

Contractor: Institutul National 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.: 15N/16.03.2018

Proiectul: PN18150101: Aplicarea analizelor moderne in estimarea hazardului la cutremur si tsunami in vederea evaluarii si reducerii riscurilor asociate

Faza 1: Efecte de amplificare a interactiei undelor seismice cu suprafata in prezenta variatiilor topografice

Termen: 6.04.2018

1. Obiectivul proiectului: Aplicarea tehnicilor moderne in estimarea hazardului seismic regional si local si evaluarea si reducerea riscului seismic
2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului: Se vor obtine rezultate specifice privind atenuarea cu distanta a parametrilor de miscare seismica (intensitatea macroseismica) ce vor fi analizate integrat, urmarindu-se evidentierea dependentelor regionale ale caracteristicilor miscarilor puternice si tinandu-se cont de directivitatea sursei si de tipul de mecanism. Pe baza analizelor se vor determina legi de atenuare la scara regionala, aplicabile in estimarea hazardului seismic local/regional. Numarul de parametri independenti in legile de atenuare va fi determinat de cantitatea de date disponibile pentru fiecare regiune (zona) considerata. Datele de iesire din studiile de hazard seismic vor fi extrapolate si folosite in studiul unui hazard secundar, si anume hazardul la tsunami. Se vor evidientia caracteristicile undelor seismice produse de forte localizate in adincime si pe suprafata; analiza ecuatiilor integrale cuplate, metode de rezolvare, estimarea transformatelor Fourier inverse; in special, folosirea functiilor

generalizate (distributiilor) in formularea problemelor cu conditii la limita. Se va face o analiza de risc bazata pe scenarii de hazard seismic, finalizata prin harti cu distributia spatiala a intensitatilor asteptate, a acceleratiilor maxime si spectrale (pentru o perioada selectata) clasificate conform metodologiei de evaluare a riscurilor, pe analiza spatiala a expunerii la fiecare hazard/scenariu calculat exprimat grafic, tabelar si/sau harti GIS si tinand cont de impactul scenariului seismic asupra fondului rezidential construit (SeisDaRo versiunea2) si asupra infrastructurii de transport (GIS). Rezultatul final va fi matricea de risc construita conform metodologiei de evaluare a riscurilor, pentru evaluarea globala si clasificarea/prioritizarea scenariilor calculate, precum si stabilirea rapida a zonelor afectate folosind atat inregistrările seismice cat si aplicatiile web de evaluare a efectelor macroseismice. Scopul final al proiectului consta in realizarea unui studiu complex, dar unitar care va porni de la cercetarile fundamentale pentru evaluarea mecanismelor focale, a parametrilor de sursa si caracterizarea seismotectonica a teritoriului si analiza raspunsului mediului la excitatii seismice si evaluarea efectelor undelor seismice asupra mediului si structurilor de la suprafata Pamantului, aceste date servind ca input in evaluarea hazardului si riscului seismic, estimarea rapida a intensitatii macroseismice si a distrugerilor ce se pot produce.

3. Obiectivul fazei: Obiectivul principal urmarit consta in evaluarea si cuantificarea efectelor seismice cu aplicabilitate la diferite amplasamente, modelarea propagarii undelor seismice prin structuri cu anumite caracteristici, in vederea introducerii lor ca input pentru proiectarea antiseismica.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei: Se vor obtine date si informatii utile in proiectarea obiectivelor civile, industriale, nucleare si militare prin introducerea unui model de suprafata neomogena (cu rugozitati) a pamantului si rezolvarea ecuatiei undelor elastice pentru undele seismice imprastiate de aceasta suprafata intr-o aproximatie de prim ordin in functie de marimea acestor rugozitati. Se vor aduce contributi la realizarea hartilor de microzonare si hazard seismic prin evidentierea efectelor induse de caracteristicile geometrice si elastice ale iregularitatii superficiale. Vor fi oferite oportunitati de transfer tehnologic catre companiile de proiectare si evaluare a riscului seismic in constructii, prin livrarea de noi tehnici, proceduri, protocoale de proiectare, si prin includerea de noi criterii si parametri de evaluare a factorilor critici in evaluarea riscului si a hazardului seismic.

5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

I. Introducere

In aceasta etapa se investigheaza efectul produs de neomogeneitatile superficiale (defecte pe suprafata, iregularitati, rugozitati) asupra propagarii undelor elastic intr-un solid semi-infinit isotrop (semi-spatiu). Modelul presupune o iregularitate, localizata pe suprafata, ce are caracteristici elastice diferite de cele ale solidului (iregularitate neomogena). Este introdusa o metoda perturbationala teoretica in tratarea acestor defecte superficiale mici (in comparatie cu perturbatiile elastice relevante ce se propaga in solid), iar ecuatiile undelor elastic sunt rezolvate intr-o aproximatie de prim ordin. Undele elastice ce se propaga in solid genereaza o forta localizata ce actioneaza pe suprafata, ca o consecinta a iregularitatilor prezente. Se arata ca defectele de pe suprafata genereaza atat unde imprastiate localizate (si doar propagative) pe suprafata (unde bi-dimensionale) cat si unde imprastiate reflectate inapoi in solid. Aceste unde sunt atat longitudinale cat si transversale, iar tipul celor imprastiate inapoi in solid nu depinde de cele incidente. Sunt prezentate efectele date de caracteristicile geometrice si elastic ale iregularitatii. Efectele directionale, anumite efecte de slowness a undelor cat si de atenuare prin imprastiere difusiva, sau possible efecte de rezonanta sunt de asemenea discutate.

