

Contractor:

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

**De acord,
DIRECTOR GENERAL**

**Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM**

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: PN 16 35 03 04

Proiectul: Estimarea in timp real a magnitudinii din moment seismic si a parametrilor miscarii solului in cazul producerii cutremurelor semnificative pe teritoriul Romaniei din date de acceleratie.

Faza 2: Estimarea in timp real a magnitudinii din moment seismic si a parametrilor miscarii solului pentru cutremurele intermediare din zona Vrancea, din date de acceleratie.

Termen: 02.06.2017

1. Obiectivul proiectului:

Obiectivul principal al acestui proiect a fost acela de a dezvolta o metoda automata, stabila, pentru estimarea in timp real a magnitudinii cutremurelor din moment seismic si a parametrilor miscarii solului pentru evenimentele seismice înregistrate de o rețea de accelerometre.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Dezvoltarea de instrumente care vor fi folosite in managementul dezastrelor provocate de cutremure in Romania. In particular, au fost dezvoltati algoritmi pentru determinarea rapida a parametrilor sursei seismice (localizarea in timp real a sursei, reprezentarea acesteia pe harta, determinarea magnitudinii din moment seismic si a parametrilor miscarii solului, folosind rețea de accelerometre).

In acest proiect a fost dezvoltata o metoda automata (stabila) pentru estimarea in timp real a magnitudinii din moment seismic si a parametrilor miscarii solului pentru evenimentele inregistrate de catre o rețea de accelerometre. S-au obtinut rezultate stabile chiar si pentru evenimentele mici cu magnitudine $M_w \approx 3$, folosind datele inregistrate in

timp real de Reteaua Seismica Nationala a Institutului National pentru Fizica Pamantului.

3. Obiectivul fazei:

Implementarea in cadrul sistemului de achizitie si procesare a datelor in timp real (Antelope) a metodologiei de estimare in timp real a momentului seismic scalar, a magnitudinii moment seismic si a frecventei de colt asociate evenimentelor seismice vrâncene de adâncime intermediara înregistrate de o rețea seismica echipata cu senzori de accelerație.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Estimarea in timp real a magnitudinii din moment seismic si a parametrilor miscarii solului pentru cutremurele semnificative, produse la adancimi intermediare din zona Vrancea, utilizand rețeaua de accelerometre disponibila din cadrul INCDFP.

5. Rezumatul fazei:

Regiunea Vrancea este o regiune seismică deosebit de complexă de convergență continentală caracterizată de cel puțin trei unități tectonice în contact: Placa Est-Europeană și subplăcile Intra-Alpină și Moesică (Constantinescu et al., 1976). Activitatea seismică cea mai puternică din România se concentrează la adâncimi intermediare de (60-200 km), într-o placă subdusă veche, aproape verticală. Observarea a 1 - 6 evenimente de $M_W > 7.0$ pe secol într-un volum focal foarte restrâns implică un nivel înalt al deformării active ($\sim 3.5 \times 10^{-7} \text{ an}^{-1}$) care nu se observă clar în deformarea crustei.

Înregistrarea evenimentelor seismice in timp real se face cu ajutorul Rețelei Seismice Nationale a INCDFP. Datele inregistrate de Reteaua Seismica Nationala, sunt pre procesate iar trenul undelor S este identificat prin aplicarea unei metodologii automate, care estimeaza timpzii de sosire ai undelor S pe baza localizarii hipocentrului, a statiilor la care au inregistrat evenimentul seismic si a modelului de viteze regional.

Pentru estimarea magnitudinii din moment seismic este folosita componenta transversala a miscarii solului. Spectrul sursei seismice este obtinut prin eliminarea din semnalele seismice a imprastierii geometrice si a atenuarii intrinseci. Urmand aceasta metodologie sunt calculate spectrele sursei seismice atat pentru viteza cat si pentru deplasare, dupa Andrews (1986), apoi este calculat momentul seismic scalar si prima estimare a frecventei de colt f_0 .

