

Seizmički reziduali određeni iz teleseizmičkih podataka na području Dinarida i jugozapadnog dijela Panonskog bazena

Jurković, Klaudia

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:791978>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij Geološkog inženjerstva

**SEIZMIČKI REZIDUALI ODREĐENI IZ TELESEIZMIČKIH PODATAKA NA PODRUČJU
DINARIDA I JUGOZAPADNOG DIJELA PANONSKOG BAZENA**

Diplomski rad

Klaudia Jurković
GI 266

Zagreb, 2017.

SEIZMIČKI REZIDUALI ODREĐENI IZ TELESEIZMIČKIH PODATAKA NA PODRUČJU
DINARIDA I JUGOZAPADNOG DIJELA PANONSKOG BAZENA

KLAUDIA JURKOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Područje istraživanja obuhvaća Dinaride i jugozapadni dio Panonskog bazena. Preko Međunarodnog seizmološkog centra – ISC Bulletin prikupljeni su podaci o dalekim potresima tijekom 2014. i 2015. godine. Odabrano je ukupno 107 dalekih potresa s epicentralnom udaljenošću od 30° do 95° od središta rasporeda potresa te magnitudom većom od 6.0 prema Richteru. Daleki potresi su registrirani na 40 permanentnih seizmičkih stanica iz Hrvatske, Slovenije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Srbije i Mađarske. Podaci na stanicama prikupljeni su preko Orfeus arhive i Seizmološke službe Republike Hrvatske. Cilj rada je dobivanje seizmičkih reziduala, određenih iz teleseizmičkih podataka, koji služe kao ulazni podaci za seizmičku tomografiju. Inverzijom tih podataka može se konstruirati geološki model na dodiru Afričke i Euroazijske ploče. Metoda slaganja tragova korištena za izračunavanje reziduala za svaku postaju u odnosu na globalni referentni model brzina ak135. Postoje različiti rasporedi reziduala, ovisno o distribuciji po azimutu. Rezultati pokazuju kako su za Vanjske Dinaride karakteristični raniji dolasci, ukazujući na materijale velikih brzina, a za Panonski bazen i Unutarnje Dinaride karakteristični su kasniji nailasci zbog malih brzina materijala.

Ključne riječi: Dinaridi, JZ dio Panonskog bazena, daleki potresi, reziduali, metoda slaganja tragova.

Diplomski rad sadrži: 45 stranica, 2 tablice, 15 slika i 54 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Franjo Šumanovac, redoviti profesor, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Franjo Šumanovac, redoviti profesor, RGNF
Dr. sc. Jasna Orešković, docent, RGNF
Dr. sc. Davor Pavelić, redoviti profesor, RGNF

Datum obrane: 20. listopad 2017.

TRAVEL-TIME RESIDUALS DETERMINED FROM TELESEISMIC DATA IN THE AREA OF
THE DINARIDES AND THE SOUTHWEST PART OF THE PANNONIAN BASIN

KLAUDIA JURKOVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Department of geophysical exploration and mine surveying,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

The study area covers the Dinarides and southwestern part of the Pannonian basin. The data about teleseismic events were collected from the International Seismological Centre (ISC) Bulletin for a period from year 2014 to 2015. A set of 107 teleseismic events were selected in the 30-95° epicentral distance range from the centre of the seismic station array and with the magnitude greater than 6.0 according to the Richter. Teleseismic events were recorded on 40 seismological stations in Croatia, Slovenia, Bosnia and Herzegovina, Montenegro, Serbia and Hungary. Dataset on seismic stations were collected from the ORFEUS database and Croatian Seismological Survey database. The aim of the study was to obtain travel-time residuals based on teleseismic data, that are used as input for teleseismic tomographic inversion. By inversion of this data, the geological model at the contact of African and Euroasian plate is constructed. The adaptive stacking technique is used for calculating relative residuals at each station for the selected earthquake, in relation to the global ak135 velocity model. There are different residual patterns depending on azimuthal distribution of the events. The results show that the External Dinarides are characterized by early arrivals pointing to high velocity materials, while the Pannonian basin and Internal Dinarides are characterized by late arrivals caused by low velocity materials.

Keywords: Dinarides, SW part of the Pannonian basin, teleseismic events, travel-time residuals, adaptive stacking technique

Thesis contains: 45 pages, 2 tables, 15 figures and 54 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Franjo Šumanovac, Full Professor, RGNF

Reviewers: PhD Franjo Šumanovac, Full Professor, RGNF
PhD Jasna Orešković, Assistant Professor, RGNF
PhD Davor Pavelić, Full Professor, RGNF

Date of defense: October 20, 2017.

Iskreno i od srca zahvaljujem svojem mentoru prof.dr.sc. Franji Šumanovcu na predloženoj temi, pruženom povjerenju, strpljenju te stručnoj pomoći kroz proces izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem docentici dr.sc. Jasni Orešković i redovitom profesoru dr.sc. Davoru Paveliću na ukazanoj pomoći i doprinosu kvaliteti diplomskog rada.

Ovom prilikom se zahvaljujem Ivi Allegrettiju, Seizmološkoj službi Republike Hrvatske i HEP-u za podatke o permanentnim stanicama u Hrvatskoj, ORFEUS-u i EIDA-i za podatke ostalih stanica. Saši Kolaru na pomoći i ugodnom društvu u uredu.

Velike zahvale svim kolegama i prijateljima koji su mi pomagali i poticali me tijekom studiranja.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojoj obitelji; seki Viktoriji, mami Ljiljani i tati Božidaru te voljenom dečku Domagoju koji su bili uz mene bez obzira na sve poteškoće i prepreke i pružali mi bezuvjetnu potporu i ljubav. Bez njih ovo postignuće ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	PODRUČJE ISTRAŽIVANJA I REGIONALNA GEOLOGIJA	3
3.	DUBOKA GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA	8
4.	IZVORI PODATAKA	12
5.	SEIZMIČKA TOMOGRAFIJA	20
6.	TELESEIZMIČKI REZIDUALI.....	22
7.	REZULTATI.....	25
8.	ZAKLJUČAK	38
9.	LITERATURA.....	39

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Topografska i tektonska karta Panonsko-Dinaridske regije s položajima seizmičkih stanica.....	3
Slika 4-1. Položaji i nazivi seizmičkih stanica, te profila P-6 i P-7	13
Slika 4-2. Epicentri svih teleseizmičkih događaja korištenih u istraživanju i raspodjela prema povratnom azimutu (Šumanovac et al., 2017).....	17
Slika 4-3. Epicentri teleseizmičkih događaja obrađenih u ovom radu i njihova raspodjela prema povratnom azimutu.....	18
Slika 5-1. Koraci pri rješavanju problema teleseizmičke tomografije korištenjem standardnog modela brzina IASP91 i 3-D modela Zemlje	21
Slika 7-1. Događaj sa sjevera – Tihi ocean; blizu Japana (41.03° N, 143.16° E), AZ 37.186° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja	27
Slika 7-2. Daleki potres sa sjevera – Tihi ocean; blizu Japana (39.86° N, 142.87° E), AZ 38.035° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja	28
Slika 7-3. Daleki potres s istoka – Indijski ocean; Indonezija (4.25° N, 92.76° E), AZ 96.218° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja	29
Slika 7-4. Daleki potres s istoka – Indijski ocean; Indonezija (0.78° S, 98.72° E), AZ 95.461° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja	30
Slika 7-5. Daleki potres s juga - jezero Albert, istočna Afrika (1.55° N, 30.89° E), AZ 160.044° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven	

nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja 31

Slika 7-6. Daleki potres s juga – Južni Atlantski ocean (35.41° S, 17.70° W), AZ 207.722°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja 32

Slika 7-7. Daleki potres sa zapada – Sjeverni Atlantski ocean (14.67° N, 58.93° W), AZ 269.618°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja 33

Slika 7-8. Daleki potres sa sjevera – Beringovo more, Pacifički ocean (53.62° N, 171.83° E) AZ 4.457°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja 34

Slika 7-9. Srednje vrijednosti relativnih reziduala zabilježeni iz četiri strane svijeta..... 35

Slika 7-10. Geološki model duž profila u sjevernim i južnim Dinaridima (Šumanovac et al., 2017). Položaji profila P-6 i P-7 prikazani su na slici 2-1. 37

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Podaci o svim potresima u epicentralnim udaljenostima od 30° do 100° 14

Tablica 4-2. Podaci o naknadno dodanim južnim dalekim potresima 19

1. UVOD

Područje istraživanja obuhvaća Dinaride i jugozapadni dio Panonskog bazena kao granicu između Jadranske mikroploče koja je dio Afričke ploče i Panonskog tektonskog segmenta, kao dijela Euroazijske ploče. Ovo granično područje Dinarida ima važnu ulogu u regionalnoj tektonici. Nedavna seizmička istraživanja o građi donje litosfere, granične zone Jadranske mikroploče i jugozapadnog dijela Panonskog bazena otkrila su anomaliju velikih brzina ispod sjevernog dijela Dinarida. Šumanovac & Dudjak (2016) su prvi otkrili ovu anomaliju koja ukazuje na tonjenje hladnog litosfernog materijala Jadranske mikroploče ispod sjeverozapadnih Dinarida do 250 km dubine. Upravo je to bila svrha daljnjeg istraživanja u kojem je područje prošireno na istok i jugoistok kako bi se dobila cjelovitija slika na području cijelih Dinarida.

Primjenjena je metoda teleseizmičke tomografije, koja može uvelike doprinijeti boljem razumijevanju strukture litosfere i njezinog odnosa s astenosferom. Glavna prednost seizmičke tomografije je njezina mogućnost trodimenzionalnog (3D) pokrivanja podzemlja što uvelike pomaže pri razumijevanju litološko-tektonskih odnosa. Seizmička tomografija koristi seizmičke valove stvorene potresima i eksplozijama, kako bi se dobili trodimenzionalni modeli Zemljine unutrašnjosti. Pri izračunavanju brzina seizmičkih valova duž putanje može se primijeniti vrijeme koje je potrebno da seizmički val prijeđe od mjesta nastanka potresa do seizmičke stanice. Koristeći vremena prvih nailazaka P-valova snimljenih na seizmičkim stanicama, mogu se definirati područja manjih ili većih seizmičkih brzina duboko u Zemlji (Arvanitis & Al-Anazi, 2009). Općenito, poznato je da u aktivnom tektonskom području hladni litosferni materijal u gornjem plaštu pokazuje velike seizmičke brzine, a da je topao materijal okarakteriziran malim seizmičkim brzinama. Odnosno, anomalije velikih brzina ukazuju na litosfernu ploču koja tone u gornjem plaštu, dok područja koja se uzdižu uzrokuju stanjivanje gornjeg dijela gornjeg plašta i Zemljine kore te pokazuju male seizmičke brzine (Šumanovac & Dudjak, 2016). Kako su subdukcijski procesi u Dinaridima djelovali tijekom dugog perioda u geološkoj povijesti, primjenjena je seizmička tomografija u svrhu omogućavanja pouzdanih definicija aktivnih procesa.

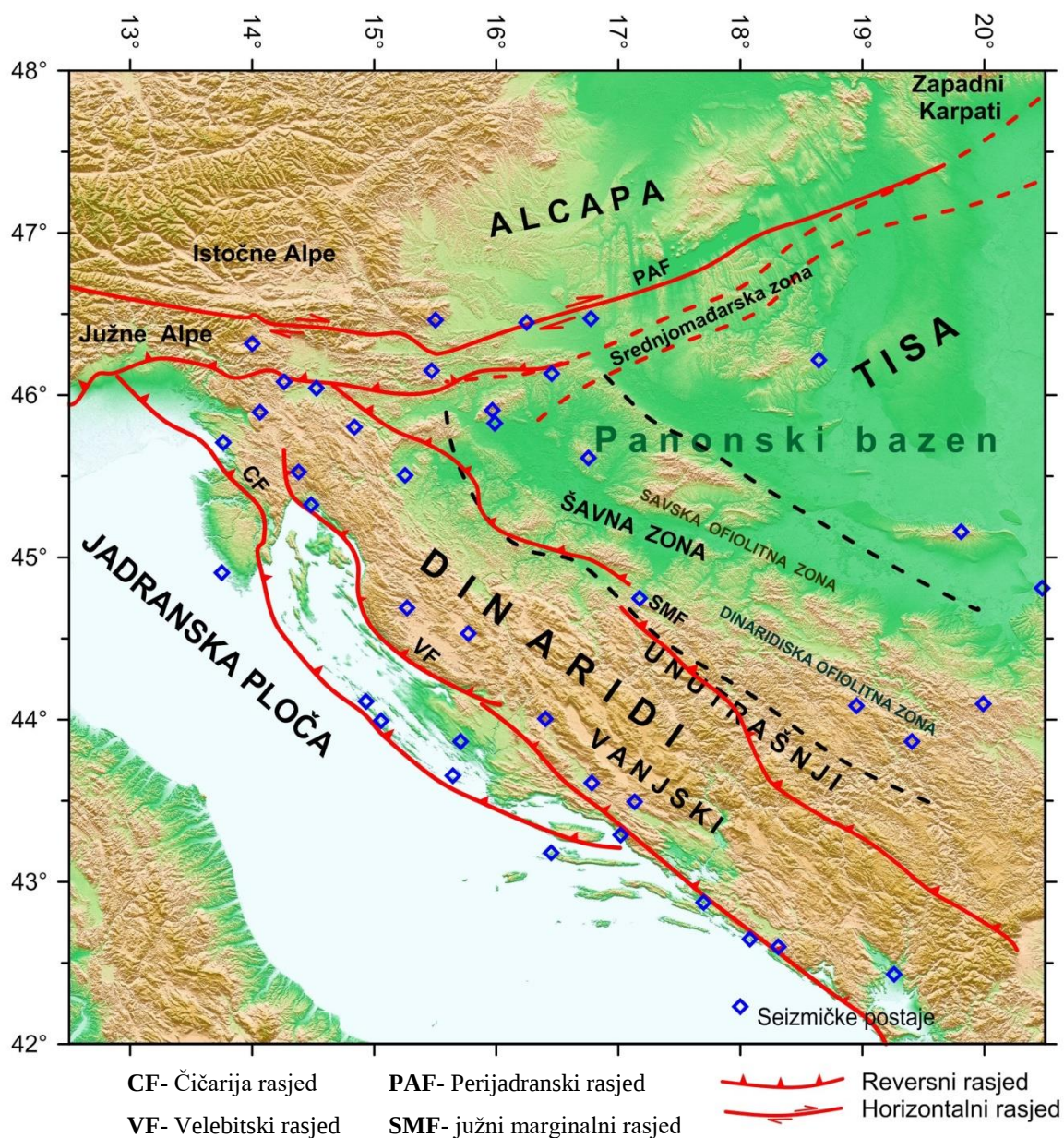
Cilj ovog rada je izračunavanje seizmičkih reziduala, određenih iz teleseizmičkih podataka, koji služe kao ulazni podaci za seizmičku tomografiju. Inverzijom tih podataka

dobije se litosferni model podzemlja. Preko Orfeusa (<http://www.orfeus-eu.org/data/eida/>) i baze podataka Hrvatske seizmološke službe prikupljeni su podaci o seizmičkim događajima tijekom 2014. i 2015. godine. Odabrano je ukupno 107 dalekih potresa s epicentralnom udaljenošću od 30° do 95° registriranih na 40 permanentnih seizmičkih stanica u području Dinarida i južnog dijela Panonskog bazena. Obradila sam 54 dalekih potresa, a ostale daleke potrese obradio je dr. sc. Tihomir Engelsfeld.

Diplomski rad napravljen je u okviru znanstvenih seizmičkih istraživanja Dinarida. Voditelj istraživanja je prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, a ostali članovi tima koji su sudjelovali u istraživanju su doc. dr. sc. Snježana Markušić, dr. sc. Tihomir Engelsfeld, doc. dr. sc. Jasna Orešković i univ. bacc. ing. geol. Klaudia Jurković. Rezultati su objavljeni 2017. godine u časopisu *Tectonophysics*; vol. 712-713, str. 523-541, pod nazivom *Shallow and deep lithosphere slabs beneath the Dinarides from teleseismic tomography as the results of the Adriatic lithosphere downwelling*.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA I REGIONALNA GEOLOGIJA

Područje istraživanja obuhvaća Dinaride i jugozapadni dio Panonskog bazena, te zahvaća područje Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine i rubne dijelove Mađarske, Srbije i Crne Gore. U geotektonskom smislu, obuhvaća rub Jadranske mikroploče (Vanjski Dinaridi) te uski pojas Unutrašnjih Dinarida i jugozapadni dio bloka jedinice Tisa (Slika 2-1).



Slika 2-1. Topografska i tektonska karta Panonsko-Dinaridske regije s položajima seizmičkih stanica

Dinaride često dijelimo na Vanjske ili Krške i Unutrašnje Dinaride. Prema Tumaču Geološke karte (HGI, 2009) u Vanjskim Dinaridima dominiraju mezozojski karbonati (vapnenci i dolomiti) koji predstavljaju krške oblike reljefa. Podređeno dolaze paleozojske i starije stijene. Liburnijske naslage i foraminiferski vapnenci paleogenske starosti zauzimaju značajan dio površine hrvatskog dijela Dinarida, u zoni koja se više-manje kontinuirano pruža od Istre pa sve do Konavala. Paleogenske stijene (karbonati, klastiti i fliš) mogu se naći i u Istri te u nekim unutrašnjim krškim poljima. Od neogenske starosti prisutne su miocenske naslage i klastične pliokvartarne naslage. U dinarskom su području deluvijalno-proluvijalni sedimenti kvartarne starosti posvuda zastupljeni. U Unutrašnjim Dinaridima razlikuju se zona Bosanskog fliša, ofiolitna zona središnjih Dinarida i Savska šavna zona. Vanjski Dinaridi se sastoje od tektonskih jedinica s istočnog dijela Jadranske mikroploče (Vlahović et al., 2005).

