

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

Cod fiscal : 5495458 (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: Aplicarea corelării formelor de undă pentru îmbunătățirea monitorizării și localizărilor evenimentelor seismice produse pe teritoriul României și zonele adiacente (PN 16 35 03 07)

Faza I: Corelarea formelor de undă utilizând înregistrările array-urilor, respectiv a stațiilor Rețelei Seismice Naționale. Analiza secvenței seismice, produsă în noiembrie 2014, în regiunea Mărășești

Termen: 10 decembrie 2016

1. Obiectivul proiectului: Aplicarea și dezvoltarea tehnicilor de corelare avansate a formelor de undă în vederea îmbunătățirii detecției și localizării evenimentelor seismice.
2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului: Vor fi implementate /dezvoltate programe de estimare a similarității formelor de undă înregistrate de stațiile seismice cu 3 componente, respectiv de stațiile de tip array. Acestea vor fi utilizate pentru creșterea eficienței procesului de detecție și estimare a parametrilor de sursă a evenimentelor seismice.
3. Obiectivul fazei: Implementarea/dezvoltarea algoritmilor capabili să estimeze gradul de similaritate al formelor de undă (înregistrate de stațiile seismice cu 3

componente cât și de cele 2 array-uri seismice aparținând Rețelei Seismice Naționale) în vederea creșterii numărului de evenimente seismice detectate cât și a îmbunătățirii localizării acestora. Aplicarea algoritmilor implementați pentru evenimentele seismice crustale produse în perioada 1 noiembrie 2014 – 31 ianuarie 2015, în regiunea Mărășești.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Testarea algoritmilor de calcul implementați pe setul de date selectat pentru optimizarea parametrilor de calcul.

Creșterea numărului de evenimente seismice detectate, îmbunătățirea localizării evenimentelor seismice prin aplicarea algoritmilor dublei-diferențe (DD), analiza distribuției evenimentelor în timp și spațiu pentru corelarea cu posibilele fenomene fizice.

Interpretarea rezultatelor obținute în contextul tectonic al regiunii, respectiv al rezultatelor obținute în studiile anterioare.

5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

Studiul de față a avut ca reper 3 activități după cum urmează:

I. Implementarea/dezvoltarea algoritmilor informatici necesari pentru aplicarea tehnicilor de corelare a formelor de undă pentru creșterea eficienței procesului de detecție și estimare a parametrilor de sursă a evenimentelor seismice.

II. Testarea algoritmilor implementați pe secvența de cutremure produsă în zona Mărășești în perioada noiembrie 2014 – ianuarie 2015.

III. Proiectarea și realizarea unui array seismic portabil destinat monitorizării seismicității în diferite condiții (de ex. : replicile produse în urma unui cutremur major).

În momentul de față, tehnicile de corelare reprezintă un instrument utilizat la scară largă, având aplicabilitate în multiple domenii de cercetare. Începutul acestor tehnici de analiză, datează încă din anii 1980, de atunci fiind permanent dezvoltate și implementate în diferite domenii. În seismologie s-au folosit pentru prima dată în 1990, de atunci fiind aplicate pentru studii privind detecția și localizarea evenimentelor seismice, analiza parametrilor sursei seismice, studii de discriminare seismică, determinare de structură, etc. Unul din obiectivele acestei etape a constat în aplicarea tehnicilor de corelare a formelor de undă atât pentru creșterea detecției evenimentelor seismice cât și a îmbunătățirii procesului de localizare. În acest scop, au fost

implementați algoritmi de calcul bazați pe corelarea formelor de undă care să conducă la atingerea obiectivele propuse.

Pentru detecția evenimentelor seismice a fost implementat un algoritm de corelare a formelor de undă de tip multi-canal, bazat pe studiile descrise de Wagner și Owens (1996), respectiv Wiechecki și alții (2000). Aceștia au arătat că un astfel de algoritm poate îmbunătăți semnificativ procesul detecției surselor seismice ce prezintă caracter repetitiv. Metoda detecției prin corelare de tip multi-canal a formelor de undă constă în utilizarea unor evenimente deja înregistrate (evenimente șablon/model) pentru care se cunosc parametrii de sursă, pentru a căuta pe formele de undă continue alte evenimente similare. Fiecare eveniment “șablon” este corelat cu forma de undă continuă a fiecărei componente a stației seismice utilizând ferestre de timp fixe pentru care se realizează corelația și ferestre de timp mobile pentru a permite calcularea coeficientului maxim de corelație, iar eficiența comparării să fie de asemenea maximă. Se obțin în cele din urmă detecții care au asociate timpul, valorile coeficientului de corelare (CC) și Z-statis. Z-statis reprezintă numărul de abateri standard pentru care detecția identificată prin corelare este mai mare decât valorile de fond ale coeficienților de corelare. Un exemplu al procesului de detecție bazat pe algoritmul descris anterior este prezentat în Figura 1.

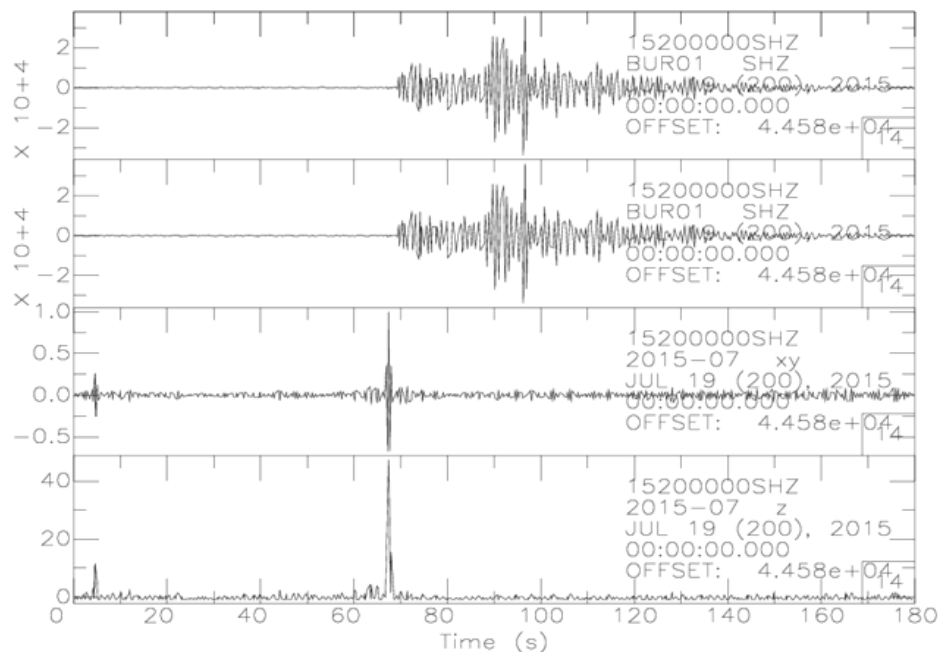


Figura 1 Aplicarea algoritmului de detecție bazat pe corelarea formelor de undă înregistrate de stația BUR01 (pentru un eveniment produs pe data de 19.07.2015, 20:14:49). Prima seismogramă (de sus în jos) reprezintă înregistrarea evenimentului “șablon”, a II-a prezintă înregistrarea continuă a formei de undă (componenta verticală a stației BUR01), următoarea arată distribuția coeficienților de corelare în timp (atingând valoarea maximă când se produce autocorelarea), iar ultima prezintă distribuția Z-statis în timp.

