

**Anexa nr. 10 la Contract nr. 31N/2019**

**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 19080102 : Cercetari avansate privind factorii care contribuie la riscul seismic pe teritoriul Romaniei in contextul interactiunii multiple litosfera, hidrosfera, atmosfera, ionosfera.**

**Faza 15. Analiza dispersiei undelor Rayleigh inregistrate la statile seismice de pe teritoriul Romaniei**

**Termen de incheiere a Fazei: 29 aprilie 2022**

**1. Obiectivul proiectului:**

Proiectul „**Cercetări avansate privind evaluarea hazardului și riscului seismic în vederea creșterii rezilienței la cutremure. Provocari in intelegerea dinamicii Pamantului**” propune o investigație multidisciplinara, complexă si intercorelata a fenomenelor care au loc în sistemul cuplat Litosfera-Hidrosfera-Atmosfera-Ionosfera, pentru modelarea fenomenelor tectonice si a proceselor seismice si identificarea relatiei spatio-temporale dintre structura geologica, tensiunile crustale, potentialul seismogen, în scopul descifrarii conexiunilor complexe dintre fenomenele tectonice si efectele lor asupra campurilor geofizice masurabile la suprafata Pamantului. Proiectul urmareste totodata si modelele de propagare ale undelor seismice si estimarea efectelor acestora la

suprafata Pamantului, prin calcularea/masurarea deformarilor si deplasarilor crustei si a interactiunii sol-structuri construite in scopul evaluarii hazardului si reducerii riscului la cutremur, dar si a altor fenomene secundare asociate acestuia (tsunami). Acest proiect va aborda fenomenul seismic in interconexiune cu fenomenele generate de sistemele litosfera, hidrosfera, atmosfera si ionosfera in scopul diminuarii riscului, tinand cont de noile metode si procedee aplicabile la aceste sisteme cuplate, incercand sa raspunda provocarilor complexe de natura stiintifica si practica pe care dinamica Pamantului le ridica, in vederea cresterii rezilientei la cutremure.

Proiectul este structurat pe doua directii mari: „D1. Cercetari avansate privind factorii care contribuie la riscul seismic pe teritoriul Romaniei” si „**D2. Cercetari complexe ale interactiunii litosfera, hidrosfera, atmosfera, ionosfera**”, ce fac parte integranta din obiectivul major „Cercetări avansate privind evaluarea hazardului și riscului seismic în vederea creșterii rezilienței la cutremure. Provocari in intelegerea dinamicii Pamantului”, al Strategiei de dezvoltare a Institutului National de CD pentru Fizica Pamantului (INCDFP).

In cadrul Directiei D2, Proiectul O2.2, **“Studii seismice asupra structurii si deformarii mantalei superioare sub orogenul Carpathic din Romania”**, este constituit din 3 Faze (vezi Tabelul urmator)

O2. 2	“Studii seismice asupra structurii si deformarii mantalei superioare sub orogenul Carpathic din Romania”		
Nr.	Faza	Denumire Faza	Rezultate
1.	Faza 15	Analiza dispersiei undelor Rayleigh inregistrate la statile seismice de pe teritoriul Romaniei	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizarea unei baze de date de viteze transversale, a distributiei lor in functie de frecventa si azimut in vederea analizei propagarii undelor seismice in medii heterogene si anisotrope</li> <li>- Indicatori rezultate: prezentari conferinte, lucrari publicate</li> </ul>
2.	Faza 26	Estimarea structurii seismice isotrope a mantalei superioare obtinuta prin tomografie seismica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversia dispersiei undelor Rayleigh pentru a estima variatia vitezelor transversale cu adancimea</li> <li>- Maparea 3D la cea mai inalta rezolutie verticala a structurilor seismice din mantaua superioara din Romania</li> <li>- Investigarea zonelor heterogene de sub Orogenul Carpathic asociate cu subductia si ruperea slabului Vrancea</li> </ul> <p>Indicatori rezultate: prezentari conferinte, lucrari publicate</p>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Imbunatatirea rezolutiei tomografiei seismice si reducerea artefactelor numerice prin adaugarea analizei distriutiei in azimut a vitezelor de faza a undelor Rayleigh in procesul de inversie</li> <li>- Maparea 3D a structurilor seismice anisotrope din crusta si manta pe teritoriul Romaniei</li> <li>- Interpretarea anisotropiei in contextul deformarii si conveciei mantalei in interiorul si in jurul slabului Vrancea</li> <li>-Investigarea cuplarii reologice intre litosfera si astenosfera, prin compararea cu deformarea crustala din date GPS si a miscarii absolute a placii Est Europene</li> <li>-Indicatori rezultate: prezentari conferinte, lucrari publicate</li> </ul>
3.	Faza 38	Estimarea deformarii mantalei prin analiza anisotropiei seismice din unde Rayleigh	

Proiectul **“Studii seismice asupra structurii si deformarii mantalei superioare sub orogenul Carpathic din Romania”** prin cele 3 faze (15, 26 si 38) propune o investigatie complexa a fenomenelor geodinamice din interiorul litosferei si astenosferei asociate cu formarea orogenului Carpathic la marginea cratonului Est European si cu generarea cutremurelor de adancime intermediara din zona seismica Vrancea. Cratonii sunt vestigii ale continentelor primordiale formate in Precambrian ( $>500\text{Ma}$ ) si au proprietati reologice si seismice distincte fata de blocurile litosferice formate in era Phanerozoica. Investigarea marginii lor si a modificarii termochimice prin coliziuni cu noi placi conduse de catre curentii astenosferici, soldate cu subductie si seismicitate postcolizionala poate furniza informatii fundamentale despre comportamentul cuplat astenosfera-litosfera si mecanismul cutremurelor in aceste situatii tectonice aparte. Teritoriul Romaniei este traversat de o granita geologica majora numita TESZ (Trans-European Suture Zone) care delimita teritoriile formate in Precambrian fata de portiuni litosferice mai tinere. TESZ demarheaza marginea cratonului Est European si a fost implicata in coliziunea cu multiple microplaci in timpul Miocenului, soldata cu formarea orogenului Carpathic si cu subductia marginii pasive a cratonului la care era atasat un brat al fostului ocean Tetis. Coliziunea sa finalizat acum  $\sim 11\text{ Ma}$  si litosfera subdusa a suferit rupere progresiva de-a lungul Carpatilor Orientali care continua si astazi in zona de curbura a Carpatilor, unde blocul Vrancea se afla intr-un proces activ de extensie si rupere, producand cutremure devastatoare dese. Imagistica seismica este cea mai buna metoda la momentul actual care poate furniza informatii despre arhitectura interna a acestui complex tectonic, cat si despre deformarea activa a placilor si a astenosferei de dedesubt, un agent fundamental care faciliteaza orogeneza, deformarea litosferei imlicate in subductie si fracturarea activa a blocului litosferic reminiscent Vrancea. Imagistica seismica se imparte in multiple domenii, in functie de zona de adancime vizata, de rezolutie, si de proprietatile care se doresc a fi studiate. Pentru imagistica litosferei si astenosferei, cele mai indicate tehnici cuprind analiza undelor Love si Rayleigh, unde seismice “de suprafata” care au o rezolutie verticala excelenta in zona de adancime 0-400 km. Viteza acestor unde este sensibila la schimbarile de densitate,

