

# Anizotropija brzina seizmičkih S valova u području središnjih Dinarida određena analizom dvoloma SKS faze

---

Šipek, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:217:980729>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-10**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Dominik Šipek

Anizotropija brzina seizmičkih S valova u  
području središnjih Dinarida određena  
analizom dvoloma SKS faze

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Dominik Šipek

Diplomski rad

**Anizotropija brzina seizmičkih S valova  
u području središnjih Dinarida određena  
analizom dvoloma SKS faze**

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

Zagreb, 2023.

Veliko hvala svim prijateljima i kolegama, profesorima i mentoru koji su mi pomogli svojim savjetima i strpljenjem. Najveća zahvala mojoj obitelji i posebice roditeljima.

## Sažetak

Dinaridi su smješteni na granici Jadranske mikroploče i Euroazijske ploče, na području u kojem je subdukcija bila aktivna prije 45 mil. godina. Dvolom SKS faza je pojava čijim se proučavanjem mogu saznati informacije o anizotropiji gornjeg plašta promatranog područja. Obradeno je 865 zapisa za ukupno 249 teleseizmičkih potresa sa seizmoloških stanica u širem Dinarskom području. Analize dvoloma ukazuju na orijentacije brzih osi u WSW-ENE smjeru koji je okomit na smjer pružanja Dinarida s razlikama u vremenima nailazaka kvazi S faza između 0.6 s do 1.6 s. Ovakva orijentacija brzih osi je u skladu s predloženim astenosferskim tokom kroz subdukcijski prozor ispod Dinarida. Za dobivene rezultate pruženo je teoretsko objašnjenje da je zabilježena anizotropija posljedica preferencijalne orijentacije minerala olivina u plaštu uzrokovana astenosferskim tokom.

**Ključne riječi:** SKS dvolom, anizotropija, astenosfera, Jadranska mikroploča.

# **S-waves anisotropy in the central Dinarides inferred using splitting of the SKS phase.**

## **Abstract**

Dinarides mountain chain is located at the border between Adria microplate and Eurasian plate, where subduction processes lasted until 45 mil. years ago. By observing SKS splitting events it is possible to infer the anisotropy in the uppermost mantle beneath the area of interest. SKS analysis was performed on 249 teleseismic events recorded on 865 seismograms at seismic stations in the wider Dinarides area. Evidence of seismic anisotropy was found with fast axis orientation in the WSW-ENE direction as well as delay times in the range from 0.6 s to 1.6 s. Fast axis direction is approximately perpendicular to the strike of the Dinarides, which implies that the registered anisotropy is caused by lattice preferred orientation of olivine crystals due to asthenospheric flow through the *slab-gap* beneath the Dinarides.

**Keywords:** SKS splitting, anisotropy, uppermost mantle anisotropy, Adria

## Sadržaj

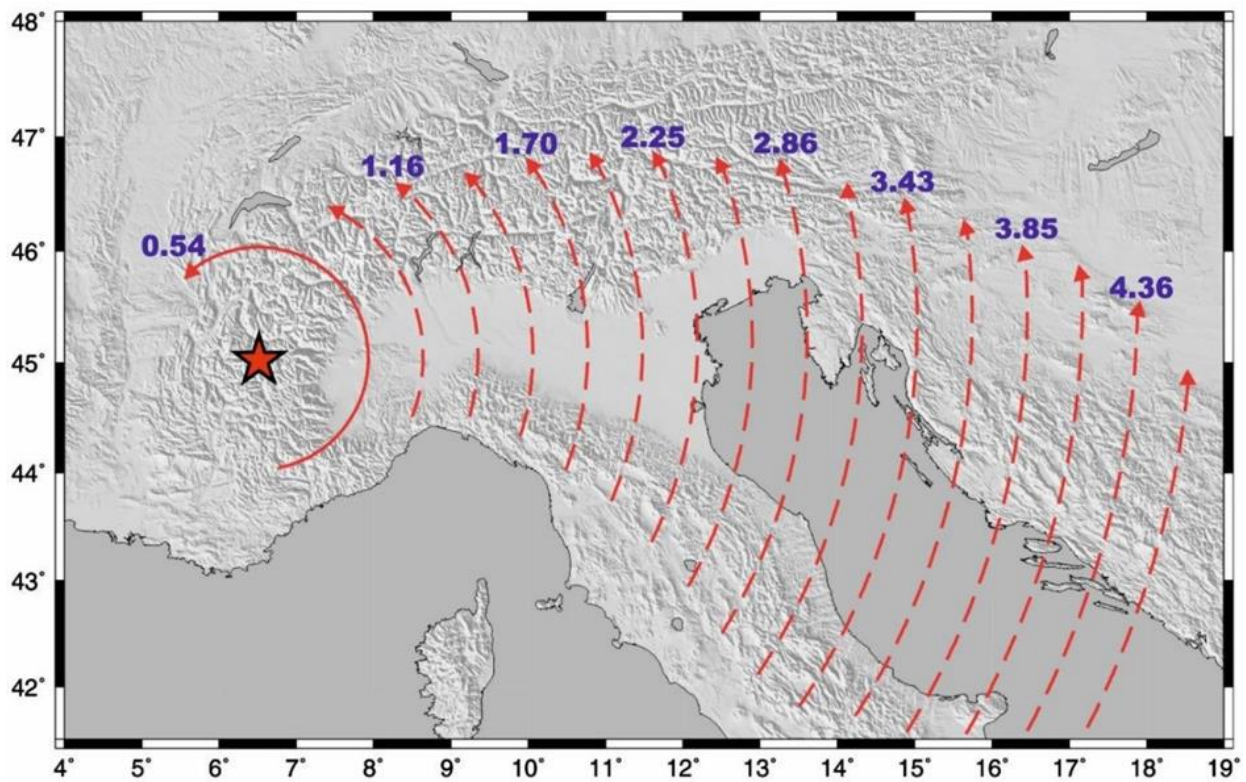
1. Uvod .....	1
1.1 Tektonska povijest.....	1
1.2 Pojava dvoloma kod SKS faze .....	8
1.3 Dosadašnja istraživanja.....	12
2. Podaci .....	16
3. Metode.....	19
3.1 Računalna obrada .....	19
4. Rezultati.....	24
5. Diskusija .....	30
6. Zaključak.....	34
Literatura .....	35
Dodatak A.....	40

# 1. Uvod

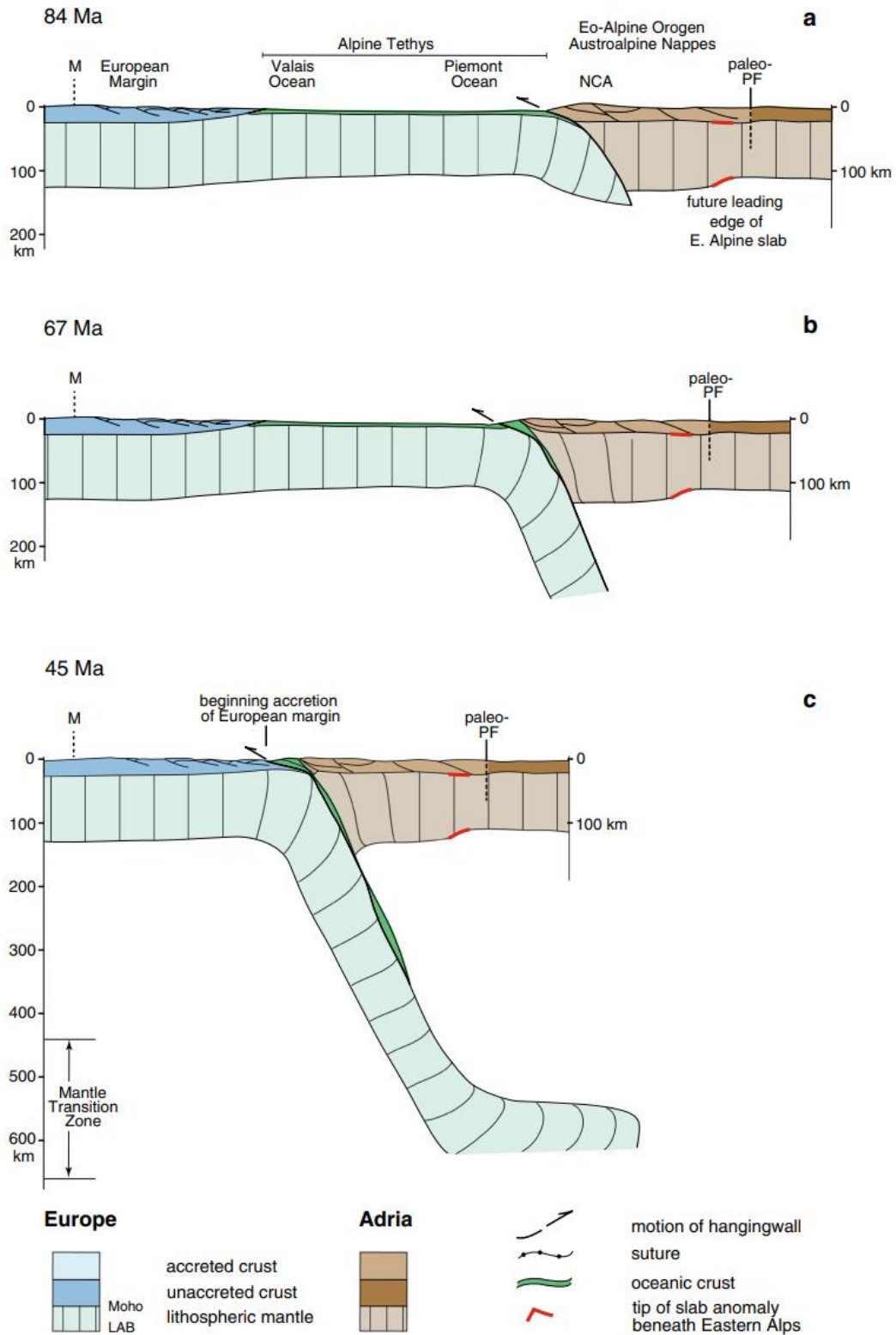
## 1.1 Tektonska povijest

Područje Dinarida sa seizmotektonskog aspekta je područje kompresije. Dinarsko gorje nastalo je kao posljedica kolizije Jadranske mikroploče (Adria) i veće Euroazijske ploče. Osim Dinarida, interakcijom Adrije i Euroazije nastali su i planinski lanci Apenina, Alpa i Albanida. Glavni pokretač navedenog kompleksnog tektonskog sustava je Jadranska mikroploča koja ponire s obje strane ispod Dinarida i Apenina dok u Alpskom sustavu Europska ploča ponire ispod Adrije. Po trenutnim spoznajama subdukcija u području Dinarida bila je aktivna u periodu od jure (84 mil. godina) do paleogena (45 mil. godina) te više nije aktivna (Slika 1.2). U kasnom eocenu (37 mil. godina) proces subdukcije zamijenila je kolizija koja je bila praćena delaminacijom litosfernog dijela plašta Jadranske mikroploče (Handy i sur. 2015, 2019). Trenutno je subdukcija aktivna samo na području Helenskog zalučnog bazena gdje se Jadranska mikroploča podvlači pod Helenide, što je podržano opažanjem potresa na dubinama oko 180 km ispod helenskog luka (Faccenna C. i sur. 2014). Jadranska mikroploča kreće se u N/NW smjeru rotacijom suprotnom od smjera kazaljke na satu oko Eulerovog pola u zapadnim Alpama u iznosu od  $0.25^\circ$ /mil. godina (Serpelloni i sur. 2005) (Slika 1.1 i Slika 1.6). Opisana situacija je interesantna zbog konvergencije tektonskih ploča koja je često vezana uz anizotropiju uzrokovanu astenosferskim tokom ili tektonskim režimom naprezanja kore. Zbog svega navedenog područje Dinarida odličan je odabir za studiju SKS dvoloma u svrhu analize anizotropije.

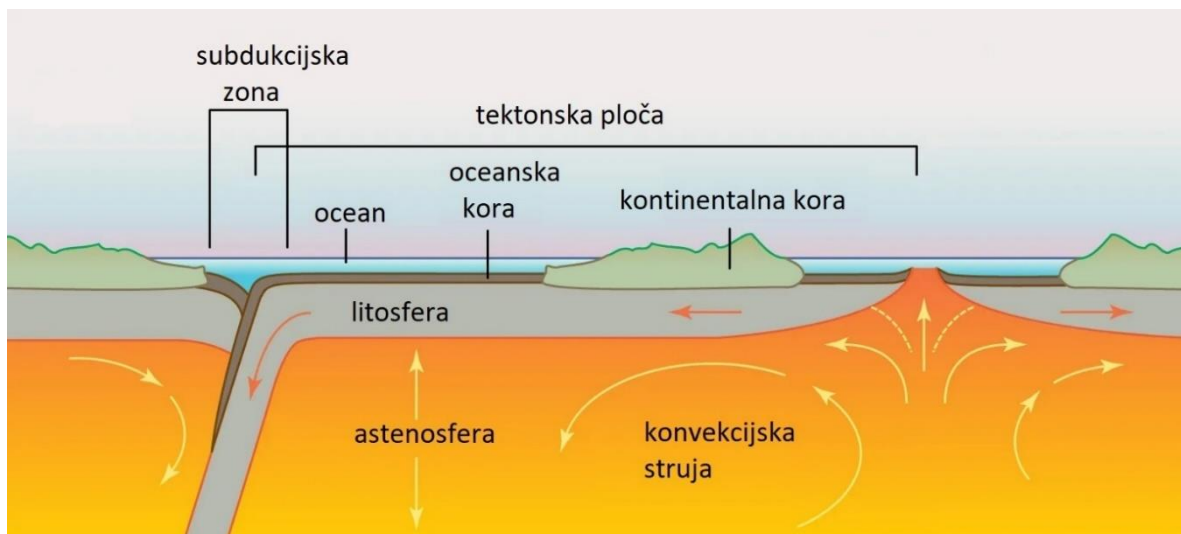




**Slika 1.1:** Raspored i brzina konvergentnih kretanja (mm/god.) u stabilnom dijelu Jadranske mikroploče i u okolnim planinskim lancima dobiveni na temelju GPS mjerenja (preuzeto iz Weber i sur. 2010).

