

Contractor: Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Fizica Pamantului
Cod fiscal : 5495458 (anexa la procesul verbal de avizare interna 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 si implementarea de noi instrumente pentru seismologia in timp real si de transfer al produselor si rezultatelor cercetării către potențiali beneficiari.

Faza 5, 2019: Implementarea si testarea sistemului automat de detecție si localizare pentru zona seismica Galați
Termen de încheiere a Fazei: 18.10.2019

1. Obiectivul proiectului:

Principalul obiectiv general al proiectului este dezvoltarea de instrumente ce pot fi folosite în managementul dezastrelor provocate de cutremure în România, în particular în orașele dens populate prin intermediul unor analize și monitorizări complexe.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Vor fi implementate, dezvoltate si aplicate metode si programe noi (avansate) de analiza datelor geofizice (seismologice si geodezice) acumulate la INDFP in vederea îmbunătățirii si eficientizării monitorizării activității seismice, estimării parametrilor surselor seismice si evaluării efectelor cutremurelor asupra structurilor naturale si antropice. Proiectul va aduce o contribuție semnificativă in ceea ce privește accesul la date, la servicii de cercetare, la soluții bazate pe cercetare- dezvoltare inovatoare și la dezvoltarea de e-infrastructuri care sa vizeze reducerea expunerii societății umane, riscului reprezentat de cutremure naturale și antropice.

3. Obiectivul fazei:

Obiectivul principal al fazei consta in adaptarea unor instrumente existente si dezvoltarea unor instrumente noi, necesare construirii unui sistem automat de monitorizare a seismicității in zone active din Romania, cu potențial de funcționare in timp real. Sistemul de monitorizare va genera un catalog automat de evenimente seismice coborând la nivel de micro-seismicitate si va permite

o analiza rapida si detaliata a caracteristicii acestor evenimente. De asemenea, el va furniza informația care in continuare poate fi utilizata la emiterea unei alerte de potențiala activare seismica a zonei. Faza se focusează pe zona seismica Galați ca studiul de caz urmând ca toate dezvoltările sa pot fi generalizate ducând la un sistem universal.

Metodologia va urmări etapele:

a. Instalarea si testarea sistemului de detecție si localizare automata folosind înregistrările continue, bazat pe metoda BackTrackBB (Poiata et al. 2016, 2018) si focusat pe zona seismica Galați.

b. Aplicarea sistemului automat pe date continue disponibile înregistrate in zona Galați si corespunzătoare configurațiilor diferite de rețea locala in vedere evaluării rezoluției si nivelului de detecție si localizare a evenimentelor seismice.

c. Compararea cataloagelor obținute prin aplicarea sistemului automat cu catalogul ROMPLUS si catalogul relocalizărilor manuale cu program JHD (Popa et al., 2016) pentru perioada de roi seismic din 2013.

d. Extinderea sistemului automat de detecție si localizare spre caracterizarea surselor seismice prin dezvoltarea sub-modulelor pentru crearea bazei de date de evenimente seismice similare (de tip „template families”).

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

1. Sistem de detecție si localizare a surselor seismice folosind date continue si particularizat pentru zona Galați.

2. Catalog cu evenimente seismice si caracteristicile lor integrabil in baza de date INCDFP.

5.Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

Implementarea si testarea sistemului automat de detecție si localizare pentru zona seismica Galați

Recentele secvențe de seismicitate crustală din fața zonei Vrancea (e.g., roiul de la Galați din 2013; Fig. 1) a subliniat importanta studiului mai detaliat a hazardului asociat faliilor crustale. Regiunea Galați, având în vedere roiul seismic din 2013, cât și instalarea recentă a stațiilor permanente adiționale (Fig. 1b), reprezintă un studiu de caz important pentru analiza și monitorizarea activității seismice crustale cu potențială legătura cu activitatea antropogenă din aceasta zonă. Schema de detectare și localizarea cutremurelor implementate la INCDFP (programul Antelope- www.brtt.com) are la bază o procedură clasică care presupune (re)citirea manuală a sosirilor undelor seismice de către un utilizator. Această citirea manuală, urmată de o asocierea a fazelor corespunzătoare, poate fi dificilă în cazul activității seismice intense și complexe (Popa et al. 2016).