Mlađi sedimenti, neogenske i kvartarne starosti, dominiraju u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena. To su klastiti s vulkanitima, vapnenačko-klastične naslage, klastiti i ugljen neogenske starosti te naslage lesa, eolski pijesci, barske i aluvijalne naslage kvartarne starosti. U depresijama su istaloženi neogenski materijal koji varira u debljinama i dubinama. Najveće i najdublje depresije u tom području su Savska i Dravska depresija. Unutar Panonskog bazena nalaze se i nekoliko gora koje sadrže paleozojske i mezozojske stijene. Panonski bazen je karakterističan po značajnim potencijalom ugljikovodika, a glavni rezervoari ugljikovodika u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena nalaze se u Savskoj i Dravskoj depresiji. Savska depresija se nalazi duž samog ruba Panonskog bazena, dok se Dravska depresija nalazi sjevernije. Obje depresije su asimetričnog oblika sa strmim južnim stranama koji su izduženi u smjeru SZ-JI.

Dinaridi su planinski lanac koji se proteže oko 700 km u smjeru SZ-JI, a spajaju se s Južnim Alpama na sjeverozapadu i s Helenidima na jugoistoku. Tijekom migracije Jadranske mikroploče, koja se nalazila na SI strani Afričke ploče, prema sjeveroistoku i u koliziji s Europskom pločom, izdigli su se Dinaridi na sjeveroistoku i Alpe na sjeveru. Kao posljedica rotacijske komponente ovog gibanja došlo je do lateralnog istiskivanja u Istočnim Alpama, izdizanja Karpata i otvaranja Panonskog bazena. Konvergencija Jadranske i Europske ploče započela je sredinom jure čime je započelo i zatvaranje dijela Neotethys oceana. O tome svjedoči obdukcija ofiolita preko tektonskih jedinica na istočnom, pasivnom rubu Jadranske mikroploče sredinom i krajem jure (Pamić et al., 2002). Daljnji nastavak zatvaranja Neotethys oceana, kao posljedica subdukcije Jadranske mikroploče pod tektonske jedinice koje pripadaju Europskoj ploči, odnosno tektonskom bloku Tise, završen je duž Savske suturne

zone u Unutrašnjim Dinaridima krajem krede i početkom paleogena (Pamić, 2002; Schmid et al., 2008). Pretpostavlja se da je nakon zatvaranja Neotethysa duž Savske suturne zone, kao posljedica i dalje aktivne konvergencije između Jadranske i Europske ploče, došlo do postupnog napredovanja navlačnog čela prema jugozapadu u vanjski, distalni dio dinaridskog orogena, što je u konačnici dovelo i do stvaranja borano-navlačnog pojasa Vanjskih Dinarida (Schmid et al. 2008; Ustaszewski et al. 2008, 2010). Konvergencija između Jadranske i Europske ploče je i danas aktivna duž istočnog ruba Jadrana i u području Dinarida, s brzinom pomaka od 2-5 mm/god utvrđenom GPS mjerenjima (Grenerczy et al., 2005; Weber et al., 2010), koja se dijelom ostvaruje i pomacima po reversnim i „strike-slip“ rasjedima neujednačeno raspoređenim duž planinskog lanca, o čemu svjedoče podaci o seizmičnosti ovog područja (Kastelić et al., 2013).

Na suprotnoj strani od Dinarida nalazi se blok Tisa u Panonskom bazenu koji je dio Euroazijske ploče (Slika 1). Budući da se ovaj blok odvojio od europskog dijela vjerojatno u miocenu (Csontos & Vörös, 2004) može se prikazati kao Panonski tektonski segment. Dakle, Dinaridi su nastali sudarom Jadranske mikroploče i Panonskog tektonskog segmenta.

Jugozapadni dio Panonskog bazena graniči s Južnim Alpama na istoku i s Dinaridima na jugu. Duž Panonskog bazena, između Dinarida i bloka Tisa, postoji široka ofiolitna zona koja je podijeljena na usku Dinaridsku ofiolitnu zonu i na mnogo širu Savska zonu. One se razlikuju u njihovom porijeklu, stukturi i vremenu. Istrošeni ofioliti pojavljuju se u Dinaridskoj ofiolitnoj zoni. Ona je povezana s otvoreno-oceanskom Tetijskom platformom, gdje su jako istrošeni ofioliti prisutni u Vardarskoj zoni, povezanoj sa zalučnim bazenima. Ofioliti Dinaridske zone povezani su s jurskim olistostroma melanžom, gdje su najmlađa komponenta titonski vapnenci i s mezozojskom uslojenom radiolarit formacijom. Ofioliti Vardarske zone povezani su s tektoniziranim ofiolitnim melanžom, gdje su najmlađa komponenta kasno trijaski-paleogenski vapnenci. Ofioliti Dinaridske i Vardarske zone su pretežno tektoniti peridotita, zastupljeni uglavnom spinel-lercolitom u zapadnom i središnjem dijelu te istrošenim harzburgitom u jugoistočnim dijelovima (Pamić et al., 2002). Zone predstavljaju ostatke procesa subdukcije u geološkoj povijesti te je ovo područje zapravo zona koja povezuje Jadransku mikroploču i Euroazijski dio. Granice tih zona određene na temelju seizmičkog i gravimetrijskog modela (Šumanovac et al., 2009; Šumanovac, 2010).

Sa sjeverozapadne i sjeverne strane Tisa graniči s megatektonskom jedinicom ALCAPA (Alps-Carpathians-Pannonia). ALCAPA je kontinentalni fragment koji uključuje tektonske

jedinice Istočnih i Južnih Alpa te Zapadnih Karpata, a koje su također u najvećoj mjeri prekrivene miocenskim i plio-kvartarnim naslagama Panonskog bazena. Granicu između Tise i ALCAPA-e čini Zagorsko-srednjotransdanubijska smična zona u kojoj se nalaze tektonske jedinice izgrađene od stijena kontinentalne i oceanske kore. Zagorsko-srednjotransdanubijska zona nastala je zatvaranjem oceanskog prostora između ALCAPA-e i Tisije u paleogenu, a potom i lateralnom ekstruzijom prema istoku tijekom neogena (Schmid et al., 2008). Zagorsko-srednjotransdanubijsku zonu neki nazivaju i Srednje-mađarskom zonom (npr. Csontos & Nagymarosy, 1998 i tamo navedene reference). S istočne i jugoistočne strane Tisa graniči s Dacijom, kontinentalnim fragmentom koji se tijekom jure djelomično odvojio od Euroazijske ploče. Granicu između Dacije i Tisije obilježava ofiolitni kompleks koji je u literaturi često nazivan Istočnom Vardarskom zonom (Schmid et al., 2008). Uz južni rub Tise nalazi se Savsko-varcarska zona, gotovo 1000 km dug pojas koji se proteže od Zagreba prema Beogradu, a predstavlja ostatak zalučnog bazena Unutarnjih Dinarida (Pamić, 2002) zatvorenog tijekom gornje krede i paleogena (Schmid et al., 2008; Ustaszewski et al., 2010).

Glavna deformacijska faza Dinarida bila je u paleogenu, s konačnim izdizanjem u razdoblju oligocena i miocena, a svojstveno joj je skraćivanje u smjeru sjever–jug, odnosno sjeveroistok–jugozapad. To je uzrokovalo karakteristični sjeverozapadni smjer pružanja i jugozapadnu vergenciju rasjednih i boranih struktura (Tomljenović et al., 2008). U sjevernom dijelu Dinarida te su strukture promijenjene tijekom neogena u zapadno pružanje smjera istok–zapad s južnom vergencijom bora i rasjeda što je svojstveno susjednim Južnim Alpama. Za Dinaride su karakteristični reversni rasjedi, a dva najznačajna su Ćićarijski rasjed i Velebitski rasjed, smješteni na prednjem dijelu Jadranske mikroploče. Trst-Učka-Dugi Otok ili Ćićarijski rasjed nalazi se na rubu Vanjskih Dinarida. Njegova se lokacija može vrlo dobro definirati na kopnu, ali u Jadranskom moru njegov smjer nije precizno definiran i prema nekim autorima, proteže se do otoka Visa na južnom Jadranu. Drugi značajni reversni rasjed paralelan Dinaridima je Velebitski rasjed. Ovi rasjedi su dio zone reversnih i normalnih rasjeda, jugoistočno od Trsta koji leži uz Jadransku obalu, koje neki autori smatraju glavnim diskontinuitetima između Vanjskih Dinarida i Jadranske mikroploče (Aljinović et al., 1984). Međutim, nedavne studije pokazuju da postoji kontinuirana strukturna tranzicija između Jadranske mikroploče i Vanjskih Dinarida, koja se sastoji od niza nabora s manjim jugozapadno usmjerenim rasjedima (Poljak & Rižnar, 1996). Južni rubni rasjed Panonskog bazena smatra se granicom između Dinarida i Panonskog bazena (Prelogović et al., 1998).

Panonski bazen obilježen je širenjem struktura (Posgay et al., 1995). Ranije se podrijetlo Panonskog bazena gledalo u odnosu na subdukciju Karpata, u smislu zalučnog bazena (Royden et al., 1983). Mnogo studija bavilo se geodinamičkim razvojem Panonskog bazena, s konceptom “tektonike izvlačenja” (“escape tectonics”). Te su studije pokušavale objasniti mehanizam transporta Alpskih fragmenata koje u istaložene na sjeveru Panonskog bazena i unutarnjih Karpata (Csontos & Vörös, 2004). Također, Brückl et al. (2007, 2010) uzimaju u obzir “tektoniku izvlačenja” kod istraživanja istočnih Alpa i okolnih regija. Dando et al. (2011) predstavili su novi koncept o podrijetlu Panonskog bazena. Otkrili su velike brzine materijala koje se protežu istočno od Alpa ispod Panonskog bazena na dubini većoj od 300 km. Ispod Panonskog bazena, materijal velikih brzina je odvojen od litosfere i protumačen kao reliktna kontinentalna litosfera. Taj plašt smatra se mogućim uzrokom proširenja Panonskog bazena.

3. DUBOKA GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA

Postoji samo nekoliko starijih geofizičkih projekata koji su dali podatke o dubokoj strukturi litosfere u istraživanom području. Prvo istraživanje litosfere napravio je Andrija Mohorovičić na temelju podataka Pokupskog potresa 8. listopada 1909. godine. Zaključio je da postoji diskontinuitet u brzini rasprostiranja prostornih valova koji definira Zemljinu koru. Dubinu tog diskontinuiteta procijenio je na 54 km (Mohorovičić, 1910). Može se spomenuti metoda dubokog seizmičkog sondiranja, pomoću refrakcijske seizmike i gravimetrije (Gravimetrijska karta Jugoslavije, 1972). Općenito, gravimetrijska karta Bougerovih anomalija ukazuje na oblik Mohorovičićevog diskontinuiteta, gdje su najveći kontrasti gustoće na kontaktu kore i litosferskog plašta. Najmanja anomalija, u istraživanom području, pruža se pravcem SZ-JI ispod Dinarida gdje bi se mogla očekivati najveća dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta (Mohorovičić, 1910).

Seizmička istraživanja koja se prvenstveno baziraju na analizi seizmičkih brzina objavili su Dragašević & Andrić (1968), Aljinović (1984), Skoko et al. (1987). U okviru dubokog seizmičkog sondiranja kartirana su dva temeljna diskontinuiteta: Moho diskontinuitet i područje ispod sedimentnog pokrova (Dragašević & Andrić, 1968.; Skoko et al., 1987). Topografija Mohorovičićevog diskontinuiteta za šire područje Jadrana prikazana je u radu Skoke et al. (1987) gdje karta debljine Zemljine kore pokazuje da je kora deblja ispod Dinarida, gdje doseže maksimum na dubini od 45 km u južnim Dinaridima, a sve je tanja prema Panonskom bazenu i slabo deformiranom dijelu Jadranske mikroploče gdje je Mohorovičićev diskontinuitet na dubinama između 25 i 35 km. Sama kora u Dinaridima pokazuje snažan diskontinuitet na prosječnoj dubini oko 10 km, a u središnjim Dinaridima i do 15 km. Taj diskontinuitet gubi se prijelazom u Panonski bazen.

Nova generacija seizmičkih istraživanja započela je u 21. stoljeću eksperimentom ALP 2002, "Seismic Exploration of the Alpine Lithosphere" (Brückl et al., 2003; Šumanovac et al., 2009), nakon čega kao nastavak projekta ALP 2002, slijede pasivna seizmička istraživanja Alpske litosfere i gornjeg plašta ALPASS (Alpine Lithosphere and Upper Mantel Passive Seismic Monitoring, Mitterbauer et al. (2011)). Projekt ALPASS-DIPS (Alpine Lithosphere and Upper Mantel PASSive Seismic Monitoring – Dinarides – Pannonian Segment) predstavlja dio ALPASS projekta, a pokriva područje sjeverozapadnih Dinarida,

prijelaznu zonu prema Panonskom bazenu i jugozapadni dio Panonskog bazena (Orešković et al., 2009).

Projekt ALP 2002 bio je veliki međunarodni seizmički eksperiment čiji je primarni cilj bio dobivanje temeljnih podataka o dubokim strukturama u litosferi. Projekt obuhvaća područje Istočnih Alpa, sjeverozapadnih Dinarida, istočnog dijela Panonskog bazena i zapadnog dijela Bohemskog masiva (Brückl et al., 2003). Na najduljim profilima u projektu (Alp01 i Alp02) dobivena je struktura kore u istraživanom području. Profil Alp01 pruža se preko Alpa smjerom sjever-jug, dajući tako presjek područja koje pod utjecajem kontakta Euroazijske ploče i Jadranske mikroploče. Profil Alp02 pruža se od Istočnih Alpa do Panonskog bazena, pokazujući odnos između strukture kore i tektonski defomiranog dijela Panonskog bazena.

Šumanovac et al. (2009) odredili su strukturu kore na kontaktu sjeverozapadnih Dinarida i jugozapadnog Panonskog bazena po profilu koji se proteže u smjeru JZ-SI od poluotoka Istre na Jadranu do Dravske depresije na jugozapadu Panonskog bazena. Izrađen je geološki model koji se temelji na podacima refrakcijske seizmike i gravimetrije. Duž profila definirana su tri tipa kore: Dinaridska i Panonska kora koje su odvojene širokom prijelaznom zonom. Dinaridska kora je karakterizirana dubokim Mohorovičićevim diskontinuitetom i izraženim diskontinuitetom između gornje i donje kore koji polako nestaje u kori koja se naglo stanjuje prema prijelaznoj zoni. Dinaridska kora je dvoslojna: gornja kora je okarakterizirana malim seizmičkim brzinama, dok donja kora ima velike seizmičke brzine i veliku gustoću. Panonska kora je jednoslojna te je karakterizirana niskom seizmičkom brzinom i gustoćom, pogotovo u nekoliko gornjih kilometara kore (brzine P-valova manje od 6,2 km/s). Velike lateralne i vertikalne promjene u gustoći i seizmičkim brzinama mogu se naći u prijelaznoj zoni. U seizmičkom modelu, Mohorovičićeva dubina je najveća na području Dinarida, oko 40 km, dok je u području Panonskog bazena od 30 do 20 km, a najmanja je na SI kraju profila.

Na temelju dvodimenzionalnog gravimetrijskog modeliranja pomoću seta kalibriranih gustoća, Šumanovac (2010) je odredio strukturu kore u cijelim Dinaridima i okolnoj regiji, južnom dijelu Panonskog bazena i istočnom Jadranu. Također, izrađena je trodimenzionalna karta Mohorovičićeva diskontinuiteta, te je određena fragmentacija Moha u sjeveroistočnim Dinaridima.

Šumanovac (2015) je proveo gravimetrijsko modeliranje u središnjem Dinaridima kako bi utvrdio litosferni model Panonsko-Jadranske navlake. Dobiven je gravimetrijski model kojim su se potvrdila sva tri tipa kore u prethodnom istraživanju (Dinaridska, Panonska i

prijelazna zona). Dinaridska kora pripada Jadranu koja spada pod Afričku jedinicu, dok Panonska kora pripada Europskoj jedinici, odnosno bloku Tisiji. Između njih leži neočekivano široka prijeazna zona koja se može identificirati s ofiolitnom zonom. Guranje koje vrši Afrička ploča s jedne strane i izdizanje astenosfere te stanjivanje kore u Panonskom bazenu s druge strane, uzrokuje podvlačenje Jadranske mikroploče pod Panonski segment Euroazijske ploče te zadebljavanje kore i strmo tonjenje Jadranskog gornjeg plašta ispod Dinarida.