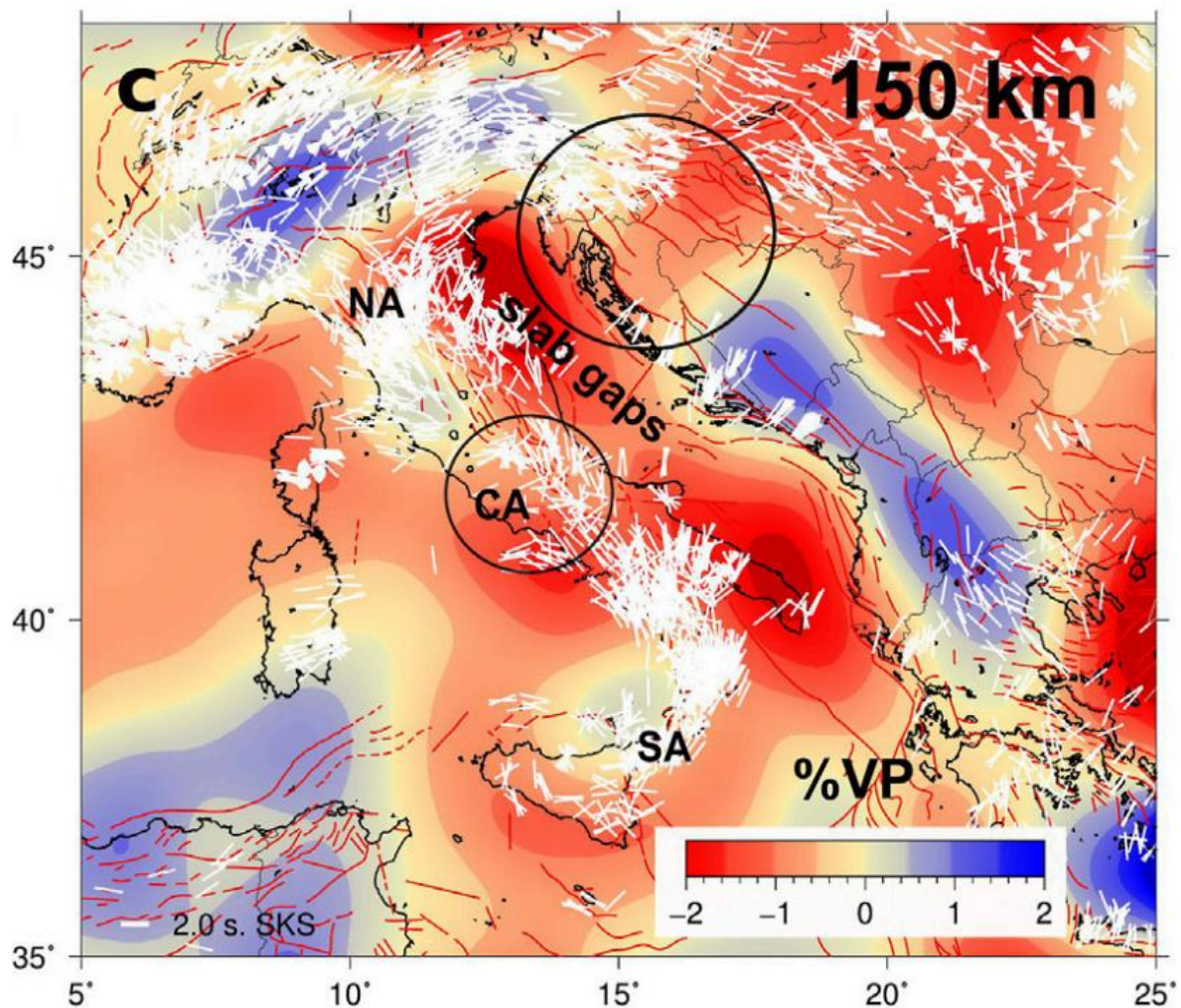


**Slika 1.2:** Presjek istočnog dijela Alpskog orogena u kasnoj kredi. A) Početna subdukcija oceanske litosfere Alpskog Thetysa (84 mil. God.) B) Nastavak subdukcije Alpskog Thetysa, akrecija oceanske kore (67 mil. God.) C) Početak kolizije (45 mil. God.) Preuzeto iz Handy i sur. 2015.



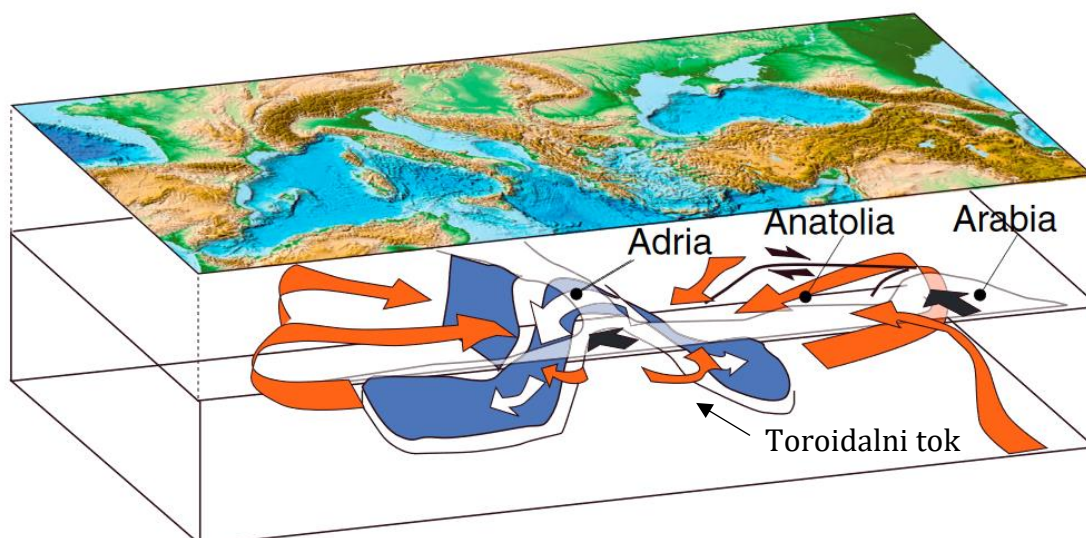
**Slika 1.3:** Presjek tektonске ploče. Subdukcijska zona predstavlja prostor u kojem dolazi do podvlačenja litosfere. Astenosfera je mehanički slabo i duktilno područje gornjeg dijela Zemljinog plašta koji se nalazi na dubini od 100 km do 400 km. Nad astenosferom se nalazi litosfera koja je sačinjena od Zemljine kore i najgornjeg dijela plašta. Astenosfera je viskozna, a litosfera je čvrsta i sadrži kontinentalnu (granitnu) ili okeansku (bazaltnu) kora. (Encyclopædia Britannica, 2023).

U Dinaridima većina tomografskih istraživanja ukazuje na postojanje tijela relativno velike brzine na dubinama od 150 km do 300 km koji se nastavlja prema Helenidskoj regiji (Piromallo i Morelli, 2003). Litosfera obuhvaća Zemljinu kora koja se na području Dinarida proteže u rasponu debljina od 40 do 55 km (Stipčević i sur. 2011) i gornji dio plašta. Duktilna litosfera odvojena je od viskoznog astenosferskog sloja (Slika 1.3). Mjerenja debljine litosfere i tomografski model brzine seizmičkih S valova ispod šireg područja Dinarida pokazala su smanjenu litosfersku debljinu na području Like i postojanje zone male brzine u prostoru dubine između 150 i 300 km, što ukazuje na mogućnost postojanja subdukcijskog prozora (u daljnjem: eng. *slab gap*) na tom području (Belinić i sur. 2018, Belinić i sur. 2021) (Slika 1.4). Ta anomalija u debljini litosfere ostavlja otvorena pitanja o geodinamici u gornjem dijelu Zemljinog plašta na području središnjeg dijela Dinarida.



**Slika 1.4:** Tomografija centralnog Sredozemlja na dubini od 150 km. Bijelim linijama su označeni smjerovi SKS brzih osi. Zaokruženi prostori su mjesta vjerojatnih subdukcijskog prozora. Na slici je lako vidljiv mogući tok iz NE regije panonskog bazena kroz Dinarski subdukcijski prozor. Preuzeto iz Salimbeni i sur. 2020.

Nedavne interpretacije anizotropije u mediteranskom području predlažu da je toroidalni tok (tok karakteriziran vertikalnom vrtložnošću) dominantni mehanizam u interakciji subducirane litosfere i okolnog plašta (Barruol i sur. 2011). Takav tok se tipično javlja u okolici litosfere koja tone i blokira slobodan protok astenosfere, kao što je slučaj kod Apenina, Kalabrijskog, Helenskog i Karpatskog luka. U okolici ovih sustava astenosferski tok je opisan kao dominantno okomit na pružanje subdukcijskog jarka (eng. *trench normal*) sa strane zalučnog bazena i paralelan pružanju subdukcijske zone (eng. *trench paralel*) sa oceanske strane.

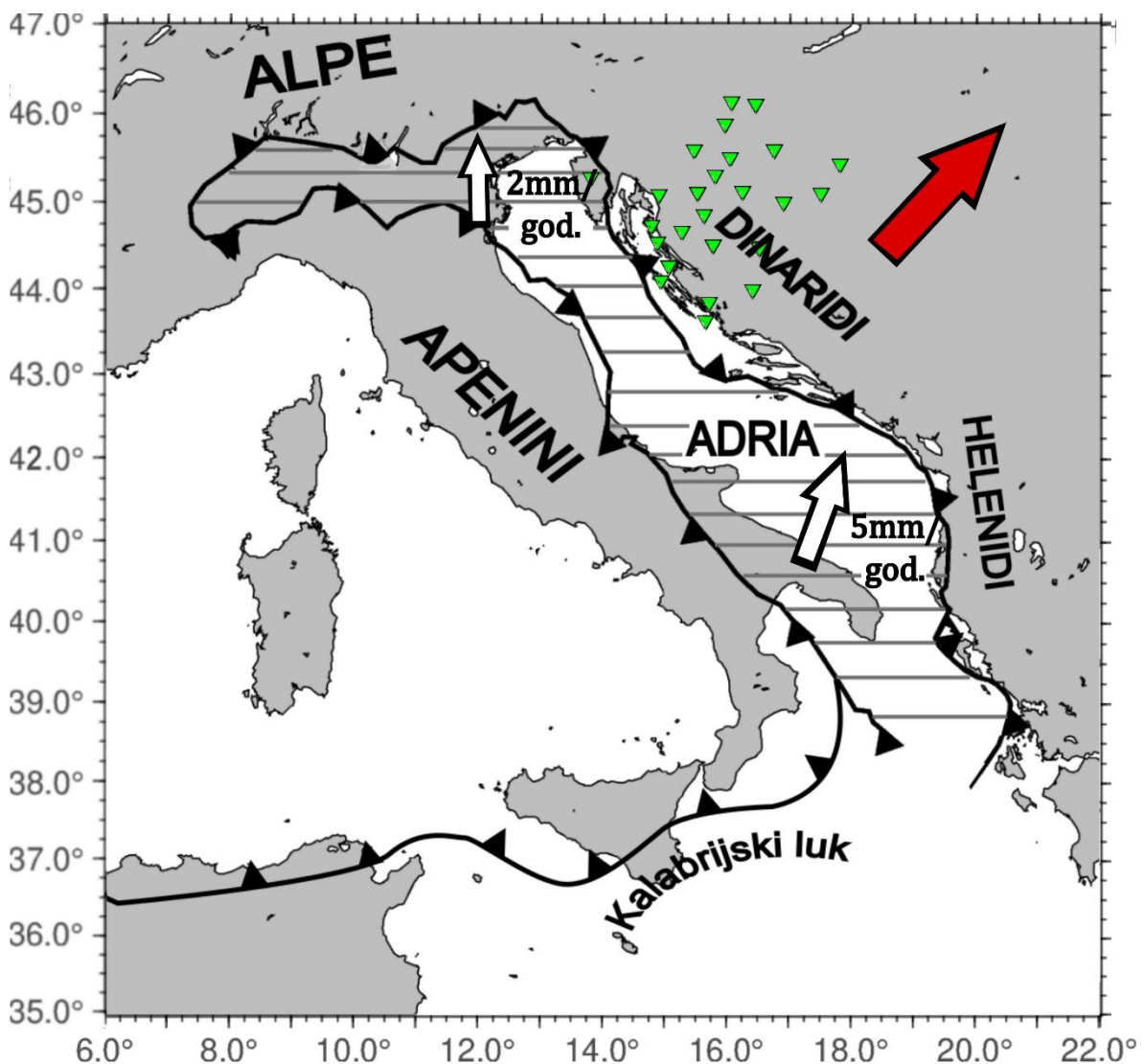


**Slika 1.5:** Ilustracija hipotetskog konvektivnog gibanja plašta u Sredozemlju. Iz Faccena i sur. 2014. Na slici je prikazan toroidalni oko subducirane Jadranske mikroploče s popratnim astenosferskim tokovima.

Toridalno gibanje materijala u gornjem plaštu ispod Jadranske mikroploče u smjeru od zapada prema istoku (Slika 1.5) potaknuto je retrogradnim gibanjem apeninskog dijela litosfere i povlačenjem litosfere (eng. slab *roll-back*) u karpatskom području. Takvo astenosfersko gibanje je moguće samo ako ne postoji subducirana litosfera na području središnjih Dinarida koja bi onemogućila protok astenosferskog materijala. Drugi predloženi mehanizam vezan je uz odlamanja subducirane litosfere (eng. *slab break-off*) u apeninskoj subdukcijskoj zoni zbog čega dolazi do smanjenog utjecaja Apeninske litosferne ploče na astenosferski tok (Király i sur. 2018). Tada bi efekt povlačenja (eng. *drag-effect*) proizveden od strane Jadranske mikroploče mogao utjecati na strukturu koja se nalazi ispod nje (Salimbeni i sur. 2013). Kao posljedica gibanja Jadranske mikroploče prema NE astenosfera bi vođena spomenutim gibanjem trebala pratiti spuštanje litosfere u istočnom dijelu Jadranske mikroploče. Nepostojanje duboko podvučene litosfere na području ispod središnjih Dinarida podržano je rezultatima studije deformacije plašta pomoću analize SKS dvoloma (Salimbeni i sur. 2022).

Gornji dio Zemljinog plašta je uglavnom sačinjen od anizotropnog materijala, pretežito je riječ o mineralu olivinu (Mainprice i sur., 1993), koji ima svojstvo da se orijentira u smjeru glavne osi naprezanja. SKS faza teleseizmičkih potresa koja prolazi kroz tekuću vanjsku jezgru Zemlje je osjetljiva na orijentaciju kristala minerala olivina. Prilikom prolaska kroz anizotropno područje dolazi do dvoloma SKS faze na dva nova vala koji putuju medijem različitim brzinama, a orijentacija i razlika u vremenu nailaska

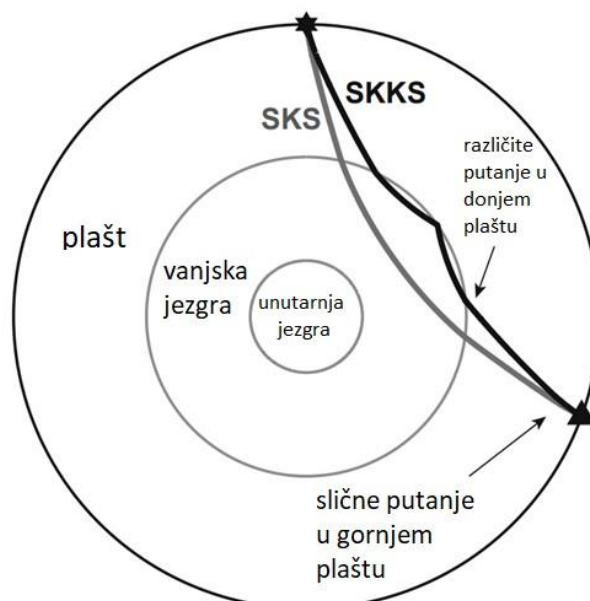
te dvije faze definiraju anizotropna svojstva ispod seizmološke stanice na kojoj su zabilježene (Savage 1999). Analizom velikog broja stanica moguće je utvrditi anizotropiju koja je vezana za deformaciju gornjeg plašta ispod nekog područja. Smicajnom deformacijom materijala bogatog olivinom (npr. trenje nastalo astenosferskim tokom) nastaje A-tip preferencijalne orijentacije kristalografskih osi (LPO, eng. *lattice preferred orientation*) (Qi i sur. 2018). A-tip preferencijalne orijentacije kristalografske osi očekivan je u subdukcijskom sustavu Jadranske mikroploče i za taj tip je smjer brzih osi podudaran sa smjerom astenosferskog toka.



**Slika 1.6:** Skica tektonike Jadranske mikroploče (Adria) i okolnog područja. Bijelim strelicama su označeni vektori pomaka zabilježeni uz pomoć GPS-a (Weber i sur. 2010.), dok je crvenom strelicom prikazan pretpostavljeni smjer astenosferskog toka u slučaju da ne postoji duboki litosferni podvučeni materijal. Zelenim trokutima su označene seizmološke postaje koje su korištene u ovom radu. Granice tektonskih ploča iz Handy i sur., 2019 i Reilinger i sur., 2006.

