

Contractor: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului
Cod fiscal: 5495459 (anexa la procesul verbal de avizare interna nr.)

De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr. Ing. Constantin Ionescu

Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Prof. Dr. Gheorghe Mărmureanu

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr: 21N/2016

Proiectul: Cercetări inovative privind caracterizarea seismicității naturale și antropice utilizând date și tehnici multidisciplinare (PN 16 35 03 02)

Faza: 2. Integrarea fluxului detecție, localizare și caracterizarea într-un sistem mobil pentru situații de criza și monitorizare ‘la cerere’ a activității seismice.

Termen: 16.10.2017

1. Obiectivele proiectului

Proiectul are următoarele **obiective generale:**

- furnizarea unui algoritm eficient pentru detectarea și localizarea surselor seismice folosind seturi de date continue achiziționate de la stațiile seismice permanente și temporare, aplicabil la analiza off-line a seismicității pentru diferite contexte tectonice și antropogene;
- Integrarea fluxului detecție, localizare și caracterizare într-un sistem mobil pentru situații de criza și monitorizare a activității seismice.

Obiectivele specifice sunt:

- Dezvoltarea unui algoritm eficient, de înaltă precizie, pentru detectarea și localizare surselor seismice;
- Crearea bazei de date și actualizarea cu evenimente seismice, informații specifice geologice și geofizice;
- Controlul calității și integrității înregistrărilor - o componenta a fluxului de procesare automată;
- Aplicarea metodologiei propuse pe studiul de caz selectat;

- Compararea rezultatelor obținute cu cele generate prin tehnici de procesare rutiniera, evaluarea comparativă a performanțelor.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivelor

Pentru atingerea obiectivelor proiectului avem în vedere obținerea următoarelor rezultate:

- Realizarea unei baze de date cu înregistrări continue și parametrii specifici evenimentelor seismice, structurată pe episoade off-line;
- Algoritm particularizat pe caz de studiu, pentru detectarea și localizarea surselor seismice folosind seturi de date continue provenite de la stațiile seismice permanente și temporare;
- Analiza unor configurații teoretice de rețele seismice temporare și estimarea impactului acestora în capacitatea de detectabilitate, precizia localizării seismelor și nivelul erorilor asociate ;
- Aplicarea metodologiei propuse pe studiul de caz selectat

3. Obiectivul fazei

Testarea capabilităților algoritmului utilizat pentru detectarea și localizarea surselor seismice folosind seturi de date continue achiziționate la stațiile seismice permanente și temporare, aplicabil la analiza off-line a seismicității în diferite contexte tectonice și antropogene și integrarea fluxului detecție, localizare și caracterizare într-un sistem mobil pentru situații de criză și monitorizare ‘la cerere’ a activității seismice;

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei

- Actualizarea bazei de date cu documente tehnice, informații geologice, înregistrări seismice continue și localizările asociate structurate pe episoade;
- Planificarea și configurarea instalării rețelelor mobile în funcție de cazul de studiu;
- Aplicarea metodologiei propuse pe studiile de caz selectat;

5. Rezumatul fazei

Obiectivul principal al acestei etape este de a furniza un algoritm eficient pentru detectarea și localizarea surselor seismice folosind seturi de date continue provenite de la stațiile seismice permanente și temporare, aplicabil la analiza off-line a seismicității în diferite contexte tectonice și antropogene, în special pentru zonele cu seismicitate complexă. Sistemul de detecție și localizare bazat pe analiza selectivă a semnalului în benzi multiple de frecvență a formelor de unda continue (Poiata et.al, 2015) a fost particularizat și testat pe baza unui studiu de caz. Spre deosebire de programele rutiniera de procesare a datelor seismice s-a dovedit că o metodologie, care are la bază un astfel de algoritm avansat, a permis reducerea semnificativa a pragului de detecție, precum și izolarea mult mai multor semnale seismice.

Într-o prima sub-activitate s-a completat baza de date, constituită în prima fază a proiectului, cu informații geologice pentru zona de studiu considerată (zona Galați) precum și actualizarea cu înregistrări continue și evenimente seismice până în luna octombrie 2017 (Figura 1). S-a folosit o suită de programe bazate pe pachetul opensource ObsPy (Beyreuther et al., 2010), integrate în fluxul de procesare.

