophysical Journal International*, 139(3), 806–22. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00967.x>.
81. Komatitsch, D., Vilotte, J.P. (1998): The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2), 368–392.
82. Komatitsch, D., Vilotte, J.P. (1998): The Spectral-Element Method: An Efficient Tool to Simulate the Seismic Response of 2D and 3D Geological Structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (2), 368–92.
83. Komatitsch, D., Xie, Z., Bozdağ, E., Sales de Andrade, E., Peter, D., Liu, Q., Tromp, J. (2016): Anelastic Sensitivity Kernels with Parsimonious Storage for Adjoint Tomography and Full Waveform Inversion. *Geophysical Journal International*, 206(3), 1467–78, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw224>.
84. Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C., Wassermann, J. (2015): ObsPy: A bridge for seismology into scientific Python ecosystem. *Computational Science and Discovery*, 8, 014003. <https://doi.org/10.1088/1749-4699/8/1/014003>.
85. Kristeková, M., Kristek, J., Moczo, P. (2009): Time-frequency misfit and goodness-of-fit criteria for quantitative comparison of time signals. *Geophysical Journal International*, 178 (2), 813–825. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04177.x>.
86. Kuk, V., Prelogović, E., Dragičević, I. (2000): Seismotectonically active zones in the Dinarides. *Geologia Croatica*, 53(2), 295–303.
87. Latečki, H., Molinari, I., Stipčević, J. (2021): 3D physics-based seismic shaking scenarios for city of Zagreb, Capital of Croatia. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19 (12), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01227-5>.

88. Lee, R.L., Bradley, B.A., Stafford, P.J., Graves, R.W., Rodriguez-Marek, A. (2020): Hybrid broadband ground motion simulation validation of small magnitude earthquakes in Canterbury, New Zealand. *Earthquake Spectra*, 36(2), 673–699. <https://doi.org/10.1177/8755293019891718>.
89. Li, B., Gabriel, A.A., Ulrich, T., Abril, C., Halldorsson, B. (2023): Dynamic Rupture Models, Fault Interaction and Ground Motion Simulations for the Segmented Húsavík-Flatey Fault Zone, Northern Iceland. *Solid Earth*, 128(6). <https://doi.org/10.1029/2022JB025886>.
90. Liu, Y., Zhao, X., Zengping, W., Liu, J., Chen, B., Bu, C., Xu, C. (2023): Broadband ground motion simulation using a hybrid approach of the May 21, 2021 M7.4 earthquake in Maduo, Qinghai, China. *Earthquake Science*, 36(3), 175-199. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2023.04.001>.
91. Liu, P.C., Archuleta, R.J., Hartzell, S.H. (2006): Prediction of broadband ground-motion time histories: Hybrid low/high-frequency method with correlated random source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 2118–2130. <https://doi.org/10.1785/0120060036>.
92. Lokmer, I., Herak, M., Panza, G., Vaccari, F. (2002): Amplification of strong ground motion in the city of Zagreb, Croatia, estimated by computation of synthetic seismograms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 105–113.
93. Lu, Y., Ben-Zion, Y. (2022): Validation of seismic velocity models in southern California with full-waveform simulations. *Geophysical Journal International*, 229 (2), 1232–1254. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab534>.
94. Lysmer, J., Drake, L.A. (1972): A finite element method for seismology, Chapter 6. In: Alder, B., Fernbach, S., Bolt, B. (eds), *Methods in computational physics*, vol 11. Academic, New York.
95. Maday, Y., Patera, A.T. (1989): Spectral-Element Methods for the Incompressible Navier-Stokes Equations. In *State of the Art Survey in Computational Mechanics*, 71–143.
96. Maechling, P.J., Silva, F., Callaghan, S., Jordan, T.H. (2015): SCEC Broadband Platform: System Architecture and Software Implementation. *Seismological Research Letters* 86(1): 27–38. <https://doi.org/10.1785/0220140125>.

97. Mai, P.M., Beroza, G.C. (2002): A spatial random-field model to characterize complexity in earthquake slip. *Journal Geophysical Research*, 107(B11), 2308, <https://doi.org/10.1029/2001JB000588>, 2002.
98. Mai, P.M., Imperatori, W., Olsen, K.B. (2010): Hybrid broadband ground-motion simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3338–3339.
99. Markušić, S., Herak, D., Ivančić, I., Sović, I., Herak, M., Prelogović, E. (1998): Seismicity of Croatia in the period 1993-1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996. *Geofizika*, 15, 83–102.
100. Markušić, S., Ivančić, I., Sović, I. (2017): The 1667 Dubrovnik earthquake—some new insights. *Studia Geophysica et Geodaetica* 61, 587–600. <https://doi.org/10.1007/s11200-016-1065-4>.
101. Mazanec, M., Valenta, J., Málek, J. (2024): Does VS30 reflect seismic amplification? Observations from the West Bohemia Seismic Network. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06679-x>
102. Mikumo, T., Miyatake, T. (1978): Dynamical rupture process on a three-dimensional fault with non-uniform frictions and near-field seismic waves. *Geophysical Journal International*, 54(2), 417–438. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04267.x>.
103. Molinari I., Morelli A. (2011): EPcrust: A reference crustal model for the European plate. *Geophysical Journal International*, 185, 352–364. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04940.x>.
104. Molinari, I., Argnani, A., Morelli, A., Basini, P. (2015): Development and testing of a 3D seismic velocity model of the Po plain sedimentary basin, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 753–764.
105. Motazedian, D., Atkinson, G.M. (2005): Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 995–1010.
106. Movavi (2024): Movavi Video Editor, verzija 24.3.0. Dostupno na: <https://www.movavi.com/videoeditor/> (pristupljeno 20. travnja 2024).
107. MPI Forum (2009): Message Passing Interface (MPI) Forum Home Page. Dostupno na: <https://www.mpi-forum.org/> (pristupljeno 13. siječnja 2023).

108. Musson, R.M.W., Jimenez, M.J. (2008): Macroseismic estimation of earthquake parameters. NERIES project report, Module NA4, Deliverable D3 (Edinburgh), 44.
109. NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (2013): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. <https://doi.org/10.5069/G9445JDF>.
110. Neumann, F. (1954): Earthquake Intensity and Related Ground Motion. University Press, Seattle, Washington, 77.
111. Nocquet, J.M., Calais, E. (2004): Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 161(3), 661–681.
112. Novikova, E.I., Trifunac, M.D. (1995): Frequency dependent duration of strong earthquake ground motion: Updated empirical equations. Report CE 95-01, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California.
113. Olsen, K.B., Day, S.M., Bradley, C.R. (2003): Estimation of (Q) for Long-Period (>2 Sec) Waves in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2), 627–38.
114. Olsen, K.B., Mayhew, J.E. (2010): Goodness-of-fit criteria for broadband synthetic seismograms, with application to the 2008 mw 5.4 Chino Hills, California, Earthquake. *Seismological Research Letters*, 81(5), 715–723.
115. Olsen, K.B., Pechmann, J.C., Schuster, G.T. (1995): Simulation of 3D elastic wave propagation in the Salt Lake basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), 1688–1710.
116. Oral, E., Satriano, C. (2021): Future magnitude 7.5 earthquake offshore Martinique: Spotlight on the main source features controlling ground motion prediction. *Geophysical Journal International*, 227(2), 1076–1093. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab245>.
117. Pacheco, P. S. (1997): *Parallel Programming with MPI*. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Press.
118. Patera, A. T. (1984): A Spectral Element Method for Fluid Dynamics: Laminar Flow in a Channel Expansion. *Journal of Computational Physics*, 54(3), 468–88, [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(84\)90128-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(84)90128-1).

119. Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, J., Dragaš, M., Lučić, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. *Tectonophysics* 297(1), 283–293.
120. Reese, W. (2008): Nginx: the high-performance web server and reverse proxy. *Linux J.*, 2008(173).
121. Republički Hidrometeorološki Zavod (2011): WS: Seismic Network of Republika Srpska. <https://rhmzrs.com/seizmologija/seizmoloska973 mreza/> (pristupljeno 14. studenog 2023).
122. Rietmann, M., Messmer, P., Nissen-Meyer, T., Peter, D., Basini, P., Komatitsch, D., Schenk, O., Tromp, J., Boschi, L., Giardini, D. (2012): Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on emerging large-scale gpu architectures. In: *SC'12 Proceedings of the ACM/IEEE international conference on high performance computing, networking, storage and analysis*, Salt Lake City.
123. Rodgers, A.J., Pitarka, A., Pankajakshan, R., Sjögreen, B., Petersson, N.A. (2020): Regional-scale 3D ground-motion simulations of Mw 7 earthquakes on the Hayward fault, northern California resolving frequencies 0–10 Hz and including site-response corrections. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(6), 2862–2881. <https://doi.org/10.1785/0120200147>.
124. Savage, B., Komatitsch, D., Tromp, J. (2010): Effects of 3D Attenuation on Seismic Wave Amplitude and Phase Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), 1241–1251. <https://doi.org/10.1785/0120090263>.
125. Schmid, S. M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., Ustaszewski, K (2008): The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(1), 139–183.
126. Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Kounov, A., Matenco, L., Nievergelt, P., Oberhänsli, R., Pleuger, J., Schefer, S., Schuster, R., Tomljenović, B., Ustaszewski, K., van Hinsbergen, D. J. (2020): Tectonic units of the Alpine collision zone between Eastern Alps and western Turkey. *Gondwana Research*, 78, 308–374.
127. Schmitz, B., Biermanns, P., Hinsch, R., Đaković, M., Onuzi, K., Reicherter, K., Ustaszewski, K. (2020): Ongoing shortening in the Dinarides fold-and-thrust belt: A new structural model of the 1979 (Mw 7.1) Montenegro earthquake



- epicentral region. *Journal of Structural Geology*, 141, 191–8141. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104192>.
128. Sećanj, M., Tomljenović, B., Latečki, H., Herak, M., Stipčević, J. (2024): Ongoing activity of Dalmatian unit basal thrust: potential seismogenic source in the Dubrovnik epicentral area (Croatia), u pripremi.
  129. Sekiguchi, H., Yoshimi, M., Horikawa, H., Yoshida, K., Kunimatsu, S., Satake, K. (2008): Prediction of ground motion in the Osaka sedimentary basin associated with the hypothetical Nankai earthquake. *Journal of Seismology*, 12, 185–195. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9077-8>.
  130. Seriani, G. (1998): 3-D large-scale wave propagation modeling by spectral element method on Cray T3E multiprocessor. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 164(1–2), 235–247.
  131. Smith, W.D. (1975): The application of finite element analysis to body wave propagation problems. *Geophys Journal International*, 42(2), 747–768.
  132. Spearman, C. (1904): The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>.
  133. Stanko, D., Markušić, S., Ivančić, I., Gazdek, M., Gülerce, Z. (2017): Preliminary estimation of kappa parameter in Croatia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032014>.
  134. Stipčević, J., Herak, M., Molinari, I., Dasović, I., Tkalčić, H., Gosar, A. (2020): Crustal Thickness Beneath the Dinarides and Surrounding Areas From Receiver Functions. *Tectonics*, 37, 1-15, <https://doi.org/10.1029/2019TC005872>.
  135. Süss, M.P., Shaw, J.H. (2003): P wave seismic velocity structure derived from sonic logs and industry reflection data in the Los Angeles basin, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B3).
  136. Šumanovac, F. (2010): Lithosphere structure at the contact of the Adriatic microplate and the Pannonian segment based on the gravity modelling. *Tectonophysics* 485(1), 94–106.
  137. Taborda, R., Roten, D. (2015): Physics-Based Ground-Motion Simulation. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5\\_240-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_240-1).

138. Tomljenović, B., Csontos, L. (2001): Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia). *International Journal of Earth Sciences*, 90(3), 560–578.
139. Tomljenović, B., Csontos, L., Márton, E., Márton, P. (2008): Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia. U: Siegesmund, S., Fügenschuh, B., Froitzheim, N. (ur.), *Tectonic aspects of the Alpine-Dinaride-Carpathian system*. Geological Society, London, Special Publications, 298, 145–167. <http://dx.doi.org/10.1144/SP298.8>.
140. Ustaszewski, K., Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Tischler, M., Kissling, E., Spakman, W. (2008): A map-view restoration of the Alpine-Carpathian-Dinaridic system for the Early Miocene. *Swiss Journal of Geosciences*, 101, 1, 273–294.
141. Ustaszewski, K., Kounov, A., Schmid, S. M., Schaltegger, U., Krenn, E., Frank, W., Fügenschuh, B. (2010): Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: from continent-continent collision to back-arc extension. *Tectonics*, 29(6).
142. van Ede, M.C., Molinari, I., Imperatori, W., Kissling, E., Baron, J., Morelli, A. (2020): Hybrid Broadband Seismograms for Seismic Shaking Scenarios: An Application to the Po Plain Sedimentary Basin (Northern Italy). *Pure and Applied Geophysics*, 117, 2181–2198. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02322-0>.
143. van Hinsbergen, D. J., Torsvik, T. H., Schmid, S. M., Matenco, L. C., Maffione, M., Vissers, R. L., Gürer, D., Spakman, W. (2020): Orogenic architecture of the Mediterranean region and kinematic reconstruction of its tectonic evolution since the Triassic. *Gondwana Research*, 81, 79–229.
144. Van Houtte, C., Drouet, S., Cotton F. (2011): Analysis of the origins of Kappa to compute hard rock to rockadjustment factors for GMPEs, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 101(6), 2926-2941. <https://doi.org/10.1785/0120100345>.
145. Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald,

- A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., SciPy 1.0 Contributors (2020): SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272.
146. Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I., Matičec, D. (2005) Evolution of the Adriatic carbonate platform: palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220(3), 333–360.
147. Vrabec, M., Prešeren, P., Stopar, B. (2006): GPS study (1996 - 2002) of active deformation along the Periadriatic fault system in northeastern Slovenia: tectonic model. *Geologica Carpathica*, 57, 57–65.
148. Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H. (1999): Relations between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra*, 15, 3, 557–564.
149. Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčić-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B. (2010): GPS derived motion of the Adriatic microplate from Istria peninsula and Po plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 483(3), 214–222.
150. Wells, D.L., Coppersmith, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.
151. Zailac, K., Matoš, B., Vlahović, I., Stipčević, J. (2023): Reference seismic crustal model of the Dinarides. *Solid Earth*, 14, 1197–1220. <https://doi.org/10.5194/se-14-1197-2023>.
152. Zhiwei, J., Zongchao, L., Jize, S., Mengtan, G., Tiefei, L., Ting, H., Na, L., Xiangyun, G. (2023): Estimation of broadband ground motion characteristics considering source parameter uncertainty and undetermined site condition in densely populated areas of Pingwu. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1081542>.
153. Zhou, J., Unat, D., Choi, D.J., Guest, C.C., Cui, Y. (2012): Hands-on performance tuning of 3D finite difference earthquake simulation on GPU fermi chipset. *Procedia Computer Science*, 9, 976–985.
154. Zhu L, Rivera LA (2002) A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysics Journal International*, 148(3), 619–627.

155. Zhu, L. (2014): Frequency-Wavenumber (FK) synthetic seismogram package, v3.2. Dostupno na: <https://www.eas.slu.edu/People/LZhu/home.html> (pristupljeno 13. lipnja 2021).

# Dodatak A

## A.1. Bilinearna interpolacija

Bilinearna interpolacija je metoda interpolacije koja se koristi za procjenu vrijednosti 2D funkcije na temelju poznatih vrijednosti četiri najbliže susjedne točke. Neka su koordinate nepoznate vrijednosti dane s  $(x, y)$ , a četiri susjedne točke s  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_1, y_2)$ ,  $(x_2, y_1)$  i  $(x_2, y_2)$ . Nadalje, vrijedi  $x_1 \leq x \leq x_2$  i  $y_1 \leq y \leq y_2$ , odnosno točka  $(x, y)$  se nalazi unutar pravokutnog područja definiranog četirima točkama. Da bi se odredila nepoznata vrijednost  $f(x, y)$  2D funkcije, u bilinearnoj interpolaciji provode se dvije jednostavne interpolacije, prvo po x-osi, pa potom po y-osi. U oba slučaja pretpostavlja se da se vrijednost 2D funkcije linearno mijenja u odnosu na susjedne točke.

Linearna interpolacija po x-osi glasi:

$$f_1(x, y) = f(x_1, y) + (x - x_1) \cdot \frac{f(x_2, y) - f(x_1, y)}{x_2 - x_1}, \quad (\text{A.1})$$

$$f_2(x, y) = f(x_1, y_2) + (x - x_1) \cdot \frac{f(x_2, y_2) - f(x_1, y_2)}{x_2 - x_1}, \quad (\text{A.2})$$

gdje je  $f_1(x, y)$  interpolirana vrijednost funkcije na lijevom, a  $f_2(x, y)$  vrijednost na desnom rubu pravokutnog područja. Linearna interpolacija po y-osi glasi:

$$f(x, y) = f_1(x, y) + (y - y_1) \cdot \frac{f_2(x, y) - f_1(x, y)}{y_2 - y_1}. \quad (\text{A.3})$$

Dobivena vrijednost  $f(x, y)$  konačna je tražena nepoznata vrijednost razmatrane 2D funkcije.

U QGIS-u (2023), bilinearna interpolacija jedna je od metoda koja se koristi u obradi rastera kada postoji potreba za interpolacijom vrijednosti između diskretnih točaka, odnosno rekonstrukcijom vrijednosti piksela na nekoj lokaciji unutar rastera. U ovome radu, bilinearna interpolacija korištena je prilikom preuzorkovanja diskretnih skupova 2D podataka određene rezolucije na gušću mrežu točaka. Drugim riječima, korištena je da bi se povećala rezolucija polaznog 2D skupa podataka.

## A.2. Podatci o potresima i postajama

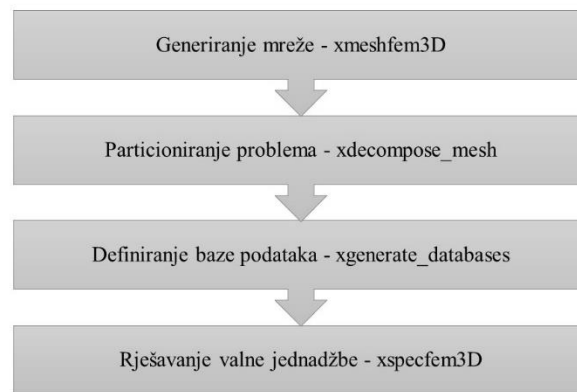
**Tablica A.1.** Popis potresa i postaja koje su ga uspješno zabilježile. U zagradi su frekvencije uzorkovanja  $f_{dt}$  kojima su postaje zabilježile potres.

Oznaka potresa	Seizmološka postaja i $f_{dt}$ (Hz)
E01	DBR (20 Hz), STON (50 Hz)
E02	DBR (100 Hz), STA (25 Hz), STON (50 Hz)
E03	STA (50 Hz), STON (50 Hz)
E04	DBRK (50 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz)
E05	DBRK (50 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz)
E06	DBRK (50 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz)
E07	DBRK (50 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz)
E08	DBRK (50 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz)
E09	DBRK (50 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz), TREB (100 Hz)
E10	DBRK (50 Hz), DF02 (100 Hz), DF04 (100 Hz), DF05 (100 Hz), STA (50 Hz), STON (50 Hz), TREB (100 Hz)

# Dodatak B

## B.1. Metodologija simuliranja niskofrekventnog doprinosa gibanja tla pomoću softvera *SPECFEM3D Cartesian*

Shematski prikaz metodologije simuliranja gibanja tla pomoću softvera *SPECFEM3D Cartesian*, verzija 4.0.0 (Komatitsch i sur., 2010, 2016; Patera, 1984) prikazan je na slici B.1. Detaljan opis svakog koraka dostupan je u priručniku softvera te na internetskoj stranici <https://specfem3d.readthedocs.io/en/latest/> (pristupljeno 29. studenoga 2023).



**Slika B.1.** Metodologija simuliranja gibanja tla pomoću softvera *SPECFEM3D Cartesian*.

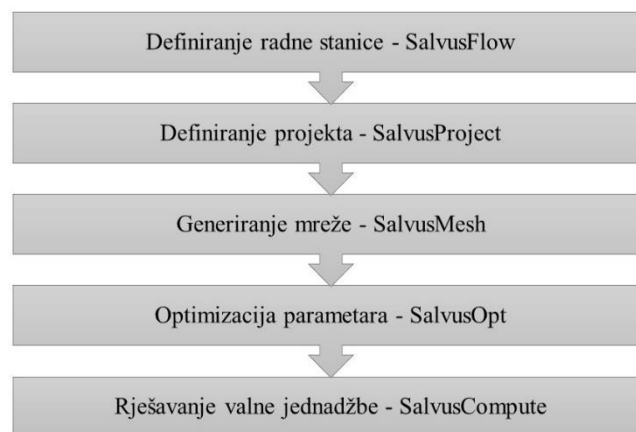
Simulacije se provode kroz četiri glavna koraka: generiranje mreže (modul *xmeshfem3D*), partitioniranje problema (modul *xdecompose\_mesh*), definiranje baze podataka (modul *xgenerate\_databases*) i rješavanje valne jednačbe (modul *xspecfem3D*).

U modulu *xmeshfem3D* za zadanu radnu domenu i 3D model generira se mreža na kojoj se provodi metoda SEM. Ulazni parametri su 3D model i broj elemenata koji će činiti mrežu. Broj elemenata koji definiraju mrežu ovisi o fizikalnim svojstvima 3D modela i rezoluciji (minimalnom periodu razlučivosti) za koju se nastoje simulirati seizmogrami – u pravilu, što je više elemenata, to im je manja dimenzija i sukladno tome manji je i period razlučivosti simulacija. Pomoću modula *xdecompose\_mesh* mreža se dijeli na niz manjih particija, ovisno o broju procesora na kojima će se računati simulacije. Potom slijedi modul *xgenerate\_databases* u kojem se definiraju glavna svojstva i ulazni parametri simulacija – seizmički izvori i prijemnici, apsorpcijski uvjeti, atenuacijska svojstva i sl. Posljednji modul *xspecfem3D* izvodi metodu SEM za zadane postavke simulacije. Izlazne datoteke su zapisi pomaka, brzina i/ili akceleracija gibanja tla te 2D i/ili 3D vizualizacija dobivenih rješenja.