U okviru projekta ALPASS (Mitterbauer et al., 2011), istraženo je strmo tonjenje plitke ploče ispod Istočnih Alpa do dubine od 250 km, što je tumačeno kao donja europska litosfera odvojena od kore i podvučena tijekom post-kolizijske konvergencije između Jadrana i Europe. U rasponu od 350 do 400 km duboka se ploča proteže ispod Istočnih Alpa i Panonskog dijela te je interpretirana kao subdicirana litosfera Alpskog Thetysa. Dio ovog projekta bio je ALPASS-DIPS projekt (ALPASS - Dinarides-Pannonian Segment) koji pokriva područje SZ Dinarida i JZ dio Panonskog bazena. Prvenstveno, cilj projekta je proučavanje litosfernih procesa i struktura u ovom području, jer tektonski i strukturni odnosi još nisu potpuno razjašnjeni. Identificirane su dvije vrste karakterističnih funkcija prijemnika koje pripadaju Dinaridskoj i Panonskoj kori kako je definirano na profilu Alp07, dok u prijelaznoj zoni postoje oba tipa (Šumanovac et al., 2016). Određena su tri glavna diskontinuiteta kore za Dinaridski tip; baza sedimenata, diskontinuitet unutar kore i Mohorovičićev diskontinuitet, dok za Panonski tip postoje dva diskontinuiteta što ukazuje na jednoslojnu koru u Panonskom bazenu. Rezultati funkcija prijemnika uglavnom su utjecali na Mohorovičićevu dubinu ispod Dinarida koje su nešto veće u usporedbi s prethodnim rezultatima refrakcijskih mjerenja na profilu Alp07 (Šumanovac et al., 2009). Na temelju funkcija prijemnika i prethodnih podataka izrađen je geološki model.

Novija istraživanja seizmičkih valova teleseizmičkih potresa pomoću funkcija prijemnika ukazuju na dvoslojnu koru i moguće još dublji Mohorovičićev diskontinuitet u središnjem dijelu Dinarida. Analiza funkcije prijemnika je korištena za određivanje dubina Mohorovičićeva diskontinuiteta na seizmičkim postajama duž jadranske obale (Stipčević et al., 2011) koji dobivaju anomalno velike vrijednosti dubina Mohorovičićeva diskontinuiteta u odnosu na sve ostale rezultate, u Istri (Orešković et al., 2011) te u Panonskom bazenu (Hetényi & Bus, 2007). Rezultati modeliranja funkcija prijemnika na osnovi tih istraživanja ukazuju na veće vrijednosti debljine kore u središnjim i južnim Dinaridima (>50km), stanjivanje kore prema sjeveru prije dosezanja minimuma u području Lika–Velebit (~40km), pa ponovo povećavanje debljine kore u sjeverozapadnim Dinaridima prema Alpama.

Brojne studije čiji je cilj definiranje strukture litosfere, a koje su temeljene na seizmičkoj tomografiji pokrivale su područje istraživanja djelomično ili potpuno. Bijwaard i Spakman (2000) primijenili su nelinearnu tomografsku inverziju na globalnoj razini. Zhu et al. (2012) pridodali su tomografiju u istraživanju kako bi se otkrila struktura Europskog gornjeg plašta. Provedena su istraživanja na regionalnoj razini koja pokrivaju dijelove Europe (Koulakov et al., 2009) i alpsko-mediteranske regije (Piromallo & Morelli, 2003). Područje istraživanja djelomično je obuhvaćeno u radovima u kojima je primjenjivana teleseizmička tomografija u Alpskom području (Mitterbauer et al., 2011) i Karpatsko-panonskoj regiji (Dando et al., 2011; Ren et al., 2012).

4. IZVORI PODATAKA

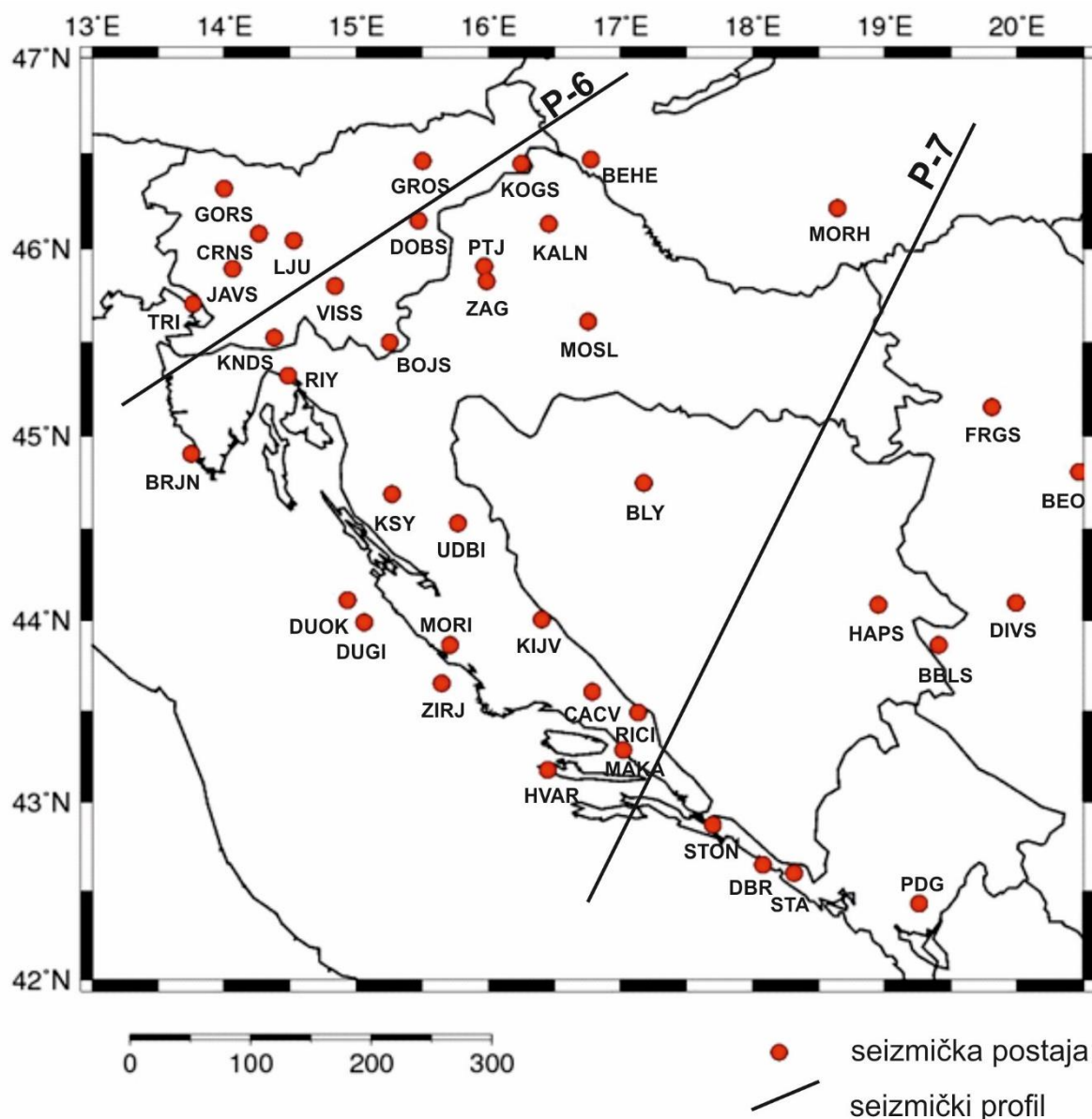
Podaci o dalekim potresima prikupljeni su preko biltena Međunarodnog seizmološkog centra (International Seismological Centre – ISC Bulletin) za razdoblje od 24 mjeseca, od 2014. do 2015. godine. Koristeći online pretraživanje internet stranice možemo pristupiti svim podacima ISC Bulletin.

Kao izvori podataka koji su prikupljeni na stanicama poslužili su Orfeus arhiva i baza podataka Hrvatske seizmološke službe. Seizmološke postaje sastoje se od širokopojasnih, trokomponentnih digitalnih seizmografa s 24-bitnim digitalizatorima. EIDA je integrirana europska baza podataka unutar ORFEUS-a (Observatories & Research Facilities for European Seismology) koja omogućuje sigurno arhiviranje seizmičkih podataka valnog te osigurava transparentan pristup arhivima istraživačkih zajednica. ORFEUS je neprofitabilna zaklada za koordinaciju i promicanje digitalne, širokopojasne seizmologije na europskom i mediteranskom području (<http://www.orfeus-eu.org/data/eida>). Mreže i stanice koje pridonose bazi podataka EIDA-e navedene su na popisu EIDA mreže. ORFEUS baza podataka svakodnevno ažurira kartu stanica.

Podaci preuzeti preko ORFEUS arhive bili su kontinuirani podaci valnih oblika s frekvencijom od 1 do 100 očitavanja po sekundi i iznad. Podaci su preuzeti uglavnom za postaje u Sloveniji, Srbiji, Crnoj Gori i Bosni i Hercegovini, a zabilježeni su seizmičkim senzorima brzina i akcelerometrima.

Stalne postaje, koje se nalaze u Hrvatskoj, opremljene su Güralp trokomponentnim širokopojasnim seizmometrima. Izlaz brzine bio je od 0.0083 Hz (ili 0.017 Hz ovisno o tipu instrumenta) do 50 Hz. Intervali zapažanja bili su između 0.01 i 0.05 s.

Korišteno je ukupno 40 seizmoloških stanica iz Hrvatske, Slovenije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Srbije i Mađarske (slika 4-1). Prostorna raspodjela stanica je dobra u Sloveniji i duž Jadranske obale, ali je jako loša na području Bosne i Hercegovine. Samo su dvije stanice korištene iz BiH, jer se do podataka ostalih 6 stanica nije uspjelo doći. Prosječna udaljenost stanica je 55 km.



Slika 4-1. Položaji i nazivi seizmičkih stanica, te profila P-6 i P-7

U obzir su uzeti daleki potresi epicentralne udaljenosti u rasponu od 30° do 100° od središta rasporeda seizmičkih stanica (tj. teleseizmički događaji). Stanice s epicentralnom udaljenošću od 95° do 100° uzrokuju probleme sa softverom u kojem se računa tomografska inverzija. Softver prestane računati nakon njihovog ubacivanja pa su te stanice izbačene. Stoga su za daljnju obradu podataka odabrani teleseizmički događaji u rasponu od 30° do 95° epicentralne udaljenosti od središta rasporeda seizmičkih stanica s magnitudom većom od 6.0 prema Richteru.

U tablici 4-1 nalaze se podaci o svim obrađenim dalekim potresima. Zelenom bojom označeni su potresi obrađeni u ovom radu, dok su žutom bojom označeni ostali potresi. Nakon kvalitete podataka, od ukupno 120 potresa, u svrhu računanja seizmičkih reziduala P-valova uzeto je 90 udaljenih potresa . Glavni kriterij za odabir događaja bio je broj postaja koje bilježe potrese te dobar omjer signal-šum. Crvenom bojom su označeni potresi koji se nisu uzimali u daljnju obradu. Kako bi se uklonio visokofrekventni šum, svi su tragovi filtrirani niskopropusnim filtrom na 0,5 ili 1 Hz.

Tablica 4-1. Podaci o svim potresima u epicentralnim udaljenostima od 30° do 100°

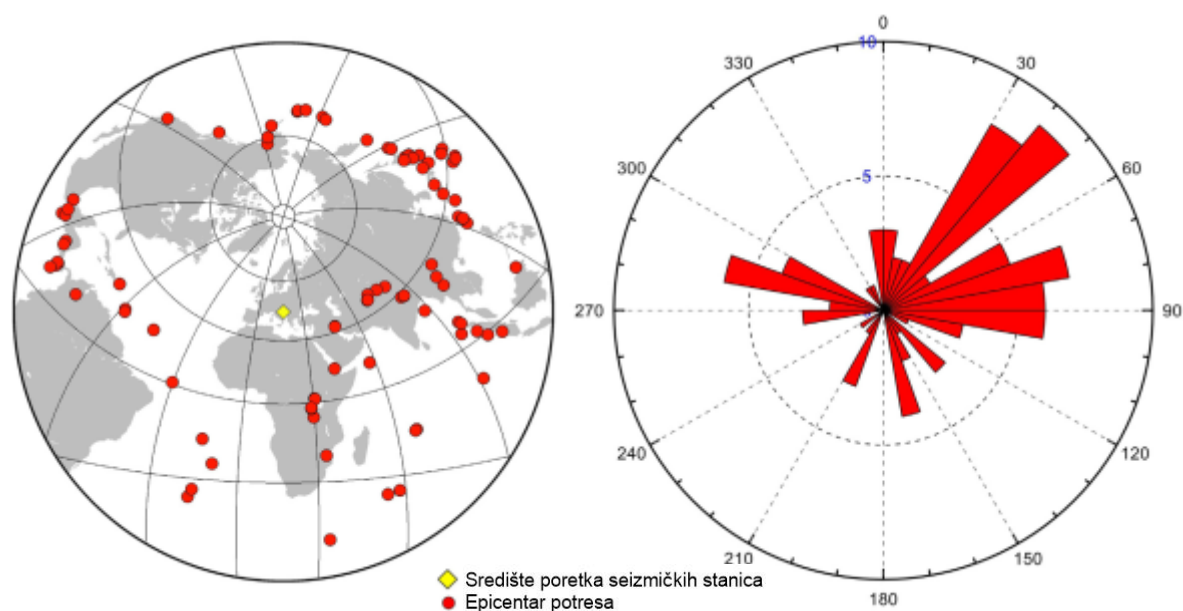
	Datum	Vrijeme	Širina	Duljina	Dubina	Mag	AZ(°)
2	1.13.2014	04:01:03.26	19.04	-66.81	20	6.4	278.4906871
3	41664	05:14:18.52	-7.98	109.27	66	6.1	
4	2.12.2014	09:19:49.06	35.91	82.59	10	6.9	76.00260716
5	2.18.2014	09:27:13.12	14.67	-58.93	14.83	6.5	269.6175073
6	2.26.2014	21:13:40.13	53.62	-171.83	265	6.1	4.457356166
7	3.2.2014	09:37:54.83	12.55	-87.69	60	6.2	288.2006013
8	3.2.2014	20:11:23.43	27.43	127.37	119	6.5	55.91496551
9	3.2.2014	22:17:14.77	14.21	-93.15	20.53	6	293.2439664
10	3.10.2014	05:18:13.43	40.83	-125.13	16.44	6.8	331.3362382
11	3.13.2014	17:06:50.77	33.68	131.82	79	6.3	48.90823489
12	3.15.2014	23:51:33.04	-5.58	-80.96	29	6.3	
13	3.21.2014	13:41:07.86	7.77	94.31	10	6.4	92.55697627
14	4.2.2014	16:13:26.73	7.94	-82.34	25	6	281.209948
15	4.10.2014	23:27:45.92	12.45	-86.37	13	6.1	287.1927075
16	4.11.2014	20:29:12.97	11.64	-85.88	135	6.6	286.2880057
17	4.15.2014	03:57:02.15	-53.53	8.7	11.74	6.9	
18	4.18.2014	14:27:24.99	17.4	-100.96	24	7.2	
19	4.24.2014	03:10:12.88	49.85	-127.44	11.4	6.6	336.7736567
20	5.4.2014	20:18:24.68	34.91	139.42	153	6	43.15092925
21	5.5.2014	11:08:43.42	19.66	99.67	6	6.1	79.90931387
22	5.8.2014	17:00:14.81	17.23	-100.75	17.09	6.4	
23	5.10.2014	07:36:01.22	17.22	-100.81	23	6	
24	5.13.2014	06:35:24.24	7.21	-82.3	10	6.5	280.6741946
25	5.15.2014	10:16:42.02	9.38	122.06	15.46	6.3	
26	5.18.2014	01:02:32.61	4.25	92.76	35	6	96.21847015
27	5.21.2014	16:21:54.35	18.2	88.04	47.23	6	89.05984103
28	5.31.2014	11:53:46.47	18.79	-107.47	5	6.2	
29	6.14.2014	11:10:59.85	-10.12	91.09	4	6.5	107.4204717
30	6.23.2014	20:53:09.70	51.85	178.74	109	7.9	10.43342049
31	6.23.2014	21:11:40.52	51.96	178.46	102.85	6	10.58121105
32	6.23.2014	21:30:46.18	51.94	178.43	101.88	6	10.60372486