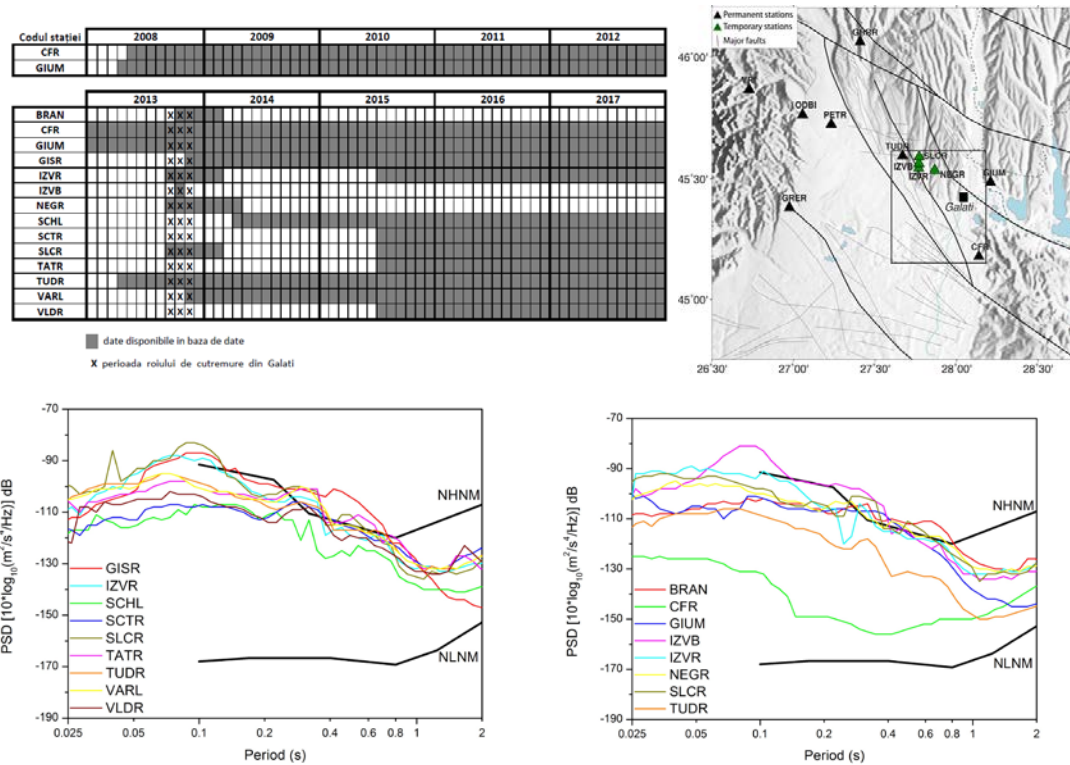


Figura 1 Datele și stațiile utilizate și disponibilitatea lor în baza de date finală. Nivelul de zgomot la stațiile instalate temporar sau existente în zona selectată în jurul ariei epicentrale, înainte și după perioada roiului de cutremure de la Galați.

S-au menținut condițiile minime de utilizare, datele de intrare care nu le întrunesc, sunt excluse din analiză, nu înainte ca detalii despre cauza și eșantioanele eliminate să fie salvate în log-uri pentru analiza ulterioară.

Informațiile geologice și geofizice provin din foraje efectuate în noile amplasamente ale stațiilor seismice (coloane litologice), din măsurători seismice active realizate în perimetrul analizat precum și studii specifice (ex: analiza Wadati).

Principalele informații geofizice care s-au obținut prin măsurători seismice active au fost structura de viteze pentru unde S precum și un parametru foarte important în analizele de hazard seismic, și anume viteza undelor de forfecare în primii 30 de metri (V_{S30}). Acesta din urmă este folosită în codul european (EC8) de proiectare antisismică pentru clasificarea amplasamentelor în funcție de tipul de sol. Măsurătorile seismice active au constat în înregistrarea undelor de suprafață (unde Rayleigh) generate de o sursă activă verticală (ciocan de 7 kg) de către un seismometru cu 3 componente situat la o distanță fixă de sursă. Adâncimea până la care se pot obține informații de încredere despre

structura de viteze depinde de distanța dintre sursă și seismometru, fiind în general egală cu 2/3 din lungimea profilului.