Incepand cu luna iunie 2016, acest algoritm functioneaza in cadrul sistemului de achizitie si procesare a datelor in timp real (Antelope 5.5), pana in prezent fiind detectate, localizate si procesate un numar de 108 evenimente seimice cu magnitudinile cuprinse intre $2.8 \leq M_W \leq 5.7$. In urma acestor localizari si estimari ale magnitudinii din moment seismic au fost generate de asemenea si harti ale parametrilor miscarii solului (PGA, PGV) care au fost trimise impreuna cu buletinele seismice asociate fiecarui eveniment via email, in general la 3 minute dupa producerea unui eveniment.

Estimarea rapida a parametrilor sursei seismice (forme de unda, coordonatele epicentrale, parametrii miscarii solului, spectrul Fourier, spectrele de raspuns si alti parametrii ingineresti) reprezinta una dintre preocuparile de interes pentru agentiile de Protectie

vor oferi inregistrari complete spre deosebire de senzorii de viteza care vor intra in limitare.

Din baza de date a sistemului de achizitie si procesare a datelor in timp real Antelope 5.5 avem acces la formele de unda si parametrii asociati evenimentelor seismice cum ar fi, azimutul, distanta epicentrala, tipul de senzor (viteza sau acceleratie), rata de esantionare, parametrii absolut necesari pentru rulara acestui algoritm de estimare a magnitudinii din moment seismic. Acest software a fost optimizat pentru a crea noi tabele in baza de date a sistemului Antelope pentru a gestiona informatia noua obtinuta in urma rularii acestui algoritm. Este inlaturat raspunsul instrumentului, apoi este fixata distanta epicentrala la 130 Km, $V_S=4.5$ Km/s, $Q=1000$, $\rho=3400$ kg/m³, iar factorul de atenuare Q este dependent de frecventa (1.1 Hz).

In continuare se verifica calitatea fiecărei inregistrari disponibile si se selecteaza frecventele de colt pentru filtrarea inregistrarilor, folosind raportul semnal zgomot (SNR), care ne ofera fereastra de timp in care semnalul va fi analizat. Aceasta analiza de zgomot incepe cu 10 secunde inainte de sosirea undelor P. Analiza semnalului seismic incepe din momentul sosirilor undelor S si reprezinta o functie de eveniment-distanta epicentrala, in particular este egala cu distanta impartita la 3km/s (Gallo et al., 2014) o valoare determinata empiric.

Fazele seismice P si S sunt detectate de programul de achizitie si procesare a datelor in timp real, Antelope 5.5. Din moment ce spectrul de zgomot poate fi la acelasi nivel cu semnalul seismic si chiar poate depasi acest nivel, atat la frecvente joase cat si inalte, este esential sa determinam intervalul de frecventa in care palierul spectral al semnalului seismic este semnificativ mai mare decat palierul spectral al zgomotului seismic. In continuare este aplicata urmatoarea procedura care va investiga domeniul de frecventa (de obicei intre 0.1 si 50 Hz), care permite selectarea ferestrei de timp ce urmeaza a fi analizata in care raportul semnal zgomot este mai mare de 3. Incepand de la cele mai joase frecvente au fost calculate frecventele minime la care raportul semnal zgomot depaseste valoarea 3. Prin aplicarea unui filtru Butterworth am obtinut vitezele, acceleratiile si deplasările solului prin derivarea sau integrarea semnalului seismic. Dupa acest pas se aplica semnalului transformata Fourier (FFT), pentru a obtine spectrul semnalului seismic. Apoi toate aceste semnale procesate sunt corectate de imprastierea geometrica si atenuarea intrinseca pentru a obtine spectrul semnalului seismic.

Estimarea magnitudinii din moment seismic

Pentru estimarea parametrilor sursei seismice, componentele orizontale ale semnalului seismic sunt rotite pentru a obtine componenta transversala a miscarii solului. Au fost selectate undele SH pentru cateva motive: undele P au avantajul de a fi primele sosiri si de aceea sunt si foarte usor de detectat. Aceasta limita de timp afecteaza frecventa minima detectabila a undelor P. De asemenea undele SV sunt afectate de convertirea fazelor si suprapunerea cu componenta verticala a undelor P.