Obiectivul principal al acestei faze este de a dezvolta un sistem automat de detecție si localizare a surselor seismice particularizat într-o prima etapa pentru zona Galați si bazat pe adaptarea unei metode automate de detecție si localizare BackTrackBB (Poiata et al., 2016; 2018). Spre deosebire de programele clasice de procesare a datelor seismice folosite la detectarea si localizare a cutremurelor, BackTrackBB este un algoritm avansat de detectare si localizare care folosește date continue înregistrate la stațiile seismice si permite reducerea semnificativa a pragului de detecție, precum și izolarea unui număr mai ridicat de semnale seismice. Ținând cont de cantitate semnificativă a datelor seismice înregistrate în zona Galați in timpul roiului seismic din 2013 si instalarea stațiilor noi in zona la sfârșitul anului 2017, în cadrul fazei au fost aplicate metode de analiză specifice în vederea: A) implementării si testării sistemului automat de detectare si localizare a evenimentelor seismice BackTrackBB folosind date continue înregistrate la stații seismice temporare (Fig. 1a) in perioada roiului seismic de la Galați din 2013; B) extinderii algoritmului, si conectării la date seismice continue de la centrul de date INCDFP si testarea lui folosind înregistrările de la stații seismice din rețeaua permanenta locala actuala de la Galați (Fig.

1b), funcțională din cu Noiembrie 2017; C) dezvoltării modului de caracterizare surselor seismice bazat pe analiza similarității formelor de unda și testarea lui pe evenimente înregistrate în timpul roiului de la Galați.

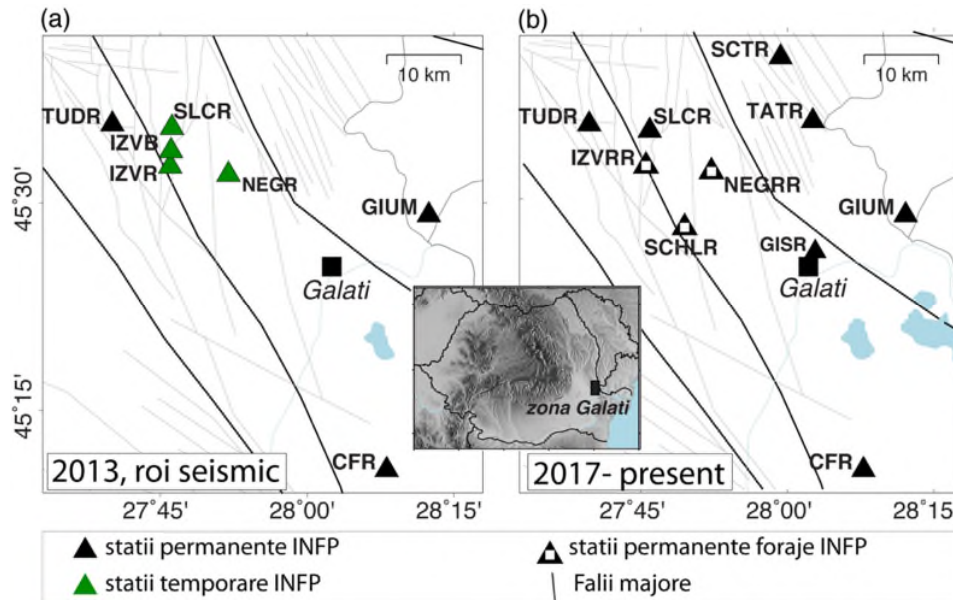


Figura 1. Distribuția stațiilor seismice în zona Galați în perioade diferite de timp. (a) Stații permanente (triunghiuri negri) și temporare (triunghiuri verzi) instalate în perioada roiului. (b) Rețea locală din zona Galați la momentul actual (inclusiv stații seismice instalate în foraje, marcate cu pătrat alb).

A) Implementarea și testarea sistemului automat de detectare și localizare a evenimentelor seismice, bazate pe metoda BackTrackBB, folosind datele seismice înregistrate în timpul roiului seismic de la Galați din 2013.

