

Anexa 10 la Contract nr. 31N/2019

**Contractor: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica
Pământului**

Cod fiscal : 5495458 (anexa la procesul verbal de avizare internă nr.)

**De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr.Ing. Constantin IONESCU**

**Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Dr. Mircea RADULIAN**

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 31N/2019

**Proiectul: PN 19080201 Dezvoltarea și implementarea de noi instrumente
pentru seismologia în timp real și de transfer a produselor și rezultatelor
cercetării către potențiali beneficiari**

***Faza 14: Dezvoltarea si implementarea in cadrul sistemului de achiziție si procesare
a datelor in timp real a unor proceduri complexe de estimare a parametrilor sursei
seismice prin inversia formelor de unda***

Termen de încheiere a fazei: 12.06.2021

1. Obiectivul proiectului:

Obiectivul acestui proiect este dezvoltarea unei metodologii noi in cadrul Institutului National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pamantului (INCDFP) pentru estimarea in timp cvasi- real a parametrilor sursei seismice, profitand de densitatea spatiala a Retelei Seismice in zonele active seismic si de gama completa de instrumente folosite.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Unul din rezultatele preconizate a fost dezvoltarea de instrumente care pot fi folosite în managementul dezastrelor provocate de cutremure în România. În particular, au fost dezvoltati algoritmi pentru determinarea rapida a parametrilor sursei seismice (localizarea în timp real a sursei, reprezentarea acesteia pe harta, determinarea magnitudinii din moment seismic și a parametrilor sursei seismice împreună cu mecanismele focale asociate, folosind Reteaua Seismica Nationala).

3. Obiectivul fazei:

- Identificarea, dezvoltarea și descrierea metodologiei de estimare în timp real a momentului seismic scalar, a magnitudinii moment seismic și a frecvenței de colt asociate evenimentelor seismice înregistrate de o rețea seismică echipată cu senzori de scurtă perioadă și bandă largă.
- Implementarea și testarea algoritmului de estimare a soluțiilor planelor de falie pentru un set de cutremure semnificative, produse la adâncimi intermediare și crustale produse pe teritoriul României, utilizând stațiile rețelei seismice naționale a INCDFP.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Testarea algoritmului de estimare a parametrilor sursei seismice împreună cu soluțiile planelor de falie pentru un set de cutremure semnificative, produse pe teritoriul României, utilizând Reteaua Seismica Nationala a INCDFP, constituie principalul obiectiv al acestui studiu. În acest moment această metodologie este în totalitate implementată și funcțională în cadrul sistemului de achiziție și procesare a datelor în timp real, Antelope 5.7.

5. Rezumatul fazei

5.1. Introducere

Proiectul abordează o tematică de maximă actualitate pentru țara noastră având în vedere activitatea seismică ridicată și potențialul ei distructiv. Realizarea lui implică atât cercetare cu caracter fundamental, cât și cercetare cu caracter tehnic-aplicativ. Proiectul va contribui la îmbunătățirea gestionării acțiunilor post seism menite să salveze vieți omenești și bunuri materiale și va duce la evitarea unor situații confuze foarte periculoase, care pot apărea în cazul producerii unui eveniment seismic major, datorită lipsei unor informații corecte.

În acest studiu este descrisă o metodă stabilă de estimare în timp real a parametrilor sursei seismice și a mecanismelor focale asociate evenimentelor seismice produse pe teritoriul României înregistrate de o rețea seismică echipată cu senzori de viteză. Multe dintre aceste evenimente seismice folosite în acest studiu s-au produs în regiunea seismică Vrancea, o regiune seismică deosebit de complexă de convergență continentală caracterizată de cel puțin trei unități tectonice în contact: Placa Est-Europeană și subplăcile Intra-Alpină și Moesică (Constantinescu et al., 1976). Activitatea seismică cea mai puternică din România se concentrează la adâncimi intermediare de (60-200 km), într-o placă subdusă veche, aproape verticală. Observarea a 1 - 6 evenimente de $M_w > 7.0$ pe secol într-un volum focal foarte restrâns implică un nivel înalt al deformării active ($\sim 3.5 \times 10^{-7} \text{ an}^{-1}$) care nu se observă clar în deformarea crustei.

Înregistrarea evenimentelor seismice în timp real se face cu ajutorul Rețelei Seismice Naționale a INCDFP. Datele înregistrate de Rețeaua Seismică Națională, sunt pre-procesate iar trenul undelor S este identificat prin aplicarea unei metodologii automate, care estimează timpii de sosire ai undelor S pe baza localizării hypocentrului, a stațiilor care au înregistrat evenimentul seismic și a modelului de viteze regional.