U ovome istraživanju softver *SPECFEM3D Cartesian* u potpunosti je pokretan na superračunalu *Supek* na Sveučilišnom računskom centru Sveučilišta u Zagrebu na 624 procesorskih jezgri po simulaciji. Simulacije su provedene na mreži s 51118080 elemenata. U prosjeku je za jednu simulaciju bilo potrebno oko 2088 GB radne memorije. Prosječno vrijeme izvođenja iznosilo je 1 dan 16 sati i 7 minuta, što odgovara procesorskom vremenu od 25033 sati.

## B.2. Metodologija simuliranja niskofrekventnog doprinosa gibanja tla pomoću softvera *Salvus*

Shematski prikaz metodologije simuliranja gibanja tla pomoću softvera *Salvus*, verzija 0.12.15 (Afanasiev i sur., 2019) prikazan je na slici B.2. Detaljan opis svakog koraka dostupan je na internetskoj stranici [https://mondaic.com/docs/0.12.15/getting\\_started](https://mondaic.com/docs/0.12.15/getting_started) (pristupljeno 29. studenoga 2023).



**Slika B.2.** Metodologija simuliranja gibanja tla pomoću softvera *Salvus*.

Simulacije se provode kroz pet glavnih koraka: definiranje radne stanice (modul *SalvusFlow*), definiranje projekta (modul *SalvusProject*), generiranje mreže (modul *SalvusMesh*), optimizacija problema (modul *SalvusOpt*) i rješavanje valne jednačbe (modul *SalvusCompute*).

Pomoću modula *SalvusFlow* definira se jedna ili više radnih stanica na kojima će se provoditi simulacije. U pravilu se svi koraci osim *SalvusCompute* provode na lokalnom računalu jer nisu numerički zahtjevni (*SalvusCompute* se obično postavlja na superračunalu/klaster). Potom slijedi definiranje glavnih svojstava i ulaznih parametara simulacije pomoću modula *SalvusProject*. Definira se radna domena, 3D model, seizmički izvori i prijemnici, apsorpcijski uvjeti, atenuacijska svojstva, te željena vremensko-frekventna razlučivost simulacija. Pomoću modula *SalvusMesh* za zadanu radnu domenu i 3D model generira se mreža na kojoj će se provoditi metoda SEM. Broj elemenata koji definiraju mrežu automatski se utvrđuje na temelju tražene vremensko-frekventne rezolucije simulacija. Pomoću modula *SalvusOpt* mreža se dijeli na niz manjih particija i



optimizira ovisno o broju procesora i svojstvima radne stanice na kojima će se računati simulacije. Posljednji modul *SalvusCompute* izvodi metodu SEM za zadane postavke simulacije. Izlazne datoteke su zapisi pomaka, brzina i/ili akceleracija gibanja tla te 2D i/ili 3D vizualizacija dobivenih rješenja.

U ovome istraživanju svi moduli softvera *Salvus* osim *SalvusCompute* pokretani su na osobnom računalu. Modul *SalvusCompute* pokretan je na superračunalu *Supek* na Sveučilišnom računskom centru Sveučilišta u Zagrebu na 512 procesorskih jezgri po simulaciji. Simulacije su provedene na mreži s 39540050 elemenata. U prosjeku je za jednu simulaciju bilo potrebno oko 2696 GB radne memorije. Prosječno vrijeme izvođenja iznosilo je 1 dan 13 sati i 35 minuta, što odgovara procesorskom vremenu od 19543 sati.

### B.3. Ulazni parametri za program *Fk3.2*

Program *Fk3.2* (Zhu, 2014) korišten je za računanje Greenovih funkcija koje su jedan od ulaznih parametara metode GP. Program je napisan u jezicima *C*, *PERL* i *Fortran 2008*. Pokretanje programa zahtjeva definiranje triju ulaznih datoteka: 1D modela, matrice udaljenosti i matrice vremena nailazaka P- i S-valova za lokacije od interesa. Za 1D model korišten je model *DF\_1D* dobiven usrednjavanjem iz modela građe kore za šire dubrovačko područje *DF\_3D* opisanog u poglavlju 4.1.2. Matrica udaljenosti definirana je tako da prekriva istu domenu kao i sam 3D model, dakle područje površine od 76.25 km × 67.25 km i vertikalnog raspona od 1750 m nadmorske visine do 70 km dubine. Matrica vremena nailazaka P- i S-valova dobivena je pomoću rutine *ray\_stimes.c* koja je implementirana u platformi *SCEC*. Navedena rutina računa vremena nailazaka za zadanu matricu udaljenosti i 1D model na temelju teorijskih hodokrona. Izračunate Greenove funkcije dostupne su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:06525> (pristupljeno 30. siječnja 2024).

### B.4. Računanje vremena trajanja snažne trešnje

Vrijeme trajanja snažne trešnje  $t_{Dur}$  računato je po uzoru na metodu od Novikova i Trifunac (1995). Osnovna pretpostavka je da je vrijeme trajanja trešnje veličina koja ovisi o frekvenciji. Zapisi brzina filtriraju se korištenjem tzv. Ormsby filtera  $A(t)$ :

$$A(t) = \frac{\pi f_1^2}{f_{12}} \text{sinc}^2(f_1 t) - \frac{\pi f_2^2}{f_{12}} \text{sinc}^2(f_2 t) - \frac{\pi f_3^2}{f_{34}} \text{sinc}^2(f_3 t) + \frac{\pi f_4^2}{f_{34}} \text{sinc}^2(f_4 t), \quad (B. 1)$$

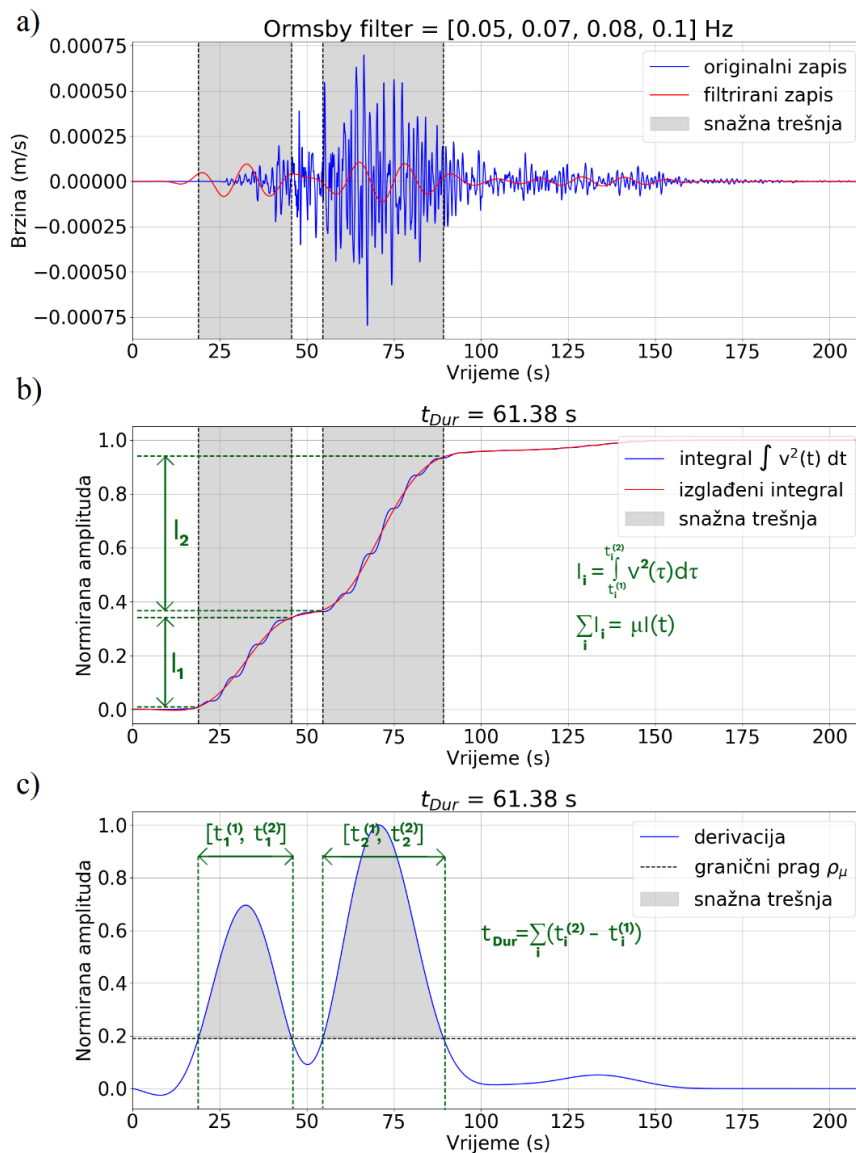
za devet frekventnih raspona čije su centralne frekvencije ( $f_0$ ) dane u tablici B.1. Granične frekvencije ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  i  $f_4$ ) Ormsby filtera također su popisane u tablici B.1. U slučaju niskofrekventnih doprinosa gibanja tla, korišteni su filteri 1–4.

**Tablica B.1.** Frekventna svojstva filtera korištenih u metodi:  $f_0$  – centralne frekvencije frekventnih raspona od interesa;  $f_1, f_2, f_3$  i  $f_4$  – granične frekvencije Ormsby filtera;  $f_{smooth}$  – granična frekvencija za izgladivanje.

Oznaka frekventnog raspona	$f_0$ (Hz)	$f_1 - f_2 ; f_3 - f_4$ (Hz)	$f_{smooth}$ (Hz)
1	0.120	0.08-0.10 ; 0.15-0.17	0.06
2	0.210	0.15-0.17 ; 0.27-0.30	0.11
3	0.370	0.27-0.30 , 0.45-0.50	0.14
4	0.630	0.45-0.50 ; 0.80-0.90	0.17
5	1.100	0.80-0.90 ; 1.30-1.50	0.20
6	1.700	1.30-1.50 ; 1.90-2.20	0.23
7	2.500	1.90-2.20 ; 2.80-3.50	0.26
8	4.200	2.80-3.50 ; 5.00-6.00	0.28
9	7.200	5.00-6.00 ; 8.50-10.00	0.30

Pomoću filtriranih zapisa računaju se integrali  $I(t) = \int_0^t v^2(\tau) d\tau$  koji su zapravo proporcionalni ukupnoj energiji seizmičkih valova. Integrali se potom izgladuju primjenom niskopropusnog Butterworthovog filtera četvrtog reda i granične frekvencije izgladivanja  $f_{smooth}$  (vrijednosti su popisane u tablici B.1). Vrijeme trajanja snažne trešnje računa se iz vremenskih intervala za koje nagib jednog izgladenog integrala (tj. derivacija) premašuje zadani granični prag:  $d[I_{smooth}(t)]/dt \geq \rho_\mu$ . Granični prag određuje se iterativno i to tako da suma integrala po vremenskim intervalima snažne trešnje odgovara nekom postotku (obično  $\mu = 0.9$ ) vrijednosti čitavog integrala  $I(t)$ :  $\sum_i I_i(t_i^{(1)}, t_i^{(2)}) = \mu \cdot I(t)$ . Primjer postupka računanja vremena trajanja snažne trešnje za jedan frekventni raspon dan je na slici B.3.

Konačna vrijednost  $GOF$  za parametar  $t_{Dur}$  određena je kao medijan devet vrijednosti  $GOF$  vremena  $t_{Dur}$  izračunatih za devet razmatranih frekventnih raspona.



**Slika B.3.** Koraci prilikom računanja vremena trajanja snažne trešnje: a) filtriranje originalnog zapisa (zabilježenog ili simuliranog) pomoću Ormsby filtera; b) računanje i izgladivanje integrala kvadrata vrijednosti brzina filtriranog zapisa; c) računanje derivacija izgladenog integrala i vremenskih intervala čija suma u konačnici odgovara vremenu trajanja snažne trešnje.

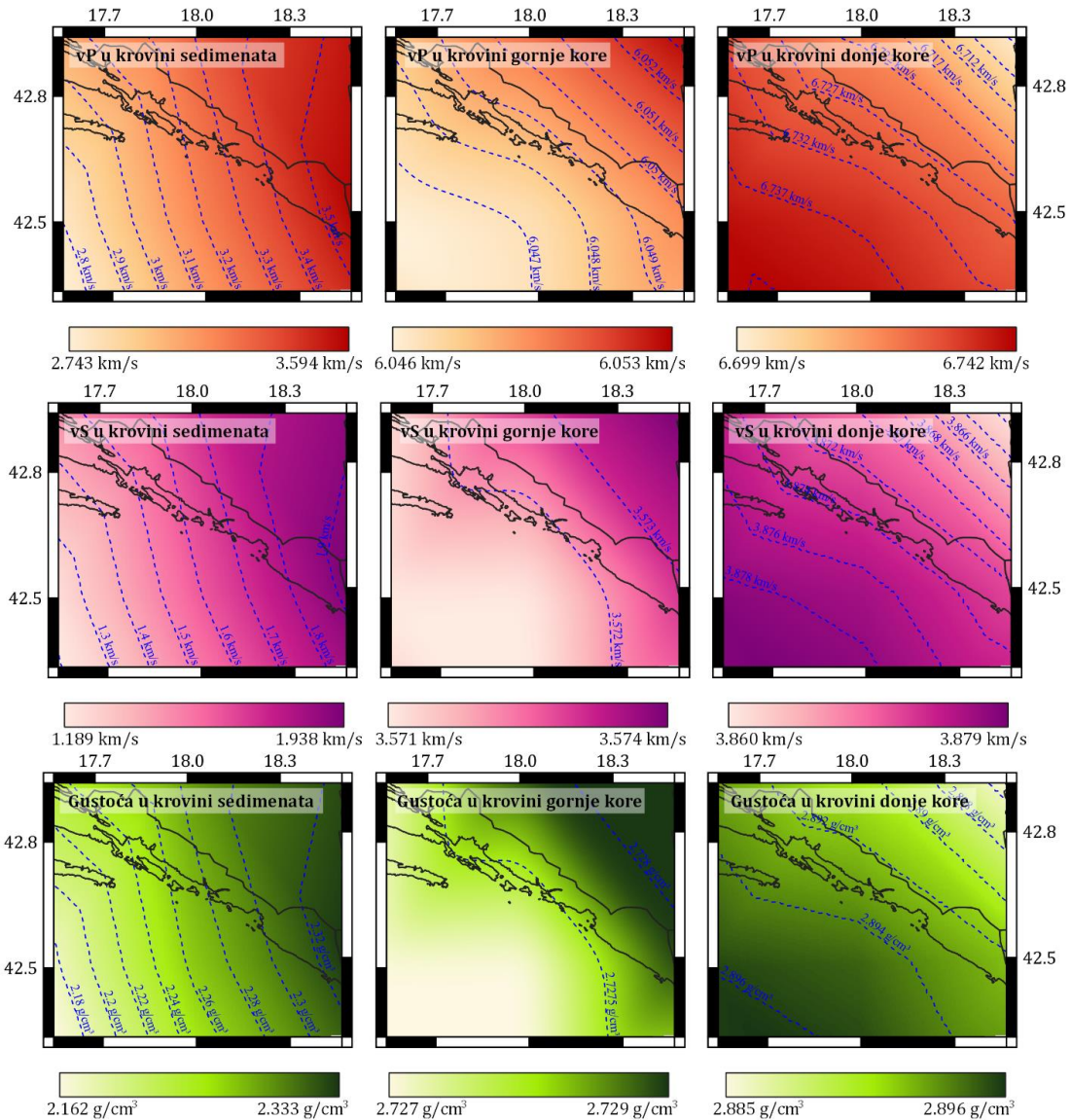
# Dodatak C

## C.1. Model *Ston\_H08*

**Tablica C.1.** Vrijednosti brzina P- ( $v_P$ ), S-valova ( $v_S$ ) i gustoća ( $\rho$ ) za pojedine dubine u modelu *Ston\_H08* (1D modelu građe kore južnog dijela Jadrana).

Dubina (km)	$v_P$ (km/s)	$v_S$ (km/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0.0	3.45	1.97	2309
0.5	4.92	2.76	2552
1.0	5.66	3.15	2647
3.0	5.76	3.20	2667
8.0	5.79	3.25	2673
13.0	5.81	3.30	2677
19.0	5.86	3.35	2687
30.0	5.91	3.40	2697
30.0	6.30	3.64	2784
35.0	6.70	3.85	2884
46.0	7.00	4.00	2968
46.0	7.74	4.37	3200
65.0	8.00	4.60	3291

## C.2. Model *EPcrust*



**Slika C.1.** Brzine P- ( $v_P$ ) i S-valova ( $v_S$ ) te gustoće ( $\rho$ ) u krovinama glavnih strukturnih jedinica modela *EPcrust*.

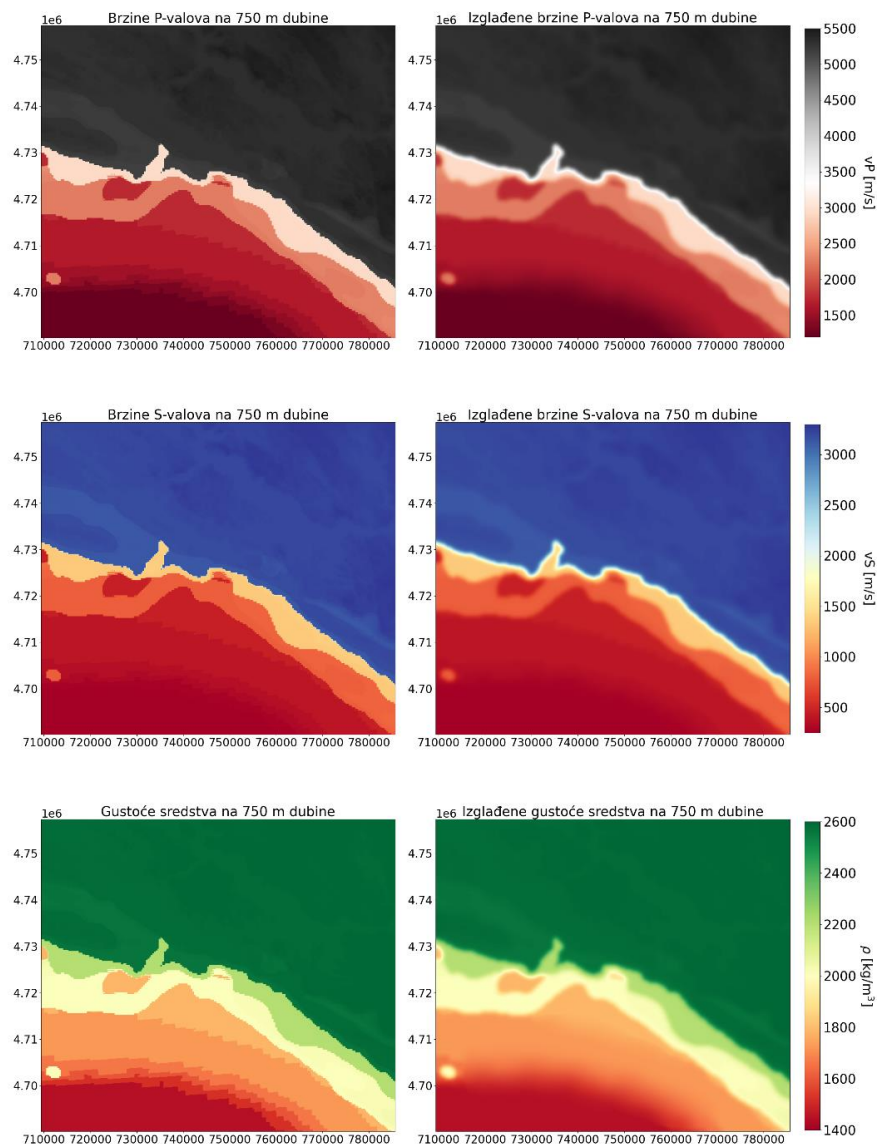
## C.3. Izgladivanje pomoću Gaussovog filtera

Gaussov filter je filter čiji se impulzivni odziv može predočiti Gaussovom krivuljom. Koristi se u svrhu izgladivanja podataka na način da se svaki podatak konvoluirá s Gaussovom krivuljom prilikom čega težina preostalih podataka opada od središta filtra. Matematički, izlazna vrijednost  $I'(x, y)$  ulazne funkcije  $I(x, y)$  nakon primjene Gaussovog filtera dana je kao:

$$I'(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k I(x+i, y+j) \cdot e^{-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}}. \quad (C.1)$$

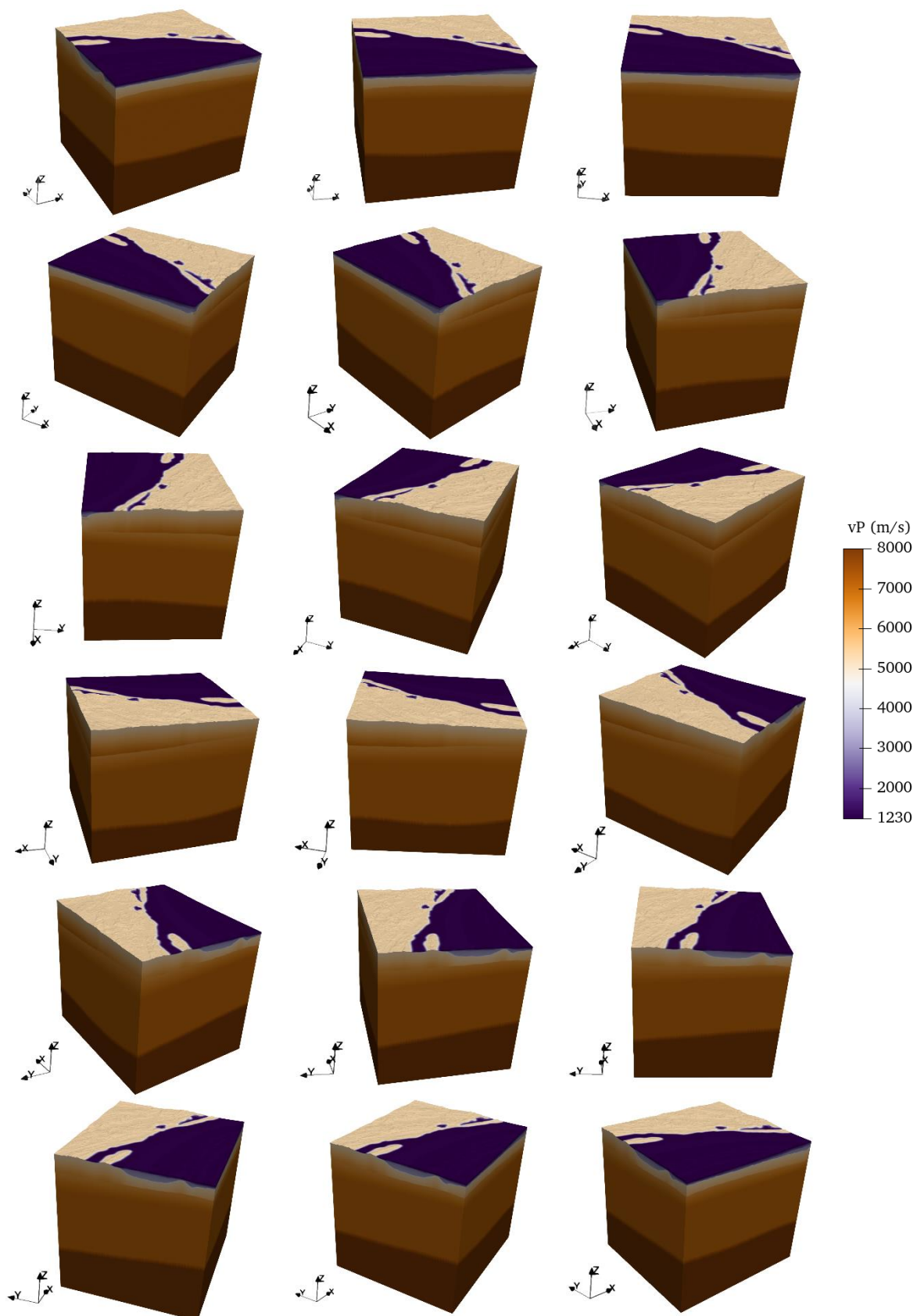
U izrazu C.1,  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju koja kontrolira širinu Gaussove krivulje, a  $k$  radijus filtra, odnosno maksimalnu udaljenost od središta filtra. Veća vrijednost standardne devijacije dovodi do jačeg izgladivanja, dok se s većom vrijednošću  $k$  uključuje više podataka koji se koriste prilikom izgladivanja.

