RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ PROIECT

Analiza și prognoza seismicității României (Analysis and Forecasting of ROmanian Seismicity) AFROS

Cod Proiect: PN-III-P4-ID-PCE- 2020-1361 Contract: PCE 119/2021

RST - RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC ÎN EXTENSO

ETAPA II – Etapă intermediară

Proiectarea si implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România 01.01.2022 - 31.12.2022

Tip Înreg.	Denumire Etapă, Denumire Activitate	Tip act	Rezultate	Dată Raportare
Etapa 2	Proiectarea si implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România	-	 Creșterea expertizei în analizarea seismicității a celor 2 doctoranzi – raport de instruire; Publicare articole ISI, BDI Prezentări conferințe; actualizare pagină web 	31/12/2022
Act 2.1	Denumire Activitate: Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului	A1	 Modelarea seismicității superficiale, crustale şi algoritmi de prognoză - raport de cercetare; 	31/12/2022
Act 2.2	Denumire Activitate: Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză	A1	 Estimarea şi prognozarea parametrilor seismicității superficiale, crustale – raport de cercetare. 	31/12/2022

*A1 - Cercetare fundamentala

CUPRINS

Rezumatul Etapei

1. Introducere

2. Descriere științifica și tehnică a etapei

Activitatea A2.1 Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului Activitatea A2.2 Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză

3. Concluzii, cu evidențierea a ceea ce s-a realizat din obiectivele propuse

4. Bibliografie

5. Rezultatele etapei

• Modelarea seismicității superficiale, crustale din Romania și algoritmi de prognoză - raport de cercetare;

• Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității superficiale, crustale din Romania – raport de cercetare;

• Creșterea expertizei în analizarea seismicității a celor 2 doctoranzi – raport de instruire.

6. Modul de diseminare a rezultatelor

- Publicare articole ISI, BDI
- Prezentări conferințe
- Actualizare pagină web

Rezumatul Etapei

In cel de-al doilea an al proiectului AFROS am condus activități de cercetare orientate in trei direcții principale, legate cu precădere de analiza seismicității crustale din Romania:

- Revizuirea catalogului de cutremure ROMPLUS care a constat in (a) analiza contaminării datelor de seismicitate crustală cu evenimente reprezentând explozii efectuate in cariere, etc..., si (b) eforturi de omogenizare a catalogului ROMPLUS (seismicitate crustală si subcrustală), in ceea ce priveşte determinarea magnitudinii si localizarea cutremurelor (cu alte cuvinte, folosirea unei metode consistente, unitare, pentru determinarea parametrilor (magnitudine, locație) cutremurelor din catalogul ROMPLUS).
- Aplicarea unei metode de separare a activității seismice de fond de cea de tip secvență seismică, cu scopul detectării unor semnale de tip pre-șoc, cu caracter precursor, pentru cutremurele din zona Vrancea (atât pentru cutremure crustale cât si subcrustale).
- Aplicarea algoritmilor de prognoza *PI/RI* pentru catalogul ROMPLUS, atât pentru seismicitatea crustală de pe tot teritoriul României, cat si subcrustală din zona Vrancea.

Aplicarea metodei de separare a activității seismice de fond de cea de tip secvență seismică a relevat numărul relativ redus al pre-șocurilor pentru seismicitatea din zona Vrancea, atât in domeniul crustal cat si subcrustal. Această observație implică dificultatea detectării unei activități de pre-șocuri pentru cutremurele din Vrancea in perioada analizată, dar nu exclude existența si detectarea acestora, in special in cazul seismelor majore din zona Vrancea. Metoda implementata in Python poate fi folosita pentru monitorizarea seismicității si detectarea unei eventuale activități de pre-șocuri. Deasemenea, o observație remarcabilă arată lipsa aproape totală a secvențelor seismice care să penetreze dintr-o zona (crustală sau subcrustală) in cealaltă. Acest rezultat implica din punct de vedere tectonic existenta unei decuplări totale sau cuplări foarte slabe intre segmentul de seismicitate crustal si cel de adâncime intermediară.

Aplicarea algoritmilor *PI/RI* de prognoză a seismicității a arătat existența unei anomalii semnificative într-o fereastra de timp de 10 si respectiv 5 ani, care include cutremurul major din 4 Martie 1977, de magnitudine M7,4. Indecșii *PI* si *RI* au fost calculați continuu, folosind catalogul ROMPLUS intre anii 1940 – 2022, pentru cutremure crustale si subcrustale. În prezent analizăm si rafinăm rezultatele obținute (pentru toate perioadele de timp) si încercăm sa le interpretăm într-o încadrare statistică. Metoda este implementată in MATLAB si permite monitorizarea permanentă a seismicității pentru detectarea unor eventuale caracteristici cu caracter anomal, precursor.

Pe lângă activitățile de cercetare științifică, am organizat, în cadrul celui de al doilea an al proiectului, seminarii și lecții de instruire cu participarea membrilor proiectului, inclusiv a studenților doctoranzi.

In timpul celui de-al doilea an al proiectului, membrii proiectului au publicat 3 articole în jurnale cotate ISI si alte 3 articole au fost trimise spre publicare către jurnale ISI. Deasemenea am organizat o sesiune speciala la o conferința internaționala de Seismologie si Inginerie Civilă, desfășurată la București.

1. Introducere

Proiectul AFROS își propune să analizeze seismicitatea din România și să găsească elemente cu posibil caracter predictiv, care să fie folosite în scopul dezvoltării și adaptării unor tehnici de prognoză ("forecasting") pentru teritoriul României. Un scop indirect al proiectului este să construiască baza de date necesară analizei și prognozei cutremurelor de pe teritoriul României. In raportul de față, vom prezenta studiile efectuate în al doilea an al proiectului (Etapa 2), în cadrul a două activități distincte, în ceea ce privește in principal seismicitatea de adâncime superficială, crustală din România, dar si, complementar, activitatea subcrustală din zona Vrancea.

După cum se cunoaște, cutremurele de adâncime intermediara din zona Vrancea au cel mai mare impact din punctul de vedere al hazardului seismic. Activitatea din primul an al proiectului (Etapa 1) sa concentrat exclusiv pe analiza seismicității subcrustale. Cu toate acestea, cutremurele de adâncime intermediara din zona Vrancea, nu reprezintă singura sursa seismogenă din România cunoscută pentru activitatea seismică cu risc seismic considerabil. Cutremurele crustale, de mică adâncime, care au loc în zone ale României precum Făgăraș-Câmpulung, Banat, Crișana, Maramureș și Dobrogea (Figura 1; Radulian et al., 2000; Moldovan et al., 2017) sunt deasemenea caracterizate de un risc seismic considerabil. De exemplu, este încă proaspăt în memoria publică impactul recentei activități seismice de mică adâncime care s-a produs în apropierea satului Izvoarele, prefectura Galați, unde un roi de cutremure de mică adâncime a avut loc în anul 2013 (Craiu et al., 2017), provocând pagube clădirilor și o mare îngrijorare din partea publicului.