In esenta, este introdus un model analitic pentru includerea iregularitatilor pe suprafata in analiza imprastierii undelor elastice. Este dezvoltata o metoda noua de propagare a undelor elastic in solide semi-infinite, bazata pe ecuatii integrale cuplate. Sunt obtinute solutiile acestor ecuatii pentru un solid isotrop semi-infinit pentru toate tipurile de unde ce rezulta.

Imprastieri multiple sunt de asteptat sa se produca in aproximatii de ordin superior. Metoda perturbationala folosita difera de alte metode. De exemplu, in acest caz, procedura este una partial intrinseca, si nu una pur externa ca in aproximatia Born. Introducerea unui strat superficial este echivalenta pina la un punct cu o tratare tip dublu-scala, ceea ce duce la asemanari cu metoda multi-scala.

Alaturi de aceste rezultate, vom arata in aceasta etapa, ca neomogeneitatile de pe suprafata pot produce unde localizate numai propagative pe suprafata, ce pot inmagazina o anumita cantitate de energie, datorita efectelor de localizare. Atenuarea undelor crustale de-a lungul lantului Alpilor, a fost pusa in evidenta, fenomen ce poate fi asociat cu localizarea energiei anumite regiuni de pe suprafata.[39] Metoda expusa aici poate fi extinsa la unde electromagnetice, sau la unde din fluide, ce se propaga intr-un solid semi-infinit cu defecte pe suprafata. A fost recent aplicata, [40] in analiza undelor elastice produse de forte localizate in solide semi-infinite.

II. Prezentarea problemei

1. Neomogeneitati pe suprafata unui solid elastic.

Consideram un solid elastic isotrop de extindere nemarginita de-a lungul directiilor $\mathbf{r}=(x,y)$ si limitat de-a lungul directiei z de o suprafata libera $z=h(\mathbf{r})$, unde $h(\mathbf{r})>0$ este o functie ce urmeaza a fi specificata (si denumita functie de rugozitate). Corpul, ce poate fi asimilat cu un solid semi-infinit (semi-spatiu elastic) cu o suprafata non-planara, ocupa regiunea $z<h(\mathbf{r})$. In acest caz este convenabil sa scriem bine-cunoscutele ecuatii ale unelor elastice libere intr-un solid isotrop in forma:

$$\frac{1}{v_t^2} \ddot{\mathbf{u}} - \Delta \mathbf{u} = m \cdot \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u} \quad (1)^*$$

unde $\mathbf{u}(\mathbf{r},z,t)$ este campul deplasarii, t reprezinta timpul, v_t este viteza undelor transversale, $m = \frac{v_l^2}{v_t^2} - 1 > \frac{1}{3}$ (de fapt 1) [41] si v_l este viteza undelor longitudinale. Intr-adevar, ecuatia (1) da undele

-
- Acesta fiind rezumatul etapei, au fost considerate numai ecuatiile strict esentiale, prezentarea lor completa numerotata consecutiv va fi introdusa in raportul extins

*numerotarea ecuatiilor...

libere transversale ($\text{div } \mathbf{u}=0$) ce se propaga cu viteza v_t si undele libere longitudinale ($\text{curl } \mathbf{u}=0$) ce se propaga cu viteza v_l .

Pentru un solid semi-infinit cu o suprafata descrisa de ecuatia $z=h(\mathbf{r})$ si extinsa in regiunea $z<h(\mathbf{r})$, campul deplasarii poate fi scris ca:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{v}, w)\theta[h(\mathbf{r}) - z], \quad (2)$$

In care \mathbf{v} este in planul (x,y) , w este de-a lungul axei z iar θ este functia step ($\theta(z)=0$ pentru $z<0$, $\theta(z)=1$ pentru $z>0$). Ordinul de marime al neomogeneitatilor superficiale (deviatia de la suprafata planului) este dat de functia $h(\mathbf{r})$, pe care o consideram a fi foarte mica in comparatie cu lungimile de unda relevante de-a lungul axei z a perturbatiilor elastice ce se propaga in solid. Prin urmare putem folosi aproximatia in prim ordin

$$\mathbf{u} = (\mathbf{v}, w)[\theta(-z) + h(\mathbf{r})\delta(z)] \quad (3)$$

pentru ecuatia (2), unde $\delta(z)$ este functia Dirac. Aceasta este aproximatia folosita de obicei in abordarile perturbationale-teoretice.[42-44] Conditii specifice de validitate a acestei aproximatii vor fi discutate in cadrul rezultatelor finale.