temperatura si continut de apa din roci in diverse masuri, dar si a stresului tectonic care orienteaza anumite minerale in directia curentilor astenosferici sau a deformarii interne din litosfera. Aceste unde sunt dispersive, viteza lor variind de asemenea cu perioada undei. Intrucat undele cu perioade mai scurte se propaga la adancimi mai mici si undele cu perioade mai lungi penetreaza zone mai adanci, se poate exploata favorabil proprietatea lor dispersiva. Fiecare perioada este deci asociata unui interval de adancime la care unda este sensibila, iar variația vitezei în fiecare punct de latitudine-longitudine reflectă proprietatile fizico-chimice ale mediului de propagare. Astfel, imagistica seismica cu unde Love și Rayleigh oferă informații fundamentale despre structura litosferică și astenosferică în zona de coliziune Carpată și a blocului seismogen Vrancea care să descreve deformarea astenosferelor ambientale. Aceste informații nu pot fi obținute prin observații directe, intrucât nu există tehnologia necesară esantionării directe a rocilor la asemenea adancimi. Proiectul va crea deci o pontă între fenomenele geodinamice, structura fizico-chimică a blocurilor litosferice de diferite varste geologice, și seismogeneza intermediara postcolizională în contextul tectonic regional al României, prin aplicarea celor mai adecvate și mai noi metode de imagistica seismica.

## 2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Dezvoltarea cercetărilor avansate privind evaluarea cu metode specific seismologice, geotehnice, fizice și matematice a factorilor care contribuie la riscul seismic pe teritoriul României pentru a asigura creșterea rezilientei societății umane la cutremure. Se vor dezvolta modele de propagare ale undelor seismice și estimă efectele acestora la suprafața Pamantului prin calcularea/masurarea deformarilor și deplasărilor crustei și a interacțiunii sol-structuri construite, în scopul evaluării hazardului și reducerii riscului la cutremur, dar și a altor fenomene secundare asociate acestuia (tsunami). Din analiza înregistrărilor de mișcări puternice ale cutremurelor vrâncene de magnitudine moderată și mare se va investiga variabilitatea observată în distribuțiile spațiale ale mișcării seismice a terenului. Se va implementa o nouă metodologie prin abordări noi de evaluare a hazardului seismic folosind factorii neliniari de amplificare spectrală, în funcție de magnitudinea cutremurului și de condițiile locale ale amplasamentului seismic. Se vor realiza hărți de expunere și vulnerabilitate seismică, precum și cu estimări de pagube pentru scenarii seismice reprezentative. Îmbunătățirea capabilităților de estimare a pagubelor directe și indirecte generate de cutremur în România se va realiza în tip aproape real și pentru scenarii reprezentative. Calculul parametrilor sursei tip falie, estimarea activității seismice se vor realiza prin parametrizări stohastice a evenimentelor seismice cu implementarea de tehnici TMS (tempo, magnitudine, spațiu). Identificarea și ierarhizarea parametrilor de interes ingineresc se va face în funcție de gradul influenței seismului asupra integrității clădirii. Se vor propune norme metodologice coerente de monitorizare a stării de sănătate și integritate a construcțiilor. De asemenea se are în vedere dezvoltarea cercetărilor complexe privind interacțiunile multiple din sistemul complex litosfera,

hidrosfera, atmosfera, ionosfera in scopul identificarii corelatiilor intre fenomenele ce au loc in focarul cutremurelor de Pamant si semnaturile acestor fenomene la suprafata Pamantului, in Atmosfera si in stratele inferioare ale ionosferei. Se vor realiza analize multiparametrice si multi statie a campurilor geofizice cu potential precursor seismic avandu-se in vedere standardizarea datelor in vederea asigurarii calitatii. Printre rezultatele cercetarilor se vor regasi si harti geologice si harti geo-tectonice pentru zonele studiate, harti macroseismice pentru cutremurele recente cu  $M>5.0$  si microzonarea in intensitati a unor orase din zona extracarpatica.

Rezultatele preconizate pentru atingerea obiectivului D2/O2 in cadrul Proiectului **“Studii seismice asupra structurii si deformarii mantalei superioare sub orogenul Carpatic din Romania”** includ o serie de pasi necesari pentru a realiza o imagine seismica a intregului sistem tectonic. Obiectivul final din punct de vedere tehnic este obtinerea unei baze de date de viteze transversale, a distributiei lor in functie de frecventa si azimut. Aceste date constituie baza unei analize amanuntite a propagarii undelor seismice in medii heterogene si anizotrope si se pot mai departe interpreta in contextul tectonic complex al zonei de subductie ce a da nastere orogenului Carpatic si existenta slabului seismogen Vrancea. Viteze transversale sunt afectate in masuri diferite de compozitia si aranjamentul mineralogice, temperatura si/sau continutul de apa si deci pot oferi indicii despre structura si fenomenele geodinamice care au loc in litosfera si astenosfera. Acestea se pot interpreta si in coroborare cu alte date geologice si geochimice si pot imbunatati nivelul de intelegerere al seismogenezei postcolozionale asociate cu ruperea litosferei.

Pasii necesari cuprind inregistrarea undelor Rayleigh si Love de catre senzorii seismici care opereaza intr-o banda de frecventa larga (**Faza 15 - Analiza dispersiei undelor Rayleigh inregistrate la statii seismice de pe teritoriul Romaniei**). Aceste unde sunt generate de cutremure de pamant aflate la distante epicentrale de  $<30^{\circ}$  fata de locatia senzorului pentru a oferi un raport semnal-zgomot optim. Undele de suprafata captate digital se proceseaza mai departe printr-un algoritm de analiza in domeniu frecventa-timp, in care amplitudinea maxima este aleasa pe fiecare domeniu de frecventa. Vitezele de grup ale pachetelor de unde se vizualizeaza grafic in functie de domeniul discret de frecventa, obtinandu-se astfel niste grafice viteza-frecventa numite curbe de dispersie. Directia de propagare a undei masurate si analizate poate afecta curba de dispersie obtinuta, stabilindu-se astfel o masuratoare preliminara a anizotropiei. Fiecare pereche cutremur-statie va avea asociata o astfel de curba de dispersie ce reprezinta raspunsul la impuls al mediului dintre statie si cutremur. Realizarea unei baze de date preliminarii a vitezelor de grup din inregistrarea cutremurelor la statii seismice reprezinta pasul primar si fundamental in imagistica seismica cu unde de suprafata si presupune o analiza si o procesare manuala amanuntita a datelor seismice.

Pasul urmator (Faza 26) il constituie inversia curbelor de dispersie, adica trecerea de la variatia vitezelor de grup in functie de frecventa (sau perioada), la variatia vitezelor transversale in functie de adancime. Trecerea de la domeniul frecventa la domeniul adancime se realizeaza printr-o serie de algoritmi numerici care pot varia in functie de valabilitatea puterii de calcul sau timpul alocat inversiei. Inversia poate fi liniara sau non-liniara si poate fi supervizata de utilizator sau ne-supervizata. In acest stadiu intervin numerosi parametri care pot fi ajustati atat inaintea inceperii inversiei (spre exemplu stabilirea unui model de viteze a priori, perturbat iterativ pentru a obtine un model final care sa minimizeze diferentele dintre datele observate si cele sintetice) cat si in timpul inversiei (de exemplu amortizarea inversiei prin fortarea amplitudinii perturbatiilor iterative). De asemenea, intrucat distributia de statii si cutremure nu este ideală, ci depinde de factorul natural, rezolutia modelului final poate sa varieze drastic in functie de acoperirea cu raze in fiecare celula a modelului, fereastra de timp aleasa pentru analiza datelor, ce poate sa cuprinda o perioada aseismica sau in care majoritatea cutremurilor sa fie suboptimal distribuite predominant intr-o anumita regiune. Maparea 3D la cea mai inalta rezolutie verticala a structurilor seismice din litosfera si astenosfera va necesita deci o vasta marja de incercari de tipuri de inversii si ajustari a mai multor combinatii de parametri de catre utilizator. Modelul final este in general ales pe baza curbelor de trade-off intre anumite caracteristici ale modelului (amplitudinile maxime obtinute, amplitudinile relative, sau distributia laterală a amplitudinilor estimate) si valuarea parametrilor din inversie (amortizare, nr de iteratii fortat etc), luand in considerare si cat de realiste sunt valorile obtinute in comparatie cu alte modele seismice de referinta.

Ultima faza a proiectului si cea mai importanta (Faza 38) este introducerea anizotropiei in tomografie. O inversie a vitezelor de grup care nu ia in considerare si variatia in functie de directie poate genera anomalii de viteze ca artefacte numerice. Numeroase studii au aratat ca ignorarea anizotropiei poate creste sau scadea vitezele estimate cu pana la 2%, un procent ce poate face o diferență fundamentală in interpretarea structurilor de adancime. Introducerea anizotropiei in inversie aduce de la sine si mai multi parametri care trebuie adaptati si reglati de catre utilizator si deci o crestere a timpului de procesare si inversie. Totusi, tomografia anizotropa furnizeaza informatii ideale atat despre compozitia chimica, temperatura si continut de apa, cat si despre deformarea activa sau fosila a litosferei si astenosferei. Aceste date pot fi direct comparate cu alte observabile geofizice, spre exemplu vitezele de deplasare ale placilor obtinute din date satelitare, stressul tectonic obtinut prin inversia mecanismelor focale, directiile altor unde sensibile la deformare precum undele SKS, ce pot corobora sau infirma modelul de tomografie. Obtinerea stresului tectonic si a anisotropiei SKS sunt deci obiective auxiliare fundamentale pentru validarea tomografiei anizotrope Rayleigh si Love.

In final, interpretarea tomografiei, stresului tectonic si propagarea undelor SKS in corroborare cu alte date geologice si geofizice, precum varsta orogenului, varsta diverselor pulsuri de compresie

care au afectat placile implicate in coliziune, cronologia eruptiilor de-a lungul orogenului care sunt in directa legatura cu ruperea progresiva a litosferei subduse, modificarea metasomatica a marginii cratonului si implicit a reologiei si densitatii sale, cat si reorientarea curentilor de deformare astenosferici, pot furniza indicii cheie in intelegerea orogenezei Carpatice si a seismogenezei anomalioase postcolizionale din zona Vrancea.

### 3. Obiectivul fazei:

**Obiectivul Fazei 15 - Analiza dispersiei undelor Rayleigh inregistrate la statiile seismice de pe teritoriul Romaniei**, cuprinde realizarea bazei de date de viteze de grup in functie de frecventa si azimut, prin analiza dispersiei undelor Rayleigh si Love generate de cutremure regionale inregistrate la statiile seismice de banda larga de pe teritoriul Romaniei. Acesta presupune procesarea amanuntita a datelor seismice si cuprinde: vizualizarea manuala a seismogramelor la timpii asteptati de sosire ai undelor vizate, inspectia raportului semnal-zgomot si a proprietatii dispersive pentru diagnosticare si selectarea unor ferestre de timp adecvate pentru analiza. Datele sunt apoi procesate folosind programe standard de seismologie (Meier et al., 2004; Rawlinson and Sambridge, 2005), in care seismograma inregistrata este filtrata pe o serie de benzi de frecventa in care se alege de catre utilizator amplitudinea maxima (Vezi Figura 2 din Rezumat).

Fiecare combinatie cutremur-statie corespunde unei seismograme care este analizata astfel manual si genereaza o curba de dispersie individuala, care contine valori ale vitezelor de grup in functie de frecventa si incertitudini asociate fiecarei masuratori. Curbele de dispersie obtinute constituie baza de inversie pentru tomografie isotropa si anizotropa ce se vor desfasura pe parcursul urmatoarelor faze.

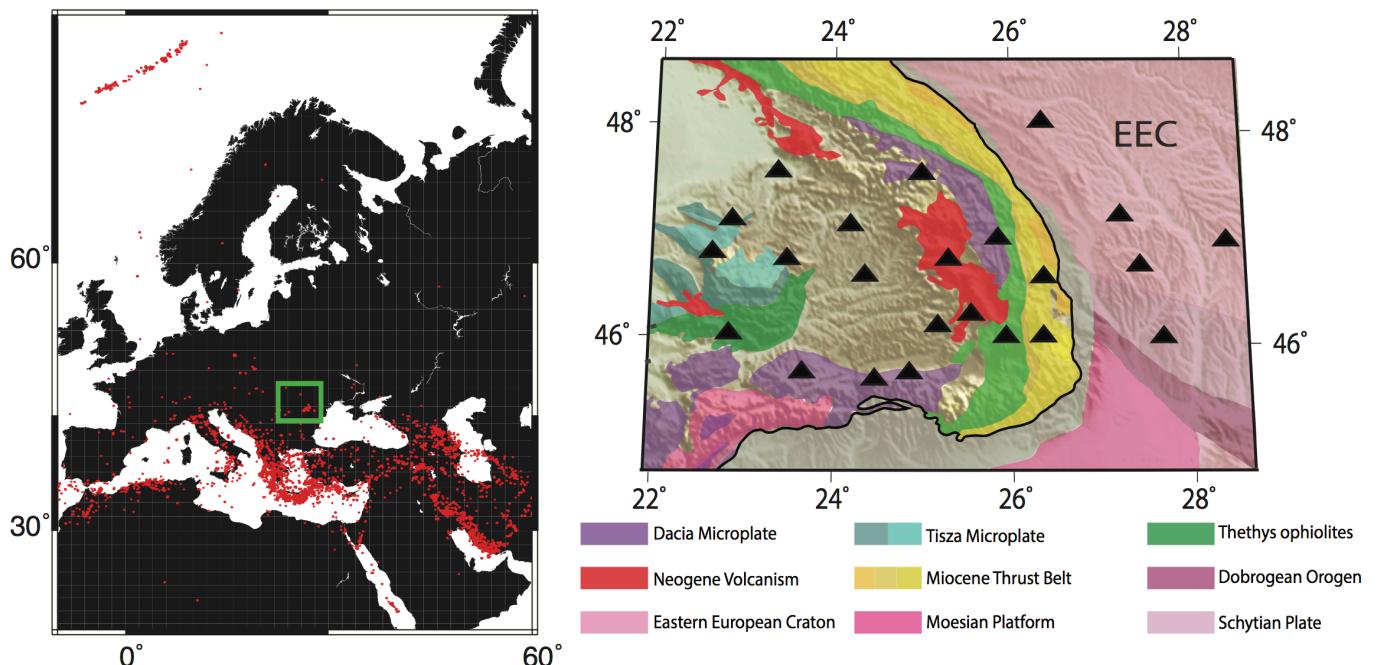
### 4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Pentru atingerea obiectivului, sunt necesare inspectia, analiza si procesarea datelor pe o perioada de minim ~3 ani ce ar cuprinde ~500 cutremure regionale cu magnitudine  $M_w > 4$ , inregistrate la cel putin 20 de statii seismice broadband din Reteaua Seismica Nationala active la momentul producerii cutremurelor. In situatia ideală in care toate statiile inregistreaza cu un raport semnal-zgomot optim semnalele cutremurelor, si undele de suprafata sunt vizibile si au o dispersivitate clara, s-ar putea genera 10,000 de curbe de dispersie. Totusi, dupa inspectia vizuala a seismogramelor, filtrare initiala, inspectia dispersivitatii pentru diagnostic, si analiza in domeniu frecventa-timp, se anuleaza in general peste 85% din datele inregistrate. Daca toate statiile ar fi active permanent in perioada aleasa, numarul curbelor de dispersie ar fi de ~1500. Rezultatul preconizat poate fi totusi si mai mic, intrucat nu toate statiile vor fi active sau vor inregistra acelasi

cutremur cu raport semnal-zgomot suficient pentru detectarea acestor unde, ceea ce poate scadea si mai mult numarul de curbe valide obtinute. De asemenea nu toate cutremurile emit unde de suprafata bine definite, multe dintre acestea atenuandu-se pe parcursul traseului pana la receptor.

##### 5. Rezumatul fazei: (*maxim 5 pagini*)

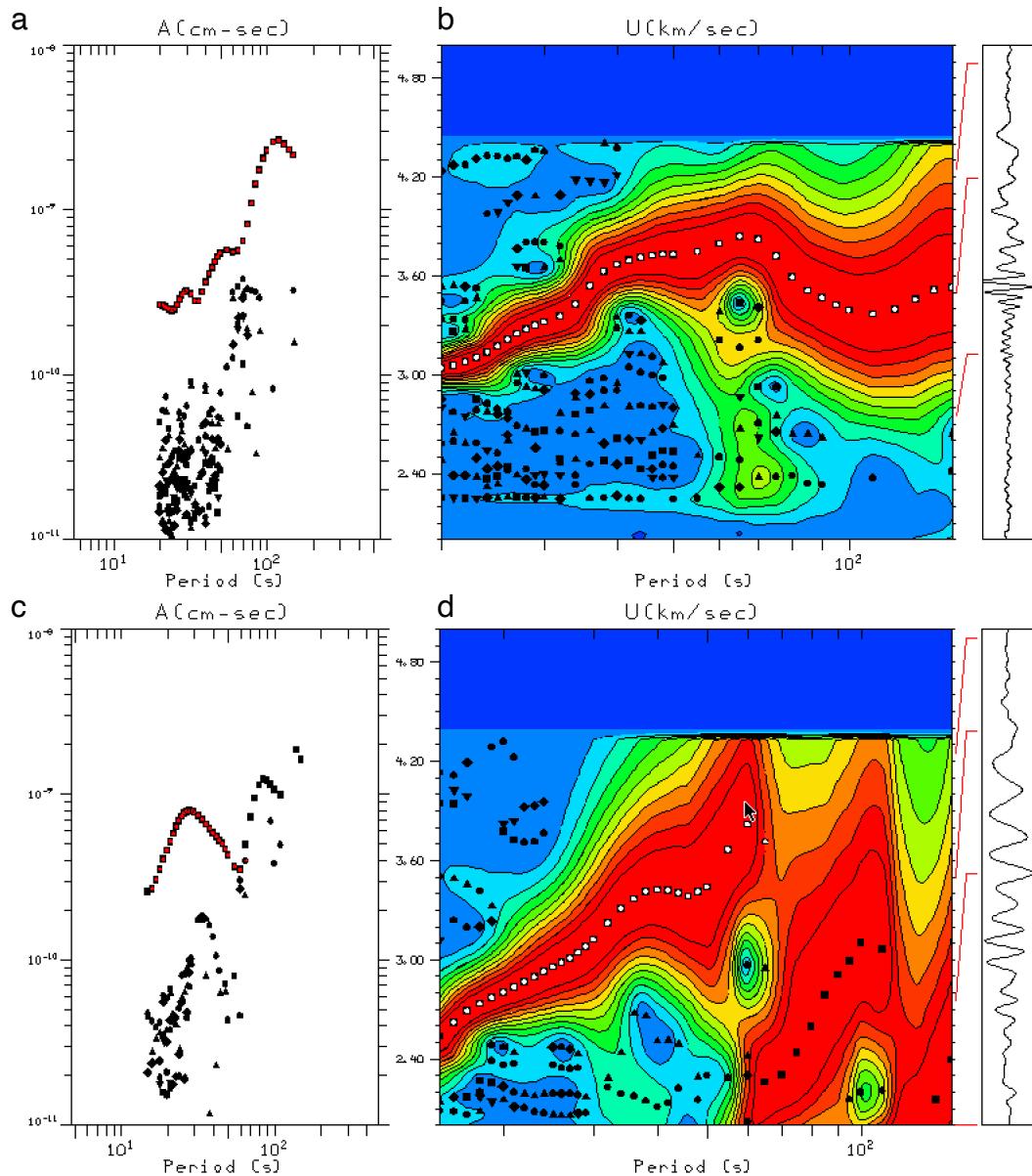
In vederea realizarii unei baze de date de viteze de grup in functie de frecventa, s-au analizat forme de unde de la 4919 cutremure cu magnitudine  $MW > 4$ , la o distanta epicentrala maxima de 3500 km fata de centrul aproximativ al zonei de studiu, cu o longitudine-latitudine de 25E-46N (Figura 1a).



*Figura 1. a. Harta regionala a zonelor seismice circum-Europene ce include epicentrele cutremurelor din perioada 2011-2017 reprezentate de punctele rosii si zona de studiu incadrata de dreptunghiul verde. b. Harta topografica a Romaniei cu unitatile tectonice si geologice majore colorate (vezi legenda) si statile seismice broadband folosite in studiul prezent (triunghiuri negre).*

Formele de unda inregistrate la 23 de statii seismice de banda larga din Reteaua Seismica Nationala (Figura 1b) au fost initial taiate intre 0 s (corespunzand cu timpul de origine al cutremurului) si 3000s, pentru a capta undele dorite. Acestea au fost apoi decimate la o rata de esantionare de 0.5 s, pentru a reduce marimea fisierelor, fara a periclitia semnalul dorit a carui frecventa poate varia intre 15 si 150 s. Raspunsul instrumentului a fost deconvoluat si amplitudinea seismogramrei convertita in unitati de viteza. Componentele seismice Z, N, E au fost rotite in sistemul de referinta al arcului de cerc in functie de azimutul cutremurului fata de statie, obtinand

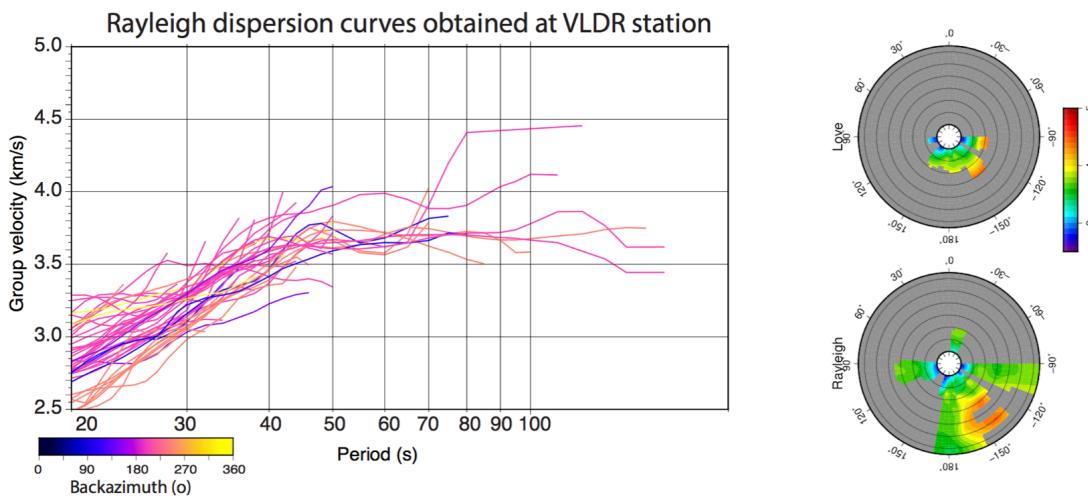
astfel componente Z,R,T. Formele de unda au fost apoi filtrate cu un filtru Butterworth cu doi poli si trei zerouri, cu frecvente de colt de 0.004, respectiv 0.03 Hz.



*Figura 2. a,c: Grafice care arata amplitudinile spectrale modele prezise in unitati cm-s versus perioada undei. Patratele colorate in rosu sunt selectate de catre utilizator. b,d: Panouri colorate care arata energia pachetelor de unde de suprafata in functie de viteza de grup  $U$  in km/s si perioada undei in s. Patratele albe reprezinta amplitudinea maxima a pachetelor de unde alese manual pentru analiza ulterioara. La dreapta figurii colorate se afla seismorama procesata. c-d: Exemplu de procesare a undelor Rayleigh similar cu a-b. In acest caz, energia undelor nu este bine definita decat intr-un interval de frecventa mai redus, probabil datorita interferentei cu un alt cutremur.*

Analiza dispersiei undelor Rayleigh si Love a fost apoi realizata utilizand codul din pachetul de coduri pentru seismologie distribuite in scop academic de catre Saint Louis University (<http://www.eas.slu.edu/eqc/eqccps.html>). Procesarea datelor consta in aplicarea unui filtru multiplu asupra seismogrammei si permite o vizualizare interactiva a datelor in care utilizatorul alege amplitudinea maxima la fiecare frecventa/perioada a modului fundamental al undelor Rayleigh sau Love. Figura 2 arata exemple grafice ale acestor procesari manuale.

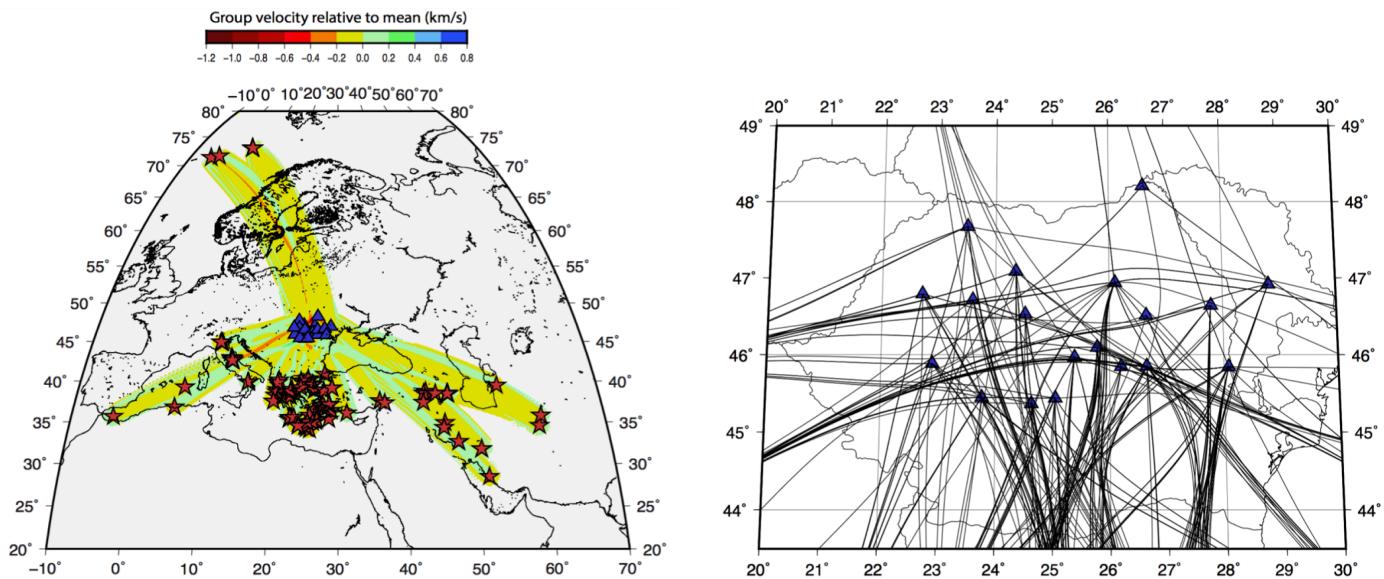
In urma analizei multi-filtru au fost obtinute in total 396 de curbe de dispersie cutremur-statie intr-un interval de perioada intre 5 s si 160 s, de la cutremure cu distanta epicentrala minima 568 km si maxima 3327 km. Figura 3 reprezinta exemple de dispersie procesate din cutremure inregistrate la statia de banda larga VLDR. Notam aici o varietate a vitezelor de grup medii din directii diferite, ceea ce atesta existenta unor heterogeneitati si anisotropii in jurul statiei. Figura 4 arata de asemenea dispersia undelor Love si Rayleigh inregistrate la VLDR in forma unor diagrame polare. Acestea arata clar ca undele Love sunt multe mai greu de captat si intervalul de perioada pentru care pot fi extrase curbele de dispersie este mult mai redus (20-50s) fata de undele Rayleigh.



*Figura 3. Stanga: Curbele de dispersie Rayleigh inregistrate la statia seismica de banda larga VLDR, colorate in functie de azimutul cutremurului. Acestea arata o diferență de viteza de grup marita în cazul cutremurelor dinspre sud-vest, date de cele provenite dinspre sud sau sud-est. Dreapta: Curbele de dispersie Love și Rayleigh inregistrate la aceeași stație, reprezentate polar în funcție de azimutul cutremurului. Culorile reprezintă viteza de grup a undelor în km/s și raza cercului reprezintă perioada undei între 20 și 85s. Notăm intervalul mult mai mic pentru care au fost extrase vitezele de grup ale undelor Love fata de undele Rayleigh.*

Cutremurile care au generat unde de suprafata de calitate din care a putut fi extrasă dispersivitatea sunt reprezentate în Figura 4. Directia de provenienta a undelor de suprafata bine definite este deci predominantă dinspre zona Mediteraneana și zona seismica Iran, desi cateva cutremure din creasta

oceanica nord-Atlantica au generat de asemenea cateva unde de buna calitate. Acoperirea pe teritoriul Romaniei cu raze care se intersecteaza din mai multe directii este esentiala pentru o tomografie cu rezolutie inalta si capabila sa reproduca anomaliiile de viteza din litosfera si astenosfera fara a introduce artefacte numerice. Totusi, acest lucru nu poate fi inca studiat in acest stadiu, intrucat testele care vor demonstra daca anomaliiile produse in tomografie sunt reale sau nu se realizeaza dupa generarea tomografiei, in functie si de parametrizarea modelului si a factorilor de amortizare ai inversiei.



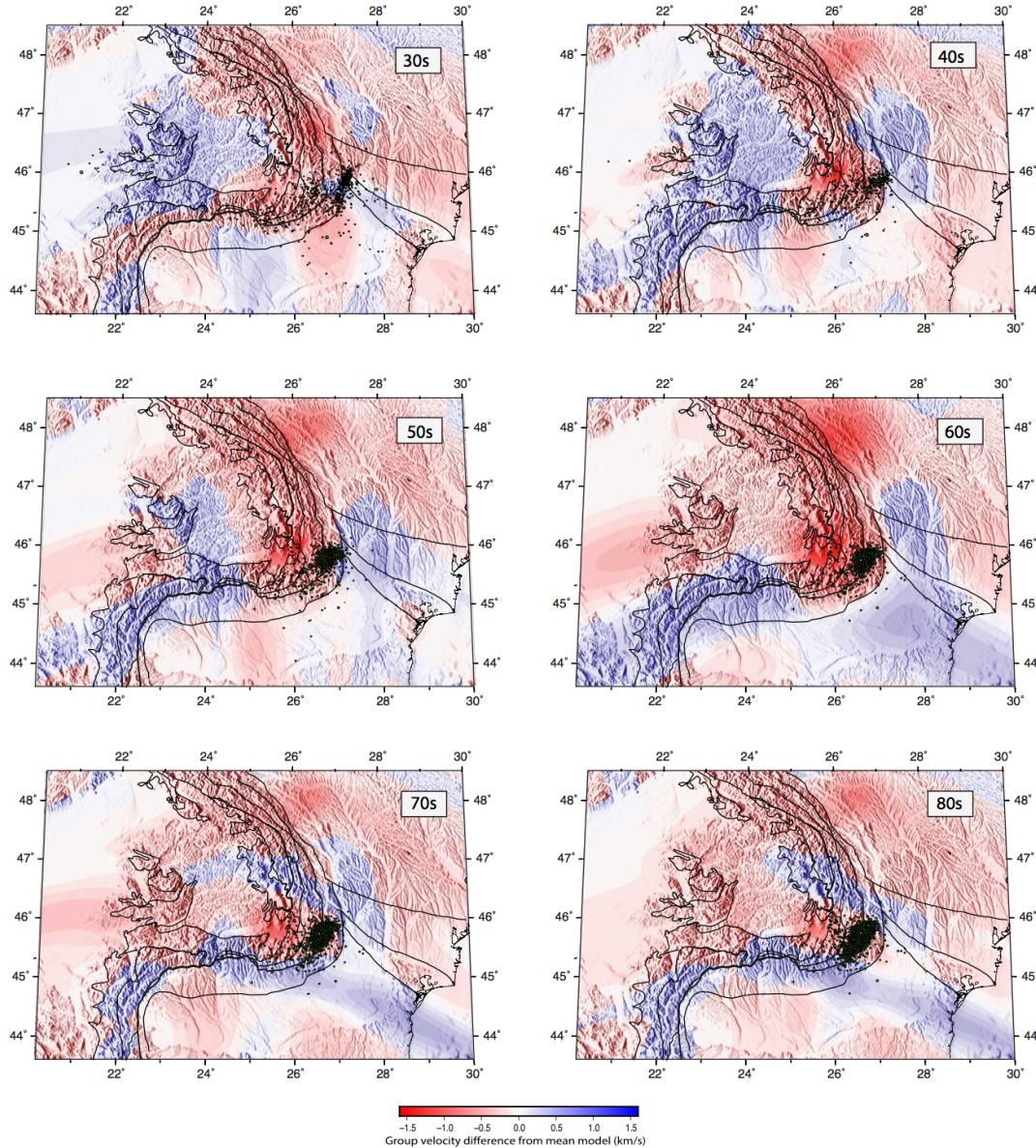
*Figura 4. Stanga: Harta regionala seismică circum-Europeana ce include cutremurile (stele rosii) care au produs unde de suprafață de calitate cu dispersivitate clara, traseul undelor colorat în funcție de viteza de grup medie, înregistrate la statioanele seismice naționale din România (triunghiuri albastre). Dreapta: Harta României ce include statioanele seismice de banda largă folosite în analiza și acoperirea cu raze seismice de la cutremurile din panoul de sus*