Rezultatele obținute in prima etapa a proiectului, in cursul anului 2021, au arătat necesitatea unui efort coordonat pentru crearea unei baze de data omogene, cu grad ridicat de acuratețe, care sa permite studii aprofundate si detaliate ale seismicității, inclusiv cu caracter de prognoza. Acest efort mobilizează in prezent nu doar membri ai proiectului AFROS, ci un colectiv mai larg din cadrul Institutului National de Fizica Pământului (NIEP). O parte din aceste eforturi sunt prezentate in cadrul activității A2.1.

In acest raport, vom prezenta mai întâi o descriere detaliata a celei de a doua etape (anul 2022) a proiectului care cuprinde activitățile A2.1 si A2.2. In cadrul activității A2.1 prezentăm la început "*Caracteristicile generale ale seismicității României, cu precădere a celei crustale – implicații pentru activitatea de prognozare a seismicității si hazardul seismic"*, după care discutăm "*Problemele legate de pre-procesarea cutremurelor crustale care au necesitat o abordare speciala"* si apoi prezentăm "*Metode de analiză detaliată"* folosite pentru analiza cu caracter de prognoză a seismicității din Romania. În cadrul activității A2.2 prezentăm rezultatele obținute cu metodologia de analiză descrisă in cadrul activității A2.1.

Ca rezultate cu importantă deosebită pentru scopul proiectului dorim sa subliniem aplicarea unui algoritm pentru stabilirea legăturii dintre seismicitate crustală si subcrustală din zona Vrancea si detectarea activității de pre-șocuri, precum si si implementarea algoritmilor de prognoză *PI* si *RI* pentru seismicitatea de pe teritoriul României. După detalierea activităților proiectului din cursul acestui an, urmează prezentarea *concluziilor*, cu evidențierea a ceea ce s-a realizat din obiectivele propuse, bibliografia, *rezultatele* si *modul de diseminare* a acestora.

Activitatea A2.1. Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului

<u>Caracteristicile generale ale seismicității României, cu precădere a celei crustale – implicații pentru</u> activitatea de prognozare a seismicității si hazardul seismic (detalii suplimentare in Anexa 1 si Ghita et al. (2021, 2022)).

Figura 1 prezintă seismicitatea României între anii 984 – 2022, conform catalogului ROMPLUS (Oncescu et al., 1999 - actualizat). Pentru perioadele istorice (înainte de anul 1940), informațiile se referă cu precădere la cutremurele majore, cu magnitudini mai mari de 6,5 (locațiile acestor cutremure istorice, bazate pe date macro-seismice, au incertitudini relativ mari, în special în ceea ce privește adâncimea focarului seismic). Seismicitatea din segmentul superficial (0 – 60 km) este crustală, în timp ce pentru adâncimi mai mari de 60 km, cutremurele sunt considerate de adâncime intermediară, având loc în segmentul de litosferă subdus la curbura Carpaților, în zona Vrancea. Prezentul raport se referă în special la cutremurele crustale, cu adâncimi între 0 și 60 km de pe teritoriul României.



Figura 1. Hartă reprezentând seismicitatea de pe teritoriul României, între anii 984 și 2022, conform catalogului ROMPLUS (Constantinescu and Mârza, 1980; Oncescu et al., 1996, 1999). Faliile majore, litosferice (e.g., Dinu și Răileanu, 2008), sunt reprezentate prin linii punctate. Epicentrele cutremurelor sunt reprezentate prin puncte de culoare albastră (cutremure cu adâncimi mai mici de 60 km), verde (cutremure cu adâncimi între 60 și 120 km) și roșie (cutremurele cu adâncimi mai mari de 120 km). Intervalele de adâncime au fost selectate astfel încât fiecare dintre ele sa se extindă pe aproximativ o treime din adâncimea maximă (aproximativ 220 km). Cele mai importante zone cu seismicitate crustală (Moldovan et al., 2017) sunt indicate in figură. Abrevierile reprezintă: CMS: Crișana-Maramureș, DT: Depresiunea Transilvaniei, BAN: Banat, DAN: Zona Dunării, FCS: Făgăraș-Câmpulung-Sinaia, VRN: Vrancea, VI: Vrancea subcrustal, IMF: Falia Intra-Moesică, PD: Depresiunea Pre-Dobrogeană, BD: Depresiunea Bârladului; SH: Şabla și DUL: Dulovo.

Harta din Figura 1 prezintă si zonele de seismicitate cele mai importante de pe teritoriul României (Moldovan et al., 2017). Cu excepția zonei VI (Vrancea intermediar), toate celelalte zone demarcate in figură sunt caracterizate de seismicitate de suprafată (crustală) cu adâncimi ale seismelor intre 0 - 60 km.

In Figura 2, arătam diagrama magnitudine – timp, pentru cutremurele crustale si subcrustale care sau produs pe teritoriul României intre anii 2000 – 2022. In intervalul analizat, se observa activitatea mult mai susținută a cutremurelor subcrustale (7 cutremure cu $M \ge 5,0$, inclusiv un cutremur cu M = 6,0) in comparație cu cele crustale (un singur cutremur cu $M \ge 5,0$, in depresiunea Bârladului, vezi Figura 1).



Figura 2. Diagrama magnitudine – timp pentru (a) cutremurele crustale (0 - 60 km) si (b) subcrustale (60 - 220 km) din Romania, pentru magnitudini, M \geq 2,5. Se observa activitatea mult mai sustinută a cutremurelor subcrustale.

De altfel, in perioada acoperita de catalogul ROMPLUS (984 – Octombrie, 2022, Figura 1) s-au produs un număr de 8 cutremure cu magnitudini $6,5 \ge M \ge 6,0$ in zona crustală (6 dintre ele in zona Făgăraș, unul in Banat si unul in zona Crișana-Maramureș, Figura 1), si un număr de 100 de astfel de cutremure in zona de adâncime intermediara din zona Vrancea (din care 37 cu magnitudini $M \ge 7,0$). Aceeași concluzie poate fi trasă si din examinarea Figurii 3, care arată relația frecvență-magnitudine a cutremurelor (Gutenberg and Richter, 1944):

$$\log N = a - b^*M \tag{1}$$

unde N este numărul cumulativ de cutremure, a, b sunt constante si M reprezintă magnitudinea cutremurelor crustale si subcrustale din România. Valoarea parametrului b, care descrie ponderea relativă a cutremurelor mai mari în comparație cu cele relativ mici, este semnificativ mai mică pentru cutremurele de adâncime intermediară din zona Vrancea.

Notăm de asemenea ca in Figura 2 se constata o descreștere a numărului cutremurelor după anul 2014, in comparație cu perioada precedentă, care este probabil asociată unor schimbări in relația de determinare a magnitudinii (vezi secțiunea următoare, cu precădere – "Încercări de revizuire a catalogului ROMPLUS").