Frecventa de colt este estimata conform Andrews (1986):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{V2} S_{D2}}{\Delta}} \quad (1)$$

Prin determinarea spectrului Brune, palierul spectral la frecvente joase se calculeaza astfel (Brune, 1970):

$$\Omega^2 = 4S_{D_2}^2 S_{V2}^{-1/2} \quad (2)$$

Dupa cum se stie, aceasta valoare este legata de momentul seismic:

$$M_0 = 4\pi\rho\beta^3\Omega k \quad (3)$$

ρ - densitatea in zona focala; β – viteza undelor S; Ω - palierul spectral al undelor de forfecare de lungă perioadă; k- forma de radiatie (include raspunsul suprafetei libere).

In final magnitudinea din moment seismic este determinata in conformitate cu Kanamori (1977):

$$M_W = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 6.1 \quad (4)$$

La sfarsitul acestei proceduri, parametrii sursei seismice obtinuti sunt stocati in baza de date a sistemului de achizitie si procesare a datelor in timp real Antelope 5.5, dupa care este generat un raport care contine toate informatiile obtinute.

Validarea rezultatelor

Au fost analizate in timp real 108 evenimente seismice cu magnitudine moderata ($M_W \geq 2.8$), de adancime intermediara din zona Vrancea, inregistrate in perioada 2016-2017. Pentru validarea rezultatelor obtinute, s-au comparat valorile magnitudinii din moment seismic (M_W) nou obtinute cu valorile magnitudinii locale (M_L) si valorile magnitudinii (M_{EWS}) produse de sistemul de avertizare rapida (EWS) al INCDFP. Toate aceste valori de magnitudine sunt calculate folosind date de acceleratie.

Evenimentele seismice analizate in faza de testare a algoritmului de estimare a magnitudinii din moment seismic sunt sintetizate in graficele de mai jos:

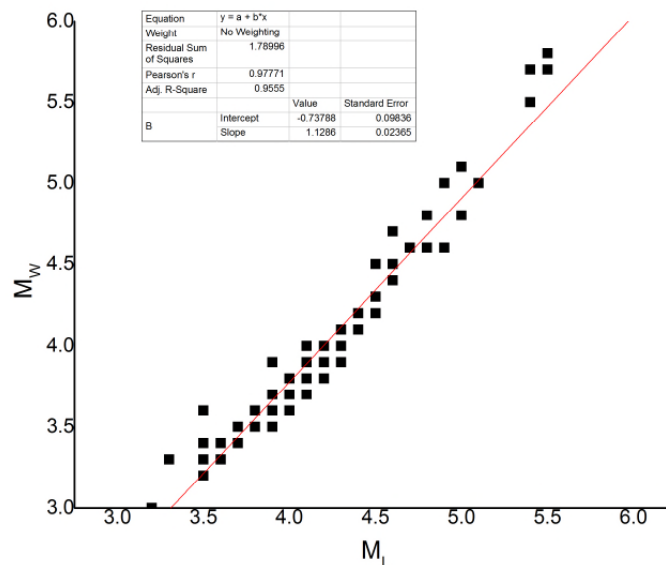


Figura 2. Compararea magnitudinii din moment seismic M_W cu magnitudinea locala M_L , pentru evenimentele analizate