În prima etapă programul BackTrackBB (bazat pe un set de sub-module scrise în Python și C++) a fost instalat pe o mașină locală la INCDFP. Ilustrarea schematică fluxului de analiză din programul BackTrackBB (după Poiata et al., 2016) este prezentată în Figura 2. După instalarea, s-a efectuat testarea programului pe date seismice corespunzătoare evenimentelor înregistrate în timpul roiului seismic care figurează în catalogul furnizat prin aplicarea metodei JHD (Popa et al., 2016). Acest lucru a permis setarea parametrilor optimi necesari pentru detectarea și localizarea evenimentelor din timpul roiului seismic din 2013 care să permită reproducerea satisfăcătoare a rezultatelor din catalogul JHD, fiind catalog cu evenimente revizuite și re-localizate manual cu o precizie de localizare ridicată.

Secvența seismică (roiul seismic) de la Galați a fost înregistrată pe un set de stații seismice permanente, la care s-au adăugat 4 stații seismice instalate temporar pe o distanță de 20 de km în jurul ariei epicentrale, imediat după momentul declanșării secvenței seismice (Fig. 1a). Acestea au funcționat în regim continuu înregistrând undele seismice pe durata roiului seismic Septembrie – Noiembrie 2013. În a doua etapă programul setat și testat a fost aplicat pentru procesarea automată a înregistrărilor continue achiziționate în timpul roiului (Fig. 1a). Aceasta etapă a evidențiat necesitatea incorporării unui modul adițional de pre-procesare a datelor care să permită efectuarea controlului de calitate a datelor de la canalele seismice selecționate pentru analiza automată. Modulul corespunzător, având scopul principal inspectarea continuității datelor în fluxul continuu de date și acoperirea golurilor (date absente) unde acest lucru este posibil. În general s-au acoperit prin interpolare goluri mici de date care nu depășeau 1-5 minute. Modulul corespunzător a fost incorporat în schema automată de detectare și localizare după cum este ilustrat în Figura 2.

Incorporarea modului a permis funcționarea corectă a programului, permițând o analiză în întregime automată a datelor continue.

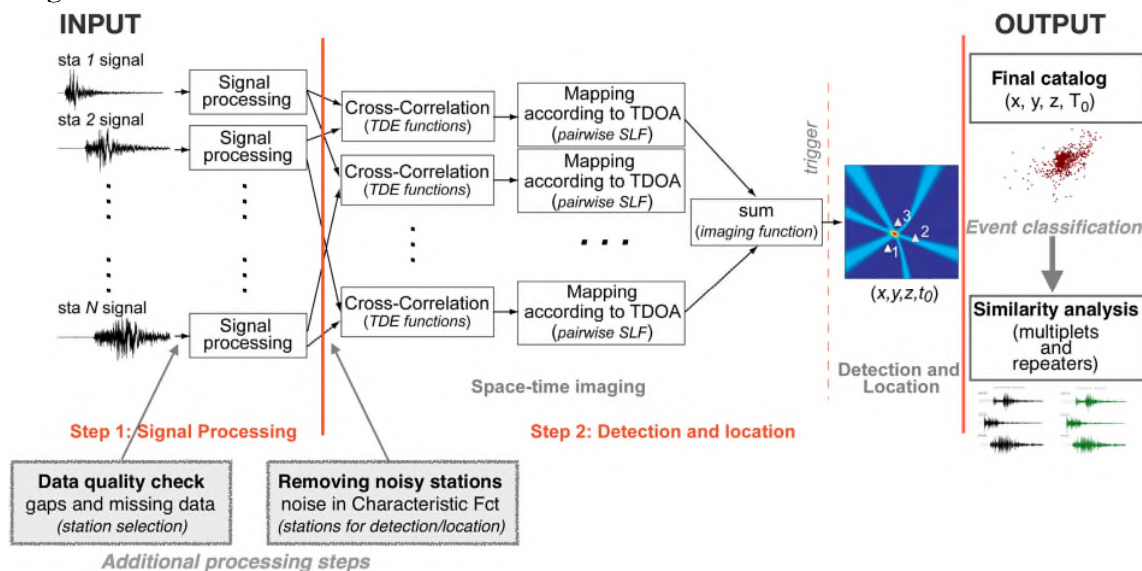


Figura 2. Prezentarea schematică a sistemului de detecție și localizare a evenimentelor seismice bazată pe metoda BackTrackBB (Poiana et al., 2016; 2018).