O prima incercare a realizarii tomografiei cu viteze de grup a fost efectuata pe baza curbelor de dispersie Rayleigh (Figura 5). Tomografia s-a realizat pe baza codurilor FMST, distribuite in scip academic de catre Nicholas Rawlinson (<http://www.iearth.org.au/codes/FMST/>). Tomografia FMST implica o inversie non-lineara iterativa in coordonate sferice (Rawlinson and Sambridge, 2005). Timpii de sosire ai undelor sunt calculati utilizand un algoritm de “mars rapid”, in care o metoda bazata pe gridarea datelor este utilizata pentru a rezolva equatiile eikonal de propagare a undelor.

Pentru rezolvarea problemei inverse, se utilizeaza o metoda a gradientului care minimizeaza iterativ o functie obiectiva ce contine un termen al datelor reziduale si doi termeni de regularizare ( $\epsilon, \eta$ ). La fiecare iteratie, modelul este perturbat si actualizat conform ecuatiei:

$$\delta m = -A[A^T (G^T C^{-1} d G + e C^{-1} m + \eta D^T D) A]^{-1} A^T y, \quad (1)$$

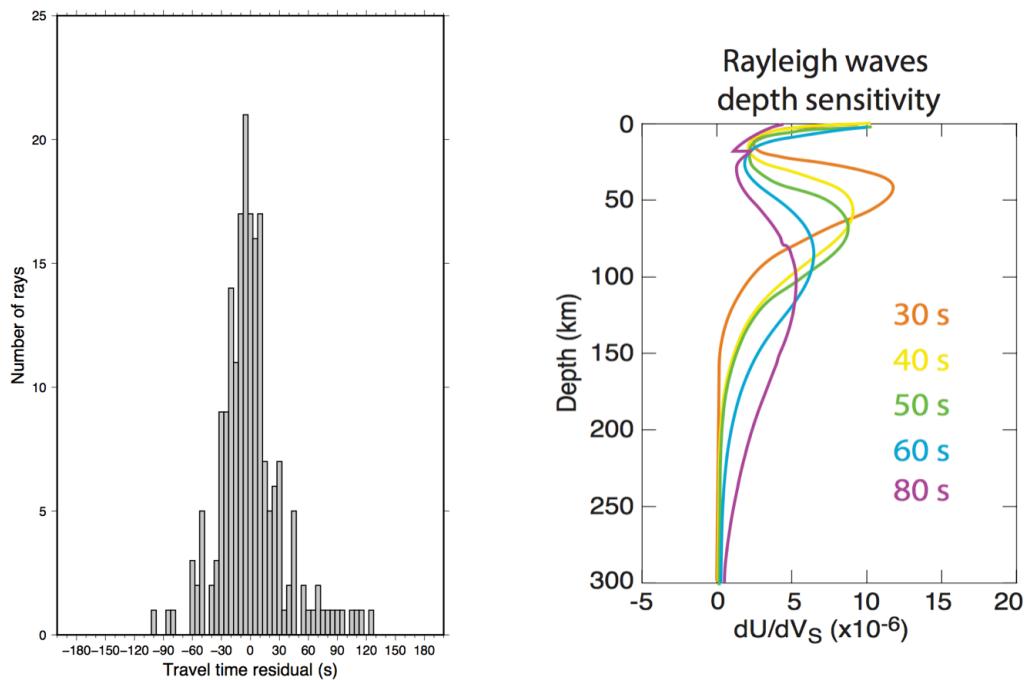
unde A este matricea subspatiului, G este matricea gradientilor timpilor de sosire de grup din modelul m, Cm este matricea covariantă a modelului a priori, D este un operator de amortizare și y reprezintă diferența dintre datele observate și cele sintetice la iteratia curentă.



*Figura 5. Tomografie Rayleigh realizata prin inversiunea curbelor de dispersie pe teritoriul Romaniei. Fiecare panou reprezinta variația laterală a anomalilor de viteza de grup în funcție de media regională, la perioade selectate: 30s-80s. Linile negre reprezintă limitele unităților geologice majore. Punctele reprezintă cutremurile de adâncime intermedie din zona Vrancea la adâncimile aproximative la care undele cu perioadele selectate sunt sensibile: 50km, 60km, 70km, 90km, respectiv 120km.*

Una din modalitatile prin care se poate verifica convergenta inversiei iterative FMST este analiza histogramelor de timpi reziduali, adica diferența între timpii de sosire observati si cei calculati pe baza modelului de tomografie. Figura 6 arata ca inversia deja este convergentă la a 10a iteratie, deoarece este distributia este concentrata în jurul timpului rezidual zero și are o formă Gaussiană. Tomografia FMST nu produce încă vitezele transversale în funcție de adâncime, ci generează variația vitezelor de grup laterale în funcție de perioada, un proxy pentru adâncime.

Astfel, undele cu o perioada de 30s, 40s, 50s, 60s, și 80s sunt sensibile la adâncimi de ~50km, ~60km, ~70km, ~90km, respectiv la ~120km (Figura 7). Amplitudinea sensibilității scade invers proporțional cu perioada și intervalul de adâncime este mai larg cu perioada undei, ceea ce implica o mai mare incertitudine în estimarea heterogeneităților la adâncimi mai mari.



*Figura 6. Stanga: Histograma ce arata timpii reziduali ai undelor de suprafață după inversie. Acestea sunt distribuiti in jurul lui zero, ceea ce arata o convergentă buna a inversiei. Dreapta: Sensibilitatea undelor Rayleigh la diverse frecvențe în funcție de adâncime.*

### Bibliografie selectiva

Meier, T., K. Dietrich, B. Stckhert, and H.-P. Harjes (2004), One-dimensional models of shear wave velocity for the eastern Mediterranean obtained from the inversion of Rayleigh wave phase velocities and tectonic implications, *Geophys. J. Int.*, 156(1), 45–58, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02121.x.

Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2005. The fast marching method: an effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media. *Exploration Geophysics*, 36(4), pp.341-350.

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 tinte stabilite și indicatorii asociati pentru monitorizare și evaluare).

## **Rezultate**

Rezultatul principal al acestei faze este realizarea unei baze de date de viteze transversale, a distributiei lor in functie de frecventa si azimut in vederea analizei propagarii undelor seismice in medii heterogene si anisotrope.

Indicatorii de rezultat sunt: prezenterile la conferinte si lucrările publicate.