U *QGIS-u* (2023), Gaussov filter primjenjuje se na piksele u rasteru da bi se dobio izgladeni raster. Konkretno, filtriranjem se uklanjaju visoke frekvencije što rezultira smanjenjem šuma, oštih prijelaza i detalja u rasteru čija je vrijednost manja od standardne devijacije. U ovome radu, izgladivanje je primijenjeno na 2D horizontalnim presjecima brzina P- i S-valova te gustoća 3D modela da bi se izgladili oštri prijelazi u vrijednostima koji u simulacijama mogu rezultirati nerealističnim i nepoželjnim refleksijama. Primjer izgladivanja za jedan presjek modela dan je na slici C.2. Izgladivanje je napravljeno s parametrima  $k = 2.5$  km i  $\sigma = 3$ .

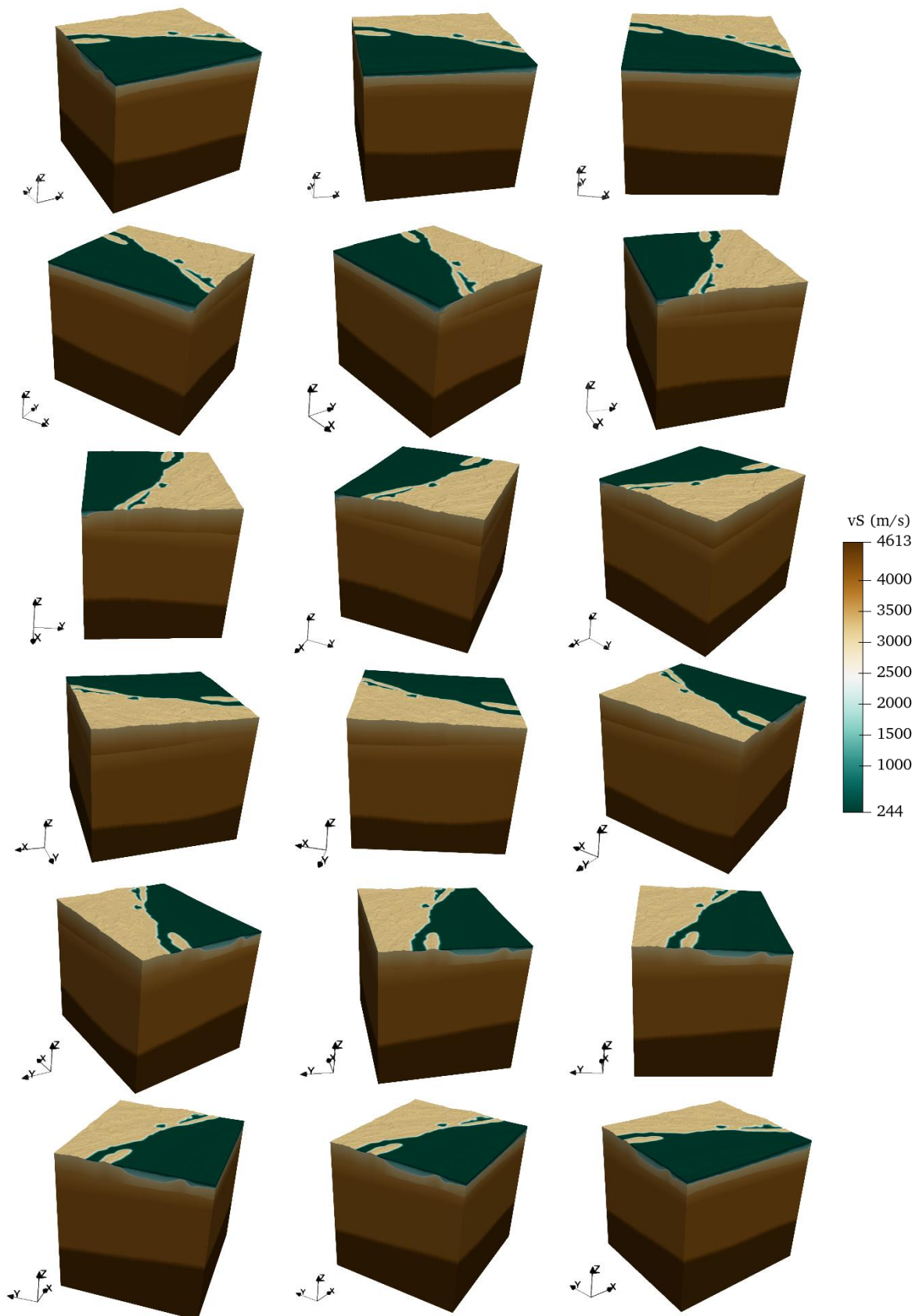


**Slika C.2.** Primjer izgladivanja jednog 2D presjeka 3D modela građe kore za šire dubrovačko područje. Originalni (lijevo) skup podataka izgladen je primjenom Gaussovog filtra (desno) s parametrima  $k = 2.5$  km i  $\sigma = 3$ .

#### C.4. Modeli *DF\_3D* i *DF\_1D*

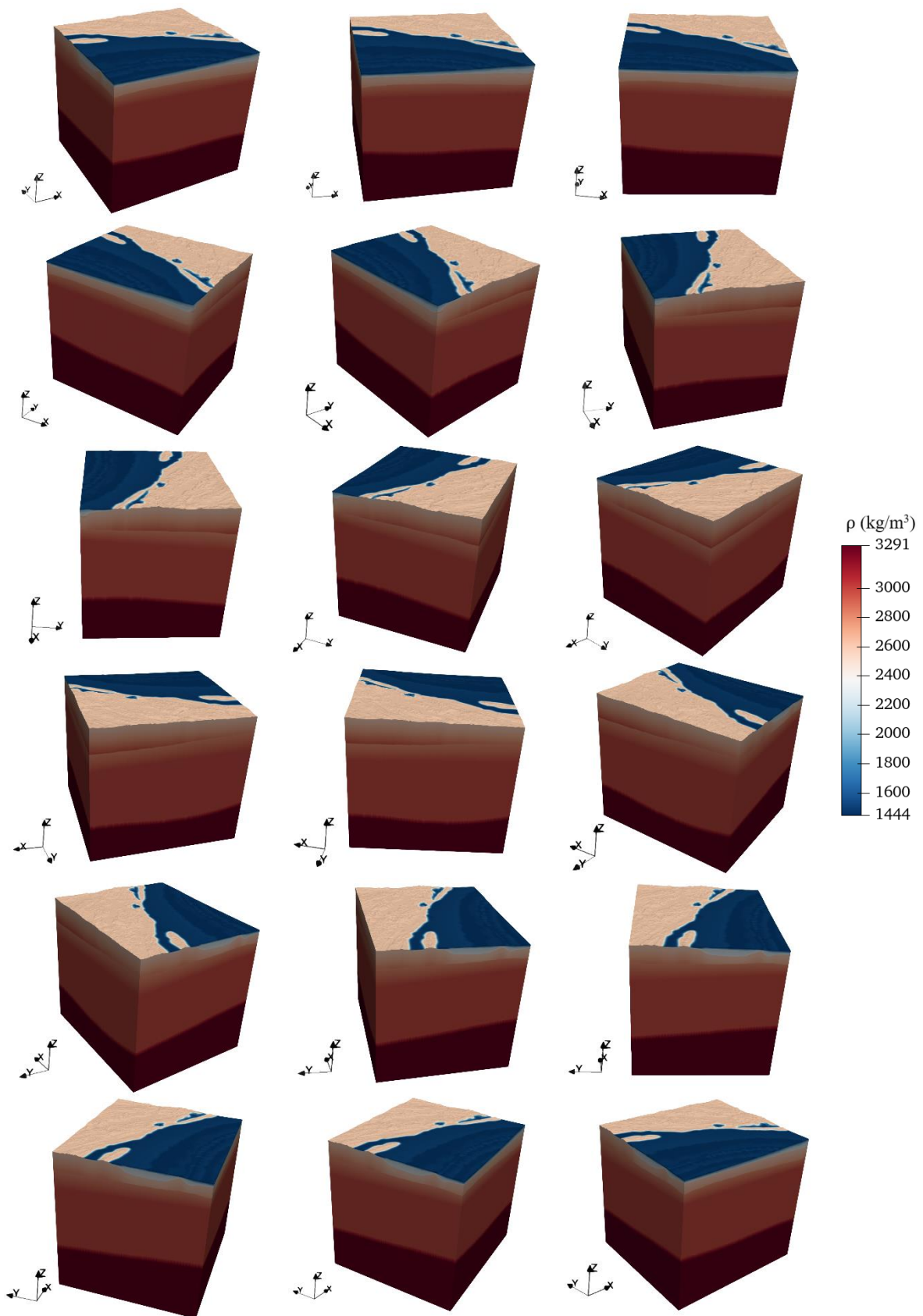


**Slika C.3.** 3D prikaz modela građe kore šireg dubrovačkog područja *DF\_3D*. Bojom su naznačene brzine P-valova ( $v_P$ ).



**Slika C.4.** 3D prikaz modela građe kore šireg dubrovačkog područja *DF\_3D*. Bojom su naznačene brzine S-valova ( $v_S$ ).

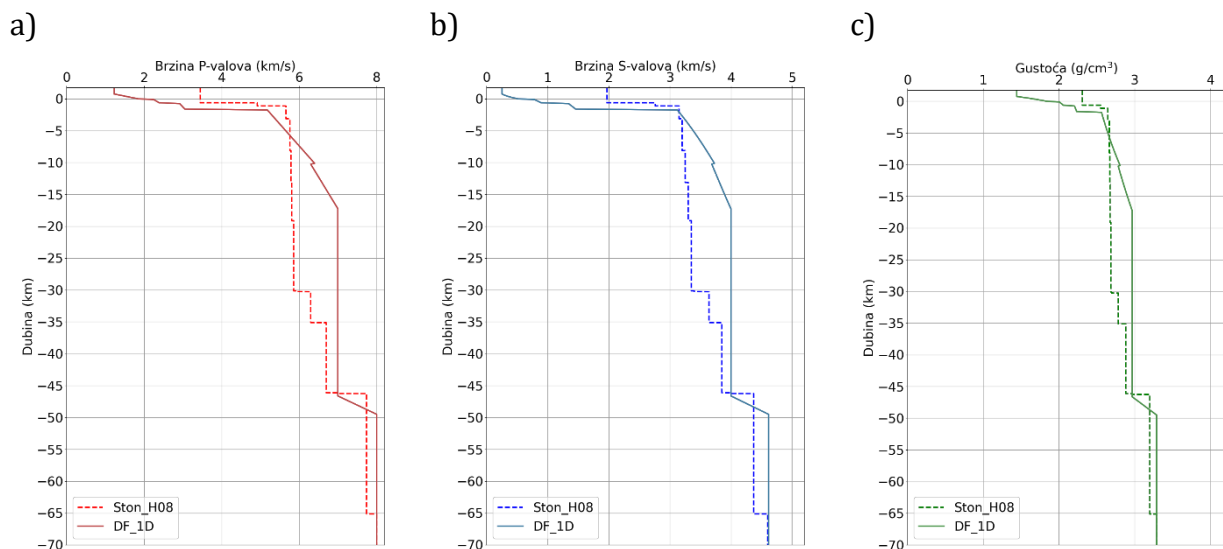




**Slika C.5.** 3D prikaz modela građe kore šireg dubrovačkog područja *DF\_3D*. Bojom su naznačene gustoće sredstva ( $\rho$ ).

**Tablica C.2.** Rasponi vrijednosti brzina P- ( $v_P$ ) i S-valova ( $v_S$ ) te gustoća ( $\rho$ ) koje su definirane u 1D modelu građe kore za šire dubrovačko područje. Pripadna debljina za koju se odnosi raspon vrijednosti označena je s  $\Delta h$ .

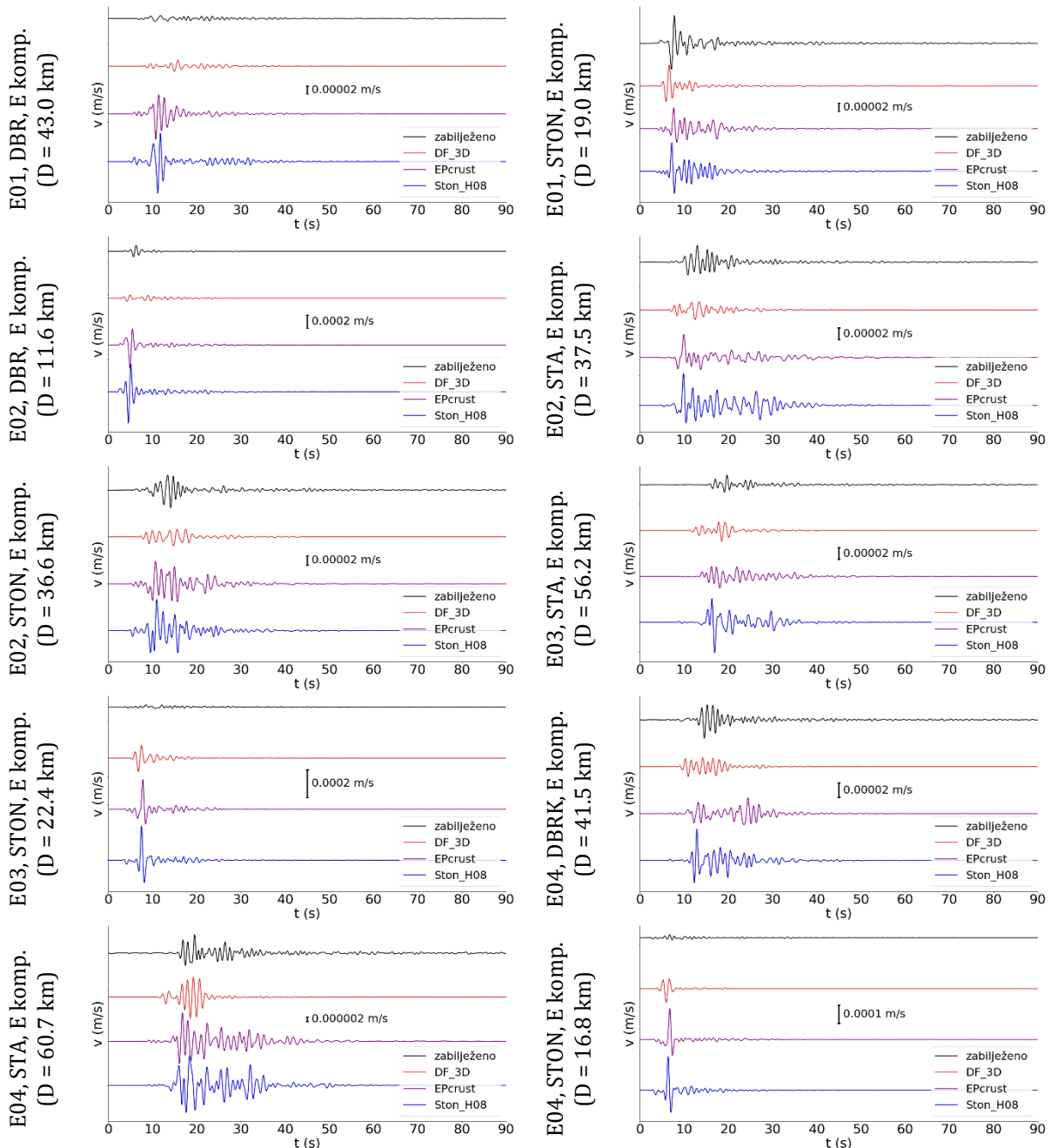
$\Delta h$ (km)	$v_P$ (km/s)	$v_S$ (km/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0.750	1.230 – 1.850	0.244 – 0.514	1444 – 1834
0.625	2.250 – 2.390	0.786 – 0.895	2008 – 2058
1.000	2.920 – 3.053	1.342 – 1.459	2206 – 2235
8.625	5.180 – 6.399	3.121 – 3.729	2563 – 2808
7.000	6.300 – 7.000	3.645 – 3.998	2784 – 2968
29.250	7.000	3.998	2982
3.000	7.000 – 8.000	3.998 – 4.613	2982 – 3291
20.500	8.000	4.613	3291



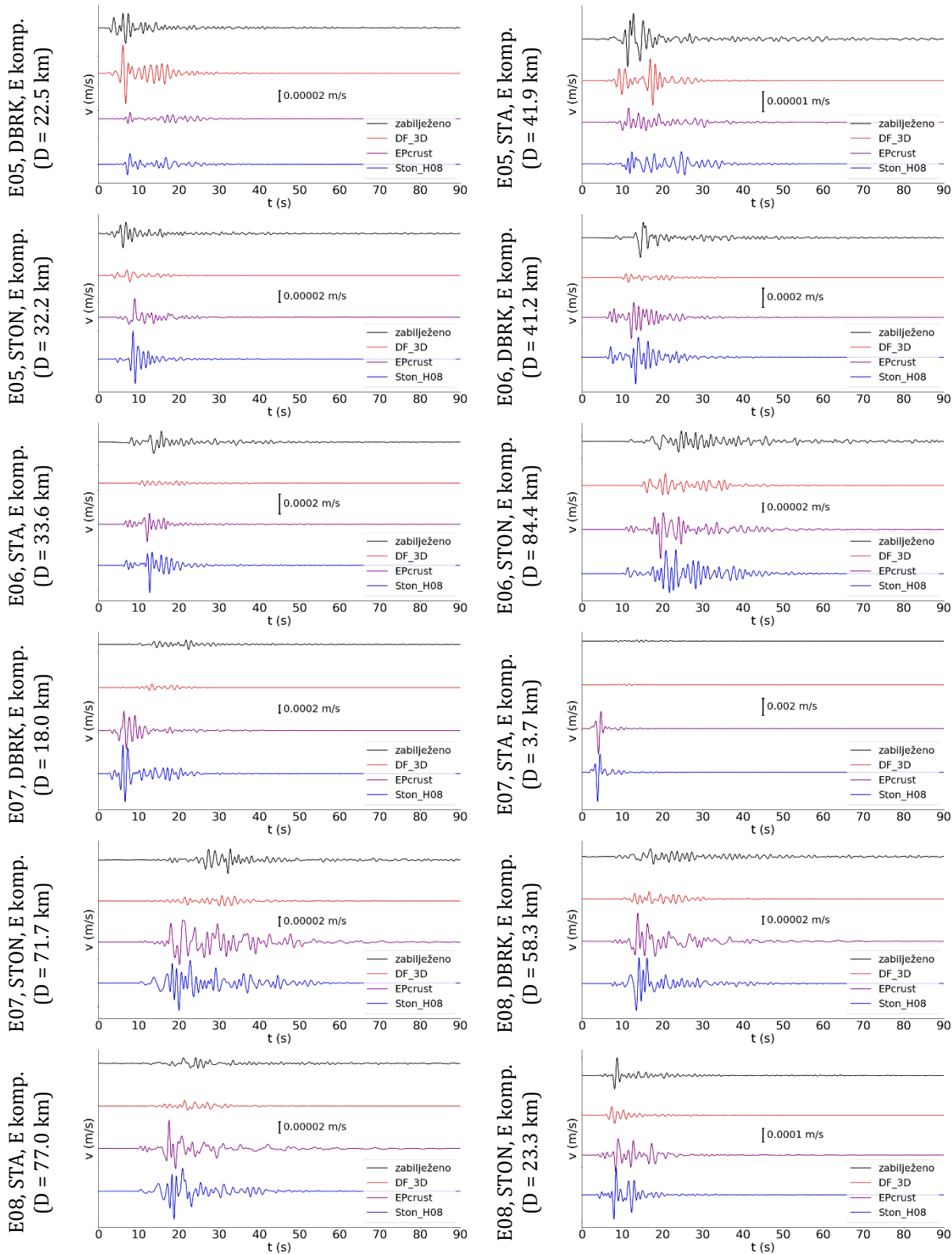
**Slika C.6.** Usporedba a) brzina P-valova; b) brzina S-valova; c) gustoća; lokalnog 1D modela *Ston\_H08* i modela *DF\_1D* građe kore za šire dubrovačko područje.