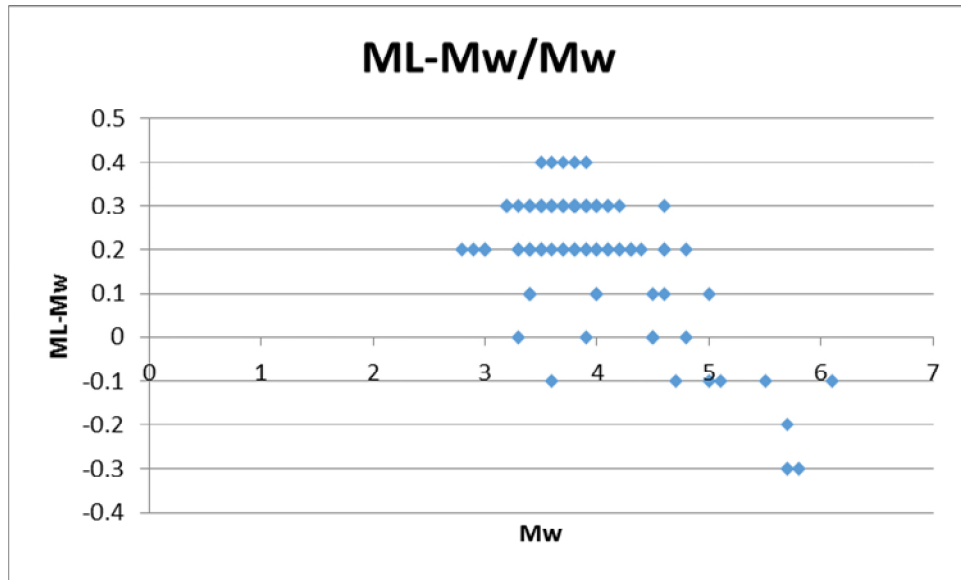


Figura 3. Erorile magnitudinii locale M_L in functie de M_w

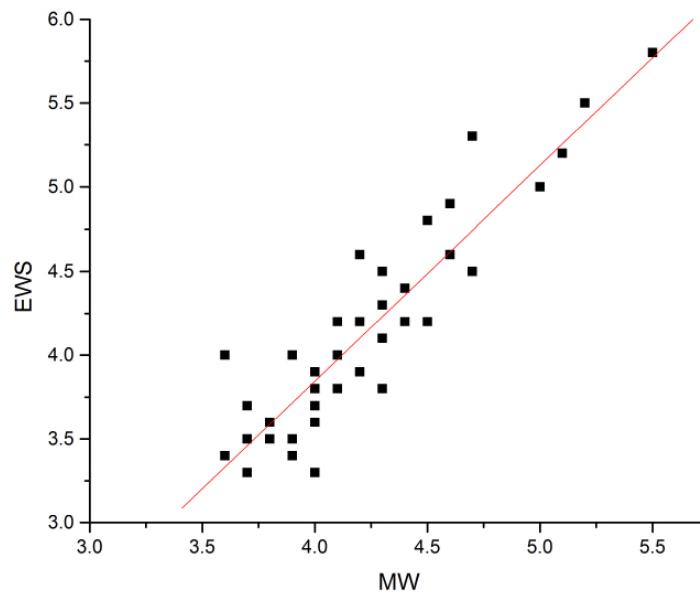


Figura 4. Compararea magnitudinii dinmoment seismic M_w cu magnitudinea furnizata de Sistemul de Avertizare Rapida (EWS)

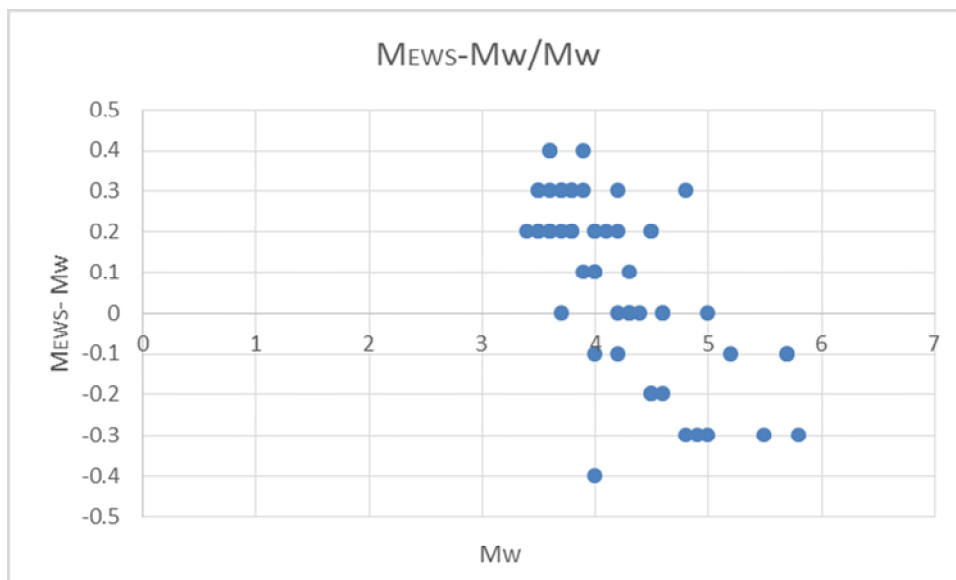


Figura 5. Erorile magnitudinii din moment seismic Mw in functie de M_{EWS}

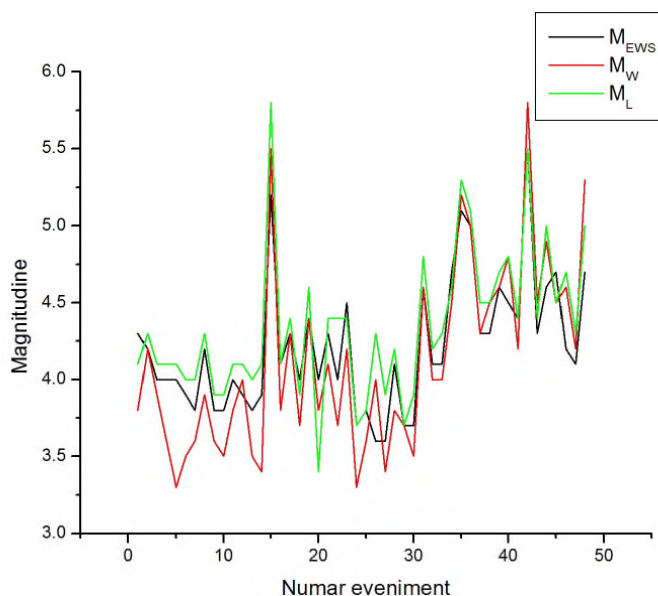


Figura 6. Reprezentarea celor 3 scari de magnitudine calculate din date de acceleratie.

Rezultatele obtinute arata ca valorile magnitudinii din moment seismic sunt suficient de stabile raportandu-ne la magnitudinea locala, neexistand variatii semnificative (Figura 2). Erori ceva mai mari apar la cutremurele intermediare cu magnitudinea $M \geq 5.3$, unde magnitudinea locala tinde sa fie saturata la un numar mare de statii care influenteaza intr-o mare masura inclusiv valoarea finala, lucru care nu se intampla cu magnitudinea calculata din momentul seismic. O buna concordanta a valorilor magnitudinii din moment seismic exista si in cazul magnitudinii furnizate de Sistemul de Avertizare Rapida (M_{EWS}), unde diferentele intre cele doua valori sunt in limite acceptabile luand in calcul ca Sistemul de Avertizare Rapida calculeaza

magnitudinea doar din primele 4 secunde ale inregistrarilor undelor P si doar la cutremure cu $M \geq 4.0$. In ceea ce priveste erorile magnitudinii din moment seismic (Fig 3,5) fata de magnitudinea locala M_L sau M_{EWS} , se observa ca marea majoritate sunt relativ mici pana in 0.2 grade de magnitudine, iar la valori de magnitudine peste 5.5, M_L tinde sa subvalueze usor magnitudinea (un numar considerabil de statii de scurta perioada aflate in limitare), aspect reflectat si in diferentele dintre M_w si M_L .

In figura 6 este ilustrat comportamentul celor 3 relatii de calcul al magnitudinii din date de acceleratie, si se poate observa ca la cutremure cu magnitudinea peste 4.0 valorile sunt sensibil egale, in timp ce la cutremure mai mici cu $M < 4.0$, valorile magnitudinii din moment seismic sunt subestimate datorita limitarii distantei epicentrale.

Magnitudinea obtinuta din momentul seismic aproximeaza foarte bine magnitudinile reale, prin urmare aceasta metodologie s-a dovedit a fi un mod foarte eficient pentru estimarea rapida si precisa a magnitudinii pentru cutremurele vrance. Estimarea rapida a parametrilor miscarii solului in cazul producerii cutremurelor semnificative pe teritoriul Romaniei din date de acceleratie este foarte importanta in evaluarea potentialelor pagube in zonele afectate in urma producerii acestora si contribuie la reducerea riscului seismic.

Mai jos este prezentat un exemplu de harti cu parametrii miscarii solului pentru evenimentul seismic vrancean din 23.09.2016, ora 23:11:19 (GMT), $M_w=5.7$, $H=100\text{km}$, generate la scurt timp (3 minute) dupa localizarea cutremurului.

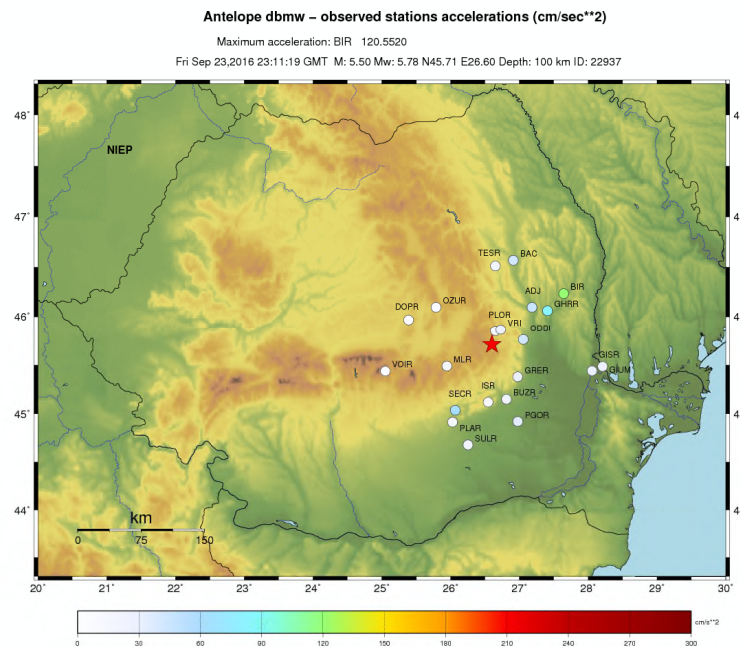


Figura 7. Acceleratiile maxime (PGA) inregistrate in urma producerii evenimentului seismic din 23.09.2016

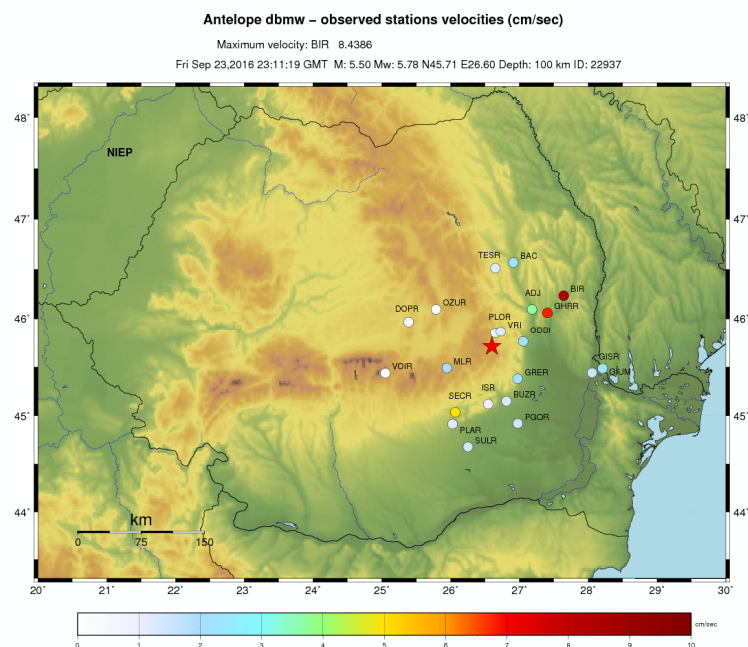


Figura 8. Vitezele maxime inregistrate (PGV) in urma producerii evenimentului seismic din 23.09.2016