În urma testelor efectuate în cadrul acestei etape (Borleanu și alții, 2016a, Borleanu și alții, 2016b, Borleanu și alții, 2016c) a fost arătat că acest tip de algoritm are o eficiență mai mare când este aplicat înregistrărilor seismice provenite de la stații de tip array comparativ cu cele provenite de la stațiile cu 3 componente, bazându-se pe procesul de sumare, specific array-urilor seismice. Această abordare oferă de asemenea un grad de stabilitate mai ridicat fiind mai rezistent la alarmele false (detectiile false).

Pentru creșterea acurateții localizării evenimentelor seismice, Shearer (1997) a demonstrat că, în afara timpilor de parcurs absoluți, pot fi implementate suplimentar valorile coeficienților de corelare ai diverselor faze seismice. Mai târziu, Waldhauser și Ellsworth (2000) introduc algoritmi dublei diferențe, folosind diferențele de timp ale corelării fazelor seismice pentru îmbunătățirea localizărilor. Pornind de la aceste considerente, în cadrul acestei etape a fost implementat algoritmul HypoDD (Waldhauser și Ellsworth, 2000). Tehnica DD are avantajul că, atunci când distanța hipocentrală între două cutremure este mică în comparație cu distanța sursă - stație și variațiile de viteză sunt mici, atunci traiectoria razei între regiunea sursă și o stație comună este similară de-a lungul întregului traseu al razei (Frechet, 1985; Got și alții, 1994). În acest caz, diferența timpului de parcurs pentru două evenimente observate la stație poate fi atribuită diferenței spațiale între evenimente (Figura 2).

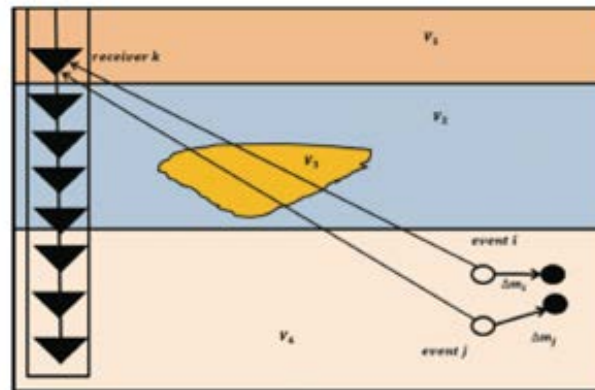


Figura 2 Reprezentarea schematică a algoritmului dublei-diferențe. Cercurile goale reprezintă localizările inițiale ale evenimentelor i, respectiv j, iar cercurile pline reprezintă localizările finale ale celor 2 evenimente. Săgețile negre Δm_j , respectiv Δm_i reprezintă distanțele dintre localizarea inițială și cea finală. Cu triunghiuri negre sunt marcate stațiile seismice (după Waldhauser & Ellsworth (2000, Castellanos și van der Baan, 2013).

Algoritmul HypoDD calculează timpul de parcurs, printr-un model de viteză în straturi (în cazul în care viteza depinde numai de adâncime), de la hipocentre la stația seismică unde unda a fost înregistrată. Reziduurile dublei-diferențe pentru perechile de cutremure la fiecare stație sunt minimizează prin metoda celor mai mici pătrate folosind

metoda de descompunere a valorii singulare (SVD) sau metoda de conjugare a gradientilor (LSQR) (Paige și Saunders, 1982). Soluțiile se găsesc ajustând iterativ diferența vectorială dintre perechile hipocentrelor apropiate, cu localizările și derivatele parțiale, actualizarea având loc după fiecare iterație.

În cadrul acestei etape, cele 2 metode descrise anterior au fost testate pe diferite seturi de date. În studiul de față, pentru aplicarea detectorului bazat pe corelarea multi-canal, a fost ales un set de date, înregistrat în perioada 1 noiembrie 2014 – 31 ianuarie 2015. A fost selectat acest interval de timp pentru că la data de 22 noiembrie 2014, ora 19:14 (GMT) în regiunea Mărășești s-a produs un cutremur având magnitudinea $M_w = 5,4$, la adâncimea de 41 km. Cutremurul a provocat ușoare avarii în cazul diferitelor construcții, creând panică în rândul populației (<http://www.hotnews.ro/stiri-esential-18639104-cutremur-puternic-resimtit-bucuresti.htm>). Șocul principal a fost urmat de 42 de replici, având magnitudinile estimate în intervalul 2,0 -3,4 (M_w), și un număr mare (181) de replici având magnitudinea $M_w < 2$, conform catalogului de cutremure românești Romplus (Oncescu și alții, 1999) revizuit permanent în cadrul Centrului de Date al Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP). Toate aceste replici au fost distribuite în timp pînă la data de 30 ianuarie 2015. Regiunea epicentrală face parte din zona de avanfosă a Carpaților Orientali, fiind practic cuprinsă în cadrul regiunii seismice Vrancea. Această regiune este încadrată într-o zonă tectonică complexă situată la intersecția a 3 unități tectonice importante: Platforma Est Europeană, placa Intra-Alpină și Platforma Moesică (Figura 3).

Cutremurele analizate sunt grupate în jurul faliei Peceneaga-Camena și faliilor secundare (Figura 3), care definesc granița între Platforma Moesică și Orogenul Nord Dobrogean (Polonic, 1986).

Din analiza distribuției evenimentelor seismice (conform catalogului de cutremure Romplus) reies cel puțin două aspecte legate de această secvență seismică. Primul dintre ele este acela că șocul principal al acestei secvențe este cel mai mare eveniment înregistrat vreodată în zonă, conform datelor istorice și instrumentale, iar cel de-al II-lea aspect este cu privire la soluția planului de falie (Figura 4) a șocului principal, care prezintă orientarea NV-SE, paralelă cu falia Peceneaga-Camena, contrar distribuției epicentrelor, orientate perpendicular pe această falie (Figura 4).