# Dodatak D

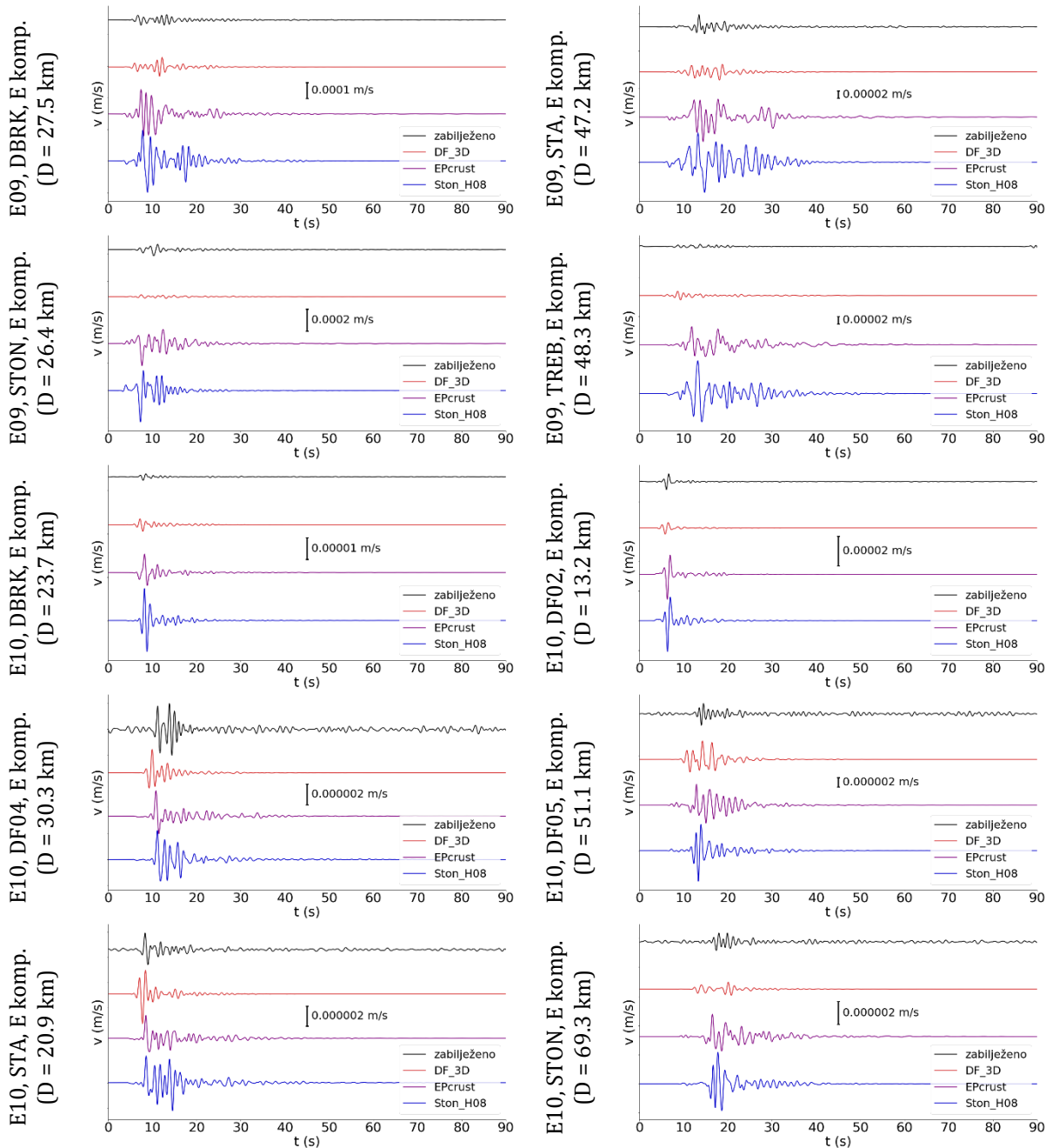
## D.1. Simulacije niskofrekventnih doprinosa s obzirom na model građe kore



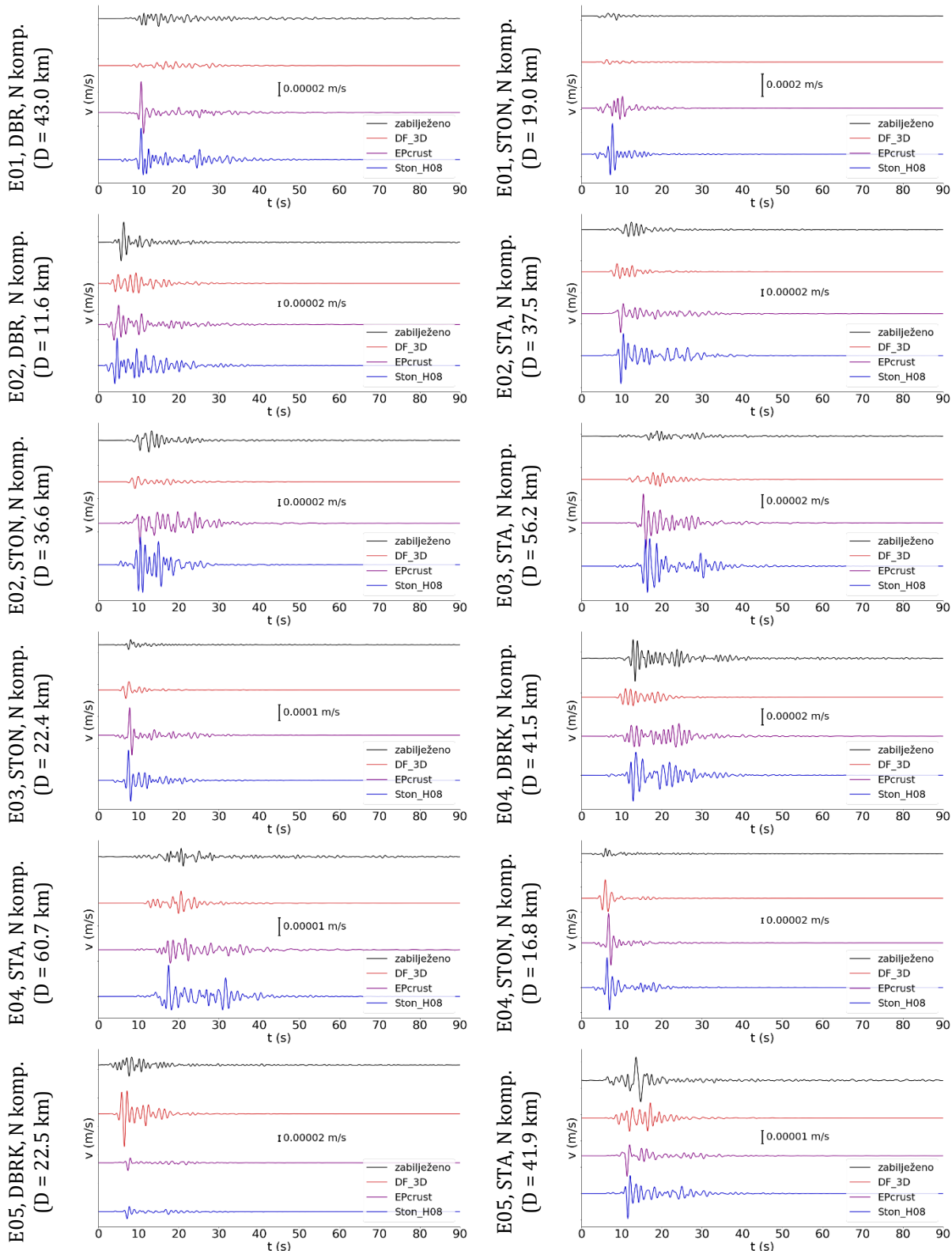
**Slika D.1.** Istočne komponente (E komp.) niskofrekventnih ( $f \leq 1$  Hz) zapisa zabilježene (crno) i simulirane (crveno – model  $DF_{3D}$ , ljubičasto – model  $EPcrust$  i plavo – model  $Ston_{H08}$ ) brzine gibanja tla po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 1 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost promatrane postaje od potresa.



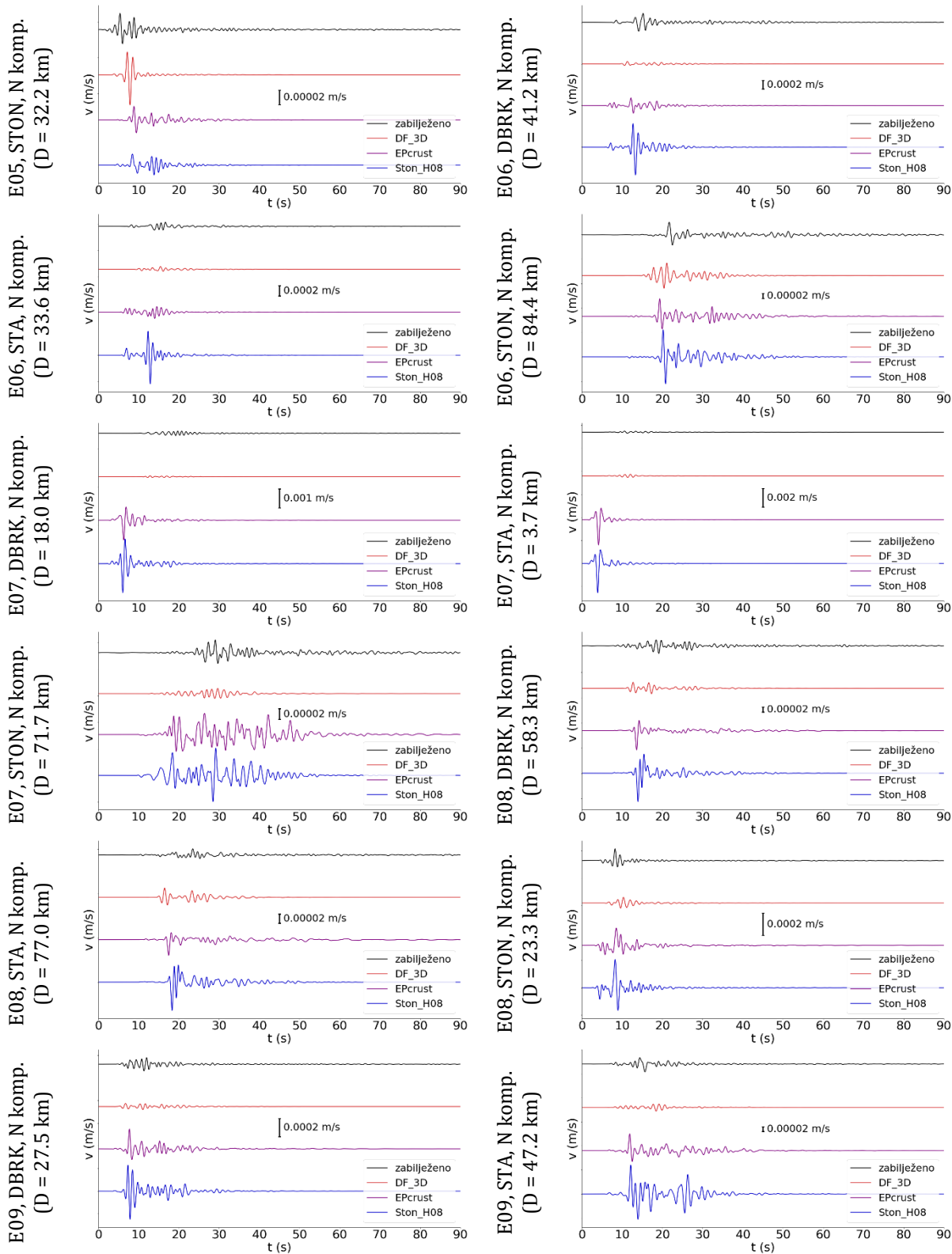
Slika D.1. Nastavlja se.



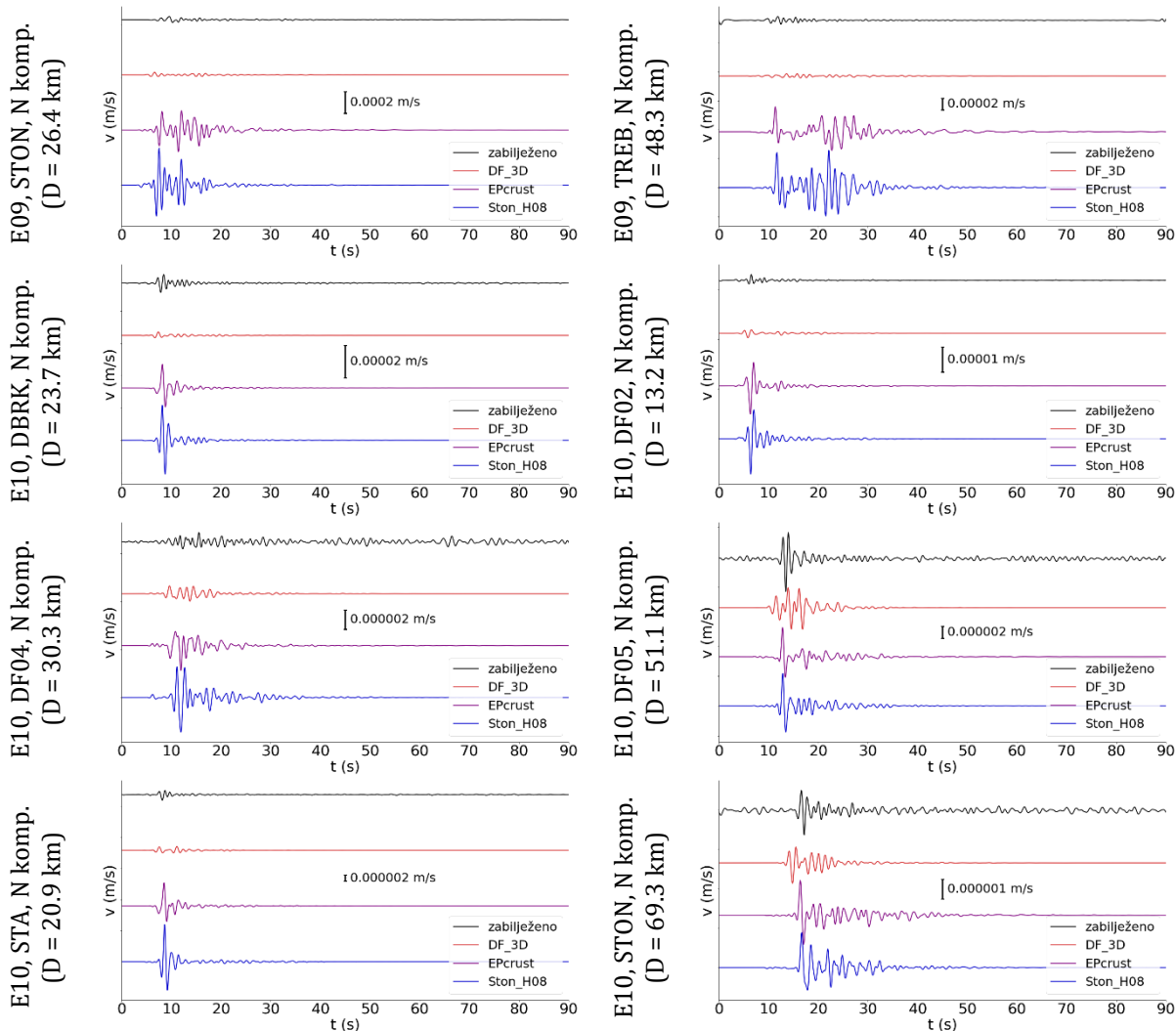
Slika D.1. Nastavlja se.



**Slika D.2.** Sjeverne komponente (N komp.) niskofrekventnih ( $f \leq 1$  Hz) zapisa zabilježene (crno) i simulirane (crveno – model *DF\_3D*, ljubičasto – model *EPcrust* i plavo – model *Ston\_H08*) brzine gibanja tla po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 1 Hz. Vrijednost *D* odnosi se na epicentralnu udaljenost promatrane postaje od potresa.

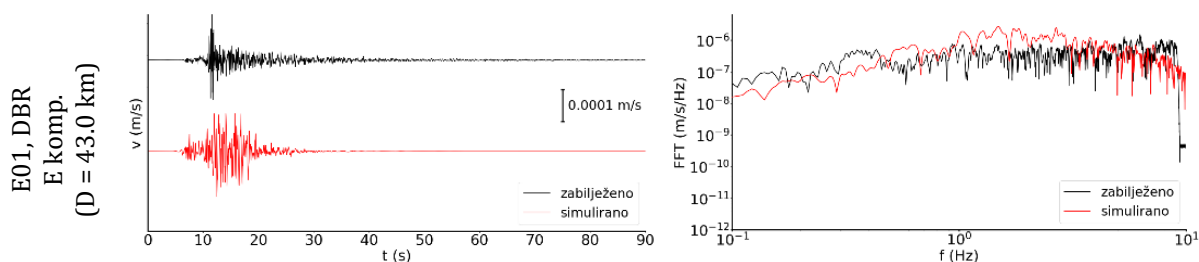


Slika D.2. Nastavlja se.



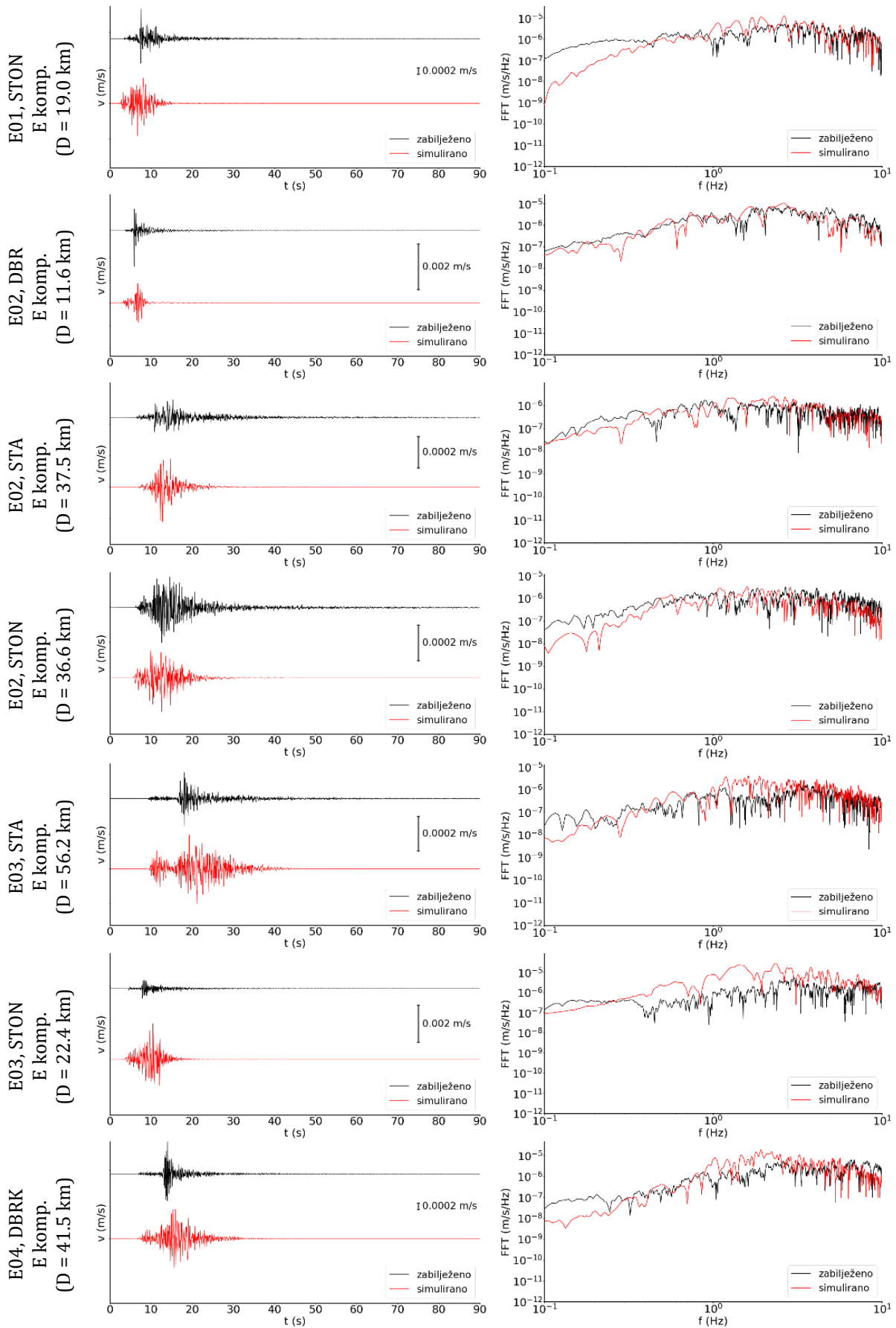
Slika D.2. Nastavlja se.