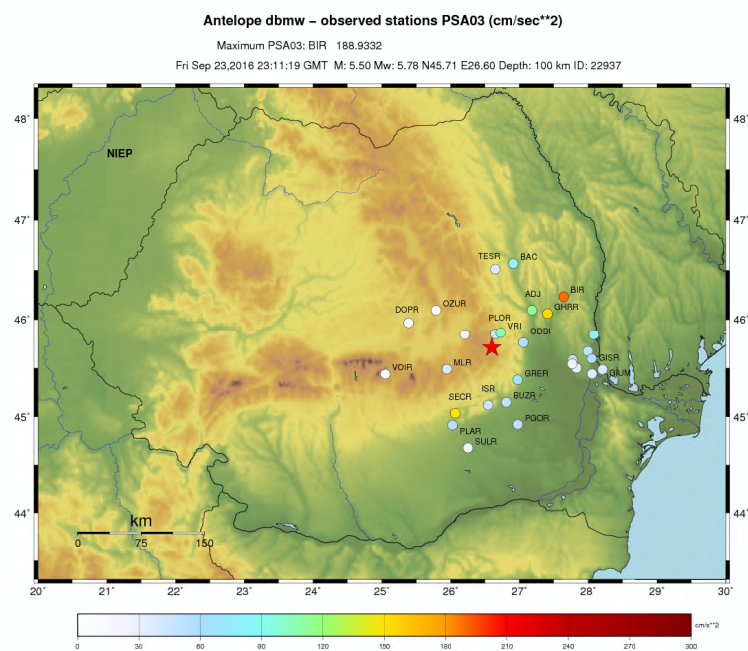


Figura 9. Acceleratiile spectrale inregistrate (PSA03) in urma producerii evenimentului seismic din 23.09.2016

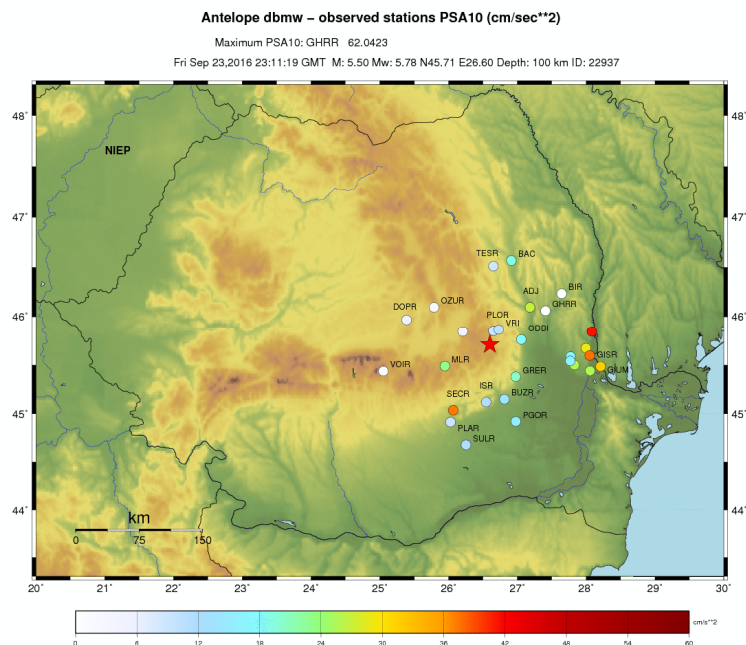


Figura 10. Acceleratiile spectrale inregistrate (PSA10) in urma producerii evenimentului seismic din 23.09.2016

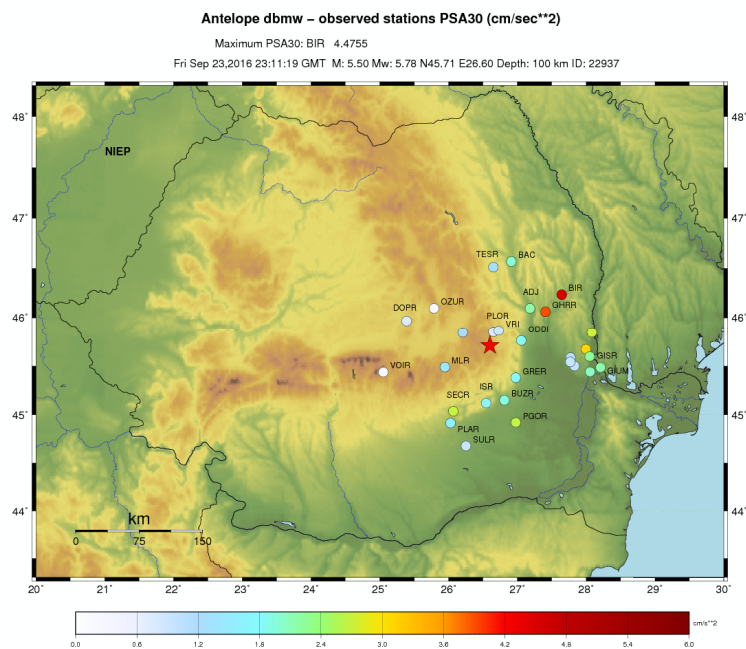


Figura 11. Acceleratiile spectrale inregistrate (PSA30) in urma producerii evenimentului seismic din 23.09.2016

