

Raport stiintific sintetic pentru intregul proiect

Etapa I:

Propagarea undelor de forfecare de la roca de bază la suprafață solicită materialele din amplasament la solicitări ciclice de încărcare – descărcare – reîncărcare și provoacă efecte seismice majore. Din acest motiv modelarea comportării pământurilor și rocilor la solicitări ciclice prezintă o importanță deosebită în predicția răspunsului seismic.

Un mare volum de investigații privind determinarea caracteristicilor tensiune–deformație a pământurilor în condiții de solicitări ciclice a fost dedicat până în prezent. Aceste studii au relevat faptul că printre factorii care influențează răspunsul tensiune-deformație ponderea o deține neliniaritatea și capacitatea de disipare. Aceste două caracteristici sunt definitorii pentru ecuația constitutivă dinamică a pământurilor. În cele ce urmează prezentăm un model dinamic vâscoelastic neliniar care include în mod unitar atât neliniaritatea cât și capacitatea de disipare și care în final poate fi privit ca o extindere în domeniul neliniar a modelului Kelvin-Voigt al vâscoelasticității liniare. Pornind de la forma integrală a ecuației constitutive a vâscoelasticității neliniare de tip relaxare prin complectări și simplificări controlate experimental s-a obținut un model dinamic care are asigurată cuantificarea prin teste în aparatura dinamică existentă (coloana rezonantă, triaxial). De asemenea, validarea modelului este asigurată prin compararea răspunsului dinamic calculat cu cel măsurat utilizând în acest scop sistemul cu un grad de libertate dinamică al coloanei rezonante

1) Modelul viscoelastic liniar. Materialele cu o relație constitutivă ca aceea data de ecuația pentru solidul elastic liniar:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1.1)$$

nu au nici o pierdere de energie internă (aici σ_{ij} este tensorul tensiunilor, ε_{kl} este tensorul deformațiilor iar C_{ijkl} este tensorul de ordinul patru al coeficienților elastici, tensorul lui Hooke). Materiale ideale, de acest tip, nu există în realitate și cu atât mai puțin în scoarta terestră, unde atenuarea energiei seismice este un fapt stabilit. Aceasta “deviație” de comportare a unui material, față de cea a unui material elastic pur, este cunoscută sub numele de *anelasticitate*. Amortizarea anelastica, în mod obișnuit, depinde într-o formă complicată de temperatura, frecvența și tipul vibrației, de starea de deformare indusă de cutremur etc. Din cauza numărului mare de mecanisme fizice care contribuie la acest fenomen, nu este posibil să le reprezentăm pe toate printr-o simplă modificare a ecuațiilor constitutive. Experiențe efectuate pe anumite materiale, inclusiv pe pământuri arată că, după o încărcare bruscă cu o sarcină, care este apoi menținută constantă, deformațiile cresc în timp iar după descărcare ele nu se anulează instantaneu. Pentru descrierea acestor fenomene vom folosi, de exemplu, în cazul unidimensional, o relație mai generală între tensiuni și deformații, de forma:

$$f(\sigma, \varepsilon, t) = 0 \quad (1.2)$$

unde σ este tensiunea, ε este deformarea specifică, iar t este timpul. Modelul simplu care va fi la baza generalizărilor ulterioare este bazat pe suprapunerea a două mecanisme de rezistență la deformare: *elasticitatea liniară* și *viscozitatea Stokes*. Un material de acest fel este numit *viscoelastic liniar*.

2) Modelul viscoelastic neliniar. De obicei solurile sunt considerate materiale viscoelastice liniare al căror comportament se poate descrie teoretic cu ajutorul modelului Voigt. Pentru acestea modulii de elasticitate și factorii de atenuare, atât la deformări liniare cât și la deformări torsionale pot fi determinați prin experimente pe coloanele rezonante Hardin și Drnevich. Cutremurele puternice, precum cele de adâncime medie generate de zona Vrancea, produc deplasări mari – de ordinul zecilor de centimetri – ale solului și implicit deformări remanente care schimbă starea materialelor. În asemenea cazuri răspunsul pământurilor solicitate seismic devine neliniar, iar aplicarea modelului Voigt este nerealistă. În cele ce urmează răspunsul seismic al solurilor va fi descris cu ajutorul unui *model viscoelastic neliniar* cu care, plecând de la curbele experimentale produse din încercările dinamice în coloane vom determina formele analitice ale modulilor elastici și atenuării funcție de nivelul de deformare luând în considerare starea de tensiuni (și/sau deformații) preexistentă solicitării seismice, precum și influența timpului de consolidare și a umidității asupra răspunsului probei în coloana rezonantă.

Răspunsul neliniar al probelor de pământ. **Pentru experimentele efectuate se considera presiunea din celula constantă și excitația cu amplitudine constantă. Schimbând aceste valori se modifică modulul de forfecare și valorile de amortizare. La modelarea comportării neliniare, se presupune ca pământurile sunt materiale viscoelastice neliniare cu ecuația constitutivă:**

$$\tau(t) = \int_{-\infty}^t G(\gamma, t-s) \dot{\gamma}(s) ds \quad (2.1)$$

unde τ este tensiunea tangentială, γ este deformarea tangentială iar G este funcția de relaxare neliniară. Pentru un anumit nivel de excitare testul pe coloana rezonantă poate da o valoare a modului dinamic G și o valoare a funcției de amortizare D . Această valoare corespunde la o anumită valoare a deformății, frecvența de excitare, mai precis frecvența de rezonanță a sistemului probă - vibrator. Deci în acest experiment, frecvența și deformarea nu sunt variabile independente. Pe de altă parte din testul pe coloana rezonantă pot fi obținuți numai câteva valori ale lui G și D plasați într-o "secțiune" a suprafeței $G = G(\gamma, \omega)$ și $D = D(\gamma, \omega)$. Aceste secțiuni corespund posibilităților aparatului, mai precis o bandă de frecvență de 5 – 50 Hz și o bandă de deformare de $10^{-3}\%$ - $5 \times 10^{-1}\%$. Deci, testul pe coloana rezonantă nu poate fi folosit pentru a obține o evaluare cantitativă a funcțiilor dinamice pe tot domeniul lor de definiție. Dar, aceste date, din coloanele rezonante, sunt foarte folositoare, pentru evaluarea comportamentului modelului viscoelastic neliniar la solicitări dinamice. La analiza mai multor teste pe coloana rezonantă se vede o influență majoră a nivelului de deformare asupra modului de forfecare și a amortizării și o influență mică a valorilor frecvenței de peste 1 Hz asupra funcției de frecvență $G_k(\omega)$ și $D_k(\omega)$ a funcțiilor dinamice (Figura 1a, b)). Mai mult, din punct de vedere a seismologiei ingineresti, banda de frecvență 1 – 10 Hz este importantă. Deci, din considerente practice se poate considera că G_k și D_k sunt constante. În acest caz ecuațiile care exprimă funcțiile modul dinamic și amortizare devin polinoame în termeni de deplasări și pot fi determinate în totalitate din coloana rezonantă prin metoda regresiei polinomiale.

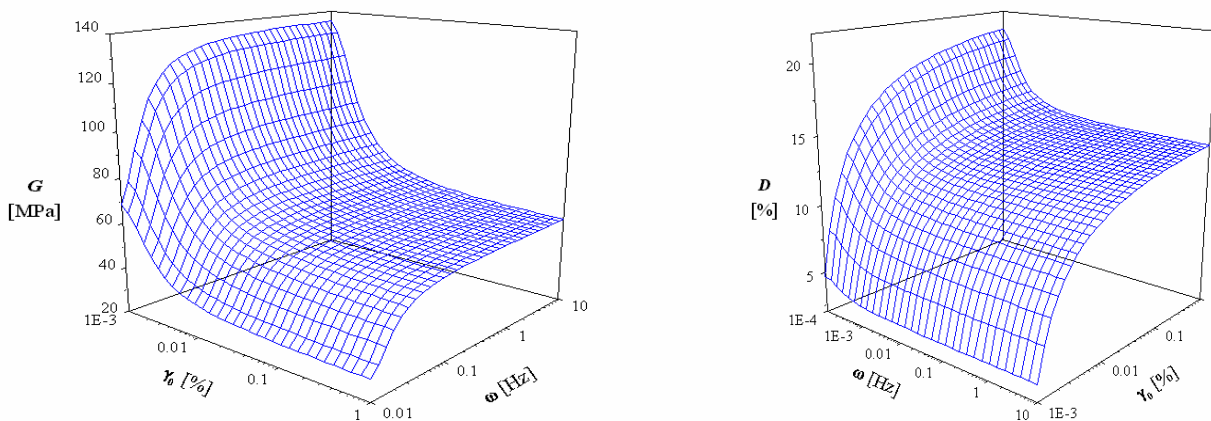


Fig. 1 a) Funcția modul dinamic $G = G(\gamma, \omega)$, și b) funcția amortizare $D = D(\gamma, \omega)$

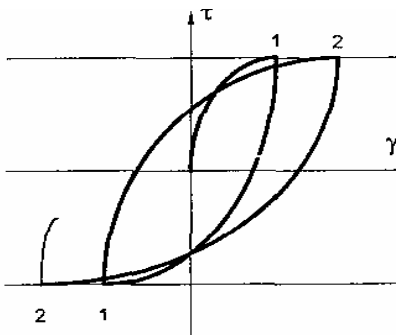


Fig. 2 Comportarea tensiune-deformație descrisă de curba tip histerezis

3) Evidența geotehnică a comportamentului neliniar al pământurilor. Denumirea generică de pământuri acoperă o gamă largă de materiale, apărute în decursul timpului prin procese naturale de degradare a rocilor. Clasificările din diverse standarde cuprind zeci de grupe și subgrupe, dar din punct de vedere al proprietăților mecanice, pentru ingineria seismică, două grupe prezintă o importanță deosebită: nisipurile și argilele. Deși au proprietăți mecanice comune, aceste două clase necesită utilizarea unor modele mecanice diferite. Principalele ipoteze care se fac la stabilirea legilor constitutive pentru pământuri sunt:

1. Pământurile sunt materiale simple cu memorie:

- nisipurile - materiale independente de viteza de încărcare (rate-independent),

- argilele - materialele dependente de viteză de încărcare (rate-dependent).

2. Istoria deformațiilor este compusă din două etape :

- Etapa anterioară momentului t_0 al primei solicitări mecanice exterioare - care constă în caracteristicile pe care materialul le are in situ datorită solicitărilor anterioare,

- Etapa solicitării seismice propriu zise - care este descrisă prin cicluri încărcare-descărcare;

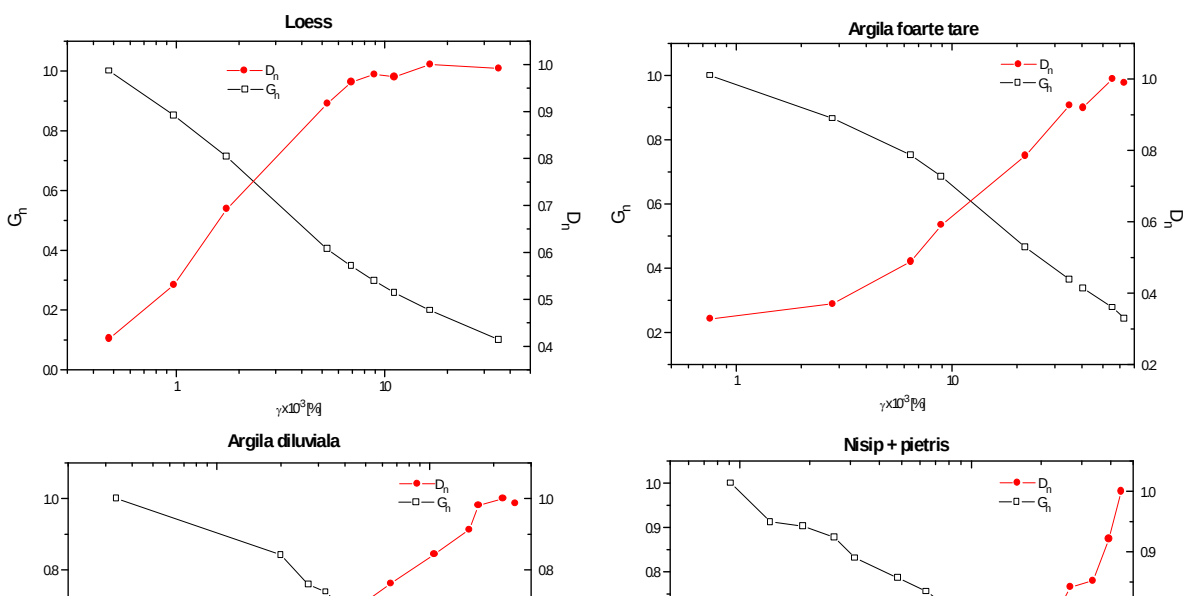
3. Pământurile supuse unei prime încărcări monoton crescătoare au o comportare de corp elastic sau vâscoelastic neliniar;

4. Orientarea particulelor constituente este alea-toare astfel încât pot fi considerate izotrope.

În mod obișnuit, nisipurile au proprietăți reologice reduse și de aceea pentru ele se poate folosi un **model elastic neliniar**, în timp ce pentru argile, care au proprietăți reologice semnificative, trebuie folosit un model **vâscoelastic neliniar**. Există însă o mare varietate de pământuri incluse în clasa nisipurilor sau în cea a argilelor iar o determinare precisă a modului de comportare nu poate fi făcută. Mai mult decât atât, același pământ poate prezenta comportări diferite în funcție de umiditate, grad de compactare, drum de încărcare etc. În cazul încărcărilor seismice, comportarea tensiune-deformație este descrisă de curbe tip histerezis ca cea din Fig. 2. Aceste curbe reflectă comportamentul neliniar al pământurilor la solicitări ciclice (similare celor seismice) iar la valori mari ale tensiunilor se observă fenomene de curgere precum și de absorbție a energiei.

Parametrii fizici de interes în determinarea răspunsului seismic al pământurilor sunt densitatea, vitezele de propagare ale undelor seismice (v_p și v_s) și atenuarea corespunzătoare acestora, mai exact factorii de calitate Q_p și Q_s : primele 3 mărimi se pot determina in situ cu suficientă precizie dar nu și modificările lor în timpul solicitării dinamice de tipul cutremurelor. Parametrii care influențează propagarea undelor mecanice (implicit seismice) sunt modulul de forfecare G , modulul de elasticitate E și raportul de amortizare D , indicele porilor e , gradul de saturare s , granulometria C , forma și mărimea particulelor, umiditatea w . Cum principalele distrugerii produse de cutremure se datorează undelor seismice transversale, variația modulului de forfecare (și implicit atenuării) în timpul solicitărilor dinamice (seismice) sunt principalele surse ale neliniarității răspunsului seismic local. Testele geotehnice efectuate asupra probelor prelevate din foraje au pus în evidență comportamentul neliniar care apare când deformațiile depășesc un anumit nivel. De exemplu, teste efectuate pe coloane rezonante și triaxial arată sistematic reduceri ale modulului de forfecare G și creșteri ale amortizării D pentru valori ale deformației $\gamma \geq 10^{-4}$ %, deci practic acestea sunt funcții $G = G(\gamma)$ și $D = D(\gamma)$. În figurile 3 a) - f) sunt prezentate normat rezultatele directe ale unor teste efectuate în laborator pe coloana Drnevich pentru diferite tipuri de pământuri. Se poate observa că reducerea valorilor normate ale

modulului de torsiune $G_n = \frac{G}{G_0}$ în cursul încercării este mai mică pentru materialele mai dure granit, argilă marnoasă în timp ce materialele „moi” care se găsesc de obicei în straturile superficiale prezintă variații mari ale G_n și amortizării $D_n = \frac{D}{D_0}$ pentru același domeniu de deformații; unde G_0 și D_0 sunt valorile corespunzătoare unei deformații inițiale de ordinul $\gamma = 10^{-4}$.



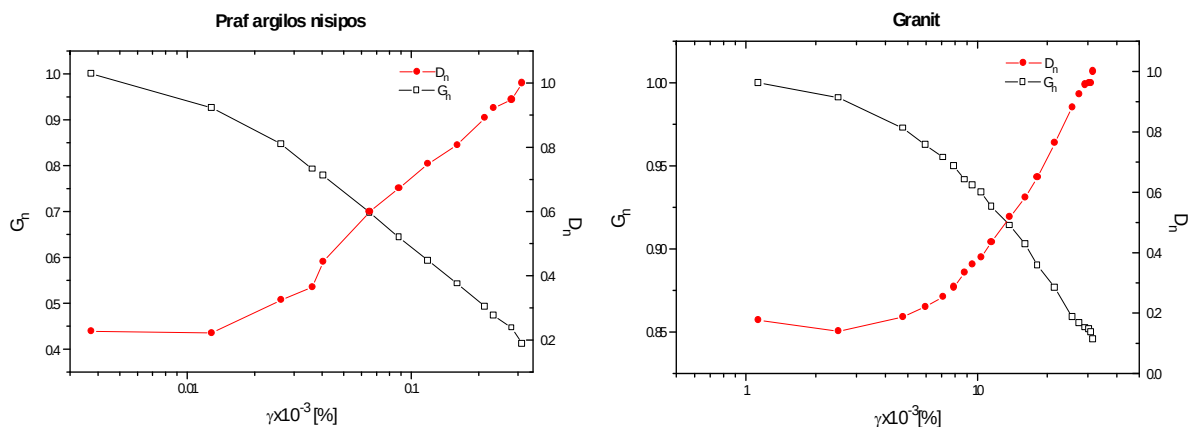
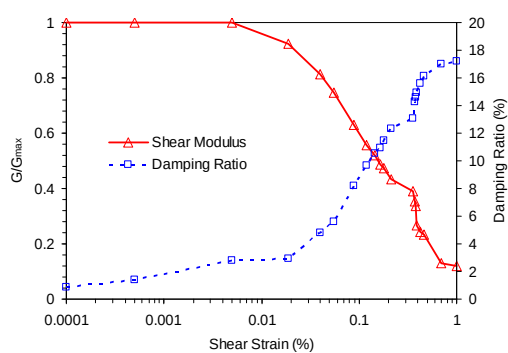


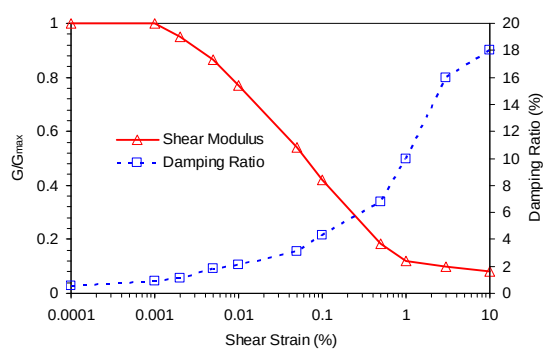
Fig. 3 Curbe normalizate ale caracteristicilor dinamice determinate experimental

Un alt grup de exepriemente a fost facut pentru pământurile din structura locală a municipiului Bucuresti. Am considerat curbele $G=G(\gamma)$ și $D=D(\gamma)$ din Fig. 4 care au fost determinate experimental prin testarea cu coloana rezonantă Drnevich în laborator a unor probe netulburate din foraje (București) conținând aceleași materiale.