## 1.2 Pojava dvoloma kod SKS faze

Pojava dvoloma SKS faze (eng. *SKS splitting*) predstavlja izvrstan alat za istraživanje anizotropije u najgornjem dijelu plašta. SKS faza nastaje kao posljedica prolaska valova dalekih potresa kroz vanjsku jezgru Zemlje, a može se detektirati na seizmografima u rasponu od 60 do 140 stupnjeva kutne udaljenosti. U imenu SKS, S označava dio putovanja vala plaštom kao posmični (S) val, a K označava dio putovanja kroz vanjsku tekuću jezgru Zemlje gdje val putuje kao kompresijski (P) val. U tekućoj vanjskoj jezgri nije moguće postojanje S valova, stoga se dolaskom vala na granicu plašta i jezgre dio energije S vala pretvara u energiju P vala. Prolaskom kroz jezgru i ponovnim dolaskom na granicu jezgre i plašta dolazi do ponovne konverzije dijela energije P vala u energiju S vala (Slika 1.7). Ovakvom konverzijom iz P u SV fazu vala on gubi svu informaciju o prethodnoj polarizaciji. U daljnjem rasprostiranju kroz plašt, nakon prolaska kroz tekuću jezgru, val može naići na anizotropno sredstvo. Tada val doživljava dvolom kao posljedicu prolaska anizotropnim sredstvom u plaštu ispod stanice na kojoj je SKS val zabilježen. Istraživanja su pokazala da je anizotropija u donjem dijelu plašta slabo izražena (npr. Niu i Perez, 2004.), stoga možemo pretpostaviti da je anizotropija zabilježena na stanici podrijetlom iz gornjeg plašta ili kore.



**Slika 1.7:** Skica putanja SKS (siva crta) i SKKS (crna crta) seizmičkih faza kroz unutrašnjost Zemlje. Preuzeto iz Lutz i sur. 2020.

Prema izvodu prikazanom u Shearer, 1999 elastodinamička jednadžba gibanja dana je izrazom:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Ukoliko na jednadžbu (1) primijenimo Hookeov zakon:  $\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl}$  ( $u_i$  je komponenta pomaka,  $\sigma$  je tenzor napetosti,  $c_{ijkl}$  su elementi tenzora elastičnosti,  $\epsilon$  je tenzor elastičnosti, a  $\rho$  je gustoća medija; uz Einsteinovu notaciju) kako bismo napetosti zamijenili deformacijama, može se pisati:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_j} (c_{ijkl} \epsilon_{kl}) \quad (2)$$

Nakon što uzmemo u obzir svojstva simetrije tenzora elastičnosti tj.  $c_{ijkl} = c_{ijlk}$  i upotrijebimo izraz  $\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right)$ , možemo pisati:

$$c_{ijkl} \epsilon_{kl} = \frac{1}{2} c_{ijkl} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) = c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \quad (3)$$

Uvrstimo jednadžbu 3 u 2 i dobijemo:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (4)$$

Pretpostavimo rješenje za jednadžbu gibanja prilikom prolaska ravnih valova koji se šire brzinom  $v$  od izvora:

$$\vec{u} = \vec{a} e^{-i\omega(t - \vec{s} \cdot \vec{x})}, \quad (5)$$

gdje vektor  $\vec{u}$  nosi informaciju o amplitudi i polarizaciji vala. Vektor  $\vec{s}$  je vektor sporosti sa iznosom  $|\vec{s}|=1/v$ . Vektor  $\vec{u}$  je pomak čestice u trenutku  $t$  na udaljenosti  $\vec{x}$  od izvora. Uvrštavanjem komponenti pomaka  $\vec{u}$  u jednadžbu gibanja (4) slijedi:

$$\rho a_i = a_k c_{ijkl} s_j s_l \quad (6)$$



Umjesto vektora sporosti može se uvesti jedinični vektor sporosti  $\vec{s}_0$  s odnosom  $\vec{s} = \frac{\vec{s}_0}{v}$ . Nakon dijeljenja sa gustoćom  $\rho$  izraz (6) prelazi u:

$$a_i = a_k \frac{c_{ijkl}}{\rho} s_{0j} s_{0l} \cdot \frac{1}{v^2} \quad (7)$$

Sada je moguće uvesti Christoffelovu matricu  $M_{ik}$ :

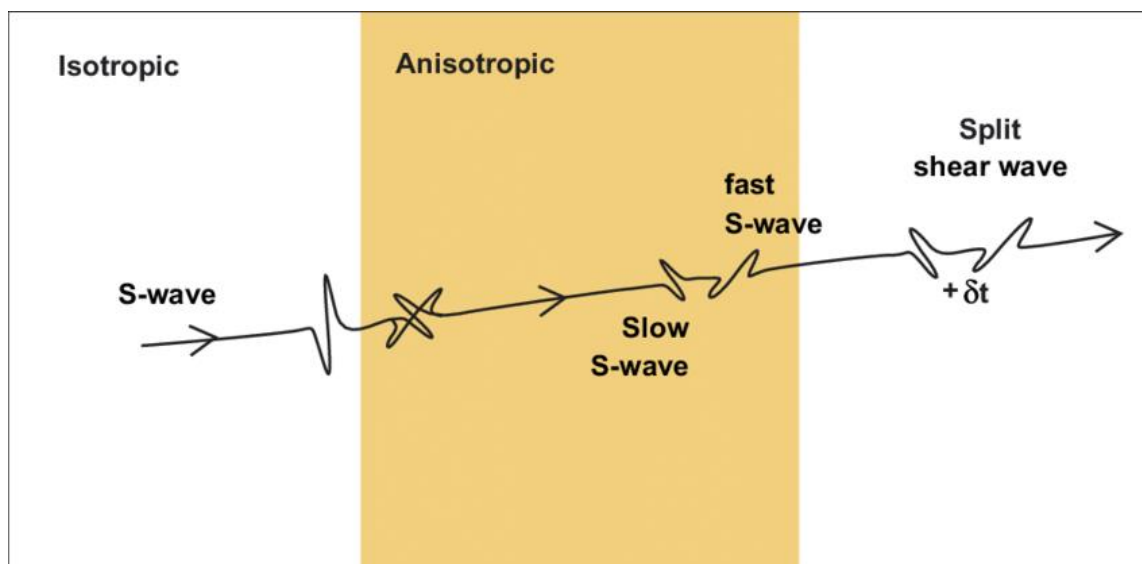
$$M_{ik} = \frac{c_{ijkl}}{\rho} s_{0j} s_{0l}. \quad (8)$$

Uvrštavanjem matrice  $M$  dobiva se konačni izraz:

$$M_{ik} a_k = c^2 a_i. \quad (9)$$

Izraz (9) je jednadžba svojstvenih vrijednosti matrice  $M$ . U izotropnom slučaju jednadžba (9) se svodi na 3 diferencijalne jednadžbe 2. reda. Međutim, u općenitom anizotropnom slučaju ne postoji jednostavan izraz za  $v$ , već se za svaki smjer vektora  $\vec{s}$  svojstvene vrijednosti  $c^2$  računaju iz matrice  $M$ . Postoje 3 različita rješenja za 3 različita vala: jedan kvazi-P ( $qP$ ) i dva kvazi-S ( $qS$ ) vala različitih brzina.

Kada radijalno polarizirani S val (SV) putuje anizotropnim medijem, on se razdvaja u dva kvazi transverzalna i međusobno ortogonalna  $qS_1$  i  $qS_2$  vala od kojih je jedan brži, a jedan sporiji. Ako je razlika u vremenu putovanja dva kvazi vala veća od trajanja originalnog impulsa, onda će se zabilježiti dva zasebna dolaska (slika 1.8). Anizotropiju je stoga moguće definirati s dva parametra: kutom  $\varphi$  koji označava smjer polarizacije bržeg kvazi transverzalnog vala i razlikom u nastupnim vremenima bržeg i sporijeg vala  $\Delta t$ . Spomenuti parametri daju informacije o anizotropiji, a iz  $\Delta t$  se može procijeniti debljina anizotropnog sloja i intenziteta anizotropnosti. Brza os anizotropnog sloja koju dobijemo iz parametra  $\varphi$  može se dovesti u vezu sa smjerom toka u gornjem plaštu, odnosno brza os je paralelna smjeru toka gornjeg plašta.



**Slika 1.8:** Prolazak posmičnog vala anizotropnim medijem i nastanak dvije ortogonalno polarizirane faze. Slika preuzeta iz Wuestefeld, i sur. (2008).

Anizotropija se kvantificira koeficijentom anizotropnosti  $k$ :

$$k = \frac{v_{max} - v_{min}}{v} \cdot 100\%,$$

gdje su  $v_{max}$  i  $v_{min}$  maksimalna i minimalna brzina (brzine bržeg i sporijeg vala), a  $v$  srednja brzina rasprostiranja vala kroz medij. Unutrašnja anizotropija (eng. *intrinsic anisotropy*) je uzrokovana unutarnjim svojstvima minerala i čini osnovicu za pojavu preferentne orijentacije minerala. Svaki mineral posjeduje unutrašnju anizotropiju koja ima svoju orijentaciju. Vanjskim djelovanjem moguće je stvoriti slučaj ujednačeno orijentiranih minerala. Kao glavni uzrok anizotropije u najgornjem dijelu Zemljinog plašta pretpostavlja se magnezij-željezov silikat ( $(Mg,Fe)_2SiO_4$ ), odnosno mineral olivin. Ukupna anizotropnost sredstva ovisi o zastupljenosti anizotropnog materijala pa je anizotropnost stijena uvijek manja od anizotropnosti minerala. U slučaju pozicioniranja minerala olivina tako da je većina orijentirana u jednom smjeru nastaje preferentna orijentacija minerala olivina (LPO), koja može uzrokovati heksagonalnu anizotropiju (Shearer, 1999.). Takav oblik anizotropije, ovisan o azimutu, potreban je kako bi se objasnio dvolom posmičnih valova koji je uočljiv na dolaznoj SKS fazi teleseizmičkih valova.

Drugi mogući uzročnik anizotropije je preferirana orijentacija oblika (SPO). U tom slučaju na malim skalama je promatrani materijal izotropan, ali ima anizotropne

heterogenosti (dijelove materijala koji se razlikuju od ostatka time što imaju anizotropna svojstva). Ako je valna duljina seizmičkog vala veća od dimenzija heterogenosti dolazi do pojave seizmičke anizotropije. Primjer *SPO* anizotropije uključuju tanke izmjenične slojeve materijala velike i male brzine. Drugi primjer uključuje preferencijalnu orijentaciju pukotina u inače izotropnoj stijeni. Nasumično raspoređene pukotine u stijeni mogu biti orijentirane u pretežito jednom smjeru tvoreći preferentni smjer anizotropije. Intenzitet anizotropije ovisi o gustoći pukotina, dimenzijama pukotina i jesu li pukotine ispunjene fluidom.

U ovakvom istraživanju ne smije se zanemariti niti doprinos anizotropnosti u Zemljinoj kori koji je uvijek prisutan.

### *1.3 Dosadašnja istraživanja*

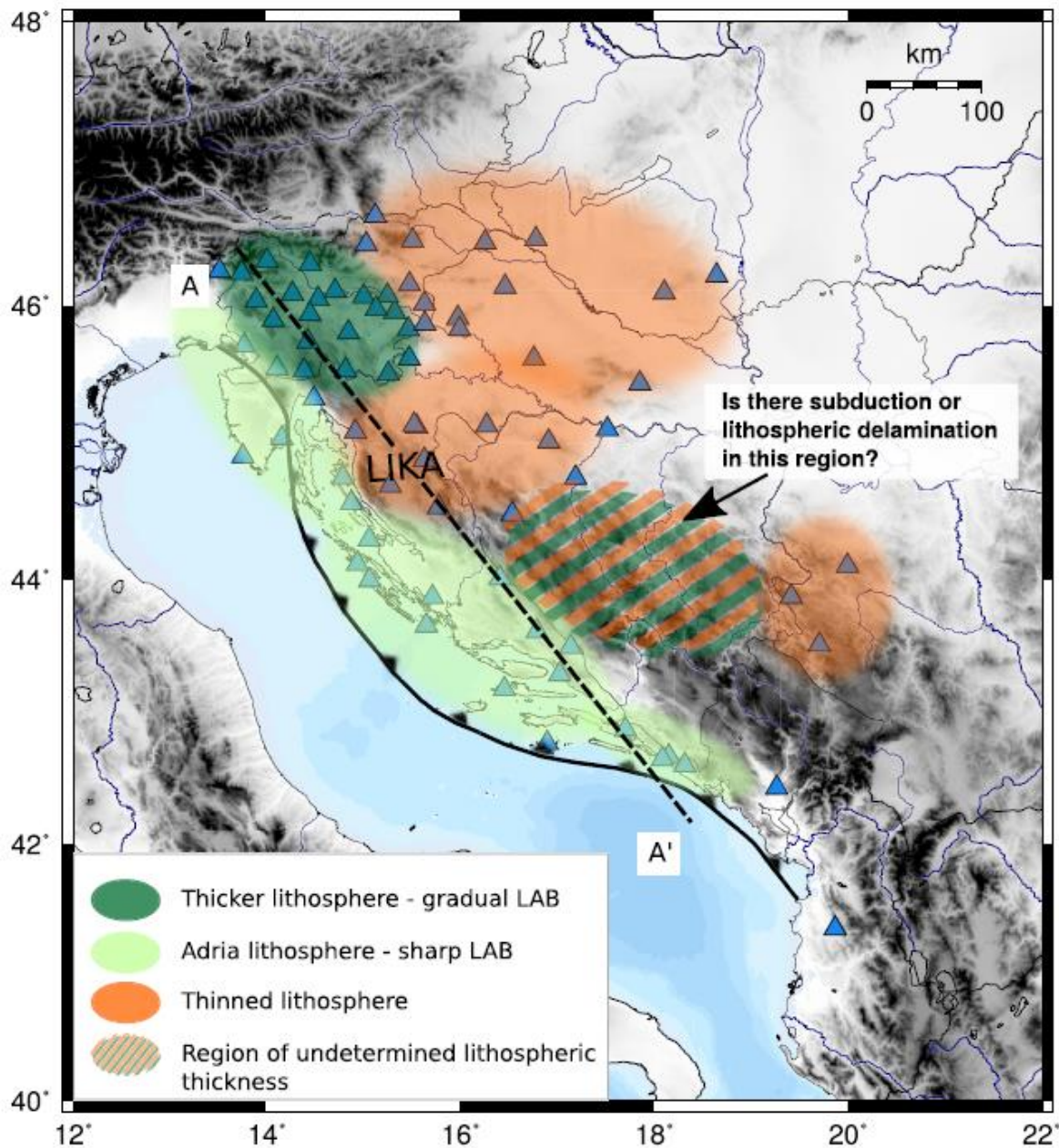
Dinaridima susjedni planinski lanci, kao što su Helenidi, Apenini i Alpe dobro su pokriveni nizom istraživanja (Piromallo i Morelli 2003., Petrescu i sur 2020., Salimbeni i sur. 2013., 2022, Schmid i sur. 2004.).

Prvo istraživanje litosfere ispod Hrvatske proveo je Mohorovičić nakon Pokupskog potresa 1909. (Mohorovičić 1910.). U svome radu opisao je nailazak dva različita para S i P faza. Za jedan par faza je točno pretpostavio da je nastao refrakcijom na diskontinuitetu koji danas nosi njegovo ime. Na temelju nastupnih vremena tog potresa zabilježenog na više seizmoloških postaja u Europi izračunao dubinu diskontinuiteta od 54 km. Od onda su provedena mnoga istraživanja strukture litosfere ispod Hrvatske.

