

Inverzija momenta tenzora uklapanjem površinskih talasa za zemljotres M 5.5 u Kraljevu

DMITRY D. SIDOROV-BIRYUKOV, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet. Beograd
ORCID: 0009-0005-4860-3585
NIKOLA B. STANKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet. Beograd
ORCID: 0000-0003-4151-4414

Originalni naučni rad
UDC: 551.24(497.11)
551.34(497.11)
DOI: 10.5937/tehnika2405543S

Ovaj rad se bavi inverzijom seizmičkih podataka iz kraljevačkog zemljotresa radi određivanja parametara izvora i poređenja sa tradicionalnim metodama analize. Razumevanje izvora zemljotresa je ključno za procenu seizmičkog hazarda i unapređenje postojećih modela. Inverzija je izvršena korišćenjem softvera Grond, korišćenjem podataka seizmičkog talasnog oblika sa seizmičkih stanica udaljenih do 900 km od epicentra, kako bi se rešio moment tenzora i drugi ključni parametri izvora, kao što su dubina, magnituda itd. Rezultati inverzije momenta tenzora upoređeni su sa rezultatima dobijenim tradicionalnom metodom polariteta prvog nailaska P-talasa. Takođe, dobijeni parametri izvora poređeni su sa rezultatima prethodnih studija, što pruža uvid u valjanost postupka inverzije. Ovo poređenje doprinosi proceni pouzdanosti različitih metoda u analizi izvora zemljotresa, čime se poboljšava razumevanje seizmičkih događaja i njihovih implikacija na regionalnu tektoniku.

Ključne reči: seizmologija, inverzija moment tenzora, mehanizam izvora zemljotresa

1. UVOD

Seizmičnost u Srbiji je uglavnom uzrokovana tektonskim procesima u regionu Balkana, koji je deo šireg mediteransko-alpskog seizmičkog pojasa. Ovo područje karakteriše složena tektonska aktivnost zbog interakcije između Evroazijske ploče i Jadranske mikroploče, fragmenta Afričke ploče. Tačnije Srbija ima umerenu seizmičku aktivnost, ali su se u prošlosti dešavali i jaki zemljotresi.

Seizmički najaktivniji regioni u Srbiji su centralna i južna Srbija, naročito Kopaonik, Kraljevo - Rudnik i Valjevo - Mionica, ali i područja okoline Vršca i Svilajнца.

Jedan od skorijih razornih zemljotresa bio je zemljotres u Kraljevu, koji se dogodio 3. novembra 2010. godine [1]. Ovaj događaj je prouzrokovao više od 100 miliona dolara štete i odneo je dve žrtve [2]. Kraljevački zemljotres je detaljno proučavan u mnogim rado-

vima, ali je u ovom radu fokus na rešavanju mehanizma izvora zemljotresa na osnovu inverzije moment tenzora. Korišćen je U te softver Grond [3] i zapisi površinskih talasa sa seizmoloških stanica udaljenih do 900 km od epicentra zemljotresa. Rezultati primenjene metodologije upoređeni su sa već objavljenim rezultatima [4]. Cilj rada je da ispita primenljivost metode inverzije momenta tenzora na ovaj problem.

2. METODOLOGIJA

Inverzija seizmičkog izvora je ključna tehnika u seizmologiji, koja omogućava određivanje karakteristika izvora zemljotresa analizom seizmičkih talasnih oblika snimljenih na različitim stanicama. Razumevanje mehanizma izvora, kao što je geometrija raseda, smer kretanja i seizmički moment, ključni su za procenu opasnosti od zemljotresa, tektonske studije i analizu regionalnih polja stresa. Poznavanjem momenta tenzora, može se steći uvid u vrstu raseda (normalan, reverzni ili transkurentni) i bolje razumeti fizički procesi koji se dešavaju tokom zemljotresa.

Tradicionalno, fokalni mehanizam zemljotresa određuje se analizom polariteta prvog nailaska P-talasa registrovanih na seizmološkim stanicama. Ova metoda koristi klasifikaciju dolazaka talasa kao kompresijskih

Adresa autora: Dmitry Sidorov-Biryukov, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Dušina 7

e-mail: g811-22@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 18.09.2024.