Determinarea structurii de viteze și calculul V_{S30} s-a realizat în trei etape principale. În prima etapă, s-a obținut spectrul de viteze prin transformarea înregistrării obținută pe teren din domeniul timp în domeniul frecvență-viteză. În cea de-a doua etapă, s-a stabilit modelul inițial pentru inversie prin alegerea unui model al cărui spectru de viteze să fie asemănător cu cel observat. Cea de-a treia etapă a avut la bază o procedură de inversie care urmărește minimizarea diferențelor dintre spectrul de viteze observat și cel calculat prin modificarea iterativă a parametrilor modelului inițial. În final s-au obținut pentru fiecare stație profilul de viteze și parametrul V_{S30} .

Figura 2 exemplifică procedura de obținere a structurii de viteze și a parametrului V_{S30} pentru stația Vlădeasa (VLDR), iar în tabelul 1 sunt prezentate valorile V_{S30} obținute pentru toate stațiile și tipul de sol asociat fiecărui amplasament.

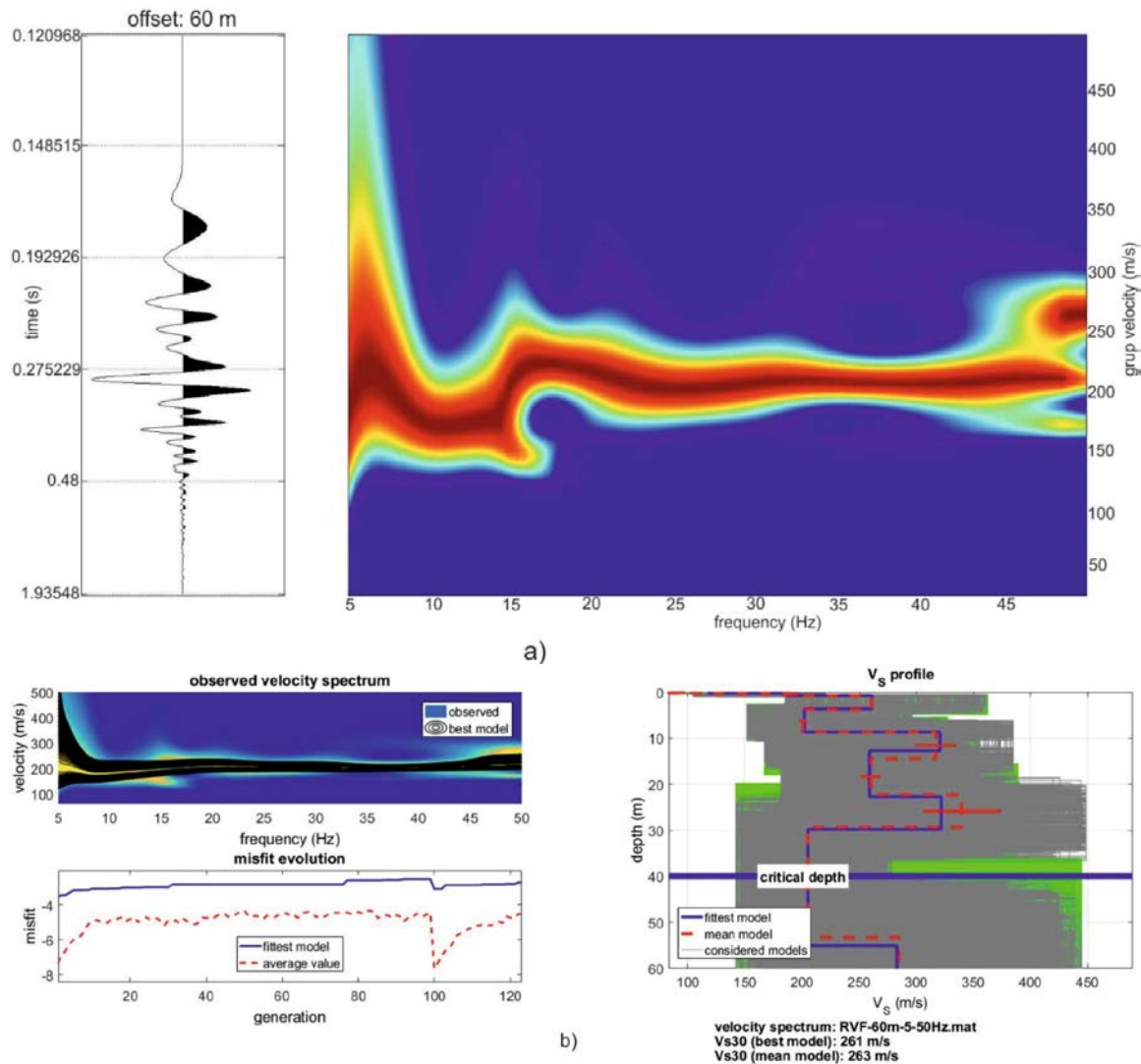


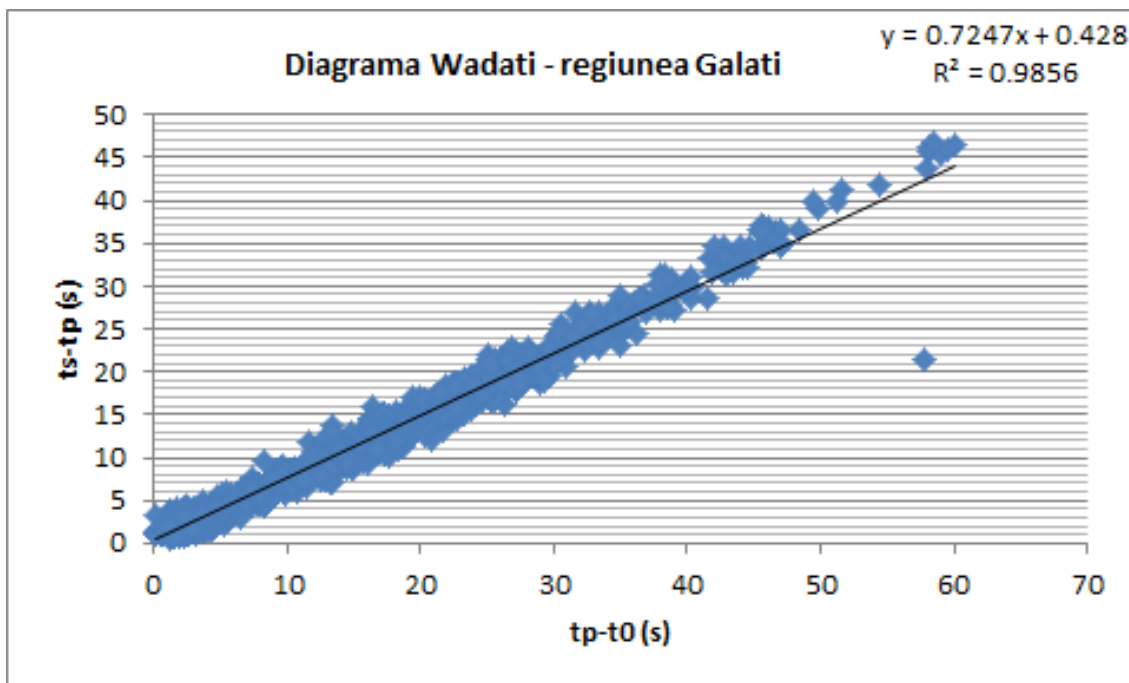