Analiza debljine litosfere ispod Dinarida koristeći funkcije prijarnika S valova (Belinić i sur. 2018) pokazala je kontraste u litosfernoj strukturi ispod različitih dijelova Dinarida i okolnog područja (Jadranskog mora i Panonskog bazena). Granica litosfere i astenosfere (eng. *Lithosphere-asthenosphere boundary LAB*) u sjeverozapadnom dijelu Dinarida je duboka (110 km) te postupno postaje plića ispod Jadranskog mora. Također, uočen je i nagli prijelaz prema znatno tanjoj litosferi ispod središnjih Vanjskih Dinarida (50-60 km) i Panonskog bazena. Manja debljina litosfere poklapa se s tomografskim

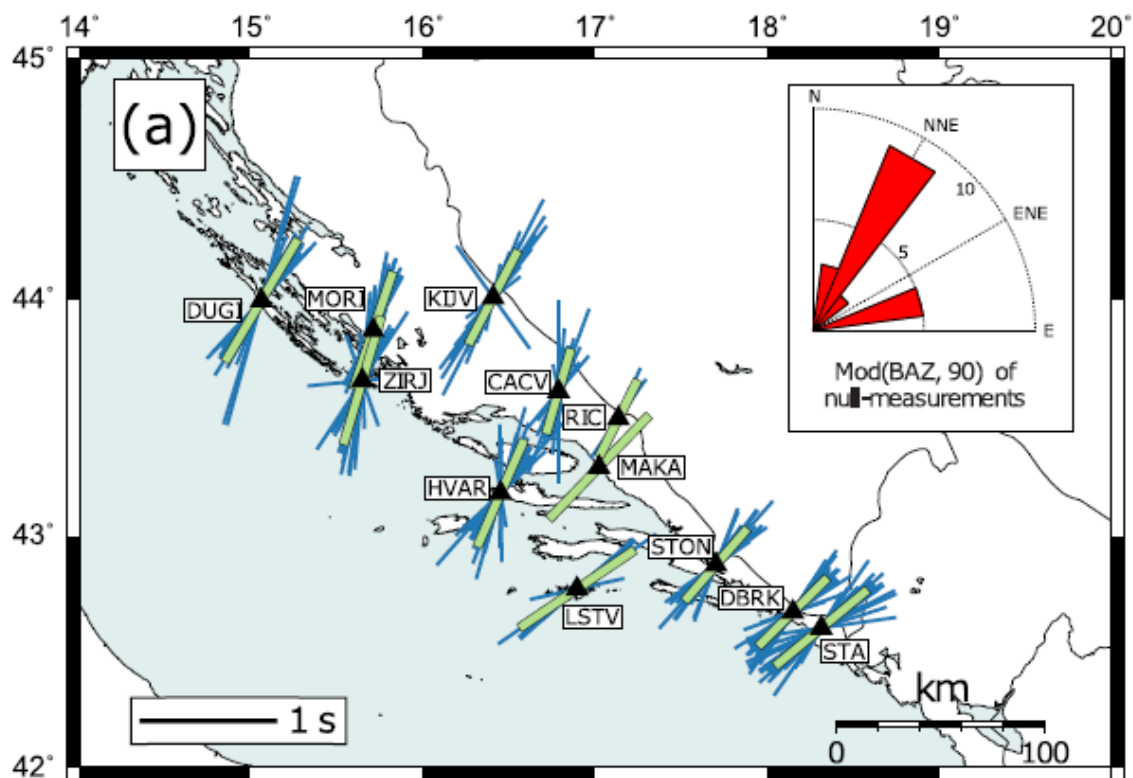
slikama koje sadrže anomaliju niske brzine u gornjem plaštu središnjih Dinarida (Piromallo i Morelli 2003.).

Karta debljine litosfere (Slika 1.9) ukazuje na anomalno područje Like kao regiju u kojoj je moguće da nema duboko subduciranog litosfernog bloka.



**Slika 1.9** Tektonska karta šireg dinarskog područja. Punom crnom linijom je iscrtana lokacija glavne fronte deformacije. Narančastom su označene površine tanje litosfere, zelenom bojom su označena područja deblje litosfere. Svijetlo zelenom bojom je označeno područje s prisustvom litosfere koja podrijetlom dolazi iz Jadranske mikroploče. Preuzeto iz Belinić i sur. 2017.

Istraživanja anizotropije u plaštu ispod Dinarida i okolnog područja su napravljena u više navrata (Subašić i sur, 2017; Salimbeni i sur., 2022). Primarna metoda u oba istraživanja je bila analiza dvoloma SKS valova. Za središnji dio Vanjskih Dinarida je pokazano (Subašić i sur., 2017) da su brze osi približno okomite pružanju planinskog lanca i usmjerene su pretežito u NE-SW i NNE-SSW smjeru (slika 1.10). Iako je istraživanje provedeno na relativno malom području (12 seizmoloških postaja smještenih u Dalmaciji) uočena je rotacija brzih osi u smjeru suprotnom od kazaljke na satu za postaje na sjevernom dijelu promatranog područja. Spomenute brze osi se podudaraju s pretpostavljenim smjerom astenosferskog toka ako nema dubokog litosfernog bloka ispod sjevernih i središnjih Dinarida. Brze osi okomite na Dinaride i na istočnu obalu Italije su dobivene i u ostalim istraživanjima (Salimbeni i sur., 2022). CASE eksperiment (Molinari i sur. 2016) koji je proveden u sklopu AlpArray projekta dao je priliku proširiti skup podataka potrebnih za istraživanja u domeni dvoloma posmičnih valova. U Dinaridima je anizotropija opažena iz brzih osi povezana s dva procesa. U vanjskim Dinaridima riječ je o kombinaciji utjecaja fosilnog toka plašta paralelnom pružanju orogena (eng. *orogen-parallel*) i aktivnog toka plašta okomitom na pružanje orogena (eng. *orogen-perpendicular*), a u unutarnjim Dinaridima tokom plašta koji je paralelan pružanju orogena (Salimbeni i sur., 2022). Takvi rezultati pripisani su preferiranoj orijentaciji kristala olivina uzrokovanom astenosferskim tokom podno Jadranske mikroploče.



**Slika 1.10** Brze osi na području južnih Dinarida. Plavom bojom su označena zasebna mjerenja za svaku stanicu. Zelenom linijom je označena srednja vrijednost za sva navedena mjerenja. (Subašić i sur. 2017)

Istraživanja anizotropije Karpatsko-Panonske regije u centralnoj i istočnoj Europi (Petrescu i sur., 2020) pokazala su da postoji generalna NW-SE orijentacija brzih osi. Petrescu i sur. (2020) predlažu da orijentacija brzih osi nema korelaciju s geologijom pri površini, niti s apsolutnim gibanjem tektonske ploče. Drugim riječima, predlažu da kontinentalno gibanje u odnosu na duboki plašt ne inducira koherentne deformacije u astenosferi. Kao mogući mehanizam predloženo je da se plašt između Jadranske mikroploče i istočnoeuropskog dijela Euroazijske ploče (kratona) premješta okomito na os poniranja Jadranske mikroploče.

## 2. Podaci

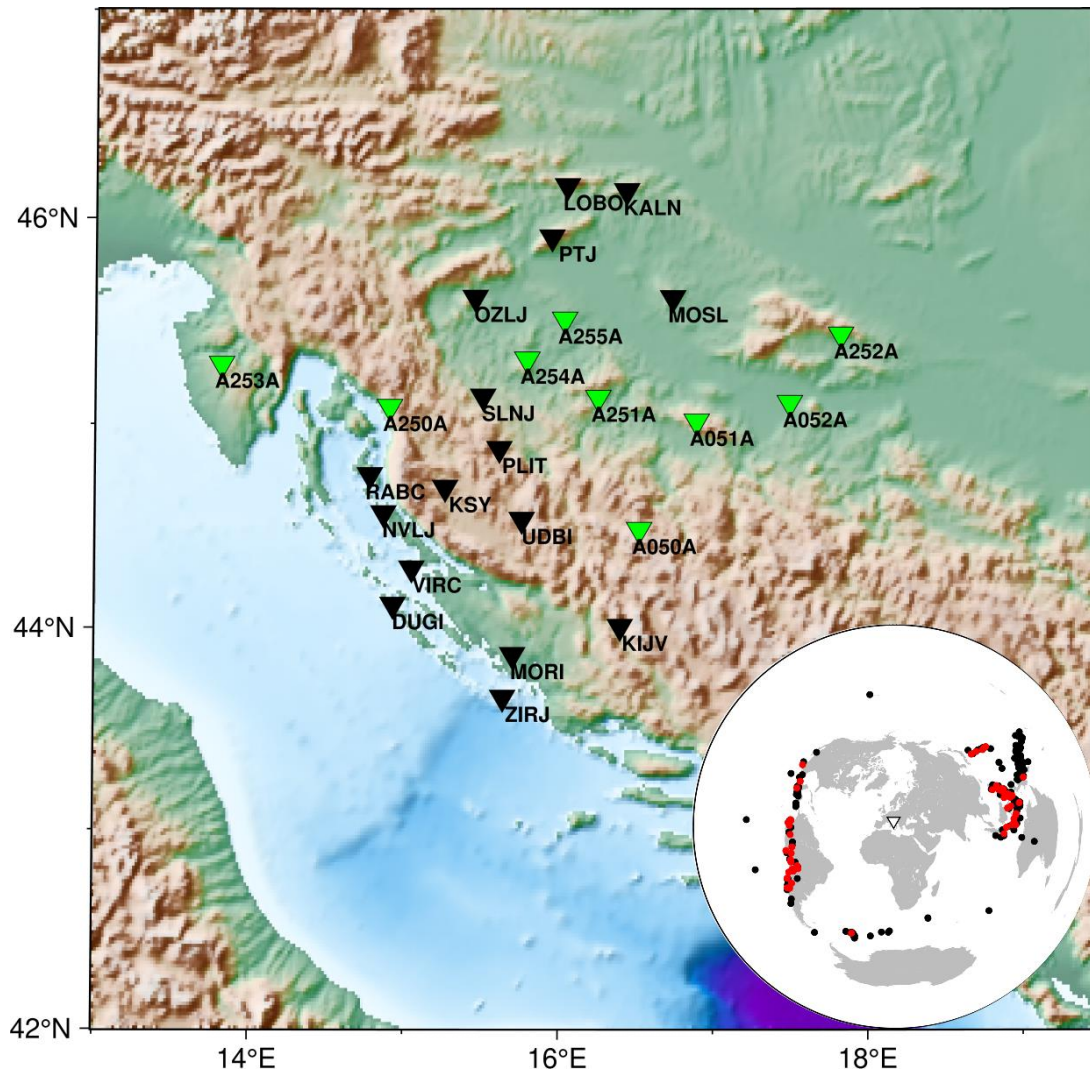
Istraživanje je provedeno na podacima 25 seizmoloških stanica (Slika 2.1.) na području Hrvatske i okolice (Tablica A1). Korištene seizmološke postaje mogu se podijeliti na privremene i stalne. Privremene seizmološke postaje, označene s A050A-A052A i A250A-A255A postavljene su u okviru europskog projekta AlpArray (Molinari i sur. 2016.) dok su preostale stalne postaje iz osnovne mreže seizmografa koje održava Geofizički odsjek. Svi korišteni instrumenti su širokopojasni s uzorkovanjem 50 Hz ili većim.

Analizirani seizmogrami prikupljeni su za potrese magnituda  $M_w > 6.0$  za epicentralne udaljenosti od  $90^\circ$  do  $130^\circ$  i u vremenskom periodu od siječnja 2016. do siječnja 2020. godine (Slika 2.1). Lokacije potresa se uglavnom nalaze sjeveroistočno, sjeverozapadno i jugozapadno s manjom koncentracijom na jugu relativno u odnosu na položaj mreže seizmografa. Zbog toga pokrivenost azimuta smjera od postaje prema epicentru potresa za područje promatranja nije idealna. Zapisi su se sastojali od jednosatnih intervala sa digitalizatora na svakoj stanici koji su objedinjeni u kontinuirani niz podataka. Zatim je na svakome od nizova uz pomoć kataloga potresa pronađen relevantan zabilježeni potres.

Svi razmatrani potresi su u rasponu od  $90^\circ$  do  $130^\circ$  epicentralne udaljenosti jer je za istraživanje potrebno da valovi na putu do stanice na kojoj su zabilježeni prođu kroz Zemljinu tekuću jezgru (slika 1.7). Tako osiguravamo da zabilježeni dvolom SKS valova odgovara anizotropiji područja ispod stanica unutar promatranog područja (Slika 2.2).

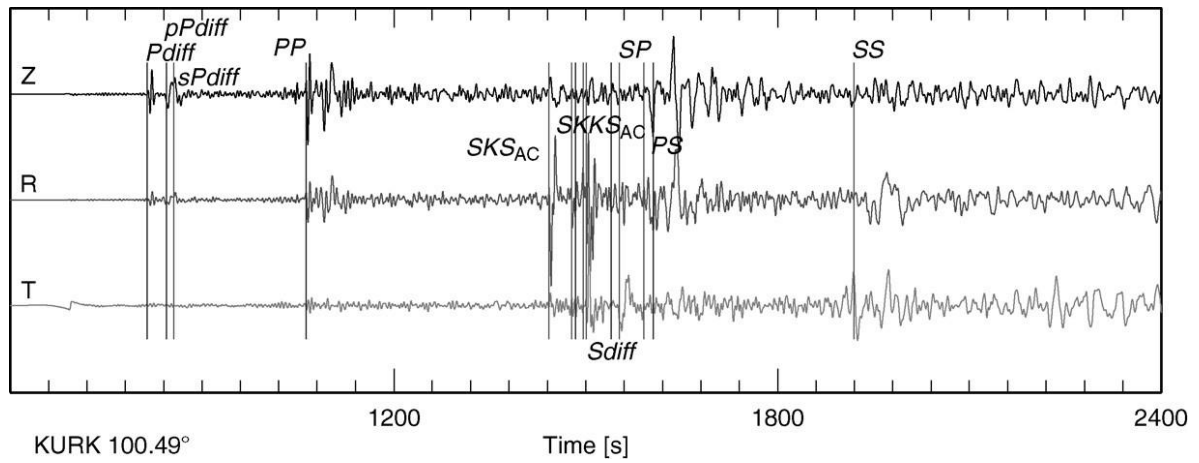
Dio seizmoloških postaja nalazi se u blizini Jadranskog mora što znači da je mogućnost pojave šuma relativno velika i može utjecati na kvalitetu rezultata. Da bi se pronašao SKS dvolom potrebno je prvo identificirati nailazak SKS faze, što podrazumijeva korištenje kvalitetnih seizmograma na kojima je moguće jasno razaznati nailaske faza. Dominantni period SKS faze (8-10 s) sličan je dominantnom periodu šuma na stanicama u priobalju (Schmid i sur. 2004) što uvelike otežava identifikaciju nailazaka SKS faze. Za stanice na priobalju (RABC, NVLJ, VIRC, DUGI, MORI) je zato omjer signala i šuma (SNR) izrazito velik i postotak zadovoljavajućih mjerenja u odnosu na zabilježena je vrlo mali u odnosu na stanice koje su u unutrašnjoj Hrvatskoj.

Stanica KSY se istaknula kao anomalija jer se iznosi oba parametra dvoloma vrlo razlikuju od okolnih i unatoč tome što ona ima prosječan postotak kvalitetnih mjerenja (10 %).



**Slika 2.1:** Promatrana regija s naznačenim seizmološkim stanicama i epicentri svih razmatranih potresa. Zelenom bojom su označene privremene stanice dok su crnom naznačene stalne seizmološke postaje. Na globalnoj karti epicentara crvenom bojom su označeni epicentri koji su proizveli dobre ili prihvatljive rezultate, a crnom epicentri svih razmatranih potresa.





**Slika 2.2:** Trokomponentni seizmogram potresa srednje dubine koji je na  $100^\circ$  udaljenosti od stanice u Kazahstanu na kojoj je zabilježen. Na seizmogramu je moguće uočiti nailazak prvo P faze, koju nakon nekog vremena prati SKS faza koja nailazi prije glavne S faze. Preuzeto iz Kennett (2007.)

## 3. Metode

### 3.1 Računalna obrada

Obrada podataka je provedena koristeći program SplitRacer (Reiss i Rumpker, 2017). SplitRacer je programski paket napisan u programskom paketu MATLAB, namijenjen za analizu dvoloma teleseizmičkih valova. Prednost SplitRacera je mogućnost obrade velike količine podataka u relativno kratkom vremenu.