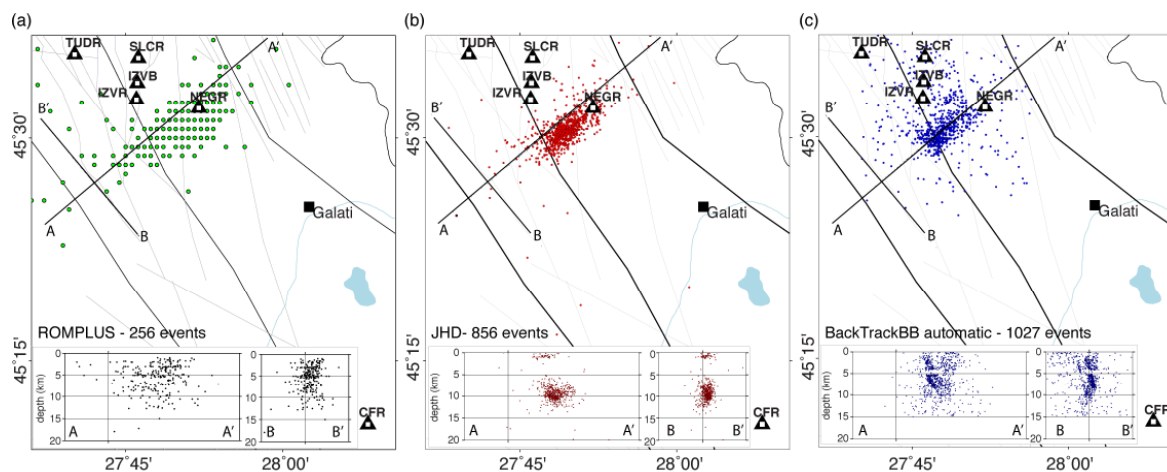


Figura 3. Compararea localizărilor evenimentelor seismice în timpul roiului de la Galați în 2013 corespunzătoare catalogului (a) ROMPLUS; (b) JHD (Popa et al., 2016); (c) automat BackTrackBB.

Rezultate obținute și comparația lor cu cataloagele ROMPLUS și JHD (Fig. 3) ilustrează numărul semnificativ mai mare de evenimente detectate de BackTrackBB (1027 față de 856-JHD și 256-ROMPLUS). În același timp, precizia localizărilor furnizată de analiza automată este comparabilă cu cea a catalogului re-localizat manual (Figurile 3b și 3c). De aici se desprinde și principalul avantaj al metodei: caracterizarea rapidă și precisă a seismicității, cu precădere în palierul –seismelor mici. Limitarea metodei o regăsim în lipsa constrângerii precise a adâncimii (se utilizează doar sosirile undei P și un model de viteze local).

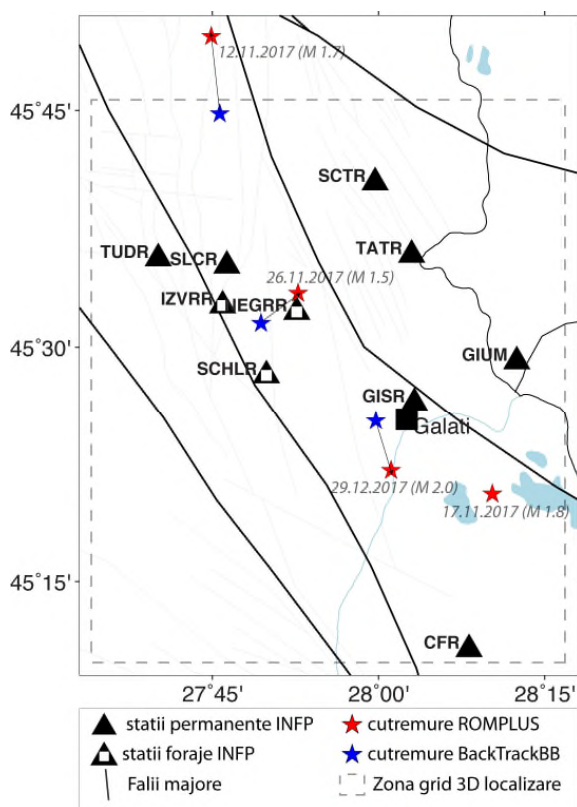
B) Aplicare algoritmului pentru analiza datelor seismice continue de la stații din rețeaua permanentă locală de la Galați actuală

Module suplimentare dezvoltate în jurul programului BackTrackBB și fișiere de configurare implementate și testate în etapa anterioară constituie un sistem automat care în etapele următoare

poate fi aplicat datelor seismice de la Galați înregistrate după încetarea roiului seismic din 2013. Din Noiembrie 2017 rețeaua seismică locală din zona a fost suplimentată cu stații noi (incluzând stații în foraje) ajungând la 10 stații care acoperă o zonă de 20-30 km în jurul ariei sursă de roi seismic din 2013 (Fig. 1b și 4). Aceasta densificarea rețelei oferă o mai bună acoperire a zonei de interes și, prin urmare, o posibilitate de monitorizare mai detaliată a seismicității. În această etapă au fost folosite date continue de la cele 10 stații din zona Galați pentru a testa sistemul automat în cazul condițiilor actuale de funcționare a rețelei și a activității seismice în zonă.

Au fost folosite componente verticale a înregistrărilor continue achiziționate în primele două luni de la momentul instalării ultimilor stații seismice în zonă (Fig. 4), respectiv Noiembrie-Decembrie 2017. S-a urmărit procesarea automată a celor 2 luni de date, analizând influența calității înregistrărilor și geometriei rețelei asupra rezultatului final, și compararea localizărilor evenimentelor detectate cu cele din catalogul ROMPLUS. În total în perioada analizată în catalogul ROMPLUS apar 4 evenimente corespunzătoare zonei de interes cu magnitudini M_w 1.5-2.0 (Fig. 4).

Figura 4. Evenimente seismice din zona Galați, din în perioada Noiembrie-Decembrie 2017. Comparatia între locatiile din catalog ROMPLUS (stele rosii) și localizarea automată (stele albastre).



Rezultatele testului, aplicând algoritmul automat celor 2 luni de date înregistrate la 10 stații seismice din zona este prezentat în Figura 4. Algoritmul nu a detectat evenimente suplimentare și din 4 evenimente a detectat și localizat 3 cutremure cu epicentre mai apropiate de zona bine instrumentată. Evenimentul din 17.11.2017 nu a fost localizat datorită faptului că a avut locație în zona cu acoperirea redusă cu stații seismice și, în general, s-a constatat un nivel de zgomot ridicat la stația apropiată GIUM care a mascat înregistrarea evenimentului. Celelalte cutremure au fost detectate și localizate cu o precizie bună. Testul, de asemenea, a subliniat faptul că înregistrările la unele dintre stații au perioade în care sunt puternic afectate de zgomot. Acest lucru poate duce la ratarea anumitor detecții. Pentru a depăși această problemă a fost activat un modul suplimentar în sistemul automat de detecție și localizare care permite înlăturarea din procesul de localizare a stațiilor cu nivel ridicat de zgomot în funcții caracteristice (Fig. 2). În același timp rezultatele testelor influenței selecției stațiilor folosite în procesul de localizare asupra calității locației finale obținute a arătat că într-adevăr, înlăturarea stațiilor zgomotoase crește calitatea localizărilor (Fig. 5 b și c), și având în vedere configurarea rețelei, stațiile CFR și GISR nu aduc un aport semnificativ

la îmbunătățirea rezultatelor (Fig. 5a). Dimpotrivă, utilizarea lor poate duce la faptul ca evenimente cu magnitudini mic s-ar putea sa fie omise (Fig. 5a). Având in vedere aceste concluzii s-a hotărât ca pentru procesarea datelor înregistrate in zona Galați de rețeaua seismică actuala sa se folosească configurația de rețea locală prezentată in Figura 5b. astfel setat (Fig. 2), modulul automat este aplicat procesării înregistrărilor de la începutul anului 2018 pana in prezent.

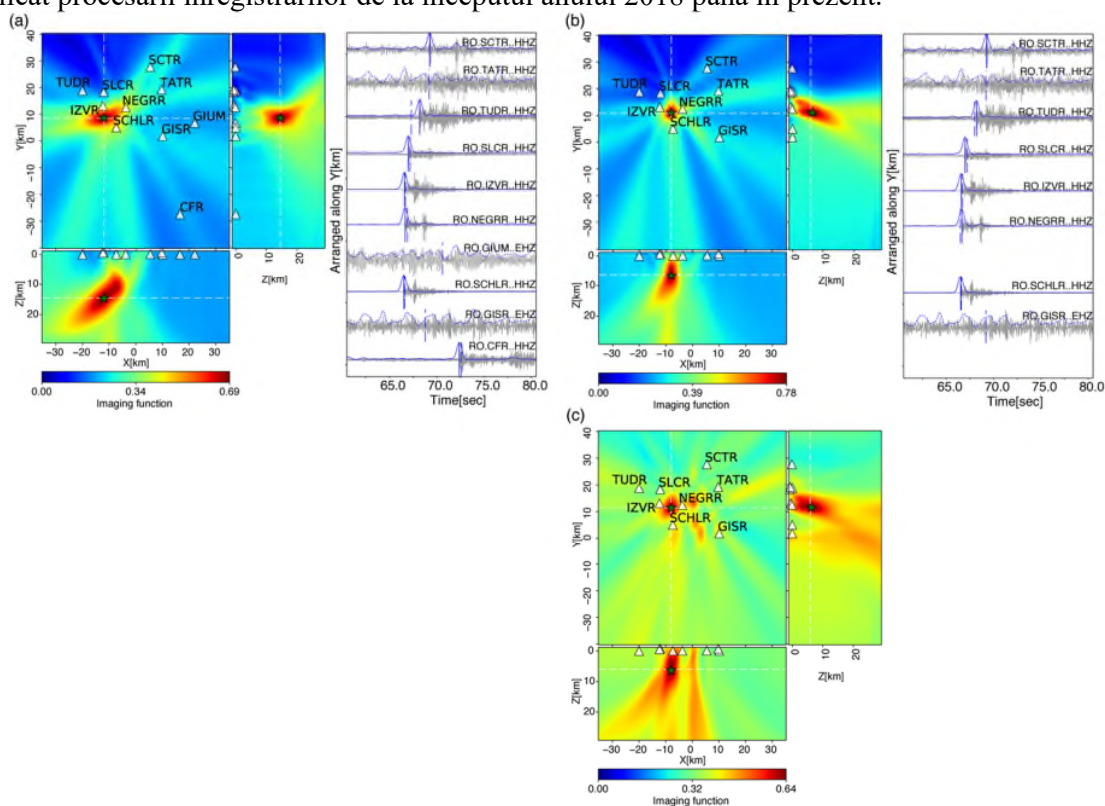


Figura 5. Cutremurul din 26.11.2017 ($M_w 1.5$) localizat cu sistem automat folosind rețeaua seismică locală. (a) Localizarea folosind 10 stații și excluzând stații cu raport SNR scăzut la funcții caracteristice (FC; linii albastre întrerupte). (b) Localizarea folosind 8 stații apropiate de zona Izvoare și excluzând, stații zgomotoase. (c) Localizarea folosind toate 8 stații apropiate.

C) Caracterizare surselor seismice bazat pe analiza similarității formelor de unda și testarea lui pe evenimente înregistrate în timpul roiului de la Galați.

Studiul similarității formelor de unde înregistrate la stații seismice reprezintă o metoda uzuala de caracterizare evenimentelor seismice și grupării lor în familii de evenimente similare care pot oferi informația despre proprietățile mecanice din zone de falie. Pentru determinarea gradului de similaritate evenimentelor seismice detectate în timpul roiului seismic a fost dezvoltat, în limbaj de programare Python, programul de calcul coeficienților de corelare ai formelor de undă (înregistrate de o stație seismică cu 3 componente) având la baza modulul XCORR de Holland et al. (2003). Acest program, permite atât caracterizarea evenimentelor seismice existente pe baza formelor de unde înregistrate, cât și procesare (în viitor) datelor continue în vederea creșterii numărului evenimentelor mici detectate. În aceasta etapa programul de corelare a fost aplicat analizei evenimentelor detectate în timpul roiului seismic de la Galați din 2013, înregistrate la stația TUDR. Prin analiza coeficienților de corelare (CC) am putut determina familii de evenimente seismice din catalogul JHD (Popa et al., 2016). O familie fiind definită ca un grup de evenimente cu formele de unda având $CC > 0.9$. În cazul cutremurelor din roiul seismic de la Galați am putut identifica 23 familii de evenimente.

Pentru a depăși dependența coeficienților de corelare de selecția benzii de frecvență folosite pentru filtrarea înregistrărilor, a fost de asemenea investigată eficiența folosirii coerenței (Uchida și Burgman, 2019; măsurii similarității în domeniul spectral) pentru a determina banda de

frecvente optima, in care similaritatea formelor de unde este maxima. Aceasta abordare ar permite o clasificare si grupare mai detaliata a evenimentelor in: evenimente similare, evenimente multiple si evenimente repetitive. Figura 6 ilustreaza un astfel de exemplu de doua evenimente similare (Fig. 6a) si 2 evenimente repetitive – pentru care forme de unde înregistrate la stația TUDR sunt similare într-o banda larga de frecventa (1-30 Hz).

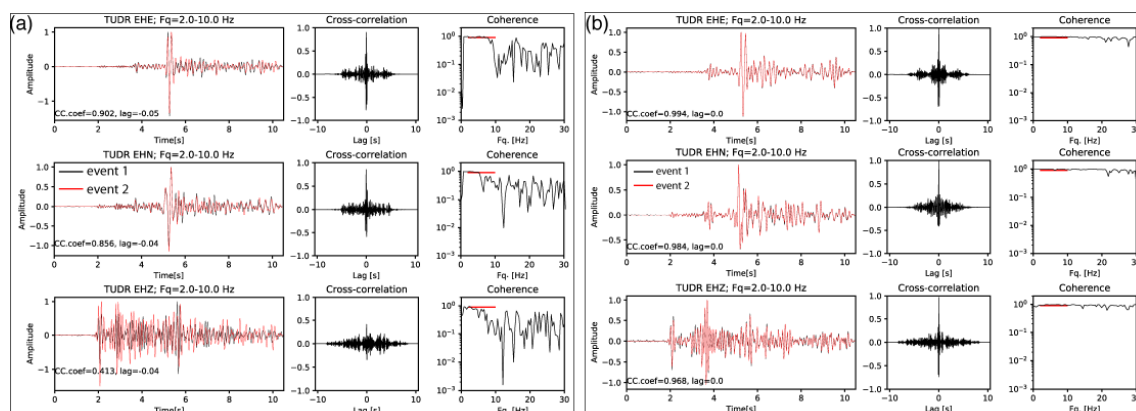


Figura 6. Exemplu cutremurelor similare de tip (a) evenimente multiple; (b) evenimente repetitive pentru 4 evenimente selectate din familii de cutremure din timpul roiului din 2013. Sunt prezentate 3 componente înregistrate la stația TUDR si funcțiile de cross-corelare si coerenta.

Bibliografie

- Holland, A. A., 2013, Earthquakes Triggered by Hydraulic Fracturing in South-Central Oklahoma: Bull. Seismol. Soc. Am., v. 103, no. 3, p. 1784-1792.
- Poiata N., Satriano C., Bernard P., Vilotte J.-P., Obara. K., (2016). Multi-band array backprojection method for detection and location of seismic sources recorded by dense seismic networks, Geophys. J. Int, 205(3).
- Poiata, N., J.-P., Vilotte, P., Bernard, C., Satriano, and K. Obara (2018). Imaging different components of a tectonic tremor sequence in southwestern Japan using an automatic statistical detection and location method, Geophys. J. Int., 213(3), 2193–2213.
- Popa M., Oros, E., Dinu, C., Radulian, M., Borleanu, F., Rogozea, M., Munteanu, I. and Neagoe, C., (2016). The 2013 Earthquake Swarm in the Galati Area: First Results for a Seismotectonic Interpretation. In “The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt”. Springer International Publishing, 253-265.
- Uchida, N. and Burgman, R., (2019). Repeating Earthquakes. Annu. Rev. *Earth Planet. Sci.* 47(1), 305-332.