Maximum Likelihood Solution b-value = 1.18 +/- 0.02, a-value = 6.95 Magnitude of Completeness = 2.9 b-value =2.51 +/- 0.06, a-value = 9.6 Magnitude of Completeness = 2.5

Figura 3. Distribuții frecventă-magnitudine pentru cutremurele crustale (0 - 50 km) si subcrustale (60 - 220 km) din Romania, pentru magnitudini $M \ge 2,5$, intre anii 2000 – 2022. Dreptunghiurile si triunghiurile goale, reprezintă respectiv numărul cumulativ si non-cumulativ al cutremurelor intermediare, cele pline reprezintă același lucru pentru cutremurele crustale. Linia violet si cea roșie reprezintă fitarea celor doua distribuții cumulative (pentru cutremure intermediare si respectiv superficiale) folosind metoda "maximum-likelihood" (Aki, 1965). Figura indică deasemenea magnitudinea de completitudine (*Mc*) pentru cele doua distribuții (determinate cu metoda "maximum-curvature", Wiemer and Wyss, 2000), precum si valorile parametrilor *a* si *b* din formula (1). Cutremurele de adâncime intermediară sunt caracterizate de un coeficient *b* (panta liniei violet) cu valoarea 1,2, in timp ce cele crustale au un coeficient *b* ridicat, cu o valoare de 2,5. Valoarea p indica probabilitatea (foarte mica) ca cele doua distribuții sa provină din aceeași populație (*Cifrele din figura sunt scrise in sistem anglo-saxon, cu punct in loc de virgula, de exemplu "2,5" devine "2.5", etc...).*

In concluzie, notăm ca deși numărul cutremurelor crustale din Romania este redus in comparație cu cele de adâncime intermediara, ele sunt o sursă de hazard seismic local datorită adâncimii lor superficiale si, ca urmare, intensității seismice relativ puternice in comparație cu un cutremur intermediar de aceeași magnitudine. Mai multe detalii legate de seismicitatea crustală (pentru tot teritoriul României si pentru segmentul crustal din zona Vrancea) sunt prezentate in Ghita et al. (2021, 2022) si Anexa 1.

Problemele legate de pre-procesarea cutremurelor crustale care au necesitat o abordare speciala

• Analiza contaminării cu explozii a catalogului cutremurelor crustale de pe teritoriul României si abordări de soluționare a problemei (Armeanu et al., 2022a, b, Vărzaru et al., 2022)(Anexa 2)

Trei abordări au fost testate (si implementare in MATLAB) pentru a soluționa problema contaminării cu explozii a catalogului cutremurelor crustale (ce afectează seismicitatea de magnitudini mici): analiza raportului zi-noapte a distribuției seismicității, analiza similarității formelor de undă si analiza spectrală (rezultate detaliate prezentate in Anexa 1 si in special 2). Prima abordare constă în reprezentarea distribuției spațiale a raportului normalizat de seisme noapte/zi (RQ) (Wiemer and Baer, 2000).

Ambele reprezentări din Figura 4 indică prezența evenimentelor artificiale în catalogul ROMPLUS, maximul activității seismice fiind evidențiat în intervalul orar 1:00 P.M.- 3:00 P.M (ora locală) iar

contaminarea cea mai puternică este observată în regiunile din partea de nord, nord-vest, centrul României și zona Dobrogei (colorate în galben, verde și albastru deschis). Este de notat că în zona de curbură a Carpaților Orientali (zona Vrancea și Bazinul Focșani), deși activitatea seismică este foarte intensă, RQ < 1,5, ceea ce indică originea pur tectonică a evenimentelor produse acolo. Similaritatea formelor de unda (Anexa 2) poate fi folosită pentru a discrimina local cutremurele de pământ de explozii. Analiza spectrală (Anexa 2) ia în considerare diferențele caracteristicilor si conținutului în frecventa ale cutremurelor si exploziilor, ajutând la discriminarea acestora.



Figura 4. Distribuția spațială a valorii RQ pe harta României (culorile deschise arată valori relativ mari ale parametrului). Cu gri sunt reprezentate epicentrele evenimentelor seismice selectate. În medalion este reprezentată histograma cu distribuția numărului de evenimente seismice în funcție de ora locală a producerii lor.

• Încercări de revizuire a catalogului ROMPLUS (material prezentat de Poiata et al., 2021, 2022; in pregătire pentru publicare)(Anexa 3)

Încercările de revizuire a catalogului ROMPLUS, care se găsesc deja într-o fază avansată, au ca scop omogenizarea determinării magnitudinilor si a localizării (in special a adâncimii) cutremurelor din România, catalogate in ROMPLUS. Omogenizarea catalogului este necesară pentru a putea compara rezultate obținute folosind date din trecut (de exemplu existenta unor lacune seismice sau activări seismice) cu seismicitatea actuală si eventual detecta caracteristici cu caracter premonitor. Deasemenea, această activitate este importantă pentru obținerea unor parametrii seismici de încredere (de exemplu valoarea lui b din relația frecventa-magnitudine), precum si evoluția acestor parametrii funcție de timp. Încercările din prezent s-au concentrat pe un catalog constând in cutremure crustale si subcrustale din regiunea Vrancea, produse intre anii 2016 – 2021, dar vor fi gradual extinse pentru tot teritoriul României, începând cu anii 2000. Figura 5 prezintă o comparație intre magnitudinea unui set de 2070 de cutremure, produse intre Septembrie 2016 – Decembrie 2021, înregistrate in buletinul seismic digital (INFP) si cele calculate cu ecuațiile folosite de sistemul ANTELOPE (dezvoltat de "Boulder Real Time Technologies"), întrebuințat la INFP. După cum se observă in Figura 5, fluxul de analiză (implementat in Python) de date utilizat permite o reproducere acceptabila a magnitudinilor produse de programul ANTELOPE. In general, o împrăștiere mai mare a valorilor Ml (magnitudine locala) calculate pentru cutremure mai mici poate fi atribuită raportului SNR (signal-noise ratio) mai defavorabil. Această procesare, extinsa pentru datele de dinainte de 2014, an in care sistemul de procesare a datelor a fost schimbat (vezi raportul AFROS pentru anul 2021), va asigura o omogenizare corespunzătoare.





Metode de analiză detaliată ale catalogului de cutremure

 Metoda dezvoltata de Zaliapin et al. (2013) de separare a activității seismice de fond de cea de tip cluster (pentru detalii, vezi Anexa 4: Petrescu and Enescu, 2022, lucrare in pregătire) pentru cutremurele crustale si de adâncime intermediară din zona Vrancea

Metoda dezvoltată de Zaliapin et al. (2013) reuşeşte să separe activitatea seismica de fond, atribuită de obicei forțelor tectonice, de acea de tip cluster (pre-șocuri, replici seismice, roiuri seismice), care rezultă ca urmare a inducerii unor seisme de către alte seisme (sau de către activitatea vulcanică, etc...) prin schimbări de stres (de exemplu replicile seismice sunt induse de către stresul provocat de cutremurul principal).