Material 1- silt argilos nisipos

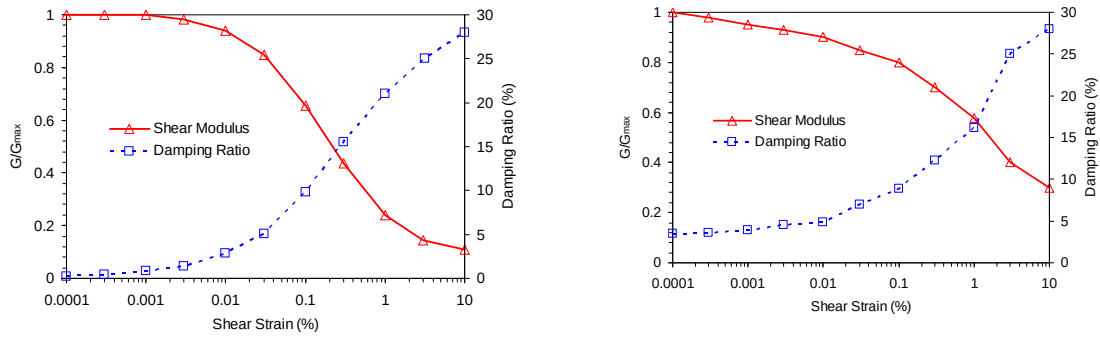


Material 2 –nisip cu pietriș



Material 3 – argilă

Material 4 – marnă nisipoasă



Material 5 – marnă tare

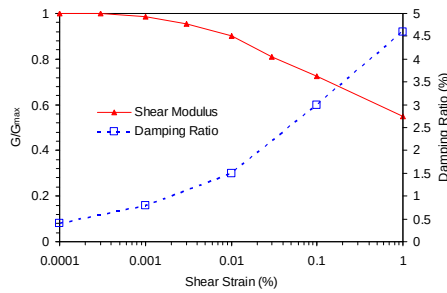


Fig. 4 Curbele $G=G(\gamma)$ și $D=D(\gamma)$ pentru pământurile din structura locală a municipiului București

Etapa II:

În cadrul acestei etapei II s-a dezvoltat o metoda originala care se poate aplica la cutemurele vrancene majore prin realizarea unei experimentari a modelului si solutiilor propuse. O alta trasatura a lucrarilor care contribuie la noutatea lor consta in metodologia si tematicile ce urmeaza a se utiliza, acestea fiind introduse in seismologie relativ de curind, iar in ceea ce priveste disciplina de baza teoretica ele au ajuns a fi perfectionate de colectivul nostru, constind in elemente propuse anterior in literatura de specialitate. Aceasta noutate se refera in mod efectiv la inlocuirea sistemelor neliniare rezolvente cu ajutorul unei scheme de determinare originale prin sisteme liniare caracterizand cu precizie progresia propagarii undelor seismice componente. Aceasta permite urmarirea fenomenelor ondulatorii datorate neliniaritatii intr-o maniera familiara cercetarilor seismologice.

1. Elemente fundamentale. Se introduce aparatul de calcul analitic pentru rezolvarea ecuatiilor elasticitatii neliniare impreuna cu metoda originala elaborata in acest scop. Metoda consta in utilizarea unui procedeu aproximativ de rezolvare cu ajutorul dezvoltarii in serie de puteri a unui parametru mic avand coeficienti solutiile de diferite ordine de marime in deplasari. Valabilitatea si convergenta acestei rezolvari depinde de parametrii asociati straturilor geologice, zonei Moho, solului considerat la suprafata si intensitatii socurilor din sursele seismice. Aceasta dependenta apare satisfacuta in cazul de fata. S-a considerat un mediu visco-elastic ale carui legi constitutive pentru tensiuni si deplasari, cat si legi de miscare sunt

$$\sigma_{ij}(t) = \delta_{ij} \int_{-\infty}^{\tau} \lambda(\theta, t - \tau) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau + 2 \int_{-\infty}^{\tau} \mu(\gamma, t - \tau) \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial \tau} d\tau, \quad \sigma_{ij} = \delta_{ij} \lambda(\theta) \theta + 2\mu(\gamma) \epsilon_{ij}; \quad \sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

Intervin functiile: dilatarea, tensorul deformatie transversala, tensorul deviatoric, tensorul gradientul deplasarii si rotatia

$$\begin{aligned}\theta &= \varepsilon_{ii}, \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}), \gamma = \sqrt{\varepsilon^D_{ij}\varepsilon^D_{ij}}, \\ \varepsilon^D_{ij} &= \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\theta\end{aligned}\quad (2)$$

$$u_{i,j} = \varepsilon_{ij} - \omega_{ij} - \frac{1}{2}u_{k,i}u_{k,j}, \omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{j,i} - u_{i,j}) \quad (3)$$

Prin inlocuirea tensiunilor din primele ecuatii din (1) pentru cazul elastic in ecuatiile de miscare rezulta conditiile

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu)\theta_{,i} + \mu(\Delta u_i + u_{k,i}\Delta u_k + u_{k,ij}u_{k,j}) + \lambda_{,i}\theta + \\ \mu_{,j}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}) = \rho\ddot{u}_i\end{aligned}\quad (4)$$

Dupa ce sa se determina dezvoltarile pentru dilatare si invariant deviatoric, pentru modulul λ si μ precum si a invariantului γ , rezulta, dupa identificarea termenilor de acelasi ordin de marime, sistemul diferential

$$\begin{aligned}(\lambda_0 + \mu_0)\theta_{1,i} + \mu_0\Delta u_{1i} &= \rho\ddot{u}_{1i}, \\ (\lambda_0 + \mu_0)\theta_{2,i} + \mu_0\Delta u_{2i} + E_{2i} &= \rho\ddot{u}_{2i} \\ (\lambda_0 + \mu_0)\theta_{3,i} + \mu_0\Delta u_{3i} + E_{3i} &= \rho\ddot{u}_{3i}, \dots\end{aligned}\quad (5)$$

Sistemul (5) conduce prin formarea componentelor de tip divergenta (axiotorice) si rotationale la sistemul de ecuatii corespunzator undelor de dilatare (longitudinale, P) si rotationale (transversale, S)

$$\begin{aligned}(\lambda_0 + 2\mu_0)\Delta\theta_1 &= \rho\ddot{\theta}_1 \\ (\lambda_0 + 2\mu_0)\Delta\theta_2 + \Theta_2 &= \rho\ddot{u}_{2i}, (\lambda_0 + 2\mu_0)\Delta\theta_3 + \Theta_3 = \rho\ddot{\theta}_3, \dots\end{aligned}\quad (6)$$

si

$$\mu_0\Delta\omega_{1ij} = \rho\ddot{\omega}_{1ij}, \mu_0\Delta\omega_{2ij} + \Omega_{2ij} = \rho\ddot{\omega}_{2ij}, \mu_0\Delta\omega_{3ij} + \Omega_{3ij} = \rho\ddot{\omega}_{3ij}, \dots \quad (7)$$

in care intervin termeni perturbatori axiali si rotationali. In continuare procedeul este aplicat ecuatiilor pentru undele SH, termenii explicitati fiind de primele 2 ordine de marime. In cadrul aplicarii la cazul fronturilor de unda provenite din sursele seismice vrance sunt utilizate descompuneri in unde plane pentru care sunt transpuse ecuatiile obtinute ele fiind totodata rezolvate sub forma unor serii Fourier complexe corespunzand componentelor ascendente si descendente ale acestor fronturi. Se constata ca perioadele care intervin ale undelor solutiilor succesive sunt multipli ai perioadei undelor teoriei liniare de acelasi ordin cu al ordinului de marime al aproximatiei respective. Neliniaritatea indusa de invariantul deviatoric creeaza dificultati in calculul efectiv urmator motiv pentru care le vom evita cu ajutorul izolarii unor cazuri particulare complementare, fiecare dintre acestea corespunzand unor distante epicentrale sau unor adancimi de straturi anumite. In raportul extins se prezinta situatiile luate in calcul si care prezinta un interes deosebit pentru evaluarea riscului seismic major pe teritoriul tarii. Pentru un caz relativ curent (cazul in care comportarea neliniara a solului este semnificativa numai in apropierea suprafetei pamantului, ceea ce corespunde unor zone destul de extinse ale tarii), apare posibilitatea producerii unei amplificari a amplitudinilor undelor seismice cu circa 30%.

2. Determinarea efectelor seismice tinand seama de structura de adancime, de zona Moho, mecanismul sursei seismice si de comportarea neliniara a stratului de la suprafata. O problema este alegerea rocii de baza si al nivelului (adancimii) acesteia. Deși propagarea verticală 1D este aplicată în evaluarea răspunsului seismic local de mai bine de 30 de ani, metoda dovedindu-și de-a lungul timpului corectitudinea și eficacitatea în aplicațiile de inginerie seismică, în literatura de specialitate nu există încă o părere unanim acceptată asupra „rocii de bază”, aceasta variind ca definiție și alegere în funcție de locația și scopul pentru care se face studiul, dar și în funcție de background-ul

teoretic al specialiștilor implicați în rezolvarea problemei. Nivelul sau adâncimea la care se află roca de bază considerată pentru analize de răspuns seismic local variază în funcție de structurile locale, pentru identificarea acestui nivel fiind folosiți și parametri ca impedența straturilor și viteza de propagare a undelor de forfecare (v_s) în stratul respectiv. Și pentru acest parametru v_s , valorile folosite acoperă un interval foarte larg: de la aprox. 1220 m/s (Ishihara et al., 1982; Schnabel et al., 1972) la aprox. 1600 m/s în aplicațiile mai recente (Yilmaz, 2005), în timp ce vitezele din straturile imediat superioare „semispatiului” considerat sunt de ordinul 600-800 m/s. Experiența acumulată în proiectele și întâlnirile internaționale ale specialiștilor din domeniu relevă faptul că folosirea unei valori ca $v_s = 650$ m/s [23] pentru stabilirea rocii de bază conduce la evaluări corecte ale răspunsului seismic local. Un alt criteriu de alegere al nivelului rocii de bază în structurile locale pentru care se dorește evaluarea efectelor locale este bazat pe

variația impedenței stratelor geologice pe adâncime și anume aprox. $\frac{\rho_i \cdot v_i}{\rho_{i-1} \cdot v_{i-1}} \geq 2$, unde ρ este densitatea, v viteza

undelor seismice iar i reprezintă indicele stratului geologic numărat de la suprafață în adâncime. Pe baza rezultatelor obținute anterior privitor la efectele seismice produse de surse cu mecanisme date, pentru o structura de adâncime și zona Moho corespunzătoare regiunilor țării, determinarea acestor efecte în situri caracterizate de o comportare neliniară a terenurilor la suprafața și poziția lor în raport cu coordonatele surselor, poate fi făcută recurând la o metoda de corelare a parametrilor de intrare a analizei neliniare și în primul rând a deplasărilor la baza stratului superficial (u'', f, d) cu datele de ieșire ale procedeelelor anterioare menționate care privesc și coordonatele surselor sau punctelor de emergență ale undelor seismice. În urma acestei corelări este posibilă aplicarea unor algoritmi de calcul furnizând un set mai complex de rezultate și anume amplitudini, coeficienți de amplificare, spectre de răspuns etc. Astfel vom recurge la relația

$K_{1N} = \frac{u_{120}}{u''_{12N}} = \frac{2}{A_{11} + \frac{A_{21}}{\mu_N \eta_N}}$, în care avem coeficienții ce caracterizează

amplificarea $K_{1N} = \frac{u_{12}}{u''_{12N}}$, $K_{2N} = \frac{u_{22}}{u''_{12N}}$, $K = \frac{u_{22}}{u_{12}}$, $K_{2N} = K K_{1N}$, $K_N = K_{1N} + K_{2N} = K_{1N}(1 + K)$.

Formulele de calcul obținute prezintă avantajul simplității deși neliniaritățile considerate conferă o complexitate deosebită a aparatului teoretic dar datorită schemei originale de rezolvare această dificultate a fost depășită în mod cu totul avantajos. În acest fel este totodată deschisă o cale spre ulterioare determinări privind alte aspecte ale zonării seismice a țării ca de exemplu în cazul unor seisme superficiale la care atât undele primare cât și cele secundare pot prezenta perioade de oscilație reduse, solurile respective fiind de asemenea slabe. În cazul producerii unor seisme în surse adânci caracterizate prin frecvențe de oscilație mai mari (cu perioade scurte) efectele neliniare ar putea fi relevante și pentru propagarea undelor în totalitatea straturilor geologice. Este de așteptat atunci o marire a intensității efectelor seismice la suprafața concomitent cu o redirectionare a efectelor de directivitate acolo unde ele au fost deja stabilite sau o precizare a lor în alte regiuni. În continuare, în raportul extins sunt prezentate elementele de calcul pentru determinarea efectelor produse de surse seismice în teoria liniară tridimensională, fiind exprimate formulele care dau valorile amplitudinilor undelor transversale în puncte diferite la suprafața ținând seama de neliniaritatea constitutivă pe baza valorilor acestora la baza stratului superficial date de evaluarea tridimensională în ipoteza unei stratificări de adâncime simple sau multiple.

3) Teoria factorilor de amplificare. Efectele oscilațiilor locale produse de mișcările seismice asupra construcțiilor de la suprafața Pamântului, sau asupra diverselor elemente de mediu natural sau produs de activitatea umană, sunt descrise de teoria generală a factorilor de amplificare seismică locală (Marmureanu and Balan, 1990). În varianta cea mai simplă a acestei teorii elementul local de interes se modelează cu un oscilator armonic liniar amortizat supus acțiunii unei forțe periodice externe. Această teorie va fi extinsă apoi mai departe la investigarea regimului de rezonanță, la derivarea simplificată a factorilor de amplificare spectrali pentru deplasare, viteză și accelerație, și la studiul regimului de socuri, atunci când forța externă are o durată finită. Prin această dezvoltare teoretică se realizează instrumentele necesare pentru o estimare calitativă rapidă, cu mijloace semi-analitice, a factorilor de amplificare și a efectului lor asupra elementului de interes, și se pot face predicții asupra unor astfel de efecte de amplificare ale mișcărilor seismice.

Evaluarea cantitativă a neliniarității. Factorii de amplificare spectrală. Modelul răspunsului elastic liniar al solului a fost aproape universal folosit de seismologi în modelarea deplasărilor induse de cutremure slabe, puternice sau teleseisme. Acest model este acceptabil pentru teleseisme și cutremure slabe dar pentru deplasări induse de cutremure puternice consecințele comportamentului neliniar trebuie neapărat considerate. Caracteristicile deplasării solului, în special durată deplasărilor puternice, pot fi afectate de focalizarea energiei seismice în marile bazine sedimentare. La cutremure mici deformările sunt mici pe când la cutremure mari deformările sunt mari. Iar răspunsul unui sistem format din materiale vascoelastice neliniare (argile, marne, nisipuri etc.) traversat vertical de unde de forfecare este

departe de a fi liniar. Ecuatia undelor in acest caz este in forma
$$G \frac{\partial^2 u_2(x_1, t)}{\partial x_1^2} + \eta \frac{\partial^3 u_2(x_1, t)}{\partial t \partial x_1^2} = \rho \frac{\partial^2 u_2(x_1, t)}{\partial t^2}$$

in care G este functia modul de torsiune dinamic iar D este functia damping de torsiune. Ambele sunt functii de deformarea transversala γ , de frecventa ω , adancimea h , presiunea σ , temperatura t si indicele de porozitate ν_r . Pentru a gasi caracteristicile comportamentului neliniar si ale raspunsului neliniar al solurilor (Marmureanu et al., 1995, 1996) au fost introdusi factorii de amplificare spectrali (seismici).