În acest studiu este descrisă o nouă metodă de estimare a magnitudinii din moment seismic (Gallo, 2014), care folosește analiza spectrală a undelor S, urmând metodologia lui Andrews (1986). Această metodă nu depinde de relații empirice, ci doar de cantități fizice din care poate fi estimat direct momentul seismic scalar. Parametrii de sursă furnizează informații esențiale pentru studiile tectonice globale, regionale și locale, pentru analiza de risc seismic, precum și pentru multe tipuri de

investigatii seismologice. Instalarea unui numar mare de statii seismice in cadrul Retelei Seismice Nationale permite crearea unei baze de date complete, cu înregistrări de calitate ale evenimentelor seismice, ceea ce genereaza un numar impresionant de polaritati cu grad de incredere ridicat utile in realizarea mecanismelor focale. In prezent, Reteaua Seismica Nationala opereaza 158 de statii seismice dintre care 121 dintre acestea transmit datele in timp real la sediul INCDFP (Figura 1).

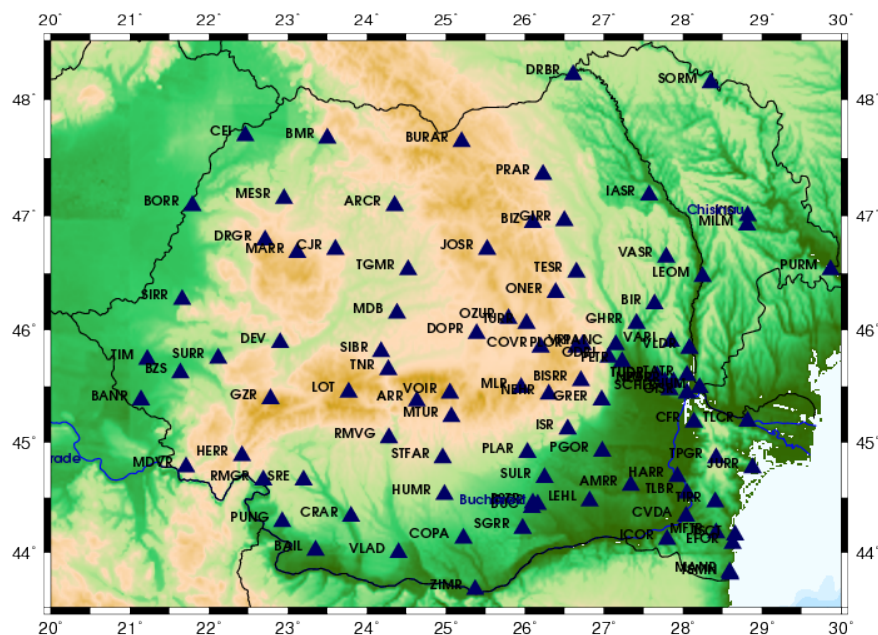


Figura 1. Reteaua Seismica Nationala

5.2. Metodologie

Din baza de date a sistemului de achizitie si procesare a datelor in timp real Antelope 5.7 avem acces la formele de unda si parametrii asociati evenimentelor seismice cum ar fi, azimutul, distanta epicentrala, tipul de senzor (viteza), rata de esantionare, parametrii absolut necesari pentru rulara acestui algoritm de estimare a parametrilor sursei seismice. Acest modul a fost optimizat pentru a crea noi tabele in baza de date a sistemului Antelope si pentru a gestiona informatia noua obtinuta in urma rularii acestui algoritm. Este inlaturat raspunsul instrumentului, apoi este fixata distanta epicentrala la 130 km, urmand sa se verifice calitatea fiecarei inregistrari disponibile. Se selecteaza frecventele de colt pentru filtrarea inregistrarilor, folosind raportul semnal zgomot (SNR), care ne ofera fereastra de timp in care semnalul va fi analizat. Aceasta analiza de zgomot incepe cu 10 secunde inainte de sosirea undelor P. Analiza

semnalului seismic incepe din momentul sosirilor undelor S si reprezinta o functie de eveniment-distanta epicentrala, in particular este egala cu distanta impartita la 3km/s o valoare determinata empiric.