Metoda kojom se vrši analiza dvoloma valova je metoda minimizacije energije (Silver i Chan 1991.) i primjenjiva je kada je poznata originalna orijentacija vala. Metoda minimizacije energije vrši pretragu dva parametra, smjera polarizacije brze osi  $\varphi$  i razlike u vremenu  $\Delta t$  nailaska dva kvazi S (qS) vala. Traže se oni parametri koji uklanjaju energiju s transverzalne komponente zabilježenog vala. Jednom kada su nađeni parametri za koje je energija minimalna, oni se uzimaju kao rezultatne vrijednosti. Postupak uklanjanja energije na transverzalnoj komponenti odgovara linearizaciji gibanja čestice. Ako je gibanje čestice linearno, tada je dobiveni smjer brze osi  $\varphi$  anizotropnog materijala paralelan ili okomit na azimut smjera od postaje prema epicentru potresa zabilježenog vala. SplitRacer koristi rezoluciju od 0.1 s za  $\Delta t$  u rasponu od 0.0 s do 4.0 s i 1 stupanj za  $\varphi$  u rasponu od 0 do 180 stupnjeva. Radi temeljite statističke analize podataka uzima se 50 pomaknutih vremenskih prozora. Pomaknuti vremenski prozori su nasumično generirani u blizini originalnog vremenskog prozora koji je dobiven metodom pretrage parametara. Parametri svake iteracije mogu se vidjeti na histogramu u gornjem desnom kutu (npr. slika 3.1). Rezultati postignuti korištenjem metode minimizacije energije pokazuju pouzdane rezultate za veliki raspon azimuta smjera brzih osi (Long i Silver 2009.).

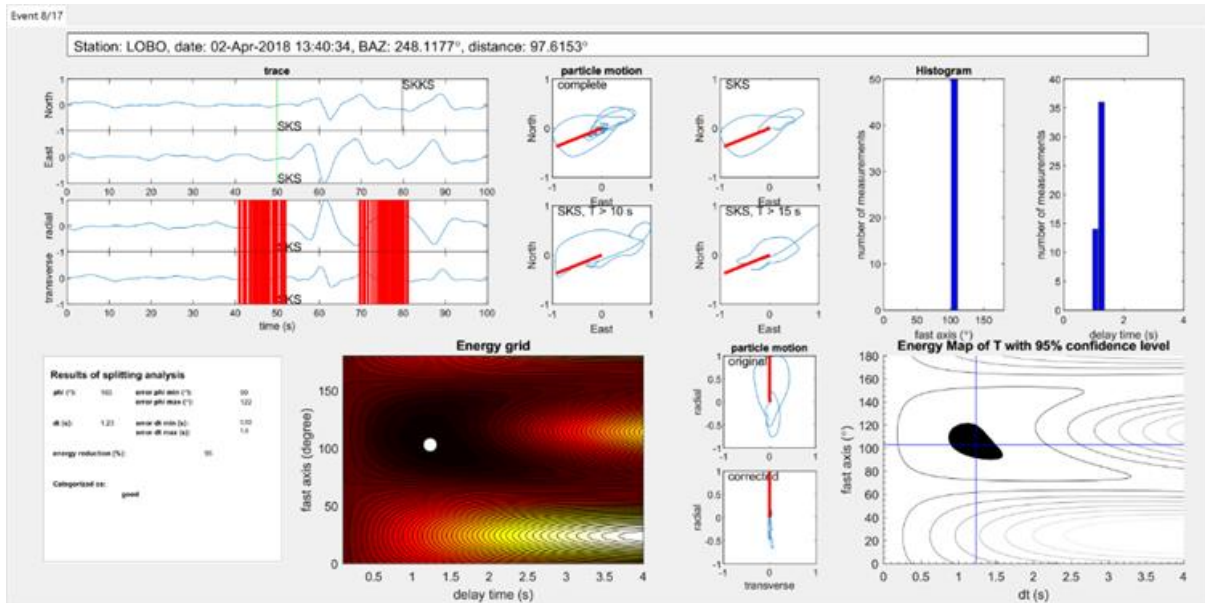
Uz grafičko sučelje pomoću kojeg je moguće analizirati i klasificirati zabilježene događaje, SplitRacer podržava i opciju automatizacije procesa koja koristi unaprijed određene kriterije za kategorizaciju događaja. Kategorizacija se vrši prema procijenjenoj kvaliteti rezultata uvrštavanjem svakog od potresa u jedan od razreda:

- *Poor*, Loše

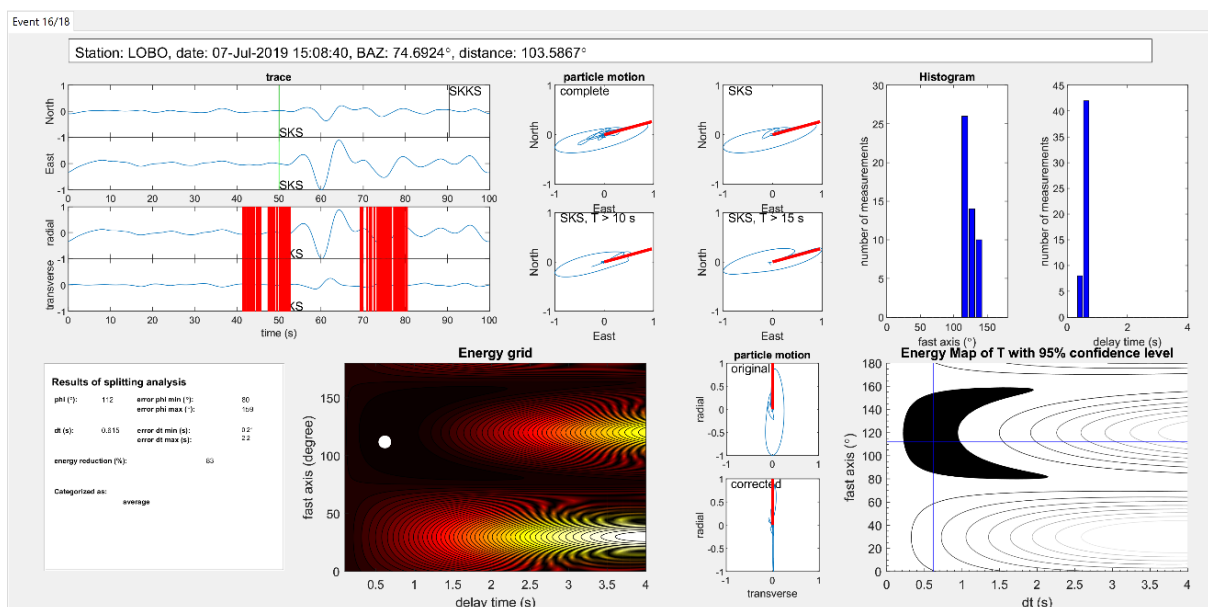
- *Average*, Prosječno
- *Good*, Dobro
- *Null*, Nul-mjerenje

Dobro mjerenje (slika 3.1) podrazumijeva jasan nailazak SKS vala na obje komponente zapisa, transverzalnoj i radijalnoj. Također, gibanje čestica je izraženo eliptično, a rasap parametara na histogramu je zanemariv pa je minimizacija energije na transverzalnoj komponenti velika. Kako bi se dobila ocjena kakvoće redukcije energije, može se izračunati postotak reducirane energije ispravljene transverzalne komponente (ona s najboljim pronađenim parametrima) u odnosu na originalnu transverzalnu komponentu. Za dobra mjerenja količina reducirane energije bi trebala biti veća od 85%. Prosječnim mjerenjem (slika 3.2) se podrazumijeva dobro mjerenje s većom količinom šuma nego dobro mjerenje, ali je količina reducirane energije na transverzalnoj komponenti i dalje zamjetna. Gibanje čestice se može razlikovati od tipično eliptičnog za dobro mjerenje, ali ispravljeno gibanje bi trebalo biti primjetno više linearno u odnosu na originalno gibanje. I u prosječnom mjerenju je zamjetna količina reducirane energije na transverzalnoj komponenti, odnosno postotak reducirane energije bi trebao biti viši od 50%.

Loše mjerenje (Slika 3.3) podrazumijeva zanemarivu količinu energije koja se pojavila na transverzalnoj komponenti pa time i čestica nema izraženo eliptično gibanje na originalnom zapisu. Događaji koji se smatraju lošim (*poor*) mjerenjima su oni kod kojih je prosječna količina reducirane energije ispod 50%, imaju relativno male intervale 95%-tne pouzdanosti (u usporedbi sa npr. *Null* mjerenjima) i mogu imati veliki rasap parametara na histogramu.

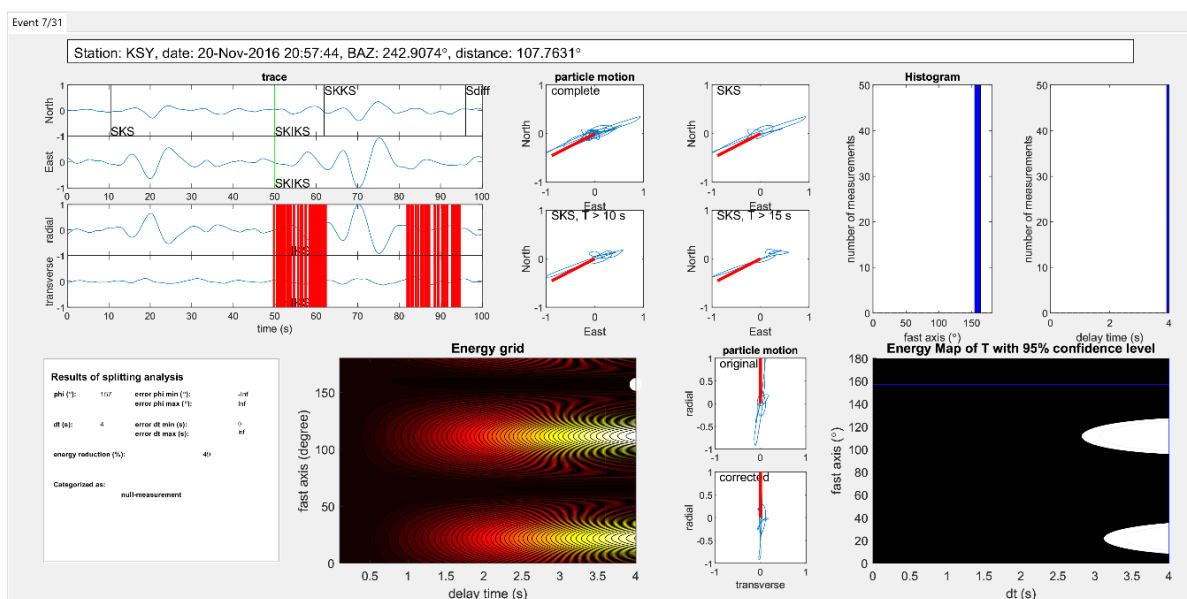


**Slika 3.1:** Primjer zadovoljavajućeg (*good*) mjerenja. Grafovi na lijevoj strani prikazuju istočnu i sjevernu, odnosno radialnu i transverzalnu komponentu seizmograma. Na E/N prikazu okomite pune linije označavaju nailaske faza, dok na transverzalno/radijalnom prikazu crvene pune linije označavaju 50 vremenskih prozora koji su korišteni pri analizi. U sredini su redom prikazane putanje gibanja čestice za: 1) cjelokupni zapis, 2) samo SKS prozor, 3) SKS prozor filtriran sa 10-50-sekundnim filterom i 4) SKS prozor filtriran 15-50-sekundnim prozorom. Histogram u desnom gornjem kutu prikazuje distribuciju parametara iz 50 razmotrenih vremenskih prozora. U sredini se također nalazi prikaz raspodjele energije, gdje bijela točka označava parametre koji dovode do dvoloma. Desno od grafa raspodjele energije nalazi se graf zabilježenog i korigiranog gibanja čestice. U donjem desnom kutu nalazi se 95%-tni interval pouzdanosti zajedno s raspodjelom energije. Presjecište dvije plave linije označava najmanji iznos energije koji je i dalje unutar intervala pouzdanosti. Na krajnjem lijevom dijelu je tekstualni prikaz kategorije mjerenja zajedno s pronađenim parametrima.

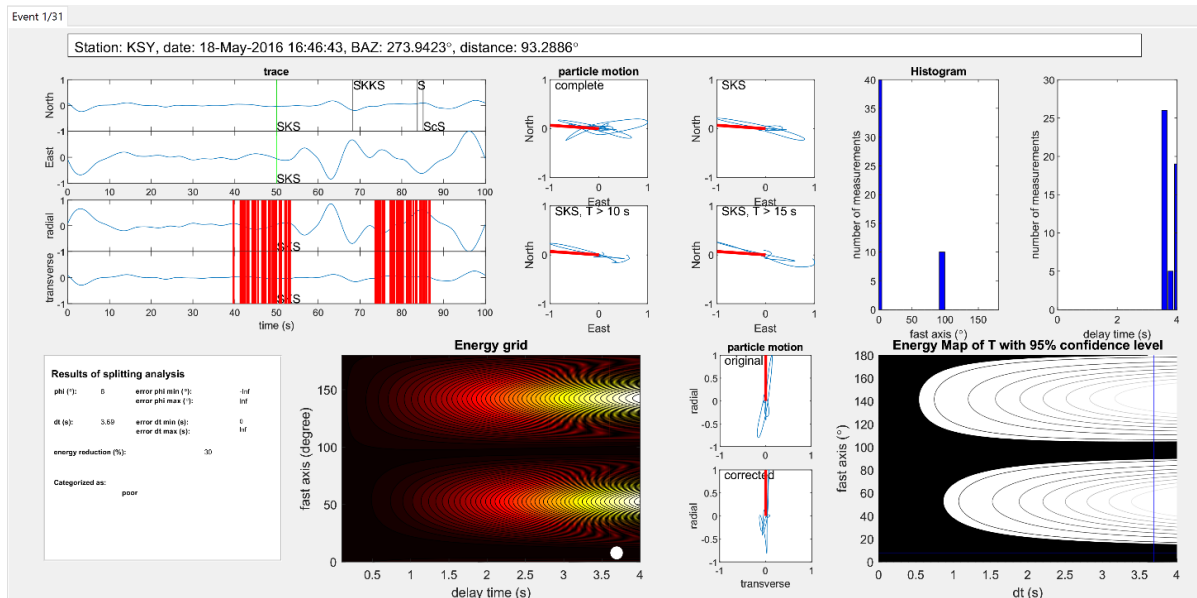


**Slika 3.2:** Primjer prosječnog (*average*) mjerenja. Opis prikaza kao na slici 3.1

*Nul*-mjerjenja (slika 3.4) se pojavljuju u dva slučaja, kada anizotropije na promatranom području nema ili kada je polarizacija ulaznog vala paralelna ili okomita smjeru brze osi anizotropnog medija. Događaj se klasificira kao *Nul* ako postoji vidljivi nailazak radialne komponente, ali ne i transverzalne. Kada transverzalne komponente nema, gibanje čestice je oblikovano samo radialnom komponentom pa je tada i gibanje čestica linearno. Pošto je u ovom slučaju inicijalno gibanje čestica linearno, minimizacija energije je nepostojeća. U slučaju *Nul*-mjerjenja analiza dvoloma često ukazuje na veliki iznos vremenske razlike u nailasku kvazi-faza. Minimalni iznos energije za *Nul*-mjerjenja se može naći na dvije različite brze osi (za razliku od jedne u svim ostalim slučajevima) i popraćen je velikim 95%-tnim intervalom pouzdanosti. *Nul*-mjerjenja se, iako ne daju direktan iznos anizotropije, mogu koristiti kao nadopuna kod analize smjerova brzih osi anizotropnog medija.