Scriem acest camp al deplasarii in forma:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \delta(\mathbf{u}_0) \quad (4)$$

unde

$$\mathbf{u}_0 = (\mathbf{v}_0, w_0)\theta(-z), \quad \delta\mathbf{u}_0 = (\mathbf{v}_0, w_0)|_{z=0}h\delta(z), \quad (5)$$

si consideram ca \mathbf{u}_0 satisface ecuatia (1)

$$\frac{1}{v_t^2}\ddot{\mathbf{u}}_0 - \Delta\mathbf{u}_0 = m \cdot \text{grad} \cdot \text{div}\mathbf{u}_0 \quad (6)$$

cu conditii specifice (anumite) la limita $z=0$. Aceasta ecuatie descrie undele incidente si reflectate inapoi in solid, ce se propaga in solidul semi-infinit cu o suprafata plana $z=0$. Putem vedea ca $\delta(\mathbf{u}_0)$ genereaza un termen sursa localizat pe suprafata (o forta) care poate produce unde imprastiate. Notam campul deplasarii asociat cu aceste unde imprastiate prin \mathbf{u}_1 ; el satisface ecuatia undelor

$$\frac{1}{v_t^2}\ddot{\mathbf{u}}_1 - \Delta\mathbf{u}_1 = m \cdot \text{grad} \cdot \text{div}\mathbf{u}_1 + \frac{\mathbf{f}}{v_t^2} \quad (7)$$

unde forta este data de

$$\frac{\mathbf{f}}{v_t^2} = \frac{1}{v_t^2}\delta\ddot{\mathbf{u}}_0 - \Delta\delta\mathbf{u}_0 - m \cdot \text{grad} \cdot \text{div} \delta\mathbf{u}_0 \quad (8)$$

Ecuatiile (7) si (8) reprezinta un mod diferit de a rescrie ecuatia undelor pentru un solid semi-infinit cu defecte pe suprafata. Pentru undele localizate pe suprafata solutiile ecuatiei (7) sint $\mathbf{u}_1 = \delta\mathbf{u}_0$. Alte solutii sint date de undele imprastiate inapoi in solid de catre defectele superficiale, adica undele generate in ecuatia (7) de catre termenul sursa \mathbf{f} (ca solutie particulara a lui (7)). Generalizam acest model ce contine defecte pe suprafata considerand ca iregularitatea este "neomogena", adica este un mediu elastic omogen cu caracteristici elastice diferite fata de cele ale suprafetei plane a

semispatiului solidului (de exemplu, cu densitate si constante elastic diferite). In acest caz putem introduce vitezele $\bar{v}_{t,l}$ ce difera de cele din solid si sa notam toti parametri cu o bara superioara (de exemplu $\bar{m} = \frac{\bar{v}_l^2}{v_l^2} - 1$), de asemenea diferiti. Forta in acest caz este data de

$$\frac{\bar{f}}{v_l^2} = \frac{1}{\bar{v}_l^2} \delta \ddot{\mathbf{u}}_0 - \Delta \delta \mathbf{u}_0 - \bar{m} \cdot \text{grad} \cdot \text{div} \delta \mathbf{u}_0 \quad (9)$$

Aceste rezultate se exprima convenabil folosind diferentele relative $\eta_{t,l} = 1 - \frac{v_{t,l}^2}{\bar{v}_{t,l}^2}$. Campul deplasarilor \mathbf{u}_1 dat de ecuatia (7) poate fi scris ca $\mathbf{u}_1 = (\mathbf{v}, w)\theta(-z)$.

Putem spune ca, in prezenta unui camp al deplasarilor \mathbf{u}_0 , neomogeneitatile de pe suprafata genereaza o forta $\bar{\mathbf{f}}$, localizata pe suprafata si de acelasi ordin de marime ca functia h ($\delta \mathbf{u}_0 \sim h\delta(z)$). Aceasta forta reprezinta diferenta dintre forta inertiala $\frac{\delta \ddot{\mathbf{u}}_0}{\bar{v}_l^2}$ si forta elastica $\Delta \delta \mathbf{u}_0 + \bar{m} \cdot \text{grad} \cdot \text{div} \delta \mathbf{u}_0$; arata modul distinct in care suprafata raspunde actiunii miscarii elastice in comparatie cu restul solidului. Ecuatia (6) da undele libere incidente si reflectate ce se propaga in semi-spatiu marginit de o suprafata plana, in timp ce ecuatia (7) ne da undele imprastiate produse de iregularitatile suprafetei, ca o consecinta a termenului sursa $\frac{\bar{\mathbf{f}}}{v_l^2}$.

Trebuie sa precizam ca acest model de suprafata neomogena poate corespunde fie unei suprafete ale carei proprietati fizice s-au modificat, fie unui solid care este omogen peste tot, inclusiv pe suprafata rugoasa. Intr-adevar, in primul caz este clar ca variatiile spatiale ale suprafetei rugoase afecteaza proprietatile sale elastice, privita ca un mediu omogen, care acopera semi-spatiul, dar fiind astfel neomogena in comparatie cu restul solidului.