## D.2. Simulacije širokopojsnih zapisa gibanja tla

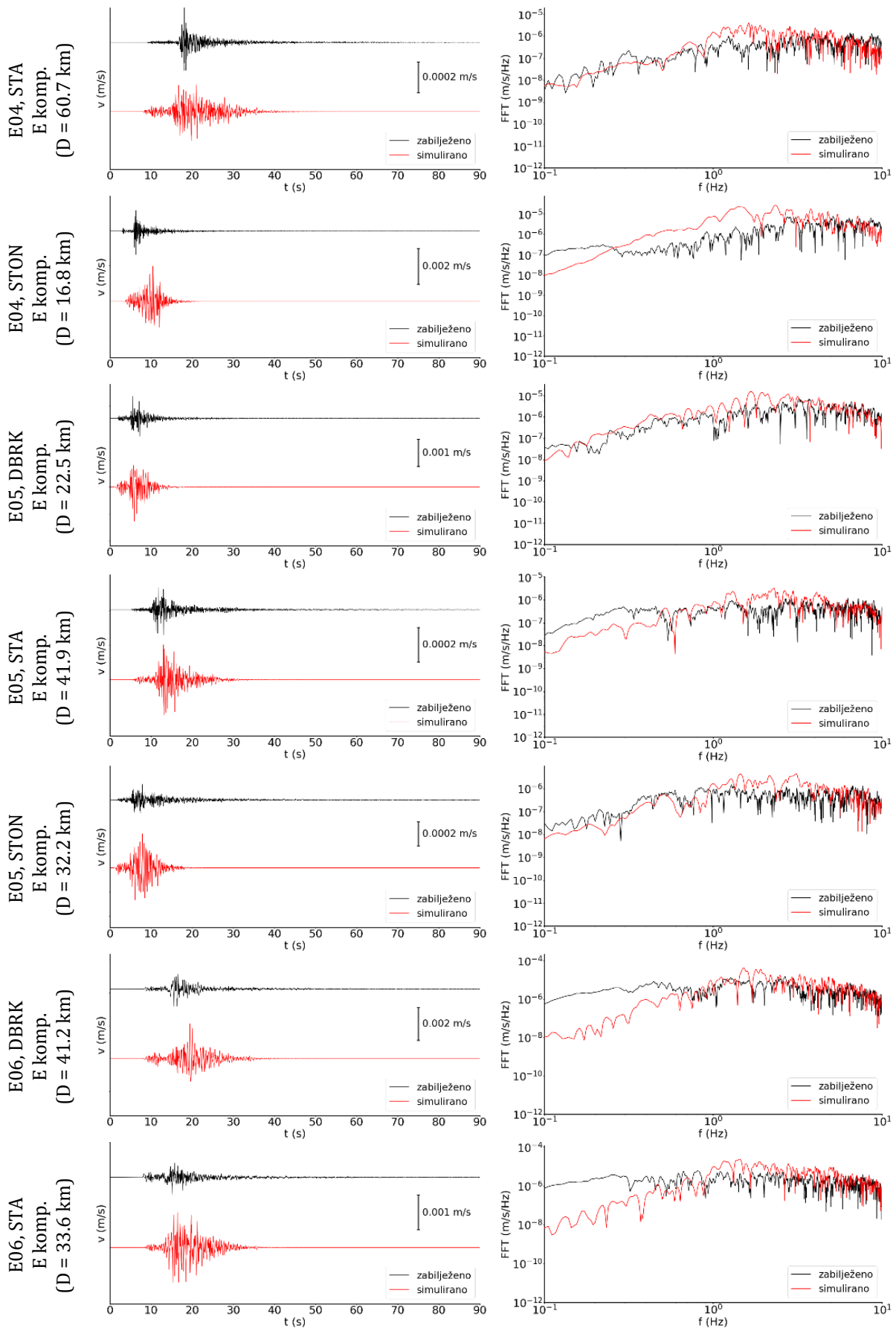


Slika D.3. Zapisi brzine gibanja tla (lijevo) te pripadni Fourierovi spektri (desno) istočne komponente (E komp.) zabilježenog (crno) i simuliranog (crveno) podatka po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 10 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost promatrane postaje od potresa.

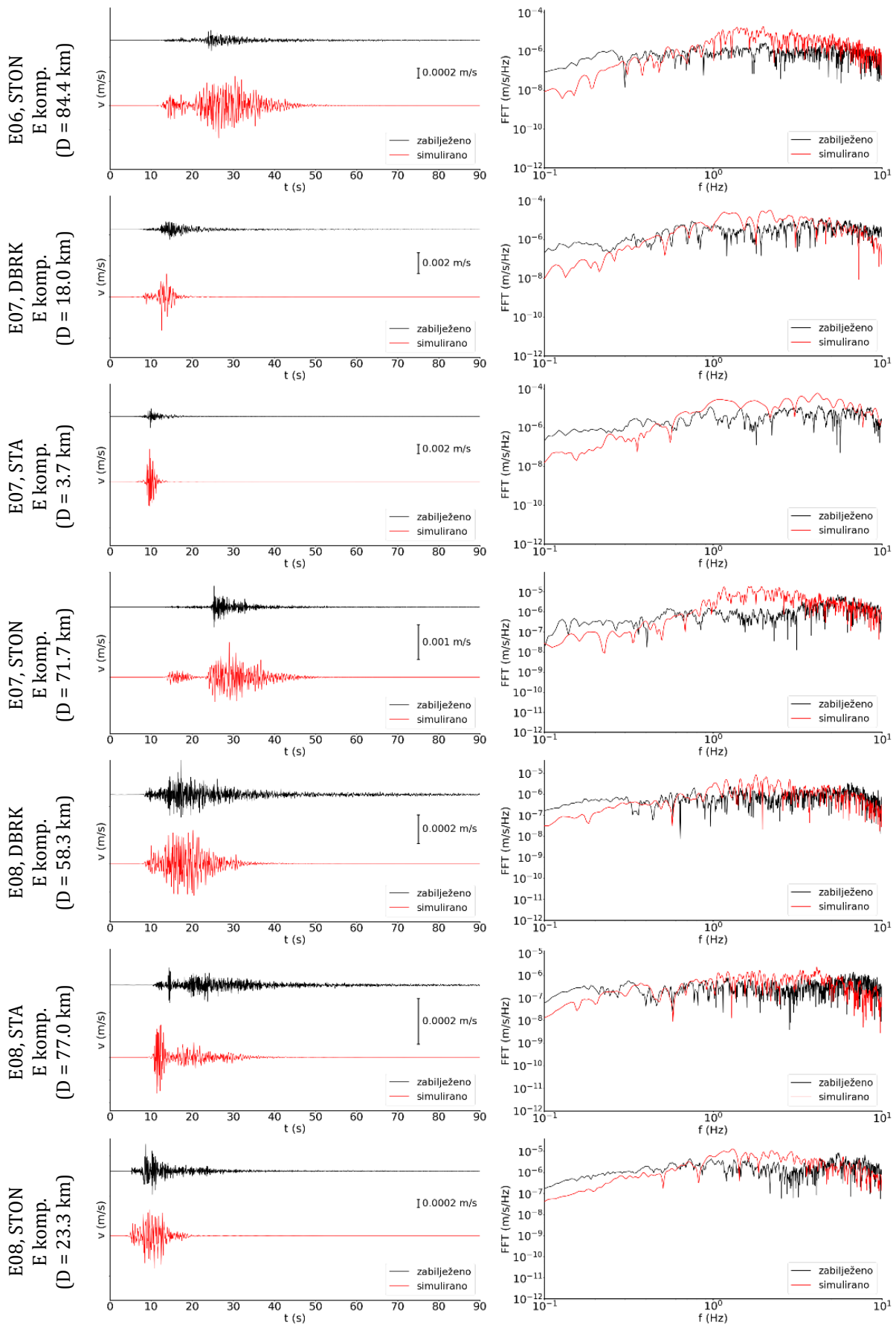




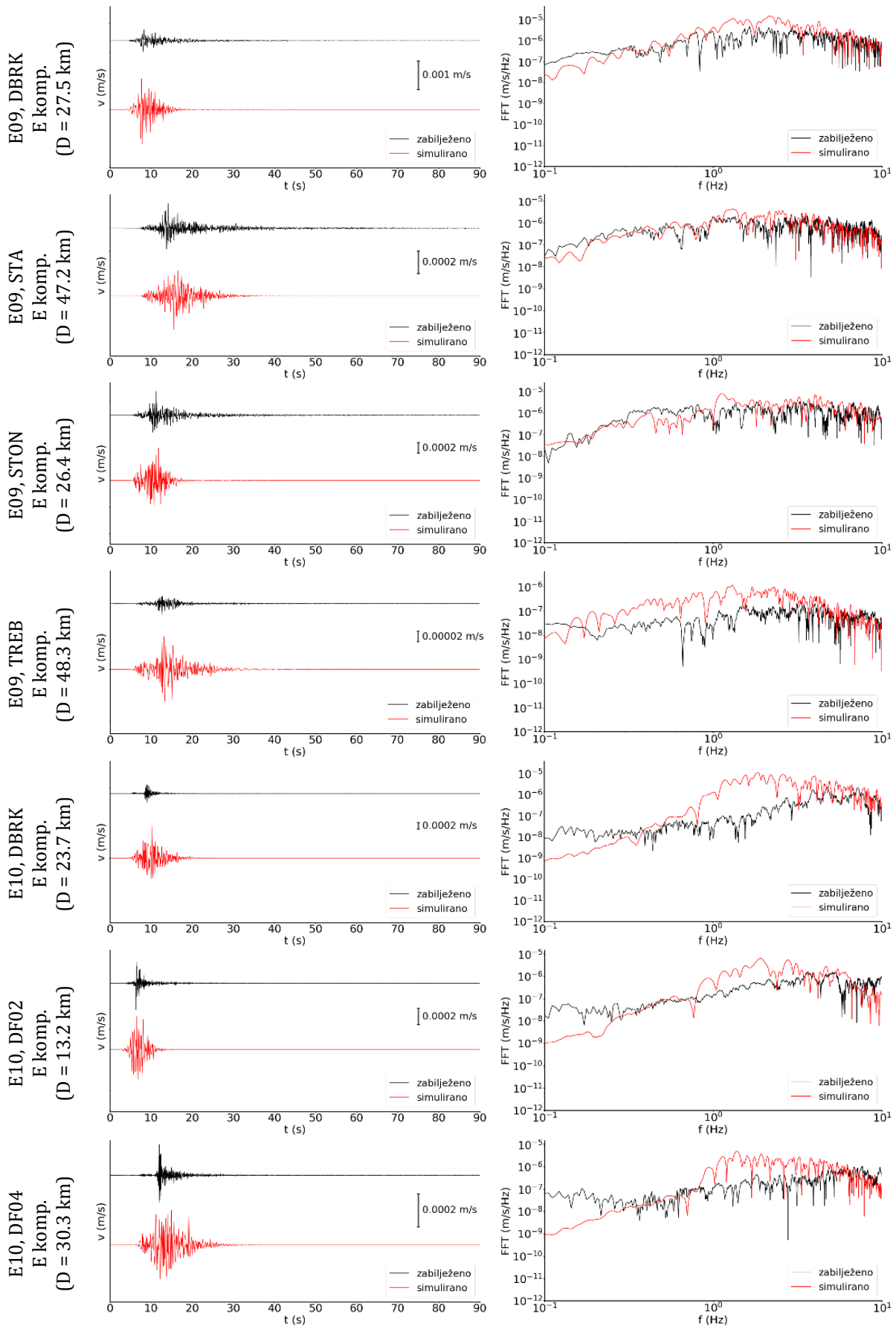
Slika D.3. Nastavlja se.



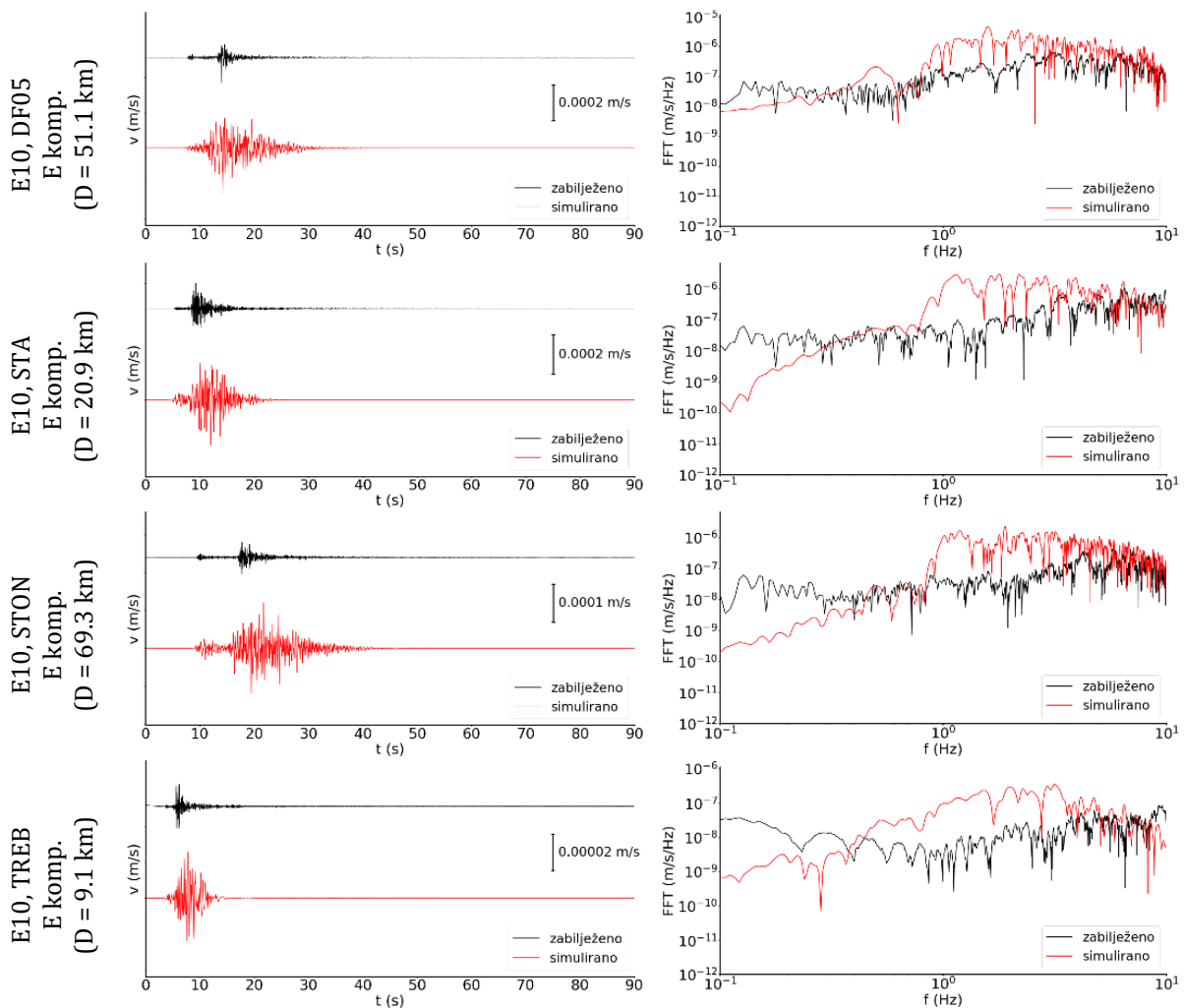
Slika D.3. Nastavlja se.



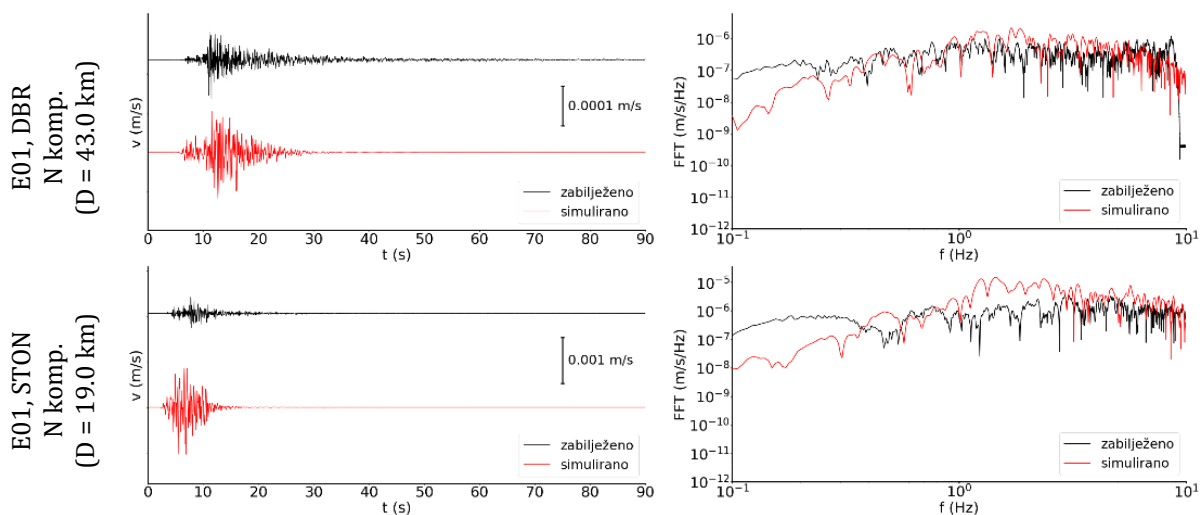
Slika D.3. Nastavlja se.



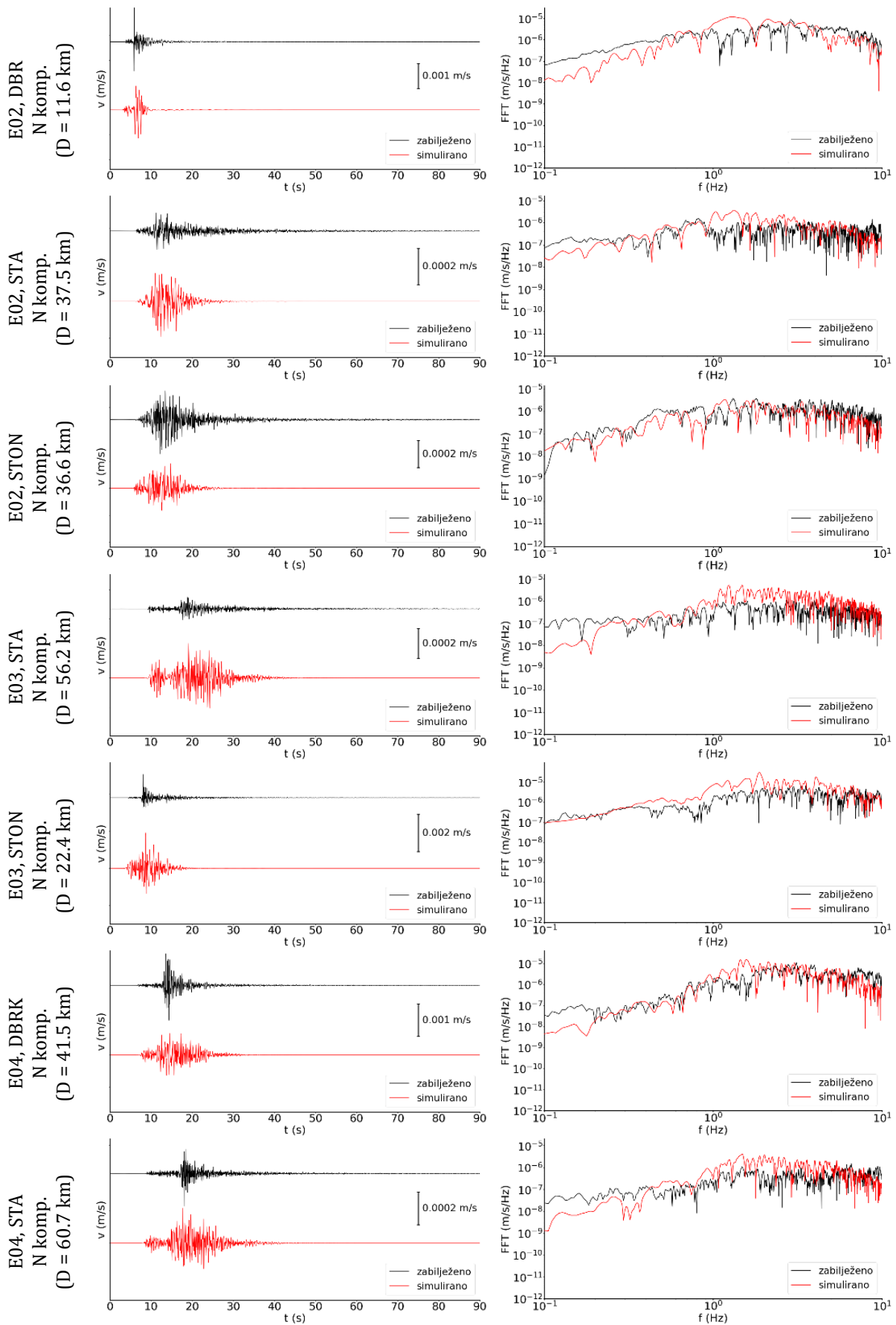
Slika D.3. Nastavlja se.



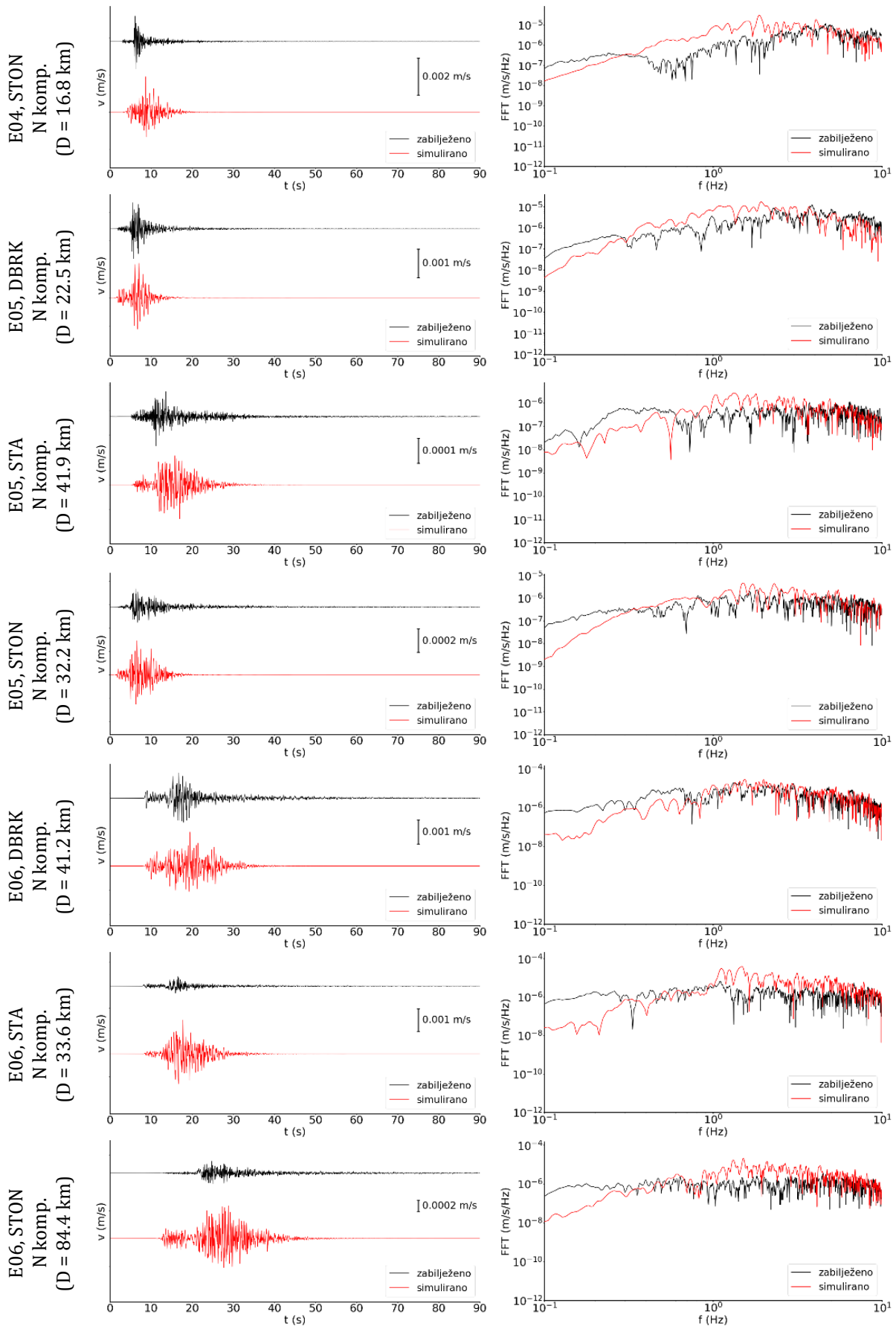
Slika D.3. Nastavlja se.