Fazele seismice P si S sunt detectate de programul de achizitie si procesare a datelor in timp real, Antelope 5.7. Din moment ce spectrul de zgomot poate fi la acelasi nivel cu semnalul seismic si chiar poate depasi acest nivel, atat la frecvente joase cat si inalte, este esential sa determinam intervalul de frecventa in care palierul spectral al semnalului seismic este semnificativ mai mare decat palierul spectral al zgomotului seismic. In continuare este aplicata urmatoarea procedura care va investiga domeniul de frecventa (de obicei intre 0.1 si 50 Hz), care permite selectarea ferestrei de timp ce urmeaza a fi analizata in care raportul semnal zgomot este mai mare de 3. Incepand de la cele mai joase frecvente au fost calculate frecventele minime la care raportul semnal zgomot depaseste valoarea 3 (figura 2).

Signal pre-processing

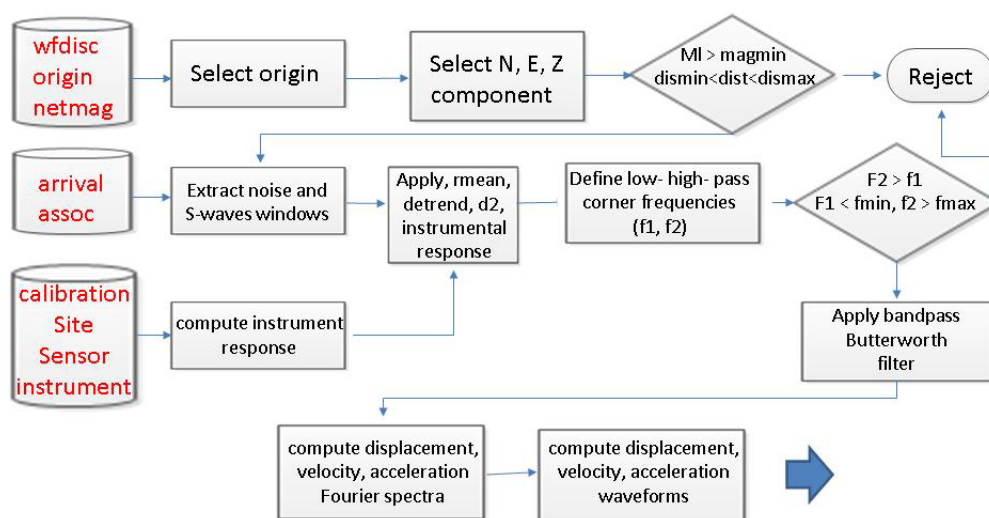


Figura 2. Diagrama procesarii formelor de unda

Prin aplicarea unui filtru Butterworth am obtinut vitezele, acceleratiile si deplasarile solului prin derivarea sau integrarea semnalului seismic. Dupa acest pas se aplica semnalului transformata Fourier (FFT), penru a obtine spectrul semnalului seismic. Apoi toate aceste semnale procesate sunt corectate de imprastierea geometrica si atenuarea intrinseca pentru a obtine spectrul semnalului seismic (figura 3).

Seismic Moment, f_0 , stress drop, M_w computation

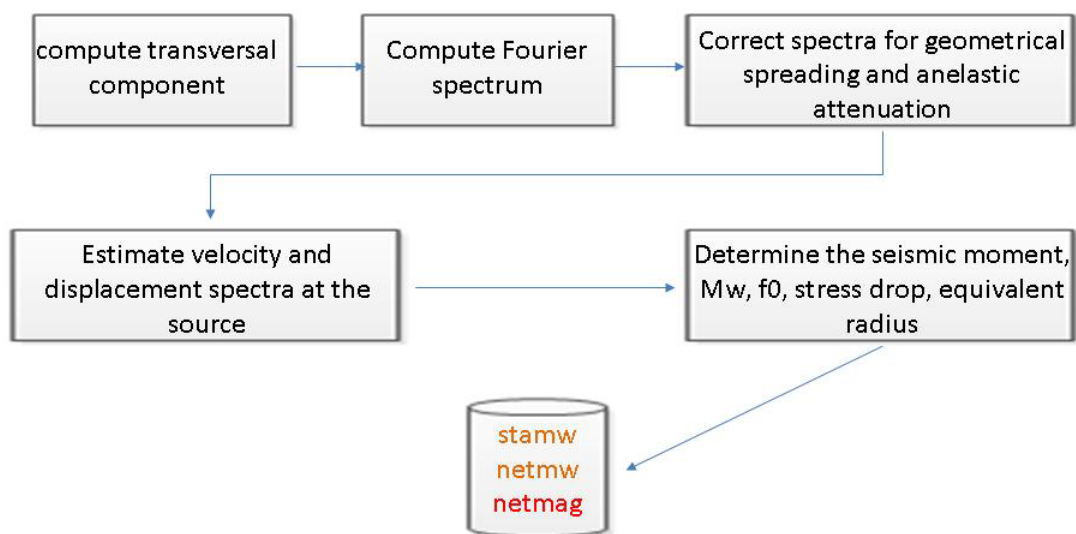


Figura 3. Procedura de estimare a parametrilor sursei seismice

Metoda clasică și cea mai utilizată pentru determinarea mecanismelor focale ale cutremurelor este de a folosi polaritățile undelor P (minim 10 polarități) pentru a identifica traiectoriile undelor dinspre sursa seismică, definind astfel cele două plane nodale, delimitate pe o proiecție stereografică. Mecanismul focal va fi calculat automat, după generarea localizării evenimentelor cu magnitudinea $M_L \geq 4$ pentru evenimentele seismice produse la adâncimi intermediare ($H \geq 60$ km) și $M_L \geq 3.5$, pentru evenimentele seismice produse la adâncimi crustale ($H < 60$ km).

Pentru obținerea mecanismelor focale folosind polaritățile undelor P, este necesar unghiul azimutal și unghiul de emergență (unghiul sub care raza seismică iese din focar) pentru fiecare fază seismică provenită de la sursă. Aceste date sunt în general oferite împreună cu localizările evenimentelor seismice, de către un program de localizare (dbloc2e/ANTELOPE).

Pentru determinarea soluțiilor planelor de falie s-a implementat codul FPFIT (cod ce generează parametrii soluțiilor planelor de falie: strike, dip, rake, etc.) în programul ANTELOPE, ambele dezvoltate de BRTT (<http://www.brtt.com/software.html>). Acest cod (FPFIT) va folosi criteriile amintite mai sus și va testa sistematic toate variantele posibile ale soluțiilor de plan de falie, astfel va valida doar acele soluții care au îndeplinit criteriile cerute. În concluzie, prin

folosirea detectoarelor pentru undele P, putem citi polaritatile (inclusiv amplitudinile) undelor P, iar mecanismul focal va fi generat automat. Codul Psmeca –este un cod dezvoltat in GMT, care citeste valori de date din fisiere si genereaza un cod PostScript care va plota mecanismul focal pe o harta. Aceste programe au fost implementate in programul de analiza rutiniera ANTELOPE.

Sunt efectuate estimari stabile in timp cvasi-real ale principalilor parametri ai mecanismului focal (strike, dip, rake, etc..). Toti acesti parametri sunt disponibili intr-un timp cat mai scurt pe site-ul INCDFP si transmisi mai departe in rapoartele aferente catre inspectoratele de interventie rapida in situatii de urgenta si agentiiilor guvernamentale.

Pentru *validarea solutiilor planelor de falie* obtinute in timp cvasi-real cu programul de analiza rutiniera ANTELOPE, s-a folosit codul Focmec, scris in Fortran 77, dezvoltat de Snoke et al. (1984), incorporat in software-ul SEISAN (Ottemöller et al 2014). Acest cod efectueaza o verificare sistematica si eficienta a sferelor focale si produce solutii ale planelor de falie corecte bazate pe criteriul de selectie al numarului de polaritati ale undelor P.

5.3 Rezultate

In acest studiu au fost analizate 329 evenimente seismice produse pe teritoriul Romaniei cu $1.7 \leq M_L \leq 6.0$, in perioada 2004-2021. Ar trebui mentionat faptul ca aceasta metodologie de estimare a parametrilor sursei seismice nu ia in calcul influenta efectelor locale asupra amplitudinilor spectrale. Chiar daca, calitatea datelor folosite este destul de buna, exista totusi o influenta puternica a efectelor locale asupra amplitudinilor spectrale, care se reflecta asupra magnitudinii si a frecventei de colt (figura 4, figura.5).

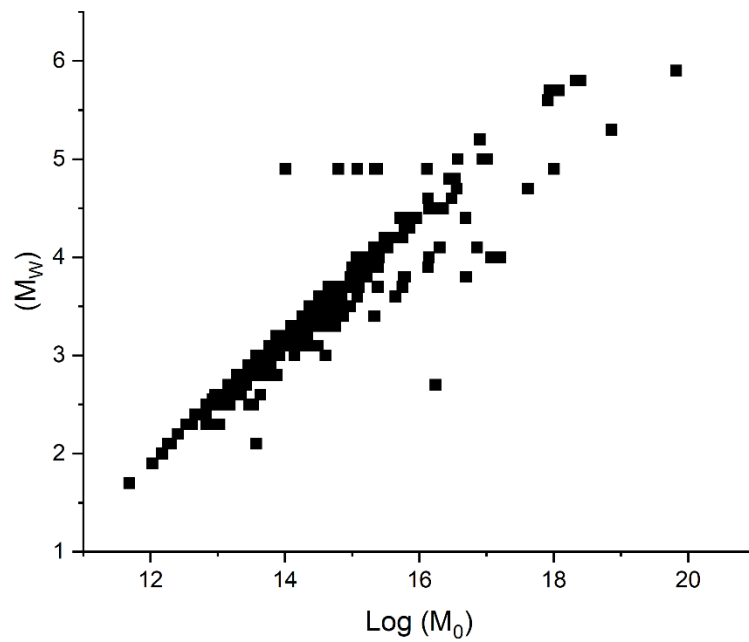


Figura 4. Magnitudinea din moment seismic in functie de logarithmul momentului seismic scalar.

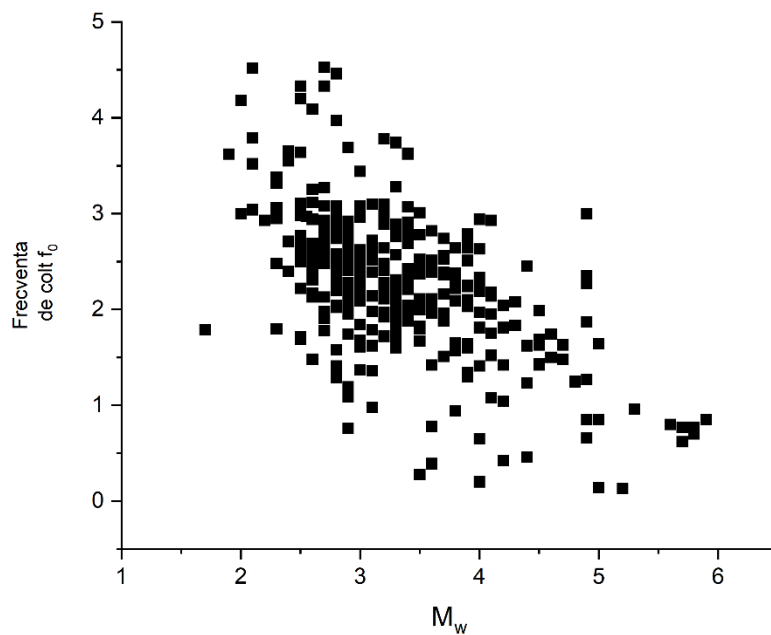


Figura 5. Magnitudinea din moment seismic in functie de frecventa de colt.

Crearea catalogului mecanismelor focale ale evenimentelor seismice inregistrate pe teritoriul Romaniei, reprezinta de asemenea un rezultat concret, important in studiile viitoare privind tectonica zonelor seismogene. In cele ce urmeaza vor fi prezentate solutiile planelor de falie efectuate cu programul de analiza rutiniera Antelope (figura 6).

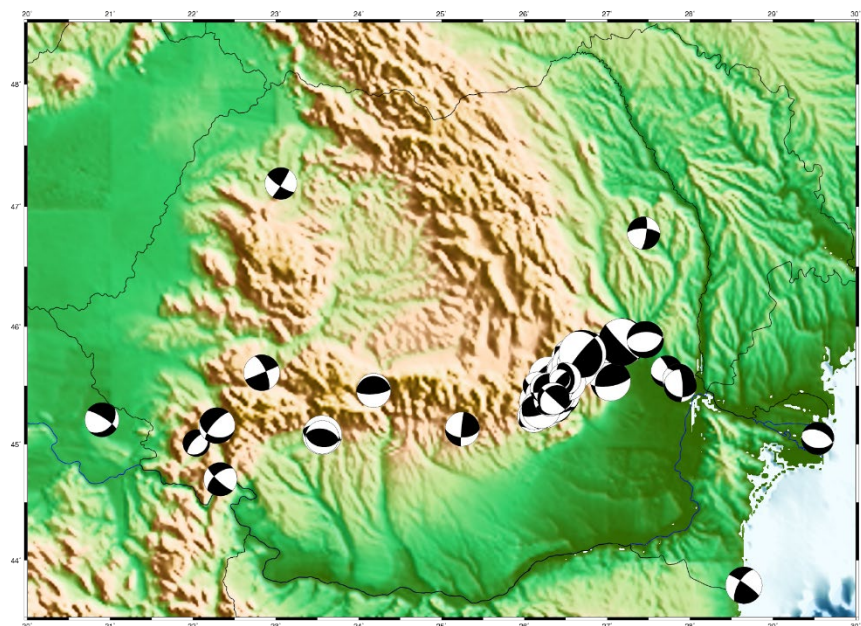


Figura 6. Mecanismele focale pentru 87 evenimente seismice folosite in acest studiu.

In ceea ce priveste analiza mecanismelor focale, acestea au fost efectuate doar pentru cutremurele cu magnitudinea $M_L \geq 4$, distribuite pe mai multe zone seismice: Galati, Tg. Carbunesti, Zalau, Vaslui, Marea Neagra, etc, acestea prezentand o faliere predominant normala cu o importanta componenta strike-slip (figura 6), exceptie facand cutremurele din zona Hateg, din data de 08.09.2013 si zona Fagaras Campulung, din data de 29.12.2015, unde mecanismul indica o faliere inversa.

In data de 22 noiembrie 2014, in regiunea Vrancea s-a produs cel mai mare eveniment crustal inregistrat instrumental din zona de curbura a Carpatilor Orientali, cu o magnitudine locala 5.7, la adancimea de 41 km. Mecanismul focal al socului principal, prezinta o faliere normala cu o componenta dominanta dip slip, ambele plane nodale fiind orientate NV-SE (figura 6).

Cea mai mare parte a evenimentelor seismice analizate in acest studiu au fost localizate in zona Vrancea, aceasta zona fiind unică cu activitate seismică atât crustală, cât și intermediară și constituie una dintre cele mai active zone seismice din Europa. Aceasta prezinta o seismicitate intensă și persistentă generată între 60 și 180 km adâncime, în interiorul unui corp care se scufundă aproape vertical în mantaua Pământului, datorită creșterii campului de stres din acest volum. O geometrie unică a plăcii, probabil păstrată până în prezent, determină localizarea stresului datorită îndoirii plăcii și eliberării ulterioare a stresului, rezultând cutremure mari în manta în regiune.

Principalul tip de faliere asociat cutremurelor vrance de adancime intermediara este reprezentat de falierea inversa (figurile 7, 8), impartit in doua categorii de evenimente seismice: prima categorie este reprezentata de orientarea NV-SE a planelor nodale si paralele fata de Arcul Carpatic, iar cea dea doua categorie prezinta o orientare NV-SE a planelor nodale, perpendicular pe Arcul Carpatic. Axele principale ale tensorului moment seismic indica un regim de stres compressional ($Tp1 > 45^\circ$ $Pp1 < 45^\circ$) (figura 9).

O alta caracteristica a zonei Vrancea subcrustale, o reprezinta tendinta axei T de a fi aproape verticala in timp ce axa compresiei P este aproape orizontala.

Rezultatele obtinute in urma calcularii stressului seismic indica o faliere inversa dominant, ce prezinta un index de stress de 2.9 (figura 9).

A fost observat si un alt regim tectonic din datele folosite, pentru zona Vrancea, care prezinta o faliere normala, cu alunecare in directie dar acestea sunt prezente la un numar restrans de evenimente seismice, aspect evidentiat la cutremurele crustale, rezultand un regim de tranzitie de la un camp compresional din zona subcrustala la un camp extensional, intalnit in Platforma Moesica.

Caracteristicile de stress obtinute in urma inversiei solutiilor mecanismelor focale dezvaluie multe aspecte ale regimului actual de stress care nu au fost evidentiate prin folosirea modelelor numerice la scara larga.

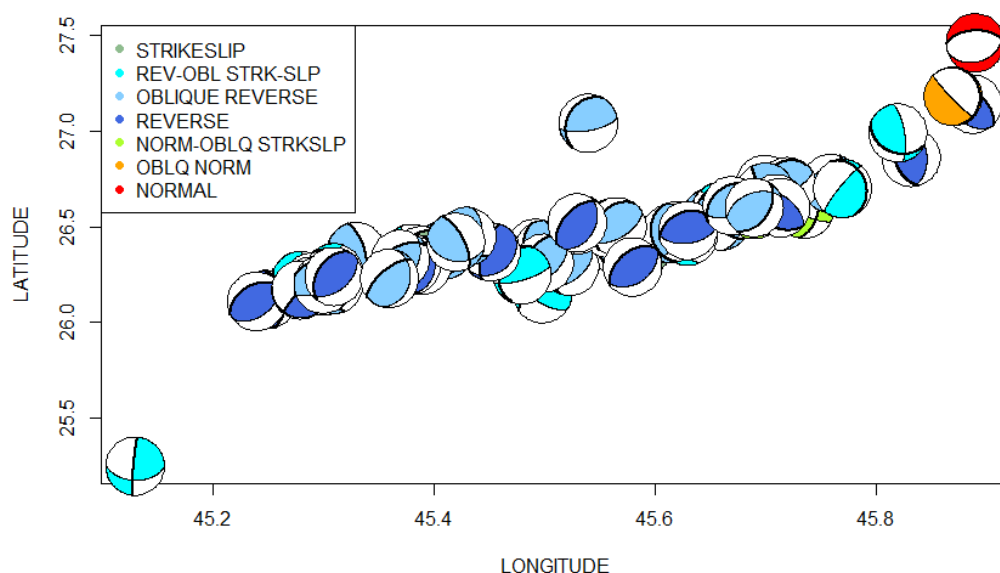


Figura 7. Distributia spatiala a solutiilor planelor de falie pentru cutremurele vrance utilizate in acest studiu (crustale si intermediare)

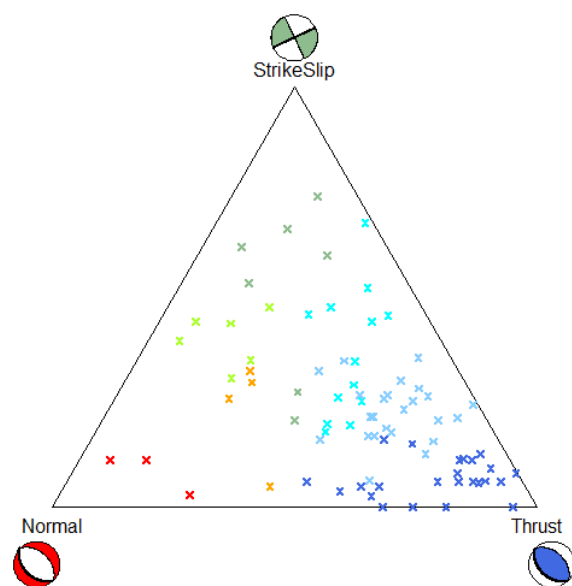


Figura 8. Diagrama Frohlich pentru clasificarea tipurilor de mekansime focale (Zona Vrancea)

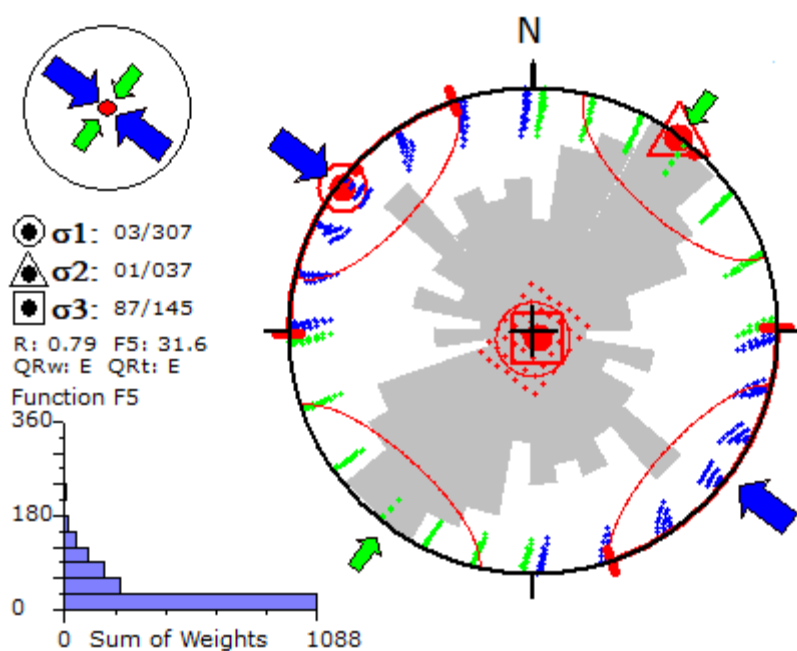


Figura 9. Campul de stres si orientarea planelor de falie pentru zona Vrancea

Inversia solutiilor planelor de falie, bazată în principal pe presupunerea că, câmpul de stres este uniform și invariant în spațiu și timp și alunecarea pe un plan de

falie are loc în direcția stresului de forfecare maximă, indică un câmp de stres predominant compresional (figura 9).

6. Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului

Metodologia studiată permite o estimare rapidă a magnitudinii din moment seismic împreună cu parametrii sursei seismice și mecanismele focale asociate cutremurelor moderate înregistrate de Rețeaua Seismică Națională utilizând date înregistrate de senzorii de viteză din cadrul INCDFP. Rezultatele obținute în urma simulărilor realizate, au fost integrate în cadrul sistemului de achiziție și procesare a datelor în timp real, în vederea creșterii performanțelor acestuia.

Obiectivele fazei au fost îndeplinite în totalitate, iar rezultatele obținute sunt în concordanță cu țintele propuse.

Rezultatele obținute în cadrul acestei faze de lucru au fost prezentate în cadrul articolelor acceptate sau în curs de acceptare:

1. Gh. Marmureanu, I. S., Borcia, A. Marmureanu, C. O. Cioflan C., D. Toma, I. Ilies, M. Craiu, I. Stoian, *Paradox of larger peak ground accelerations in extra-Carpathian area than in epicenter.*, Romanian Journal of Physics 65, 811 (2020).
2. M., Craiu, A., Craiu, M., Mihai, A., Marmureanu, *Real time analysis for Vrancea intermediate depth events using strong motion data*, Geoscience 2020.
3. Computing a large refined catalog of focal mechanisms for Vrancea intermediate depth (2005–2020) ,Craiu Andreea, Mihai Marius, Marmureanu Alexandru, Craiu Marius, Manea Elena, ESC 2021
4. Earthquake Mechanisms and Stress Field for Vrancea crustal zone (2010-2020) Mihai Marius, Craiu Andreea, Craiu Marius, Marmureanu Alexandru, ESC 2021

Bibliografie

Jonathan M. Lees (2018). RFOC: Graphics for Spherical Distributions and Earthquake Focal Mechanisms. Rpackage version 3.4-6.

Aki K (1966) Generation and propagation of G waves from Niigata earthquake of June 16, 1964, estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ 44:73–78;

Andrews DJ (1986) Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. Maurice Ewing series, 6, American Geophysical Union, Geophysics Monograph, 37, Washington DC, pp 259-267;

Brune J (1970) Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes. J Geophys Res 75(26):4997–5009;

Brune J (1971) Correction. J Geophys Res 76(20):5002 ;

Constantinescu, L., Constantinescu, P., Cornea, I., and Lăzărescu, V. (1976), Recent seismic information on the lithosphere in Romania, *Rev. Roum. Géol., Géophys., Géogr., Ser Géophys.* 20, 33-40;

Craiu M., Craiu A., Ionescu C., Popa M., Radulian M., (2012) New local magnitude calibration for Vrancea (Romanian) intermediate-depth earthquake, Romanian Reports in Physics, Vol. 64, No. 4, 2012;

Eaton JP (1992) Determination of amplitude and duration magnitudes and site residuals from short-period seismographs in northern California. Bull Seismol Soc Am 82:533–579;

Gallo A., Costa G., Suhadolc P. (2014) Near real-time automatic moment magnitude estimation, Bull Earthquake Eng, 12:185–202, DOI 10.1007/s10518-013-9565-x;

Gutenberg B, Richter CF (1942) Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. Bull Seismol Soc Am 32:163–191;

Gutenberg B, Richter CF (1956) Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (second paper). Bull Seismol Soc Am 46(2):105–145;

Kanamori H (1977) The energy release in great earthquakes. J Geophys Res 82:2981–2987 ;

Kanamori H, Jennings PC (1978) Determination of local magnitude, ML from strong-motion accelerograms. Bull Seismol Soc Am 68(2):471–485;

Richter CF (1935) An instrumental earthquake magnitude scale. Bull Seismol Soc Am 25:1–32.

Responsabil proiect
Dr Marmureanu Alexandru

Responsabil faza
Dr. Craiu George Marius