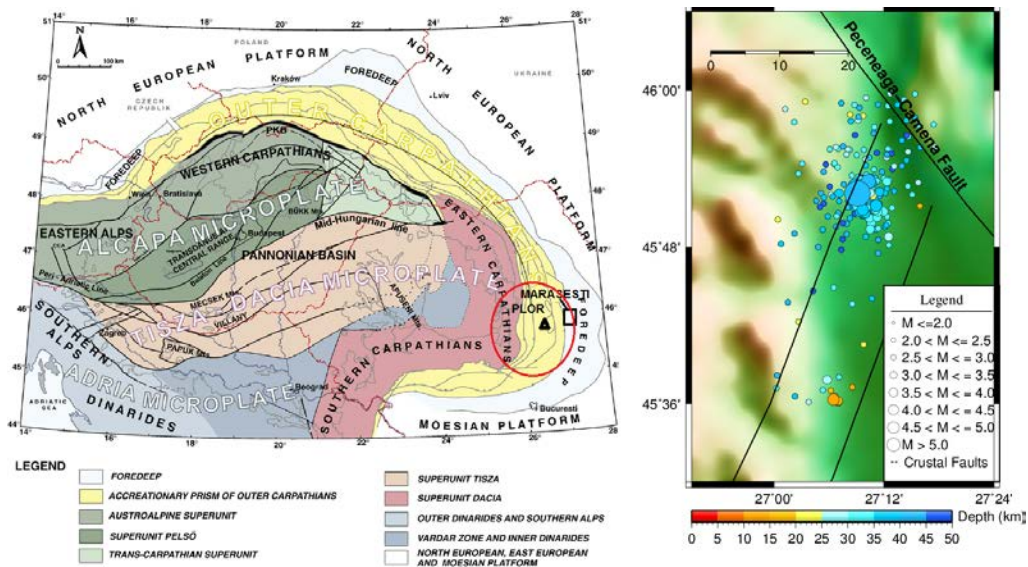


Figura 3 Principalele formațiuni tectonice existente în regiunea studiată (după Kovács și alții, Tasarova și alții 2009). Stația PLOR este marcată cu triunghi negru, iar regiunea Mărășești cu dreptunghi negru. Regiunea Vrancea este marcată prin cercul roșu (stânga). Distribuția evenimentelor seismice (conform catalogului Rompluș) în funcție de magnitudine (mărimea cercului) și adâncime (culoare) și sistemul de falii existent în zonă (reprezentate după Răileanu și alții 2009 în harta din partea dreaptă)

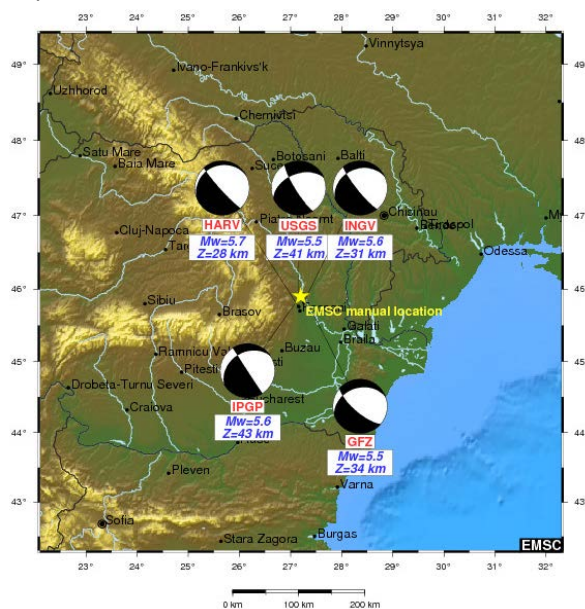


Figura 4 Reprezentarea soluțiilor planului de falie pentru șocul principal al secvenței, calculat de centrele internaționale (<http://www.emsc-csem.org/Earthquake/tensors.php?id=0&id2=VEL28;MT&id3=GJQM9>)

Având în vedere că aceasta reprezintă secvența seismică cu cele mai multe înregistrări, produsă totodată într-o regiune deosebit de complexă atât din punct de vedere tectonic cât și din punct de vedere seismic, înregistrările evenimentelor produse în cadrul acestei secvențe au fost selectate spre a fi analizate utilizând cele două metode descrise anterior.

Pentru aplicarea tehnicii de corelare multi-canal au fost selectate înregistrările array-ului seismic Ploștina (PLOR), fiind singura stație de acest gen situată la o distanță de 40 km de epicentru. Detectorul de corelare multi-canal a fost aplicat pe formele de undă înregistrate de componentele verticale ale array-ului Ploștina (PLOR) în perioada 1 noiembrie 2014 - 31 ianuarie 2015. Au fost selectate câteva zile de înregistrări înainte de producerea șocului principal (1-21 noiembrie 2014) pentru a verifica posibila existență a preșocurilor. Disponibilitatea datelor seismice pentru perioada selectată este prezentată în Figura 5. Observăm că, în perioada selectată, array-ul seismic a funcționat impecabil, procentul datelor disponibile fiind de 100%. Fiecare linie orizontală (din Figura 5) reprezintă disponibilitatea datelor asociată fiecărei stații.

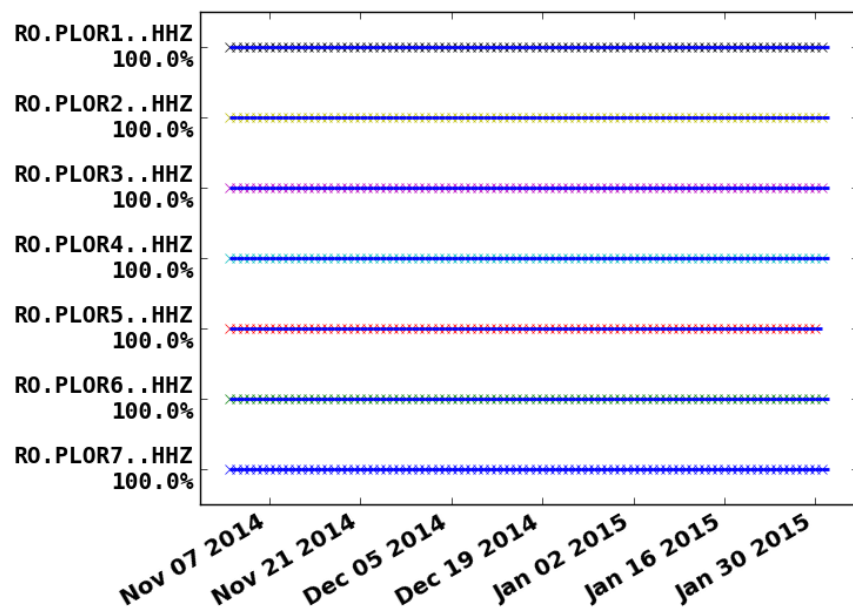


Figura 5 Reprezentarea disponibilității datelor pentru componentele verticale ale array-ului PLOR în perioada selectată (1 noiembrie 2014 – 31 ianuarie 2015)

Pentru aplicarea detectorului de corelare multi-canal au fost selectate un număr de 24 evenimente "șablon" având raportul semnal zgomot (SNR) peste valoarea de 1,9. Pentru stabilirea nivelului optim de filtrare a formelor de undă în vederea aplicării algoritmului au fost calculate spectrogramele evenimentelor model. Două spectrograme calculate utilizând formele de undă (pentru evenimentele din 22.11.2014, 19:14; 22.11.2014, 21:05) înregistrate de componenta verticală a stației PLOR1 sunt prezentate

în Figura 6. Prin inspecția vizuală a spectrogramelor calculate și o serie de teste de corelare a formelor de undă între stațiile array-ului, banda de frecvențe cea mai eficientă a fost estimată între 1,0 și 5,0 Hz. Merită menționat faptul că domeniul cel mai mare de frecvențe este dat de evenimentul cu magnitudinea mai mică, observație evidențiată chiar de spectrogramele reprezentate pentru cele 2 evenimente (Figura 6).

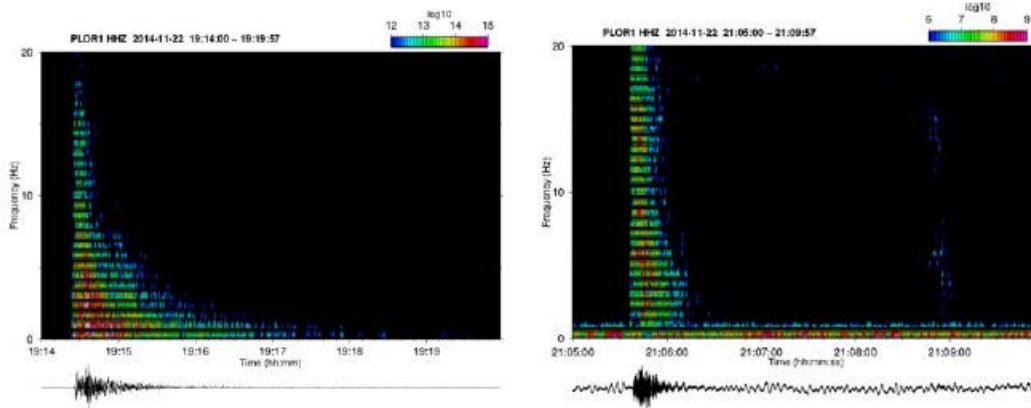


Figura 6 Spectrogramele calculate pentru componeta verticală a stației PLOR1 pentru șocul principal (22.11.2014, 19 :14, imaginea din stânga) și pentru replica din (22.11.2014, 21:05, imaginea din dreapta)

În afara intervalului de frecvențe determinat pentru filtrarea optimă a formelor de undă, pentru aplicarea detectorului descris anterior și reprezentat în Figura 1, au fost alese prin calculul teoretic al timpilor de parcurs, respectiv prin multiple încercări, timpul de parcurs (7,8 s) al undei P de la hipocentru la stația seismică (folosit de asemenea ca reper pentru întreaga analiză) precum și fereastra de timp (35 s) a semnalului seismic (începând cu 5 s înaintea sosirii undei P și continuând până în domeniul undelor coda S) care a fost folosit pentru suprapunerea pe forma de undă continuă în vederea determinării coeficienților de corelare. Folosind parametrizarea menționată anterior au fost detectate un număr de 259 evenimente comparativ cu cele identificate manual. Pragul detecțiilor a fost precizat încă de la momentul specificării parametrilor ca fiind de minimum 0,25 pentru CC, respectiv de 6 pentru Z-statis. Distribuția detecțiilor identificate în urma aplicării algoritmului de corelare multi-canal în funcție de CC și Z-statis este prezentă în Figura 7.

Observăm din Figura 7 că evenimentele identificate de algoritmul de corelare multi-canal sunt caracterizate de valori scăzute ale Z-statis respectiv ale CC, conducând astfel la ipoteza existenței mai multor surse seismice situate la distanțe relativ mari (de ordinul kilometrilor), una față de alta.

Detecțiile identificate prin algoritmul bazat pe algoritmul corelării multi-canal sunt reprezentate în Figura 8. Numărul detecțiilor în funcție de zilele lunii, respectiv orele zilei relevă că detecțiile sunt distribuite pe întreaga zi, atingând valoarea maximă în jurul orei 23 (ora locală). Detecțiile sunt de asemenea, distribuite de-a lungul tuturor zilelor lunii, cu o valoare maximă în zilele de 22, respectiv 23 noiembrie. Aceste

caracteristici evidențiază de fapt că cele mai multe evenimente seismice (replici) s-au produs imediat după șocul principal, după care numărul lor a scăzut semnificativ.

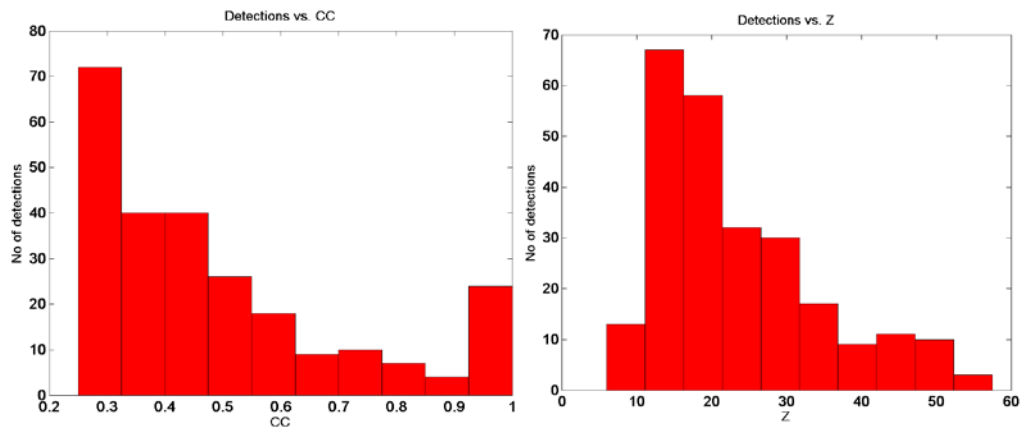


Figura 7 Reprezentarea numărului detecțiilor vs. CC (stânga) și Z-statis (dreapta)

Comparația între numărul evenimentelor seismice din catalogul de cutremure Romplus și detecțiile evidențiate de algoritmul prezentat este arătată în Figura 9.

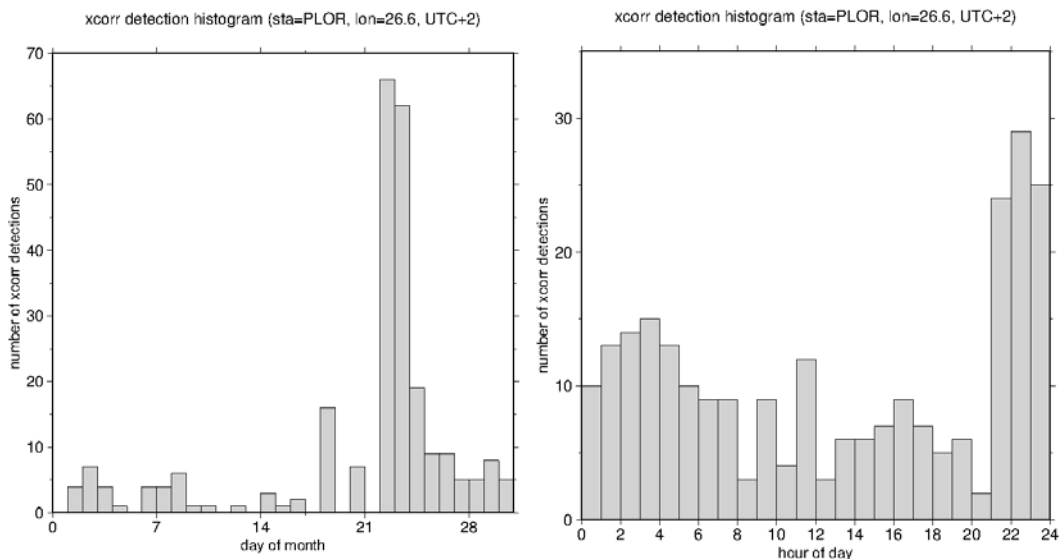


Figura 8 Numărul detecțiilor în funcție de: zilele lunii (stânga) respectiv orele zilei (dreapta)

Un nou algoritm bazat pe tehnica corelării multi-canal a fost implementat și testat, folosind înregistrările array-ului PLOR din perioada 1 noiembrie 2014 – 31 ianuarie 2015. În această perioadă a fost înregistrată o secvență seismică crustală, produsă în regiunea Mărășești, formată dintr-un șoc principal ($M_w = 5,4$) și un număr de 222 replici, conform catalogului de cutremure Romplus. Aplicarea algoritmului de detecție (pentru perioada de timp menționată) bazat pe tehnica corelării multi-canal și

un număr de 24 evenimente model a permis detectarea unui număr de 259 evenimente, evidențiind astfel eficiența acestui algoritm.

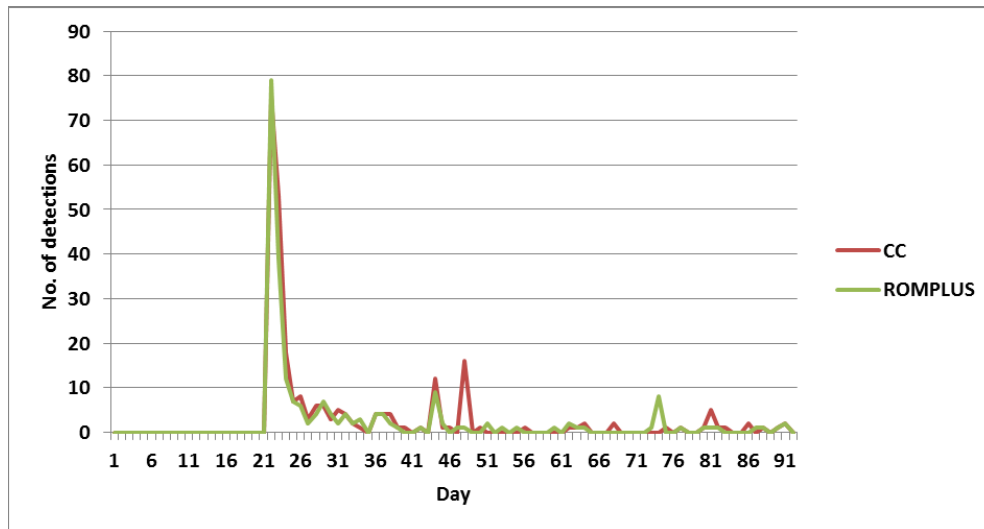


Figura 9 Distribuția detecțiilor (asociate secvenței seismice analizate) în timp, conform catalogului Romplus (reprezentate cu verde) vs. detecțiile evidențiate de algoritmul de corelare (reprezentate cu roșu) multi-canal (între 1 noiembrie 2014 și 31 ianuarie 2015)

Pentru a îmbunătăți calitatea localizării evenimentelor seismice realizate cu mijloacele de calcul rutinier (Antelope 5.6), în cadrul acestei etape a fost implementat și testat algoritmul de relocalizare HYPODD (Waldhauser și Ellsworth, 2000), bazat pe metoda dublei-diferențe. Waldhauser și Ellsworth (2000), au arătat că incertitudinile de localizare pot fi reduse până la un ordin de mărime atunci când se utilizează timpii de parcurs ca duble- diferențe, minimizând în acest fel incertitudinile induse de modelul de viteză. Această abordare este utilă în special în zonele cu seismicitate densă sau în cazul în care distanța dintre evenimente este mică. Aplicarea acestui algoritm pe setul de date înregistrat în cadrul secvenței seismice de la Mărășești (22 noiembrie 2014 – 31 ianuarie 2015) definește alinieri mai bune sau chiar migrarea seismicității, oferind astfel indicii importante referitoare la tectonica regiunii. Algoritmul a fost aplicat setului de date revizuit constând din localizări realizate utilizând un număr de cel puțin 6 faze seismice. Acestea, la rândul lor au fost manual reevaluate, fiind eliminate fazele seismice care prezentau un grad redus de confidență. Astfel, setul de date de intrare constă dintr-un număr de 193 evenimente seismice (le vom numi inițiale) distribuite pe o suprafață de aproximativ 22 x 44 km, cu adâncimi cuprinse între 18 și 54 km, iar magnitudinea (locală) variind de la -0,3 la 5,8 (Figura 3). Concomitent, pe lângă localizările inițiale ale evenimentelor au fost utilizate diferențele timpilor de sosire calculate la stații comune pentru perechi de evenimente pe baza localizărilor inițiale, precum și diferențele timpilor de corelare pentru același tip de fază înregistrată la stații comune. În urma determinării diferențelor de timp de parcurs pe baza localizărilor

inițiale au fost identificate un număr de 7927 faze P comune și 7292 de faze S comune. Pentru determinarea coeficienților de corelare a fost impusă o limită prag de 0,7, pentru care au fost considerați coeficienții de corelare, rezultând astfel un număr de 1795 faze P comune și 630 de faze S comune. În cazul de față am folosit un model de viteză local determinat de Răileanu și alții (2009), modificând gradientul de viteză cu o valoare de viteză constantă pentru fiecare strat și eliminându-le pe cele de viteză redusă conform studiului lui Slaker (2011) care arată că evenimentele care sunt prezente în stratul de viteză redusă, influențează semnificativ rezultatele obținute când zona cu viteză redusă este luată în considerare.

Distribuția stațiilor folosite (pe o rază de maxim 200 km în jurul epicentrelor) respectiv a epicentrelor relocalizate utilizând tehnica HypoDD sunt arătate în Figura 10.

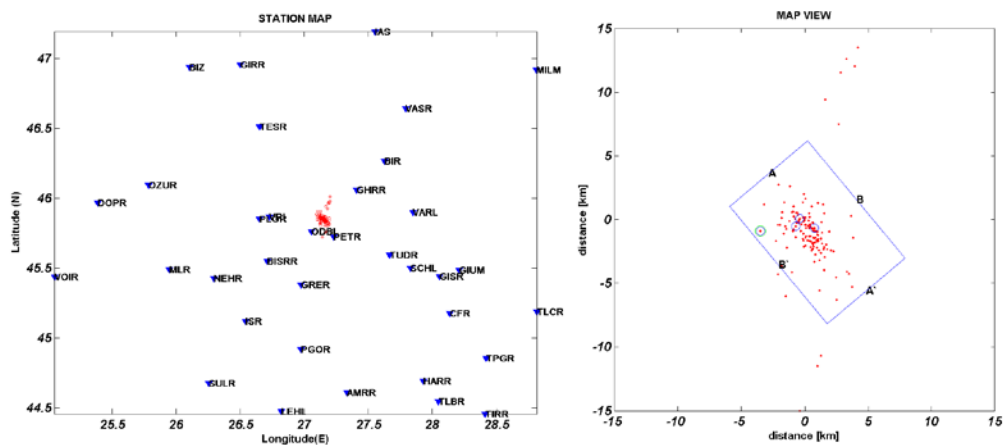


Figura 10 Distribuția stațiilor folosite în procesul de relocalizare (albastru) și evenimentelor relocalizate (stânga). Distribuția detaliată a epicentrelor. Liniile albastre delimitează o secțiune transversală și una verticală.

Comparativ cu localizările obținute inițial (vezi Figura 3), folosind metodele rutiniere, erorile de localizare sunt mai mici atunci când se utilizează tehnica HypoDD: eroarea medie pe longitudine fiind de 1,12 km față de 2,41 km, obținută prin metoda LOCSAT (implementată în mediul Antelope 5.6), în timp ce pentru latitudine, eroarea medie este de 2,2 km față de 6,38 km, iar pentru adâncime 1,74 față de 4,06 km. Distribuția epicentrală arată o aliniere NV-SE în concordanță cu soluția mecanismului focal prezentată de diferite centre internaționale (Figura 4), fapt ce nu a putut fi observat până în prezent.

Un alt aspect important al acestei secvențe este dat de analiza distribuției în timp a evenimentelor seismice. Comparând evoluția în timp a producerii evenimentelor seismice (pentru primele 7 ore de la producerea șocului principal) pe cele 3 direcții (X-longitudine, Y-latitudine, Z-adâncime) am constatat o migrare a replicilor cu o viteză medie de aproximativ 3 km/zi. În Figura 11 sunt prezentate distribuțiile evenimentelor în timp în funcție de latitudine, respectiv longitudine. Timpul de referință este ora de producere a șocului principal (reprezentat cu albastru). Această evoluție a seismicității poate fi cauzată de prezența fluidelor în jurul hipocentrelor.

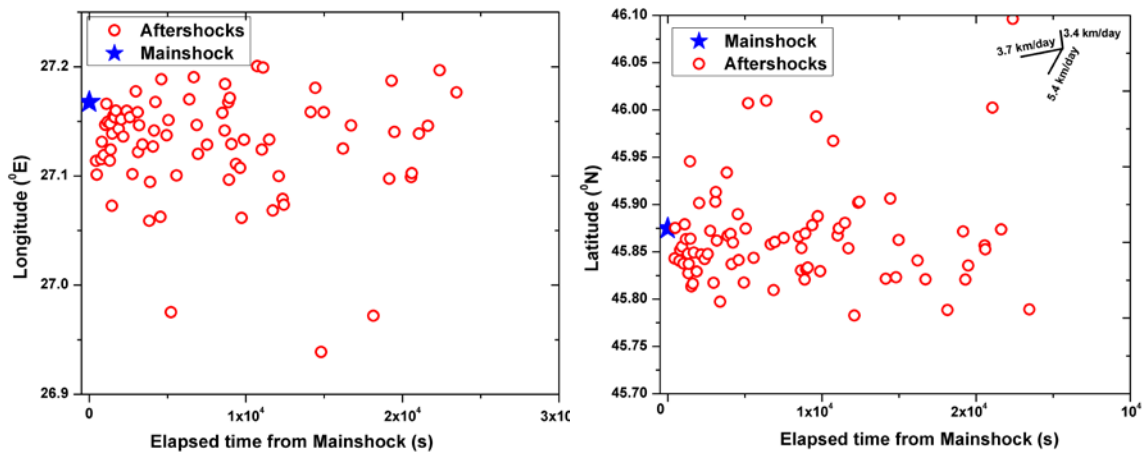


Figura 11 Distribuția replicilor în timp pe direcția X (longitudine) și Y (latitudine) în primele 7 ore de la producerea șocului principal.

Relația Omori este o distribuție statistică ce exprimă descreșterea în timp a ratei replicilor. Caracteristicile parametrului p , care indică măsura scăderii ratei replicilor, modificările și variabilitatea lui, pot fi legate de eterogenitatea structurală, stresul și variațiile de temperatură din scoarță (Utsu și alții, 1961, Enescu și alții, 2011). Valoarea parametrului p din relația Omori modificată **(1)**, a fost calculată pe seturi de evenimente

$$n(t) = K/(t+c)^p \quad (1)$$

($n(t)$ reprezintă frecvența de producere a cutremurelor pe unitatea de timp, la timpul t după șocul principal, iar K , c și p sunt constante), selectate în funcție de magnitudine. Deoarece pentru noile detecții identificate cu algoritmul corelării multi-canal nu au fost estimate magnitudinile, determinarea s-a realizat numai pe setul de date inițial. Astfel, au fost considerate seturi de evenimente diferențiate pe 3 valori de magnitudine (locală) și anume : evenimente cu $M_L > 0,0$ cu $M_L > 0,9$ respectiv cu $M_L > 1,4$. Primele două valori ale coeficientului p sunt aproape constante (~ 1), în timp ce ultima este semnificativ mai mare ($\sim 1,26$). Acest comportament poate fi explicat fie prin inconsistențe ale calcului magnitudinii (ceea ce este puțin probabil) fie unei variații a stresului seismic în regiune, în acord cu modelul lui Dietrich. În cazul în care stresul scade cu logaritmul timpului, este de așteptat o scădere rapidă a numărului de replici ($p > 1$). În Figura 12 sunt arătate variațiile coeficientului p al relației (1) pentru seturile de evenimente cu $M_L > 0$ respectiv cu $M_L > 1,4$.