Distanta celui mai apropiat vecin ("nearest-neighbour distance") intre un cutremur i și unul j (cel mai apropiat de i) este definită in spațiu-timp folosind formula propusă de Zaliapin et al. (2013):

$$\eta_{ij} = t_{ij} (r_j)^{d_f} 10^{-bm_i}, t_{ij} > 0, \quad \eta_{ij} = \infty, t_{ij} \le 0$$
⁽²⁾

unde t_{ij} este diferența de timp dintre un cutremur *i* și un cutremur *j*, r_{ij} este distanța dintre hipocentrale cutremurelor (în km), *b* este panta din relația frecventă-magnitudine (Ecuația 1) și d_f este dimensiunea fractală a distribuției hipocentrale a cutremurelor din zona (e.g., Moldovan et al., 2022).

Folosind această formulă si considerând b (= 1,0) si $d_f (=1,6)$ (Moldovan et al., 2022), am obținut distribuția din Figura 6 pentru cutremurele din zona Vrancea (atât cele crustale cat si cele de adâncime

intermediare, $M \ge 2,5$). Metoda dezvoltată de Zaliapin et al. (2013) arată ca pentru cataloagele de cutremure cu "cluster-are" puternică, distribuția are 2 vârfuri, adică 2 sub-distribuții care sunt de obicei



Figura 6. Histograma a valorilor parametrului η împreuna cu fitarea celor doua curbe Gauss (distribuție Gauss mixta, cu doua componente). Curba de culoare galbena corespunde seismicității de fond, in timp ce aceea de culoare roșie corespunde distribuției de tip cluster. Intersecția celor doua distribuții (cea pentru valori relativ mici) poate fi considerata ca separând celor doua tipuri de seismicitate (de fond si de tip cluster).

fitate cu doua curbe de tip Gauss (distribuție Gauss mixtă). Această fitare este arătata in Figura 6. Distribuția din dreapta graficului (linie roșie) corespunde seismicității de fond, in timp ce distribuția din stânga (linie portocalie) corespunde seismicității de tip cluster. In cazul seismicității de suprafața se observa pentru multe regiuni seismice de pe glob (e.g., Tamaribuchi et al., 2018, pentru Japonia), o distribuție de tip cluster foarte bine conturată. Pentru zona Vrancea, unde seismicitatea intermediară este preponderentă, clusterele sunt mult mai limitate ca număr. Este interesant de constatat că, deși exista seismicitate de suprafață in zona Vrancea, ea nu are o amprentă semnificativă asupra rezultatelor (distribuția de tip cluster este destul de redusă). Metodele de calcul au fost implementate in Python.

Rezultatele in ceea ce privește clusterele (secvențele) de cutremure detectate si implicația rezultatelor pentru prognoza seismicității din zona Vrancea sunt discutate în prima parte a descrierii activității A2.2.

• Metoda PI/RI de analiză a seismicității (pentru detalii vezi Anexa 5, Tiampo and Enescu, 2022, lucrare in pregătire) aplicate seismicității de pe tot teritoriul României

<u>Indexul *PI*</u> (Tiampo et al., 2002, 2006) se calculează in zonele active seismic pentru magnitudini mai mari decât magnitudinea de completitudine (Figura 3). Zona de interes este divizata folosind o tehnica de tip "gridding" (similar cu calculul variației spațiale a parametrului statistic *z*, introdus in raportul primei faze) in mai multe casete (sub-zone) dreptunghiulare. Metoda definește rate seismicității, $\psi_{obs}(x_i,t)$, ca numărul de cutremure pe unitatea de timp (un an in cazul nostru) într-o caseta (box) cu locația *x_i*, la timpul *t*. Seismicitatea medie reprezentata de funcția S(*x_i*,*t*₀,*t*) pe intervalul (*t* - *t*₀) este data de relatia:

$$S(x_i, t_0, t) = \frac{1}{(t - t_0)} \int_{t_0}^t \psi_{obs}(x_i, t) dt \,.$$
⁽³⁾

 $S(x_i,t_0,t)$ este calculat pentru *N* locații și t_0 este un timp fix, cum ar fi începutul catalogului. Notând mediile spațiale pentru N casete cu >, funcția de fază $S'(x_i,t_0,t)$ este definită ca fiind funcția de normă unitară medie zero, obținută din $S(x_i,t_0,t)$:

$$S'(x_i, t_0, t) = \frac{S(x_i, t_0, t) - \langle S(x_i, t_0, t) \rangle}{\|S(x_i, t_0, t)\|},$$
(4)

unde || S(xi,t0,t) || este rădăcina pătrata a varianței, pentru toate casetele. Funcția definita mai sus poate fi folosită pentru a calcula schimbările temporale si spațiale de seismicitate, intre 2 momente de timp, t₁ si t₂: $\Delta S'(x_i,t_1,t_2) = S'(x_i,t_0,t_2) - S'(x_i,t_0,t_1)$. In final, este obținută media valorilor lui $\Delta S'(x_i,t_1,t_2)$ pentru toate posibilele valori ale anului de baza, t₀. In final, indexul PI, ΔP , este obținut ca: $\Delta P(x_i,t_1,t_2) = {\Delta S'(x_i,t_1,t_2)}^2 - \mu_p$, unde μ_p este media spațiala ${\Delta S'(x_i,t_1,t_2)}^2$.

<u>Indexul RI</u> (Holliday et al., 2005) este definit într-un mod mult mai simplu decât indexul PI, după ce a fost folosită aceeași tehnica de "gridding" pentru a diviza zona seismica de interes in casete. Indexul este calculat pentru fiecare casetă ca numărul total de cutremure din casetă într-o anumita perioadă de timp împărțit la valoarea cea mai mare (dintre toate casetele). Se selectează apoi o valoare de prag în intervalul [0, 1] și toate casetele cu valori mai mari decât valoarea de prag se pot așteaptă să aibă un eveniment semnificativ în perioada de prognoză. Casetele rămase cu scoruri RI mai mici decât valoarea de prag reprezintă locații în care nu se așteaptă să se producă cutremure semnificative. Rezultatul este o hartă a locațiilor dintr-o regiune seismică în care se estimează că vor avea loc cutremure într-un interval de timp viitor pe termen mediu.

Metodele de calcul pentru *PI/RI* sunt implementate in MATLAB. Rezultatele obținute cu tehnicile *PI/RI* pentru tot teritoriul României sunt prezentate in cea de a doua parte a descrierii activității A2.2.