3.1. Definitia factorilor de amplificare spectrali (SAF). Consideram un oscilator liniar cu un singur grad de libertate caracterizat de masa m , constanta elastica k , damping ζ , acceleratia la baza $\ddot{a}(t)$ (iar acceleratia absoluta a solului este $a(t)$). Deplasarea relativa $x(t)$ poate fi calculata din integrala Duhamel. La conditii initiale zero, expresia lui $x(t)$ ia

forma:
$$x(t) = \frac{-1}{\omega \sqrt{1 - \beta^2}} \int_0^t \ddot{a}(\tau) e^{-\beta \omega(t-\tau)} \sin \omega \sqrt{1 - \beta^2} (t - \tau) d\tau$$
 in care frecventa fundamentala este $\omega^2 = \frac{k}{m}$ si

dampingul este $\beta = \frac{\zeta}{2\sqrt{km}}$. Din relatia de mai sus obtinem prin derivare expresia exacta a vitezei relative $\dot{x}(t)$:

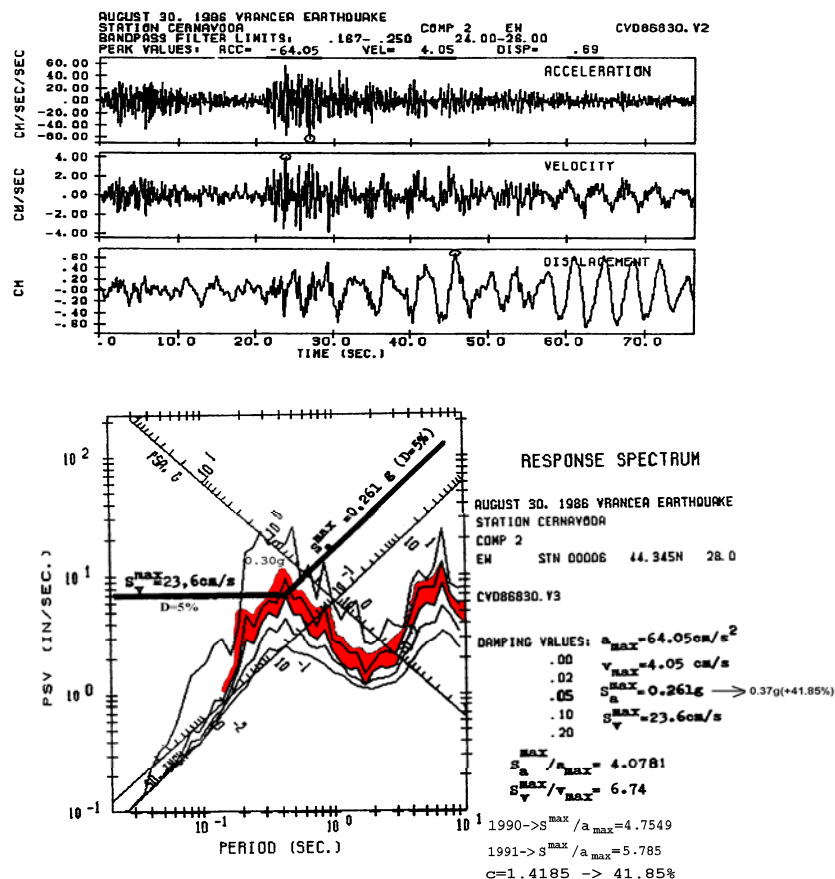
$$\dot{x}(t) = \int_0^t \ddot{a}(\tau) e^{-\beta \omega(t-\tau)} \cos \omega \sqrt{1 - \beta^2} (t - \tau) d\tau + \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \int_0^t \ddot{a}(\tau) e^{-\beta \omega(t-\tau)} \sin \omega \sqrt{1 - \beta^2} (t - \tau) d\tau$$

Acceleratia absoluta a masei m se obtine prin derivarea relatiei de mai sus si considerand si notatia urmatoare obtinem:

$$\ddot{y}(t) = \omega \frac{1 - 2\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \int_0^t \ddot{a}(\tau) e^{-\beta \omega(t-\tau)} \sin \omega \sqrt{1 - \beta^2} (t - \tau) d\tau + 2\omega\beta \int_0^t \ddot{a}(\tau) e^{-\beta \omega(t-\tau)} \cos \omega \sqrt{1 - \beta^2} (t - \tau) d\tau$$

Valorile maxime absolute ale marimilor $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{y}(t)$ calculate din raspunsul seismic le definim: $S_d = |x(t)|_{\max}$; $S_v = |\dot{x}(t)|_{\max}$; $S_a = |\ddot{y}(t)|_{\max}$. Reprezentările grafice ale lui S_a , S_v , S_d in functie de perioada fundamentala de vibratie neamortizata T pentru diferite fractiuni de amortizare critica ($\beta=0\%$, 2% , 5% , 10% , 20%) se numesc spectre de raspuns ale cutremurului. Rapoartele dintre valorile spectrale maxime ale lui S_a , S_v , S_d din spectrele de raspuns si valorile maxime ale lui $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{y}(t)$ calculate din accelerogramele inregistrate se numesc factori de amplificare spectrali pentru acceleratia absoluta, viteza relativa, deplasarea relativa: $SAF_a = S_a^{\max} / a_{\max}$; $SAF_v = S_v^{\max} / v_{\max}$; $SAF_d = S_d^{\max} / d_{\max}$ unde: $a_{\max} = \ddot{y}(t)_{\max}$; $v_{\max} = \dot{x}(t)_{\max}$ and $d_{\max} = x(t)_{\max}$. In figura de mai jos sunt definiti factorii de amplificare spectrali si se poate observa efectul neliniaritatii (zona rosie) pentru zona Cernavoda corespunzatori evenimentului din 30 august 1990 ($M_s=7.0$).

4)Structurile de propagare a undelor seismice. Pentru cazul cutremurelor puternice produse în zona Vrancea bedrock-ul este modelat ca un mediu inelastic cu straturi omogene și paralele, caracterizate de parametri fizico-mecanici determinați din recente experimente de tomografie și refracție seismică pe direcția Vrancea-București, continuat până la adâncimi de aprox. 1000 km cu proprietățile medii continentale ale litosferei inferioare și mantalei. Modelele folosite pentru descrierea proprietăților litosferei sunt adoptate pe baza: **a)** modelelor crustale de viteze folosite în localizarea cutremurelor care folosesc în principal informațiile provenite din investigațiile petroliere, iar adâncimile discontinuităților Conrad, Moho și ale limitei litosferă-astenosferă sunt adoptate pe baze geofizice (Radulescu, 1998; Raileanu et al., 1994) sau seismologice (Enescu et al., 1992). Importante schimbări în structurile geologice clasic acceptate pentru zona de interes au fost furnizate de experimentul de refracție seismică Vrancea '99. **b)** prezenței unui canal de viteză scăzută pentru undele transversale în partea adâncă a litosferei, ulterior modificat pentru a include foarte recente rezultate ale experimentelor de tomografie seismică a zonei Vrancea (Martin et al., 2002); **c)** adoptării unui model continental mediu curent folosit în seismologia modernă pentru adâncimi mai mari de 250 km (Radulian et al., 2000). Modelele elaborate aici vor fi folosite pentru simularea mișcării seismice (ce se va efectua în etapele viitoare). Cele mai multe **structuri geologice locale** al căror răspuns seismic a fost evaluat prin metoda hibridă se află în municipiul București (Panza et al., 2003; Cioflan et al., 2004) unde se găsesc strate cu geometrii relativ simple însă în care există numeroase neomogenități laterale (variații ale vitezelor undelor seismice în același strat/material geologic, variații ale densităților, factorilor de calitate etc).



Etapă III :

1. Factori de amplificare și efecte locale. Factorii de amplificare ai mișcărilor seismice pot servi ca estimări calitative în evaluarea efectelor locale ale seismelor. În acest context, există câteva elemente principale care trebuie considerate. În primul rând, efectele locale se evaluează întotdeauna asupra unui element de interes, ca, de exemplu, o construcție, elemente de construcție, porțiuni de sol, elemente de mediu natural, etc.[5] Apoi, în estimarea factorilor de amplificare un rol important revine parametrului de atenuare (coeficient de disipare), așa cum s-a arătat în secțiunea precedentă, regimului de rezonanță sau de cuasi-rezonanță, și caracteristicilor locale ale elementului de interes, în special proprietăților neliniare.[6]. Ca urmare, elasticitatea liniară trebuie extinsă la modele visco-elasticitate, ce permit includerea constitutivă a disipării, și la modele neliniare.[7]-[10] Toate aceste considerații sunt deosebit de importante în evaluarea efectelor seismice locale.[11]-[13] Trebuie subliniat că pe lângă amplificarea locală, mișcarea seismică produce și efecte de amplificare extinse, provenite din propagarea undelor seismice, care au fost studiate în contextul unor modele neliniare de elasticitate, în special în legătura cu efectele importante de directivitate.[16]-[18] Amplificarea locală produsă de seismele majore din Vrancea a fost de asemenea studiată recent în funcție de mărimea acestor seisme și de conținutul lor spectral.[19] Factorii de amplificare ai solului afectat de mișcarea seismică în funcție de frecvență, identificați din prelucrarea seismogramelor, constituie răspunsul spectral al cutremurului. Cutremurele originare în Vrancea, produse pe 30 August 1986 ($M_W=7.1$, 130 km adâncime) [14], 31 Mai 1990 ($M_W=6.4$, 80km adâncime) [15], 4 martie 1977 ($M_W=7.4$), 30 Mai 1990 ($M_W=6.9$), au fost studiate sub raportul factorilor locali de amplificare, folosindu-se înregistrările de la mai multe stații. Se constată o dependență apreciabilă a factorilor de amplificare de mărimea seismelor aceasta fiind probabil datorată diferențelor în conținutul lor spectral. În general, amplificările scad cu creșterea mărимitudinii, o contribuție în acest sens putând avea efectele neliniare locale, ce afectează, în acest context, în primul rând parametrul de atenuare. O atenție deosebită s-a acordat centralei nucleare de la Cernavodă, pentru care sunt estimați factori de amplificare de ordinul 2.5-3.5, ușor mai ridicați decât indicațiile de proiect ale constructorului (Atomic Energy Canada Ltd).

În Figura 2 sunt prezentate spectrele de răspuns în accelerații la locația Magurele-București pentru cutremure mari pentru diverse valori ale parametrului de atenuare, împreună cu factorii spectrali de amplificare (SAF) și cu raportul c dintre acești factori, considerat o măsură a efectelor neliniare locale induse de seismele cu mărимitudini mari. În Figura 3 spectrele de răspuns (evenimentul Vrancea 1986 și doar pentru 5% parametrul de atenuare) pentru structura locală INCERC modelată cu model anelastic liniar și model viscoelastic neliniar. Răspunsul structurii locale (amplificarea) este hasurat. [13], [19] În cadrul raportului extins sunt prezentate date complete referitoare la acești factori de amplificare și la valorile maxime ale accelerațiilor, vitezelor și deplasărilor la diverse stații și pentru cele patru cutremure majore.

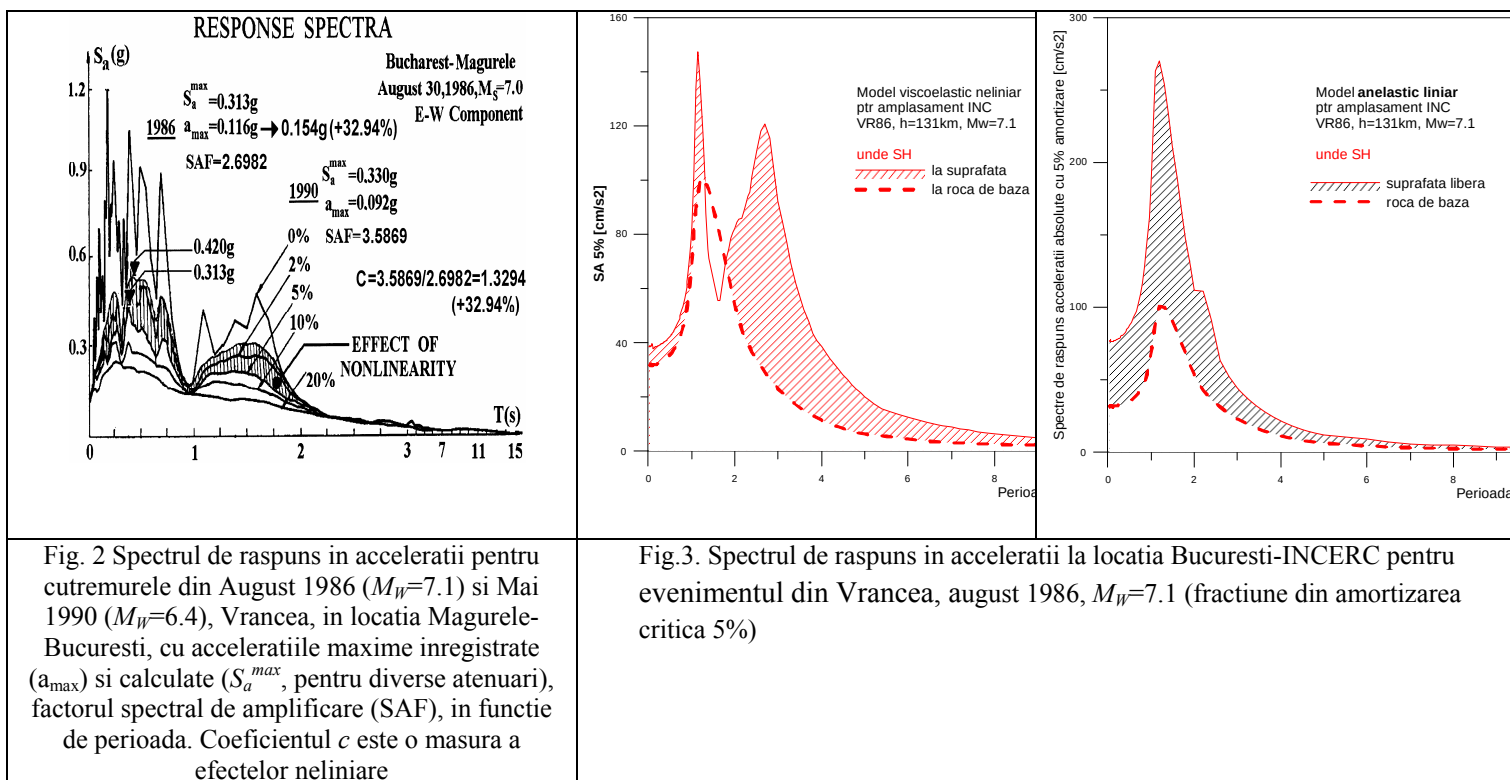


Fig. 2 Spectrul de raspuns in acceleratii pentru cutremurele din August 1986 ($M_W=7.1$) si Mai 1990 ($M_W=6.4$), Vrancea, in locatia Magurele-Bucuresti, cu acceleratiile maxime inregistrate (a_{max}) si calculate (S_a^{max} , pentru diverse atenuari), factorul spectral de amplificare (SAF), in functie de perioada. Coeficientul c este o masura a efectelor neliniare

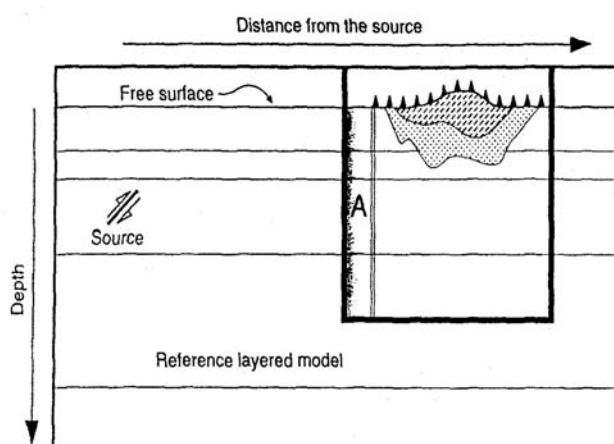
Fig.3. Spectrul de raspuns in acceleratii la locatia Bucuresti-INCERC pentru evenimentul din Vrancea, august 1986, $M_W=7.1$ (fractiune din amortizarea critica 5%)

In continuarea etapei precedente, pentru a completa studiul factorilor de amplificare, in varianta cea mai simpla a acestei teorii, elementul local de interes s-a modelat cu un oscilator armonic liniar amortizat supus actiunii unei forte periodice externe, in cadrul **Miscarii oscilatorie liniare fortate cu atenuare**. Aceasta teorie a fost extinsa in etapa III la investigarea regimului de rezonanta, la derivarea simplificata a factorilor de amplificare spectrali pentru deplasare, viteza si acceleratie, si la studiul regimului de socuri, atunci cind forta externa are o durata finita. Prin aceasta dezvoltare teoretica se realizeaza instrumentele necesare pentru o estimare calitativa rapida, cu mijloace semi-analitice, a factorilor de amplificare si a efectului lor asupra elementului de interes, si se pot face predictii asupra unor astfel de efecte de amplificare ale miscarilor seismice.

Mai departe ne vom ocupa de comportamentul solurilor continute in structura geologica locala, tinind cont de caracteristicile sursei seismice si de informatiile geologice si geotehnice disponibile ale mediului de propagare. Ca urmare a acestui tip de comportament se va considera evaluarea efectelor seismice locale. Se va face o analiza comparativa a raspunsului local folosindu-se mai multe metode de evaluare specifice modificate si adaptate de echipa care realizeaza acest proiect.

2)Evaluarea efectelor seismice locale.

2.1) Metoda hibridă. Aspecte teoretice și aplicative. Metoda hibridă, inițiată de Făh în 1991 și continuu dezvoltată pe măsura aplicării ei în diferite cazuri, este o combinație a tehnicii sumării multimodale aplicată mediului de propagare (bedrock) al undelor seismice produse de sursă cu tehnica diferențelor finite aplicată structurii geologice locale a punctului de interes pentru care dorim o evaluare detaliată a mișcării și răspunsului seismic local. Schema de principiu a metodei este prezentată în Fig.1. Pentru cazul cutremurelor puternice produse în zona Vrancea, bedrock-ul este modelat ca un mediu inelastic cu straturi omogene și paralele. Câmpul de unde seismice generat de sursa seismică este evaluat prin metoda sumării multimodale și folosit apoi ca input în gridul folosit de tehnica diferențelor finite pentru evaluarea mișcării seismice prin structura geologică locală a site-ului de interes, structură ce conține straturi cu geometrii complexe și numeroase neomogenități laterale.