Rad prihvaćen: 26.09.2024.

ili dilatacionih, na osnovu čega se generiše tzv. fokalni mehanizam, koji grafički prikazuje orijentaciju raseda i vektor kretanja. Iako ova tradicionalna metoda pruža korisne informacije, ona ima svoja ograničenja. Analiza prvog pokreta zahteva jasne dolaske P-talasa, koji možda nisu uvek dostupni, i ne koristi u potpunosti bogate informacije sadržane u celom seizmičkom talasnom obliku. S druge strane, inverzija seizmičkog izvora prevazilazi početni dolazak P-talasa korišćenjem čitavog talasnog oblika snimljenog na svakoj stanici, pružajući detaljnije i sveobuhvatnije razumevanje izvora zemljotresa.

U inverziji seizmičkog izvora, talasni oblici se modeluju korišćenjem Grinovih funkcija, koje opisuju kako se seizmički talasi šire kroz Zemljinu unutrašnjost. Upoređivanjem sintetičkih seizmograma generisanih iz ovih Grinovih funkcija sa posmatranim podacima i iterativnim podešavanjem momenta tenzora zemljotresa, možemo minimizirati njihovo odstupanje. Ova metoda omogućava precizniju i potpuniju rekonstrukciju mehanizma izvora, posebno u složenim okruženjima gde metoda polariteta prvog nailaska može biti nedovoljna.

U inverziji seizmičkog izvora, Grinove funkcije su kritične u modelovanju širenja talasa od izvora do prijemnika, opisujući kako seizmički talasi putuju kroz Zemljinu unutrašnjost. Prethodnim izračunavanjem Grinovih funkcija za specifične parove izvor-prijemnik, efikasno se modeluju talasni oblici za bilo koji seizmički događaj, što se izražava kao:

$$U_{synthetic}(x + \Delta x, t + \Delta t) = G * M(x, t),$$

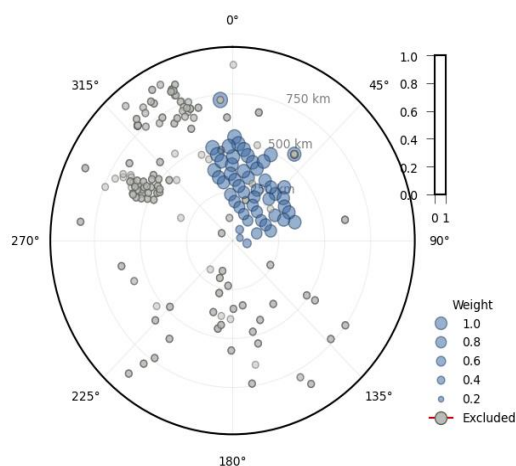
gde je U pomeraj očekivanog seizmičkog uticaja koje zavisi od koordinate stanice $x + \Delta x$ u trenutku $t + \Delta t$, na osnovu Grinovog tenzora G i momenta tenzora zemljotresa M u tački x i vremenu t , dok $*$ označava operaciju konvolucije. Seizmogrami zasnovani na merenim podacima se zatim upoređuju sa sintetičkim seizmogramima, generisanim konvolucijom Grinovih funkcija sa momentom tenzora, koji karakteriše mehanizam izvora zemljotresa.

Proces inverzije podrazumeva minimizaciju razlike između posmatranih i sintetičkih seizmograma kroz iterativno prilagođavanje momenta tenzora. Ova optimizacija teži određivanju optimalnih parametara izvora, uključujući magnitudu, orijentaciju raseda i geometriju pukotina. Metoda omogućava precizno modelovanje seizmičkih izvora, što doprinosi boljem razumevanju geodinamičkih procesa i unapređenju procene seizmičkog hazarda.

3. EKSPERIMENT

Da bi se dobili talasni oblici sa najbližih seizmičkih stanica, napisana je skripta u programskom

jeziku Python za pronalaženje i preuzimanje neobrađenih talasnih oblika. Kako se koriste površinski talasi, potrebno je razmatrati period niske frekvencije, oko 0,1 Hz, stoga se traži BH? kanala, gde B predstavlja njegovu brzinu uzorkovanja (od 20 do 80 uzoraka u sekundi), a H – seizmometri sa visokim pojačanjem, ? označava bilo koju orijentaciju seizmometra prema priručniku SEED [5]. Neophodni su i metapodaci sa ovih stanica. Skripta koristi ObsPy biblioteku [6]. Dobijene podatke dostavlja IRIS (eng. Incorporated Research Institutions for Seismology) [7] i oni se sastoje od podataka iz različitih seizmoloških mreža. Zbog problema sa metapodacima i prestanka rada stanica, tokom početnog proračuna korišćene su samo sledeće mreže: PL Poljska seizmološka mreža [8], RO Rumunska seizmološka mreža [9] i YD južnokarpatiski projekat [10]. Azimutno pokrivanje seizmoloških stanica je prikazano na slici 1.