Activitatea A2.2. Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză

• Metoda dezvoltata de Zaliapin et al. (2013) de separare a activității seismice de fond de cea de tip cluster (pentru detalii, vezi Anexa 4; Petrescu and Enescu, 2022, lucrare in pregătire) pentru cutremurele crustale si de adâncime intermediară din zona Vrancea

Prezentăm in cele ce urmează rezultatele legate de secvențele identificate pentru zona Vrancea (crustal si intermediar), precum si implicații ale rezultatelor pentru prognoza seismică. După cum am văzut deja in secțiunea precedentă, seismicitatea de fond este predominantă in cazul activității seismice din Vrancea. Am reușit însă sa detectăm câteva secvențe seismice clare care sunt prezentate in Tabelul 1 (vezi si Tabelul 2 din Anexa 4). Aceste secvențe sunt caracterizate de un parametru η mai mic decât "-4,45" (punctul de intersecție al celor doua curbe Gauss, vezi secțiunea precedentă).

Timp cutremur principal	Magnitu- dine cutremur principal	Adâncime cutremur principal (km)	Număr de Preșocuri	Număr de replici	Interval de adâncime (km)	Întindere pe adâncime (km)	Durata (zile)
2004.10.27	6,0	105,4	0	36	25,3-153,5	128,2	129
2005.05.14	5,5	148,5	0	36	101,6-155,5	53,9	2360
2005.12.13	4,9	136,8	0	5	115,5-138,0	22,5	65
2009.04.25	5,4	109,6	0	11	12,7-128,4	115,7	80
2009.10.22	4,6	156,3	3	7	125,6-156,3	30,7	90
2011.05.01	4,9	146,1	0	8	142,3-160,9	18,6	270
2011.10.04	4,8	142,0	0	10	119,5-153,1	33,6	44
2013.10.06	5,2	135,1	0	23	6,2-148,4	142,2	2514
2014.11.22	5,4	40,9	0	7	34,3-109,8	75,4	15

Tabel 1. Detalii despre clusterele (secvențe de tip preșoc-cutremur principal-replici) detectate

2016.12.27	5.6	96.9	14	28	75.9-143.2	67.3	782
2018.10.28	5.5	147.8	0	22	110.4-149.8	39.4	757

Secvențele seismice din Tabelul 1 sunt de tip "preșoc-cutremur principal-replici", in timp ce acelea din Tabelul 2 (prezentate doar in Anexa 4) sunt de tip "roi seismic". Diferența dintre cele doua tipuri de secvențe seismice constă in faptul că in cazul roiurilor diferența dintre magnitudinea cutremurului principal si replica cu magnitudinea cea mai mare este mai mică ($\leq 1,3$ unități de magnitudine), decât in cazul primului tip de secvență.

Activitatea de preșocuri este una dintre cele mai semnificative elemente cu caracter precursor. Doar doua dintre secvențele detectate de noi in zona Vrancea prezinta pre-șocuri. Este o observație cumva surprinzătoare, deoarece in general, cel puțin cutremurele superficiale ar trebui sa aibă o activitate de pre-șocuri mai abundenta. Așa după cum arătăm in Anexa 4 (Petrescu and Enescu, 2022), cea mai importanta implicație a rezultatelor obținute este una de natura tectonică: partea crustală si de adâncime intermediara din Vrancea sunt probabil decuplate complet sau cuplate foarte slab, ceea ce explică penetrarea aproape inexistentă a secvențelor analizate dintr-un domeniu in altul (Figura 7). Detectarea unor cutremure de tip "roi seismic", in special in zona crustală, are deasemenea implicații in ceea ce privește regimul termic si de deformare in această regiune. Din punctul de vedere al prognozei seismice, vom extinde metodologia pe termen mai lung, in măsura in care datele ne vor permite, si încerca sa găsim secvențe de pre-șocuri asociate cu cutremure mai mari (in special cele cu $M \ge 6,5$ din zona de adâncime intermediară). Speculăm deasemenea ca regimul termic si de deformare special nu creează condiții favorabile de producere a unor cutremure majore in domeniul crustal din zona Vrancea.



Figura 7. a) Hipocentre ale cutremurelor în domeniile crustal și subcrustal pentru zona Vrancea, colorate în funcție de clasificarea explicată in text: șocuri principale (roșu), replici (verde), pre-șocuri (albastru), evenimente de tip "roi seismic" (cyan). b) Reprezentarea adâncime-timp a cutremurelor din Vrancea arătând perechi de cutremure cu $\log(\eta) < -5,0$. Doar secvențele seismice cu cel puțin 3 cutremure sunt reprezentate.

 Metoda PI/RI de analiză a seismicității (pentru detalii vezi Anexa 5, Tiampo and Enescu, 2022, lucrare in pregătire) aplicate seismicității de pe tot teritoriul României

Prezentăm in această sub-secțiune rezultatele obținute folosind algoritmii *PI* (Figura 8) si *RI* (Figura 9). Cutremurele cu magnitudini M > 4,0 si M > 3,0 au fost folosite respectiv pentru primul si al doilea algoritm. Am ales astfel de valori ridicate de prag ale magnitudinilor ținând cont de nivelul de completitudine al datelor si stabilitatea rezultatelor.

In cazul algoritmului *PI* prezentăm rezultate obținute folosind o perioadă de învățare (perioada in care algoritmul a fost aplicat datelor de observație) de 5 ani si 10 ani. Rezultatele (prognoza seismică) este făcută deasemenea pentru perioade de 5 ani si respectiv 10 ani. In Figura 8(stânga) prezentăm rezultatele obținute pentru perioada de prognoză 1977-1987 (perioada de învățare este 1966-1976), in timp ce in Figura 8(dreapta) perioada de prognoză este 1977-1982 (perioada de învățare este 1971-1976). Am ales astfel de intervale de timp, pentru exemplificarea metodelor, deoarece suntem interesați atât in prognoza cutremurelor crustale cat si a celor de adâncime intermediara. Deasemenea am dorit ca algoritmii *PI/RI* sa fie testați mai întâi in cazul unor perioade de timp in care s-au produs cutremure majore (precum cutremurul din 4 Martie 1977, magnitudine M7,4). De notat ca am efectuat calcule pentru toată perioada 1940 – 2022, dar încă analizam implicația rezultatelor.

Atât in harta din Figura 8(stânga) cat si in cea din Figura 8(dreapta), se observa un "hot-spot" (valori relativ ridicate ale parametrului *PI*, care pot indica atât o descreștere cat si o activare a seismicității) centrat pe zona Vrancea. Este interesant că prognoza pe un interval de 5 ani arată valori mai ridicate (roșu intens) decât cele pentru 10 ani in zona Vrancea. Cu toate că o calibrare atentă cu date locale este necesară pentru a trage concluzii ferme, valori ale parametrului *PI* mai mari decât 0.1 (10⁻¹) au fost observate retrospectiv înaintea unor cutremure majore produse in diverse părți ale globului (e.g., Nanjo et al., 2006, pentru Japonia). Rezultatele obținute cu algoritmul PI sunt promițătoare in special in cazul cutremurelor majore din zona Vrancea. In contrast cu zona Vrancea, alte regiuni cu seismicitate de suprafață arată valori modeste ale indexului *PI*. Cu toate acestea, pentru alte intervale de timp, am obținut



Figura 8. (stânga) Indicele *PI*, pentru perioada de învățare 1966-1976, perioada de prognoză 1977-1987. Triunghiurile inversate indică locația cutremurelor ($M \ge 5.0$) care au avut loc în perioada de învățare, cercurile identifică locația cutremurelor ($M \ge 5.0$) care au avut loc în perioada de prognoză. Scara de culoare este logaritmică, de la alb la galben spre roșu (dreapta) Indicele *PI*, pentru perioada de învățare 1971-1976, perioada de prognoză 1977-1982, simboluri și scară de culori sunt la fel ca în harta de la (dreapta).

valori considerabile si pentru zone cu seismicitate crustală, precum zona seismică Făgăraș. În momentul de fată investigam aceste posibile valori anomale.