Tehnica diferențelor finite fiind foarte cunoscută și folosită în diverse domenii, în cele ce urmează nu se va prezenta teoria metodei multimodale. Specificăm că în prezentul studiu de aplicabilitate al metodei hibride am folosit câmpul complet al undelor seismice SH și P-SV calculat prin rulări separate ale programelor de calcul specifice pentru fiecare din componentele radială (RAD), transversală (TRA) și verticală (VER). La calcularea seismogramelor sintetice (în termeni de deplasări, viteze, accelerații) prin metoda sumării modurilor

avem nevoie de întregul spectru al vitezelor
Fig. 1

de fază și de grup pentru undele de volum și de suprafață care se pot propaga prin mediul structural considerat. Estimarea contribuției diferitelor moduri de vibrație la deplasarea rezultantă produsă de undele seismice la suprafața liberă se face prin calcularea analitică a integralei energiei care se definește astfel:

$$I = \int_0^{\infty} \rho(z) \left(\frac{u_y(z)}{u_y(0)} \right)^2 dz = \int_0^{\infty} \rho(z) \left(\frac{\dot{u}_y(z)}{\dot{u}_y(0)} \right)^2 dz \quad (1)$$

Din (1) se poate observa că integrala energiei I are valori mici când deplasarea rezultantă la suprafața liberă ($z=0$) este mare. Modul fundamental de vibrație are valorile cele mai mici ale integralei I pe întreaga plajă de frecvențe considerată, deci el are contribuția majoră în deplasarea rezultantă la suprafață, ceea ce este valabil pentru o sursă seismică superficială (cutremure normale) iar calcularea seismogramelor sintetice se poate face cu un număr relativ restrâns de moduri. Sursele seismice cu adâncimi hipocentrale relativ mari – cum este cazul cutremurelor intermediare – sunt capabile de a excita mai multe moduri de vibrație în structurile stratificate, deci contribuția modurilor superioare începe să devină importantă iar în calculul deplasărilor la suprafața liberă trebuie considerate mult mai multe sau chiar toate modurile posibile, ceea ce duce la creșterea timpului de calculator. Un alt factor important în calculul seismogramelor sintetice prin metoda sumării modurilor este factorul de calitate al mediului de propagare, definit ca inversul produsului dintre viteza de fază c și atenuarea fazei respective C : $Q = \frac{1}{2Cc}$.

Metoda hibridă presupune calculul seismogramelor sintetice prin tehnica sumării modurilor numai pe prima parte a parcursului undelor seismice de la sursă până la regiunea de interes prin structura geologică regională (1-D, aici denumită și „bedrock”). Câmpul deplasărilor produse de sursa seismică pe parcursul respectiv este introdus în grila de diferențe finite sub forma unor coloane de seismograme pe adâncime notate cu A în Fig. II.1 și este folosit ca input pentru propagarea undelor prin structura geologică locală modelată mult mai detaliat. Calculele cu tehnica diferențelor finite se efectuează separat pentru undele SH și cuplajul P-SV, întrucât ecuația generală de mișcare se descompune în două ecuații distincte pentru fiecare tip de undă. De asemenea, această separare a calculelor este necesară și pentru satisfacerea condițiilor de continuitate a câmpurilor de tensiuni și deplasări la interfețele straturilor geologice pentru fiecare tip de undă. Aplicarea metodei hibride pentru evaluarea efectelor seismice locale în cazul structurilor geologice sedimentare excitate de cutremure intermediare vrâncene a necesitat extinderea programelor de calcul și modificarea adecvată a schemelor de diferențe finite.

2.2) Distribuția generală a parametrilor mișcărilor seismice puternice: validări ale modelărilor și teste de stabilitate. Distribuția parametrilor mișcărilor seismice puternice pentru București este simulată folosind metoda hibridă care ia în considerare efectele sursei seismice, ale mediului de propagare și ale structurii geologice locale în generarea seismogramelor sintetice (în termeni de deplasare, viteză și accelerație). Calculul parametrilor mișcării seismice implică două etape: simularea propagării undelor seismice generate de sursă folosind un model mediu unidimensional pentru reprezentarea structurii geologice regionale „bedrock”, urmată apoi de generarea seismogramelor sintetice la suprafața liberă considerând propagarea undelor prin structura geologică locală. Domeniul de frecvențe folosit în aceste calcule 0.005-1 Hz include perioadele de oscilație ale clădirilor înalte, tipice orașului București. Simulările numerice ale parametrilor mișcării seismice la suprafață, în București, sunt parte integrantă a analizelor de hazard și de risc seismic efectuate - de obicei - prin metode deterministe (DSHA), în timp ce analizele de tip probabilist (PSHA) se rezumă la baza de date înregistrate la aceste cutremure; în aceste cazuri este absolut necesară alegerea unui „cutremur de referință”, deoarece față de acest eveniment se vor face corecțiile și interpretările modelărilor tuturor scenariilor seismice.

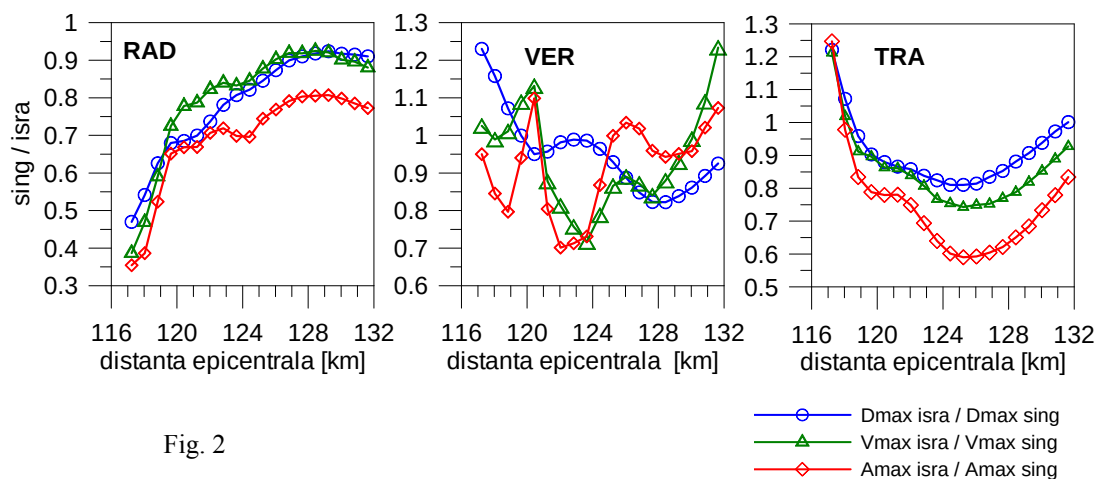


Fig. 2

Ca exemplu, în Fig. 2 sunt reprezentate rapoartele valorilor maxime ale accelerațiilor calculate folosind aceste modele pentru componentele radială (RAD), verticală (VER) și transversală (TRA) în cazul evenimentului din 30 august 1986 pentru un set de 19 receptori virtuali dispuși la distanțe egale în lungul profilului S2. Se poate observa că apar diferențe pentru componentele TRA și RAD, în timp ce pentru componenta VER cele două modele dau rezultate similare. Ca test de stabilitate al rezultatelor simulării numerice s-a folosit comparația seismogramelor (accelerații, viteze și deplasări) obținute aplicând metoda hibridă cu cele ale metodei analitice aplicate în cazul unidimensional al structurii geologice regionale, fiind acceptate numai diferențe mai mici de 10% între cele două tipuri de simulări. Pentru validarea modelelor numerice folosite în simulare s-a folosit comparația rezultatelor metodei hibride aplicate pentru cazul bidimensional folosind structura regională și cea locală cu înregistrările evenimentului simulat. Un exemplu de validare a rezultatelor simulării este dat în Fig.3 pentru cutremurul din 30 august 1986 înregistrat la stația INC în nord-estul Bucureștiului (profilul S4, model structură locală strate paralele). Se observă că semnalul simulat sintetic reproduce amplitudinea și durata semnalului înregistrat la stația respectivă, filtrat pentru domeniul de frecvențe folosit în simulare, la un nivel foarte bun din punct de vedere al aplicațiilor în inginerie, mai ales pentru componentele RADială și TRAnsversală, în timp ce componenta VERticală, mai puțin importantă din punct de vedere ingineresc și al transmisiei de energie seismică este 17%, subevaluată în aceasta simulare. Un rezultat al testelor 1D efectuate cu metoda hibridă se poate observa în Fig. 4 care reprezintă variația PGA („peak ground acceleration” – accelerația maximă simulată) în funcție de distanța epicentrală și modelele de bedrock folosite (inițial - linia roșie; cel final - linia albastră).

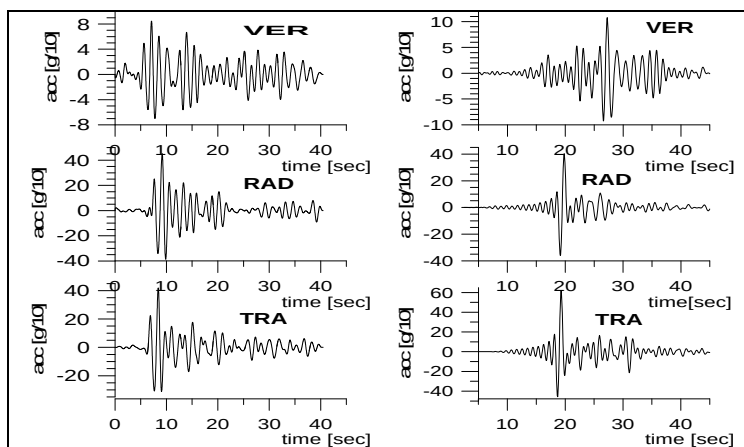


Fig. 3 Accelerograme VR86 înregistrate la stația INC, rotite și filtrate în domeniul de frecvențe al simulărilor (stânga) și accelerogramele simulate pentru VR86 prin metoda hibridă (dreapta)

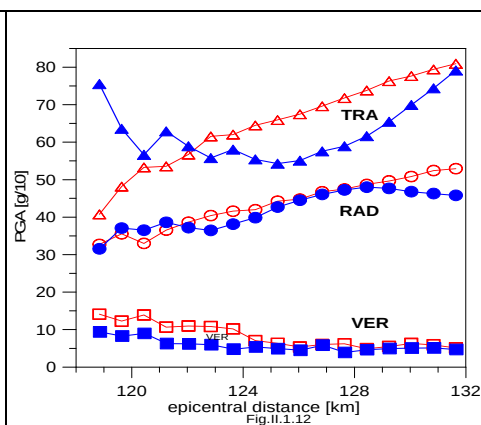


Fig. 4 Variația PGA (simulata) pe cele trei componente, în funcție de distanța epicentrală și modelele de bedrock folosite (inițial - roșu; cel final – albastru)

Se pot mai multe exemple de validare a simulărilor numerice, unul fiind prezentat în Fig. 5 unde (a) reprezintă accelerograma înregistrată la stația MAG la evenimentul VR901 rotită din componentele NS, EV, Z în RAD, TRA, VER; (b) aceeași accelerogramă filtrată în domeniul 0.005-1 Hz; (c) rezultatele simulării numerice prin metoda hibridă. Se poate observa, ca și în cazul precedent, că semnalele sintetice reproduc bine forma și durata în timp a accelerațiilor înregistrate (în Fig. 5 a-b și c timpul de origine nu este același), de asemenea pentru amplitudinile componentelor transversală – considerată de cel mai mare interes în aplicațiile ingineriei seismice – și componenta

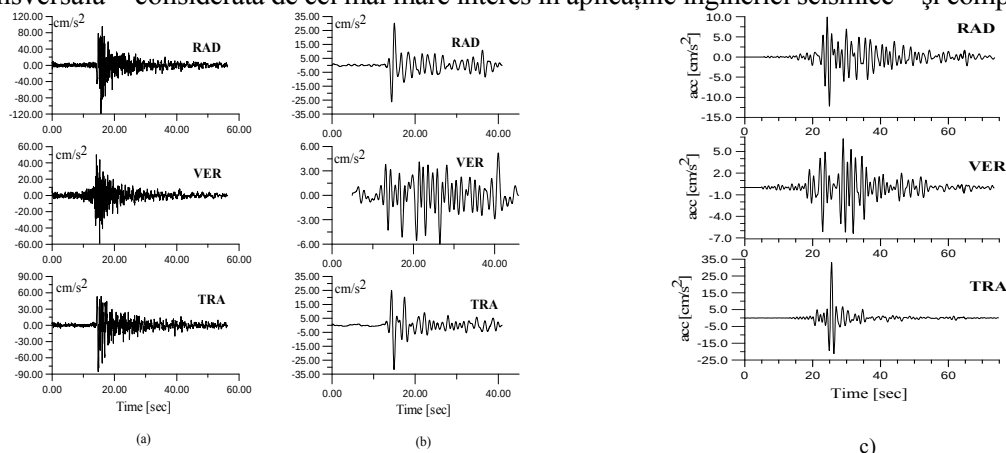


Fig.5

verticală. Componenta radială sintetică a semnalului respectiv este subevaluată în comparație cu cea înregistrată la stația MAG. O altă metodă de validare a simulărilor sintetice constând în compararea conținutului energetic E_t pe domeniul de frecvențe folosit în simulări al semnalelor înregistrate și celor simulate. Acest lucru se poate observa în partea de sus a figurii 6 în care liniile punctate corespund semnalelor înregistrate iar cele continue semnalelor simulate numeric pentru stația respectivă folosind metoda hibridă; culorile diferențiază factorii de ductilitate astfel: albastru $m=1$, roșu $m=2$ și verde pentru $m=4$. Ca și din cele prezentate în Fig. 5, se poate observa perfecta similitudine dintre semnalul sintetic și cel real înregistrat pentru cutremurul din 30 mai 1990 (VR901) pentru componentele transversală și verticală (aici notată UP), în timp ce componenta radială a aceluiași semnal sintetic este subestimată. Deși abordările moderne „energetice” - practic calculul în termeni de energie - devin din ce în ce mai populare, parametrul de mai mare interes în seismologia inginerască decât accelerația la suprafață rămâne spectrul de răspuns, fiind cel mai des folosit pentru exprimarea inputului seismic. În partea de jos a Fig. 6 observăm că spectrele de răspuns calculate pentru aceleași semnale reale și sintetice arată potriviri mult mai bune-pentru toate cele trei componente-decât accelerațiile înseși, SA manifestând o stabilitate care este de preferat în practica inginerască, precum și în studiile seismologice cu aplicabilitate în microzonarea seismică. Distribuția teritorială a valorilor maxime în termeni de deplasare, viteză, accelerație pentru fiecare componentă simulate prin metoda hibridă pentru evenimentul de referință VR86 sunt calculate (Fig. 7) și se poate concluziona că, în conformitate cu datele înregistrate la cutremurul puternic din 1986, din simulare reiese că valorile maxime ale accelerației terenului se realizează în partea de nord a Bucureștiului și valorile mai mici în partea de sud-est a orașului. Pentru partea de nord-vest a orașului nu au fost disponibile înregistrări ale acestor cutremure cu care să putem calibra simulările numerice.

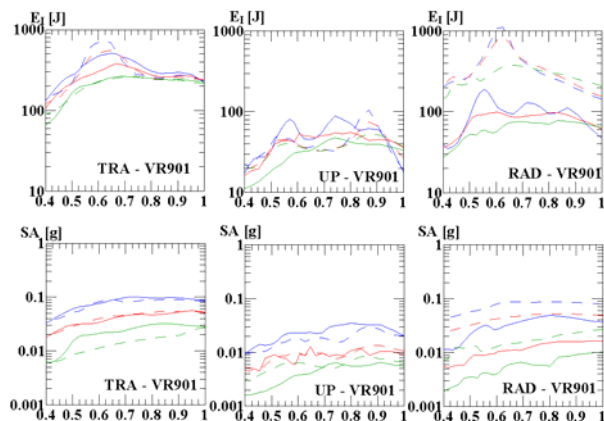


Fig. 6

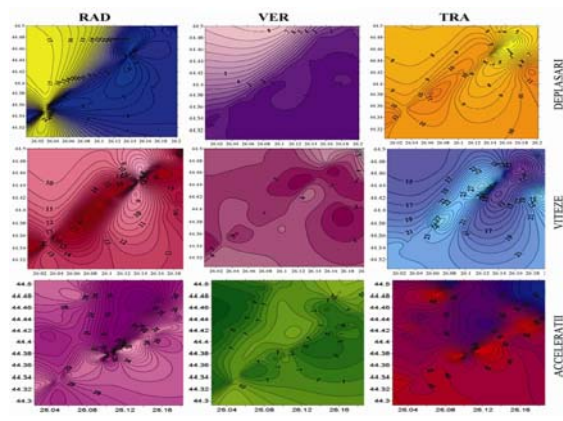


Fig. 7

2.3) Evaluarea efectelor seismice locale. Pentru analiza efectelor seismice induse de structurile geologice locale este mai convenabil să considerăm valorile relative ale parametrilor mișcării seismice calculați sintetic, cea mai folosită mărime fiind accelerația maximă relativă care reprezintă raportul $A_{\max}(2D) / A_{\max}(1D)$ pentru fiecare punct de pe suprafața orașului în care s-au calculat accelerograme sintetice. Acest mod de abordare a problemei aplicat aici este convenabil în **evaluarea efectelor locale induse de structura locală. Calculele respective reprezintă determinarea funcțiilor de tranfer de la roca de baza la suprafața.** Notația 2D se referă la calculele făcute luând în considerare ambele structuri geologice (structura geologică regională și cea locală) iar notația 1D desemnează calculele făcute prin aceeași metodă, folosind însă numai structura geologică regională.

Fig. 8 prezintă distribuția $A_{\max}$ relative pentru structura locală a profilului S2 calculate în cazurile ultimelor patru cutremure vrâncene puternice. Se constată că amplificările induse de structura locală la aceste evenimente sunt diferite, componenta verticală fiind cea mai afectată (cercuri - componenta RADială, triunghiuri - componenta TRAnsversală și romburi - componenta VERTicală).

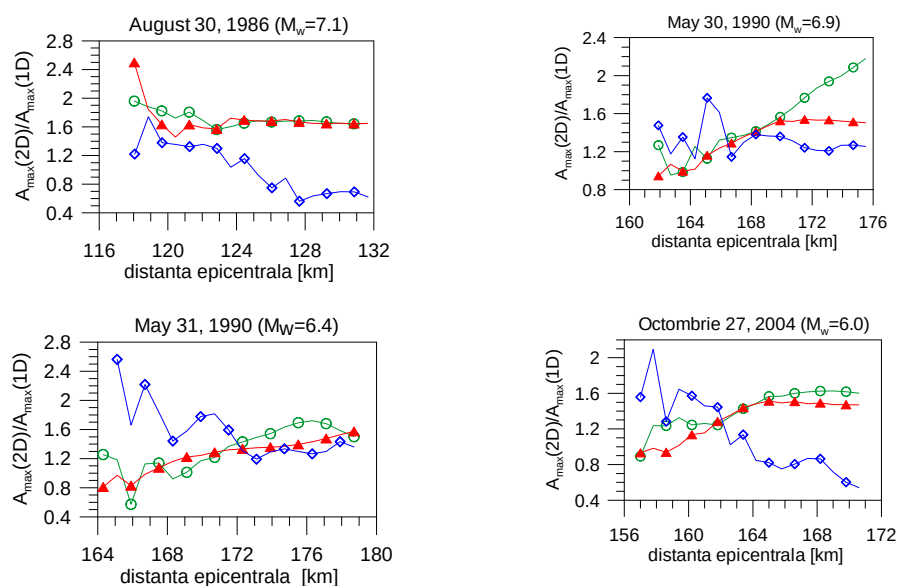


Fig. 8

De exemplu, componenta transversală a accelerației este amplificată de aproximativ 1,6 ori de structura geologică S2 la cutremurul cel mai puternic VR86 ($M_w=7.1$), în timp ce efectul aceleiași structuri la VR902 ($M_w=6.4$) constă într-o amplificare mai mică (1,2) și pe primii 4 km ai secțiunii se constată chiar o atenuare a semnalului la suprafață

$\frac{A_{\max}(2D)}{A_{\max}(1D)} = 0,8 \div 1$. Componenta radială a accelerațiilor are un comportament similar cu cel al componentei transversale.

Amplificarea componentei verticale descrește rapid cu distanța pentru VR86 unde pe ultimii 7 km ai secțiunii se vede practic atenuarea semnalului $\{A_{\max}(2D) / A_{\max}(1D) < 1\}$ în timp ce pentru VR902 care are magnitudine și adâncime hipocentrală mai mici, însă mecanism diferit de VR86, amplificările componentei verticale sunt mult mai mari (de la 2,5 la 1,2). Un comportament similar al acestei structuri locale se poate observa și pentru seismul de cea mai mică magnitudine VR04, $M_w=6$.

Putem conchide că structura locală în cauză are efect de amplificare al semnalului seismic similar pentru componentele radială și transversală cu valori medii între 1,2 și 1,5 pentru evenimentele cu magnitudine $M_w < 7$ (VR901, VR902, VR04). Pentru cazul seismelor cu $M_w > 7$ putem aștepta amplificări mai mari ale componentelor radiale și transversale de-a lungul acestei structuri, după cum se observă în cazul simulat al cutremurului de referință August 30, 1986 unde amplificările componentelor RAD și TRA au valori medii de 1,8-1,9. În ceea ce privește componenta verticală a mișcării seismice simulate pe această secțiune, comportamentul general evidențiază amplificări importante, de exemplu $A_{\max}(2D)/A_{\max}(1D) = 2,6$ și 2,1 pentru evenimentele VR902 și VR04, amplificări care scad rapid de-a lungul secțiunii până

la valori subunitare ce indică atenuarea semnalului seismic propagat pe direcția verticală. De remarcat că maximele amplificării verticale se realizează în cazurile seismelor de magnitudine relativ mică ($M_w=6,4$ respectiv 6) care au și mecanisme similare (clasă B), iar pentru VR86 ($M_w=7.1$) la care maximul amplificării pe verticală are valoarea cea mai mică, fenomenul de atenuare se manifestă pe mai mult de jumătate din lungimea secțiunii respective. **Concluzia care se desprinde din datele prezentate este că amplificările (valori și distribuția lor spațială) semnalului seismic vertical depind mai puțin de magnitudinea cutremurului decât de mecanismul de producere și adâncimea hipocentrală,** după cum se poate vedea și din studiul parametric al influenței adâncimii hipocentrale.

Din figura 9 se poate observa că distribuția accelerațiilor transversale de-a lungul secțiunii este similară pentru toate cele 3 adâncimi hipocentrale diferite fiind doar valorile maxime; evenimentul cu hipocentrul cel mai apropiat de suprafață producând, cum e și normal, valorile cele mai mari ale accelerațiilor la suprafața structurii locale.

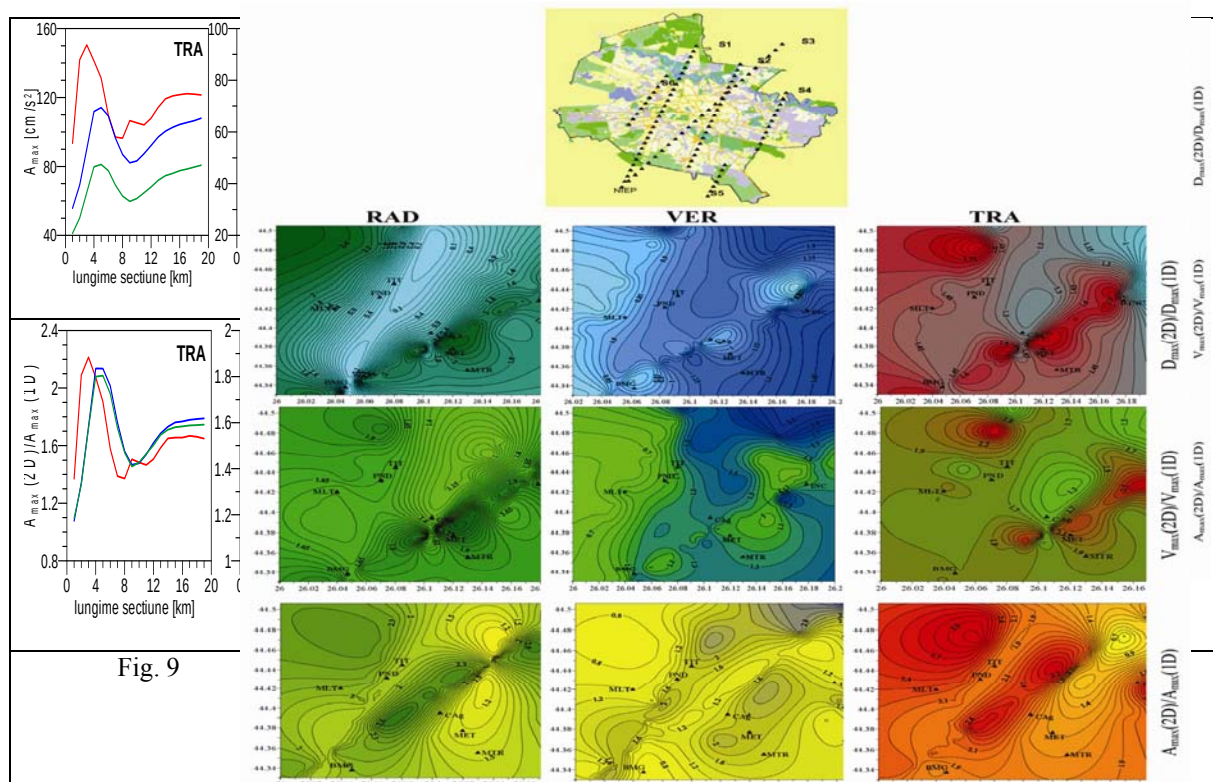


Fig. 9

Distribuția valorilor maxime ale accelerațiilor radiale la suprafața acestei structurii locale respectă același trend general ca și accelerațiile transversale, cu deosebirea că pentru $h=110$ km tendința acestora este descrescătoare și nu crescătoare ca pentru $h=120$, respectiv 130 km, dar în continuare valorile maxime rămân invers proporționale cu adâncimea hipocentrală. În ceea ce privește comportamentul componentei VERticale, proporționalitatea inversă a maximelor la suprafață cu adâncimea hipocentrală observată la componentele TRA și RAD nu se mai păstrează, în schimb, amplificarea (valorile relative ale accelerațiilor - Fig. 10) semnalului seismic vertical indusă de această structură locală crește neliniar cu adâncimea hipocentrală până la valori de 2,2 și 2,4 pentru $h=120$, respectiv 130 km și amplificări mai mici de 1,5 pentru adâncimea hipocentrală de 110 km. **Utilizarea valorilor relative $[D_{max}(2D)/D_{max}(1D)$; $V_{max}(2D)/V_{max}(1D)$ și $A_{max}(2D)/A_{max}(1D)$] ale parametrilor mișcării seismice la suprafață se dovedește utilă pentru analiza comportamentului seismic al structurii locale la diferite cutremure pentru care s-au făcut validări și/sau calibrări ale modelelor numerice folosite în simulări, cum este și cazul acestui studiu.**

Fig. 11. Efecte locale în București reprezentate prin valorile relative ale parametrilor mișcării seismice pentru cutremurul de referință

Cunoașterea distribuției amplificărilor locale (funcții de transfer) pentru diferite scenarii seismice deja realizate sau doar așteptate reprezintă un pas esențial în evaluarea hazardului seismic local. Aceste distribuții simulate pentru cutremurul de referință folosind modele validate de înregistrările rotite și filtrate pe domeniul 0,05-1 Hz ale evenimentului VR86 sunt prezentate în Fig. 11 cu specificarea că programul de grafică folosit face doar conexiunea coordonate spațiale - valoare maximă, neavând posibilitatea corelării acestor perechi cu informațiile geologice pe care s-a bazat modelarea efectivă.

2.4) Metoda MS-SH. Aplicarea metodei MS-SH pentru evaluarea răspunsului seismic local și a efectelor seismice induse în structura geologică locală de cutremurele puternice presupune mai multe etape: o etapă privitoare la investigarea posibilelor *surse seismice* sau a istoriei, a seismicității zonei sursei dacă acesta este cunoscută, inclusiv studiul mecanismelor determinate, alegerea mecanismului reprezentativ și parametrii de modelare a sursei seismice caracteristici metodei MS; o etapă privitoare la compilarea *modelelor structurale* rezultate din cunoașterea detaliată a geologiei și proprietăților geotehnice ale ariei investigate și a parcursului intermediar începând cu zona seismogenă Vrancea; modelarea structurii locale folosită în MS-SH se face în principal prin determinarea parametrilor geotehnici și a funcțiilor dinamice ale pământurilor prin teste de laborator, *in situ* sau folosirea unor curbe $G=G(\gamma)$, $D=D(\gamma)$ publicate și/sau recomandate pentru tipurile de materiale conținute în structura locală; o altă etapă specifică metodei MS-SH este calcularea inputului seismic, testarea influenței alegerii nivelului considerat „roca de bază”, verificarea completitudinii în frecvențe a semnalului introdus în structură se face prin compararea spectrelor Fourier ale excitației seismice calculată sintetic cu cel puțin o înregistrare de suprafață pentru site-ul respectiv, chiar dacă nu este înregistrarea unui cutremur puternic; *Calculul parametrilor* ce redau comportamentul seismic al structurii locale: accelerație la suprafață, viteza și deplasarea relative, istoria tensiunilor și a deformațiilor într-unul sau mai multe straturi de interes, spectrul Fourier și spectrele de răspuns (cu factori de amortizare între 0 și 20%) în termeni de accelerație absolută, viteze relative și deplasări relative. Toate acestea se obțin prin folosirea oricărui program bazat pe aproximația liniară echivalentă în descrierea comportamentului vâscoelastic neliniar al pământurilor tip ProShake, Eera etc. sau chiar modelări histeretice neliniare dacă le considerăm necesare; **Evaluarea efectelor seismice locale în metoda MS-SH se face prin funcția de transfer a cărei definiție furnizează nu numai valoarea relativă a parametrilor mișcării seismice ci și dependența acestor rapoarte de frecvență pentru pachetul de straturi considerat;** *Controlul simulărilor* se face pe baza înregistrărilor disponibile în locul respectiv, rotite și filtrate în domeniul de frecvențe pentru care se face analiza.

Câteva din rezultatele obținute prin aplicarea metodei MS-SH pentru evaluarea efectelor locale al unui amplasament din orașul Bacău sunt prezentate în figurile 12. Evenimentele seismice pentru care s-a făcut investigația sunt cele din 30 aug. 1986 (VR86, $M_w=7,1$), 30 și 31 mai 1990 (VR901, $M_w=6,9$ respectiv VR902, $M_w=6,4$).

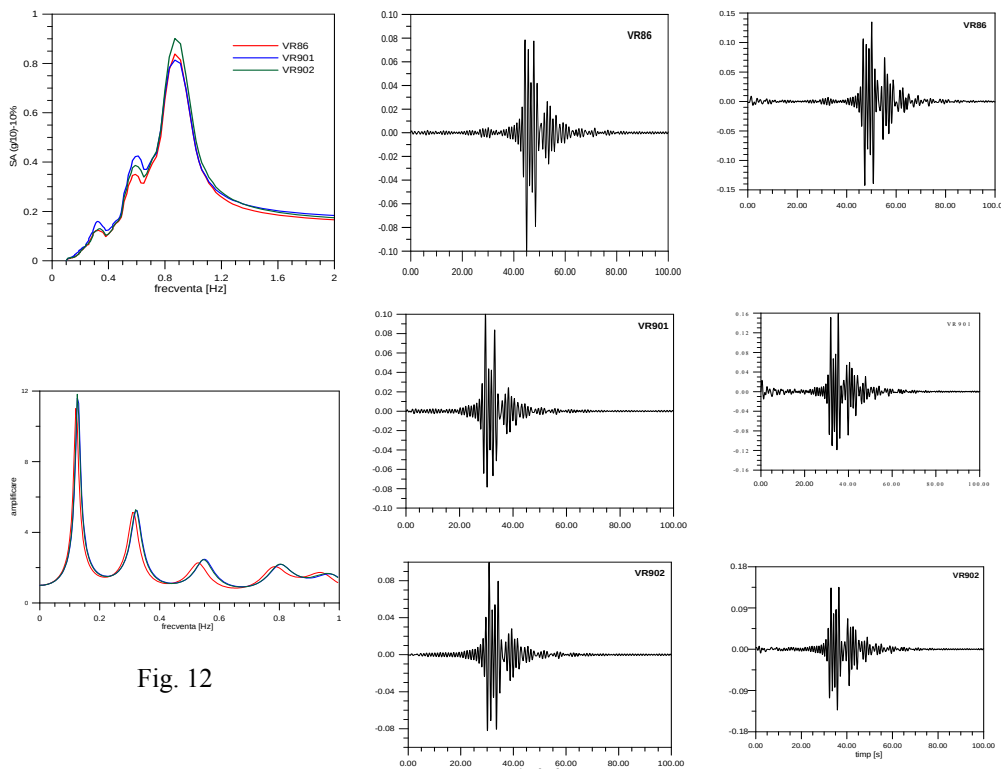


Fig. 12

Acceleratii la roca de baza
[g]

Acceleratii la suprafata [g]

Pentru orasul Bucuresti calculele au folosit structura regională de propagare a undelor seismice din Vrancea până la aria oraşului, inițial conceputa pentru estimarea hazardului și a fost modificată pentru a include rezultatele experimentelor de refractie seismică VRANCEA'99 conform (V. Răileanu, 2002), tomografie seismică a zonei Vrancea și rezultatele din inversia neliniară a undelor de suprafață. Toate aceste experimente au facut parte din activitatea institutului nostru in ultimii zece ani. Înregistrările seismelor

puternice folosite în verificarea simulărilor au fost furnizate de stația INC (SMA-1, INCERC București) rotite și filtrate low-pass Gauss pe domeniile 0.05 - 1 Hz și 0.1 - 2 Hz. În Fig. 13 se prezintă spectrele de răspuns amortizat 5% calculate prin MS-SH pentru locația stației seismice în cazul celor mai puternice evenimente înregistrate, reprezentate prin liniile punctate (albastru: domeniul 0,05 - 1 Hz; roșu: 0,1 - 2 Hz). În aceleași figuri cu linie continuă sunt reprezentate spectrele componentelor transversale înregistrate și filtrate până la 1 Hz (albastru) și până la 2 Hz (roșu). Se poate observa reproducerea foarte exactă a perioadelor specifice structurii locale de către semnalul simulat sintetic pentru evenimentul VR86 în domeniul de până la 1 Hz (albastru), în timp ce pentru domeniul de frecvențe extins la 2 Hz pentru același eveniment sinteticul prezintă doar un singur peak chiar pe media maximelor din semnalul înregistrat.

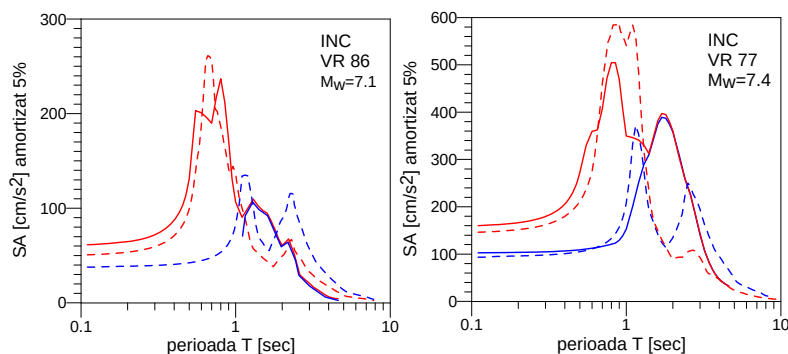


Fig. 13

Pentru evenimentul VR86 spectrul accelerației sintetice amortizat 5% în domeniul 0.1 - 2 Hz (linia roșie punctată din partea stângă a Fig. 13) fitează foarte bine pe cel obținut din înregistrare reprezentat prin linia roșie continuă ($SA_{max}=260 \text{ cm/s}^2$ sintetic și $SA_{max}=242 \text{ cm/s}^2$ real, supraevaluare de 7,438%) iar modelele de bedrock, structură locală inclusiv curbele dinamice respective au fost folosite în continuare la simularea prin aceeași metodă a răspunsului seismic pentru zona considerată în cazul a 5 evenimente reale cu magnitudinile cuprinse între 6 (27.X.2004) și 7.4 (4.III.1977) și un eveniment ipotetic „cutremurul maxim posibil” care se poate produce în zona Vrancea ($M_w=7.7$).

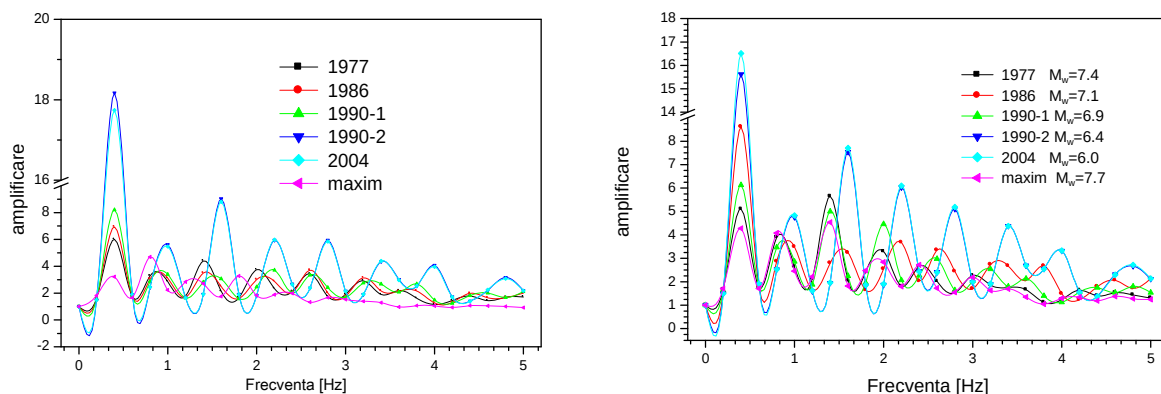


Fig. 14

Efectele locale sunt descrise în termeni de spectre de amplificare reprezentate separat pentru domeniile de frecvențe folosite: (0.05 - 1) Hz în Fig. 14 (stinga) și (0.1 - 2) Hz în Fig. 14 (dreapta). Se poate observa că excitațiile seismice de până la 1 Hz produc amplificări mari în structura locală considerată mai ales pentru cutremurele de magnitudine „mică”: 6.0 în 27.X.2004 respectiv 6.4 pentru 31.V.1990 (Fig. 14-stinga, desemnat prin **1990-2**), în timp ce la cutremurele cele mai puternice (în Fig. 14-stinga notate cu **1977**, **1986**, **maxim**) funcțiile de transfer au valori din ce în ce mai mici pe măsură ce magnitudinea crește. Amplificarea așteptată pentru o asemenea structură locală în cazul cutremurului maxim posibil este „doar” 5 și se realizează la 0,9 Hz. În cazul inputului seismic calculat pentru aceleași evenimente în domeniul de până la 2 Hz se pot observa funcțiile de transfer obținute folosind aceleași modele în Fig. 14-dreapta: amplificările au valori maxime puțin mai scăzute decât în cazul precedent și ele scad mult mai ordonat pe măsură ce magnitudinea crește. Spre exemplu, amplificarea maximă așteptată în cazul evenimentului maxim posibil este de 4,5 și se realizează la frecvența de 1,5 Hz. Amplificarea maximă a acestei structuri supusă excitației seismice 0.1 - 2 Hz este 16,5 pentru frecvența de 0,35 Hz și se realizează în cazul cu $M_w=6$.

Etapa 4:

1)Introducere. In aceasta etapa sint incluse rezultate originale privitoare la aproximatia razelor geometrice in medii slab neomogene. Aceasta metoda este importanta pentru includerea efectului neomogenitatilor mediului in propagarea undelor, a defectelor, localizate, extinse, corelate spatial, si, in special, pentru a se aduce corectii de tip unda la aproximatia razelor geometrice. In particular, metoda permite includerea efectelor de ordin superior in studiul dispersiei. Aproximatia cuasi-clasica in ecuatia undelor, numita si aproximatia Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB sau WKBJ cu includerea lui Jeffreys), se refera la componenta spatiala a propagarii undelor intr-un mediu neliniar cu vectorul de unda (generalizat) dependent slab de pozitie. Dupa exemplul modelului stratificat al unui mediu elastic se studiaza aceasta ecuatie intr-o succesiune de strate adiacente, suficient de subtiri pentru a aproxima vectorul de unda cu o constanta in fiecare strat. Conditiiile de continuitate a undelor la fiecare interfata conduc la o relatie de recurenta matriciala pentru amplitudinile undelor reflectate si transmise, ecuatie rezolvata in ipoteza unui numar infinit de strate suficient de subtiri. In conditiile in care vectorul de unda are o dependenta spatiala slaba, solutia este identica cu solutia integrala a aproximatiei WKB. Aceste cercetari sint de importanta pe plan mondial in cadrul domeniului nostru de interes intrucit ele prezinta un potential considerabil aplicativ si necesita totodata abordari teoretice complexe.

Studiul incepe prin incercarea de a modela fenomenele elastice in medii anisotrope. S-a abordat elasticitatea unui solid elastic cu o axa de anisotropie, plecind de la clasificarea diverselor contributii la energia elastica a acestui mediu dupa simetria grupului de rotatii in jurul axei de simetrie. Aceasta metoda este cea mai potrivita pentru a introduce diversele contributii provenite din anisotropie in elasticitatea generalizata la repere necarteziene. In cadrul solidului elastic axial s-a gasit ca deformarea lui elastica este descrisa de un tensor de ordinal doi, un vector si un scalar, asa incit energia lui elastica contine 5 invarianti, si in consecinta 5 constante de cuplaj elastic. Un astfel de solid anisotrop este formal similar, in comportarea lui elastica, cu un solid cristalin cu simetrie hexagonala, desi

semnificatia coordonatelor si a cimpului de deformare elastica este diferita. Se studiaza stabilitatea deformarii elastice a unui astfel de solid anisotrop axial, si se vor gasi constrangeri corepsunzatoare asupra constantelor de cuplaj elastic. In continuare, deformarile elastice ale unui astfel de solid au fost clasificate in moduri de forfecare si de comprimare-dilatate atat bazale cit si axiale, si, in plus, s-a identificat un nou mod de deformare, complex, ce se poate caracteriza ca un mod de “giture”.

2) Elasticitatea unui solid axial anisotrop

Energia elastica. Energia elastica a unui solid in aproximatia liniara depinde, in general, de un tensor de constante C_{ijkl} , ai carui indicii sint cartezieni. Prin urmare, exista, in general, $3^4=81$ constante elastice. Dar tensoul C_{ijkl} este simetric in ij si in kl , ceea ce inseamna ca din cele $3 \times 3 = 9$ componente ij sau kl ramin 6 independente, ceea ce conduce la $6 \times 6 = 36$ constante elastice. In plus, tensorul este simetric in perechile (ij) si (kl) , astfel incit matricea $6 \times 6 = 36$ contine $6 + (36 - 6) / 2 = 21$ constante elastice independente. Pentru aceste constante elastice se foloseste de obicei notatia lui Voigt [1] $1 \rightarrow xx, 2 \rightarrow yy, 3 \rightarrow zz, 4 \rightarrow yz(zx), 5 \rightarrow zx(xz), 6 \rightarrow xy(yx)$. Relatiile Cauchy $C_{12}=C_{66}, C_{13}=C_{55}, C_{23}=C_{44}, C_{45}=C_{36}, C_{56}=C_{14}, C_{46}=C_{25}$ pot reduce la 15 numarul acestor constante elastice. Solidele sint in general anisotrope la nivel atomic, conform cu simetria grupurilor lor punctuale finite, astfel incit numarul cele 21 de constante elastice se reduce corespunzator fiecarei simetrii cristaline. In limita simetriei continue la grupul rotatiilor constantele elastice sint in numar de 2, corespunzator coeficientilor Lamé λ si μ .

In afara de aceasta anisotropie la nivel atomic, si intermediar intre simetria de grupuri finite si simetria de grupuri continue, solidele cu o structura complexa pot prezenta anisotropii la nivel macroscopic. Proprietatile elastice si propagarea undelor in astfel de solide anisotrope sint diferite in acest caz fata de situatia din solidele isotrope, sau fata de situatia din solidele cu anisotropie la nivel atomic, ceea ce motiveaza un studiu special. In general, metoda de elasticitate anisotropa prezentata aici[2] poate fi extinsa la elasticitatea mediilor finite si cu geometrii speciale, in care neliniaritatile aduc o contributie importanta. Exemplu tipic de solid anisotrop este solidul cu anisotropie axiala, adica un mediu elastic ce este isotrop in planul (xy) si care are o axa de anisotropie in lungul directiei z . Coordonatele x, y, z si, respectiv, indicii 1, 2, 3 sint doua tipuri de notatii folosite fara diferentiere in continuare. Lungimea infinitesimala pentru solidul axial anisotrop este data de

$$dl^2 = dx_i^2 + dx_3^2 \quad (1)$$

unde $i=1,2$, care devine

$$\begin{aligned} d\tilde{l}^2 = & \left[(1 + \partial u_1 / \partial x_1) dx_1 + \partial u_1 / \partial x_2 \cdot dx_2 + \partial u_1 / \partial x_3 \cdot dx_3 \right]^2 + \\ & + \left[\partial u_2 / \partial x_1 \cdot dx_1 + (1 + \partial u_2 / \partial x_2) dx_2 + \partial u_2 / \partial x_3 \cdot dx_3 \right]^2 + \\ & + \left[\partial u_3 / \partial x_1 \cdot dx_1 + \partial u_3 / \partial x_2 \cdot dx_2 + (1 + \partial u_3 / \partial x_3) dx_3 \right]^2 \end{aligned} \quad (2)$$

sub actiunea cimpului de deformare $x_i \rightarrow \tilde{x}_i = x_i + u_i, i = 1, 2, 3$. In ordinul dominant in u_i (2) se poate scrie

$$d\tilde{l}^2 = dl^2 + 2u_{ij} dx_i dx_j + 2u_{i3} dx_i dx_3 + 2u_{33} dx_3^2 \quad (3)$$

in care este introdus tensorul de deformare

$$u_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2 \quad (4)$$

vectorul de deformare

$$u_{i3} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \right), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

si scalarul de deformare $u_{33} = \partial u_3 / \partial x_3$, toti in raport cu rotatiile in jurul axei de anisotropie. In conformitate cu principiile generale ale teoriei elasticitatii[3] densitatea de energie elastica contine in acest caz 5 invarianti patratici ce pot fi construiti cu deformatiile introduse mai sus, adica ea poate fi scrisa ca

$$\varepsilon_{el} = \lambda u_{ii}^2 + \mu u_{ij}^2 + \tau u_{i3}^2 + \sigma u_{33}^2 + \nu u_{33} u_{ii} \quad (6)$$

unde literele grecesti simbolizeaza 5 constante de cuplaj elastic. In astfel de expresii pentru densitatea de energie elastica se pot vedea elementele de noutate pe care elasticitatea anisotropa le aduce.

Este cunoscut faptul ca simetria hexagonala are 5 constante elastice. Energia (6) este foarte asemanatoare cu energia corespunzatoare simetriei hexagonale, scrisa in forma

$$\varepsilon_{el} = \left(\lambda + \frac{\mu}{2} \right) u_{ii}^2 + \frac{\mu}{2} \left[(u_{11} - u_{22})^2 + 4u_{12}^2 \right] + \tau u_{i3}^2 + \sigma u_{33}^2 + \nu u_{33} u_{ii} \quad (7)$$

dar coordonatele hexagonale $x, y \rightarrow \xi, \varsigma = x \pm y$, si cimpul elastic corespunzator sint diferite.

Introducind notatia $T = u_{ii}$ (8) pentru urma tensorului de deformare, se poate scrie

$$u_{ij}^2 = \left(u_{ij} - \frac{1}{2} T \delta_{ij} \right)^2 + \frac{1}{2} T^2 = \frac{1}{2} (u_{11} - u_{22})^2 + 2u_{12}^2 + \frac{1}{2} T^2 \quad (9)$$

si

$$\varepsilon_{el} = \mu \left(u_{ij} - \frac{1}{2} T \delta_{ij} \right)^2 + \left(\lambda + \frac{\mu}{2} - \frac{\nu^2}{4\sigma} \right) T^2 + \tau u_{i3}^2 + \sigma \left(u_{33} + \frac{\nu}{2\sigma} T \right)^2 \quad (10)$$

de unde se pot deduce imediat conditiile de stabilitate

$$\mu, \tau, \sigma > 0, \quad \nu^2 < 2\sigma(2\lambda + \mu) \quad (11)$$

Procesele elastice descrise de (10) pot fi clasificate in felul urmator.

Pentru $u_{11}=u_{22}=u_{i3}=u_{33}=0$ exista moduri de forfecare ale planului bazal (xy) cu densitatea de energie elastica $2\mu u_{12}^2$ pentru $u_{ij}=u_{33}=0$ exista moduri de forfecare axiale cu energia τu_{i3}^2 ; pentru $u_{12}=u_{i3}=u_{33}=0$ si $u_{11}=u_{22}$ se obtin moduri de compresie ale planului bazal cu densitatea de energie $2(2\lambda + \mu)u_{11}^2$; de asemenea, apar moduri de compresie axiale pentru $u_{ij}=u_{i3}=0$, cu densitatea de energie σu_{33}^2 ; in sfirsit, exista un mod special, ce poate fi numit un mod de "giture" definit de $u_{12}=u_{i3}=0$, $u_{11}=u_{22}$, $u_{33} + \frac{\nu}{2\sigma} T = u_{33} + \frac{\nu}{\sigma} u_{11} = 0$, de densitate de energie $\left(\lambda + \frac{\mu}{2} - \frac{\nu^2}{4\sigma} \right) T^2 = 2(2\lambda + \mu)u_{11}^2 - \sigma u_{33}^2$.

Unde elastice. Energia cinetica a miscarii elastice este data de

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \rho \int dV (\dot{u}_1^2 + \dot{u}_2^2 + \dot{u}_3^2) \quad (12)$$

unde ρ este densitatea iar V este volumul, energia elastica fiind obtinuta din (6) in forma

$$\begin{aligned}
E_{el} = & \int dV \left[(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{4} \tau \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \\
& + \int dV \left[\frac{1}{2} \mu \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{4} \tau \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \\
& + \int dV \left(2\lambda \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \\
& + \int dV \left\{ \frac{\tau}{4} \left[\left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \right] + \sigma \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \right\} + \\
& + \int dV \left[\frac{\tau}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \right] + \nu \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)
\end{aligned} \tag{13}$$

Introducind transformata Fourier

$$u_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\mathbf{q}} u_{i\mathbf{q}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{x}} \tag{14}$$

cu $\hat{u}_{i\mathbf{q}} = u_{i-\mathbf{q}}$, $i = 1, 2, 3$, energia cinetica devine

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \rho \sum_{\mathbf{q}} (\dot{\hat{u}}_{1\mathbf{q}} \dot{u}_{1\mathbf{q}} + \dot{\hat{u}}_{2\mathbf{q}} \dot{u}_{2\mathbf{q}} + \dot{\hat{u}}_{3\mathbf{q}} \dot{u}_{3\mathbf{q}}) \tag{15}$$

iar energia elastica

$$\begin{aligned}
E_{el} = & \sum_{\mathbf{q}} \left[(\lambda + \mu) q_1^2 + \frac{1}{2} \mu q_2^2 + \frac{1}{4} \tau q_3^2 \right] \hat{u}_{1\mathbf{q}} u_{1\mathbf{q}} + \\
& + \left[\frac{1}{2} \mu q_1^2 + (\lambda + \mu) q_2^2 + \frac{1}{4} \tau q_3^2 \right] \hat{u}_{2\mathbf{q}} u_{2\mathbf{q}} + \\
& + (2\lambda + \mu) q_1 q_2 \hat{u}_{1\mathbf{q}} u_{2\mathbf{q}} + \left[\frac{1}{4} \tau (q_1^2 + q_2^2) + \sigma q_3^2 \right] \hat{u}_{3\mathbf{q}} u_{3\mathbf{q}} + \\
& + \left(\frac{1}{2} \tau + \nu \right) q_1 q_3 \hat{u}_{3\mathbf{q}} u_{1\mathbf{q}} + \left(\frac{1}{2} \tau + \nu \right) q_2 q_3 \hat{u}_{3\mathbf{q}} u_{2\mathbf{q}}
\end{aligned} \tag{16}$$

Transformarea ortogonala

$$\begin{aligned}
u_{1\mathbf{q}} &= \cos \theta_{\mathbf{q}} \cdot v_{1\mathbf{q}} + \sin \theta_{\mathbf{q}} \cdot \tilde{v}_{2\mathbf{q}} \\
u_{2\mathbf{q}} &= -\sin \theta_{\mathbf{q}} \cdot v_{1\mathbf{q}} + \cos \theta_{\mathbf{q}} \cdot \tilde{v}_{2\mathbf{q}}
\end{aligned} \tag{17}$$

cu

$$\sin \theta_{\mathbf{q}} = \frac{q_1}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}, \quad \cos \theta_{\mathbf{q}} = \frac{q_2}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}$$

decupleaza miscarea in planul bazal, si conduce la

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \rho \sum_{\mathbf{q}} \left(\dot{\hat{v}}_{1\mathbf{q}} \dot{v}_{1\mathbf{q}} + \dot{\hat{v}}_{2\mathbf{q}} \dot{v}_{2\mathbf{q}} + \dot{\hat{v}}_{3\mathbf{q}} \dot{v}_{3\mathbf{q}} \right) \quad (19)$$

si

$$E_{el} = \sum_{\mathbf{q}} \left[\frac{1}{2} \mu (q_1^2 + q_2^2) + \frac{1}{4} \pi q_3^2 \right] \hat{v}_{1\mathbf{q}} v_{1\mathbf{q}} + \left[(\lambda + \mu) (q_1^2 + q_2^2) + \frac{1}{4} \pi q_3^2 \right] \hat{v}_{2\mathbf{q}} \tilde{v}_{2\mathbf{q}} + \left[\frac{1}{4} \tau (q_1^2 + q_2^2) + \sigma q_3^2 \right] \hat{u}_{3\mathbf{q}} u_{3\mathbf{q}} + \left(\frac{1}{2} \tau + \nu \right) |q_3| \sqrt{q_1^2 + q_2^2} \hat{u}_{3\mathbf{q}} \tilde{v}_{2\mathbf{q}} \quad (20)$$

Este de remarcat ca transformarea data de (17) si (18) revine la o rotatie de unghi $\theta_{\mathbf{q}}$ a polarizarilor in jurul axei de anisotropie, astfel incit $\tilde{v}_{2\mathbf{q}}$ este orientat in lungul vectorului de unda transversal $\mathbf{q}_{\perp} = (q_1, q_2)$ iar $v_{1\mathbf{q}}$ este perpendicular pe acest vector.

Hamiltonianul dat de (19) si (20) este adus la o suma de oscilatori armonici

$$H = \frac{1}{2} \rho \sum_{i\mathbf{q}} \left[\hat{v}_{i\mathbf{q}} \dot{v}_{i\mathbf{q}} + \omega_i^2(\mathbf{q}) \cdot \hat{v}_{i\mathbf{q}} v_{i\mathbf{q}} \right], \quad i = 1, 2, 3 \quad (21)$$

cu frecventele

$$\omega_1^2(\mathbf{q}) = \frac{1}{2\rho} (2\mu q_{\perp}^2 + \pi q_3^2)$$

si

$$\omega_{2,3}^2(\mathbf{q}) = \frac{1}{4\rho} \left([4(\lambda + \mu) + \tau] q_{\perp}^2 + (\tau + 4\sigma) q_3^2 \pm \left\{ [4(\lambda + \mu) - \tau] q_{\perp}^2 + (\tau - 4\sigma) q_3^2 \right\}^2 + 4(\tau + 2\nu)^2 q_3^2 q_{\perp}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

de o a doua transformare ortogonala

$$\begin{aligned} u_{3\mathbf{q}} &= \cos \varphi_{\mathbf{q}} \cdot v_{3\mathbf{q}} + \sin \varphi_{\mathbf{q}} \cdot v_{2\mathbf{q}} \\ \tilde{v}_{2\mathbf{q}} &= -\sin \varphi_{\mathbf{q}} \cdot v_{3\mathbf{q}} + \cos \varphi_{\mathbf{q}} \cdot v_{2\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\text{unde} \quad \tan 2\varphi_{\mathbf{q}} = \frac{2(\tau + 2\nu) |q_3| q_{\perp}}{[4(\lambda + \mu) - \tau] q_{\perp}^2 + (\tau - 4\sigma) q_3^2} \quad (25)$$

Introducind binecunoscutii operatori de creare si anihilare pentru excitatii de unda elementare

$$\begin{aligned} v_{i\mathbf{q}} &= \sqrt{\frac{\hbar}{2\rho\omega_i}} (a_{i\mathbf{q}}^{\wedge} + a_i - \mathbf{q}) \\ \dot{v}_{i\mathbf{q}} &= i \sqrt{\frac{\hbar\omega_i}{2\rho}} (a_{i\mathbf{q}}^{\wedge} - a_i - \mathbf{q}) \end{aligned} \quad (26)$$

hamiltonianul (21) ia forma diagonala obisnuita

$$H = \sum_{i\mathbf{q}} \hbar \omega_i(\mathbf{q}) \left(a_{i\mathbf{q}}^\dagger a_{i\mathbf{q}} + 1/2 \right) \quad (27)$$

Discutii. Mai intii se remarca ca numai $v_{1\mathbf{q}}$ este un mod pur transversal (adica perpendicular pe $\mathbf{q}$), $v_{2\mathbf{q}}$ si $v_{3\mathbf{q}}$ au atit componente transversale cit si longitudinale, dupa marimea unghiului $\varphi_{\mathbf{q}}$. Pentru fiecare vector de unda $\mathbf{q}$ exista un triedru local **1,2,3**, dat de

$$\begin{aligned} u_{\mathbf{q}} &= u_1 \mathbf{i} + u_2 \mathbf{j} + u_3 \mathbf{k} = \\ &= (\cos \theta \cdot \mathbf{i} - \sin \theta \cdot \mathbf{j}) v_1 + (\sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot \mathbf{i} + \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \mathbf{j} + \sin \varphi \cdot \mathbf{k}) v_2 + \\ &\quad + (-\sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \mathbf{i} - \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \mathbf{j} + \cos \varphi \cdot \mathbf{k}) v_3 = v_1 \mathbf{1} + v_2 \mathbf{2} + v_3 \mathbf{3} \end{aligned} \quad (28)$$

care are axele in lungul polarizarilor (triedru de polarizare), vectorul de propagare $\mathbf{q}$ fiind in planul **2, 3**. In al doilea rind, se poate remarca anulara unghiului corespunzator celei de a doua transformari, $\varphi_{\mathbf{q}} = 0$, in cazul in care modul de forfecare axiala si modul de "gituire" sint absentii ($\tau = \nu = 0$), situatie in care exista urmatoarele trei tipuri de unde elastice:

$$\omega_1^2(\mathbf{q}) = (\mu / \rho) q_{\perp}^2 \quad (29)$$

cu polarizarea $v_{1\mathbf{q}}$ perpendiculara pe $\mathbf{q}_{\perp}$ si pe axa de anisotropie;

$$\omega_2^2(\mathbf{q}) = [2(\lambda + \mu) / \rho] q_{\perp}^2 \quad (30)$$

cu polarizarea $v_{2\mathbf{q}}$ paralela cu vectorul de unda $\mathbf{q}_{\perp}$ (perpendicular pe axa de anisotropie); si

$$\omega_3^2(\mathbf{q}) = (2\sigma / \rho) q_3^2 \quad (31)$$

cu polarizarea $v_{3\mathbf{q}} = u_{3\mathbf{q}}$ paralela cu axa de anisotropie.[4] Cu exceptia acestei situatii simplificate, undele elastice ce se propaga intr-un solid axial anisotrop au o dispersie pronuntata, asa cum este evidentiata de dependenta considerabil neliniara a frecventelor de vectorul de propagare (termenii cuartici in (22) si (23), dispersie provenita din cuplajul intre diversele moduri elastice. De asemenea, undele elastice intr-un solid anisotrop axial prezinta polarizari combinate, adica amestecuri de unde longitudinale si transversale. Aceste rezultate pot fi relevante pentru discontinuitatea elastica din zona inferioara a mantalei Pamintului (adincime circa 5000km, la limita cu miezul Pamintului), unde s-a evidentiat recent o noua faza cristalina a silicatilor de magneziu si fier, similara cu structurile stratificate de tip perovskita, dar cu anisotropii mult mai mari.[5, 6]

3) Aproximatia cuasi-clasica.

Aproximatia razelor geometrice. In cazul in care distantele pe care se propaga undele sint mult mai mari decit lungimea de unda, atunci undele pot fi privite ca unde plane, sau, echivalent, ca raze geometrice similare cu razele de lumina din optica geometrica. Aceasta este aproximatia ce se foloseste curent in teoria propagarii undelor seismice. Razele sufera refractii, reflectii, difractii, interferenta etc., si, in plus, ele pot fi supuse unei dispersii slabe, provenita din variatia slaba a proprietatilor mediului. Aceasta dispersie usoara, ce modifica slab proprietatile unei unde plane este tratata in mod standard in asa-numita aproximatie WKB (sau WKBJ, dupa numele autorilor ei - Wentzel, Kramers, Brillouin si Jeffreys).[7] Unda este in acest caz solutia ecuatiei diferentiale de ordinul doi

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = -k^2(x) \psi \quad (48)$$

unde functia $k(x)$ (in general complexa) are o variatie slaba x . Cu substitutia

$$\psi(x) = e^{\Phi(x)} \quad (49)$$

functia $\Phi(x)$ satisface ecuatia

$$\Phi'^2(x) + \Phi''(x) + k^2(x) = 0 \quad (50)$$

de unde

$$\Phi''(x) = -k^2(x) \pm ik'(x) + \dots \quad (51)$$

Introducind (51) in (49) se obtine solutia de tip WKB

$$\psi(x) = \frac{C}{\sqrt{k(x)}} e^{\pm i \int_{x_0}^x k dx} \quad (52)$$

unde C si x_0 sint constante de integrare. Functia $k(x)$ poate fi considerata ca fiind vectorul de unda (variabil), iar $\lambda(x) = 1/\sqrt{k(x)}$ este atunci lungimea de unda; solutia data de (52) este atunci valabila pentru

$$\left| \frac{d\lambda}{dx} \right| \ll 1 \quad (53)$$

Aproximatia WKB, cunoscuta (in mecanica cuantica, de exemplu) si sub numele de aproximatia cuasi-clasica, sau aproximatia opticii geometrice (in care faza undei se mai numeste si eikonal), [8], [9] a fost studiata intens.[10] **In aceasta sectiune este prezentata o noua derivare a acestei aproximatii, sugerata de propagarea undelor in medii slab neomogene.[11] Aceasta tehnica de lucru cu undele in aproximatia razelor este inspirata de abordarile teoretice ale prof. M. Misicu si prof. Gh. Marmureanu si colaborarii, [12]-[14] si ea poate fi utila in propagarea undelor in medii stratificate, in medii cu structura complexa, inclusiv cu proprietati neliniare.**

Metoda matriciala. Fie o unda de amplitudine unitate si vector de unda k_0 ce se propaga printr-un mediu usor neomogen de la $x_0=0$ la $x_N=L$. Unda este reflectata la $x_0=0$ cu amplitudinea R , si este transmisa la celalalt capat $x_N=L$ cu amplitudinea T . Se presupune ca propagarea se petrece de-a lungul unei linii drepte cu un vector de unda $k(x)$ ce depinde slab de pozitie, adica variatia lungimii de unda pe lungimea caracteristica a distributiei neomogeneitatilor mediului este foarte mica (mult mai mica decat unitatea). Aceasta este exact conditia (53) impusa de aproximatia opticii geometrice. In consecinta, mediul se poate diviza in straturi de coordonate x_n , $n=0,1,\dots,N$, astfel incit vectorul de unda $k(x)=k_n$ este constant pentru fiecare interval $x_{n-1} < x < x_n$; in fiecare interval de acest fel se poate scrie unda ca o suprapunere de unda directa si unda reflectata

$$\psi_n(x) = A_n e^{ik_n x} + B_n e^{-ik_n x}, \quad x_{n-1} < x < x_n, \quad n = 0, 1, \dots, N+1 \quad (54)$$

unde $A_0=1$, $B_0=R$, $A_{N+1}=T$, $B_{N+1}=0$, x_{n-1} si x_{N+1} fiind arbitrari. O schita a acestei scheme este prezentata in Fig. 1.

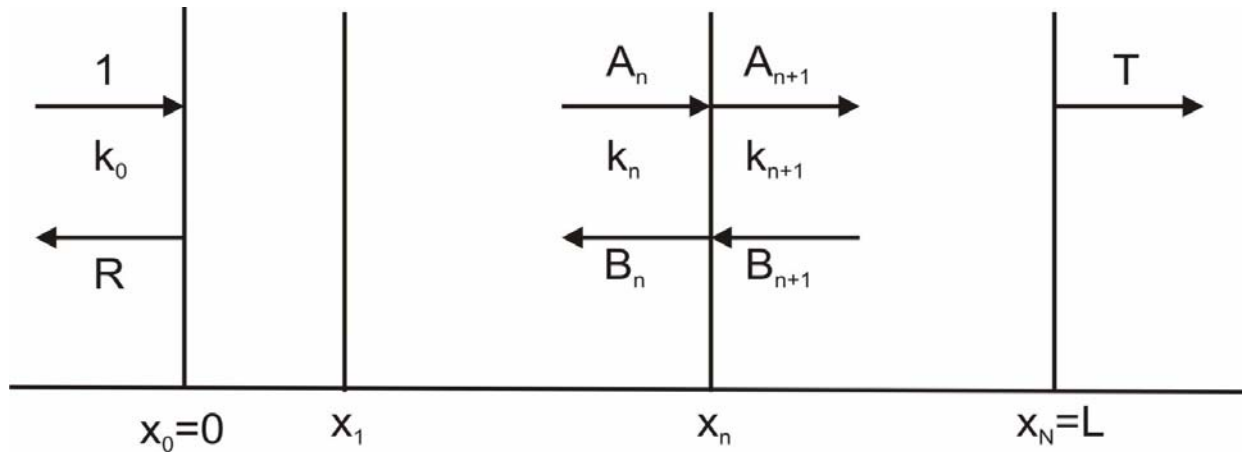


Fig. 1 Schema propagării undei printr-o succesiune de straturi subtiri într-un mediu neomogen

Condițiile de continuitate

$$\psi_n(x_n) = \psi_{n+1}(x_n), \quad \psi'_n(x_n) = \psi'_{n+1}(x_n) \quad (55)$$

permit ca amplitudinile A_{n+1} , B_{n+1} să fie exprimate cu ajutorul amplitudinilor A_n , B_n . În notatie matricială această relație de recurență se scrie

$$\begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix} = M_n \begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix}, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (56)$$

unde

$$M_n = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_n}{k_{n+1}} \right) e^{-i(k_{n+1}-k_n)x_n} & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_n}{k_{n+1}} \right) e^{-i(k_{n+1}+k_n)x_n} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_n}{k_{n+1}} \right) e^{i(k_{n+1}+k_n)x_n} & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_n}{k_{n+1}} \right) e^{i(k_{n+1}-k_n)x_n} \end{pmatrix} \quad (57)$$

Prin reiterarea acestei relații (56) se obține soluția

$$\begin{pmatrix} T \\ 0 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 1 \\ R \end{pmatrix} \quad (58)$$

unde

$$M = M_N M_{N-1} \dots M_1 M_0 \quad (59)$$

Deoarece k_n variază lent cu n se pot reține numai primii doi termeni în dezvoltarea în serie

$$k_{n+1} = k_n + k'_n + \dots = k_n (1 + u_n) \quad (60)$$

unde

$$u_n = \frac{d}{dn} (\ln k_n) \ll 1 \quad (61)$$

Folosind aproximația liniară în (57) matricea M_n se poate scrie ca

$$M_n = M_n^0(1 + M_n^1) \quad (62)$$

unde

$$M_n^0 = \begin{pmatrix} e^{-u_n k_n x_n} & 0 \\ 0 & e^{iu_n k_n x_n} \end{pmatrix} \quad (63)$$

este o matrice diagonala, iar

$$M_n^1 = \frac{1}{2}u_n \begin{pmatrix} -1 & e^{-2ik_n x_n} \\ e^{2ik_n x_n} & -1 \end{pmatrix} \quad (64)$$

Coefficientul de transmisie. In cadrul aceleiasi aproximatii se poate acum calcula produsul de matrici din (59) ca

$$M = M_N^0 M_{N-1}^0 \dots M_1^0 M_0^0 (1 + M_N^1 + M_{N-1}^1 + \dots + M_1^1 + M_0^1) \quad (65)$$

si se obtine

$$M = \begin{pmatrix} (1-u/2)e^{-i\varphi} & \varepsilon e^{-i\varphi} \\ \varepsilon^* e^{i\varphi} & (1-u/2)e^{i\varphi} \end{pmatrix} \quad (66)$$

cu urmatoarele notatii:

$$u = \sum_{n=0}^N u_n = \int_0^N dn \cdot \frac{d}{dn} (\ln k_n) = \ln[k(L)/k_0] \quad (67)$$

$$\varphi = \sum_{n=0}^N u_n k_n x_n = \int_0^N dn \cdot k'_n x_n = \int_0^L dk \cdot x = k(L)L - \int_0^L k \cdot dx \quad (68)$$

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^N u_n e^{-2ik_n x_n} \quad (69)$$

In ecuatiile de mai sus s-au inlocuit sumele cu integrale, deoarece k_n este o functie lent variabila de n . Este usor de vazut acum ca ε dat de (69) poate fi neglijat in cadrul acestei aproximatii folosite aici. Intr-adevar, exista urmatoarea estimatie pentru ε :

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^N u_n e^{-2ik_n x_n} = \int_0^L dx \cdot (\ln k)' e^{-2ikx} \cong u \cdot \frac{e^{-2ik(L)L} - 1}{-2ik(L)L} \quad (70)$$

si se poate vedea ε este mai mic decit u printr-un factor de ordinul $1/k(L)L \ll 1$. Cu alte cuvinte, efectele de interferenta in aceasta aproximatie de lungimi de unda scurte conduc la un coeficient de reflectie R nul, deoarece, facind uz de (58) si (66), se obtine

$$R = -\frac{\varepsilon^*}{1-u/2} \cong 0 \quad (71)$$

si

$$T \cong (1 - u/2)e^{-i\varphi} = \left[1 - \frac{1}{2} \ln[k(L)/k_0]\right] \cdot e^{-ik(L)L + i \int_0^L k \cdot dx} \quad (72)$$

Unda emergenta la $x_N=L$ este prin urmare

$$\psi(L) = \left[1 - \frac{1}{2} \ln[k(L)/k_0]\right] \cdot e^{i \int_0^L k \cdot dx} \quad (73)$$

de unde se vede ca amplitudinea ei este suma primilor doi termeni in dezvoltarea lui $[k_0/k(L)]^{1/2}$; conform cu (53) aceasta este exact solutia WKB. Se verifica usor ca ecuatia de conservare a "curentului" $\psi^* (\partial \psi / \partial x) - (\partial \psi^* / \partial x) \psi = \text{const}$ revine la $k_0(1 - |R|^2) = k(L)|T|^2$, ecuatie ce este verificata de (71) si (72).

Calcululele prezentate aici se refera la propagarea undelor, adica absorbtia este lasata la o parte, ca si cum vectorul de unda $k(x)$ ar fi pur real. Includerea absorbtiei insa este imediata, calculele ne reprezentind nici o particularitate in cazul in care $k(x)$ este complex. Intr-adevar, daca vectorul de unda $k(x)$ are o parte imaginara $\kappa(x)$ unda $\psi(x)$ in (54) trebuie inlocuita cu

$$\psi_n(x) = A_n e^{ik_n x} e^{-\kappa_n(x-x_{n-1})} + B_n e^{-ik_n x} e^{-\kappa_n(x_n-x)}, \quad x_{n-1} \prec x \prec x_n \quad (74)$$

astfel incit sa se ia in considerare absorbtia. Urmind acelasi rationament ca mai sus se ajunge din nou la ecuatia (73) cu $k(x)$ o functie complexa.

Abordarea teoretica a propagarii undelor in aproximatia razelor geometrice prezentata aici poate fi extinsa in cel putin trei directii. Intai, se poate lua in discutie incidenta diferita de normala a undei, incluzind in acest fel refractia pe un mediu neomogen. In al doilea rind, exista posibilitatea luarii in considerare a contributiilor de ordin superior in dezvoltarile in serie folosite, astfel incit sa se poata face corectii la aproximatia razelor geometrice. In fine, o a treia directie de dezvoltare se refera la posibilitatea includerii diverselor defecte, mai mult sau mai putin localizate, largind astfel capabilitatile de tratare a propagarii undelor in medii cu structura complexa.

4) Discutii si concluzii.

Propagarea undelor in medii elastice si fenomenele asociate, precum atenuarea miscarii elastice si difuzia energiei, in conditii de anisotropie, structura complexa (de exemplu granulara, fragmentata), neomogeneitati, anarmonicitati, sint grupate sub numele generic de elasticitate neliniara. Solidele cu structura complexa pot prezenta anisotropii la scara macroscopica, ceea ce modifica substantial proprietatile lor elastice. **S-a studiat propagarea undelor elastice intr-un astfel de mediu continuu cu anisotropie axiala si s-au pus in evidenta noi moduri elastice, asociate cu miscarile elastice distincte in planul transversal pe axa de anisotropie si in lungul axei de anisotropie, precum dilatari si compresii, moduri de forfecare si un mod nou, provenit din cuplajul anisotropic, ce poate fi numit mod de "giture". S-a gasit ca unele elastice intr-un astfel de mediu anisotrop prezinta dispersii considerabile, provenite de la neliniaritatile induse de anisotropie in frecventele proprii ale modurilor elastice.** Metoda elasticitatii anisotrope prezentata in prima sectiune a acestei etape poate fi extinsa la medii elastice cu alte tipuri de anisotropii, cu simetrii limitate, cu dimensiuni finite, cu geometrii speciale, situatii in care neliniaritatile joaca un rol important. Astfel de rezultate pot fi relevante pentru discontinuitatile elastice din zona inferioara a mantalei Pamintului (la limita cu miezul Pamintului, adincime circa 5000km), unde s-a descoperit recent o noua faza cristalina a silicatilor de magneziu si fier, inrudita cu structurile stratificate de tip perovskita, dar cu anisotropii mult mai mari.

In aceasta etapa au fost incluse rezultate originale si in ceea ce priveste undele elastice intr-un solid axial anisotrop si aplicarea aproximatiei razelor geometrice ca metoda si instrument de calcul in propagarea undelor seismice in medii slab neomogene. Rezultatele matematice ale propagarii undelor in astfel de cazuri, in special cele referitoare la propagarea undelor de suprafata in spatii laminare semi-infinite, prezinta efecte neliniare

deosebit de interesante, în sensul amplificării efectelor locale ca urmare a regimului neliniar. Studiul propagării undelor în aproximația razelor geometrice reprezintă unul din obiectivele propuse și pentru care am obținut rezultate în cadrul acestei etape. Propagarea undelor pe distanțe mari este descrisă, de obicei, cu ajutorul aproximației razelor geometrice, cunoscute și sub numele de aproximația cuasi-clasică, a opticii geometrice, a eikonalului sau WKB(J). Această aproximație este specifică mediilor cu dispersie slabă, cu o distribuție slab variabilă în spațiu a neomogeneităților. **Folosind o diviziune infinitesimală a mediului în straturi, o metoda inspirată de propagarea undelor în medii stratificate aproximația razelor este derivată cu o metoda matricială**, deosebit de favorabilă dezvoltărilor specifice unor condiții mai complexe. Condițiile de continuitate a undelor la fiecare interfață conduc la o **relație de recurență matricială pentru amplitudinile undelor reflectate și transmise, ecuație rezolvată în ipoteza unui număr infinit de strate suficient de subțiri**. În condițiile în care vectorul de undă are o dependență spațială slabă, soluția este identică cu soluția integrală a aproximației WKB. Avantajele acestei metode folosite în derivarea rezultatului constau în **evidențierea clară a unui coeficient de reflexie zero și în identificarea coeficientului de transmisie cu amplitudinea undelor emergente. Aceasta metoda poate fi aplicată la medii cu defecte, sau neomogeneități localizate sau extinse, structuri ce prezintă corelații spațiale, la fenomene de refracție, interferență și difracție, și, în special, la fenomenele de dispersie avansată**. Metoda oferă posibilitatea de a introduce sistematic corecții de tip undă în aproximația razelor geometrice, lărgind astfel capacitatea instrumentelor de studiu la fenomene complexe legate de propagarea undelor.

Concluzii și rezultate:

Concluzii și rezultate pentru etapa I:

1) Din curbele experimentale produse din încercările dinamice în coloanele rezonante s-au determinat formele analitice ale modulelor elastice și atenuării funcție de nivelul de deformare luând în considerare starea de tensiuni și/sau deformări preexistente solicitării seismice. Aceste experimente au fost realizate folosind baza de date geotehnice a caracteristicilor solurilor superficiale din diverse zone inclusiv aria orașului București, creată pentru realizare activităților propuse în această etapă.

2) Datele din coloanele rezonante sunt foarte folositoare, pentru evaluarea comportamentului modelului viscoelastic neliniar la solicitări dinamice. La analiza mai multor teste pe coloana rezonantă se vede o influență majoră a nivelului de deformare asupra modului de forfecare și a amortizării (Figura 1 a) și b)) și o influență mică a valorilor frecvenței de peste 1 Hz asupra funcției de frecvență $G_k(\omega)$ și $D_k(\omega)$ a funcțiilor dinamice.

3) Curbele din Figura 2 reflectă comportamentul neliniar al pământurilor la solicitări ciclice (similare celor seismice) iar la valori mari ale tensiunilor se observă fenomene de curgere precum și de absorbție a energiei.

4) Testele geotehnice efectuate asupra probelor prelevate din foraje au pus în evidență comportamentul neliniar care apare când deformările depășesc un anumit nivel. De exemplu, teste efectuate pe coloane rezonante și triaxial arată sistematic reduceri ale modului de forfecare G și creșteri ale amortizării D pentru valori ale deformății $\gamma \geq 10^{-4} \%$, deci practic acestea sunt funcții $G = G(\gamma)$ și $D = D(\gamma)$.

5) Se poate observa că reducerea valorilor normate ale modului de torsiune $G_n = \frac{G}{G_0}$ în cursul încercării este mai

mică pentru materialele mai dure granit, argilă marnoasă în timp ce materialele „moi” care se găsesc de obicei în

straturile superficiale prezintă variații mari ale G_n și amortizării $D_n = \frac{D}{D_0}$ pentru același domeniu de deformații; unde

G_0 și D_0 sunt valorile corespunzătoare unei deformații inițiale de ordinul $\gamma=10^{-4}$.

Rezultate si concluzii pentru etapa II:

1) Stabilirea modelului mecanic corespunzător proprietăților geofizice care intervin în propagarea undelor seismice și manifestarea lor la suprafața teritoriului țării. Aceste proprietăți sunt exprimate de legile constitutive ale proceselor elastice, viscoase și plastice care au loc în timpul cutremurelor și data fiind complexitatea acestora era necesară selectarea celor care, conform datelor geologice de asemeni colationate la începutul studiului aveau o relevanță semnificativă. Ca urmare s-au elaborat legile specifice explicite, cu parametri fizici corespunzători rocilor de adâncime cât și zonelor de la suprafață. La acestea din urmă s-au urmărit în special situațiile critice conducând la un risc seismic important. De asemenea s-au introdus marimile fizice cu caracter neliniar care descriu cât mai apropiat comportamentul straturilor menționate de la suprafață. În acest mod s-a permis precizarea efectului straturilor geologice situate pe traseul undelor seismice provenite din surse vrance care ajung în centre dens populate ale țării.

-Elaborarea schemei generale de calcul constând în aproximarea soluțiilor ecuațiilor generale ale mediului corespunzător modelului mecanic adoptat cu ajutorului dezvoltărilor în serie în raport cu un parametru mic, schema care spre deosebire de cea anterior adoptată și prezenta în literatura de specialitate internațională include în plus marimile fizice suplimentare menționate mai sus. Modul de formulare a schemei a fost ales astfel ca să se respecte caracterul de neliniaritate medie a proceselor care au loc în straturile superficiale întâlnite în țară. Sunt obținute sisteme de ecuații liniare pentru fiecare etapă de aproximare.

2) Dezvoltarea procedeeleor de determinare a intensităților efectelor seismice produse de suprapunerea efectelor de reflexie și refracție în mod distinct pentru mediile: stratificate, foliate (echivalente cu blocuri de forma lamelată) acestea din urmă incluzând zona Moho. Selectarea datelor de calcul corespunzătoare zonelor urbane în care sunt situate terenuri slab consolidate care prezintă risc seismic pronunțat datorat amplificării efectelor neliniare. Procedeele sunt aplicate ecuațiilor obținute și menționate la punctul anterior.

3) Obținerea elementelor de bază pentru stabilirea amplificării efectelor seismice în raport cu mărimea și caracteristicile surselor seismice atât relativ la componentele undelor liniare cât și la cele neliniare. Aceste elemente constau într-un set de parametri definind raporturile: dintre amplitudinile undelor liniare, a celor corespunzătoare aproximatiei superioare pentru undele neliniare, ambele fiind calculate la suprafață, precum și dintre raportul dintre amplitudinea undelor la suprafață și a celor din sursa seismică. Aceste calcule s-au realizat pentru medii cu stratificație simplă și complexă, în cazul neliniarităților ce intervin. În acest mod se realizează o caracterizare mai completă decât cea existentă până în prezent, avantajul ei fiind asigurarea contra riscului seismic mai realist și mai complet. Sunt astfel prevenite eventuale situații catastrofale care prin procedeele existente nu pot fi prevăzute.

4) Evaluarea preliminară a amplificării seismice maxime pentru regiunea București care a precizat o creștere a amplitudinilor datorată efectelor neliniare față de cele liniare până la 30% ceea ce indică pe de o parte insuficiența procedeeleor uzual liniare iar pe de altă parte necesitatea determinării mai atente incluzând de exemplu procese ireversibile visco-plastice.

5) Realizarea unor tabele de date incluzând date geologice pentru structuri de adâncime și parametri mecanici utile determinării la scară microlocală a efectelor seismice inclusiv zona Moho (prezentate în raportul extins)

6) Pentru a afla caracteristicile cantitative ale comportamentului neliniar al solurilor și ale răspunsului neliniar al acestora au fost introdusi factorii de amplificare spectrali definiți ca raportul dintre valorile maxime spectrale ale accelerației absolute (S_a), vitezei relative (S_v) și deplasării relative (S_d) din spectrele de răspuns pentru diferite fracțiuni ale amortizării critice, și valorile maxime ale lui $\ddot{y}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ din procesarea înregistrărilor deplasărilor puternice.

7) Factorii de amplificare scad în timp ce deformația crește, confirmându-se și că există tendința de scădere a accelerației în timp ce mărimea crește. Dacă mărim nivelul de excitație (în coloanele rezonante), maxima din spectrul de răspuns are valori mai ridicate în cazul liniar decât în cazul neliniar. Acest lucru este consistent cu teoria oscilatorului clasic cu un singur grad de libertate (folosita aici pentru introducerea SAF) deoarece maximele seismogramelor deplasărilor în cazurile liniar și neliniar sunt controlate de frecvențele care sunt deamplificate datorită neliniarității.

8) Cutremurele majore vrance, prin specificul lor, pot induce amplificări importante datorită neliniarității în cadrul efectelor produse de fenomenele de directivitate. Există posibilitatea ca riscul seismic să fie artificial exagerat din cauza neconsiderării efectelor neliniare de ordinul trei (neconsiderate aici) sau a reflexiilor și refracțiilor undelor seismice.

9) Prin realizarea unor modele structurale complete cu parametri bine cunoscuți se permite aplicarea metodelor de simulare a mișcărilor seismice și a constituit o bază de pornire importantă în cunoașterea limitărilor metodei și a

furnizat valoroase teste parametrice în ceea ce privește influența surselor seismice vrâncene asupra parametrilor mișcării seismice la suprafața amplasamentelor sedimentare. Construirea modelelor structurale care se vor folosi în simulări înseamnă mai mult decât simpla înșiruire de parametri determinați in situ sau luați din literatură ci aplicarea acestora în funcție de posibilitățile și caracteristicile metodei, a programelor de calcul aferente etc. Acest lucru s-a realizat în cadrul acestei etape folosindu-se programe de calcul specifice.

Concluzii si rezultate pentru etapa III:

- a) Calculul amplificărilor în deplasare, viteză și accelerație, ca urmare a proximității rezonanței, parametrul de atenuare fiind instrumental în definirea factorilor de amplificare prin raportare la mișcarea sub acțiunea exclusivă a forței perturbatoare externe. **Factorii de amplificare cresc monoton în timp, fiind marginiți asimptotic, estimarea lor fiind imediată prin mijloace semi-analitice.**
- b) **Soluția generală a acestei problemei oscilatorului liniar armonic atenuat oferă posibilitatea tratării spectrale a răspunsului, regimul de rezonanță, sau de vecinătate a rezonanței fiind descris în forma particulară a suprapunerii oscilațiilor proprii și oscilațiilor externe, în cazul în care forța externă este periodică în timp.**
- c) Tratarea problemei **socurilor externe perturbatoare**, un caz limită în studiile teoretice dar foarte frecvent în practică. **Amplificarea în acest caz este ne semnificativă pentru deplasări, relativ normală în viteze, dar poate fi apreciabilă în accelerații.**
- d) **Estimările teoretice pentru factorii de amplificare ai acestui model simplu sînt în acord calitativ cu factorii de amplificare empirici, derivați pe baza deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor maxime locale din seismogramele corespunzătoare la diverselor locații de interes pe teritoriul României pentru cutremurele majore din Vrancea. Studiul acestor factori de amplificare empirici a relevat dependența lor considerabilă de locație și de magnitudinea cutremurului, efecte locale puse pe seama comportării neliniare a solurilor. În plus, efectele locale considerabile de directivitate (și selectivitate) în propagarea undelor seismice pot fi atribuite de asemenea regimului neliniar și comportării visco-elastice neliniare a materialului geologic local.**
- e) Au fost examinate condițiile de producere a efectelor de neliniaritate în cazul deplasărilor puternice ale solului înregistrate pe teritoriul României în timpul ultimelor cutremure (cu epicentrele în zona Vrancea). Pentru a afla caracteristicile cantitative ale comportamentului neliniar al solurilor și ale răspunsului neliniar al acestora au fost introduși factorii de amplificare spectrali definiți ca raportul dintre valorile maxime spectrale ale accelerației absolute (S_a), vitezei relative (S_v) și deplasării relative (S_d) din spectrele de răspuns pentru diferite fracțiuni ale amortizării critice, și valorile maxime ale lui $\ddot{y}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ din procesarea înregistrărilor deplasărilor puternice.
- f) Există o puternică dependență neliniară între SAF și magnitudine. Ca exemplu, s-au comparat valorile SAF înregistrați la stația seismică Bacău pentru ultimele trei evenimente puternice (30 august 1986, 30 mai 1990, 31 mai 1990) și s-a observat dependența neliniară de magnitudine.
- g) Factorii de amplificare scad în timp ce deformația crește, confirmându-se și că există tendința de scădere a accelerației în timp ce magnitudinea crește. Dacă marim nivelul de excitare (în coloanele rezonante), maxima din spectrul de răspuns are valori mai ridicate în cazul liniar decât în cazul neliniar. Acest lucru este consistent cu teoria oscilatorului clasic cu un singur grad de libertate (folosită aici pentru introducerea SAF) deoarece maximele seismogramelor deplasărilor în cazurile liniar și neliniar sînt controlate de frecvențele care sînt deamplificate datorită neliniarității.
- h) Riscul seismic poate crește sensibil (cu 30%) dacă frontul de undă este caracterizat de frecvențe înalte și de timpuri mari de parcurs datorită structurii alterate (din cauza deformațiilor mari) a mediului de propagare sau suprapunerii undelor radiate de surse multiple. De exemplu cutremurul din 4 martie 1977 ($M_S=7.2$) s-a produs sub forma unor socuri succesive de-a lungul unei falii cu dimensiuni relativ mari. Socurile, pe parcursul unor intervale scurte de timp

au avut diferite orientari si deplasari induse diferite amplitudini. