Contractor: INCDFP Cod fiscal : 5495458

(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 02 01 Proiectul: Cercetări privind îmbunătățirea sistemului de alertare la cutremure prin utilizarea combinata a abordărilor "regionala" si "on-site" Faza 1: Tehnici de estimare rapida a magnitudinii cutremurelor folosind abordarea "on-site"

Termen: 31.05.2016

- 1. <u>Obiectivul proiectului</u>: EVALUAREA SI REDUCEREA RISCULUI SEISMIC PENTRU CRESTEREA REZILIENTEI SOCIETATII
- 2. <u>Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:</u>

Creșterea eficientei sistemul de alarmare la cutremure, prin realizarea de aplicații software noi, care vor integra rezultatele celor doua metodologii "regionala" si "on-site". Prin utilizarea combinata a celor doua metodologii, sistemul de alarmare va fi îmbunătățit, in special pentru "zonele oarbe", zone pentru care notificările la cutremure semnificative, folosind abordarea "regionala", utilizata in cadrul INCDFP, ar fi trimise după ce efectele ar fi simțite. Prin folosirea abordării combinate, posibili utilizatori din "zonele oarbe" ar putea fi notificați in cazul unor cutremure puternice.

# 3. Obiectivul fazei:

Elaborarea si testarea unui algoritm de estimare rapida a magnitudinii

cutremurelor folosind o singura stație seismica sau cele mai apropiate de epicentru pentru cresterea timpului de alarmare.

### 4. <u>Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:</u>

Testarea si dezvoltarea de metodologii automate pentru estimarea rapida a tăriei cutremurelor, folosind primele secunde ale mișcării solului înregistrate

### 5. <u>Rezumatul fazei</u>: (maxim 5 pagini)

Sistemele de alarmare la cutremure (EWS) reprezintă o disciplina relativ recenta in seismologie care îsi datorează existenta dezvoltării unor metodologii automate de procesare a datelor seismice si de predicție a mișcării puternice a solului folosind primele secunde ale înregistrării undelor seismice. Ideea de baza a sistemelor de alarmare la cutremure este aceea ca la o distanta de ordinul câtorva zeci /sute de kilometri de sursa, folosind mijloace de comunicatie si calculatoare extrem de rapide este posibila generarea unei notificări de alarmare cu câteva zeci de secunde înainte de sosirea undelor distructive S sau a undelor de suprafață care se propaga cu 4 km/s sau 3 km/s respectiv. Metoda numita generic "metoda P" (Allen et al., 2012), de exemplu, generează fazele asociate, localizarea si magnitudinea folosind informația disponibila in primele secunde ale undei P înregistrata la un număr mic de stații (4-6) din vecinătatea sursei seismice. Localizarea astfel obtinuta permite calcularea distantei la oricare site de alarmat si, folosind relatii de atenuare, estimarea valorilor maxime ce descriu mișcarea solului (accelerație, viteza sau deplasare) in locații prestabilite. Un astfel de sistem de alarmare este cunoscut in literatura ca sistem regional de alarmare la cutremure (REEWS), deoarece este bazat pe o întreaga rețea seismica ce acoperă o zona activa seismic. O alta schema de validare, propusa (Zhang & Jin, 2013), utilizata in cadrul REEWS din Fujian, China, este capabila sa genereze alerta la cutremure in momentul când unda P este detectata la 3 stații seismice (număr suficient pentru o prima localizare preliminara) iar la una dintre stații s-a putut calcula cu erori minime deplasarea maxima (Pd) pentru a putea estima magnitudinea.

Aceasta abordare este total opusa unui sistem de alarmare "on-site" ce se bazează pe faptul ca întotdeauna undele P vor ajunge înaintea undelor S, si prin utilizarea unei mici ferestre de date după detecția undei P, a depășirii unui nivel de amplitudine sau de perioada predominanta se va emite alerta (Zollo et al.,2010). Acest tip de sistem de alarmare la cutremure este mai puțin precis si poate genera mai multe alarme false, dar este de preferat la distante epicentrale mici ("zone oarbe", in care alerta generata de REEWS ar fi recepționată mult prea târziu).

Cercetările recente in domeniul EWS se ocupa de alegerea parametrului ce descrie cel mai bine mărimea acestuia folosind informația din unda P, de exemplu Pd si  $\tau_c$  (Wu & Kanamori, 2005), de obținerea de relații de atenuare regionale (RAR) pentru unde seismice (Campbell, 1989; Joyner & Boore, 1987; Kenneth et al., 2008), optimizarea algoritmilor de localizare a epicentrului folosind cat mai puține stații (Horiuchi et al., 2006; Satriano et al, 2008; Pinsky & Horiuchi, 2009) si optimizarea REEWS (Oth et al., 2010; Stankiewicz et al., 2013). In ultimele decenii , sisteme de alarmare la cutremure au fost implementate in diferite regiuni ale lumii. In prezent sunt operaționale asemenea sisteme in Mexic (Espinosa-Aranda et al. 2011), Japan (Horiuchi et al. 2005), Taiwan (Hsiao et al. 2009), si Romania (Ionescu et al. 2007, Marmureanu et al. 2010). Alte sisteme sunt in faza de testare si evaluare a performantelor: ElarmS in California (Allen 2007), PRESTo in Italia (Satriano et al. 2010), si EEWS in Turcia, China, Corea de Sud, etc (Figura 1).



Figura 1. Sisteme de alarmare la cutremure din diferite regiuni ale lumii (albastru- sistem operațional; verde- sistem in testare)

Instalarea unui număr mare de stații seismice in cadrul Rețelei Seismice Naționale permite crearea unei baze de date complete, cu înregistrări de calitate ale evenimentelor seismice moderate si foarte puternice, chiar si la distante epicentrale foarte mici. In prezent, Rețeaua Seismica Naționala operează 158 de stații seismice dintre care 121 dintre acestea transmit datele in timp real la sediul INCDFP. In fiecare amplasament seismic sunt folosite digitizoare Quanterra Q330 si Kinemetrics ROCK/ROCK. Toate stațiile seismice in timp real folosesc o rata de 100 de eșantioane pe secunda. La fiecare stație seismica sunt instalați atât senzori de viteza de banda larga (Streckeisen STS2 sau Guralp CMG40T) cat si senzori de acceleratie (model EpiSensor).

In cadrul acestui proiect s-au utilizat nivelelor spectrale ale undei P in vederea obținerii rapide a magnitudinii cutremurelor din zona Vrancea. Algoritmul de determinare a nivelului spectral a utilizat o fereastra de 3 secunde de la detecția undei P, înregistrată pe canale de accelerație in zona epicentrala. După, s-au determinat FFT si spectrul din deplasarea obținuta prin dubla integrare a înregistrărilor originale. S-a calculat M<sub>0</sub> utilizând relația de determinare a momentului seismic (Gibowicz & Kijko, 1994) si M<sub>w</sub> utilizând formula Hanks si Kanamori (1979). Următorul pas a fost reprezentat de determinarea unor factori de corecție la stațiile utilizate folosind magnitudinea din catalogul seismic ROMPLUS. Abordarea aceasta permite estimarea rapida a magnitudinii moment folosind doar înregistrările de la stațiile cele mai apropiate de epicentru.

Metodologia folosita pentru determinarea  $M_w$  este bazata pe aproximarea palierelor spectrale, propusa de Andrews (1986):

$$\Omega_0 = 2\left(\frac{\kappa^3}{J}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (1),$$

unde J si K au fost calculați conform relației lui Snoke (1987):

$$J = 8\pi^2 \left( \frac{1}{3} |U(f_1)|^2 f_1^3 + df \sum_{f=f_1+1}^{f_2-1} |U(f)|^2 f^2 + |U(f_2)|^2 f_2^3 \right), (2)$$
$$K = 2 \left( |U(f_1)|^2 f_1 + df \sum_{f=f_1+1}^{f_2-1} |U(f)|^2 + \frac{1}{3} |U(f_2)|^2 f_2 \right) (3),$$

iar  $f_1$  si  $f_2$  reprezintă limitele lățimii de banda a instrumentului seismic iar U(f) reprezintă deplasarea maxima a solului in domeniul de frecventa respectiv.



Fig. 4. Exemple ale estimarilor palierelor spectrale folosind ferestre de timp de 3 secunde (dreptunghiurile rosii din seismograme) la statia MLR pentru trei evenimente seismice diferite 22 Noiembrie 2014 M5.7 adancime 40km, 6 Martie 2006 M4.7

adancime 152km, 11 Mai 2012 M3.8 adancime 157km. Liniile orizontale ingrosate reprezinta palierul spectral, in timp in ce liniile punctate reprezinta limitele largimii de banda folosite in acest studiu.

Momentul seismic a fost calculat prin folosirea metodei propusa de Boore and Boatwhright (1984) care foloseste frecventele joase pentru deplasarea maxima. Magnitudinea din moment seismic (4) a fost intodusa pentru prima data de (Hanks si Kanamori, 1979) si calculata din momentul seismic (5)  $M_0$  [Nm] (Gibowicz & Kijko, 1994):

$$M_{w} = \frac{2}{3} \log(M_{0}) - 6 \quad (4)$$
$$M_{0} = \frac{4\pi\rho \alpha^{8} R \Omega_{0}}{F_{c} R_{c} S_{c}} \quad (5);$$

unde  $\rho$  reprezintă densitatea in sursa seismica,  $\alpha$  reprezintă viteza undelor S in sursa, R este distanta de la sursa la stația seismica, Sc reprezintă corectia la statie, Rc este corectia la suprafata libera, iar Fc este coeficientul de radiație al undelor P.

Au fost analizate 96 de evenimente seismice produse in perioada 2005 – 2012 la adâncimi de pana la 155 km. Au fost folosite 1719 de înregistrări de accelerații pe trei componente cu o rata de eșantionare de 100 de pachete pe secunda (Fig.6).



Fig.5. Compararea influentei ferestrei de timp selectate pentru un eveniment seismic cu M=5.6 inregistrat la statia seismica MLR. In partea superioara a imaginii este ilustrata seismograma componentei de viteza cu lungimi ale inregistrarilor de la 3 pana la 8 secunde incadrate in dreptunghiuri: linia neagra reprezinta fereastra de 3s, linia punctata -4s, linia neagra punctata -5s, linia gri continua – 6s, linia gri intrerupta -7s, linia gri punctata – 8s. Spectrul rezultat cu palierul spectral (linia orizontala

neintrerupta) si domeniul de frecventa (liniile verticale punctate) sunt prezentate in partea inferioara, iar durata inregistrarilor este specificata pentru fiecare imagine. Influenta ferestrei de timp a inregistrarilor asupra estimarilor palierelor spectrale nu este mare, dar dupa cum se poate observa cele mai bune estimari sunt in cazul ferestrei de timp de 5 secunde.



Fig.6. Distributia spatiala a evenimentelor seismice inregistrate in zona seismica Vrancea analizate in acest studiu (2005-2013)

Rezultatele au fost obținute prin folosirea a trei strategii diferite:

- Abordarea 1 folosește palierul spectral la fiecare stație seismica pentru determinarea momentului seismic pentru toate înregistrările disponibile, apoi face media M<sub>0</sub> pentru fiecare eveniment seismic si implicit media M<sub>w</sub> pentru fiecare eveniment analizat.
- Abordarea 2 consta in modificarea primei metodologii in limitarea estimării mediei momentului seismic M<sub>0</sub> doar la stațiile seismice cu un unghi de incidenta (calculate din normala la suprafață, si mai mic de 30 de grade) apoi magnitudinea din moment seismic M<sub>w</sub> este calculata din momentul seismic mediu calculat pentru acest eveniment.
- Abordarea 3 se bazează pe estimările individuale ale M<sub>W</sub> pentru fiecare stație cu un unghi de incidenta obtuz al undelor P si apoi calculează magnitudinea medie pentru acest eveniment.





tuturor inregistrarilor disponibile – Abordarea 1



Fig.8. Rezultatele estimarii M<sub>w</sub> folosind momentul seismic mediu calculat prin folosirea

statiilor seismice cu un unghi de incidenta- Abordarea 2



## Fig.9. Rezultatele estimarii Mw prin folosirea momentului seismic calculat la statiile cu un

#### unghi de incidenta- Abordarea 3

O observație generala este ca deși exista mult mai multe evenimente seismice cu magnitudini cuprinse intre 3.6 si 4.4 (aproximativ 90% din datele folosite), pe măsură ce magnitudinile mai mari sunt dispersate, fitarea liniara nu este suficient de precisa pentru a produce coeficienți de calibrare robuști. Mai departe ne propunem sa împărțim datele in unități de o zecime grade de magnitudine si apoi sa realizam un fit linear care sa poata fita foarte bine aceste valori. Intervalul general de estimare se situează pana in 0.5 grade de magnitudine.