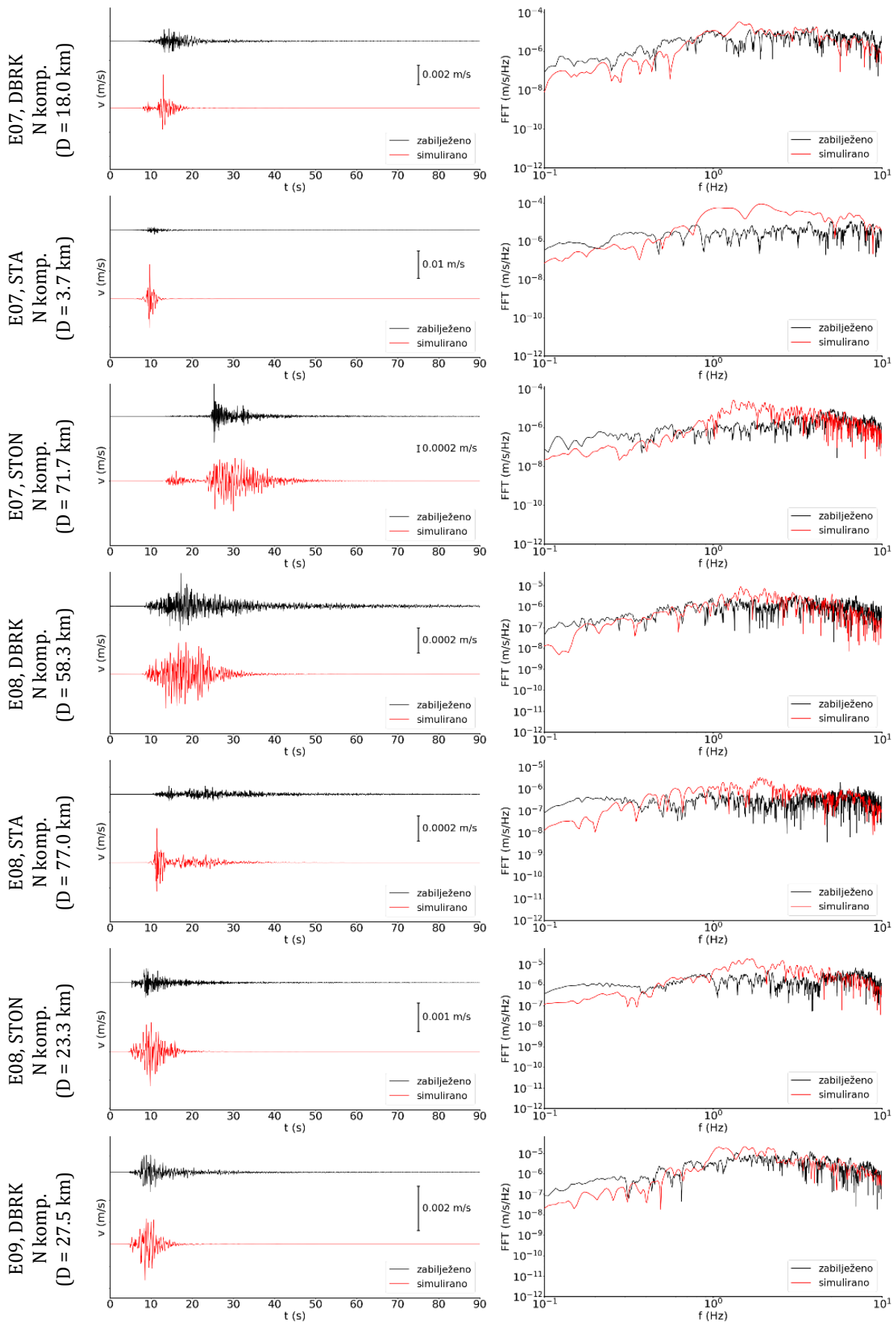
Slika D.4. Zapisi brzine gibanja tla (lijevo) te pripadni Fourierovi spektri (desno) sjeverne komponente (N komp.) zabilježenog (crno) i simuliranog (crveno) podatka po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 10 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost promatrane postaje od potresa.



Slika D.4. Nastavlja se.

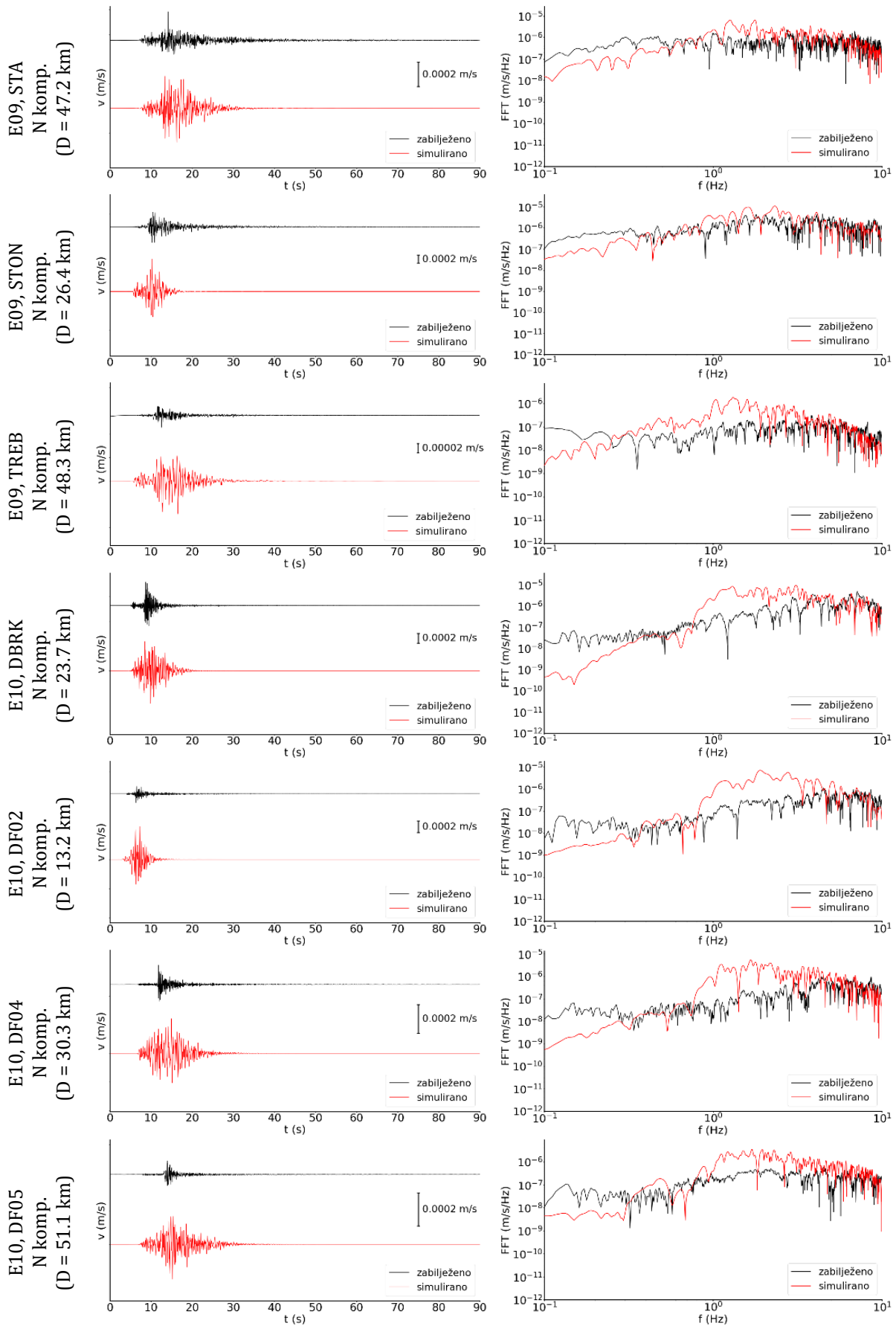


Slika D.4. Nastavlja se.

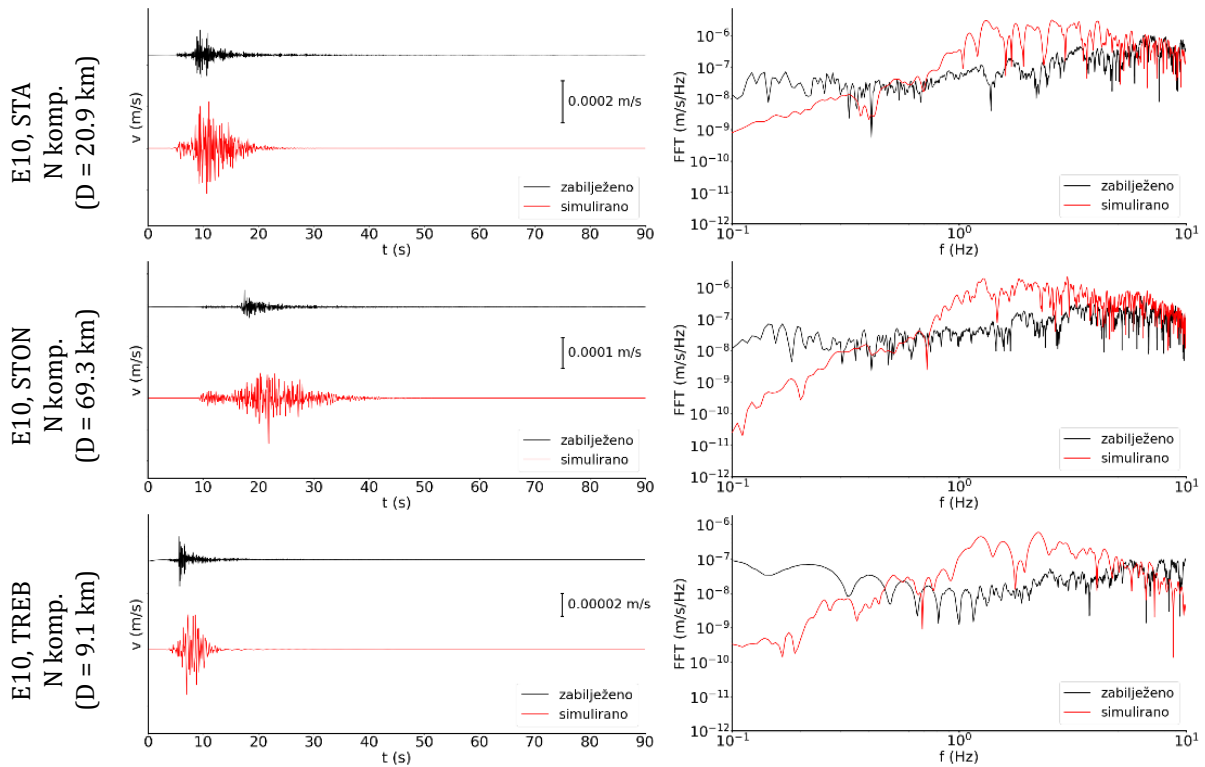


Slika D.4. Nastavlja se.

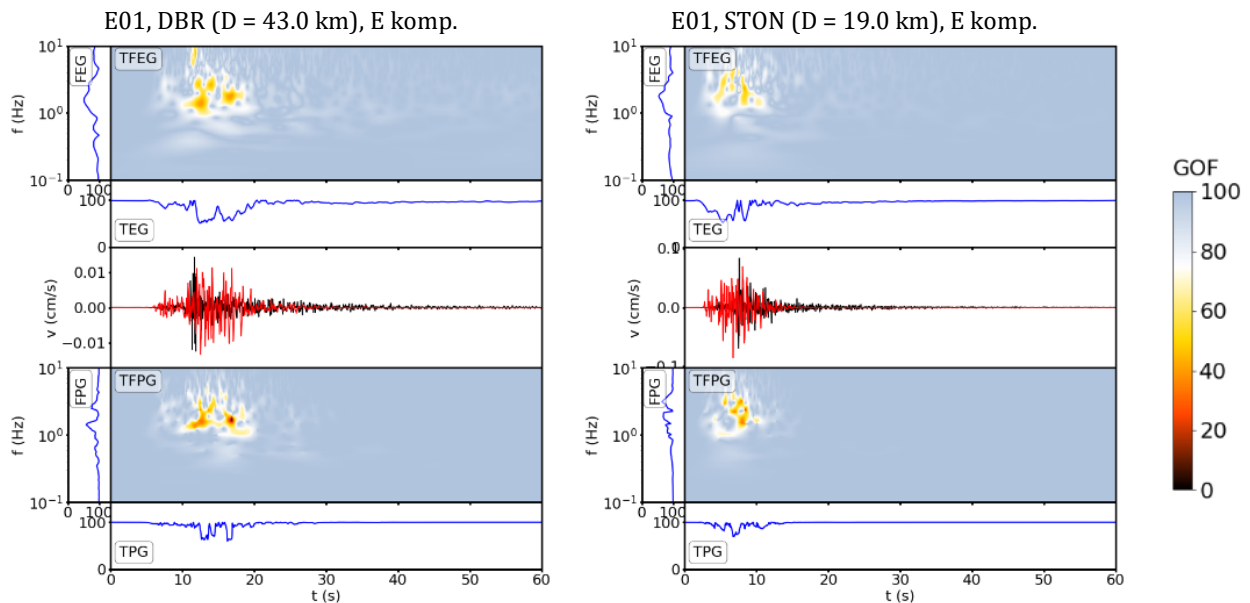




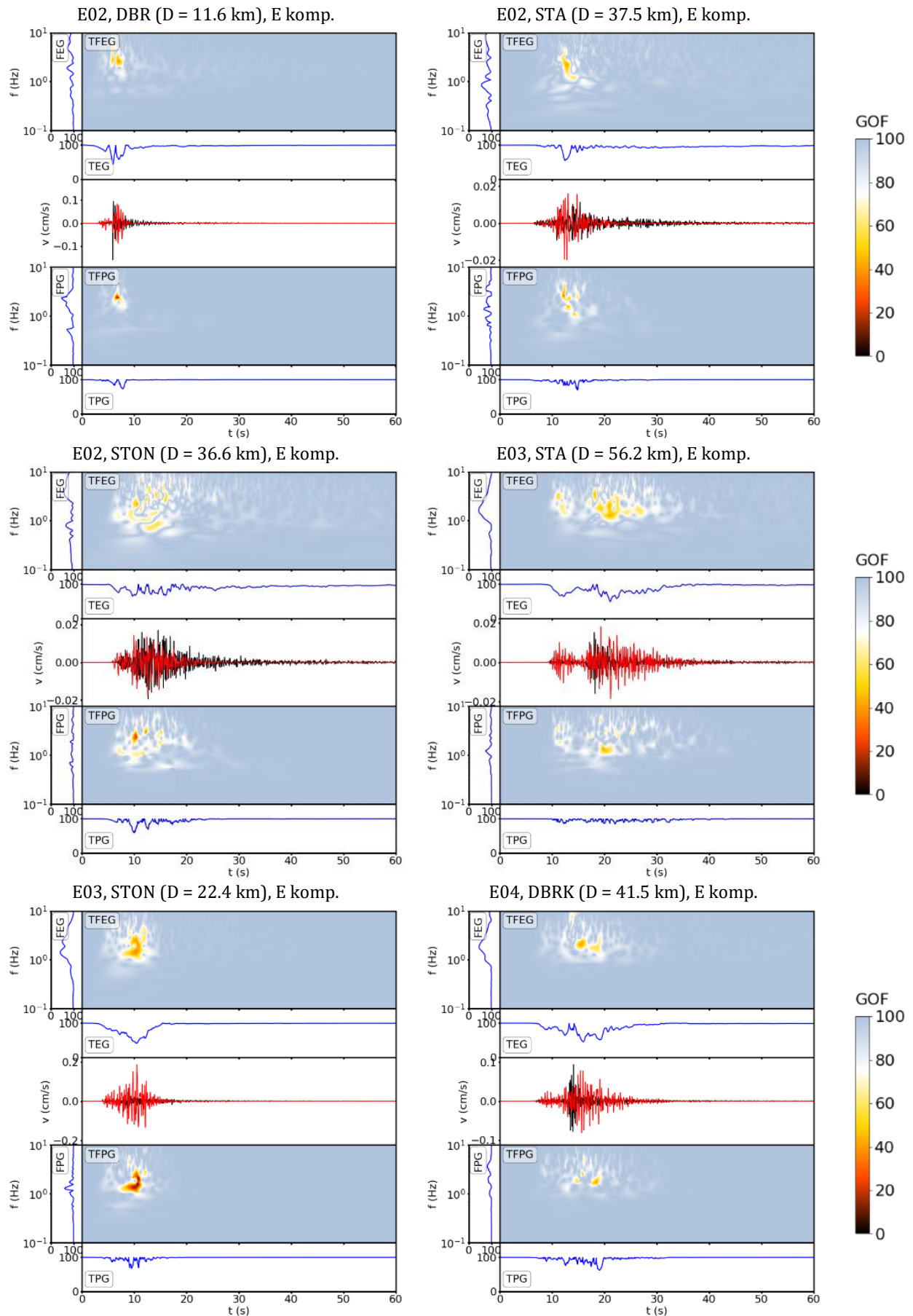
Slika D.4. Nastavlja se.



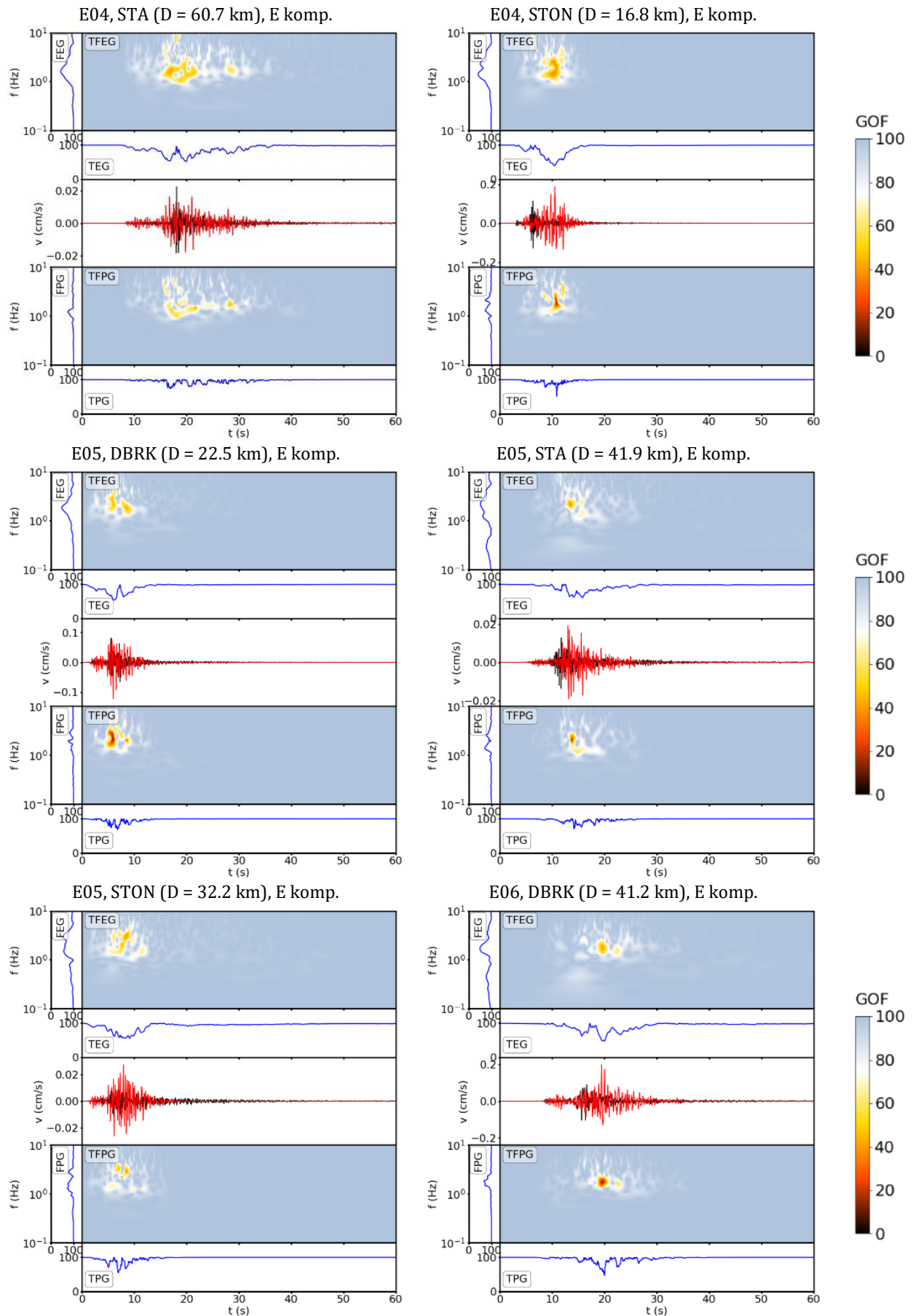
Slika D.4. Nastavlja se.