In figurile de mai sus sunt reprezentate valorile maxime ale acceleratiilor si vitezelor inregistrate (PGA si PGV) in urma producerii evenimentului seismic din 23.09.2017, ora 23:11:19 (GMT), impreuna cu valorile acceleratiilor spectrale calculate la 0,3; 1 respectiv 3 s. Aceste harti impreuna cu parametrii sursei seismice (M_0 , M_w , f_0)

sunt incluse intr-un raport care in urma implementarii acestei metodologii in timp real in cadrul Antelope, este disponibil in 5 minute dupa producerea unui cutremur de adancime intermediara in zona seismica Vrancea si apoi poate fi postat pe pagina web a INCDFP si trimis catre inspectoratele pentru situatii de urgenta (IGSU) si agentiiile guvernamentale re sponsabile de managementul impotriva dezastrelor naturale.

Bibliografie:

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

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

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

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

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

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

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

Rezultate

In prezent aceasta metodologie este folosita cu succes in analiza evenimentelor seismice de adancime intermediara produse in zona seismica Vrancea si ofera estimari stabile ale magnitudinii din moment seismic chiar si la cutremurele majore, lucru dovedit prin rezultatele obtinute in urma producerii celor doua evenimente seismice importante din 2016 cu Mw=5.7 (toata procedura pana la trimiterea raportului final a durat aproximativ 5 minute).

In urma testarii acestei metodologii de estimare a magnitudinii moment si a parametrilor miscarii solului din date de acceleratie pentru cutremurele de adancime intermediara din zona Vrancea, se constata ca rezultatele obținute sunt in concordanta cu solutiile oferite de sistemul de achizitie si procesare a datelor in timp real Antelope dar si cu rezultatele furnizate de Sistemul de Avertizare Rapida (EWS).

Stadiul realizării obiectivului fazei

Obiectivul a fost realizat integral

Concluzii

Magnitudinea obtinuta din momentul seismic aproximează foarte bine magnitudinea cutremurelor, prin urmare aceasta metodologie s-a dovedit a fi un mod foarte eficient pentru estimarea rapida si precisa a magnitudinii pentru evenimentele seismice vrâncene.

Au fost detectate in timp real 108 evenimente seismice cu magnitudine moderata ($M_W \geq 2.8$), de adâncime intermediara din zona Vrancea, înregistrate in perioada 2016-2017, inclusiv doua evenimente cu $M_W \leq 5.7$, iar procedura dezvoltata in cadrul acestui proiect a produs rezultate stabile, cu grad ridicat de încredere ce au contribuit la reducerea riscului seismic.

Scara de magnitudine locala M_L tinde sa subestimeze magnitudinea peste pragul de magnitudine $M_L \geq 5.5$, in consecinta rezultatul direct al acestor cercetari a constatat in estimarea in timp real a magnitudinii din moment seismic M_W si a parametrilor miscarii solului din date de acceleratie, scara de magnitudine care nu se satureaza chiar si in cazul producerii unor evenimente catastrofale, reusind astfel sa evitam situatia intrarii in limitare a canalelor de viteza folosite in momentul de fata, in cazul producerii unui cutremur catastrofal. Estimarea in timp real a magnitudinii din moment seismic si a parametrilor miscarii solului pentru cutremurele puternice, prezinta un rol important in reducerea impactului negativ al evenimentelor catastrofale asupra zonelor dens populate si, in special, in reducerea pagubelor la structurile strategice si la sistemele de intretinere (retele de electricitate, apa, conducte de gaze). Folosind datele de la cutremurele puternice vor fi dezvoltate noi tehnici care vor putea evita problema saturarii si vor calcula rapid magnitudinea cutremurelor majore, ceea ce va conduce la o mai buna estimare (solutie stabila) in timp real a magnitudinii cutremurului.

Responsabil proiect
Dr. Craiu George Marius