Prezentăm in Figura 9 rezultatele obținute folosind algoritmul *RI*. Urmând aceeași procedură folosită in lucrări precedente (Holliday et al., 2005), valorile *RI* reprezentate pe hartă sunt doar cele care depășesc o valoarea de prag, aleasă ca 0,1. Similar cu hârțile *PI* (Figura 8), se observa un hot-spot clar, centrat pe zona seismică Vrancea. Perioada de învățare pentru metoda *RI* se extinde de la începutul catalogului de cutremure pană in momentul de la care se dorește estimarea hazardului seismic. Perioada de prognoză nu este clar specificată, ea fiind de obicei considerată cu o durată de 10 ani (Holliday et al, 2005).



Figura 9. Indicele *RI*, prag de 0,1, pentru perioada de învățare 1940-1976. Cercurile indică cutremure care au avut loc în perioada 1977-1987, cu magnitudini $M \ge 5,0$. Scala de culori este logaritmică, de la alb la roșu.

Modificări ale metodei *RI* (Nanjo et al., 2011) permit o formulare mai exactă si vor fi implementate in abordări viitoare. Pentru o testare riguroasă a rezultatelor *PI* si *RI* vom introduce un procedeu propus de Molchan (1991), care permite evaluarea obiectivă a unei prognoze (spre exemplu, estimarea câștigului de probabilitate al unei prognoze comparat cu o alegere aleatoare). Vom extinde deasemenea algoritmii *PI* si *RI* luând in considerare, in cazul seismicității subcrustale, diverse niveluri de adâncime.

<u>Comparare cu rezultate folosind parametrul statistic z.</u> In raportul primei faze a proiectului, am prezentat un alt algoritm, bazat pe valorile parametrului statistic z, pentru prognozarea seismicității subcrustale din zona Vrancea. Arătam in cele de mai jos ca rezultatul obținut pentru zona Vrancea cu algoritmii PI si RI este consistent calitativ cu variația parametrului z pentru un interval de timp asemănător.

Parametrul z pentru identificarea schimbărilor ratei de seismicitate (Habermann, 1983) este dat de formula:

$$Z = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$
(5)

unde,

- m_1 și m_2 reprezintă media ratei de cutremure pentru 2 perioade (W_1 și W_2) pe care dorim sa le comparam;
- n_1 , n_2 și σ_1 , σ_2 sunt, respectiv, numerele de cutremure și deviațiile standard pentru cele 2 perioade de timp.

Valorile parametrului z au aceeași interpretare în termeni ai semnificației statistice precum numărul de deviații standard de la valoarea medie pentru o distribuție normală. Astfel, o valoare $|z| \ge 1,96$ arată o semnificație a schimbării ratei seismice de 95%, în timp ce $|z| \ge 2,58$ indică o semnificație statistică cu un nivel de încredere de 99%. O valoare pozitivă a parametrului z reprezintă o seismicitate relativ scăzută în fereastra W_2 comparat cu W_1 , în timp ce o valoare negativă reprezintă o activare a seismicității în fereastra W_2 comparat cu W_1 . Fereastra W_1 este definita de la începutul catalogului pana la momentul de la care începe fereastra W_2 . Fereastra W_2 se extinde de la momentul pentru care se determină parametrul z și are o lungime definită de utilizator (de exemplu, un an de zile, etc...), în funcție de scopul urmărit. Denumim fereastra W_2 fereastră de monitorizare (sau de prognoza).

Legat de semnificația statistică a lui *z*, autori diferiți propun limite mai conservatoare, bazate pe simularea unor cataloage de cutremure aleatorii cu caracteristici asemănătoare cu catalogul real analizat (e.g., Katsumata, 2017 a folosit $/z/ \ge 5,0$). Enescu and Ito (2001) au detectat o perioadă de relativă liniște seismică înainte de cutremurul din anul 1995 din localitatea Kobe (cu magnitudine M=7,3) pe baza unei valori anomale a lui *z* = 10,4.



Figura 10. Numărul cumulativ al cutremurelor ($M \ge 4,0$) subcrustale din zona Vrancea, împreună cu valoarea parametrului *z* în funcție de timp (axa verticala din dreapta, de culoare verde), intre anii 1960 - 1979. Fereastra W_1 se extinde de la începutul perioadei de studiu până la momentul pentru care se determină parametrul *z*, în timp ce fereastra W_2 a fost aleasă de 1,5 ani. Valoarea lui z este calculată folosind un pas al ferestrei de 28 zile. Figura indică valoarea maximă a lui *z* (8,3, obținută pentru anul 1969.6).

Figura 10 arată numărul cumulativ al cutremurelor ($M \ge 4,0$) subcrustale (0 – 220 km) din zona Vrancea, împreună cu valoarea parametrului *z* în funcție de timp, intre anii 1960 - 1979. Se observă că valoarea cea mai semnificativă, pozitivă, a parametrului (*z* = 8,3) este atinsă cu aproximativ 7 ani înainte de 1977. După cum se observă in figură, numărul cumulativ de cutremure ($M \ge 4,0$) are o scădere importantă cu aproximativ 7-8 ani înainte de cutremurul din 4 Martie 1977, de magnitudine M7,4. Parametrul *z* cuantifică această anomalie de seismicitate. Dacă admitem criteriul lui Katsumata (2017) pentru detectarea unei alarme seismice, atunci într-adevăr valoarea de 8,3 a parametrului *z* indică o reducere semnificativă a nivelului seismicității in zona Vrancea. De notat ca existenta unei posibile lacune seismice înaintea cutremurului vrâncean din 4 Martie 1977 a fost raportata de Mârza (1979).

O posibila strategie de lucru viitoare este folosirea indecșilor *PI/RI* pentru conturarea zonei anomale de seismicitate, după care analiza parametrului *z* va fi aplicată la scară locală, pentru a stabili variații pe termen scurt ale seismicității.