#### REFERINTE

- 1. Allen RM, Baer G, Clinton J, Hamiel Y, Hofstetter A, Pinsky, V, Ziv A, Zollo A (2012). Earthquake early warning for Israel: recommended implementation strategy, GSI/26/2012 or GII 500/676/12 reports, December 2012. GSI and GII, Jerusalem
- Andrews, D.J. (1986) Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. In: S. Das, J. Boatwright and C.H. Sholtz (eds.), Proc. 5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics, American Geophysical Union, Washington, D.C., 259-267
- Boore, D. M., Boatwhright, J (1984), Average body-wave radiation coefficients. Bull. Seism. Soc. Am. 74, 1615-1621
- 4. Campbell KW (1989). The dependence of peak horizontal acceleration on magnitude, distance and site effects for small magnitude earthquakes in California and Eastern North America. Bulletin of the Seismological Society of America, 79:1311-1338
- Espinosa-Aranda JM, Cuellar A, Rodriguez FH, Frontana B, Ibarrola G, Islas R, Garcia A (2011). The seismic alert system of Mexico (SASMEX): progress and its current applications. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31:154–162
- 6. Gibowicz, S.J., Kijko, A., An Introduction to Mining Seismology (Academic Press, San Diego 1994)
- 7. Hsiao NC, Wu YM, Shin TC, Zhao L, Teng TL (2009). Development of earthquake early warning system in Taiwan. 36, L00B02, doi: 10.1029/2008GL036596
- Ionescu C, Boese M, Wenzel F, Marmureanu A, Grigore A, Marmureanu G (2007). An early warning system for deep Vrancea (Romania) earthquakes. In: Earthquake early warning systems. Springer, Berlin, pp 343–349
- Joyner WB, Boore DM (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics II, GT DIV/ASCE, Utah, June 27-30, 43-102
- 10. Mărmureanu A., Ionescu C., Cioflan C.O., Advanced real-time acquisition of the Vrancea earthquake early warning system, Soil Dynamics and Earthquake Engeneering (2010), doi 10.1016/j.soildyn.2010.10.002
- 11. Pinsky V, Horiuchi S (2009). Hypocenter location of mixed events in real-time processing systems. Journal of Seismology, 13(4):589-600

- 12. Oth A, Bose M, Wenzel F, Kohler N, Erdik M (2010). Evaluation and optimization of seismic networks and algorithms for earthquake early warning—the case of Istanbul (Turkey). Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 115:B10311
- 13. Satriano C, Lomax A, Zollo A (2008). Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning. Bulletin of the Seismological Society of America, 98:1482–1494
- 14. Stankiewicz J, Bindi D, Oth A, Parolai S (2013). Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan. Journal of Seismology, 17:1125–1137
- 15. Wu YM, Kanamori H (2005). Rapid assessment of damaging potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 95:1181–1185
- 16. Zhang Y, Zhang J, Huang Z, Lin C, Wang S (2013). Site correction of ground motion in Fujian area. Earthquake Science, 26(1):55-66
- 17. Zhang H, Jin X (2013). Probabilistic earthquake early warning times in Fujian Province. Earthquake Science, 26(1):33–41
- Zollo A, Amoroso O, Lancieri M, Wu YM, Kanamori H (2010). A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks. Geophysics Journal International, 183:963–974

# <u>6.</u> <u>Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului</u>

Metodologia studiata permite o estimare rapida a magnitudinii moment a cutremurelor puternice înregistrate de Rețeaua Seismica Națională si va fi implementata in timp real după realizarea unei aplicații software ca va permite detecția si utilizarea metodologiei menționate. Aceasta aplicație software va fi dezvoltata si implementata in etapa următoare.

Pe durata acestui proiect s-au trimis 2 articole spre publicare cu menționarea acestui proiect la "acknowledgement":

 FAST MOMENT MAGNITUDE FOR LOCAL EVENTS USING STRONG MOTION DATA, Marius Craiu, Antonella Gallo, Giovanni Costa, Alexandru Marmureanu, Andreea Craiu, SGEM Bulgaria, acceptat  Fast Moment Magnitude determination from P-wave trains for Bucharest Rapid Early Warning System (BREWS), Grzegorz Lizurek, Alexandru Marmureanu, Jan Wiszniowski, Pure and Applied Geophysics, in evaluare

> Responsabil proiect Alexandru Marmureanu