6.Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului (se vor preciza stadiul de implementare a proiectului, gradul de indeplinire a obiectivului cu referire la tintele stabilite si indicatorii asociați pentru monitorizare si evaluare).

Rezultate

1. A fost instalat si testat programul de detecție si localizare BackTrackBB folosind date înregistrate in zona seismica Galați in timpul roiului seismic din 2013.
2. Au fost dezvoltate si integrate in pachetul existent de program BackTrackBB module suplimentare de controlul calității datelor si selectarea stațiilor după criteriul de zgomot. Aceste implementări si fișiere de configurare au constituit un sistem automat de detecție si localizare destinat monitorizării seismicității din zona Galați.
3. Sistemul a fost aplicat unei perioade inițiale (2 luni) de funcționare a rețelei seismice actuale din zona Galați.

4. Sistemul a fost extins cu module pentru caracterizare evenimentelor seismice pe baza de similaritate formelor de unda.
5. Catalogul cutremurelor furnizat la finalul fazei cuprinde perioada roiului seismic din 2013 si Noiembrie-Decembrie 2017. Conținând informația despre poziția si timpul producerii evenimentului si clasificarea in familii de evenimente similare.

Stadiul realizării obiectivului fazei

Prin rezultatele prezentate referitoare la implementarea si testarea sistemului automat de detecție si localizare a activității seismice din zona Galați consideram ca **obiectivele fazei au fost îndeplinite** si ca **angajamentele asumate au fost atinse**, iar proiectul a atins gradul de implementare scontat pentru aceasta faza.

Propuneri pentru continuarea proiectului:

In această etapă, **obiectivul a fost îndeplinit integral iar rezultatele obținute sunt in concordanta cu țintele propuse** venind in sprijinul implementării proiectului.

Viitoare studii vor urmări extinderea catalogului seismic din zona Galați pana la data actuala si dezvoltarea capacitații de analiza in timp real al sistemului. De asemenea, algoritmul dezvoltat va fi aplicat pentru zona Vrancea. Rezultatele obținute in acesta faza au fost prezentate la conferințe stiințifice internaționale . O publicație prezentând rezultatele fazei est in proces de pregătire.

Rezultatele obtinute in aceasta faza au fost prezentate la:

- **10th Congress of Balkan Geophysical Society**, Albena, Bulgaria: 18-22 .09.2019, Sectiunea 2.2 (orala): Physics of Earthquakes and Seismic Sources: N. Poiata, D. Tataru, B. Grecu (2019). *Seismicity in Galati region, romania: from 2013 seismic swarm to the monitoring of present-day seismic activity.*

Deplasari efectuate in cadrul fazei:

- **2019 EPOS Seismology Workshop, ORFEUS Annual Meeting & EMSC GA**; Grenoble, France, 7-10 October. A. Marmureanu, Prezentare: *Infrastructure, services and products of selected European datacentres: NIEP.*
- **XIV INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL WORKSHOP**, Chisinau, Moldova, 09-13 September 2019. Gh. Marmureanu, I. S. Bircia, A. Marmureanu, C. O. Cioflan, I. Ilies, G. M. Craiu, I. Stoian Gh. Marmureanu, prezentare: *The paradox of larger peak ground accelerations in extra-Carpathian area than in epicenter.*
- **XIV INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL WORKSHOP**, Chisinau, Moldova, 09-13 September 2019. B. Grecu. A. Danet, L. Manea, D. Toma, A. Tiganescu, A. Constantin, C. Neagoe, C. Ionescu, Prezentare: *New ShakeMap implementation for Romania and neighboring countries.*
- **2019 EPOS WP10 Final Workshop and EPOS IP Final Event: Implementation Phase Council Meeting**, EPOS Services for Solid Earth Science, EPOS practical solutions to Data Interoperability & FAIRness, Madrid, Spania; 24-28 Septembrie. Participant: A. Muntean.
- Workshop: **Interactii intre produsele de cercetare furnizate de serviciile tematice nationale si europene**, Praga, Cehia; Participant: L. Manea.

Responsabil Faza

Dr. Natalia Poiata

N. Poiata


Responsabil Proiect

Dr. Alexandru Marmureanu