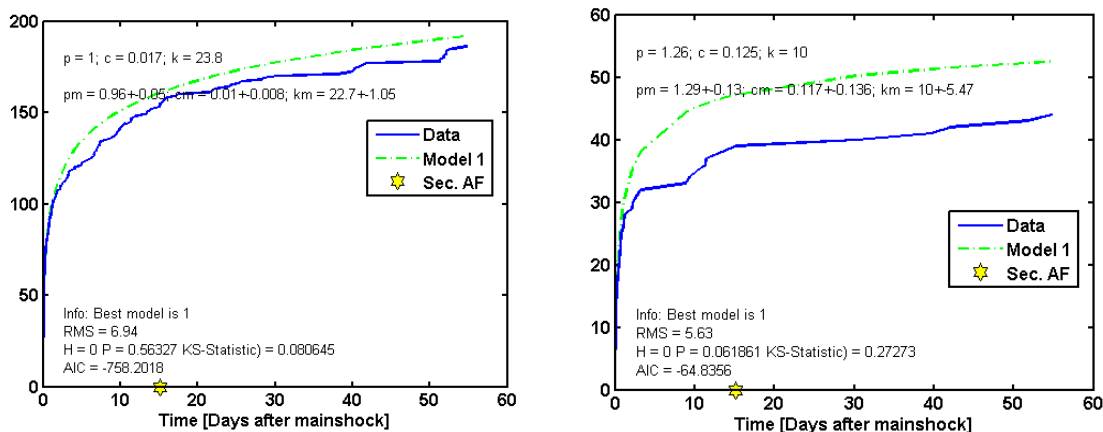


Figura 12 Relația Omori calculată pe setul de date inițial: pentru evenimentele cu $M_L > 0$ (stânga) respectiv pentru evenimentele cu $M_L > 1,4$ (dreapta)

În condițiile producerii unui eveniment seismic major (de ex. secvența seismică analizată, roiul de cutremure din apropierea orașului Galați din 2013, etc.) este de o importanță extremă utilizarea unui set de instrumente seismice ușor transportabile care ar putea înregistra date seismice de înaltă calitate. În acest context, echipamentele mobile trebuie să fie proiectate astfel încât să depășească limitările întâlnite la rețelele seismice obișnuite, permițând o acoperire cât mai eficientă a regiunii care trebuie monitorizată și o dinamică a înregistrărilor cât mai variată. Astfel, la proiectarea unui array de stații seismice mobile ar trebui avuți în vedere factori precum: rezoluția, geometria, apertura, ș.a.m.d. În funcție de suprafața regiunii care trebuie monitorizată, numărul senzorilor seismici poate varia semnificativ. Pentru această etapă am construit funcția de răspuns al unor ipotetice stații de tip array desemnate să monitorizeze seismicitatea locală a unor regiuni de mărimea cazurilor exemplificate anterior. Astfel, am exemplificat 2 tipuri de configurații pentru a arăta posibilele avantaje sau dezavantaje în ambele cazuri. În Figura 13 sunt prezentate ambele configurații de array-uri. În imaginea de sus am considerat o geometrie în formă de stea cu 5 elemente, unul situat central iar celelalte 4 la distanță egală de 1km. Răspunsul acestui array, calculat alături pentru frecvența de 1,0 Hz, evidențiază exact geometria array-ului prin distribuția lobilor secundari în raport cu cel principal. Tot din răspunsul instrumentului se observă capacitatea acestuia de a acoperi rezonabil domeniul vitezelor undelor de volum care se propagă la distanțe locale. În imaginea de jos am ales o configurație diferită în formă de triunghi cu 7 elemente, cu un element central, 3 elemente situate la distanță egală de 1km iar alte 3 elemente amplasate la aproximativ 3km de elementul central. Răspunsul acestui array, calculat alături pentru frecvența de 0,3 Hz.

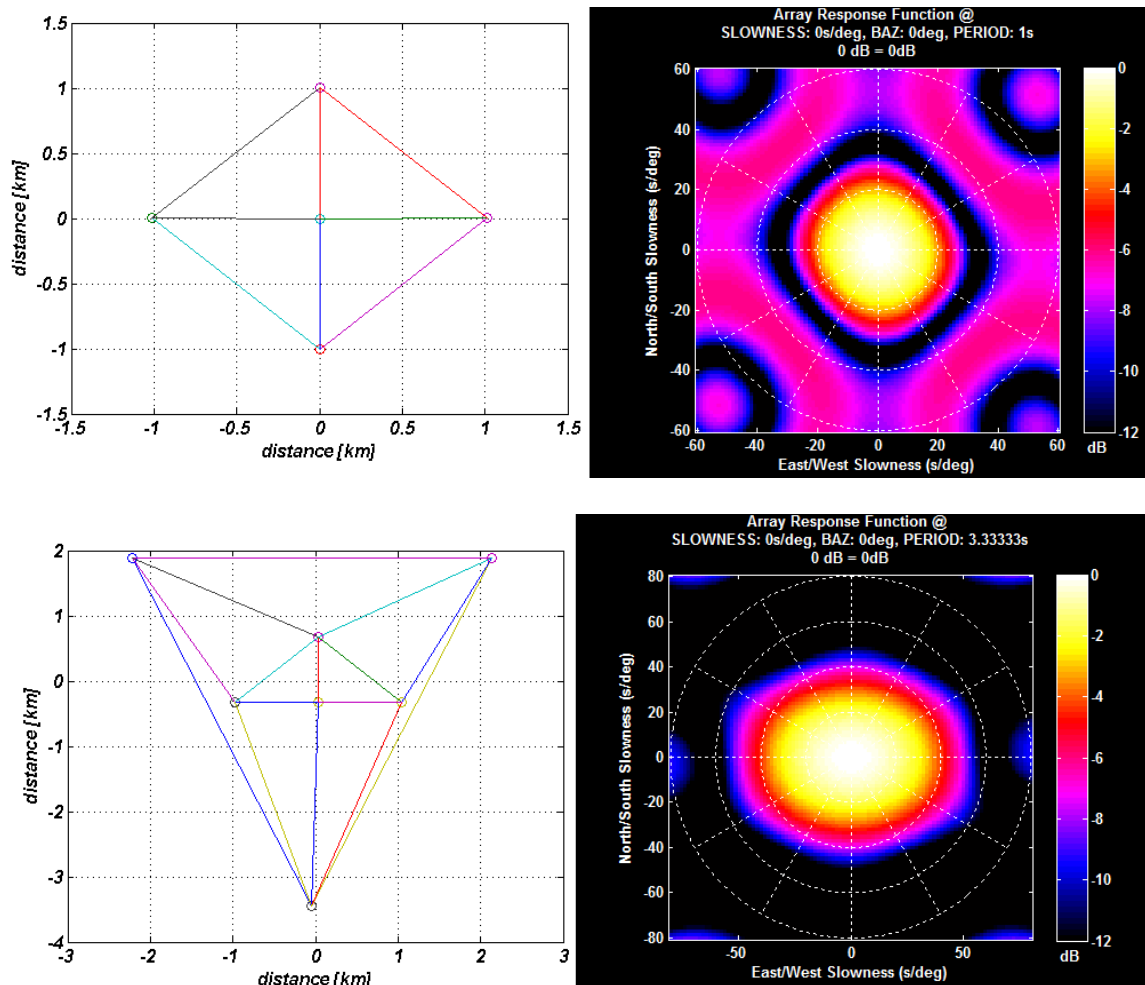


Figura 13 Distribuția elementelor (stânga) și răspunsul array-ului (dreapta) pentru o configurație formată din 5 elemente (sus) și alta formată din 7 elemente (jos)

Se observă din cele 2 reprezentări variația funcției de răspuns a array-ului în cazul modificării geometriei, respectiv a distanțelor dintre elementele array-ului. Crescând la 7 elemente și măbind totodată distanța dintre elementele array-ului, crește deopotrivă capacitatea array-ului, acoperind un spectru mai larg de tipuri de unde ce pot fi analizate.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ:

Borleanu F, Popa M, Radulian M. și Eugen Oros (2016a) Source parameters of 2015 earthquake sequence occurred at the northwestern Romanian border, European Geosciences Union General Assembly 2016

Borleanu F, Plăcintă A.O., Popa M, Moldovan I.A., și Popescu E., (2016b) Seismicity monitoring at the Izvorul Muntelui dam (Eastern Carpathians, Romania) using multiple approaches, The 15 International Balkan Workshop on Applied Physics, 2016,

Borleanu F, Plăcintă A.O., Rogozea M., Popa M, Radulian M. (2016c) Multi-channel correlation analysis for November, 2014 South-Eastern Carpathians (Romania) sequence 35rd General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, Trieste, Italia

Enescu B., Enescu D., Ito K., Values of b and p: their variations and relation to physical processes for earthquakes in Japan and Romania, Rom. Journ. Phys., 56, 590–608, 2011.

Kovács I. Kovács, Z. Zajacz, C. Szabó (2004) Type-II xenoliths and related metasomatism from the Nógrád-Gomor Volcanic Field, Carpathian–Pannonian region (northern Hungary – southern Slovakia) Tectonophysics, 393, pp. 139–161

Oncescu, M. C., Marza, V. I., Rizescu, M., și Popa, M.: The Romanian Earthquake Catalogue between 1984–1997, in: Vrancea Earthquakes, Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, edited by: Wenzel, F., Lungu, D., and Novak, O., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999.

Răileanu, V., 2009. Caracterizarea geologică și parametrii elastici ai amplasamentelor stațiilor seismologice și de accelerometre din rețeaua INCD Fizica Pământului, program NUCLEU 2006 - 2008 "Cercetări avansate privind managementul dezastrelor generate de cutremurele românești", tema 06-31 0201, ed. Thenopress, cap .7, pag 297-359.

Utsu T., 1961, A statistical study on the occurrence of aftershocks, Geophys. Mag., 30, pp. 521–605.

Tašarová A., Afonso J. C., Bielik M., Gotze H. J., Hok J., 2009: The lithospheric structure of the Western Carpathian-Pannonian Basin region based on the CELEBRATION, 2000 seismic experiment and gravity modelling. Tectonophysics, 475, 3-4, 454-469.

Wagner, G.S., 1996, Signal detection using multi-channel seismic data, Bull., Seism. Soc. Am. 86(1A), 221-231, 1996

Waldhauser, F., Ellsworth, W., 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the northern Hayward Fault, California, Bulletin of the Seismological Society of America 90,6, pp.1353-1368

Wiechecki S. Gray H. L. Woodward W.A. Statistical Developments in Support of CTBT Monitoring, Technical report 98/07/15 - 00/05/16

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

În această etapă s-au implementat algoritmi ce permit folosirea corelării formelor de undă înregistrate de stațiile seismice cu 3 componente, respectiv de array-urile seismice în vederea îmbunătățirii detecțiilor și localizărilor evenimentelor seismice.

Rezultatele obținute în urma aplicării detectorului bazat pe corelarea multi-canal arată clar eficiența acestei metode, reușind detecția de noi evenimente seismice care nu au putut fi observate cu algoritmi folosiți în mod rutinier. A fost de asemenea evidențiat că acest detector este mult mai eficient când este aplicat pe date provenite de la array-urile seismice comparativ cu datele provenite de la stațiile cu 3 componente.

Aplicarea tehnicii de relocalizare relativă a adus contribuții esențiale, grupând mult mai bine hipocentrele evenimentelor produse în această secvență, evidențiind un aliniament NV-SE, în concordanță cu planele mecanismului de focar obținut de diferite centre internaționale.

Au fost proiectate 2 array-uri seismice pentru analizarea configurației optime în vederea monitorizării temporare a seismicității locale din diferite regiuni. Ambele s-au dovedit utile în funcție de suprafața regiunii și domeniul undelor seismice destinate monitorizării, respectiv analizei.

Rezultatele obținute în cadrul acestei etape au fost prezentate în cadrul a 3 conferințe internaționale astfel:

Borleanu F, Popa M, Radulian M. și Eugen Oros (2016a) Source parameters of 2015 earthquake sequence occurred at the northwestern Romanian border, prezentare poster în cadrul conferinței European Geosciences Union General Assembly 2016 desfășurată în Viena, Austria

Borleanu F, Plăcintă A.O., Popa M, Moldovan I.A., și Popescu E., (2016b) Seismicity monitoring at the Izvorul Muntelui dam (Eastern Carpathians, Romania) using multiple approaches, prezentare poster în cadrul conferinței The 15 International Balkan Workshop on Applied Physics, 2016, desfășurată în Constanța, România

Borleanu F, Plăcintă A.O., Rogozea M., Popa M, Radulian M. (2016c) Multi-channel correlation analysis for November, 2014 South-Eastern Carpathians (Romania) sequence prezentare poster în cadrul conferinței 35rd General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, desfășurată în Trieste, Italia

În continuare, algoritmi propuși vor fi aplicați pe un set de date diferit iar ca element de noutate va fi aplicat un algoritm de tomografie seismică bazat de asemenea pe metoda dublei-diferențe.

Responsabil proiect

Felix Borleanu