Slika 1 – Azimutalni obuhvat seizmoloških stanica

Pošto se analiziraju Lavovi i Rejljevi talasi, treba rotirati originalne N i E komponente na osnovu azimuta seizmičkog događaja, što Grond softver radi automatski.

Kako bi se izvršila simulacija, definisana je unapred izračunata baza Grinovih funkcija zasnovana na modelu kore, kao i početni parametri i granični uslovi. Za model zemljine kore korišćen je model CRUST 2.0 [11]. Prema tome, kora oko događaja je „m9“ što označava debelu proširenu koru i sedimente od 0,5 km. Dozvoljeno odstupanje od početka epicentra bilo je ± 50 km, a za magnitudu dozvoljeno odstupanje opseg je bio od 5 do 6. Dozvoljeno odstupanje vremena početka događaja je bilo ± 10 sekundi.

Ovi početni parametri omogućili su dobijanje preciznog rezultata u slučaju da kvalitet talasnog oblika i pokrivenost stanica nisu dovoljni. Početni parametri sa dovoljnom tolerancijom na odstupanja mogu biti korisni u slučaju nesigurnosti ili grešaka u informacijama o poreklu događaja. Na primer, postoji neslaganje u pogledu dubine: USGS navodi dubinu od 0,9

km, dok izveštaj [4] sugerše dubinu od oko 10 km. Zbog toga su granice dozvoljenih varijacija postavljene relativno široko.

4. REZULTATI

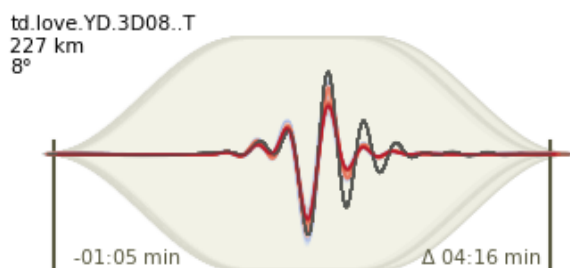
Rezultati simulacije prikazani su u tabeli 1.

U prvoj koloni je parametar izvora zemljotresa, u drugoj vrednost izvora zemljotresa za model koji najbolje odgovara, u trećoj je prosečna vrednost za sve modele (Mean) i poslednja je standardna devijacija (Std).

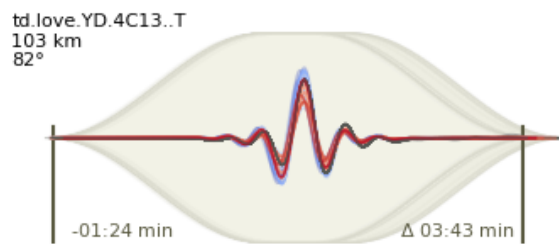
Tabela 1. Rezultati simulacije

Parametar	Najbolji	Mean	Std
Vreme (s)	7.2	1.9	3.7
Udaljenost po severu (m)	23000	5000	17000
Udaljenost po istoku (m)	29000	2000	20000
Dubina (m)	18200	11200	4000
Magnituda	5.426	5.463	0.042
Trajanje (s)	4.3	3.4	1.1
strike1	190	220	120
dip1	76.7	75.9	10
rake1	-160	30	110
strike2	96	131	51
dip2	73	68	14
rake2	-14	60	95
Rel moment iso	0.07	-0.01	0.16
Rel moment clvd	-0.45	-0.36	0.26

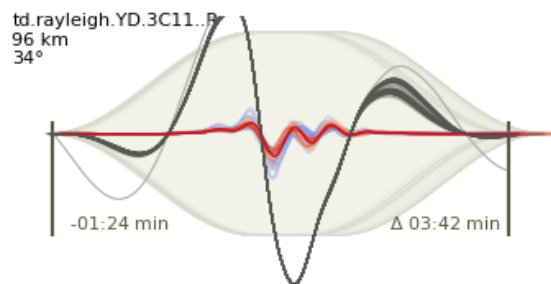
Na slikama 2 - 5 prikazani su reprezentativni primeri dobre i loše korelacije talasnih oblika: Crvena linija je očekivani (simulirani) talasni oblik, a crna linija je snimljeni (posmatrani) talasni oblik. Zadatak je umanjiti razlike (funkcija neusklađenosti) između ove dve krive.