## **Stadiul realizarii obiectivului fazei**

Obiectivul fazei a fost indeplinit cu succes, intrucat au fost obinute un numar de curbe de dispersie suficiente realizarii unei tomografii preliminarii cu unde de suprafata Rayleigh.

## **Concluzii**

Pentru a investiga structura litosferica a Romaniei, s-au analizat 4919 cutremure regionale din care au fost extrase curbe de dispersie pentru undele de suprafata Rayleigh, cat si variatia acestora cu directia de propagare, respectiv anizotropia seismica. In urma analizei cu filtre multiple, au fost estimate 396 de curbe de dispersie Rayleigh pentru perioade intre 5 s si 160 s. Traseele undelor Rayleigh au fost utilizate pentru constructia hartilor de viteze de grup cu ajutorul algoritmului "fast marching". Tomografia seismica Rayleigh releva existenta unor heterogeneitati seismice complexe in litosfera. Subliniem diminuarea vitezelor in special in zona Intra-Carpatica comparativ cu zona Vrancea si zonele de orogen. Anomalia de viteza poate indica o subtiere a litosferei accompagnata de migragrea catre suprafata a unei astenosfere cu temperatura ridicata si posibil bogata in fluide, cu efectul scaderii coeficientului de forfecare si implicit al vitezei seismice Rayleigh.

### **Propuneri pentru continuarea proiectului:**

Acoperirea cu unde Love nu a fost suficienta realizarii unei tomografii preliminarii si necesita o procesare a datelor pe o perioada mai extinsa de timp, care sa inglobeze cutremure cu raport semnal-zgomot superior. In continuare se vor realiza teste de checkerboard pentru a evalua rezolutia modelului si capacitatea de a capta anomalii de viteza seismica la marimi suficient de mici pentru a descrie in detaliu structura interna a litosferei si a astenosferei. Este de asteptat ca acoperirea cu raze distribuita inegal sa afecteze rezolutia modelului, ceea ce indica necesitatea analizei unei perioade si mai mari de timp pentru imbunatirea ulterioara a modelului. Tomografia FMST este totusi inca un pas intermediar in obtinerea modelului final, ce va consta in distributia vitezelor transversale cu adancimea. Acestea pot fi asociate direct cu variatii de compoziti chimica, temperaturi sau continut de apa si interpretate in relatie cu posibile mecanisme de generare a cutremurelor intermediare in zone de subductie intra-placa.

**Rezultatele obtinute în acestă fază au fost publicate și prezentate la conferințe științifice internaționale.**

### **Articole publicate:**

Ivan, M., Petrescu, L., Wang, R. (2022). An attenuating, isotropic and heterogeneous uppermost inner core: evidence from global PKiKP-PKIKP amplitude ratio tomography, *Geophysical Journal International*, ggac142, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac142>

Petrescu L., Borleanu F., Placinta A. (2022). Seismic structure of a Tethyan back-arc: transdimensional ambient noise tomography of the Black Sea lithosphere. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 325, 106854

Apostol, B. F., Borleanu F., Cune, L. C. (2022). Seismic source and earthquake parameters from local seismic recordings. Earthquakes of 28.10.2018 and 23.09.2016, Vrancea, Romania, *Romanian Reports in Physics*, 74 (1), 702.

Borleanu, F., Petrescu, L., Enescu, B., Radulian, M., Popa, M. (2021). The missing craton edge: crustal structure of the East European Craton beneath the Carpathian Orogen as revealed by double-difference tomography”, *Global and Planetary Change* (Special Issue), Volume: 197 , Article Number: 103390.

Petrescu L., Borleanu F., Radulian M., Ismail-Zadeh A., Matenco L. (2021) Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: insights into intermediate-depth seismic nests in locked collisional settings, *Tectonophysics*, 799 Article Number: 228688.

Petrescu, L., Stuart, G., Houseman, G., Bastow, I. (2020). Upper mantle deformation signatures of craton–orogen interaction in the Carpathian–Pannonian region from SKS anisotropy analysis. *Geophysical Journal International*, 220(3), 2105–2118.

**Prezentări la conferințe internationale:**

**EGU General Assembly 2022**

Lavinia-Cristina Varzaru and Felix Borleanu, Identifying anthropogenic seismic events generated in western Romania using statistical approaches and novel waveform processing techniques , EGU22-10911 ECS Virtual presentation, ERE5.1, Induced/triggered seismicity in geo-energy applications: monitoring, modeling, mitigation, and forecasting – rezumat acceptat

Placinta A.O, Petrescu L., Borleanu F., Radulian M., Historical earthquake simulation using ambient seismic noise in Vrancea (Romania): preliminary results – rezumat acceptat

Felix Borleanu, Laura Petrescu, Fabrizio Magrini, Anica Otilia Placinta, Bogdan Grecu, Mircea Radulian, and Luca De Siena, Seismic attenuation tomography in the Carpathian-Pannonian region from ambient seismic noise analysis – rezumat acceptat

**JPGU, Japan Geophysical Union Assembly 2022, Japonia 2022**

Ivan M., Petrescu L., An attenuating, isotropic and heterogeneous uppermost inner core: evidence from global PKiKP-PKIKP amplitude ratio tomography, Japan Geophysical Union Assembly 2022 (prezentare orala)

**3ECEES - The Third European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Bucharest, 4-9 September, 2022**

15 rezumate extinse trimise si care sunt in curs de evaluare

**Honorary Symposium, A life dedicated to Earth sciences, the legacy of Professor Corneliu Dinu, 11 April 2022, Vasile Lăzărescu Hall, Faculty of Geology and Geophysics, Bucharest, Romania**

Mircea Radulian – Earthquake properties in the Vrancea seismogenic zone

Petrescu L, Borleanu, F., Radulian, M., Matenco, L. The importance of fluid embrittlement in Vrancea Earthquakes, Corneliu Dinu Symposium 2022, Bucharest

Felix Borleanu – Preliminary results of attenuation tomography in the Carpathian-Pannonian area revealed by ambient seismic noise analysis

**TOPO-TRANSILVANIA WORKSHOP, 12 APRIL 2022, GEOECOMAR, BUCHAREST, ROMANIA, 2022**

Prezentari Petrescu L, Borleanu, F. si Radulian M.

**2021**

**IASPEI 2021**

Petrescu, L., Borleanu, F., Radulian, M., Izmail Zadeh, A., Matenco, L., Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: insights into intermediate-depth earthquake nests in locked collisional settings, IASPEI Meeting, New Delhi, India, 2021 (prezentare orala)

**ESC 2021**

Petrescu, L., Stuart, G., Houseman, G., Bastow. Upper mantle deformation signatures of craton-orogen interaction in the Carpathian-Pannonian region from SKS anisotropy analysis. ESC 38th General Assembly, Corfu, Greece, 2021 (prezentare orala)

**Responsabil Fază**

*Dr. Petrescu Laura*

**Director proiect,**

*Dr. Iren Adelina Moldovan*