Figura 2a - Componenta radială a undei Rayleigh obținută în teren la stația VLDR și spectrul de viteze observat; b - Rezultatele obținute în urma inversiei (stânga sus – potrivirea dintre spectrul de viteze observat și spectrul de viteze obținut pentru cel mai bun model, stânga jos – evoluția diferențelor în etapa

de inversie, dreapta – poșilele de viteze pentru cel mai bun model (albastru) și modelul mediu (roșu) precum și valorile V_{s30} corespunzătoare)

Tabelul1 Clasificarea amplasamentelor stațiilor în funcție de valoarea V_{s30} calculată

Statie	V_{s30} calculat (m/s)	V_{s30} (m/s) (EC 8)	Clasificarea solului (EC 8)
CFR	458	360 - 800	B
IZVR	233	180 - 360	C
SCHL	239	180 - 360	C
SCTR	207	180 - 360	C
TATR	267	180 - 360	C
TUDR	239	180 - 360	C
VLDR	282	180 - 360	C

Diagramele Wadati se obțin printr-o regresie liniară între diferențele timpilor de sosire ai undelor P și S și timpul de sosire al undelor P și furnizează informații importante privind mediul de propagare și sursa seismică. Panta (ecuația) determinată în urma regresiei oferă informații cu privire la raportul V_p/V_s al mediului de propagare, iar intersecția cu abscisa este un indicator al corecțiilor de timp ce trebuie aplicate timpilor de sosire ai undelor la o anumită stație.