3. Concluzii, cu evidențierea a ceea ce s-a realizat din obiectivele propuse

Principalele concluzii ale analizelor desfășurate in cadrul celui de-al doilea an al proiectului pot fi rezumate după cum urmează:

1) Analiza generală a seismicității României intre anii 2000 – 2022 (cel mai recent si mai complet interval de timp din punct de vedere al înregistrării cutremurelor de magnitudine relativ mică din catalogul ROMPLUS, catalog care acoperă tot teritoriul României) a pus in evidentă o activitate mult mai susținută a cutremurelor subcrustale din Vrancea (7 cutremure cu $M \ge 5,0$, inclusiv un cutremur cu M = 6,0) in comparație cu cele crustale (un singur cutremur cu $M \ge 5,0$, in depresiunea Bârladului).

2) Pentru același interval de timp (2000 – 2022), valoarea coeficientului b din relația frecventămagnitudine, pentru cutremurele crustale de pe tot teritoriul României, are o valoare relativ mare in comparație cu valoarea lui b pentru cutremurele de adâncime intermediara din Vrancea. Prin urmare, într-o anumita perioada de timp ne așteptam la un număr relativ redus de cutremure cu magnitudini mari in cazul seismicității crustale din România comparat cu zona de adâncimi intermediare din Vrancea.

3) Studiile din primul an al proiectului au pus in evidentă necesitatea revizuirii catalogului ROMPLUS. Prin urmare, am efectuat analize detaliate in ceea ce privește: a) contaminarea catalogului de cutremure crustale cu explozii seismice (din cariere, etc...) si b) omogenizarea catalogului ROMPLUS in ceea ce privește magnitudinea si localizarea cutremurelor crustale si de adâncime intermediara din Vrancea. Contaminarea catalogului cu explozii a fost investigata folosind trei metode diferite, capabile sa pună in evidenta si discrimineze exploziile de cutremure naturale.

4) Am definitivat un procedeu (si analiza aferentă) care a permis separarea seismicității din zona Vrancea (cutremure crustale si subcrustale) in seismicitate de fond și secvențe seismice. Parametrii necesari acestui algoritm, precum valoarea lui *b*, din relația frecventa-magnitudine a cutremurelor, si dimensiunea fractală, d_f , au fost determinate într-un studiu separat al proiectului (Moldovan et al., 2022). Secvențele seismice pot fi de tip "preșoc-cutremur principal - replici seismice" sau de tip "roi seismic". Această analiză a condus la trei concluzii importante: numărul relativ redus al secvențelor seismice (comparat cu seismicitatea de fond), numărul relativ redus al pre-șocurilor pentru cutremurele din Vrancea (atât pentru cele crustale cat și subcrustale) si lipsa aproape totală a secvențelor care sa penetreze dintr-o zona (crustală sau subcrustală) in cealaltă. Primele doua concluzii au implicații directe in ceea ce privește predictibilitatea cutremurelor, in special bazat pe activitatea de pre-șocuri. Cu toate acestea, analiza prezentă nu exclude posibilitatea înregistrării de pre-șocuri înaintea unor cutremure relativ mari (care nu s-au produs in perioada analizata, 2000 – 2021). Cea de a treia concluzie are implicații de natură tectonica si sugerează o decuplare probabil totală intre segmentul de seismicitate crustal si cel sub-crustal. Apreciem ca acest obiectiv a fost realizat integral.

5) Am analizat catalogul ROMPLUS folosind indecșii de seismicitate *PI/RI*. Am prezentat in acest raport doar rezultate obținute pentru o perioada de prognoza de 5 ani si respectiv 10 ani, care include cutremurul vrâncean major din 4 Martie 1977, magnitudine M7,4. Atât indexul *PI* cat si *RI* indica existenta unei anomalii de seismicitate in zona Vrancea pentru ferestrele de timp 1977 - 1987 (10 ani) si 1977 - 1982 (5 ani). In prezent continuam cu calibrarea metodelor *PI/RI* si interpretarea rezultatelor. Apreciem ca acest obiectiv a fost atins in proporție mare, însă analiza si interpretarea rezultatelor va continua in al treilea an al proiectului.

4. Bibliografie

Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a$ - bM and its confidence limits, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Tokyo University, 43, 237-239.

Armeanu I., Borleanu F., Radulian M., (2022a). Quarry blasts identification in Maramures and Bucovina (Romania) areas using statistical and cross-correlation techniques, *The 3rd European Conference on Earthquake Seismology and Engineering, Bucharest, Romania*, September 4-9, 2022, 4671 - 4677, 2022 (capitol carte).

Armeanu I., Borleanu F., Vărzaru, L., Ghica D., Popa M., (2022b). A reanalysis of the seismic activity at the western edge of the Eastern European Platform, Romanian Journal of Physics (accepted).

Constantinescu, L. and Mârza, V.I., (1980). A computer-compiled and computer-oriented catalogue of Romania's earthquakes during a millennium (AD 984–1979), Rev. Roum. Geophys. 24, 193–234.

Craiu, A., Craiu, M., Diaconescu, M. and Mărmureanu, A., (2013). Seismic swarm recorded in Galati area, Romania: focal mechanism solutions, Acta Geodesica et Geophysica, 52, 53–67, doi:10.1007/s40328-016-0161-9, 2017.

Dinu C., and Răileanu V. and project members (2008). Map with the main fault systems, Romania. *Project CEEX no.* 647/2005.

Enescu B. and Ito, K. (2001). Some premonitory phenomena of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake: seismicity, b-value and fractal dimension, *Tectonophysics*, 338, 3-4, 297-314.

Habermann, R.E., (1983). Teleseismic detection the Aleutian Island Arc., J. Geophys. Res., 88(B6), 5056-5064.

Ghita C, Raicu R, Constantinescu, E.G., Moldovan I.A, (2021). Estimating the magnitude of completeness and spatial variation of seismic b value for Vrancea area (Romania), crustal earthquakes for the last three decades, *SGEM*, 21, 1.1, doi:10.5593/sgem2021/L1/s05.086.

Ghita C., Diaconescu M., Constantinescu E.G., Moldovan I.A., (2022). Analysis of seismicity in north eastern part of Romania for the last three decades, *Proceedings of the 3rd European Conference on Earthquake Seismology and Engineering, Bucharest, Romania*, September 4-9, 2022, 4362 – 4367, Editura Conspress, Bucuresti.

Gutenberg, R. and Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 34, 185-188.

Moldovan I.A., Popescu E., Radulian, M., Enescu B, Plăcinta A.O., Ghita C., Constantin A.P. (2022). Fractal properties of the spatial distribution of crustal and subcrustal Vrancea earthquakes, Romanian Journal of Physics - accepted.

Katsumata, K. (2017). Long-Term Seismic Quiescences and Great Earthquakes and Around the Japan Subduction Zone Between 1975 and 2012, *Pure and Applied Geophysics*, 174(6), 2427-2442.

Molchan GM., (1991). Structure of Optimal Strategies in Earthquake Prediction, *Tectonophysics*, 193, 267-76.