Slika 3.3: Primjer Null (*Nul*) mjerjenja. Opis prikaza kao na slici 3.1



Slika 3.4: Primjer lošeg (*poor*)mjerenja. Opis prikaza kao na slici 3.1

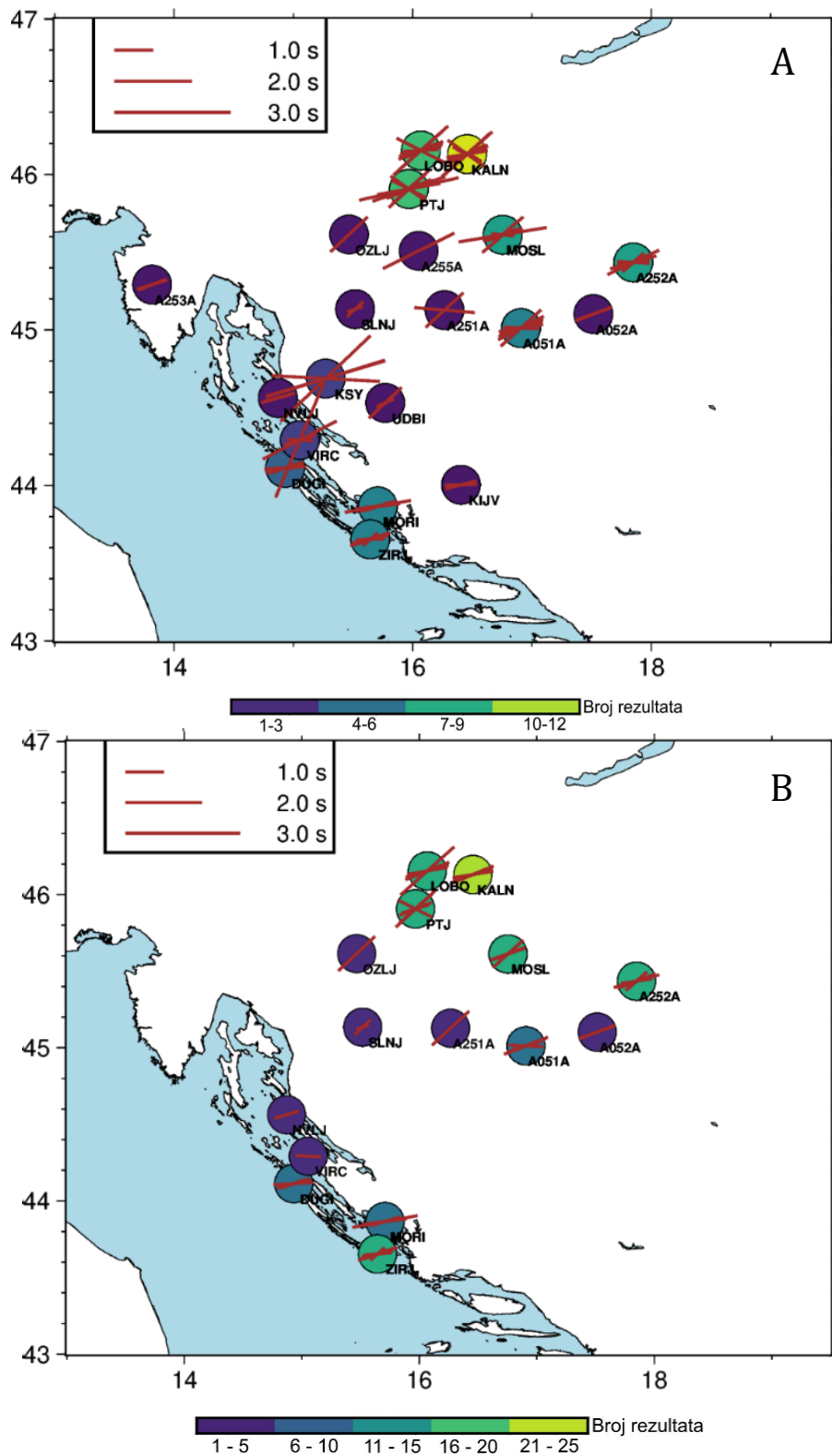
Za potrebe ovog rada svi seizmogrami su filtrirani pojasno propusnim filtrom za periode između 7 i 20 sekundi kako bi SKS val bio bolje vidljiv. Nakon filtriranja, metodom minimizacije energije transverzalne komponente su određene brze osi i pripadajuća vremensko odstupanja za sve podatke koji su prošli prijašnje korake.

U ovom radu je za najmanji dozvoljeni omjer signala i šuma (eng. *Signal to noise ratio* SNR ) uzet iznos od 3.0, koji se smatra graničnom vrijednošću valjanih rezultata. SNR = 3 je upotrijebljen jer za veće iznose omjera signala i šuma nije dobiven značajno kvalitetniji rezultat, ali je smanjen broj rezultata koji zadovoljavaju uvjete. Tada bi broj adekvatnih seizmograma bio premali za smislenu analizu. Iznosi frekvencija pojasno propusnog filtera i SNR su pronađeni kroz iterativno ispitivanje različitih frekvencija. U obzir su uzeti iznosi SNR u rasponu od 2.5 do 4.5 i periodi donje granice pojasno propusnog filtera u rasponu od 7 sekundi za donju granicu i 25 sekundi za gornju granicu.

## 4. Rezultati

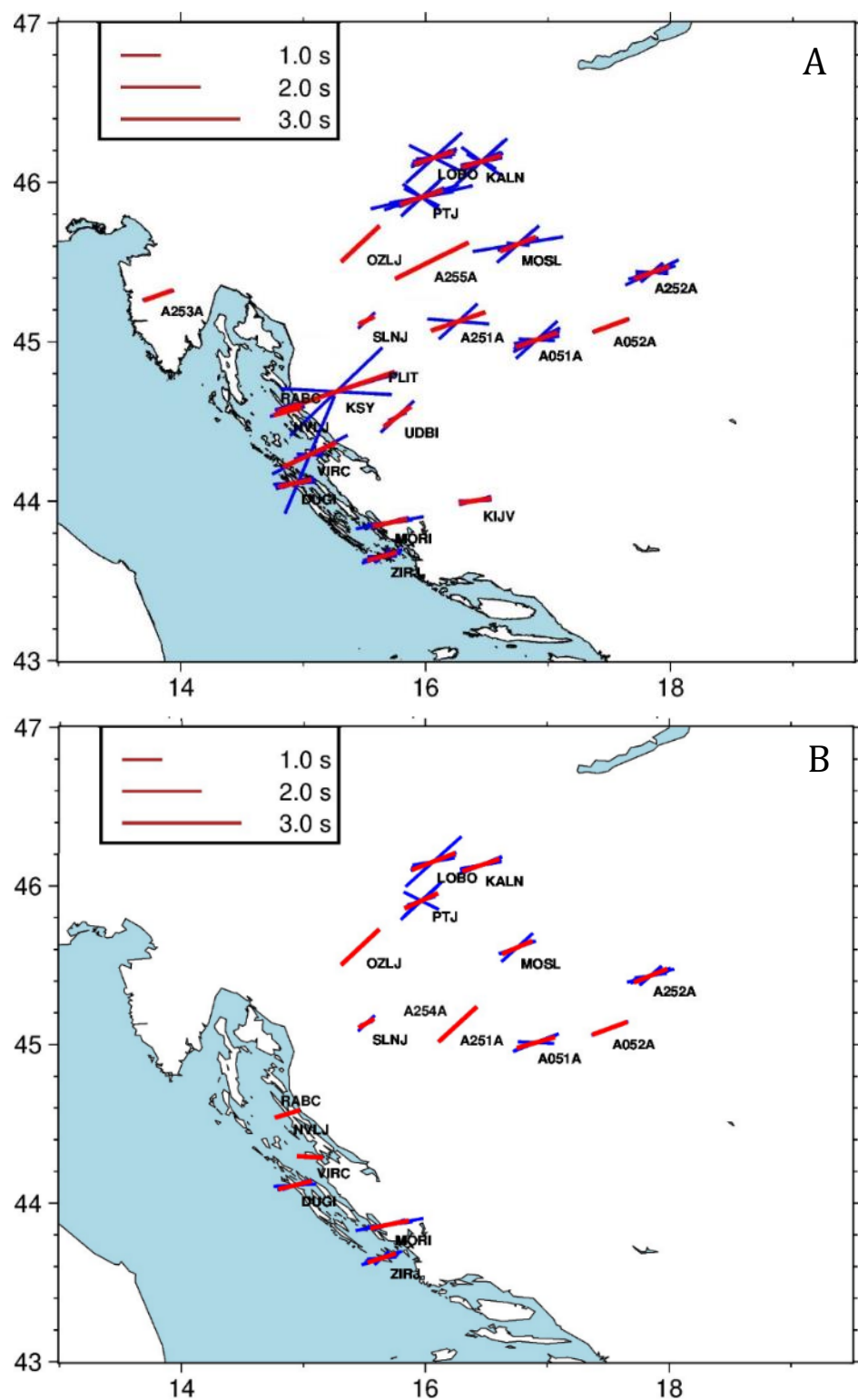
Od ukupno 865 razmotrenih seizmograma, analiza je rezultirala sa 156 dobrih i prosječnih mjerenja što čini 18% svih seizmograma. Neke od stanica, npr. A250A, A254A, A050A, PLIT, RABC, nisu imale niti jedan rezultat dobre ili prosječne kvalitete. Od ostalih postaja većina ih ima manje od 10 prihvatljivih rezultata što je relativno mali uzorak u usporedbi s ostalim istraživanjima provedenim na okolnom području. Za postaju KSY je uočen jako velik iznos u razlici vremena nailazaka faza od u prosjeku 3 sekunde, ali za tu postaju postoje samo tri prosječna mjerenja pa je pri analizi zanemarena. Ako se promotri postotak prihvatljivih seizmograma (broj zabilježenih dvoloma podijeljen sa brojem dobrih i prosječnih mjerenja) za svaku stanicu zasebno može se uočiti da je on veći na stanicama u unutrašnjosti Hrvatske, ali i da stalne postaje (KALN, LOBO, PTJ) imaju kvalitetnije rezultate u odnosu na privremene postaje.

U Tablici A1 prikazana je srednja vrijednost azimuta i razlike nailazaka faza s pripadnim standardnim devijacijama. Za vremenske podatke prosjek je srednjak svih podataka za određenu stanicu. Srednja vrijednost brzih osi i pripadna devijacija dobivena je uz pomoć **pycircstat** (Philipp i Berens, 2009) Python paketa za kružnu statistiku. Svi rezultati su prikazani na slikama 4.1, 4.2, 4.3 i 4.4. Na slikama je crvenom bojom ucrtan iznos srednje vrijednosti dobivenih srednjih osi.

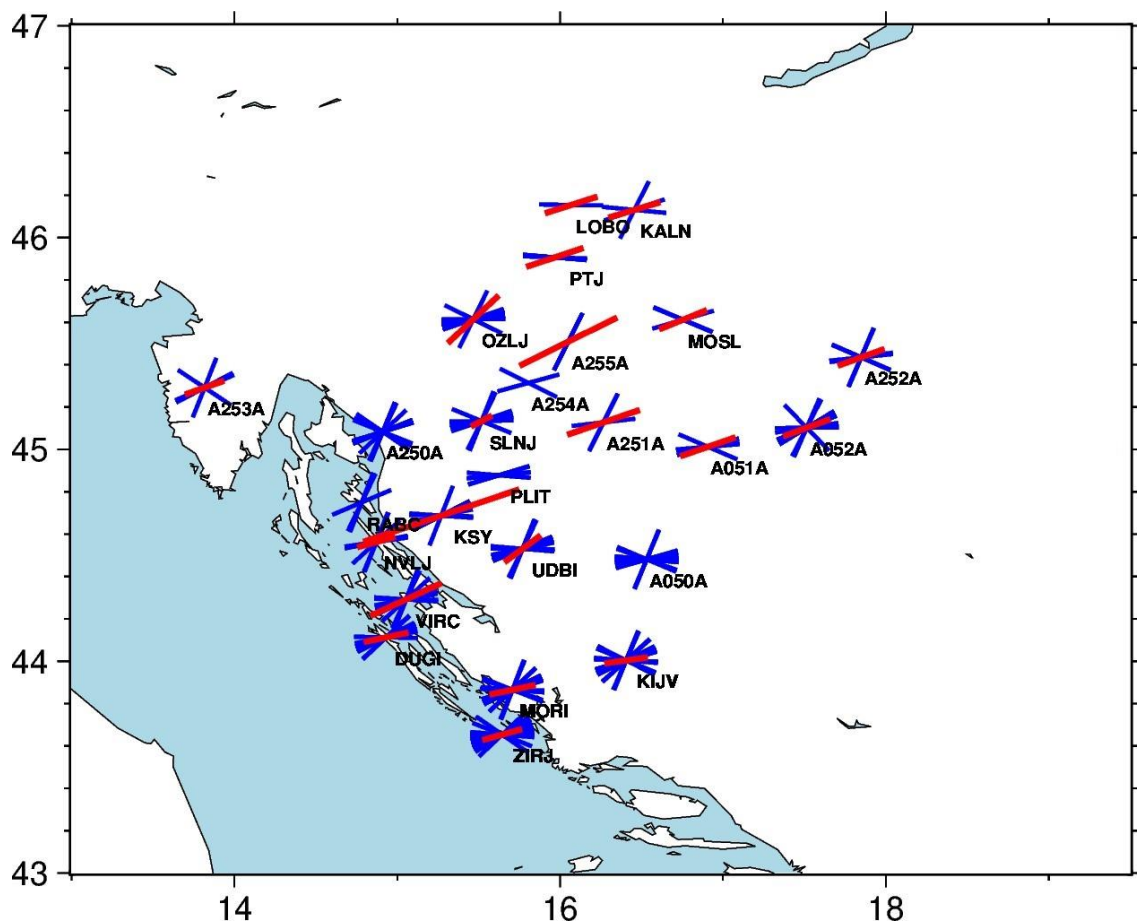


**Slika 4.1:** Prikaz brzih osi dobivenih analizom mjerenja dobre i prosječne (A) kvalitete i isključivo dobre (B) kvalitete s brojem rezultata za pojedine stanice. Crvene linije predstavljaju pojedinačne smjerove brzih osi za stanice prikazane na slici, a njihova duljina je skalirana sukladno razlici u vremenima nailazaka brze i spore osi. Boja krugova odgovara broju dobrih rezultata zabilježenih na stanicima.





**Slika 4.2:** Plavom linijom su označene brze osi pojedinačnih dobrih i prosječnih rezultata (A) i isključivo dobrih rezultata (B). Crvenom bojom ucrtana je srednja vrijednost povratnog azimuta svih mjerenja za pojedinu lokaciju, dok je duljina svake crvene linije proporcionalna srednjoj vrijednosti razlike vremena nailazaka brze i spore faze.

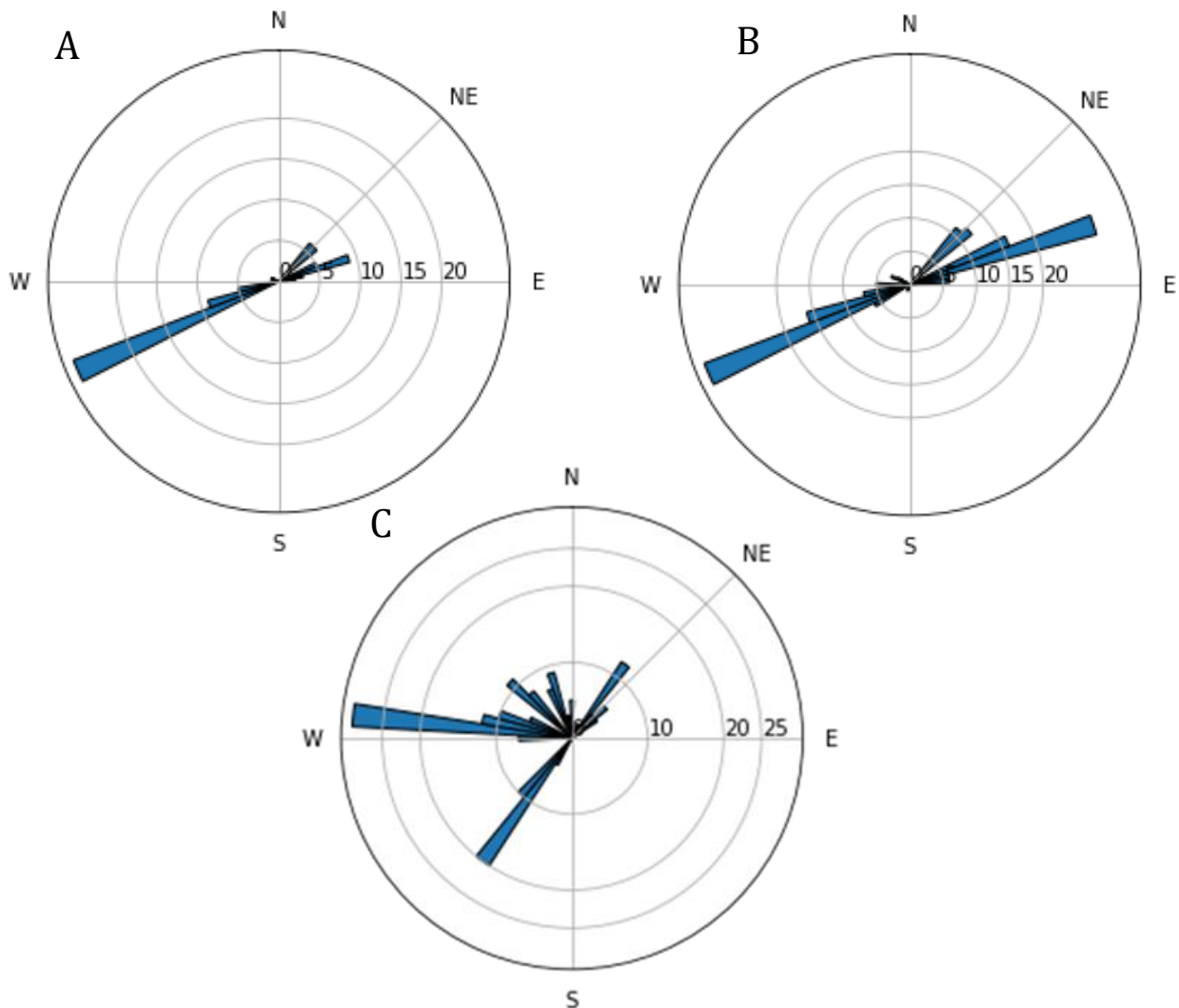


**Slika 4.3:** Karta *Nul* mjerenja (plava boja). Većina osi *Nul* mjerenja je paralelna s dobivenim smjerovima brzih osi. Također, postoji veliki broj *Nul* osi okomitih na smjerove brze osi. Crvenom brojem naznačene su srednje vrijednosti brzih osi sa slike 4.2 A

Kao što se može vidjeti na slikama 4.1 i 4.2, brze osi su orijentirane pretežito okomito na smjer pružanja Dinarida. Autori (npr. Subašić i sur., 2017.) koji su proučavali anizotropiju ovoga područja pronašli su protusatnu rotaciju smjerova brzih osi za stanice na sjeveru u odnosu na stanice na jugu Južnih Dinarida. Za stanice koje se nalaze u unutrašnjosti Hrvatske (MOSL, LOBO, PTJ, A251A, A252A, A051A, A254A) vidi se da je srednja vrijednost orijentacije brzih osi u rasponu od  $63^\circ$  do  $73^\circ$ .

Vremenska razlika u nailasku kvazi faza ( $qS_1$  i  $qS_2$ ) je raspoređena između 1 sekunde i 2 sekunde. Većina vremenskih razlika pada u mali interval od 0.9-1.3 sekunde sa ekstremima (OZLJ, A251A, A255A) bliže iznosu od 2s. Za stanice bliže obali (RABC, VIRC, ZIRJ, MORI, DUGI, NVLJ, A250A) je srednja vrijednost 1.15 sekundi što se i poklapa s dosadašnjim rezultatima istraživanja na dalmatinskoj obali (Subašić i sur., 2017.; Salimbeni i sur., 2022.), dok je za stanice u unutrašnjosti Hrvatske (LOBO, MOSL, PTJ,

A252A, A052A, A051A, A251A, OZLJ, KALN) vrijednost iznosi 1.37 sekundi (Slika 4.1) što je sličnije nalazima Petrescu i sur. (2020.) koji su našli da vrijednost  $\Delta t$  raste u smjeru od središnjeg Panonskog bazena prema sjeveroistoku. U prijašnjim istraživanjima (Subašić i sur. 2017.) je navedeno kako je bio potreban visok omjer signala i šuma ( $SNR > 4$ ) jer u protivnom nije moguće razaznati dominantni period SKS faze od šuma na seizmogramu. Temeljem istraživanja (Restivo i sur., 1999.) teleseizmičkih SKS faza u prisustvu velikog seizmičkog šuma nađeno je da su parametri dvoloma loše ograničeni za male omjere signala i šuma ( $SNR = 3$  i manje). Stoga proučavanje anizotropije koristeći dvolom SKS valova zahtjeva relativno veliku kvalitetu podataka.



**Slika 4.4:** Kružni histogram azimuta brzih osi za isključivo dobra mjerenja (A) i za dobra i prosječna mjerenja (B) i *Nul* mjerenja (C).

Za isključivo dobre rezultate većina brzih osi imaju vrijednosti azimuta od oko  $70^\circ$  i izmjerene su uglavnom na stanicama koje se nalaze u unutrašnjosti Hrvatske (Slike 4.1 B i 4.2 B). Histogram *Nul*-mjerjenja (Slika 4.4 C) daje prikaz distribucije povratnog azimuta *Nul*-rezultata. Vidljiva je velika količina rezultata u smjeru SW-NE te još veća količina u smjeru W-E (oko  $275^\circ$ ). Osim tih smjerova postoje i mnogi rezultati u svim smjerovima od W do N. Pošto *Nul* rezultati nastaju u slučaju da je upadni val okomit ili paralelan na brze osi, očekivano je da postoje 2 skupa rezultata sa smjerovima koji su međusobno okomiti, što na slici 4.4 C nedostaje.

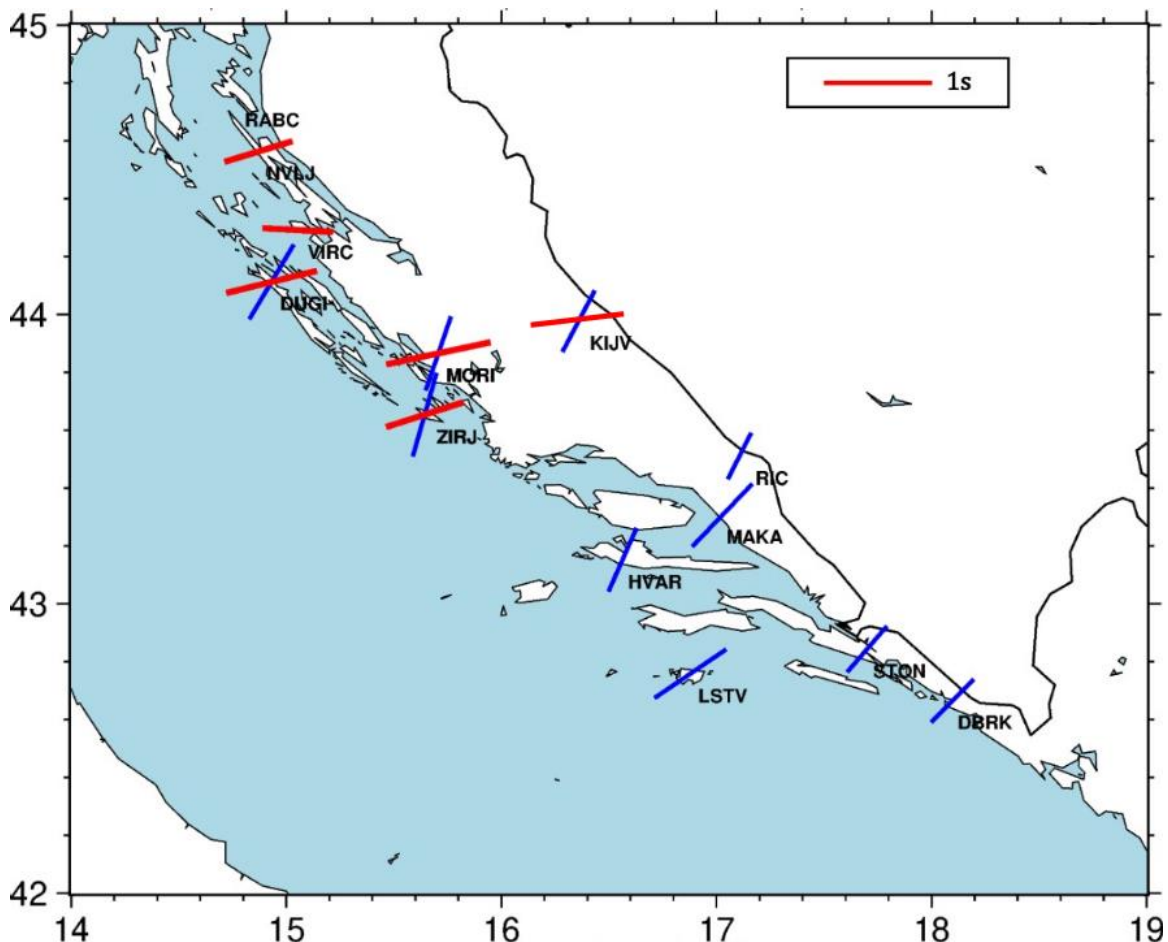
## 5. Diskusija

Nađene su srednje vrijednosti orijentacije brzih osi SKS faza na 25 seizmoloških postaja smještenih u Vanjskim i Unutrašnjim Dinaridima. Srednje vrijednosti brzih osi su približno okomite pružanju Dinarida s prosječnim azimutom brzih osi između  $46^\circ$  i  $82^\circ$  i s vremenskom razlikom u nailasku faza u rasponu od 0.55 do 1.83 sekundi (Slike 4.2 A i 4.2 B). Navedene vrijednosti za smjer brzih osi razlikuju se od vrijednosti iz prethodnih istraživanja na istom području (Slika 5.1). Subašić i dr. (2017.) proveli su istraživanje za 12 postaja na dalmatinskom području proučavajući 3861 seizmogram. Na stanicama DUGI, MORI, KIJV i ZIRJ, koje se nalaze u obje analize, postoje značajne razlike u zabilježenim smjerovima brzih osi dok se razlike vremena nailazaka u većini slučajeva slažu. Za seizmološku postaju DUGI Subašić i dr. dobili su prosječnu vrijednost smjera brzih osi u iznosu od  $31^\circ$  iz 18 mjerenja, dok je u ovome radu dobivena srednja vrijednost od  $76^\circ$  za 4 mjerenja. Mjerno je postaji ZIRJ u prethodnom istraživanju određena srednja vrijednost orijentacije brzih osi od  $16^\circ$  iz 28 rezultata, dok je u ovome radu dobivena srednja vrijednost od  $72^\circ$  iz 8 rezultata. Za mjerne postaje MORI i KIJV u prijašnjem radu dobivene su vrijednosti orijentacije brzih osi od  $19^\circ$  iz 20 rezultata za MORI i  $28^\circ$  iz 27 rezultata za KIJV, dok su u ovome istraživanju dobivene vrijednosti  $78^\circ$  iz 11 rezultata za MORI i  $82^\circ$  iz 2 rezultata za KIJV (Slika 5.1).

Iako su iznosi dobivenih orijentacija brzih osi nešto drugačiji, njihove srednje vrijednosti su i dalje približno okomite na pružanje Dinarida. Ako su srednje vrijednosti orijentacija brzih osi u oba slučaja približno okomite na Dinaride, možemo zaključiti da postoji preferencijalni smjer brzih osi uzrokovan sličnim procesima. Ono što je iz ove usporedbe očito jest velika razlika u broju prihvatljivih rezultata za svaku postaju. U trenutnom je radu broj analiziranih seizmograma mnogo manji nego što je to bilo u istraživanju s kojim je provedena usporedba. Ovo istraživanje razlikuje se od drugih ovog tipa po obuhvaćenom području promatranja. Za razliku od do sada promatranih postaja na jadranskom primorju, u ovaj rad su uključene i postaje u unutrašnjosti Hrvatske i Bosne i Hercegovine. To je omogućilo bolju usporedbu promjene orijentacije smjera brzih osi s geografskom širinom.

Ako se pretpostavi da je glavnina anizotropije uzrokovana preferencijalnom orijentacijom kristala olivina, dobiveni rezultati mogu se interpretirati kao pokazatelji

toka astenosfere. Preferencijalna orijentacija kristala olivina uvjetovana je konvektivnim gibanjem plašta koje je orijentirano okomito na pružanje Dinarida (Faccenna i sur. 2014). Predloženo je da se astenosferski materijal koji se nalazi između Jadranske mikroploče i istočnoeuropskog kratona giba okomito na os ponora Jadranske mikroploče (Petrescu i sur. 2020). Orijentacija anizotropije u području predgorskog bazena sjevernih Apenina mogla bi biti povezana s povlačenjem subducirane litosfere (eng. *slab rollback*) ispod sjevernog dijela Apenina. Taj pomak litosfere uzrokuje istiskivanje materijala u plaštu i tok materijala (eng. *mantle flow*) okomit na smjer subdukcijskog jarka (*trench-normal*) (Jolivet i sur. 2009.). Dinaridski subdukcijski prozor (*slab gap*), čije je postojanje podržala i studija debljine litosfere (Belinić i sur., 2018.), može se tada shvatiti kao izlazni put materijala u plaštu prema Panonskom bazenu, dodatno naglašen povlačenjem subducirane litosfere u području Karpata.



**Slika 5.1:** Usporedba rezultata iz Subašić i sur. 2017 (plava boja) i rezultata ovog rada (crvena boja). Orijentacije brzih osi su različite za postaje koje se pojavljuju u oba rada, ali je orijentacija u oba slučaja približno okomita na pružanje Dinarida.

Razlika u vremenima nailazaka za  $qS_1$  i  $qS_2$  faza dobivena u ovom radu (0.6 do 1.6 s) je slična rezultatima prijašnjih istraživanja. Subašić i sur. (2017.) dobili su srednje vrijeme od 0.8 s za područje južnih Dinarida, Salimbeni i sur. (2022.) su za isto područje dobili srednju vrijednost razlike vremena nailazaka oko 1 s. Usporedba s iznosima anizotropije u Panonskom bazenu daje slične rezultate, Petrescu i sur. (2020.) našli su srednju razliku u vremenu nailazaka od 1 s za središnji Panonski bazen koja raste sve do 1.4 s u sjeveroistočnom dijelu Panonskog bazena. Orijehtacija brzih osi u središnjoj i istočnoj Europi je NW-SE (Petrescu i sur., 2020.) što je različito od orijentacije brzih osi dobivenih u ovom radu (WSW-ENE smjer) i ukazuje na to da je dinamika plašta u Dinarskom području i središnjoj i istočnoj Europi drugačija.

Smjer apsolutnog kretanja (*Absolute plate motion, APM*) tektonske Euroazijske ploče izračunat koristeći web aplikaciju za računanje gibanja tektonskih ploča UNAVCO (2016.) (preuzeto iz Subašić i sur. 2017.) u HS2-NUVEL1A i HS3-NUVEL1A referentnom sustavu vulkanskih vrućih točaka (eng. *hot spot*) (Gripp i Gordon, 1990.) ima smjer  $242^\circ$  (HS2) i  $244^\circ$  (HS3). Kada je smjer brzih osi paralelan APM vektoru, anizotropija se interpretira kao rezultat diferencijalnog kretanja između astenosfere i dna litosfere (Silver, 1996.). Smjer brzih osi dobiven analizom ne odstupa puno od smjera APM vektora Euroazijske ploče, iako su Subašić i sur. (2017.) došli do zaključka da anizotropija ne bi trebala biti pod utjecajem gibanja Euroazijske ploče, već gibanja Jadranske mikroploče.

Ako su vremenske razlike oko jedne sekunde, kao što su ovdje, komponenta anizotropije kore postaje nezanemariva (npr. Wolbern i sur. 2014). Komponenta anizotropije kore koja se inače zanemaruje u SKS istraživanjima može dati veliki doprinos ukupnoj anizotropiji u području intenzivne tektonske aktivnosti. U tim područjima stijene u kori su pod dovoljno velikom napetosti da se pojave mnoge mikro pukotine orijentirane u smjeru naprežanja. U slučaju postojanja sustava vertikalnih i subvertikalnih ekstenzivno-dilatacijskih pukotina (*EDA*) moguća je pojava anizotropije. Anizotropija je tada uzrokovana ovim pukotinama koje su orijentirane djelovanjem lokalnog polja tektonske napetosti. Stoga se utjecaj anizotropije kore ne smije zanemariti jer bi mogao imati značajan doprinos ukupnoj anizotropiji promatranog područja.

Na slikama 4.4 A i B nalaze se kružni histogrami procijenjenih orijentacija brzih osi. Za isključivo dobre rezultate (Slika 4.2 B) većina smjerova povratnog azimuta (*back-azimuth*) nalazi se na oko  $250^\circ$  (odnosno  $70^\circ$  zbog ekvivaletnosti smjerova). Na istim

histogramima je moguće uočiti i mnoge brze osi usmjerene SW-NE što se poklapa s rezultatima dobivenim prijašnjim istraživanjem. Na kružnom histogramu (slika 4.4 A) dominantan smjer je smjer WSW-ENE s većinom rezultata koji dolaze iz središnjeg dijela Hrvatske i seizmoloških stanica koje se nalaze u unutrašnjim Dinaridima. WSW-ENE smjer brzih osi tada bi ukazivao na tok materijala u gornjem Zemljinom plaštu prema praznini koju ostavlja povlačenje ploče u Karpatskoj subdukcijskoj zoni.

Slika 4.2 A prikazuje stanice s pripadajućim dobrim i prosječnim mjerenjima i njihovim srednjim vrijednostima prikazanim crvenom bojom. Moguće je vidjeti značajan rasap oko srednjeg iznosa. Taj rasap nije prisutan u drugim istraživanjima (Subašić i sur. 2017., Salimbeni i sur. 2020.) i ukazuje na smanjenu kvalitetu rezultata. Na slici 4.2 B su prikazani samo dobri rezultati koji imaju manji rasap, ali je i količina stanica koje imaju prihvatljiva mjerenja uvelike smanjena. Također su smjerovi postaja koje su smještene istočnije zastupljeniji u isključivo dobrim mjerenjima što ukazuje na prisustvo šuma u stanicama koje su bliže obali, odnosno da su uvjeti  $SNR \geq 3$  više pogodovali dobivanju dobrih rezultata za stanice koje se nalaze u unutrašnjosti Hrvatske.

*Nul*-mjerenja bi mogla potvrditi rezultate i poboljšati analizu. Na slici 4.3 su plavom bojom ucrtane orijentacije osi *Nul*-mjerenja i vidljivo je da postoje dva dominantna smjera na kojima su koncentrirana. Očekivano je da smjerovi *Nul*-mjerenja budu približno okomiti jedan na drugog ali podatci (slika 4.4 C) to ne pokazuju, ali jedan od smjerova je približno paralelan brzim osima što je u skladu sa očekivanjima. I na prikazu *Nul*-mjerenja (slika 4.3) vidljiv je veliki rasap zabilježenih smjerova, a taj je rasap vidljiv i na histogramu (slika 4.4 C). Ako se na stanicama pojavljuje velika količina šuma u signalu, kao što je slučaj ovdje, Liu and Gao (2013.) predlažu da se *Nul*-mjerenja ne razmatraju. U ovom radu *Nul*-mjerenja su upotrijebljena kao nadopuna ostalim rezultatima i s obzirom na njihovu razdiobu ona potvrđuju orijentaciju brzih osi u smjeru okomitom na pružanje Dinarida.



## 6. Zaključak

Analizirano je ukupno 865 zapisa od 249 teleseizmičkih potresa zabilježenih na stalnim seizmografskim postajama hrvatske seizmološke mreže i privremenim postajama postavljenim u sklopu AlpArray projekta. Na temelju analize SKS faza ispitana je anizotropija S-valova u gornjem plaštu te su nađeni smjerovi brzih osi orijentiranih u smjeru ENE–WSW. Na stanicama koje su bile pokrivena prijašnjim istraživanjem dobiveni smjerovi razlikuju se od prijašnjih istraživanja, ali i dalje imaju orijentaciju približno okomitu na pružanje Dinarida. Takvi smjerovi brzih osi vjerojatno proizlaze iz preferencijalne orijentacije kristala olivina koja je uzrokovana astenosferskim tokom ispod Jadranske mikroploče u smjeru Panonskog bazena. Smjer *Nul*-mjerenja podržava orijentaciju dobivenih brzih osi. Anizotropija kore kao posljedica ekstenzivno-dilatacijskih pukotina uzrokovanih djelovanjem lokalnog polja tektonske napetosti orijentirana je u ugrubo istom smjeru. Zbog toga ona ne može biti zanemarena jer bi mogla imati doprinos ukupnoj zabilježenoj anizotropiji. Vremenske razlike u nailasku kvazi faza su u rasponu od 0.55 do 1.83 sekundi što je u skladu s dosadašnjim istraživanjima i potvrđuje da su pronađene dimenzije anizotropije slične.

Opažen je veliki rasap u smjerovima pronađenih brzih osi u kombinaciji s relativno malim brojem mjerenja za pojedinačne stanice i s ne idealnom azimutalnom pokrivenošću za promatrano razdoblje.

# Literatura

- Allegretti, I., Herak, M., Herak, D. (2010): *Shear-wave splitting and velocity anisotropy in the crust beneath the stations of the Croatian seismological network*, poster, in: EMSC 2010, Montpellier, France.
- Barruol, G., Bonnin, M., Pedersen, H., Bokelmann, G.H., Tiberi, C. (2011): *Belt-parallel mantle flow beneath a halted continental collision: the Western Alps*, Earth planet. Sci. Lett., 302(3–4), 429–438.
- Belinić, T., Stipčević, J., Živčić, M., AlpArray Working Group (2018): *Lithospheric thickness under the Dinarides*, Earth Planet. Sci. Lett., 484, 229–240, doi:10.1016/j.epsl.2017.12.030.
- Belinić, T., Kolínský, P., Stipčević, J., AlpArray Working Group, 2021. Shear-wave velocity structure beneath the Dinarides from the inversion of Rayleigh-wave dispersion, Earth and Planetary Science Letters 555, 116686, doi:10.1016/j.epsl.2020.116686.
- Brückl, E., Bleibinhaus, F., Gosar, A., Grad, M., Guterch, A., Hrubcová, P., Keller, R.G., Majdanski, M., Šumovac, F., Tiira, T., Yliniemi, J., Hegedus, E., Thybo, H. (2007) (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, doi:10.1029/2006JB004687.
- Encyclopædia Britannica. (2023): asthenosphere. URL: <https://www.britannica.com/science/asthenosphere>. (12.09.2023)
- Faccenna, C., Becker, T.W., Auer, L., Bili, A., Boschi, L., Brun, J.P., Capitanio, F.A., Funicello, F., Horvath, F., Jolivet, L., Piromallo, C., Royden, L., Rossetti, F., Serpelloni, E. (2014): *Mantle dynamics in the Mediterranean*, Rev. Geophys., 52, 283–332, doi:10.1002/2013RG000444.
- Gripp, A. E., Gordon, R.G. (1990): Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model. Geophys. Res. Lett. 17, 1109–1112.

- Gripp, A. E., Gordon, R. G. (2002): *Young tracks of hotspots and current plate velocities*. Geophysical Journal International 150, 321–361. doi:10.1046/j.1365-246X.2002.01627.x.
- Handy, M. R., Ustaszewski, K. i Kissling, E. (2015): Reconstructing the Alps-Carpathians-Dinarides as a key to understanding switches in subduction polarity, slab gaps and surface motion. Int. J. Earth Sci. 104, 1–26. doi:10.1007/s00531-014-1060-3
- Jolivet, L., Faccenna, C., Piromallo, C., (2009): *From mantle to crust: Stretching the Mediterranean*. Earth and Planetary Science Letters 285, 198–209. doi:10.1016/j.epsl.2009.06.017.
- Kennett, B. (2007): *Seismic Phases*. Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (eds) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer, Dordrecht. doi:10.1007/978-1-4020-4423-6\_290
- Király, Á., Faccenna, C., Funicello, F. (2018): *Subduction zones interaction around the Adria microplate and the origin of the Apenninic arc*. Tectonics, 37, 3941–3953. doi: 10.1029/2018TC005211
- Lippitsch R., Kissling E., Ansorge J. (2003): *Upper mantle structure beneath the Alpine orogen from high-resolution teleseismic tomography*. Journal of Geophysical Research. 108. doi:10.1029/2002JB002016.
- Liu, K. H., Gao, S. S. (2013): *Making reliable shear-wave splitting measurements*. Bulletin of the Seismological Society of America 103, 2680–2693. doi:10.1785/0120120355.
- Long, M. D., and P. G. Silver (2009): Shear wave splitting and mantle anisotropy: Measurements, interpretations, and new directions, Surv. Geophys. 30, 407–461.
- Lutz, K. A., Long, M., Creasy, N., Deng, J. (2020): *Seismic anisotropy in the lowermost mantle beneath North America from SKS-SKKS splitting intensity discrepancies*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 305. doi:10.1016/j.pepi.2020.106504.
- Mainprice, D., Silver, P. G., Margheriti, L., Nostro, C., Cocco, M., Amato, A. (1993, 1996): *Interpretation of SKS-waves using samples from the subcontinental lithosphere* *Seismic anisotropy beneath the Northern Apennines (Italy) and its*

*tectonic implications*. Phys. Earth Planet. Interiors/Geophys. Res. Lett. 7823, 32572721–42802724. doi:10.1029/96gl02519

Mohorovičić, A., (1910): *Potres od 8.X 1909 (Das Beben vom 8.X. 1909)*, Jahrbuch des meteorologischen Observatoriums in Zagreb (Agram) für das Jahr 1909, 1–56 (Engleski prijevod: 1992, Earthquake of 8 October 1909, *Geofizika*, 9, 3–55).

Molinari I., Clinton J., Kissling E., Hetényi G., Giardini D., Stipčević J., Dasović I., Herak M., Šipka V., Wéber Z., Grácz Z., Solarino S., Swiss-AlpArray Field Team, AlpArray Working Group (2016): *Swiss-AlpArray temporary broadband seismic stations deployment and noise characterization*. Adv. Geosci., 43, 15-29, doi: 10.5194/adgeo-43-15-2016

Perez, A. M., Niu, F. (2004): *Seismic anisotropy in the lower mantle: a comparison of waveform splitting of SKS and SKKS*. AGU Fall Meeting Abstracts. -1. 1329. doi:10.1029/2004GL021196

Petrescu. L., Stuart, G., Houseman, G., Bastow, I. (2020): Upper mantle deformation signatures of craton–orogen interaction in the Carpathian–Pannonian region from SKS anisotropy analysis, *Geophysical Journal International*, doi: 10.1093/gji/ggz573

Berens, P. (2009): *CircStat: a MATLAB toolbox for circular statistics*. Journal of Statistical Software. 31. 10.18637/jss.v031.i10.

Piomallo, C., Morelli, A. (2003): *P wave tomography of the mantle under the Alpine-Mediterranean area*. J. Geophys. Res. 108, 2065. B2. doi:10.1029/2002JB001757

Qi, C., Hansen, L. N., Wallis, D., Holtzman, B. K., Kohlstedt, D. L. (2018): *Crystallographic preferred orientation of olivine in sheared partially molten rocks: The source of the “a-c switch”*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 316–336. doi: 10.1002/2017GC007309

Reiss, M. C., Rumpker, G. (2017): *SplitRacer: MATLAB Code and GUI for Semiautomated Analysis and Interpretation of Teleseismic Shear-Wave Splitting*. *Seismological Research Letters*, 88(2A), 392–409. doi:10.1785/0220160191

- Restivo, A., Helffrich, G. (1999): *Teleseismic shear wave splitting measurements in noisy environments*. *Geophysical Journal International* doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00845.x
- Shearer, P. M. (1999.): *Introduction to seismology*, Cambridge University Press, Cambridge
- Salimbeni, S., Pondrelli, S., Margheriti, L. (2013): Hints on the deformation penetration induced by subductions and collision processes: Seismic anisotropy beneath the Adria region (Central Mediterranean). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118, 5814–5826. doi:10.1002/2013JB010253.
- Salimbeni S., Pondrelli S., Molinari I., Stipčević J., Prevolnik S., Dasović I., AlpArray-CASE working group (2022): *Seismic anisotropy across Adria plate, from the Apennines to the Dinarides*. *Frontiers in Earth Science*, Volume 10 2022, doi:10.3389/feart.2022.881138, ISSN: 2296-6463
- Savage, M. (1999): Seismic anisotropy and mantle deformation: What have we learned from shear wave splitting? *Rev. Geophys.* 37, 65–106. doi:10.1029/98RG02075
- Schmid, C., Van Der Lee, S., Giardini, D. (2004): *Delay times and shear wave splitting in the Mediterranean region*. *Geophysical Journal International* 159, 275–290. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02381.x.
- Serpelloni, E., Anzidei, M., Baldi, P., Casula, G., and Galvani, A. (2005): Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: New results from the analysis of permanent and non-permanent GPS networks. *Geophys. J. Int.* 161,861–880. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02618.x
- Silver, P. G., Chan, W. W. (1991): Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research*, 96(B10), 16429. doi:10.1029/91jb00899
- 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, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05004.x

Subašić S., Prevolnik S., Herak D., Herak M. (2017): Observations of SKS splitting beneath the Central and Southern External Dinarides in the Adria-Eurasia convergence zone, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2017.03.027

UNAVCO (2016): Plate motion calculator. URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion->[Online; pristupljeno 11 Prosinac 2016].

Woelbern I., Löbl U., Rumpker G., (2014): *Crustal origin of trench-parallel shear-wave fast polarizations in the Central Andes*. *Earth and Planetary Science Letters*. 392. 230–238. 10.1016/j.epsl.2014.02.032.

Wuestefeld, A., Bokelmann, G., Zaroli, C., Barruol, G. (2008): *Splitlab: A shear-wave splitting environment in MATLAB*. *Computers & Geosciences*. 34. 515-528. 10.1016/j.cageo.2007.08.002.

## Dodatak A

**Tablica A1.** Popis stanica koje čine promatranu seizmološku mrežu, s brojem analiziranih potresa i brojem dobivenih valjanih rezultata za svaku postaju. Zadnja četiri stupca su srednje vrijednosti azimuta smjera brzih osi ( $\varphi$ ) i vremenske razlike vremena nailazaka faza ( $dt$ ) s pripadnim standardnim devijacijama svakog mjerenja.

Stanica	Lat. °N	Long. °E	Br. anal. potresa	Broj rezultata	$\varphi^\circ$	$\sigma_\varphi^\circ$	$dt, s$	$\sigma_{dt}, s$
A250A	45.0840	14.9106	19	0				
A251A	45.1286	16.2664	14	2	71.08	66.65	1.79	0.15
A252A	45.4356	17.8482	37	13	70.20	59.89	1.16	0.26
A253A	45.2926	13.8167	22	2	70.63	6.37	0.97	0.00
A254A	45.3148	15.8050	11	0				
A255A	45.5090	16.0507	10	1	63.62	0.00	2.56	0.00
A050A	44.4818	16.5313	35	0				
A051A	45.0125	16.9069	41	10	71.04	57.46	1.37	0.23
A052A	45.1026	17.5139	19	2	69.81	6.52	1.18	0.05
MOSL	45.6135	16.7544	45	13	68.04	72.81	1.21	0.56
DUGI	44.1131	14.9318	52	9	77.97	19.08	1.07	0.22
KALN	46.1311	16.4557	53	25	73.36	64.94	1.27	0.33
KIJV	44.0048	16.4046	55	2	82.06	19.48	1.03	0.00
KSY	44.6881	15.2703	42	4	71.42	60.97	3.87	0.22
LOBO	46.1551	16.0686	27	17	72.37	76.67	1.29	0.44
MORI	43.8660	15.7072	56	11	78.16	45.84	1.10	0.40
NVLJ	44.5634	14.8710	19	3	74.73	9.54	0.92	0.15
OZLJ	45.6152	15.4672	35	1	46.86	0.00	1.64	0.00
PLIT	44.8783	15.6230	34	0				
PTJ	45.9073	15.9681	51	18	71.68	78.44	1.41	0.66
RABC	44.7504	14.7821	12	0				
SLNJ	45.1344	15.5171	31	3	62.43	67.43	0.55	0.13
UDBI	44.5314	15.7693	35	3	53.45	68.05	1.06	0.34
VIRC	44.2924	15.0539	46	5	65.28	67.92	1.83	1.31
ZIRJ	43.6542	15.6438	64	12	74.38	23.21	0.97	0.20