Pentru calculul V_p/V_s s-au folosit 433 evenimente și 4120 perechi de citiri ale timpilor de sosire ai undelor P și S. Din panta (ecuația) obținută în diagrama Wadati a rezultat un raport $V_p/V_s = 1,72$ și un factor de corelație de 98%. Punctele care nu se înscriu pe dreapta pantei corespund unor timpi de sosire cu erori asociate mari. Aceste erori se pot datora și/sau semnala instalări/operări deficitare a stațiilor sau citiri imprecise ale timpilor de sosire respectiv identificări necorespunzătoare ale fazelor seismice de către operator. Cel mai important aspect dezvăluit sunt erorile sistematice care se pot datora și dezvălui totodată efecte locale ce caracterizează amplasamentul stației, și care pot fi corectate prin calculul unor corecții aplicate ulterior timpilor de sosire.

Într-o a doua sub-activitate s-au testat diferite configurații teoretice de rețele mobile, de instalat într-o zonă de studiu, cu scopul de a compara influența pe care o au asupra capacității de localizare a evenimentelor seismice și preciziei obținute. Proiectare teoretică a rețelei seismice mobile, pentru un experiment temporar, depinde de condițiile locale și disponibilitatea materialelor, precum și de natura studiului de caz considerat. În scopul facilitării instalării stațiilor mobile în teren și asigurării obținerii celor mai bune rezultate (date de înalta calitate, îmbunătățirea localizării evenimentelor seismice) au fost testate diferite configurații privind geometria stațiilor. Abordată doar la nivel teoretic, metodologia urmează a fi adaptată pentru fiecare studiu de caz, selectându-se configurația care produce cele mai bune rezultate în ceea ce privește răspunsul rețelei și capacitatea estimată de detecție. Se are în vedere o configurație de rezervă în cazul în care condițiile locale din teren impun modificări ale pozițiilor inițiale ale stațiilor.

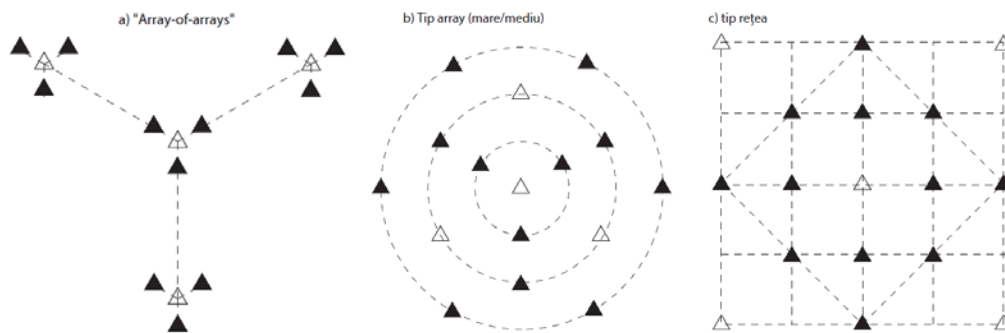


Fig 3 - configurații teoretice ale unei rețele de stații mobile ce se pot propune pentru zona de studiu

După testarea răspunsului unor rețele teoretice, s-a trecut la estimarea răspunsului rețelei de monitorizare existente în zona investigată, la care s-au adăugat/variat diferite elemente (stații, în funcție de disponibilitatea lor la diferite momente în timp: e.g., în timpul roiului, după și în viitor; sursele seismice punctuale amplasate atât în interiorul rețelei de stații cât și în afara acesteia).

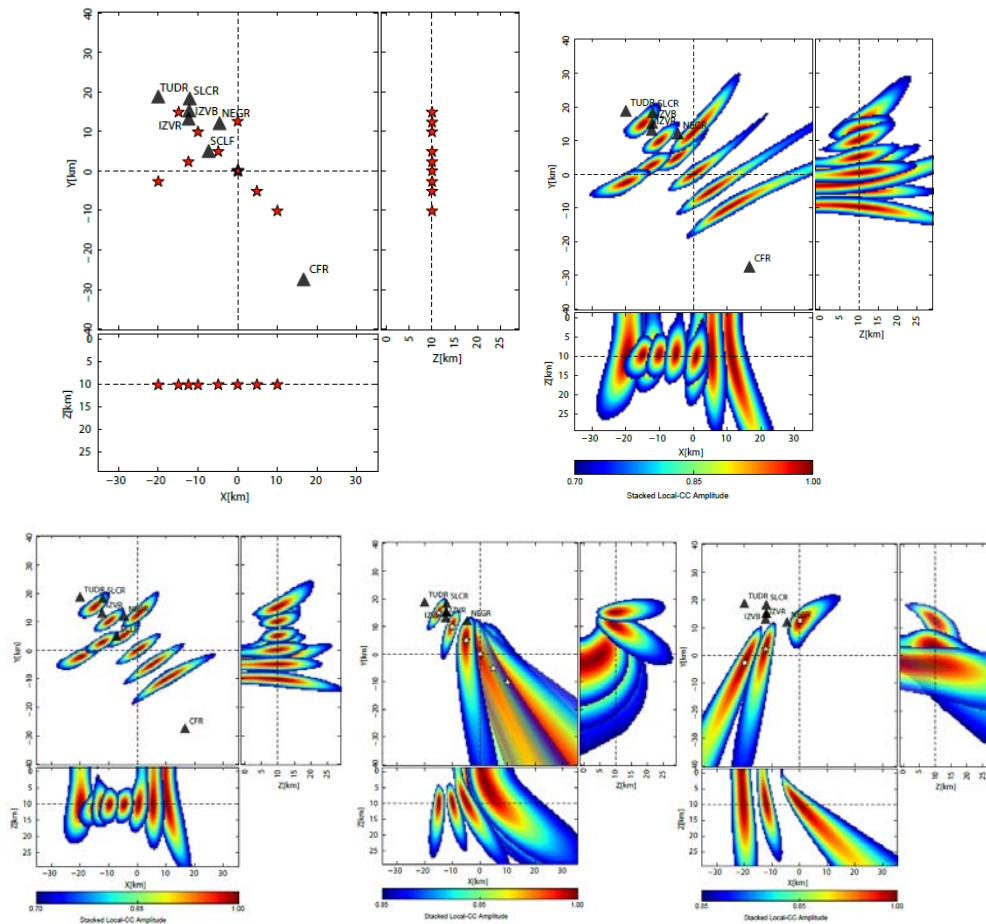


Fig 4. Simularea răspunsului rețelei pentru diferite localizări ale surselor seismice (stelute roșii). Precizia localizărilor poate fi estimată prin analiza comparativă a elipsei erorilor.

O altă consecință a lipsei unui istoric al monitorizării zonelor cu seismicitate complexă este slaba constrângere a seismicității zonei. Ce se poate face în acest sens, folosind metodele moderne de procesare și analiză a semnalului, este să se compare forme de undă ale unor înregistrări mai vechi, de la o stație din zona de studiu, cu forme de undă înregistrate la aceeași stație în timpul roiului seismic. Prin analiza coeficientului de corelare putem estima că evenimentul înregistrat în trecut și imposibil de localizat din lipsă de stații seismice, s-a produs în aceeași zonă cu cel a cărui formă de undă se potrivește. Tehnica se numește “template matching” este utilizată cu succes în multe zone de pe glob și poate fi inclusă într-un flux automat de procesare.

În studiul nostru am folosit în comparație înregistrări de la stația Carcaliu din anul 2009, respectiv 2013. Am păstrat în analiză doar acele înregistrări la care coeficientul de corelare >0.75 .

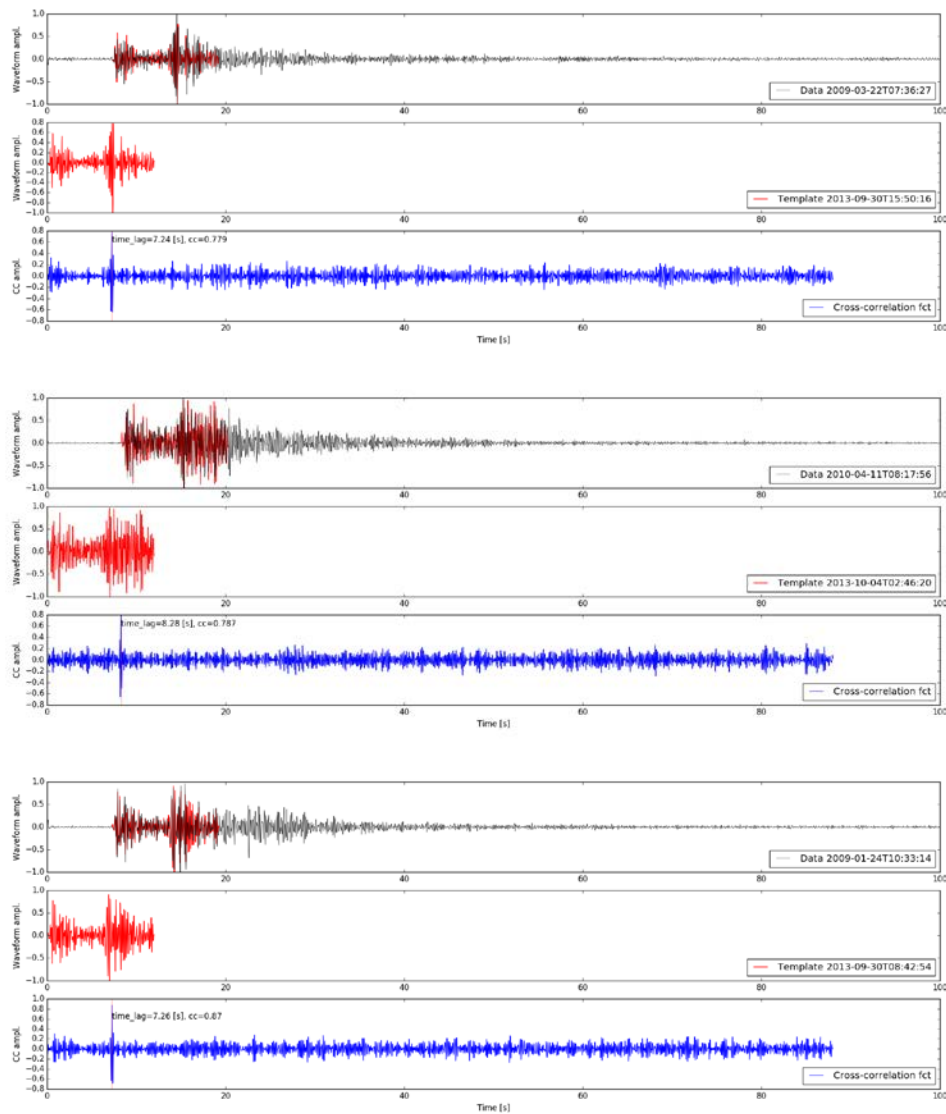


Fig.5 Analiza de corelare a semnalului înregistrat la stația seismică Carcaliu (CFR) pentru 3 perechi de evenimente înregistrate în 2009 respectiv 2013

Referințe

- Beyreuther, Moritz, et al. "ObsPy: A Python toolbox for seismology." *Seismological Research Letters* 81.3 (2010): 530-533.
- Cesca, S. & Grigoli, F., 2015. Full Waveforms Seismological Advances for Microseismic Monitoring. *Advances in Geophysics*, DOI:<http://doi.org/10.1016/bs.agph.2014.12.002>.
- Geiger, L., Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only (translated from German), *Bull. St Louis Univ.*, vol. 8, pp 56–71, 2015.
- Kao, H. & Shan, S.-J., The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space, *Geophys. J. Int.*, 157(2), pp 589–594, 2004.
- Lomax, A., A reanalysis of the hypocentral location and related observations for the Great 1906 California Earthquake, *Bull. seism. Soc. Am.*, vol. 95, pp 861–877, 2005.
- Poiata, N., C. Satriano, P. Bernard, J.-P. Vilotte, & K. Obara. 2015. Multi-band array backprojection method for detection and location of seismic sources recorded by dense seismic networks, *Geophys. J. Int.*, 2015

- Popa, Mihaela, et al. "The 2013 Earthquake Swarm in the Galati Area: First Results for a Seismotectonic Interpretation." *The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt*. Springer International Publishing, 2016. 253-265.
- Tataru, D., N. Poiata, B. Grecu, M. Radulian, and M. Popa (2016). Characterization of seismic sources using large seismic datasets - Galati pilot area, 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM), Albena, Bulgaria, Vol.III, pp. 411-418.
- Wadati, K. On the travel time of earthquake waves, Part II. *Geophysical Magazine*, 7, 101–111, 1933
- Withers, M., Aster, R. & Young, C., An automated local and regional seismic event detection and location system using waveform correlation, *Bull. seism. Soc. Am.*, vol. 89(3), pp 657–669, 1999.

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

Zonele cu seismicitate complexă pot fi considerate acele regiuni caracterizate de cele mai multe ori de o frecvență medie spre scăzută de apariție a seismelor, totodată fără a putea discerne cu exactitate cauzele producerii sau fenomenologia asociată. Deseori aceste zone se constituie în episoade de studiu tocmai prin asocierea cu fenomenul de seismicitate indusă sau prin prisma efectelor pe care le prezintă (modificări geo-morfologice sau impact asupra activității /funcționării societății). Zona Galați și roiul de evenimente seismice crustale produse în perioada septembrie-decembrie 2013, care, în ciuda magnitudinilor relativ mici ale evenimentelor ($M < 4,0$) fenomenul a provocat panică și distrugerii minore în zona, reprezintă un exemplu perfect de zonă cu seismicitate complexă. Instrumentarea geofizică a zonei, inițiată imediat după declanșarea roiului seismic (stații seismice și GPS mobile, unele dintre ele fiind transformate în permanente) și care continuă și în prezent (stații seismice permanente instalate în foraje) oferă oportunitatea perfectă de testare a algoritmului propus precum și dezvoltărilor ulterioare.

Optimizarea monitorizării, detecției și localizării cutremurelor în astfel de zone devine o problemă crucială și se poate face atât prin reprocesarea datelor existente cu ajutorul unor metode noi care fac uz de algoritmi de detecție și localizare bazați pe procesarea avansată a semnalului și putere de calcul, cât și prin utilizarea de date înregistrate cu rețele temporare de monitorizare. În ultimul caz este mai mult decât necesar un studiu care să ne dea o informație despre configurația optimă a rețelei de monitorizare, raportată la scopul studiului și încercarea de eficientizare a resurselor. Prin acest proiect s-a realizat un astfel de studiu care abordează cele 2 aspecte menționate mai sus: monitorizare particularizată pe caz de studiu și procesarea volumelor mari de date înregistrate continuu prin algoritmi și metode eficiente, posibil a fi integrate și conectate la module de vizualizare și alertare în timp real, în cazul depășirii unor parametri predefiniți (ex: rata de seismicitate, nivel de magnitudine, etc.).

Aceste metode 'avide' de date oferă perspective noi privind problema generării și a evoluției în timp a seismicității asociate diferitelor cauze tectonice sau antropogene și să îmbunătățească acuratețea determinării hazardului și a riscului seismic asociat. Existența altor zone cu seismicitate complexă în România potrivite pentru testarea algoritmului (zonele seismogene - Vrancea, Mărășești, seismicitate indusă - Hațeg și

activități antropogene - Petroșani, Roșia Poieni, Dobrogea) se constituie de asemenea în premise de continuare ale proiectului.

Fiind vorba de un proiect aplicativ, care de la nivelul obiectivelor și-a propus interconectarea și/sau oferirea de date de intrare pentru sistemele de luare a deciziilor (rezultate orientate către utilizator), extinderea parteneriatelor și implicarea efectivă și eficientă a comunităților interesate, rezultatele proiectului urmând a fi extinse în funcție de nevoile și cerințele utilizatorilor și, cel mai important, rezultatele proiectului trec printr-un proces dinamic de dezvoltare bazat pe feedback-ul continuu al utilizatorului. Aici sunt cuprinse și comunitățile IT de dezvoltatori ce pot configura noi module de vizualizare a datelor și produselor derivate, precum și realiza interconectarea cu sistemele de avertizare.

Diseminarea rezultatelor proiectelor a fost realizată prin următoarele publicații și prezentări la conferințe naționale și internaționale:

Natalia Poiata, Claudio Satriano, Jean-Pierre Vilotte, Pascal Bernard, Florent Aden-Antoniow, Kazushige Obara, Dragos Tataru, Bogdan Grecu, Mihaela Popa, Mircea Radulian - Locating seismic sources with an automatic multi-scale, array-based detection and location scheme, British Seismology Meeting, 5-7.04 2017, UK

Dragos Tataru, Natalia Poiata, Bogdan Grecu, Eduard Nastase, Advanced site monitoring and source characterization in areas with complex seismicity - Galati area study, 17th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science. IBWAP 2017 (11-14, July, 2017) (prezentare orala)

Dragos Tataru, Natalia Poiata, Bogdan Grecu - Optimization of earthquake detection and location in areas with low and complex seismicity, International Multidisciplinary Scientific Conference on Earth and Planetary Sciences - SGEM2017 (prezentare orala si articol proceeding ISI)

Responsabil proiect
Dr. Ing Tătaru Dragoș