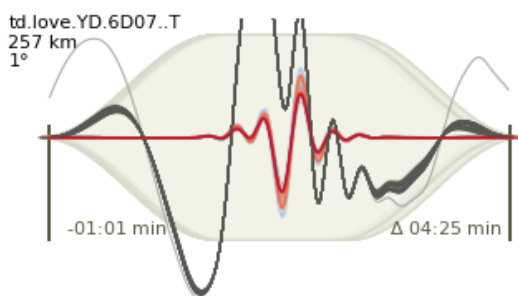
Slika 2 – Lavov talasni oblik odgovara za ceo ansambl za stanicu YD.3D08 (dobro poklapanje)



Slika 3 – Lavov talasni oblik odgovara za ceo ansambl za stanicu YD.4C13 (dobro poklapanje)



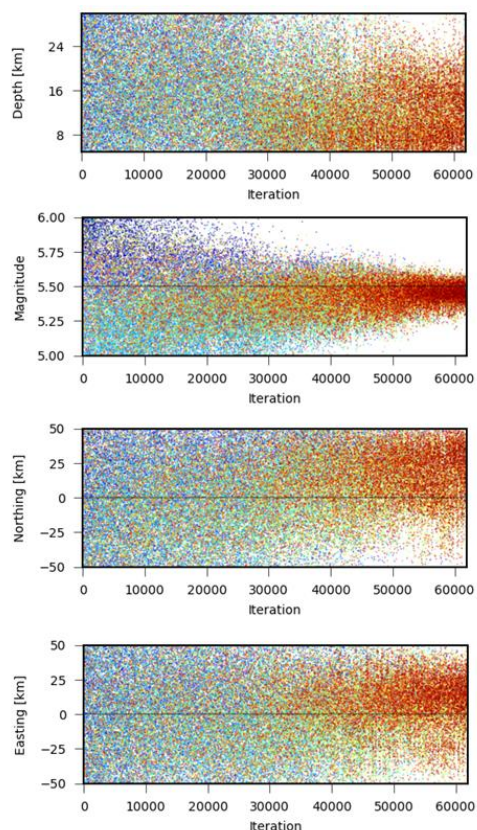
Slika 4 – Rejljev talasni oblik koji odgovara za ceo ansambl za stanicu YD.3C11 (loše poklapanje)



Slika 5 – Lavov talasni oblik odgovara za ceo ansambl za stanicu YD.6D07 (loše poklapanje)

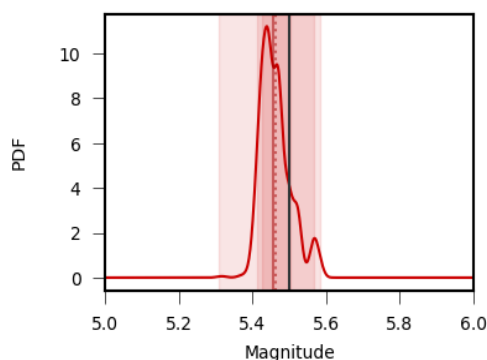
Loša korelacija je obično uzrokovana problemima sa metapodacima (osetljivošću) ili bilo kakvim mehaničkim problemima na samoj stanici. Isključivanje neispravnih stanica iz analize moglo bi značajno poboljšati konačne rezultate inverzije. Iako amplituda signala može biti nepouzdana, fazni podaci često ostaju korisni za optimizaciju modela, a određeni korekcionni faktori mogu se primeniti za prilagođavanje nepravilnih amplituda.

Međutim, ako su i amplituda i faza signala odstupaju od očekivanih vrednosti, stanica se može smatrati neispravnom i isključiti iz daljeg procesa obrade. Kako bi se utvrdilo koji se parametri mogu pouzdano rešiti na slici 6 su prikazani dijagrami modela za magnitudu, dubinu, udaljenost u pravcu severa, i udaljenost u pravcu istoka.



Slika 6 – Raspodela glavni parametri izvora zemljotresa kao rezultat simulacije. Plave (hladne) boje za višu vrednost funkcije odstupanja, crvena (tople) – za nižu

Magnituda se vrlo dobro rešava (oko 5,4). Takođe postoji mogućnost da se istraži funkcija gustine verovatnoće za različite parametre (npr. magnituda – slika 7).

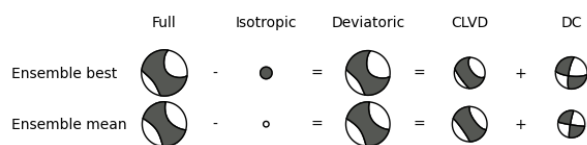


Slika 7 – Funkcija gustine verovatnoće za magnitudu. Crvena puna vertikalna linija daje medijanu vrednost distribucije, a isprekidana crvena vertikalna linija srednju vrednost. Oblasti koje se preklapaju crvenom bojom pokazuju intervale sigurnosti od 68% (najdublje područje), intervale sigurnosti od 90% (srednja oblast) i minimalne i maksimalne vrednosti (najšire područje)

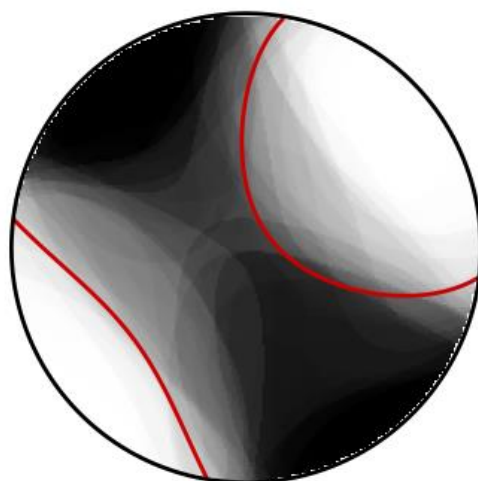
Što se tiče udaljenosti u pravcu severa i istoka, inverzija daje vrednosti koje ne konvergiraju već uzimaju širok opseg vrednosti. Po udaljenosti u pravcu severa, inverzija sugerise opseg vrednosti od -25 do +50, dok po udaljenosti u pravcu istoka predviđa vrednosti od -30 do +35. Po dubini, inverzija daje nešto preciznije rezultate, pri čemu se vrednosti dubine kreću od 6 do 20 km.

Ovi problemi bi se verovatno rešili većim brojem iteracija kao i isključivanjem podataka sa stanica koje imaju veoma lošu korelaciju.

Dobijeni moment tenzor je prikazan na slici 8, a njegova preciznost je ilustrovana na slici 9.



Slika 8 – Dobijeni moment tenzor na osnovu postupka inverzije



Slika 9 – Moment tenzora dobijen inverzijom na osnovu svih 2000 modela nakon konvergencije na osnovu 60000 iteracija. Svi rezultati su prikazani jedan preko drugog. Jasnija slika (crno i belo) odgovara većoj preciznosti

Preciznija rešenja inverzije moment tenzora se takođe mogu proceniti praćenjem standardne devijacije dobijenog rešenja momenta tenzora u tabeli 1, ali ova slika to predstavlja vizuelnim pristupom. Jasnija (crna i bela) boja prikazuje veće poklapanje modela, time ukazujući na najverovatniji pravi moment tenzor. To znači da što je slika jasnija, to je veća preciznost u rešavanju momenta tenzora.

Zemljotres je imao kosi mehanizam raseda, što je karakteristično za kompresiona tektonska okruženja gde su dva bloka u kore pomerena jedan prema drugom. Ovaj mehanizam je u skladu sa regionalnim tektonskim silama, budući da severni

deo Balkanskog poluostrva trpi kompresiju usled konvergencije Afričke ploče (uključujući uticaj Jadranske mikroploče) i Evroazijske ploče.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata, jasno je da je istraživanje u ovom radu dovelo do sličnih rezultata kao u prethodnim istraživanjima [4]. Iako izračunata dubina potpuno precizirana, rezultati ovog rada sugerišu veću procenjenju dubinu izvora, u rasponu od 11 do 18 km, u poređenju sa dubinom od 0,9 km koju je izneo USGS i 10 km prema istraživanju [4]. Što se tiče inverzije momenta tenzora, dobijeni su slični rezultati za seizmički događaj, pri čemu on pokazuje komponente transkurentnog i reversnog kretanja.

Rezultati dobijeni u ovom radu mogli bi se dodatno unaprediti prikupljanjem koeficijenata za stanice sa niskom amplitudnom korelacijom sa sintetičkim seismogramima ili isključivanjem takvih stanica iz analize. Takođe, sužavanje dozvoljenih granica za parametre izvora (kao što su dubina, severno i istočno odstojanje) moglo bi doprineti preciznijem određivanju ovih vrednosti.

Modelovanje momenta tenzora i njegovo poređenje je ključno za razumevanje mehanike seizmičkih događaja i njihovih izvora. Moment tenzori obezbeđuju matematički prikaz sila uključenih tokom zemljotresa, nudeći uvid u orijentaciju raseda, smer kretanja i tip raseda.

Simulacijom momenta tenzora, moguće je modelovati različite scenarije zemljotresa, testirati hipoteze o seizmičkim izvorima i poboljšati razumevanje tektonskih procesa. Poređenje uočenih i sintetičkih moment tenzora omogućava validaciju modela, poboljšava procenu seizmičkog hazarda i doprinosi preciznijim predviđanjima kretanja tla i potencijalne štete. Ovaj pristup poboljšava našu sposobnost da interpretiramo složene seizmičke podatke i doprinosi poboljšanju sistema ranog upozorenja.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije preko Ugovora br. 451-03-66/2024-03/200126.

LITERATURA

- [1] USGS, *M 5.5 - 5 km NE of Kraljevo, Serbia*, [Na mreži]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000hny4/executive>. [Poslednji pristup 07 09 2024].
- [2] Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR), *Disaster Risk Profile: Serbia*, 17 April 2017. [Na mreži]. Available: <https://www-gfdr.org/en/publication/disaster-risk-profile-serbia>. [Poslednji pristup 7 september 2024].
- [3] Heimann S, Isken M, Kühn D, Sudhaus H, Steinberg A, Vasyura-Bathke H, Daout S, Cesca S. i Dahm T, *Grond - A probabilistic earthquake source inversion framework*, 2018.
- [4] D. Herak, M. Herak i M. Trifunac, Kraljevo earthquake-reduced damage by asymmetric radiation?, *Izgradnja*, t. 65, pp. 241-245, 2011.
- [5] Networks, International Federation of Digital Seismograph, *Standard for the Exchange of Earthquake Data*, Available: https://www-fdsn.org/-pdf/SEED-Manual_V2.4.pdf, 2009.
- [6] M. Beyreuther, R. Barsch, L. Krischer, T. Megies, Y. Behr i J. Wassermann, ObsPy: A Python Toolbox for Seismology, *Seismological Research Letters*, t. 81, br. 3, p. 530–533, 2010.
- [7] The facilities of EarthScope Consortium were used for access to waveforms, related metadata, and/or derived products used in this study. These services are funded through the National Science Foundation's Seismological Facility for the Advancement of Geos, [Na mreži].
- [8] PL: Polish Seismological Network, Polish Academy of Sciences, Polskiej Akademii Nauk (PAN), [Na mreži]. Available: <https://fdsn.org/networks/detail/PL/>.
- [9] RO: Romanian Seismic Network, [Na mreži]. Available: <https://fdsn.org/networks/detail/RO/>.
- [10] YD (2009-2011): South Carpathian Project, [Na mreži]. Available: https://fdsn.org/-networks/-detail/YD_2009/.
- [11] C. Bassin, G. Laske i G. Masters, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, u *EOS Trans AGU*, 2000.

SUMMARY

MOMENT TENSOR INVERSION BY FITTING SURFACE WAVES FOR THE M 5.5 EARTHQUAKE IN KRALJEVO

This paper focuses on the inversion of seismic data from the Kraljevo earthquake to determine the source parameters and provide a comparison with classical methods. Understanding the earthquake source is critical for seismic hazard assessment and contributes to refining existing models. The inversion was performed using the Grond software, using seismic waveform data from the seismic stations located in the range of 900 km from the epicenter to resolve the moment tensor and other key source parameters: depth, magnitude, etc. The results for the moment tensor solution were compared with the one obtained from traditional (P-wave first-motion polarity) method as well as the source parameters were compared with findings from prior studies, offering insights into the robustness of the inversion approach. This comparison helps assess the reliability of different techniques in earthquake source analysis, enhancing our understanding of seismic events and their broader implications for regional tectonics.

Key Words: seismology, moment tensor inversion, earthquake source mechanism