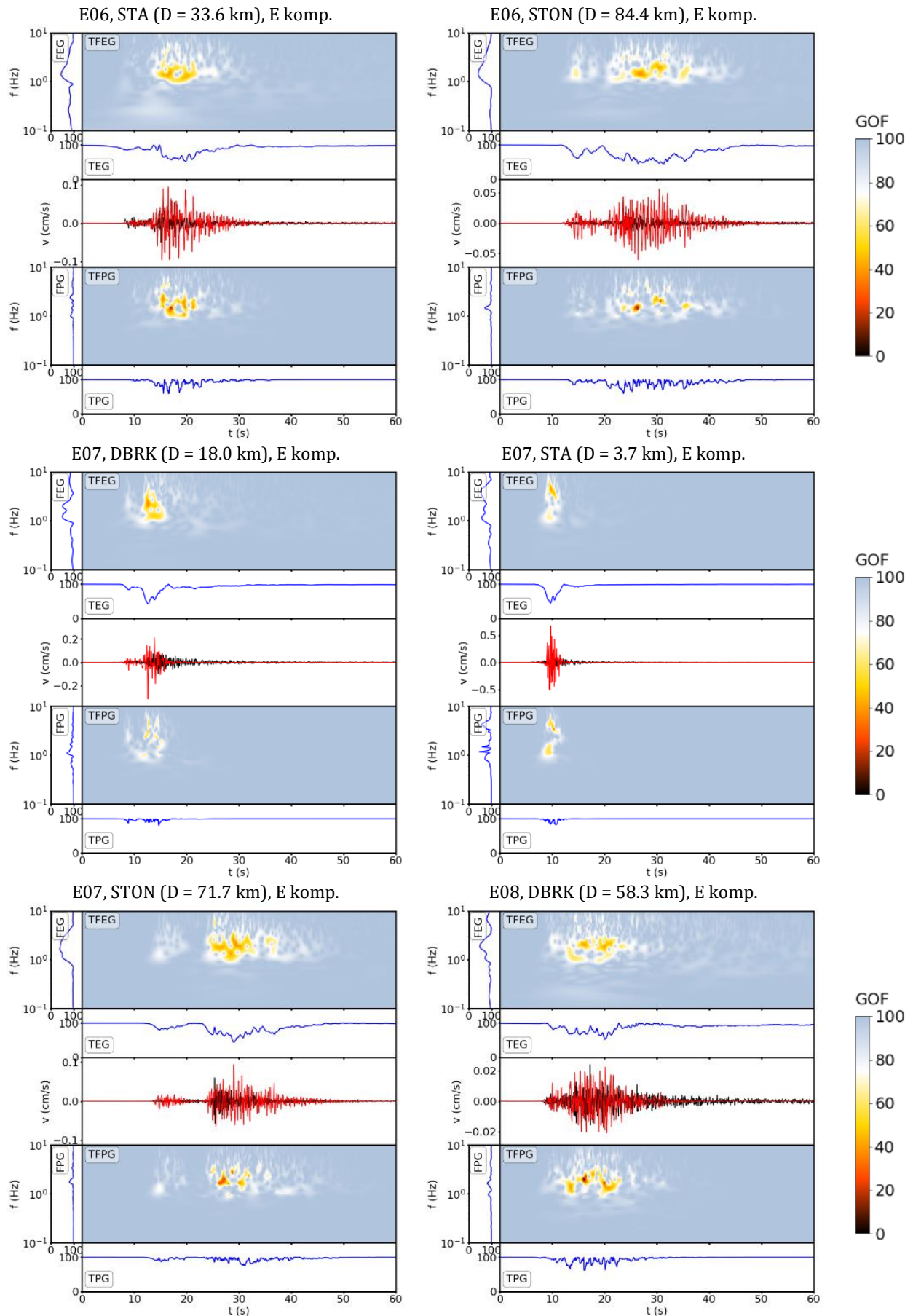
Slika D.5. Funkcije mjera kvaliteta prilagodbe *TFEG*, *TFPG*, *TEG*, *TPG*, *FEG* i *FPG* istočne komponente (E komp.) zabilježenog (crno) i simuliranog (crveno) podatka po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 10 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost potresa i promatrane postaje. Skalom 0–100 i bojom naznačene su vrijednosti *GOF* pojedine funkcije.



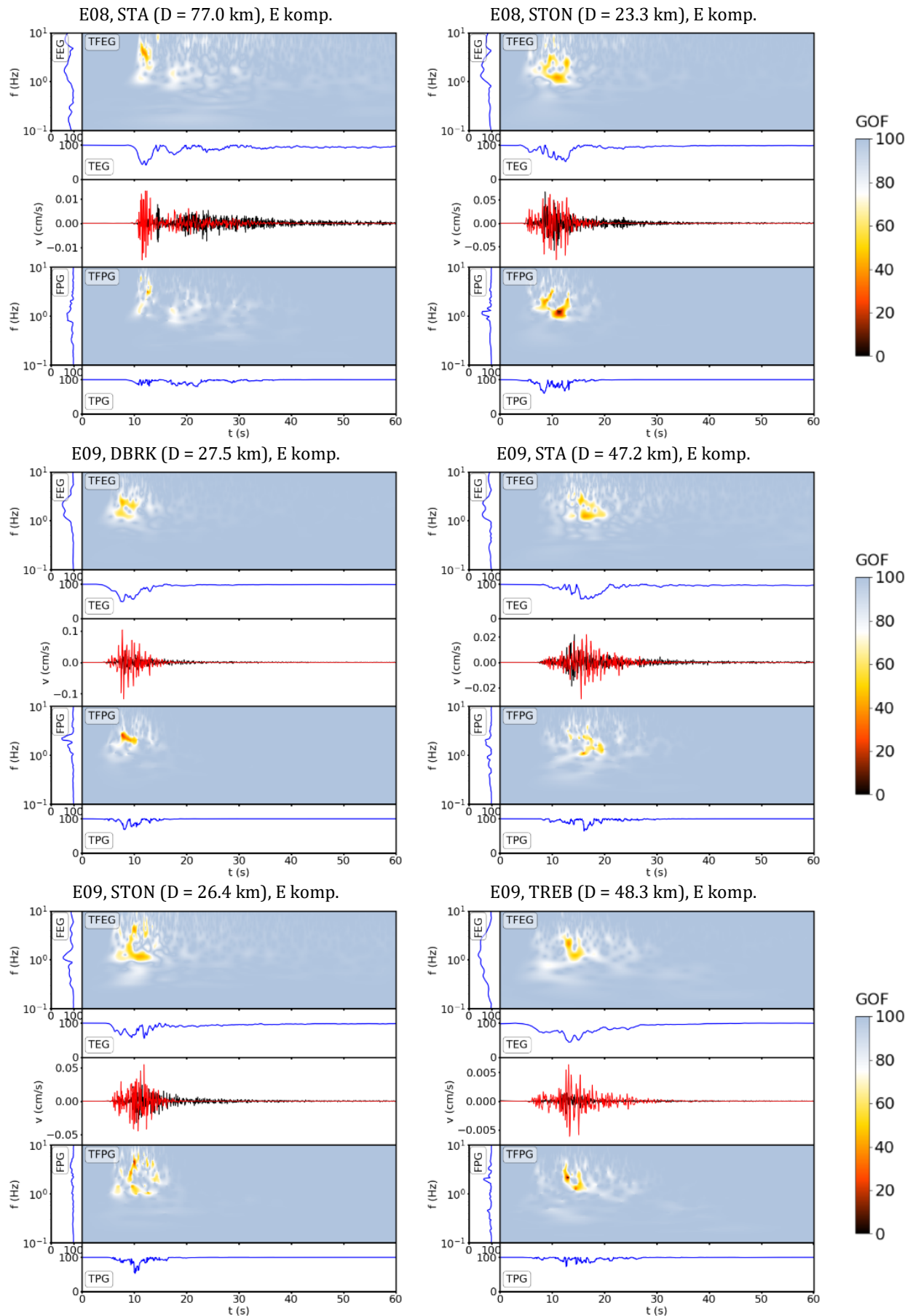
Slika D.5. Nastavlja se.



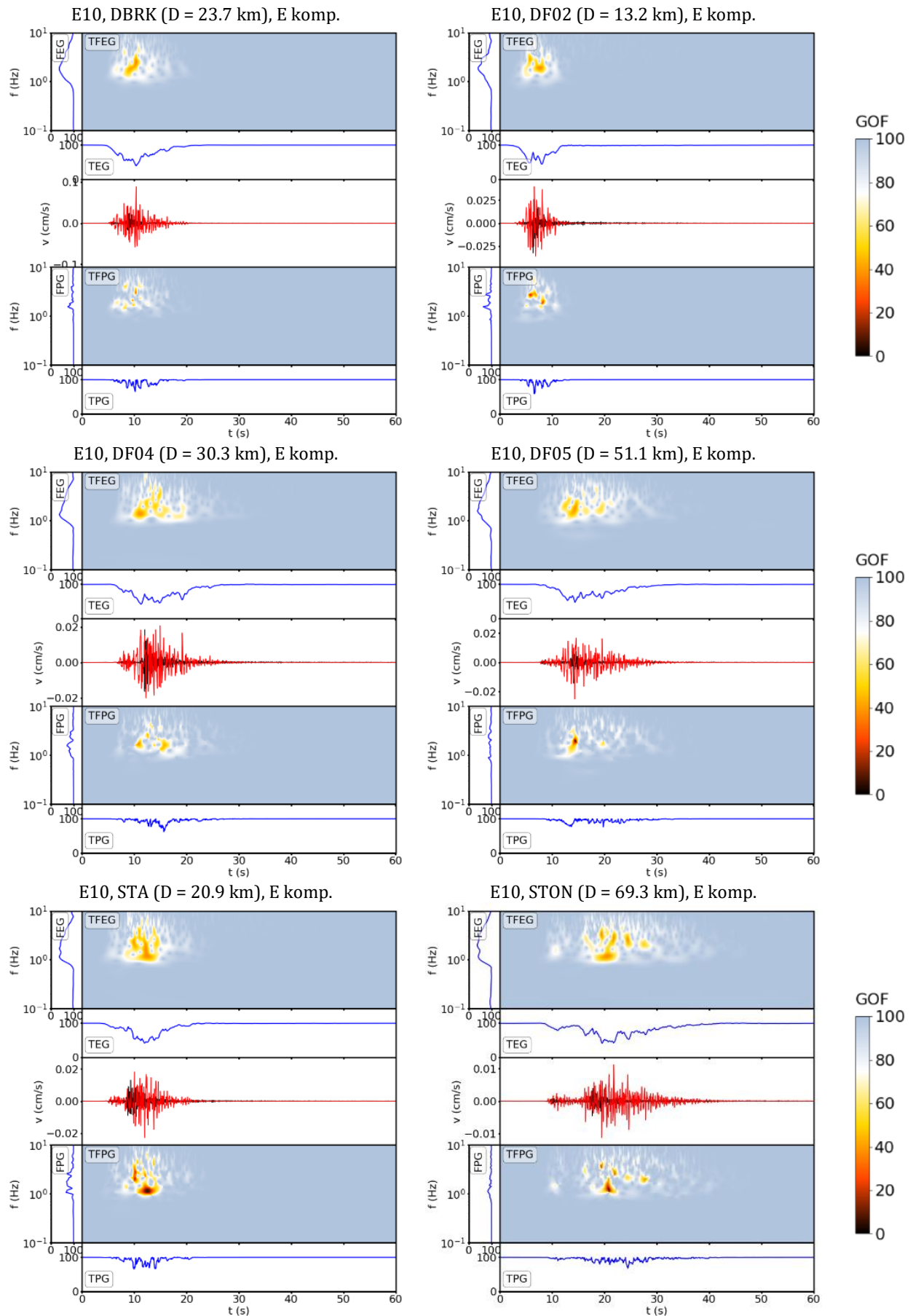
Slika D.5. Nastavlja se.



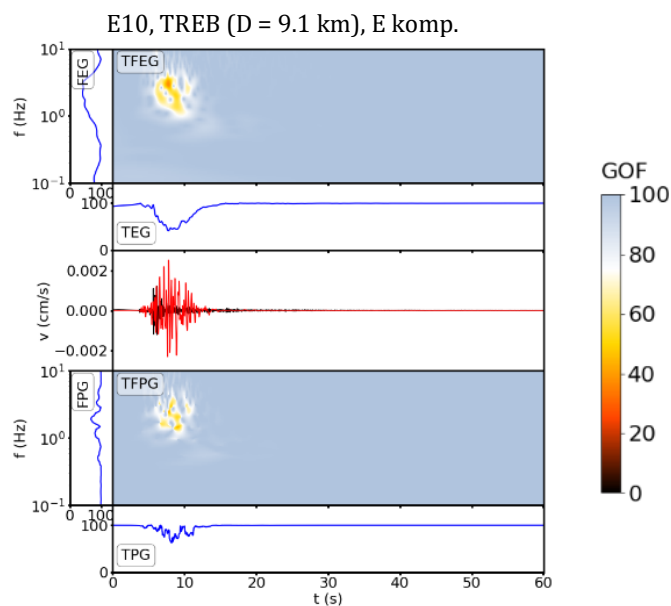
Slika D.5. Nastavlja se.



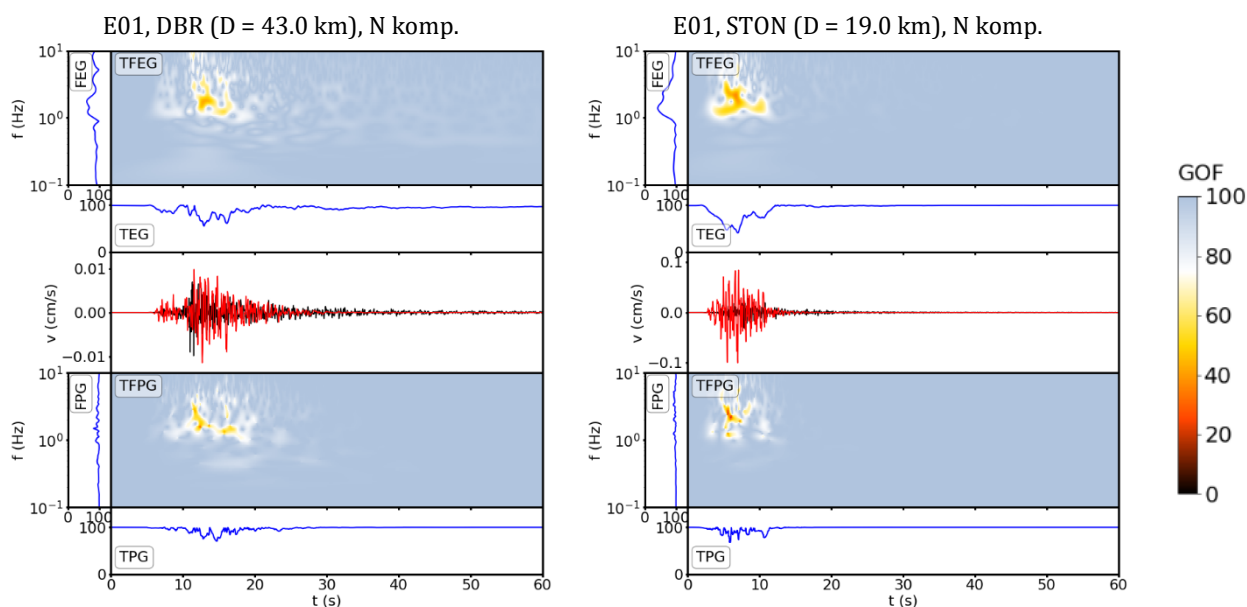
Slika D.5. Nastavlja se.



Slika D.5. Nastavlja se.

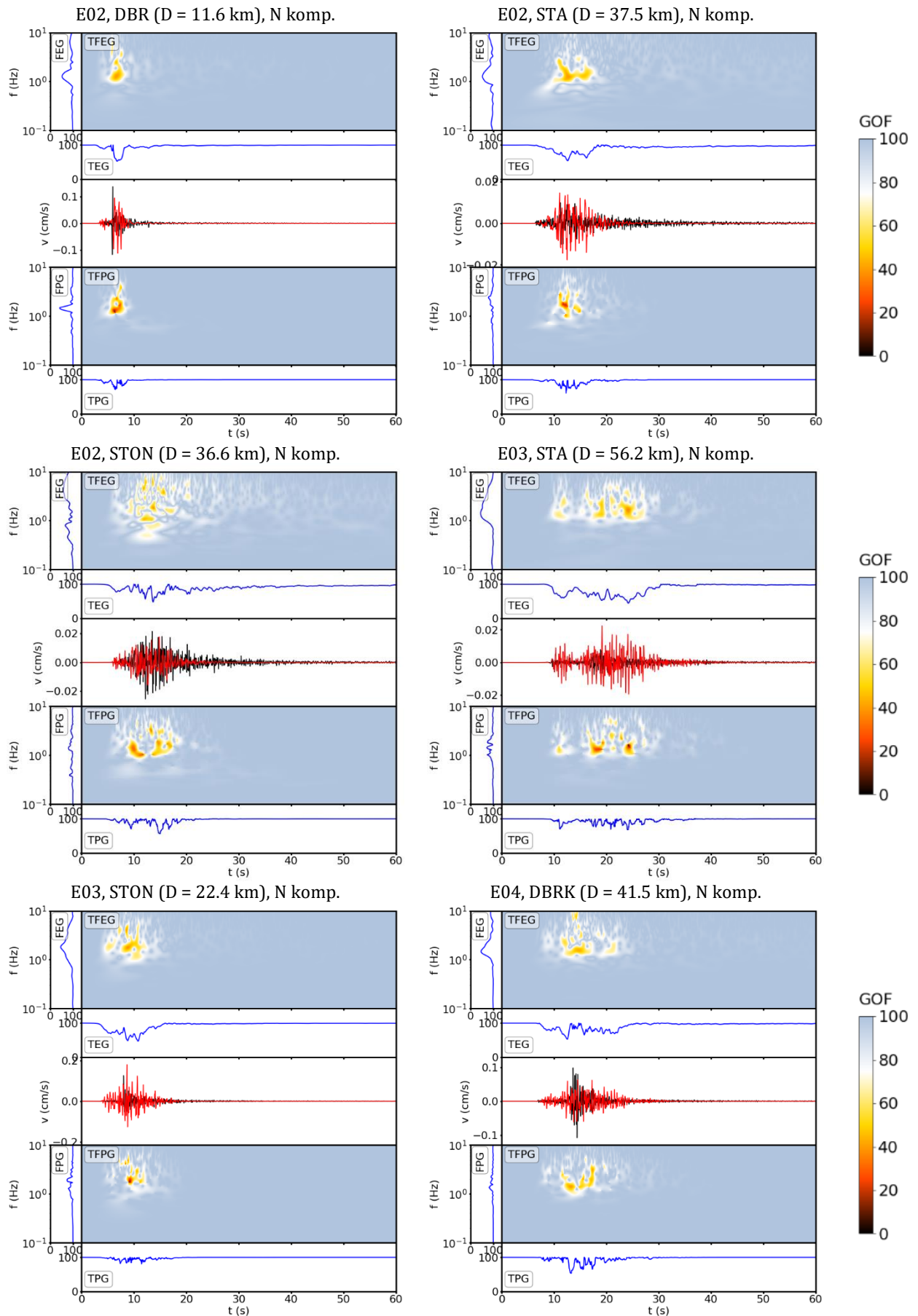


Slika D.5. Nastavlja se.

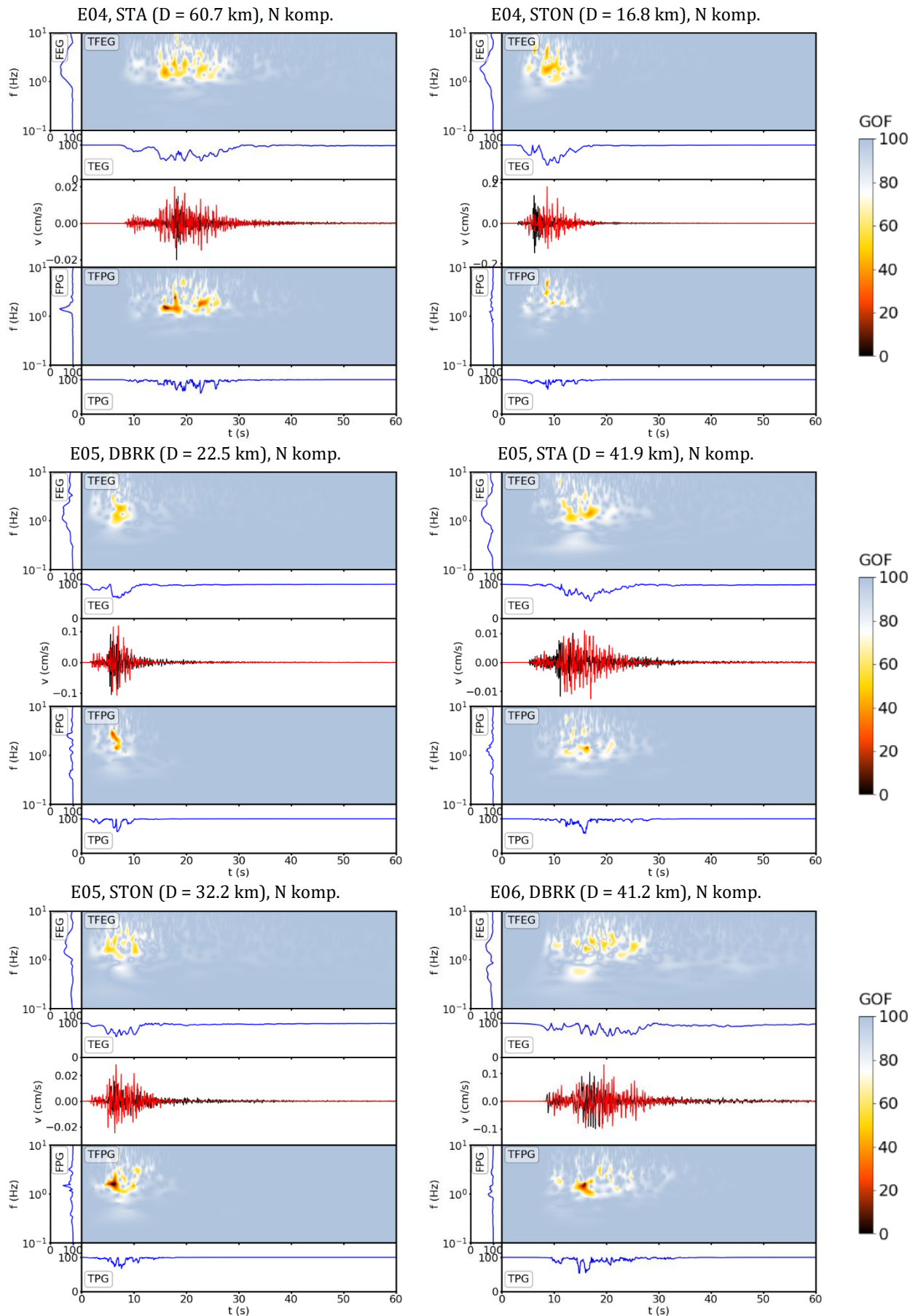


Slika D.6. Funkcije mjera kvaliteta prilagodbe *TFEG*, *TFPG*, *TEG*, *TPG*, *FEG* i *FPG* sjeverne komponente (N komp.) zabilježenog (crno) i simuliranog (crveno) podatka po parovima potres-postaja. Zapisi su filtrirani između 0.1 i 10 Hz. Vrijednost  $D$  odnosi se na epicentralnu udaljenost potresa i promatrane postaje. Skalom 0–100 i bojom naznačene su vrijednosti *GOF* pojedine funkcije.