Schema teoretica perturbationala expusa mai sus poate fi scrisa si in alt mod, prin rescrierea ecuatiei (1) intr-o forma ce include viteza v_l a undelor longitudinale si parametrul $1 - \frac{v_l^2}{\bar{v}_l^2} = \frac{m}{1+m}$. Atunci ecuatiile (6)-(8) devin:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_l^2} \ddot{\mathbf{u}}_0 - \Delta \mathbf{u}_0 &= n(-\Delta \mathbf{u}_0 + \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u}_0) \\ \frac{1}{\bar{v}_l^2} \ddot{\mathbf{u}}_1 - \Delta \mathbf{u}_1 &= n(-\Delta \mathbf{u}_1 + \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u}_1) + \frac{\bar{\mathbf{f}}}{v_l^2} \end{aligned} \quad (10)$$

unde

$$\frac{\bar{\mathbf{f}}}{v_l^2} = \frac{1}{\bar{v}_l^2} \delta \ddot{\mathbf{u}}_0 - (1 - \bar{n}) \Delta \delta \mathbf{u}_0 - \bar{n} \cdot \text{grad} \cdot \text{div} \delta \mathbf{u}_0 \quad (11)$$

In raportul extins se va prezenta modul de obtinere al acestor unde libere ce se propaga intr-un semi-spatiu cu o suprafata plana printr-o metoda diferita, care poate fi aplicata apoi in derivarea solutiilor pentru unde imprastiate (ecuatia (7)) si a doua ecuatie (10)).

III. Calculul undelor imprastiate

In cest paragraf se va prezenta rezolvarea ecuatiei (7) si celei de-a doua ecuatie (10) pentru undele imprastiate transversale si longitudinale folosind metoda functiilor Green.

Consideram acum undele incidente transversale impreuna cu undele reflectate transversale si longitudinale corespunzatoare:

$$\mathbf{u}_0 = (\mathbf{u}_0^{(1)} e^{i\kappa_0 z} + \mathbf{u}_0^{(2)} e^{-i\kappa_0 z} + \mathbf{u}_0^{(3)} e^{-i\kappa'_0 z}) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}} \quad (33)$$

(pentru $z < 0$) unde amplitudinile $\mathbf{u}_0^{(1,2,3)}$ satisfac conditiile corespunzatoare de unde transversale si longitudinale. De exemplu, in reprezentarea $\mathbf{u}_0 = (\mathbf{v}_0, w_0)$ avem $\mathbf{k}_0 \mathbf{v}_0^{(1,2)} \pm \kappa_0 w_0^{(1,2)} = 0$ (incluzand si $w_0^{(1,2)} = 0$ corespunzatoare undelor s) si $\frac{\kappa_0 \mathbf{v}_0^{(3)} \mathbf{k}_0}{\kappa_0} \pm \kappa_0 w_0^{(3)} = 0$. In plus, undele date de ecuatia (33) trebuie sa satisfaca conditiile la suprafata. Astfel, pentru o suprafata fixa vom avea $\mathbf{u}_0|_{z=0} = 0$, in timp ce pentru o suprafata libera, impunem conditia $\sigma_{iz} = 0$ unde σ_{ij} este tensorul stress (tensiune) ($i=x, y, z$). Toate aceste conditii fixeaza amplitudinile $\mathbf{u}_0^{(1,2,3)}$, pina la un unghi de incidenta si amplitudinea undei incidente, in termeni de coeficienti de reflexie si unghiuri de reflexie, pina la urma de fapt in termeni de viteze ale undelor $v_{i,l}$. [41]

Trebuie sa precizam ca undele transversale au doua polarizari, una in planul de propagare (planul (\mathbf{k}_0, κ_0)), pe care o vom numi aici unde p (paralele), si alta perpendiculara pe planul de propagare, pe care o vom numi aici unde s (perpendiculare). Combinatia lineara a undelor plane date de relatia $\mathbf{u}_0 \sim (e^{\pm i\kappa_0 z}, e^{\pm i\kappa'_0 z}) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}}$ (12) este supusa conditiilor impuse de suprafata (care poate fi libera sau fixa). In seismologie, undele longitudinale, indexate aici prin l , sunt numite de obicei unde primare si notate cu P , in timp ce unde transversale, indexate prin t sint numite secundare si notate cu SH . Undele transversale p discutate aici nu au o polarizare simpla in raport cu suprafata. Trebuie precizat ca rezultatele schemei perturbationale aplicate aici ecuatiilor integrale prezinta forma cea mai simpla si convenabila pentru cazul undelor longitudinale p si transversale s . Astfel, cu aceste notatii, pentru o unda s incidenta avem numai o unda reflectata s ($\mathbf{u}_0^{(3)} = 0$), in timp ce pentru o unda p incidenta avem atat unde p cit si longitudinale. O situatie similara este pentru o unda incidenta longitudinala, cu κ_0 si κ'_0 facand schimb de pozitii in ecuatia (33). Deplasarea $\delta \mathbf{u}_0$ data de ecuatia (5) implica \mathbf{u}_0 pentru $z=0$, astfel ca putem reprezenta aceasta contributie localizata a undei \mathbf{u}_0 astfel:

$$\mathbf{u}_0|_{z=0} = (\mathbf{v}_0, w_0) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}} \quad (34)$$

unde \mathbf{v}_0, w_0 includ contributiile corespunzatoare diferitelor polarizari.

Suntem interesati in primul rind sa rezolvam ecuatia (7) pentru undele imprastiate, cu forta $\frac{\bar{\mathbf{f}}}{v_t^2}$ generata de undele libere \mathbf{u}_0 , asa cum este data de ecuatia (9). Consideram o componenta Fourier de forma

$$h(\mathbf{r}) = h e^{i\mathbf{q} \mathbf{r}} \quad (35)$$

pentru functia ce caracterizeaza iregularitatile, unde h este o amplitudine (ce depinde de \mathbf{q}) iar \mathbf{q} reprezinta un vector de unda caracteristic (in rezultatele finale trebuie introdusa si contributia $\mathbf{q} \rightarrow -\mathbf{q}$). Deplasarea localizata $\delta \mathbf{u}_0$ data de ecuatia (5) poate fi scrisa ca

$$\delta \mathbf{u}_0 = h(\mathbf{v}_0, w_0) e^{-i\omega t + i\mathbf{k} \mathbf{r}} \delta(z),$$

in care $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \mathbf{q}$. Folsind aceasta deplasare $\delta \mathbf{u}_0$, forta $\frac{\bar{\mathbf{f}}}{v_t^2}$ data de ecuatia (9) poate fi calculata direct. Este data de relatiile de mai jos, in care am renuntat la factorul exponential $e^{-i\omega t + i\mathbf{k} \mathbf{r}}$

$$\frac{\bar{\mathbf{f}}^{(x,y)}}{v_t^2} = -h[\bar{\kappa}^2 \mathbf{v}_0 \delta(z) + \mathbf{v}_0 \delta''(z) - \bar{m} \mathbf{k} (\mathbf{k} \mathbf{v}_0) \delta(z) + i \bar{m} \mathbf{k} w_0 \delta'(z)]$$

$$\frac{\bar{f}_z}{v_t^2} = -h[\bar{\kappa}^2 w_0 \delta(z) + w_0 \delta''(z) + \bar{m} \mathbf{k} v_0 \delta'(z) + \bar{m} w_0 \delta''(z)]$$

in care

$$\bar{\kappa} = \sqrt{\frac{\omega^2}{\bar{v}_t^2} - k^2}$$

si

$$\kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{v_t^2} - k^2} = \sqrt{\kappa_0^2 - 2\mathbf{k}_0 q - q^2} \quad (39)$$

Adaugam aceste contributii ce sunt date de aceasta forta (folosind functia Green din ecuatia (14)) in partea dreapta a ecuatiilor (18) si (19) pe care le rezolvam folosind procedura descrisa in sectiunea precedenta. Prin urmare, ecuatia (18) devine

$$v_2 = -\frac{i}{2\kappa} \frac{\partial v_2}{\partial z} \Big|_{z=0} e^{-ikz} - \frac{1}{2} v_2 \Big|_{z=0} e^{-ikz} - \frac{ih}{2\kappa} (\bar{\kappa}^2 - \kappa^2) v_{02} e^{-ikz} + h v_{02} \delta(z)$$

Deplasarea v_2 data mai sus include undele localizate

$$v_{2l} = h v_{02} \delta(z) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r}}$$

Care sunt unde imprastiate ce se propaga doar pe suprafata (unde dimensionale). Contributia ramasa in ecuatia (40) (adica termenii fara $\delta(z)$) reprezinta undele imprastiate reflectate inapoi in solid. Vom nota aceasta contributie cu v_{2r} . Luand a doua derivata in raport cu z in ecuatia (40) si folosind conditia de self-consistenta impusa de aceasta ecuatie asupra deplasarii pe suprafata, se obtine solutia:

$$v_{2r} = -\frac{ih}{4\kappa} (\bar{\kappa}^2 - \kappa^2) v_{02} e^{-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r} - ikz} \quad (42)$$

Aceasta este o unda s imprastiata inapoi in solid de catre iregularitatile suprafetei. Se poate vedea ca aceasta imprastiere este asigurata de parametri elastici distincti (prin relatia $\bar{\kappa}^2 - \kappa^2 = -\frac{\omega^2 \eta_t}{v_t^2} \neq 0$). Prezenta vectorului de unda $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \mathbf{q}$ in ecuatia (42) este indicativul pentru un fenomen de reflexie selectiv, asociat cu iregularitatile suprafetei, si, in general, cu efectele de directivitate.

Intr-o maniera asemanatoare obtinem ecuatiile pentru v_1 si w cu termenii forta dati de ecuatia (37).

$$v_{1l} = h v_{01} \delta(z), \quad w_l = h \frac{1+\bar{m}}{1+m} w_0 \delta(z) \quad (43)$$

Ecuatiile (21) si (24) ramin aceleasi dar constanta C data de ecuatia (25) (ce include relatia (24)) devine acum

$$C = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial z} - ikw \right) \Big|_{z=0} + \frac{1}{2} \left(ikv_1 - \frac{k}{\kappa} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} - \frac{h}{2\kappa} (\bar{\kappa}^2 - \kappa^2) (\kappa v_{01} + kw_0) \quad (44)$$

Urmand aceeasi procedura descrisa in sectiunea anterioara obtinem undele imprastiate

$$\begin{aligned}
v_{1r} &= -\frac{ihv_t^2}{4\omega^2}(\bar{\kappa}^2 - \kappa^2)(\kappa v_{01} + \kappa w_0)e^{-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\kappa z} = \\
&= \frac{i}{4}h\eta_t(\kappa v_{01} + \kappa w_0)e^{-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\kappa z}
\end{aligned} \tag{45}$$

Se poate vedea ca aceasta reprezinta o unda p , $\text{div}(v_{1r}, w_r) = 0$, adica $\kappa v_{1r} - \kappa w_r = 0$, si in care $w_r = \frac{\kappa v_{1r}}{\kappa}$.

Revenim acum la a doua ecuatie (10) in care forta este data de

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{\mathbf{f}}(x,y)}{v_t^2} &= -h[(1 - \bar{n})\bar{\kappa}^2 \mathbf{v}_0 \delta(z) + (1 - \bar{n})\mathbf{v}_0 \delta''(z) - \bar{n}\mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{v}_0)\delta(z) + i\bar{n}\mathbf{k}w_0\delta'(z)] \\
\frac{\bar{f}_z}{v_t^2} &= -h[(1 - \bar{n})\bar{\kappa}^2 w_0 \delta(z) + (1 - \bar{n})w_0 \delta''(z) + \bar{n}\mathbf{k}\mathbf{v}_0 \delta'(z) + \bar{n}w_0 \delta''(z)]
\end{aligned}$$

Folosind din nou aceeasi procedura din sectiunea precedenta obtinem deplasarea localizata

$$v_l = h \frac{1 - \bar{n}}{1 - \bar{n}} \mathbf{v}_0 \delta(z), \quad w_l = h w_0 \delta(z)$$

Se poate vedea ca, prin compararea ecuatiilor (41), (43) si (47) iregularitatile neomogene afecteaza undele localizate in feluri diferite. Pentru undele imprastiate reflectate inapoi in solid, ecuatiile (29) si (30) din sectiunea precedenta raman neschimbate, dar constanta C' data de ecuatie (31) (in care am introdus relatia (30)) devine

$$C' = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial z} + \frac{i\kappa'^2}{\kappa} w \right) \Big|_{z=0} + \frac{1}{2} \left(i\kappa' v_1 + \frac{\kappa'}{\kappa} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} - \frac{h}{2\kappa} (\bar{\kappa}'^2 - \kappa'^2) (\kappa v_{01} - \kappa' w_0)$$

Obtinem atunci in continuare undele reflectate:

$$v_{1r} = -\frac{ihv_l^2 k}{4\omega^2 \kappa'} (\bar{\kappa}^2 - \kappa'^2) (\kappa v_{01} - \kappa' w_0) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\kappa' z} = \frac{i}{4} h \eta_l (\kappa v_{01} - \kappa' w_0) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\kappa' z}$$

iar $w_r = -\frac{\kappa' v_{1r}}{\kappa}$. Se poate vedea ca aceasta unda imprastiata este unda longitudinala ($\text{curl}(v_{1r}, w_r) = 0$ adica $-\kappa' v_{1r} = \kappa w_r$).

Conform ecuatiilor (42), (45) si (49), in modelul prezentat de iregularitate superficiala avem unde imprastiate inapoi in solid numai pentru o suprafata rugoasa cu caracteristici elastice distincte fata de cele ale solidului (iregularitate neomogena, $\eta_{t,l} \neq 0$). Pentru o iregularitate omogena, adica pentru $\eta_{t,l} = 0$, obtinem doar unde imprastiate localizate pe suprafata, date de

$$\mathbf{u}_l = \delta \mathbf{u}_0 = h((\mathbf{r})\mathbf{v}_0, w_0) e^{-i\omega t + i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}} \delta(z) \tag{50}$$

dupa cum era de asteptat.

IV. Cazuri particulare

Din ecuatiile (42), (45) si (49) putem obtine coeficientii de reflexie, in raport cu energia, ai undelor imprastiate inapoi in solid. Caracteristica lor generala o constituie efectele de direccionalitate. Derivarea acestor coeficienti este complicata in cazul general, unde trebuie sa

fixam amplitudinea undelor \mathbf{u}_0 originale conform cu natura acestor unde si cu conditiile la limita. O alta dificultate apare din cauza faptului ca trebuie sa “renormalizam” amplitudinile undelor \mathbf{u}_0 originale efectate astfel incat sa includem undele imprastiate cind punem conditiile la limita (o procedura specifica problemei perturbational-teoretica). Asadar ne vom limita aici sa dam coeficientii de reflexie pentru citeva cazuri particulare.

Intai, un caz simplu este cel al unde s originale, descrisa de:

$$\mathbf{u}_0 = 2(0, u_0, 0) \cos \kappa_0 z \cdot e^{-i\omega t + i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}}$$

unde \mathbf{k}_0 este in lungul axei x . Folosind ecuatia (52), densitatea de energie (pe unitatea de masa) a unde s incidente in ecuatia (54) este $\frac{\varepsilon_0}{\rho} = \omega^2 u_0^2$. Trebuie sa calculam proiectiile $v_{01,2}$ ale amplitudinilor acestei unde pe $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \mathbf{q}$ and \mathbf{k}_1 . Prin introducerea unghiului α intre \mathbf{q} si \mathbf{k}_0 obtinem $v_{01} = 2u_0 q \sin \alpha / k$ si $v_{02} = 2u_0 (k_0 + q \cos \alpha) / k$ (si desigur w_0). Din ecuatiile (42), (45) si (49) se poate vedea ca undele s incidente produc atat unde s si p transversale imprastiate, cat si unde p longitudinale imprastiate, datorita neomogeneitatilor de pe suprafata. Folosind aceste ecuatii se pot calcula amplitudinile acestor unde si obtine apoi coeficientii lor de reflexie:

$$\begin{aligned} R_s &= \eta_t \frac{h\omega^2}{4v_t^2 \kappa k} (k_0 + q \cos \alpha), \\ R_p &= \eta_t \frac{h\omega q}{4v_t k} \sin \alpha, \\ R_l &= \eta_l \frac{h\omega q}{4v_l k} \sin \alpha \end{aligned} \quad (55)$$

Densitatea de energie purtata de aceste unde este data de $\frac{\varepsilon_{s,p,l}}{\varepsilon_0} = R_{s,p,l}^2$. Trebuie sa subliniem dependenta de directie (prin unghiul α) complicata a acestor coeficienti de reflexie, ce apare atat in κ cat si in k . Formulele din ecuatia (55) devin desigur mult mai simple in cazul unei incidente normale ($\mathbf{k}_0=0$).

In cazul incidente normale exista de asemenea un caz simplu privind undele longitudinale descrise de

$$\mathbf{u}_0 = 2(0, 0, u_0) \cos \kappa'_0 z \cdot e^{-i\omega t}$$

unde $\kappa'_0 = \omega / v_l$. Densitatea de energie pe unitatea de masa in cazul acestor unde incidente este $\frac{E_0}{\rho} = \omega^2 u_0^2$. Conform ecuatiilor (42), (45), si (49) undele imprastiate in acest caz sunt unde p si unde longitudinale. Coeficientii lor de reflexie au o forma mult mai simpla acum

$$R_p = \eta_t \frac{h\omega q}{4v_t k}, \quad R_l = \eta_l \frac{h\omega \kappa'}{4v_l k} \quad (57)$$

Patrutul acestor coeficienti dau fractiunea de energie purtata de aceste unde (respectiv).

Mai trebuie sa precizam ca toate formulele de mai sus sunt valabile numai pentru $\kappa, k, q \neq 0$ (numitori diferiti de zero).

Se mai poate vedea din cazurile particulare descrise mai sus, precum si din ecuatiile generale (42), (45) si (49) ca intreaga cantitate de energie transmisa difuziv de catre undele imprastiate pe irregularitatile suprafetei implica sume de forma $\sum_{\mathbf{q}} |h(\mathbf{q})|^2 f(\mathbf{q})$, unde $h(\mathbf{q})$ este transformata Fourier a functiei irregularitatilor (roughness function) $h(\mathbf{r})$, iar $f(\mathbf{q})$ sunt functia specifice ce corespund tipului undelor (factori ce implica k, κ, κ' etc.). Din punct de vedere calitativ, pentru a maximiza aceasta energie, este necesar, distinct de cazurile particulare ce implica retele ce contin elemente periodice repetitive (unul sau mai multi vectori de unde \mathbf{q}), sa se include cat mai

multe componente Fourier posibile, adica suprafata sa fie cit mai iregulata posibil, pentru a avea o buna atenuare, ceea ce este un rezultat asteptat rezonabil.

V. Concluzii

In aceasta etapa s-a introdus un model de distributie a defectelor pe o suprafata neomogena a unui corp elastic isotrop semi-infinit si s-au rezolvat ecuatiile undelor pentru unde elastice imprastiate pe aceste iregularitati superficiale, intr-o aproximatie de prim ordin in raport cu marimea acestei distributii a defectelor. Undele imprastiate sunt de doua tipuri: unde localizate (si numai propagative) pe suprafata, date de ecuatiile (43) si (47), si unde imprastiate reflectate inapoi in solid de catre iregularitatile de pe suprafata, atat transversale, date de ecuatiile (42) si (45), cat si longitudinale, date de ecuatiile (49). Primele (cele transversale) pot deveni restrictionate pe suprafata (confinante), adica unde de suprafata dampate, in cazul unei iregularitati de dimensiuni mari (pentru vectori de unda \mathbf{q} mari). Undele reflectate lipsesc pentru o iregularitate omogena ($\eta_{l,t} = 0$), caz in care raminem numai cu unde localizate. S-au mai evidentiat efectele induse de caracteristicile geometrice si elastice ale iregularitatii superficiale, precum si posibilitatea de producere a altor efecte ce pot interveni: directivitate, atenuare prin imprastiere difuziva, rezonanta etc.

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 tintele stabilite si indicatorii asociati pentru monitorizare si evaluare).

Prin rezultatele prezentate consideram ca **obiectivele fazei au fost indeplinite in totalitate** si ca **tintele stabilite au fost atinse iar proiectul a atins gradul de implementare scontat** pentru aceasta etapa.

Prin urmarirea atingerii scopului sau, acest proiect isi propune sa ofere date si si informatii utile in ceea ce priveste proiectarea obiectivelor civile, industriale, nucleare prin introducerea unui model de suprafata neomogena (cu rugozitati) a pamantului si rezolvarea ecuatiilor undelor elastice pentru undele seismice imprastiate de aceasta suprafata intr-o aproximatie de prim ordin in functie de marimea acestor rugozitati. Au fost aduse contributiile la realizarea hartilor de microzonare si hazard seismic prin evidentierea efectelor induse de caracteristicile geometrice si elastice ale iregularitatii superficiale. Au fost oferite oportunitati de transfer tehnologic catre companiile de proiectare si evaluare a riscului seismic in constructii, prin livrarea de noi tehnici, proceduri, protocoale de proiectare, si prin includerea de noi criterii si parametri de evaluare a factorilor critici in evaluarea riscului si a hazardului seismic.

Scopul final al acestei etape de cercetare a fost atins integral si a constat in evaluarea deplasarilor la suprafata, produse de undele seismice, în cazul structurilor (naturale sau artificiale), aceste date servind ca input în evaluarea riscului seismic. De asemenea si-a propus sa gaseasca care unde elastice vor fi simtite la suprafata pamantului, ce intensitate pot avea ele si ce distrugerii pot produce. Astfel, prin analiza raspunsului mediului la excitatii seismice, se pot estima efectele undelor seismice asupra structurilor de la suprafata Pamantului.

Datorita efectelor de localizare unde confinate pot prezenta efecte de stocare a energiei. Mai trebuie mentionat ca imprastierea multipla poate aparea in aproximatiile superioare. In cuplajul undelor de suprafata (Rayleigh) cu neregularitati cu structura periodica repetitiva pot aparea efecte de atenuare, sau amplificare a undelor propagative din surse secundare.

Prin aceste cunostinte se doreste prevenirea autoritatilor si factorilor de decizie privind expunerea populatiei si a mediului construit la cutremure, atat la nivel national cat si local, **conform documentelor emise de programele europene Orizont 2020 - strategia GEOSS /GEM / EPOS-**

IP si cu strategia nationala pentru Competitivitate 2014-2020 (Axa prioritara 2) si cu Strategia de Dezvoltare Regionala 2014-2020 Bucuresti-Ilfov.

In concluzie, prin aceasta metoda se introduce un model de suprafata neomogena (cu rugozitati) a pamantului si este rezolvata ecuatiile undelor elastice pentru undele seismice imprastiate de aceasta suprafata intr-o aproximatie de prim ordin in functie de marimea acestor rugozitati. Undele imprastiate sunt de doua tipuri: unde localizate (si numai propagative) pe suprafata, si unde imprastiate reflectate inapoi in solid de catre iregularitatile de pe suprafata, atat transversale, cat si longitudinale. Primele (cele transversale) pot deveni restrictionate pe suprafata (confinat), adica unde de suprafata dampate, in cazul unei iregularitati de dimensiuni mari (pentru vectori de unda \mathbf{q} mari). Undele reflectate lipsesc pentru o iregularitate omogena ($\eta_{l,t} = 0$), caz in care raminem numai cu unde localizate. Datorita efectelor de localizare undele confinate pot prezenta efecte de stocare a energiei. Mai trebuie mentionat ca imprastierea multipla poate aparea in aproximatiile superioare. In cuplajul undelor de suprafata (Rayleigh) cu neregularitati cu structura periodica repetitiva pot aparea efecte de atenuare, sau amplificarea a undelor propagative din surse secundare. S-au pus in evidenta efectele induse de caracteristicile geometrice si elastice ale iregularitatii superficiale, si s-a prezentat o discutie asupra posibilitatii de producere a altor efecte ce pot interveni: directivitate, atenuare prin imprastiere difuziva, rezonanta etc.

Propuneri pentru continuarea proiectului: Deoarece, în această etapă, **obiectivul a fost indeplinit integral iar rezultatele obtinute sint in concordanta cu tintele propuse** venind in sprijinul implementarii proiectului, propunem continuarea executiei proiectului in etapa urmatoare.

Indicatori : O parte din rezultate acestei etape vor fi prezentate la conferinte stiintifice internationale:

1) *Site-Structure under Seismic Loads in Risk Evaluation for Highly Populated Areas*, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, June, 2018, authors: Bogdan Felix Apostol, Stefan Florin Balan, Constantin Ionescu, Carmen Ortanza Cioflan.

2) *Influence of Nonlinear Effects Induced by Strong Earthquakes on Soil Deposit Parameters*, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, June, 2018, authors: Stefan Florin Balan, Bogdan Felix Apostol, Constantin Ionescu, Carmen Ortanza Cioflan.

sau sunt in curs de aparitie la reviste cu referenti cotate ISI:

1) Cioflan, C. O., Apostol, B. F., Radulian, M., Ionescu, C., Balan, S. F., *Practical insights on seismic risk evaluation from site-structure dynamic behavior perspective for Bucharest urban area*, Rom. J. Phys., in press, 2018.

Responsabil faza,

Dr. Bogdan Apostol



Responsabil proiect

Dr. Iren Adelina Moldovan