33	6.23.2014	22:29:51.81	51.96	178.58	106.6	6	10.50808258
34	6.24.2014	03:15:35.49	52.2	176.7	4	6.3	11.59554527
35	6.29.2014	05:56:31.72	24.39	142.63	48	6.2	
36	6.30.2014	19:55:32.39	28.34	138.84	511	6.2	47.4034866
37	7.5.2014	09:39:27.79	1.93	96.94	20	6	94.83726467
38	7.7.2014	11:23:54.78	14.72	-92.46	53	6.9	293.0852317
39	7.11.2014	19:22:00.82	37.01	142.45	20	6.5	39.92415456
40	7.17.2014	11:49:33.93	60.3	-140.34	10	6	347.7684396
41	7.19.2014	14:14:01.85	11.74	57.64	10	6	119.7972834
42	7.20.2014	18:32:47.79	44.64	148.78	61	6.2	31.70572195
43	7.25.2014	10:54:49.72	58.31	-136.96	10	6.1	345.3973832
44	7.27.2014	01:28:37.44	23.72	-45.58	10	6	267.6933431
45	7.29.2014	10:46:14.70	17.68	-95.65	107	6.3	297.3417134
46	8.3.2014	08:30:13.57	27.19	103.41	12	6.2	71.56189291
47	8.10.2014	03:43:17.24	41.16	142.13	41	6.1	37.75854998
48	8.18.2014	02:32:05.35	32.7	47.7	10.2	6.2	106.093652
49	8.18.2014	18:08:22.75	32.58	47.7	5	6	106.2996808
50	8.24.2014	10:20:44.07	38.22	-122.31	11.12	6.02	328.2050504
51	8.24.2014	23:21:45.52	-14.6	-73.57	101	6.8	
52	9.6.2014	19:22:59.04	18.75	-107.05	17	6.2	
53	9.25.2014	17:51:17.00	61.94	-151.82	108.9	6.2	353.8204459
54	10.7.2014	13:49:39.72	23.38	100.47	8.51	6.1	76.47548207
55	10.8.2014	02:40:53.11	23.84	-108.33	10	6.1	
56	10.11.2014	02:35:47.48	41.03	143.16	22	6.1	37.18595346
57	10.14.2014	03:51:34.46	12.53	-88.12	40	7.3	288.4938864
58	11.17.2014	16:52:46.85	-46.35	33.8	10	6.1	167.5302577
59	11.22.2014	13:08:18.42	36.64	137.89	9	6.2	43.12873778
60	12.2.2014	05:11:31.00	6.16	123.13	614	6.6	
61	12.6.2014	17:21:49.02	7.98	-82.73	15	6	281.5156363
62	12.7.2014	21:16:35.74	13.67	-91.47	32	6.1	291.6687497
63	12.8.2014	08:54:52.52	7.94	-82.69	20	6.6	281.4593544
64	12.10.2014	21:03:39.26	25.54	122.45	256	6.1	60.48627118
65	12.29.2014	09:29:37.39	8.63	121.52	8	6.1	
66	1.7.2015	05:07:07.51	5.9	-82.66	8	6.5	280.0213279
67	2.13.2015	18:59:12.23	52.65	-31.9	16.68	7.1	300.7006646
68	2.13.2015	20:06:32.29	22.64	121.42	29.67	6.2	63.15884989
69	2.16.2015	23:06:28.23	39.86	142.87	23	6.7	38.03474464
70	2.20.2015	04:25:23.38	39.82	143.59	10	6.2	37.59559795
71	2.21.2015	10:13:53.29	39.82	143.49	7	6	37.65985763
72	2.22.2015	14:23:12.73	18.68	-106.85	5	6.2	
73	3.3.2015	10:37:30.05	-0.78	98.72	28	6.1	95.46125276
74	3.10.2015	20:55:44.37	6.78	-72.99	155	6.2	273.7696844
75	3.23.2015	04:51:38.01	-18.35	-69.17	130	6.4	
76	4.20.2015	01:42:58.38	24.2	122.32	29	6.4	61.48602679
77	4.20.2015	11:45:13.43	24.08	122.45	29	6	61.47957374
78	4.20.2015	12:00:00.06	24.04	122.46	29	6.1	61.49995426
79	4.24.2015	13:56:15.47	51.62	-130.78	10	6.2	339.4782875

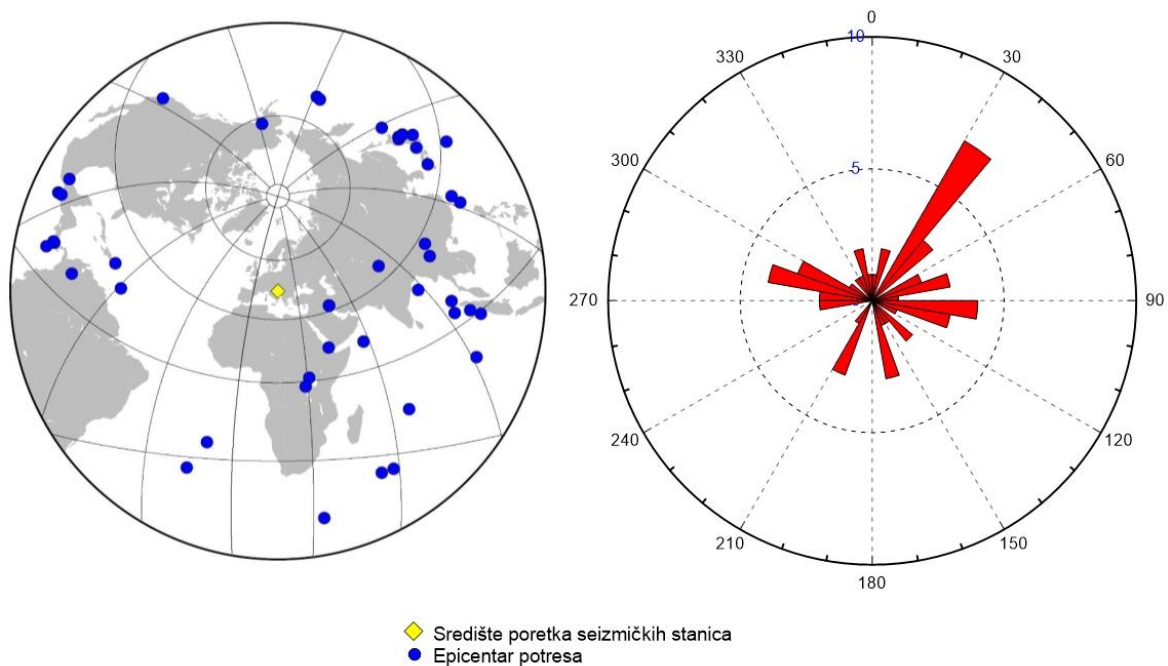
80	4.25.2015	06:11:26.27	28.15	84.71	15	7.8	82.60477032
81	4.25.2015	06:15:22.91	27.63	85.54	10	6.1	82.55300332
82	4.25.2015	06:45:20.53	28.18	84.8	10	6.6	82.51761734
83	4.26.2015	07:09:10.96	27.79	86.04	24.79	6.7	82.07742755
84	5.10.2015	21:25:46.44	31.24	142.02	6	6	43.47764716
85	5.12.2015	07:05:19.73	27.81	86.07	15	7.3	82.03924982
86	5.12.2015	07:36:54.49	27.62	86.16	15	6.3	82.15766137
87	5.12.2015	21:12:58.89	38.91	142.03	35	6.8	39.11640587
88	5.15.2015	20:26:56.87	-2.54	102.22	151	6	94.1901951
89	5.24.2015	04:53:23.63	-16.86	-14.17	10	6.3	210.8522437
90	5.29.2015	07:00:09.00	56.59	-156.43	72.6	6.8	355.5190125
91	5.30.2015	11:23:02.10	27.84	140.49	664	7.8	46.50944529
92	5.30.2015	18:49:07.27	30.78	142.97	5.74	6.2	43.06172229
93	6.4.2015	23:15:43.90	5.99	116.54	10	6	77.99097309
94	6.8.2015	06:01:08.30	41.56	142.03	42	6.1	37.58954104
95	6.17.2015	12:51:32.79	-35.36	-17.16	10	7	206.2537322
96	6.23.2015	12:18:30.27	27.74	139.72	460	6.5	47.12315073
97	7.3.2015	01:07:47.29	37.46	78.15	20	6.4	76.74632604
98	7.3.2015	06:43:21.53	10.17	125.89	32	6.1	
99	7.7.2015	05:10:28.12	43.91	147.97	49	6.3	32.59211061
100	7.16.2015	15:16:33.33	13.88	-58.54	17.03	6.5	268.7253347
101	7.27.2015	04:49:46.40	52.38	-169.45	29	6.9	3.109861634
102	7.29.2015	02:35:59.00	59.89	-153.2	119.3	6.3	354.1896894
103	8.13.2015	10:39:53.84	-37.02	78.06	10	6	
104	9.1.2015	15:25:09.52	31.18	141.6	8	6	43.8077639
105	9.10.2015	10:26:44.80	52.1	-169.53	20	6	3.176961683
106	9.13.2015	08:14:12.24	25.14	-109.43	10	6.7	312.0378363
107	9.18.2015	15:59:42.64	15.28	-45.99	10	6	260.4863993
108	10.14.2015	05:43:08.30	48.86	156.23	12	6	25.10286116
109	10.23.2015	01:40:06.34	-54.23	6.16	11	6	
110	10.23.2015	04:04:18.14	-45.81	37.17	10	6	165.1277751
111	10.26.2015	09:09:32.76	36.44	70.72	212.52	7.5	82.33258822
112	11.8.2015	16:47:02.16	6.84	94.65	10	6.6	92.98628754
113	11.9.2015	16:03:46.07	51.64	-173.07	15	6.5	5.412885125
114	11.13.2015	20:51:31.02	30.99	128.89	12	6.7	52.565977
115	11.24.2015	22:45:38.85	-10.54	-70.96	605.72	7.6	
116	11.24.2015	22:50:53.77	-10.05	-71.02	611.71	7.6	
117	11.26.2015	05:45:18.30	-9.19	-71.29	599.35	6.7	
118	12.7.2015	07:50:07.53	38.23	72.75	33	7.2	78.81718994
119	12.17.2015	19:49:53.15	15.8	-93.63	85.95	6.6	294.6470586
120	12.20.2015	18:47:35.53	3.64	117.63	6.93	6.1	
121	12.25.2015	19:14:47.17	36.49	71.13	206	6.3	82.01934862

Idealna prostorna distribucija dalekih potresa bila bi jednolika s obzirom na povratne azimute, odnosno takva da se potresi pojavljuju na svim stranama svijeta, te bi rozeta dijagram trebao prikazivati krug. Međutim, uvijek se događa da su potresi brojniji u nekim povratnim azimutima, ovisno o položaju seizmičkog rasporeda s obzirom na područja u kojima su potresi češći. Povratni azimut je azimut mjeren od stanice prema izvoru potresa.

Na slici 4-2 prikazana je prostorna raspodjela svih dalekih potresa koji su se koristili u istraživanju, dok su na slici 4-3 prikazani samo oni daleki potresi koji su obrađeni u ovom radu.



Slika 4-2. Epicentri svih teleseizmičkih događaja korištenih u istraživanju i raspodjela prema povratnom azimutu (Šumanovac et al., 2017)



Slika 4-3. Epicentri teleseizmičkih događaja obrađenih u ovom radu i njihova raspodjela prema povratnom azimutu

U ovom slučaju, prostorna distribucija dalekih potresa nije jednolika. Sjeveroistočni i istočni daleki potresi dominiraju u odnosu na potrese s drugih strana svijeta. U usporedbi s istočnim i sjevernim dalekim potresima, zapadni daleki potresi učestalo pokazuju veći šum. Od spomenutih 90 dalekih potresa, nijedan nije bio južni potres. Stoga su, za računanje reziduala iz tog smjera, uzeti potresi iz vremenskog intervala od 2005. do 2015. godine. Na taj način dopunjeni su podaci iz južnog smjera i postignuta je povoljnija raspodjela. Koristili su se podaci južnih dalekih potresa koji su zabilježeni samo na hrvatskim stanicama. U tablici 4-2 prikazani su podaci o dodatnim južnim potresima. Također, kao i u tablici 4-1, zelenom bojom su označeni daleki potresi obrađeni u ovom radu, a žutom svi korišteni u istraživanju dok su crvenom bojom označeni daleki potresi koji se nisu koristili u daljnjoj obradi. Iz južnog smjera je uzet manji broj potresa zbog iznimno velikog šuma.

Tablica 4-2. Podaci o naknadno dodanim južnim dalekim potresima

	Datum	Vrijeme	Širina	Duljina	Dubina	AZ(°)
122	12.1.2005.	8:40:1.74	-0.883	-21.119	10	227.6631718
123	16.2.2005.	20:27:53.75	-35.79	-16.431	10	206.6208649
125	5.12.2005.	12:19:53.73	-6.242	29.6812	15.8	163.9250968
126	22.2.2006.	22:19:9.32	-21.31	33.5493	16.4	163.3116008
127	19.2.2007.	2:33:43.93	1.6445	30.7077	29	160.2625721
128	28.3.2007.	21:17:11.9	-6.248	29.6826	14.3	163.9250047
129	3.7.2007.	8:26:0.93	0.72	-30.261	10	237.5660367
130	3.2.2008.	7:34:10.81	-2.391	28.8949	4.1	163.9325377
131	24.4.2008.	12:14:50.21	-1.153	-23.524	10	229.9012859
133	27.7.2008.	21:15:42.18	-0.249	-18.295	15.6	225.1303342
134	27.8.2008.	6:46:20.72	-10.7	41.4321	14.9	151.8457535
135	28.8.2008.	15:22:23.61	-0.025	-17.44	4.5	224.3576032
136	12.10.2009.	3:15:47.81	-17.18	66.6858	14.1	131.4753434
137	22.3.2011.	13:31:28.68	-33.12	-15.936	10	207.2950458
138	12.6.2011.	21:3:22.3	13.523	41.6994	3.2	138.071762
139	2.12.2011.	00:22:53.88	-34.02	58.0439	22	146.9751568
140	24.3.2012.	4:43:51.73	-20.13	14.4811	9.5	182.6166422
141	21.4.2012.	1:19:28.65	-35.33	-16.113	12	206.5631995
142	29.6.2012.	15:31:47.26	-24.74	-9.6814	14.2	205.1844472
143	26.7.2012.	5:33:33.86	-17.55	66.2905	16.2	132.008395
144	3.7.2013.	19:21:46.61	1.5496	30.8894	15.7	160.0443722
145	17.8.2013.	16:32:31.83	-34.89	54.1278	10.9	150.2518934
146	24.5.2015.	4:53:23.9	-16.8	-14.18	10	212.4256586
147	17.6.2015.	12:51:30.3	-35.41	-17.698	10	207.7215219
148	7.8.2015.	1:25:00.0	-2.041	28.925	14	163.7993996
149	24.11.2015.	20:45:0.59	0.0202	-17.843	0	224.8163744

5. SEIZMIČKA TOMOGRAFIJA

Elastični valovi putuju različitim brzinama kroz različite stijene pa se granice brzina najčešće podudaraju s geološkim granicama. No, seizmičke brzine ovise i o stanju stijena, njihovoj raspucalosti i šupljikavosti pa dolazi do znatnih promjena brzina unutar iste vrste stijena. Mjerenjem vremena putovanja valova od izvora do stanica (seizmometara), smještenim na različitim udaljenostima od izvora dobiva se brzina rasprostiranja elastičnih valova kroz podzemlje (Šumanovac, 2012).

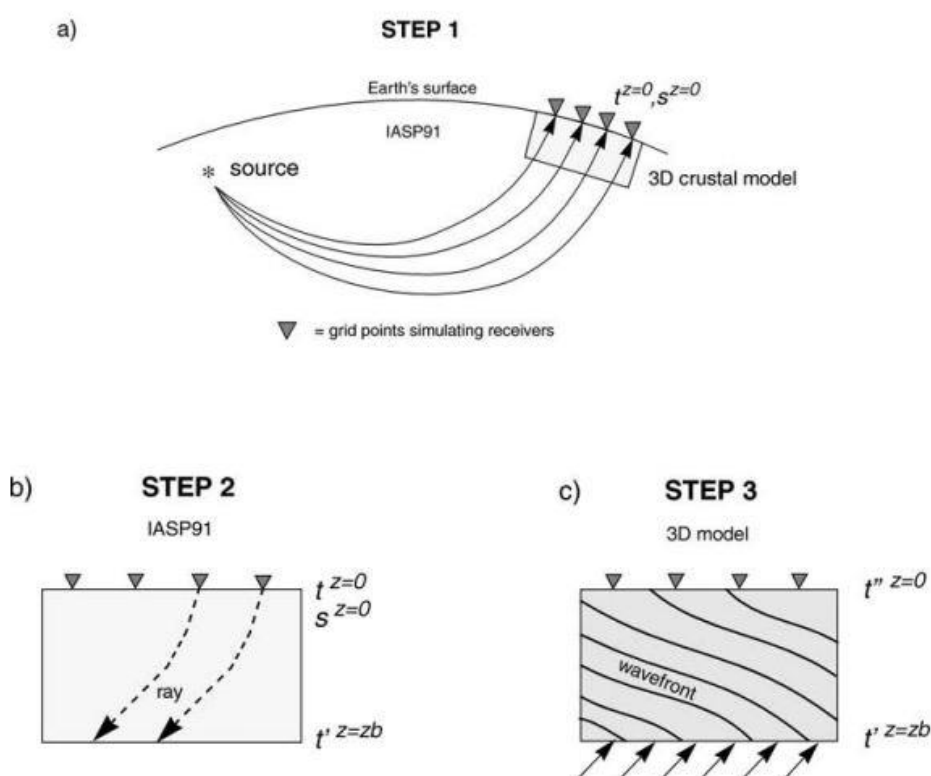
Metoda korištena u ovom radu naziva se seizmička tomografija. Njena glavna prednost je mogućnost trodimenzionalnog pokrivanja podzemlja što je bitno za ovo istraživanje, s obzirom kako se ovdje radi o tektonski i litosferski kompleksnom podzemlju. Tehniku kojom se ova metoda služi možemo opisati kao trodimenzionalno modeliranje distribucije brzina seizmičkih valova kroz Zemlju. Postoje tri vrste tomografije: bliski potresi, daleki potresi (teleseizmička tomografija) i zajednička tomografija.

Vrijeme putovanja seizmičkog vala od epicentra potresa do seizmografa definirano je raspodjelom seizmičkih brzina duž njegovog puta. Kada bi pretpostavili idealan, simetrično sferičan model Zemlje, raspodjela brzina bila bi radijalna. U stvarnosti, opažana vremena putovanja najčešće pokazuju mala odstupanja od izračunatih vremena za referentni model. Ta odstupanja nazivaju se reziduali vremena putovanja ili anomalije, te mogu imati više uzroka. Najizraženiji uzrok je da središte potresa nije na površini već može biti na dubini i do nekoliko stotina kilometara. Tako su precizno određivanje koordinata epicentra te dubine i vremena pojave potresa nužni za seizmičku tomografiju. Uzrok je također i lokalna raspodjela seizmičkih brzina neposredno ispod seizmičkih stanica.

Postoje uzdužne promjene brzina primarnih i sekundarnih valova na svakoj dubini. Ove promjene se izražavaju u postocima od prosječne brzine pretpostavljene za tu dubinu. Ako na određenoj dubini seizmički val prođe kroz područje malo veće brzine od prosječne, stići će malo prije od očekivanog do prijarnika. Odnosno, ako seizmički val prođe kroz područje malo manje brzine od prosječne, stići će malo kasnije od očekivanog do prijarnika. Ovo omogućava klasifikaciju vremena nailazaka na „ranije“ i „kasnije“, ovisno o tome da li se val prostirao kroz područje „brže“ ili „sporije“ u odnosu na pretpostavljeni globalni model. Brzina seizmičkog vala određena je elastičnim parametrima i gustoćom, koji su najčešće pod

utjecajem temperature. Anomalije brzina, registrirane pomoću seizmičke tomografije, u globalnom mjerilu najčešće su interpretirane u vidu abnormalnih temperatura ili krutosti. „Sporo“ područje povezano je s nadprosječnom temperaturom i manjom krutošću, dok je „brzo“ područje povezano s ispodprosječnom temperaturom i većom krutošću (Lowrie, 1997).

Waldhauser et al. (2002) opisali su seizmičku tomografiju kroz tri koraka korištenjem standardnog modela brzina IASP91 i 3-D modela Zemlje (slika 5a). U prvom koraku računaju se vremena putovanja t i sporosti s za proizvoljne izvore na Zemljinoj površini koristeći referentni model brzina IASP91. Kako bi se odredila lokacija gdje su sporosti određene dubini (baza z_b 3-D modela), zrake se prate natrag kroz referentni model Zemlje do baze lokalnog modela koristeći Snellov zakon (slika 5b). Ovime dobivamo ulazne točke (za 3-D model) i odgovarajuća vremena putovanja t' teleseizmičkog signala u bilo koju 3-D strukturu. U trećem koraku (slika 5c) sferična valna fronta dobivena u drugom koraku proširena je od baze lokalnog modela do njegove površine. Vremena putovanja t'' kroz heterogenu 3-D strukturu brzina izračunata su metodom konačnih razlika (eng. finite differences) prema Vidale (1990) uz izmjene koje su uveli Hole & Zelt (1995).



Slika 5-1. Koraci pri rješavanju problema teleseizmičke tomografije korištenjem standardnog modela brzina IASP91 i 3-D modela Zemlje

6. TELESEIZMIČKI REZIDUALI

Relativni reziduali koriste se kao ulazni podaci za inverziju seizmičke tomografije. Svrha korištenja relativnih, a ne apsolutnih reziduala je smanjenje utjecaja pogrešaka i efekta heterogenosti plašta izvan modela (Dando et al., 2011). Relativni rezidual za stanicu i iz odabranog potresa izračunava se kao razlika između apsolutnog reziduala (a_i) i srednje vrijednosti reziduala za odabrani potres (a_{av}):

$$r_i = a_i - a_{av} . \quad (6-1)$$

Apsolutni reziduali računaju se kao razlika između promatranog (t_i) i pretpostavljenog vremena putovanja (a_{ip}):

$$a_i = t_i - a_{ip} . \quad (6-2)$$

Srednja vrijednost reziduala računa se po formuli:

$$a_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (6-3)$$

gdje je n broj promatranih nailazaka (stanica) za odabrani potres.

Za procjenu relativnih reziduala razvijeno je nekoliko metoda, a glavna razlika je u primijenjenoj tehnici za poravnavanje skupa snimljenih tragova. Sve one koriste činjenicu da je za udaljene događaje oblik valne fronte vrlo sličan na svim lokalnim stanicama mreže.

Za izračunavanje relativnih reziduala, u ovom istraživanju, koristila se metoda slaganja tragova (eng. adaptive stacking technique). Metoda je prvi put primijenjena prije pedeset godina (Jansson & Husebye, 1966; Gangi & Fairborn, 1968). Rawlinson i Kennett (2004) poboljšali su metodu slaganja tragova koja je danas među nekoliko metoda koje su u uobičajenoj upotrebi.

Metoda pruža učinkoviti i brz postupak za procjenu rasporeda reziduala preko mreže seizmičkih stanica. Pomoću predviđanja iz nekog modela može se postići približno poravnanje tragova, koji se potom stapaju na oblik referentnog traga. Svaki trag stanice,

nakon iterativnog poboljšanja poravnanja, uspoređuje se s referentnim tragom. To može dovesti do izravne procjene reziduala iz modela brzina. Metoda je brza, tolerantna na šum i promjene valnog oblika. Glavna razlika od ranijih oblika je ta da metoda automatski uzima u obzir nepouzdanost svakog izračunatog reziduala, odnosno ovaj pristup ima prednost generiranja automatskih procjena pogrešaka (Rawlinson and Kennett, 2004; Rawlinson et al., 2006).

Započinje se odabirom segmenta svakog traga oko faze interesa, a zatim se postiže približna usklađenost tragova primjenom vremenskih pomaka, u odnosu na referentnu točku. Za teleseizmičke primjene, referentni model brzina ak135 pokazao se vrlo učinkovit za odabir odgovarajućeg intervala od svakog traga, tipično 20-40 s, i za postizanja početnog poravnanja. Može se odabrati bilo koja faza, a u istraživanju se koristila P-faza. Nakon inicijalnog poravnanja korištenjem seta vremenskih pomaka izvedenih iz referentnog modela izračunavaju se linearni i kvadratni tragovi za dio prozora koji uključuje željeni dio tragova pridruženih s odabranom fazom. Linearni trag predstavlja procjenu tipičnog valnog oblika preko polja, a kvadratni trag je pokazatelj širenja u poravnanju između postaja.

Rezultat metode je dobivanje reziduala za svaku postaju u odnosu na predviđenja propagacijskog modela. Kada se, na primjer koristi ak135 model predviđanja za teleseizmičke faze, onda se dobivaju uzorci reziduala od ak135 modela preko niza postaja od pomaka potrebnih za postizanje poravnanja svih signala (Rawlinson and Kennett, 2004).

Izračunavanje reziduala u ovom istraživanju rađeno je u operacijskom sustavu Linux. Postupak se može prikazati kroz četiri koraka:

- U prvom koraku izračunava se teoretsko vrijeme putovanja na svakoj stanici, za odabrani potres, korištenjem ak135 modela brzina (Kennett et al., 1995). Ulazna datoteka mora imati podatke o nazivima i koordinatama seizmičkih postaja, te podatke o teleseizmičkim događajima (koordinate i dubinu). Izlazna datoteka pokazuje teoretsko vrijeme prvih nailazaka (vrijeme iz aktive modela) u sekundama, koordinate i nazive stanica. Zatim, dodavanjem vremena kada se dogodio potres, izračunava se vrijeme na svim stanicama. Na nekim stanicama nisu zabilježeni prvi nailasci, pa su za te stanice tragovi prikazani kao ravna crta na slikama tragova prije poravnanja i nakon poravnanja. Isti postupak se radi za svaki potres.

- U drugom koraku bira se dio traga u kojem se predviđa prvi nailazak. Trag se najprije reže 20 sekundi prije i 20 sekundi poslije izračunatog vremena, a zatim se reže 10 s prije i 20 s nakon te se dobiva duljina traga od 30 s. U programu za rezanje tragova, postavljaju se i filtri. Korišteni su niskopropusni LP (eng. Low Pass) filtri koji propuštaju signale s frekvencijom nižom od zadane. Postupak se ponavlja za svaku stanicu, za sve potrese.
- Treći korak je procjena relativnih reziduala i njihovih pogrešaka koristeći metodu slaganja tragova. Referentni modela brzina ak135 koristi se za oblikovanje približnog usklađivanja tragova. Dio tragova se slaže kako bi se dobio referentni trag (takozvani linearni i kvadratni trag) koji se zatim uspoređuje sa svakim snimljenim tragom. Da bi se poboljšalo poravnanje tragova koristi se iterativni postupak. U ulaznu datoteku se unese broj iteracija, namjesti se interval u kojem će se vidjeti tragovi i naziv događaja. Rezultat svake iteracije je novi referentni trag i poboljšane vrijednosti reziduala. U izlaznoj datoteci dobije se iznos reziduala i njihove pogreške za svaku stanicu.
- U većini slučajeva procijenjeni reziduali nakon trećeg koraka su spremni za daljnju obradu. Međutim, u nekim slučajevima je potrebno napraviti promjene u ulaznim podacima nakon vizualnog pregledavanja konačnih složenih seizmograma i procijenjenih pogrešaka. Stoga, četvrti korak uključuje dvije mogućnosti mijenjanja ulaznih podataka. Prva mogućnost je eliminirati određene tragove ako je valni oblik jednog ili više tragova različit od valnog oblika ostalih tragova. Druga mogućnost je uzeti u obzir da duljina i položaj tragova koji su slagani nisu prikladno odabrani. U ovom istraživanju duljina traga je 30 s, ali dio određen za slaganje je oko 10 s. Nakon promjene tih vrijednosti u procesu slaganja može se dobiti bolje usklađivanje tragova i manja pogreška procijenjenih reziduala.

7. REZULTATI

Izračunati su teleseizmički reziduali za 74 daleka potresa. Budući da su neki daleki potresi odstupali od epicentralne udaljenosti 30° - 90° , a neki događaji bili opterećeni šumom zbog kojih se nisu vidjeli prvi nailasci, u ovom radu je korišteno ukupno 54 događaja za daljnju obradu.

Za prikaz metode slaganja tragova bit će navedeno nekoliko događaja sa različitih strana svijeta. Uzorci reziduala prikazani su žutom i zelenom bojom, gdje zeleni kružići predstavljaju ranije nailaske, a žuti kasnije nailaske (slike 7-1 do 7-8).

Na slici 7-1 prikazan je daleki potres koji se dogodio na sjeveru 11.10.2014. s magnitudom 6.1 prema Richteru. Slika 7-1a prikazuje tragove prije usklađivanja dobivene ak135 modelom, a slika 7-1b tragove nakon poravnanja. Uočava se oštar prvi nailazak valova i tragovi su usklađeni. Slikom 7-1c prikazano je područje istraživanja s izračunatim vrijednostima reziduala. Reziduali imaju male vrijednosti, osim stanice MAKa koja pokazuje veće vrijednosti. Raniji nailasci javljaju se u području Vanjskih Dinarida, dok se kasniji nailasci javljaju u Unutarnjim Dinaridima i Panonskom bazenu. Stanica BEO odskaka od ostalih stanica iz tog područja; ima veće vrijednosti i pokazuje raniji nailazak. Na sljedećem primjeru potresa sa sjevera (slika 7-2) slabije se vide prvi nailasci, a jače kasniji. Sjeverni daleki potres dogodio se 16.2.2015. s magnitudom 6.7 prema Richteru. Stanica DBRK ima puno veću vrijednost reziduala u odnosu na sve ostale rezidualne, a stanica BEO je i u ovom primjeru anomalna (slika 7-2c). Raniji nailasci javljaju se duž Jadranske obale, dok se u unutrašnjosti javljaju kasniji nailasci.

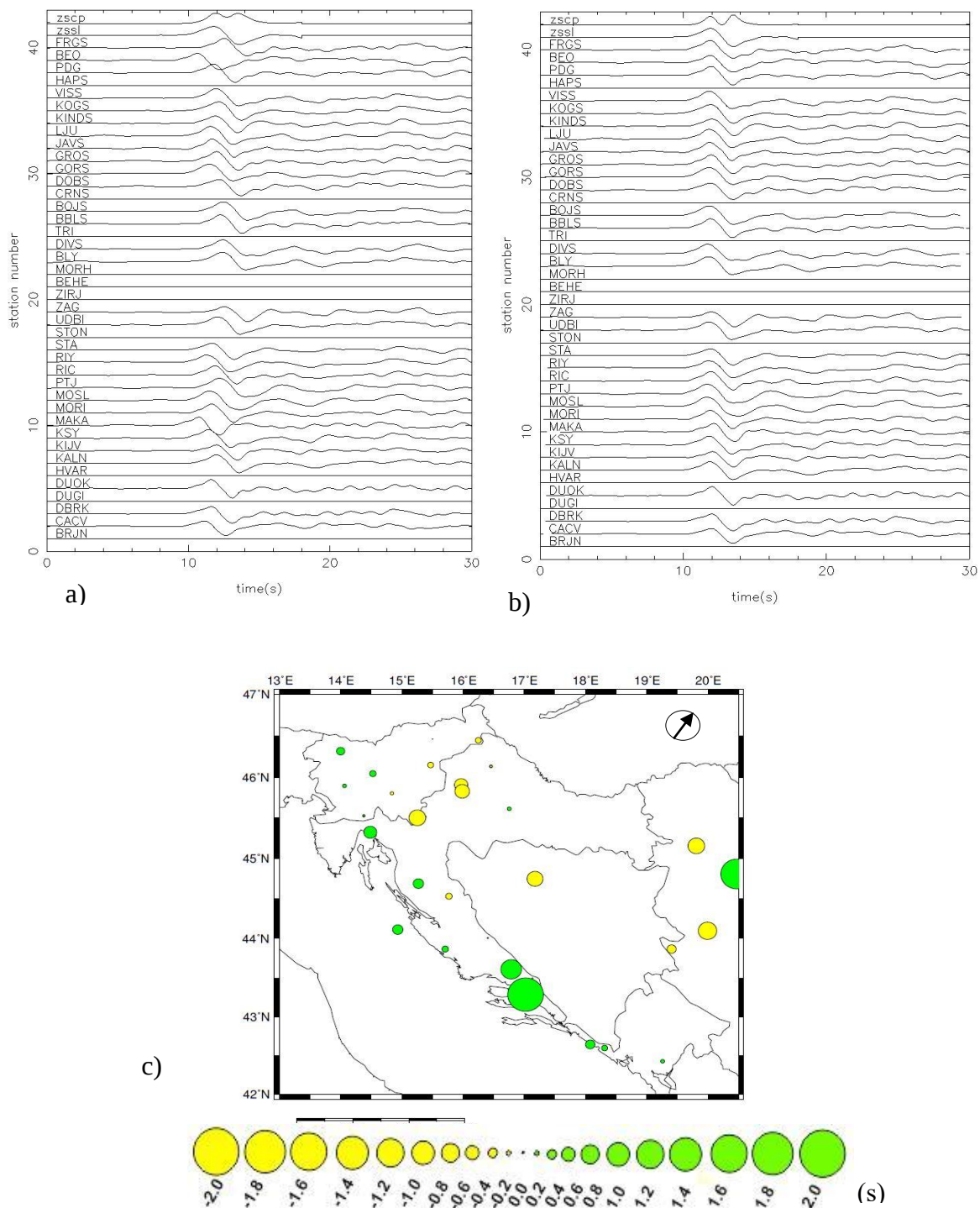
Daleki potres s istoka dogodio se 18.5.2014. s magnitudom 6 prema Richteru (slika 7-3). Prikazani su tragovi prije poravnanja dobiveni modelom ak135 (slika 7-3a) i konačno poravnanje tragova nakon 10 iteracija (slika 7-3b). Usporedba kvadratnog traga na početku i nakon završne faze jasno ukazuje na poboljšano poravnanje i oštre prve nailaske. Stanica BEO odstupa i pokazuje velike vrijednosti ranijih nailazaka. Na području Slovenije i sjeverozapadne Hrvatske javljaju se kasniji nailasci, dok se na području Jadranske obale javljaju raniji nailasci. Drugi primjer istočnog dalekog potresa dogodio se 3.3.2015. s magnitudom 6.1 prema Richteru (slika 7-4). Tragovi su loše kvalitete, odnosno zabilježeni su šumovi te su prvi nailasci teže uočljivi (slike 7-4a i 7-4b). Podaci ovog istočnog događaja

pokazuju anomalno velike rezidualne duž Jadranske obale uzrokovane povećanim šumom te vrlo male rezidualne na području Slovenije (slika 7-4c).

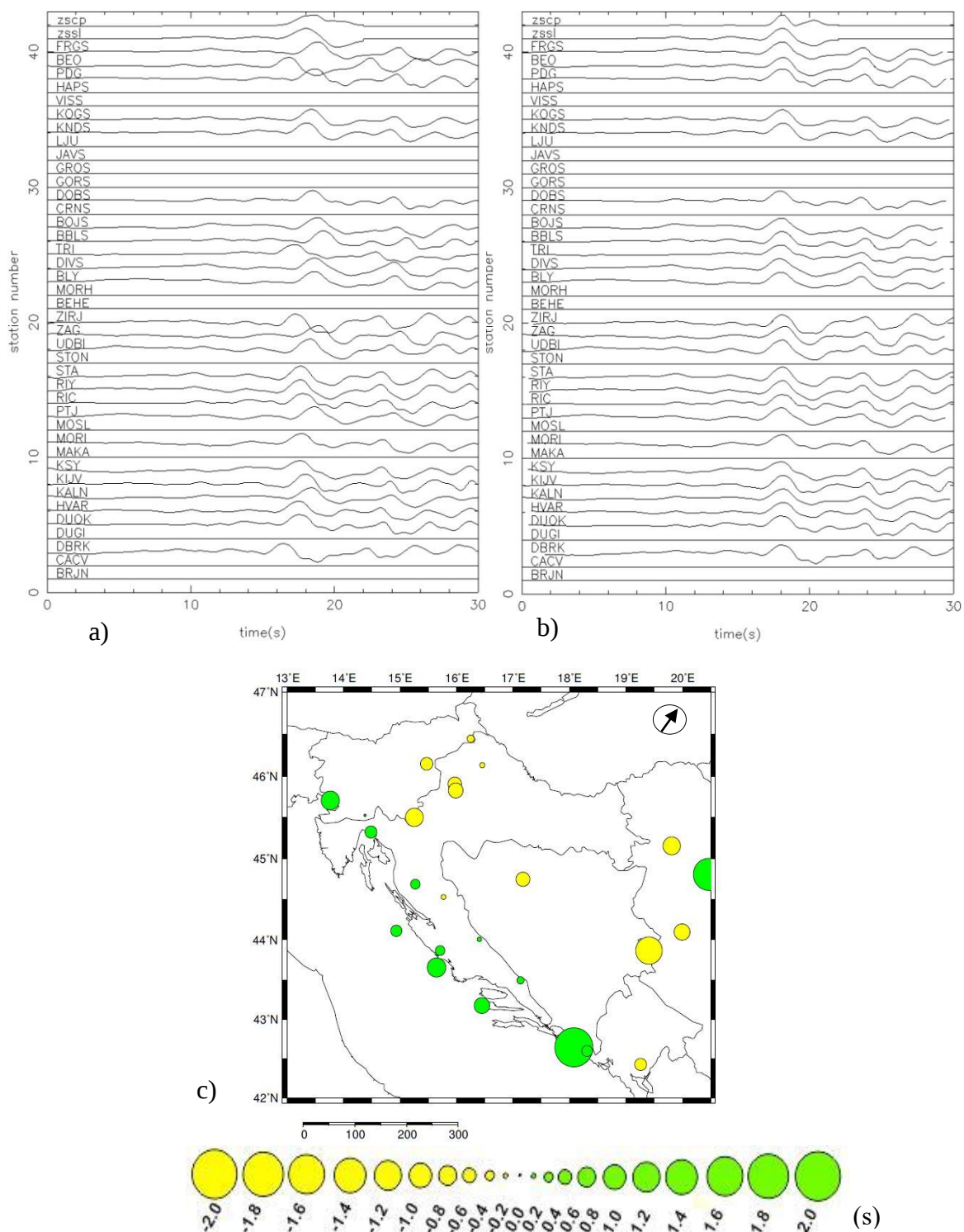
Južni daleki potresi korišteni su samo na hrvatskim stanicama (slike 7-5 i 7-6). Prvi nailasci se vide, ali slabije od kasnijih nailazaka koji su šumovi. Slika 7-5a prikazuje tragove prije poravnanja dobivene ak135 modelom, a slika 7-5b tragove nakon poravnanja dobivene nakon 10 iteracija. Stanica DUOK pokazuje izrazito velike vrijednosti ranijih nailazaka u odnosu na ostale vrijednosti reziduala (slika 7-5c). Za primjer je uzet još jedan južni potres koji se dogodio 17.6.2015. (slika 7-6). Prvi nailasci se ne vide jasno i moguće je da su prvi nailasci slabi jer su opterećeni šumom pa se ne mogu razlučiti, stoga se tek kasniji nailasci jasnije vide. Također je moguće da su prvi nailasci jasnije izraženi pikovi, a da se pojavljuju kasnije zbog samog područja ili zbog greške u određivanju dubine hipocentra. Stanica STON pokazuje najveću vrijednost teleseizmičkih reziduala. Raniji nailasci se javljaju duž Jadranske obale (slika 7-6c).

Tragovi prije poravnanja i nakon poravnanja prikazani su i za zapadni daleki potres koji se dogodio 18.2.2014. s magnitudom 6.5 prema Richteru (slike 7-7a i 7-7b). Prvi nailasci su oštri. Tragovi nakon poravnanja dobiveni su nakon 10 iteracija (slika 7-7b). Reziduali prikazani na području istraživanja imaju male vrijednosti ranijih i kasnijih nailazaka, a stanica BEO pokazuje anomalne vrijednosti, tj. puno veće ranije nailaske (slika 7-7c).

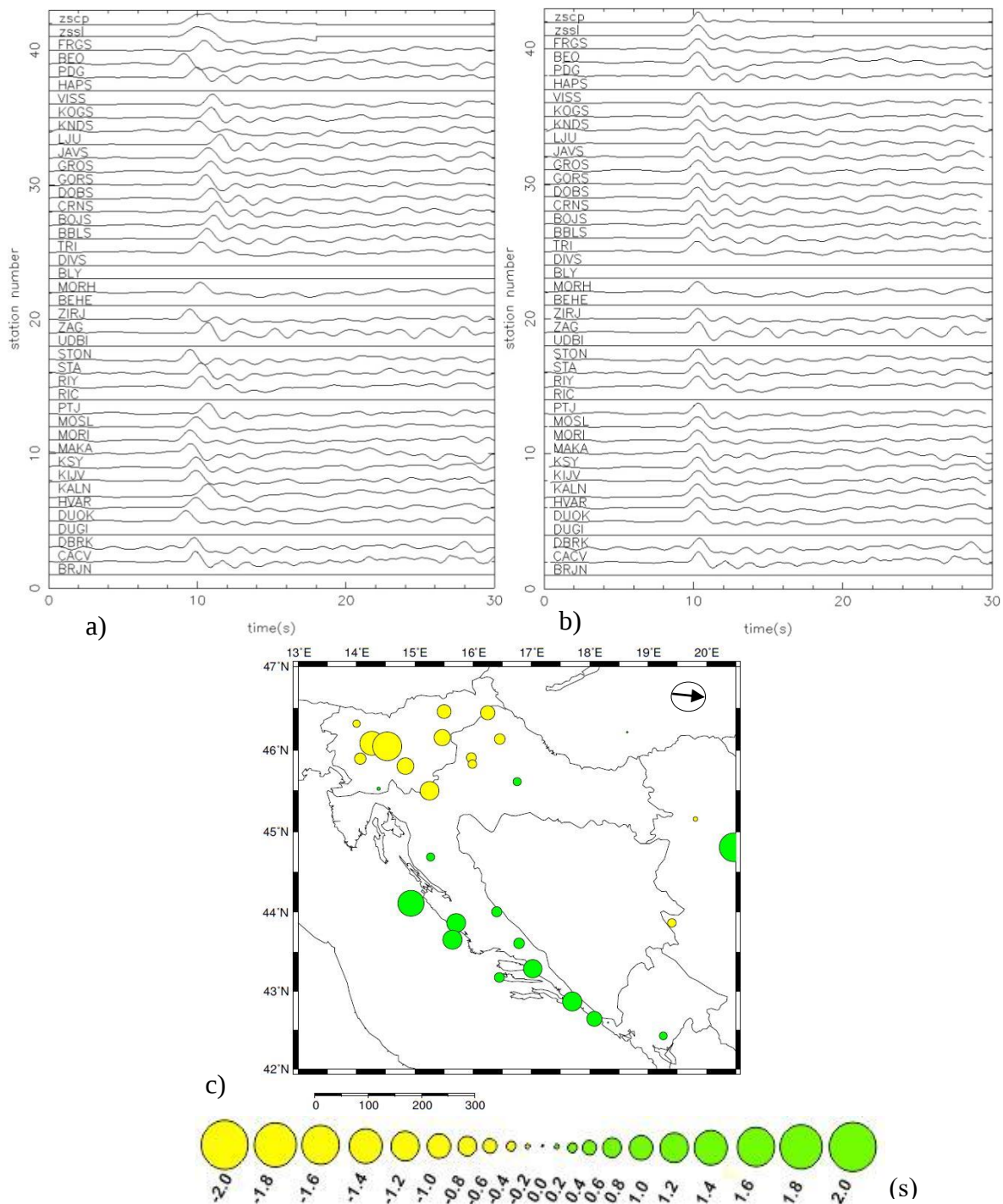
Sjeverni potres od 26.2.2014. magnitude 6.1 prema Richteru primjer je neupotrebljivih podataka (slika 7-8). Podaci pokazuju jako veliki šum te se prvi nailasci ne mogu uočiti.



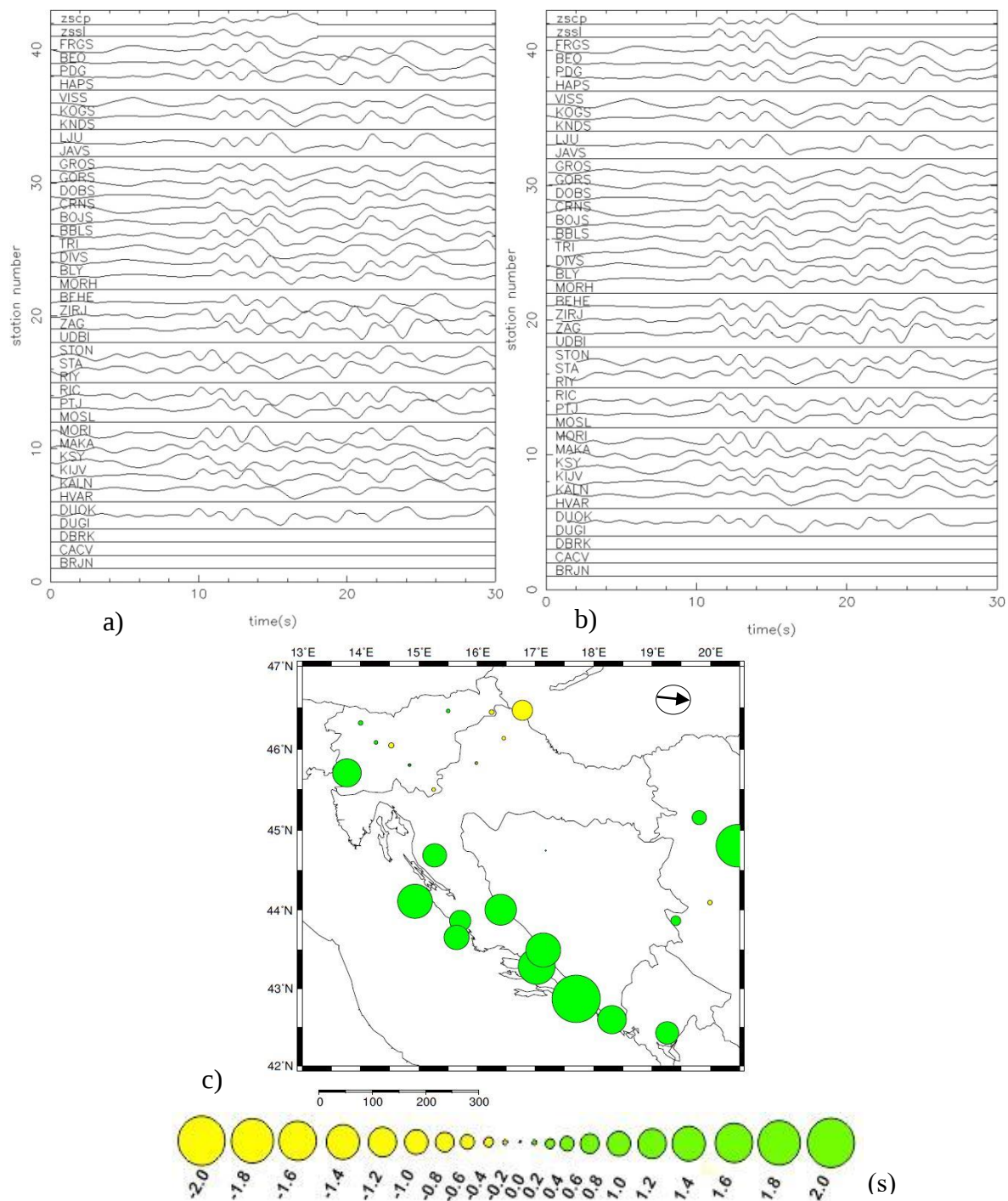
Slika 7-1. Događaj sa sjevera – Tihi ocean; blizu Japana (41.03° N, 143.16° E), AZ 37.186°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja



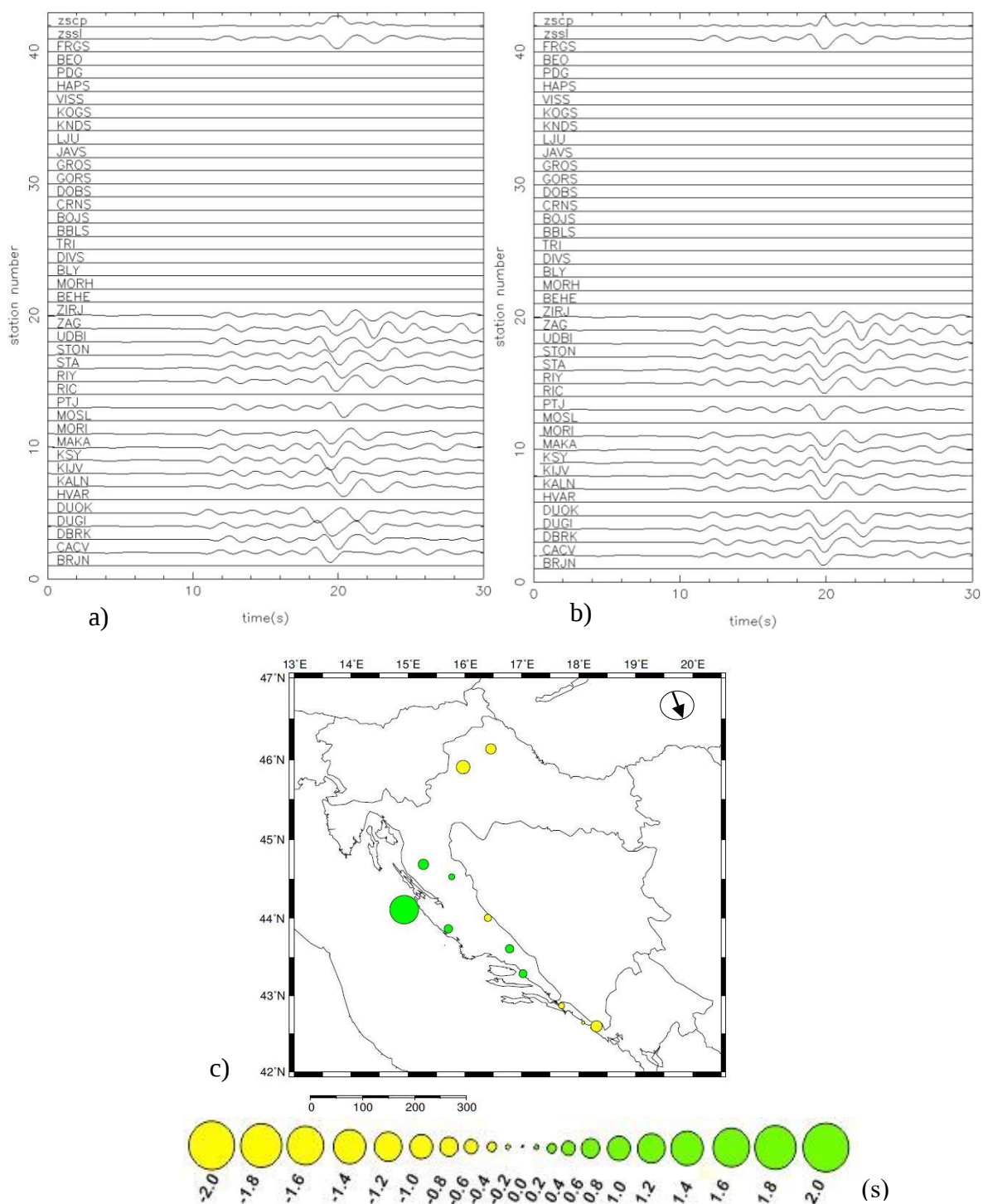
Slika 7-2. Daleki potres sa sjevera – Tihi ocean; blizu Japana (39.86° N, 142.87° E), AZ 38.035° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja



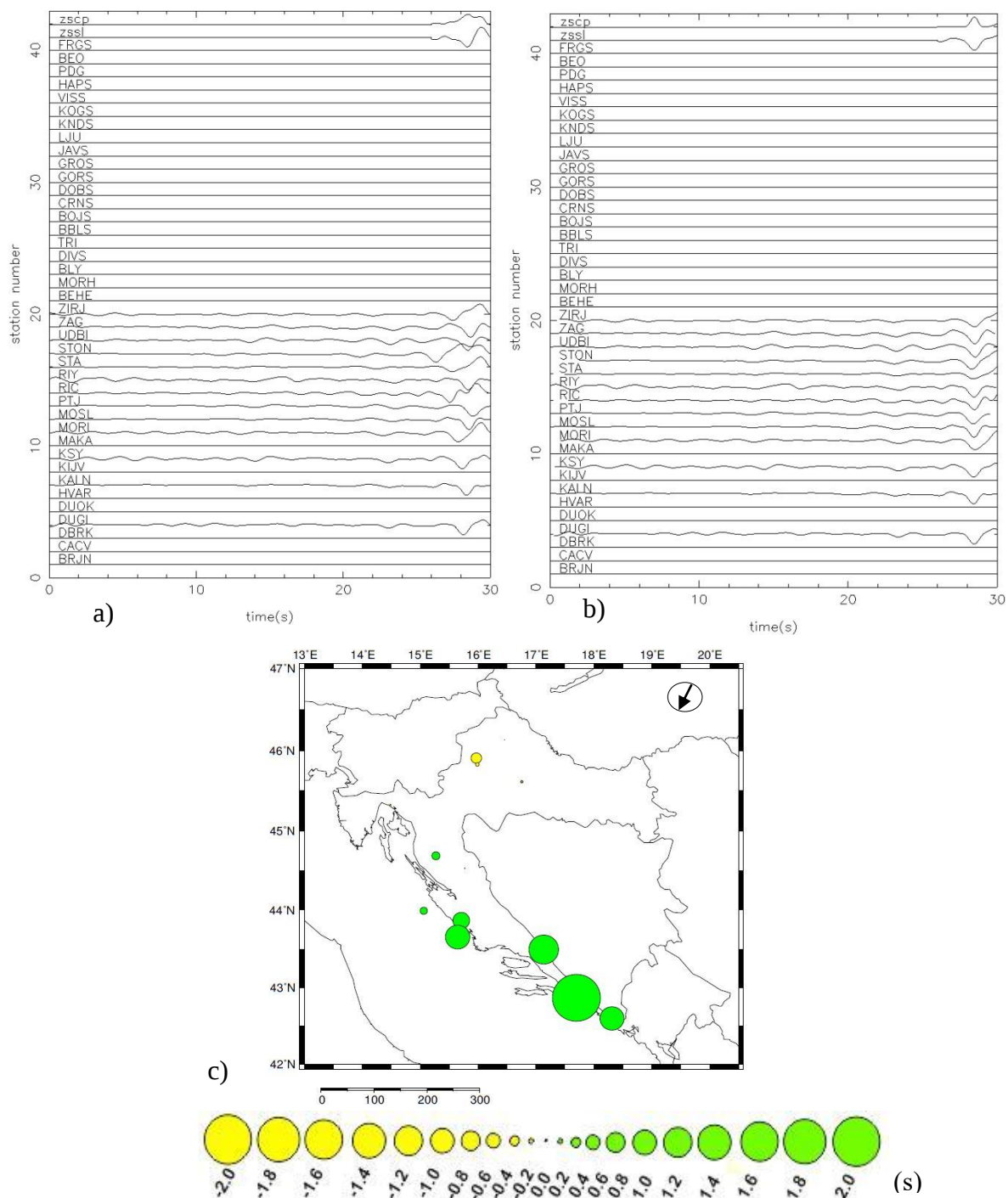
Slika 7-3. Daleki potres s istoka – Indijski ocean; Indonezija (4.25° N, 92.76° E), AZ 96.218°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja



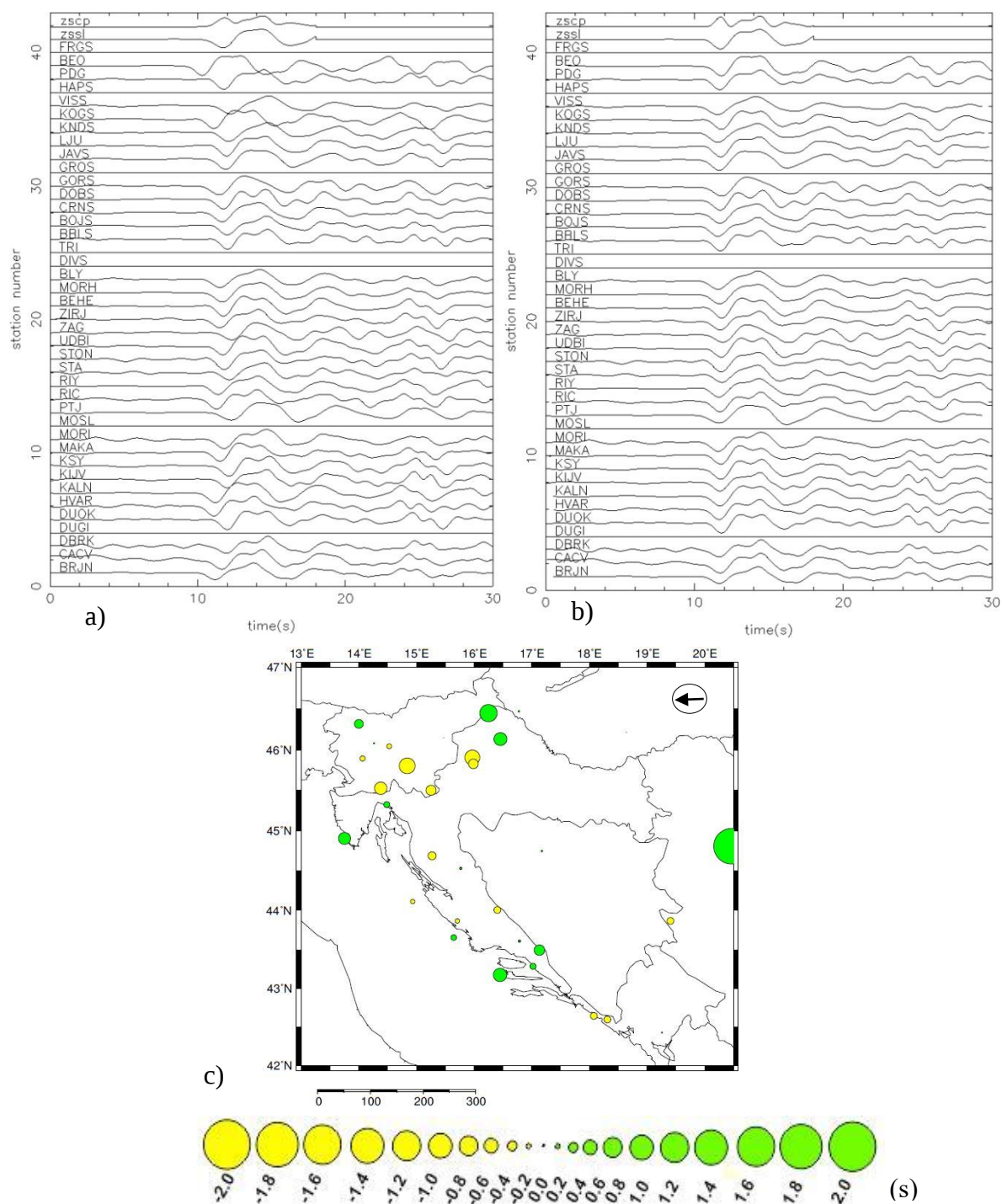
Slika 7-4. Daleki potres s istoka – Indijski ocean; Indonezija (0.78° S, 98.72° E), AZ 95.461° : a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja



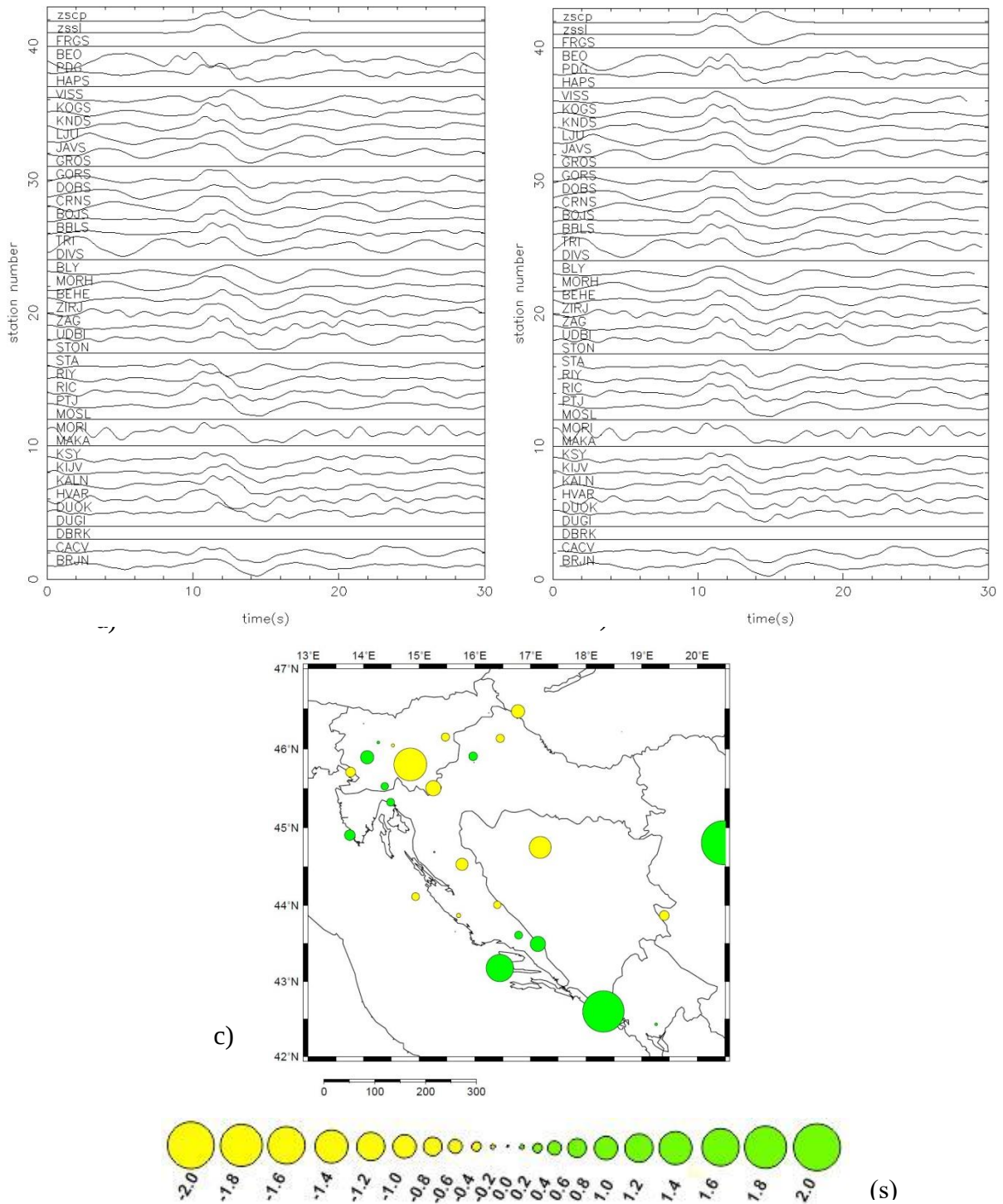
Slika 7-5. Daleki potres s juga - jezero Albert, istočna Afrika (1.55° N, 30.89° E), AZ 160.044°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja



Slika 7-6. Daleki potres s juga – Južni Atlantski ocean (35.41° S, 17.70° W), AZ 207.722°:
a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja

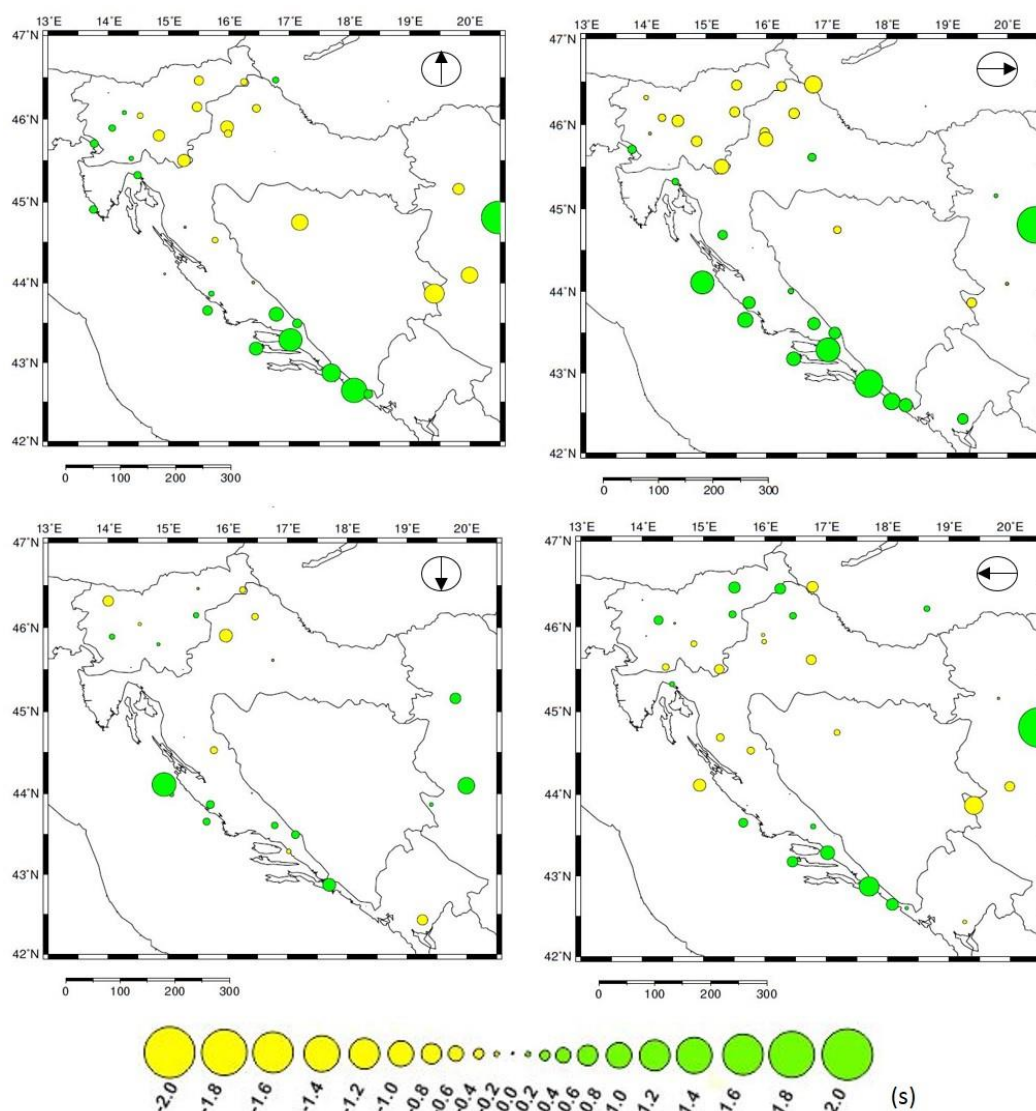


Slika 7-7. Daleki potres sa zapada – Sjeverni Atlantski ocean (14.67° N, 58.93° W), AZ 269.618°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja



Slika 7-8. Daleki potres sa sjevera – Beringovo more, Pacifički ocean (53.62° N, 171.83° E) AZ 4.457°: a) trag prije poravnanja dobiven ak135 modelom; b) trag nakon poravnanja dobiven nakon 10 iteracija; c) raspored reziduala za vremena nailazaka P-valova (u sekundama) dobiveni iz razlike između traga prije i nakon poravnanja

Azimutalna raspodjela reziduala pokazuje sličan raspored za različite događaje koji se javljaju iz istog područja svijeta, međutim dolasci s različitih područja pokazuju drugačiju razdiobu (slike 7-1c – 7-8c). Rasporedi reziduala ovise o azimutu događaja i udaljenosti, a time neke stanice pokazuju pozitivne reziduale za neke događaje i negativne reziduale za druge događaje. Prema Graeber et al. (2002) u idealnom slučaju bi anomalije trebale biti jednake za valove koji dolaze iz istog upadnog kuta.



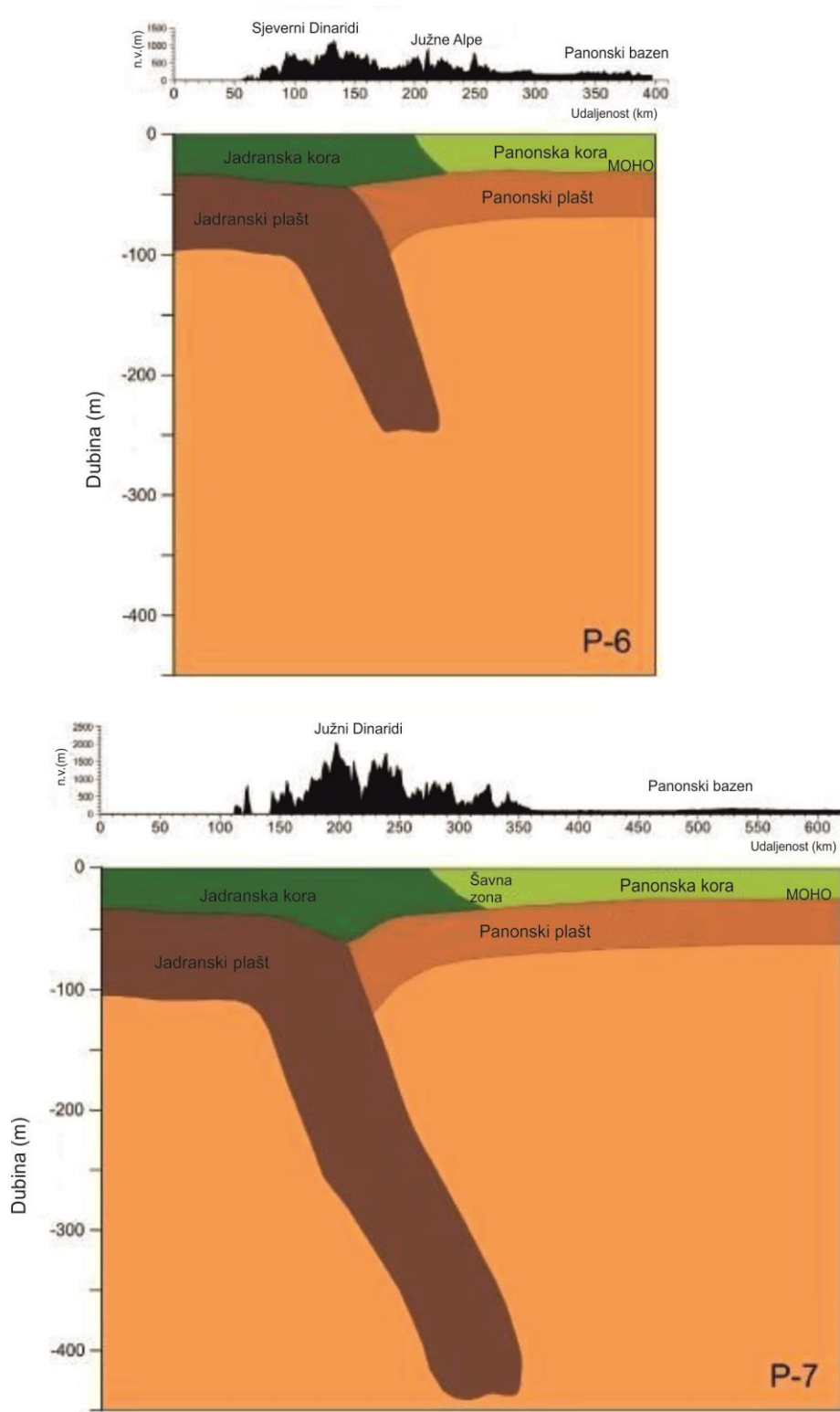
Slika 7-9. Srednje vrijednosti relativnih reziduala zabilježeni iz četiri strane svijeta

Ovisno o raspodjeli teleseizmičkih potresa s obzirom na azimut postoje različiti uzorci rasporeda reziduala, prikazani slikom 7-9. Srednje vrijednosti reziduala računane su za svaku

stanicu unutar određenog raspona prema azimutu. Za sjeverne potrese uzet je raspon od 340° - 50° , za istočne daleke potrese raspon je od 60° do 120° , za južne daleke potrese uzet je raspon 150° - 215° te za zapadne potrese od 240° do 330° . Kod istočnih dalekih potresa možemo primijetiti veće vrijednosti reziduala u odnosu na događaje s drugih strana. Slične su vrijednosti ranijih nailazaka u Vanjskim Dinaridima i kasnijih nailazaka u Panonskom bazenu i Unutarnjim Dinaridima. Sjeverni događaji pokazuju sličan raspored reziduala, ali za te događaje su karakteristične male vrijednosti kasnijih nailazaka za središnji dio Dinarida. Skromniji rezultati su dobiveni za južne i zapadne potrese koji pokazuju male vrijednosti kasnih i ranih nailazaka. U slučajevima sjevernih, istočnih i zapadnih događaja stanica BEO pokazuje anomalne vrijednosti reziduala, tj. vrlo velike vrijednosti ranijih nailazaka u odnosu na ostale stanice iz tog područja.

Raniji dolasci, označeni kao pozitivni reziduali protežu se kroz Vanjske Dinaride. Njihova pojava predstavlja velike seizmičke brzine, karakteristične za hladne i krute materijale, koji bi u ovom slučaju predstavljali Jadransku mikroploču. Postupno naginjanje tih reziduala prema sjeverozapadu ukazuje na tonjenje Jadranske mikroploče pod Panonski tektonski segment, što je glavni uzrok nastanka Vanjskih Dinarida. Negativni reziduali, odnosno kasniji nailasci ukazuju na tople i meke materijale malih seizmičkih brzina. U ovom slučaju takvi materijali generalno karakteriziraju Panonski bazen i Unutarnje Dinaride.

Još jedan bitan odnos, dobiven daljnjom obradom ovih reziduala i koji obećava kvalitetan razvoj istraživanja je i nejednako dubinsko pokrivanje anomalija brzina ispod Vanjskih i Unutarnjih Dinarida. Anomalije velikih brzina ne pokrivaju jednake dubine. U sjevernim Dinaridima anomalija se proteže do 250 km dubine, dok u središnjim i južnim Dinaridima ona obuhvaća veće dubine, do 450 km (slika 7-9). Na profilu P-6 koji se proteže preko sjevernih Dinarida i profilu P-7 koji se nalazi u južnim Dinaridima (slika 4-1) anomalija velikih brzina interpretirana je kao razdvajanje donje litosfere, koja strmo tone u astenosferu. Takav zaključak je izveden iz geoloških modela na temelju rezultata ranije spomenutih istraživanja iz 3. poglavlja. Također, prilog takvom zaključku ukazuje i odsutnost dubokih potresa te nepostojanje vulkanizma na Dinaridskom području.



Slika 7-10. Geološki model duž profila u sjevernim i južnim Dinaridima (Šumanovac et al., 2017). Položaji profila P-6 i P-7 prikazani su na slici 2-1.

8. ZAKLJUČAK

Na području Dinarida i jugozapadnog dijela Panonskog bazena, koji se nalaze na kontaktu Jadranske mikroploče kao dijela Afričke ploče i Panonskog tektonskog segmenta kao dijela Euroazije, korišteni su podaci opažanja dalekih potresa na permanentnim seizmičkim postajama kako bi se izračunali teleseizmički reziduali.

Korišteno je 40 permanentnih seizmičkih postaja na području Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine te rubne dijelove Mađarske, Srbije i Crne Gore. Daleki potresi odabrani su u rasponu od 30° do 95° epicentralne udaljenosti od središta rasporeda seizmičkih stanica s magnitudom većom od 6 prema Richteru. Odabrano je 90 dalekih potresa za istraživanje, od kojih je 44 potresa obrađeno u radu te je od 22 dodatna južna potresa u radu obrađeno 10.

Za izračunavanje relativnih reziduala koristila se metoda slaganja tragova koja pruža učinkovit i brz postupak za procjenu uzoraka reziduala u mreži seizmičkih stanica. Dobiveni su tragovi prije poravnanja pomoću referentnog modela brzina ak135 i tragovi nakon poravnanja, dobiveni najčešće nakon 10 iteracija. Rezultat su reziduali, odnosno odstupanja vremena putovanja seizmičkih valova u odnosu na referentni model ak135. Ta odstupanja očitavaju se kao raniji ili kasniji nailasci na seizmografu. Azimutalna distribucija reziduala pokazuje sličan raspored reziduala za različite događaje koji se javljaju iz istog područja svijeta, a drugačiji raspored s različitog područja svijeta jer uzorci reziduala teže promijeni ovisno o azimutu događaja i udaljenosti.

Teleseizmički reziduali korišteni su za dobivanje trodimenzionalnog modela brzina dubine od 0 do 450 km radi određivanja strukture litosfere na istraživanom području. Rezultati istraživanja nedavno su objavljeni u časopisu *Tectonophysics* pod naslovom *Shallow and deep lithosphere slabs beneath the Dinarides from teleseismic tomography as the results of the Adriatic lithosphere downwelling*. Bitno je spomenuti kako je ovo prvo istraživanje u kojem je interpretiran model seizmičkih brzina tako visoke rezolucije za cijeli pojas Dinarida. U prijašnjim istraživanjima, Dinaridi nisu potpuno pokriveni ili je postignuta znatno slabija rezolucija.

9. LITERATURA

- ALJINOVIĆ, B., BLAŠKOVIĆ, I., CVIJANOVIĆ, D., PRELOGOVIĆ, E., SKOKO, D., BRDAREVIĆ, N., 1984. Correlation of geophysical, geological and seismological data in the coastal part of Yugoslavia. *Bolletino di oceanologia teoretica ed applicata*, II/2: 77-90, Trieste.
- ARVANITIS, M., AL-ANAZI, B.D., 2009. Matematički prikaz modela i primjene seizmičke tomografije. *Nafta* 60: 232-239.
- BIJWAARD, H., SPAKMAN, W., 2000. Non-linear global P-wave tomography by iterated linearized inversion. *Geophys. J. Int.* 141: 71–82.
- BRÜCKL, E., BODOKY, T., HEGEDŰS, E., HRUBCOVÁ, P., GOSAR, A., GRAD, M., GUTERCH, A., HAJNAL, Z., KELLER, G.R., ŠPICAK, A., ŠUMANOVAC, F., THYBO, H., WEBER, F., ALP 2002 Working Group, 2003. ALP 2002 Seismic Experiment. *Stud. Geophys. Geod.* 47:651–657.
- BRÜCKL, E., BLEIBINHAUS, F., GOSAR, A., GRAD, M., GUTERCH, A., HRUBCOVÁ, P., KELLER, G.R., ŠUMANOVAC, F., TIIRA, T., YLINIEMI, J., HEGEDŰS, E., THYBO, H., 2007. Crustal structure due to collisional and escape tectonics in the Eastern Alps region based on profiles Alp01 and Alp02 from the ALP 2002 seismic experiment. *J. Geophys. Res.* 112, B06308.
- BRÜCKL, E., BEHM, M., DECKER, K., GRAD, M., GUTERCH, A., KELLER, G.R., THYBO, H., 2010. Crustal structure and active tectonics in the Eastern Alps. *Tectonics* 29, TC2011.
- CSONTOS, C., NAGYMAROSY, A., 1998. The Mid-Hungarian line: a zone of repeated tectonic inversions. *Tectonophysics* 297: 51–71.
- CSONTOS, L., VÖRÖS, A., 2004. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 210:1–56.

DANDO, B.D.E., STUART, G.W., HOUSEMAN, G.A., HEGEDUES, E., BRÜCKL, E., RADOVANOVIC, S., 2011. Teleseismic tomography of the mantle in the Carpathian Pannonian region of central Europe. *Geophys. J. Int.* 186:11–31.

DRAGAŠEVIĆ, T., ANDRIĆ, B., 1968. Deep seismic sounding of the Earth's crust in the area of the Dinarides and the Adriatic Sea. *Geophys. Prospect.* 16 (1): 54–76.

GANGI, A.F., FAIRBORN, J.W., 1968. Accurate determination of seismicarray steering delays by an adaptive computer programme. *Supplemento Al Nuovo Cimento, Serie 1* (6). 105–115.

GRAVITY MAP OF YUGOSLAVIA, 1972. Gravimetrijska karta SFR Jugoslavije – Bouguerove anomalije, 1:500.000. Federal Geological Institute, Beograd.

GRENERCZY, G., SELLA, G., STEIN, S., KENYERES, A., 2005. Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. *Geophys. Res. Lett.* 32.

HETÉNYI, G., BUS, Z., 2007. Shear wave velocity and crustal thickness in the Pannonian Basin from receiver function inversions at four permanent stations in Hungary. *J. Seismol.* 11: 405–414.

HOLE, J.A. & ZELT, B.C., 1995. 2-D finite-difference reflection traveltimes. *Geophys. J. Int.*, 121: 427–434.

JANSSON, B., HUSEBYE, E.S., 1966. Application of array data techniques to a network of ordinary seismograph stations. *Pure Appl. Geophys.* 63: 83–104.

KASTELIC, V., VANNOLI, P., BURRATO, P., FRACASSI, U., TIBERTI, M.M. & VALENSISE, G. (2013): Seismogenic sources in the Adriatic Domain.– *Mar. Petrol. Geol.*, 42: 191–213.

KENNETT, B.L.N., ENGDAHL, E.R., BULAND, R., 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times. *Geophys. J. Int.* 122: 108–124.

KOULAKOV, I., KABAN, M.K., TESAURO, M., 2009. P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. J. Int.* m179:345–366.

LOWRIE, W., 1997. *Fundamentals of geophysics*. Velika Britanija: Cambridge University press.

MITTERBAUER, U., BEHM, M., BRÜCKL, E., LIPPITSCH, R., GUTERCH, A., KELLER, G.R., KOSLOVSKAYA, E., RUMPFHUBER, E.M., ŠUMANOVAC, F., 2011. Shape and origin of the east-alpine slab constrained by the ALPASS teleseismic model. *Tectonophysics* 510:195–206.

MOHOROVIČIĆ, A., 1910. Potres od 8. X. 1909. (Das Beben vom 8. X. 1909.). *Godišnje izvješće Zagrebačkog meteorološkog opservatorija za godinu 1909.* 9, pp. 1–56 (4/1).

OREŠKOVIĆ, J., ŠUMANOVAC, F., HEGEDŰS, E., DUDJAK, D., KOVÁCS, A.C., KOLAR, S., 2009. Natural and controlled seismic experiment on the profile in transition area from the Dinarides to Pannonian basin. 28° Convegno Nazionale GNGTSpp. 181–184.

OREŠKOVIĆ, J., ŠUMANOVAC, F., HEGEDŰS, E., 2011. Crustal structure beneath Istra peninsula based on receiver function analysis. *Geofizika* 28: 247–263.

PAMIĆ, J., TOMLJENović, B., BALEN, D., 2002. Geodynamic and petrogenetic evolution of alpine ophiolites from the central and NW Dinarides: an overview. *Lithos* 65: 113–142.

PIROMALLO, C., MORELLI, A., 2003. P wave tomography of the mantle under the Alpine-Mediterranean area. *J. of Geophys. Res.* 108 (B2):2065.

POLJAK, M., RIŽNAR, I., 1996. Structure of the Adriatic - Dinaric platform along the Secovlje - Postojna profile. *Geol.Croat.* 49/2: 345–346 Zagreb.

POSGAY, K., BODOKY, T., HEGEDÜS, E., KOVÁCSVÖLGYI, S., LENKEY, L., SZAFIÁN, P., TAKÁCS, E., TÍMÁR, Z., VARGA, G., 1995. Asthenospheric structure beneath a Neogene basin in southeast Hungary. *Tectonophysics* 252:467–484.

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: 283–293.

RAWLINSON, N., KENNETT, B.L.N., 2004. Rapid estimation of relative and absolute delay times across a network by adaptive stacking. *Geophys. J. Int.* 157:332–340.

RAWLINSON, N., READING, A.M., KENNETT, B.L.N., 2006. Lithospheric structure of Tasmania from a novel form of teleseismic tomography. *J. Geophys. Res.* 111, B023101.

REN, Y., GRECU, B., STUART, G., HOUSEMAN, G., HEGEDÜS, E., South Carpathian Project Working Group, 2013. Crustal structures of the Carpathian-Pannonian region from ambient noise tomography. *Geophys. J. Int.* 195:1351–11369.

ROYDEN, L., HORVÁTH, F., RUMPLER, J., 1983. Evolution of the Pannonian Basin system: tectonics. *Tectonics* 2:63–90.

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 J Geosci* 101, p. 139–183.

SKOKO, D., PRELOGOVIĆ, E., ALJINOVIĆ, B., 1987. Geological structure of the Earth's crust above the Moho discontinuity in Yugoslavia. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 89, 379–382.

STIPČEVIĆ, J., TKALČIĆ, H., HERAK, M., MARKUŠIĆ, S., HERAK, D., 2011. Crustal and uppermost mantle structure beneath the External Dinarides, Croatia, determined from teleseismic receiver functions. *Geophys. J. Int.* 185:1103–1119.

ŠUMANOVAC, F., OREŠKOVIĆ, J., GRAD, M., ALP 2002 WORKING GROUP, 2009. Crustal structure at the contact of the Dinarides and Pannonian basin based on 2-D seismic

and gravity interpretation of the Alp07 profile in the ALP2002 experiment. *Geophys. J. Int.* 179: 615–633.

ŠUMANOVAC, F., 2010. Lithosphere structure at the contact of the Adriatic microplate and the Pannonian segment based on the gravity modelling. *Tectonophysics* 485: 94–106.

ŠUMANOVAC, F., 2012. *Osnove geofizičkih istraživanja*. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ŠUMANOVAC, F., 2015. Lithosphere model of the Pannonian-Adriatic overthrusting. *Tectonophysics* 665:79–91.

ŠUMANOVAC, F., DUDJAK, D., 2016. Descending lithosphere slab beneath the Northwest Dinarides from teleseismic tomography. *J. Geod.* 102:171–184.

ŠUMANOVAC, F., HEGEDŰS, E., OREŠKOVIĆ, J., KOLAR, S., KOVÁCS, A.C., DUDJAK, D., KOVÁCS, I.J., 2016. Passive seismic experiment and receiver functions analysis to determine crustal structure at the contact of the northern Dinarides and southwestern Pannonian Basin. *Geophys. J. Int.* 205:1420–1436.

ŠUMANOVAC, F., MARKUŠIĆ, S., ENGELSFELD, T., JURKOVIĆ, K., OREŠKOVIĆ, J., 2017. Shallow and deep lithosphere slabs beneath the Dinarides from teleseismic tomography as the results of the Adriatic lithosphere downwelling. *Tectonophysics* 712-713: 523–541.

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. Geological Society, London, Special Publications, 298: 145-167.

TUMAČ GEOLOŠKE KARTE Republike Hrvatske 1:300.000. Zagreb, 2009. Hrvatski geološki institut.

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 J. Geosci.* 101 (Suppl 1):273–294.

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 (TC6017).

VIDALE, J.E., 1990. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions. *Geophysics*, 55: 521–526.

VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I., MATIČEC, D., 2005. Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220: 333–360.

WEBER, J., VRABEC, M., PAVLOVČIČ-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: 214–222.

WALDHAUSER, F., LIPPITSCH, R., KISSLING, E. AND ANSORGE, J., 2002. High resolution teleseismic tomography of upper-mantle structure using an a priori three dimensional crustal model. *Geophys. J. Int.* 150: 403–414.

ZHU, H., BOZDAG, E., PETER, D., TROMP, J., 2012. Structure of the European upper mantle revealed by adjoint tomography. *Nat. Geosci.* 5:493–498.

www izvori:

International Seismological Centre, On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent; Thatcham, United Kingdom <http://www.isc.ac.uk/Bull.>

Observatories and research facilities for European seismology <http://www.orfeus-eu.org/data/eida/>.