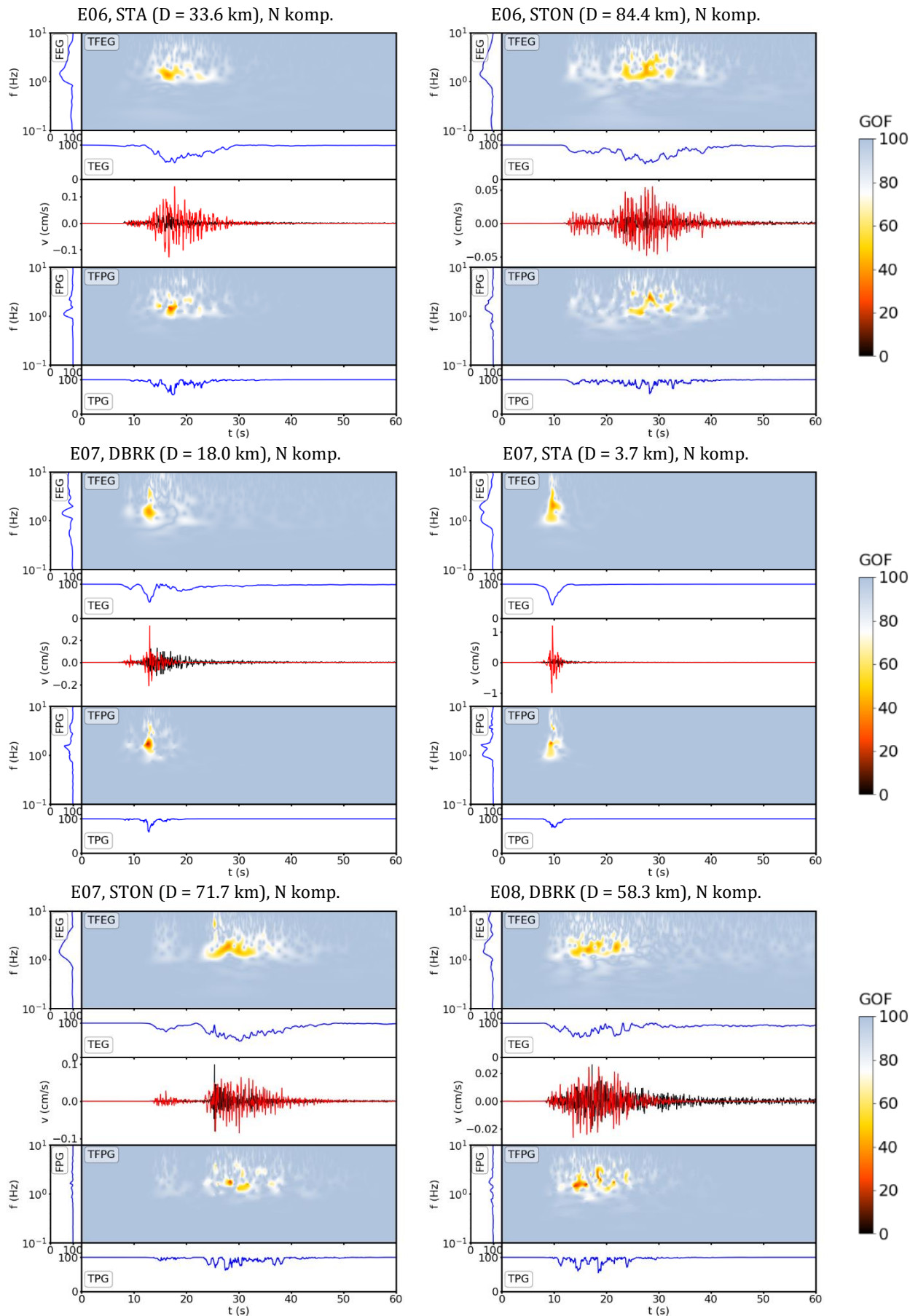




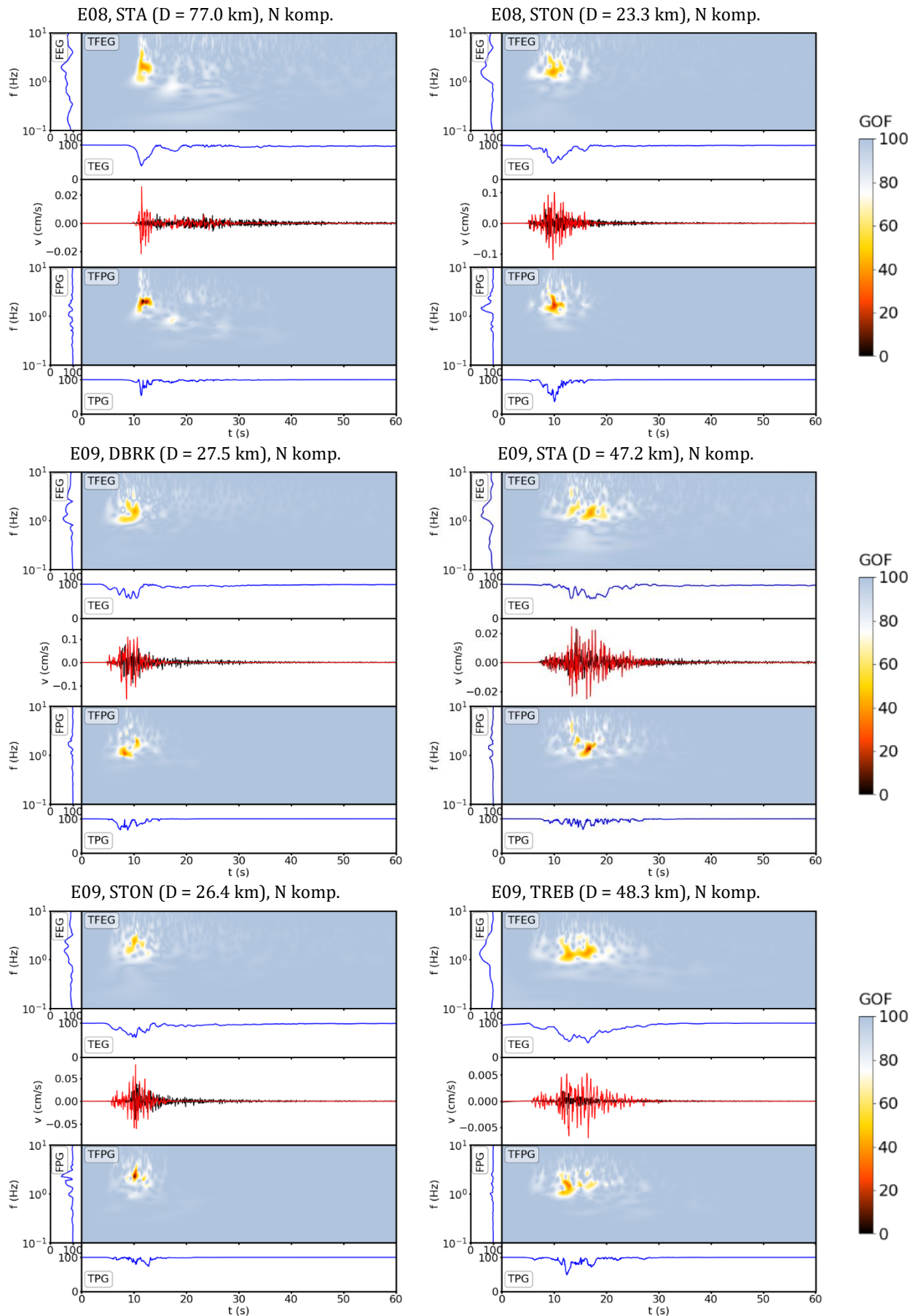
Slika D.6. Nastavlja se.



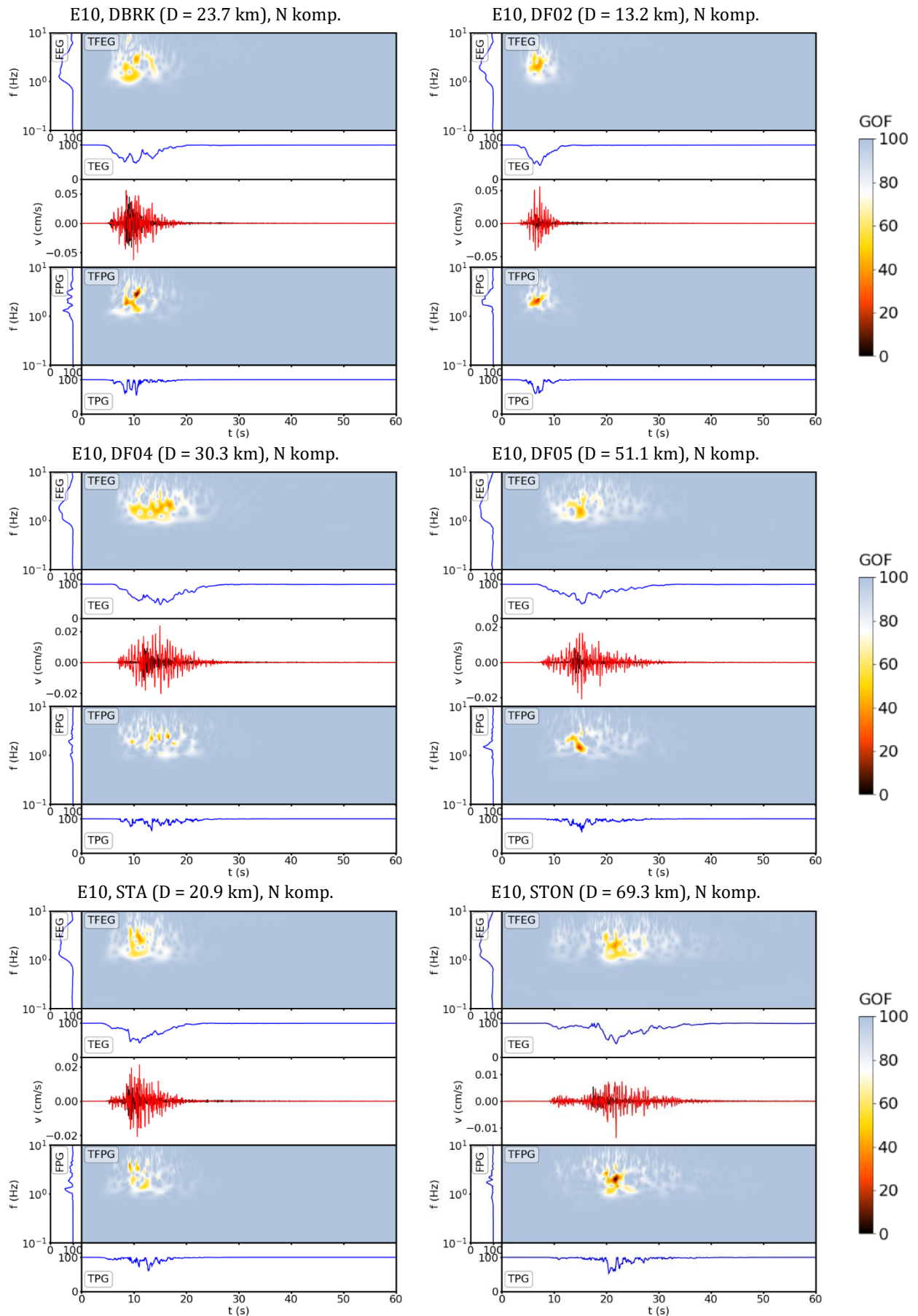
Slika D.6. Nastavlja se.



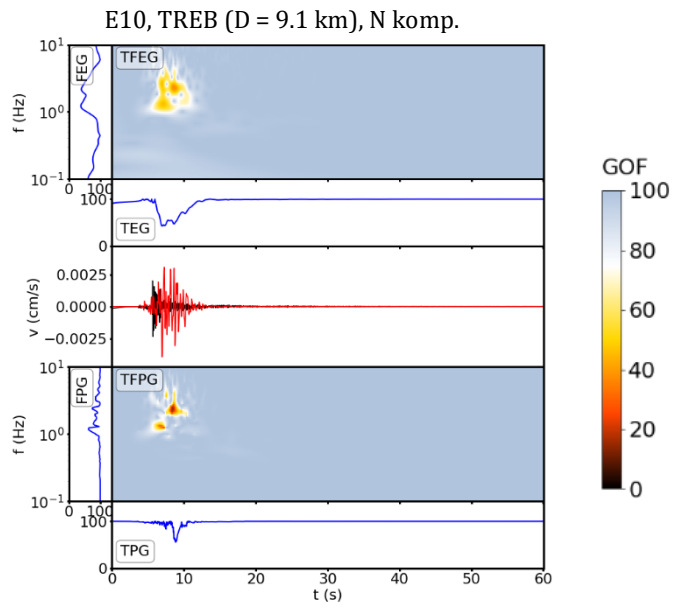
Slika D.6. Nastavlja se.



Slika D.6. Nastavlja se.



Slika D.6. Nastavlja se.



**Slika D.6.** Nastavlja se.

# Životopis

Helena Latečki

Rođena sam u Zagrebu, 18. srpnja 1995. godine

Zvanje: magistra fizike-geofizike

Od veljače 2020. godine radim u Seizmološkoj službi pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu kao tehnički suradnik. U listopadu 2021. godine zapošljam se kao asistent iz područja prirodnih znanosti na projektu DuFAULT („Karakterizacija i monitoring rasjednog sustava šireg dubrovačkog područja“) financiranog iz Hrvatske zaklade za znanost. Doktorski studij fizike smjer geofizike upisujem u studenom 2019. godine na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

U razdoblju od siječnja 2022. do travnja 2024. suradnica sam na projektu CRONOS („Geofizičko-seizmološka istraživanja potresom ugroženih područja u RH i razvoj atenuacijskih relacija predviđanja seizmičkog gibanja tla“) financiranom od strane Norveški financijski mehanizam 2014. – 2021.

Tijekom svog doktorskog studija, bavim se promocijom znanosti sudjelovanjem na manifestacijama Smotra Sveučilišta u Zagrebu i Dan i noć PMF-a.

U svibnju 2023. godine na Institutu za Geofiziku i Vulkanologiju u Bologni odradila sam dvotjedno stručno usavršavanje. Svoje rezultate predstavila sam na znanstvenim međunarodnim skupovima tijekom kojih sam osobno prezentirala 2 postera i 5 usmenih izlaganja od ukupno 11 konferencijskih izlaganja kao koautor. Koautor sam na četiri znanstvena rada (tri objavljena i jedan u procesu objavljivanja), te prvi autor jednog rada.

Primljene nagrade i priznanja:

- 2019.           Rektorova nagrada za individualni znanstveni i umjetnički rad u akademskoj godini 2018./2019.
  
- 2018.           Dekanova nagrada za izuzetan uspjeh u diplomskom sveučilišnom studiju Fizika-Geofizika, smjer Seizmologija i fizika čvrste Zemlje, akademska godina 2018./2019.

# Lista publikacija

## Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima

Neobjavljeni radovi u postupku:

1. Sečanj, M., Tomljenović, B., **Latečki, H.**, Herak, M., Stipčević, J. (2024): Ongoing activity of Dalmatian unit basal thrust: potential sesimogenic source in the Dubrovnik epicentral area (Croatia) (u pripremi)

Objavljeno:

1. Dasović, I., Herak, M., Herak, D., **Latečki, H.**, Sečanj, M., Tomljenović, B., Cvijić-Amulić, S., Stipčević, J. (2023): The Berkovići (BIH) ML = 6.0 earthquake sequence of 22 April 2022 – seismological and seismotectonic analyses. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2024.230253 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
2. Mustać, M., Dasović, I., **Latečki, H.**, Cecić, I. (2021): The public response and educational outreach through social media after the Zagreb earthquake of 22 March 2020. *Geofizika*, 38 (2), 215-234 doi:10.15233/gfz.2021.38.7 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
3. **Latečki, H.**, Molinari, I., Stipčević, J. (2021): 3D physics-based seismic shaking scenarios for city of Zagreb, Capital of Croatia. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 28, doi:10.1007/s10518-021-01227-5 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

## Sažetci sa skupova

1. **Latečki, H.**, Molinari, I., and Stipčević, J.: What's Shaking in the Adriatic Sea? - Implications of Ground Motion Simulation of the 2021 Central Adriatic Earthquake. Future Directions: Physics-Based Ground-Motion Modeling, Seismological Society of America, Vancouver, BC, 10–13 Oct 2023 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
2. **Latečki, H.**, Molinari, I., Stipčević, J. (2023): Ground motion simulation of the 2021 Mw 5.2 Central Adriatic earthquake. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria,



24–28 Apr 2023, EGU23-5365, doi:10.5194/egusphere-egu23-5365 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

3. Dasović, I., Herak, D., Herak, M., **Latečki, H.**, Sečanj, M., Tomljenović, B., Cvijić-Amulić, S., Mustać Brčić, M., Belinić Topić, T., Stipčević, J. (2023): The Berkovići (BA) 22 April 2022 earthquake sequence – seismological and seismotectonic analysis. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-13405, doi:10.5194/egusphere-egu23-13405 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
4. Herak, M., Herak, D., **Latečki, H.**, Belinić Topić, T., Cvijić Amulić, S., Dasović, I., Mustać Brčić, M., Sečanj, M., Tomljenović, B., Stipčević, J. (2023): The Berkovići earthquake series (BIH) - preliminary results of seismological research. AdriaArray workshop 2023, Dubrovnik, 2. - 5. travnja 2023 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
5. **Latečki, H.** (2022): Potresi i Dubrovnik, Znanstveno-stručni skup Seizmička i klimatska ugroženost dubrovačkog područja. Dubrovnik, 3. – 4. svibnja 2022 (predavanje)
6. **Latečki, H.**, Sečanj, M., Dasović, I., Stipčević, J. (2022): Seismic shaking scenarios for city of Dubrovnik, Croatia. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-8291, doi:10.5194/egusphere-egu22-8291 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
7. Sečanj, M., Tomljenović, B., Stipčević, J., **Latečki, H.**, Dasović, I. (2022): Identification and 3D modeling of active faults in the Dubrovnik (Croatia) offshore area – preliminary results. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-11083, doi:10.5194/egusphere-egu22-11083 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
8. Stipčević, J., Herak, M., Sečanj, M., Tomljenović, B., Dasović, I., **Latečki, H.** (2022): Where Does the Intraplate Tectonic Activity Originate From? Examples from the Adriatic Plate. SSA Annual Meeting 2022, 19–23 April 2022, Bellevue, Washington, SAD, Seismological Research Letters, 93, 1115–1372. doi:10.1785/0220220087 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
9. **Latečki, H.**, Stipčević, J., Molinari, I. (2021): Seismic shaking scenarios for city of Zagreb, Croatia. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 April 2021, EGU21-8781, doi:10.5194/egusphere-egu21-8781 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

10. **Latečki, H.**, Stipčević, J., Molinari, I. (2021): Seismic shaking scenarios for city of Zagreb, Croatia. 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering 1CroCEE, Zagreb, Hrvatska: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, doi:10.5592/co/1crocee.2021.138 (predavanje, međunarodna recenzija, prošireni sažetak, znanstveni)
11. Mustać, M., Cecić, I., **Latečki, H.**, Dasović, I. (2021): Social media as a tool for providing information following a hazardous event: „Zagrebački potres 2020 – vaše info za seizmologe“ Facebook group. 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering 1CroCEE Zagreb, Hrvatska: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, doi:10.5592/co/1crocee.2021.249 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

## Ocjenski radovi i ostale publikacije

1. Dasović, I., Herak, D., Herak, M., **Latečki, H.** (2022): Potres kod Berkovića (BiH) 22. travnja 2022. godine. Vijesti Hrvatskog geološkog društva 59/1, 33–34 (članak, ostalo)
2. Dasović, I., Stipčević, J., **Latečki, H.** (2021): Istraživački projekt Hrvatske zaklade za znanost IP-2020-02-3960: Karakterizacija i monitoring rasjednog sustava šireg dubrovačkog područja – DuFAULT, voditelj projekta Josip Stipčević. Vijesti Hrvatskog geološkog društva, 58/1, 42–44 (članak, ostalo)
3. Dasović, I., Herak, D., Herak, M., **Latečki, H.**, Mustać, M., Tomljenović, B. (2020): O potresima u Hrvatskoj. Vijesti Hrvatskoga geološkog društva 57/1, 4-27 (članak, ostalo)
4. **Latečki, H.** (2019): Elastička svojstva kore u sjeverozapadnim Dinaridima određena na temelju analize seizmičkog nemira. Diplomski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:884994>
5. **Latečki, H.** (2019): Varijacije seizmičkih brzina na širem području Kvarnera određene na temelju analize seizmičkog nemira. Individualni znanstveni i umjetnički rad, UNIZG Rektorova nagrada, akademska godina 2018./2019.