Mârza, V.I., (1979). The March 4, 1977 Vrancea earthquake seismic gap, Bull. Seismol. Soc. Am., 69(1), 289-291.

Moldovan, I.A., Constantin, A.P., Plăcinta, A.O., Toma-Dănila, A., Ghita, C., Moldoveanu, T., Paerele, C.M., (2017). The Rating of Large Romanian Dams into Seismic Risk Classes, Published in Resilient Society - Multidisciplinary contributions from economic, law, policy, engineering, agricultural and life sciences fields, Eds: Ozunu, A., Nistor, I.A., Petrescu, D.C., Burny, P., Petrescu-Mag, R.M., *Les Presses agronomiques de Gembloux, Belgium & Bioflux, Romania*, 121-150.

Holliday, J.R., Nanjo, K.Z., Tiampo, K.F., Rundle, J.B., and Turcotte, D.L., (2005). Earthquake forecasting and its verification, *Nonlin. Processes Geophys.*, 12, 965–977.

Nanjo, K. (2011). Earthquake forecasts for the CSEP Japan experiment based on the RI algorithm. *Earth Planets Space*, 63, 9, doi:10.5047/eps.2011.01.001.

Nanjo, K.Z., Rundle, J.B., Holliday, J.R. and Turcotte, D.L., (2006). Pattern Informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan. *Pure Appl. Geophys.*, 163, 2417–2432, doi:10.1007/s00024-006-0130-2.

Oncescu M.C., Mârza V.I., Rizescu M. and Popa M., (1999). The Romanian earthquake catalogue between 984 – 1997. In: Wenzel F., Lungu D., Novak O. (eds) *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4748-4_4.

Oncescu, M.C., Rizescu, M. and Bonjer, K.P., (1996). SAPS—a completely automated and networked seismological acquisition and processing system, *Comp. Geosci.*, 22, 89–97.

Poiata N., Grecu, B., Radulian, M., Tataru, D., Borleanu, F., Dinescu, R., (2022). Vrancea seismicity through reproducible data-intensive analysis of seismological records, *The 16th Workshop of International Lithosphere Program Task Force Sedimentary Basins & 7th Geoscience*, 6-8 October 2022, București, România (oral presentation).

Poiata N., Radulian, M., Grecu, B., Popa, M., Borleanu, F., and Enescu, B. (2022). Propunerea unei metodologii de procesare a datelor pentru omogenizarea catalogului ROMPLUS, Ședința *AFROS*, Noiembrie 4, 2022 (prezentare orala online).

Radulian, M., Mandrescu, N., Popescu, E., Utale, A. and Panza, G., (2000). Characterization of Romanian seismic zones, *Pure Appl. Geophys.*, 157, 57-77.

Radu, C. (1979). Catalogue of strong earthquakes occurred on the Romanian territory. Part I. —

before 1901; Part II — 1901 -1979, in I. Cornea and C. Radu (eds.), *Seismological Studies on the March* 4, 1977 *Earthquake*, Bucharest, 723–752 (in Romanian).

Tamaribuchi, K., Yagi, Y., Enescu, B. and Hirano, S., Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. *Earth Planets Space*, 70, 90, doi:10.1186/s40623-018-0866-9.

Tiampo, K. F., Rundle, J.B., McGinnis, S., Gross, S.J., and Klein W., (2002). Mean-field threshold systems and phase dynamics: an application to earthquake fault systems, *Europhysics Letters*, 60(3), 481–488.

Tiampo, K.F., Rundle, J.B., Klein, W., and Holliday, J.R. (2006). Forecasting rupture dimension using the pattern informatics technique, *Tectonophysics*, 424, 3–4, 367-376.

Vărzaru L., Borleanu F., (2022). Identifying anthropogenic seismic events generated in western Romania using statistical approaches and novel waveform processing techniques, European Geophysical Union meeting, Vienna, Austria, 23–27 May 2022 (online presentation).

Wiemer, S., (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismol. Res. Lett., 72(3), 373-382, https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373.

Wiemer S., and Baer M., (2000). Mapping and removing quarry blast events from seismicity catalogs, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90(2), 525–530.

Wiemer, S., and M. Wyss (2000). Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 859–869.

Zaliapin, I. and Ben - Zion, Y., (2013). Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 2847-2864.

5. Rezultatele etapei

• Modelarea seismicității crustale și algoritmi de prognoză - raport de cercetare: Activitatea A2.1;

• Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității crustale – raport de cercetare: Activitatea A2.2;

• Creșterea expertizei în analizarea seismicității (inclusiv însușirea unor tehnici ML) a celor 2 doctoranzi – raport de instruire: În timpul celui de-al doilea an de desfășurare a proiectului am organizat 4 seminare online la care au prezentat următorii cercetători:

- Profesor Universitar Ilya Zaliapin, Directorul programului pentru studii post-universitare, statistica si ştiinţa datelor, Departamentul de Matematica si Statistica, Universitatea Nevada, Reno, SUA, Aprilie 6, 2022;
- Dr. Laura Petrescu & Dr. Bogdan Enescu, Institutul National de Fizica Pământului, Noiembrie 4, 2022, 23 Iunie, 2022;
- Dr. Natalia Poiata, Institutul National de Fizica Pământului, Noiembrie 4, 2022;

> Profesor Mircea Radulian, Institutul National de Fizica Pământului, Noiembrie 17, 2022.



Screenshot de la unul din seminariile organizate în cadrul proiectului AFROS (Conferențiar: Prof. Ilya Zaliapin, Universitatea Nevada, Reno, Aprilie 6, 2022)

6. Modul de diseminare a rezultatelor

• Publicare articole:

In timpul celui de-al doilea an de activitate, membrii proiectului au publicat: 3 articole în jurnale cotate ISI si alte 3 articole sunt trimise spre publicare către jurnale ISI (vezi Anexa 6, care cuprinde prezentările si articolele publicate pentru fiecare an al proiectului, pentru detalii).

• Organizarea unei sesiuni speciale la conferința Europeana de Seismologie si Inginerie Civilă "The 3rd European Conference on Earthquake Seismology and Engineering", București, România, Septembrie 4-9, 2022.

• Prezentări conferințe: 16 prezentări în total (vezi Anexa 6 pentru detalii).

• Interviu in mass-media, realizat de fizician Dr. Cristian Presura cu Dr. Bogdan Enescu, in care s-a menționat de activitatea proiectului AFROS.

• Actualizare pagină web (in limbile Română și Engleză): <u>http://afros.infp.ro/</u>

<u>Nota 1:</u> Detalii despre lucrările si prezentările membrilor proiectului au fost încărcate si pe platforma EVoC (însă doar publicațiile/prezentările unde s-a mulțumit explicit proiectului AFROS).

<u>Nota 2:</u> o variantă în Engleză a acestui raport, in format PDF, dar având forma unei prezentări PowerPoint, este disponibilă în Anexa 7.

6 Decembrie 2022

Director Proiect, Enescu Bogdan Dumitru

Bluen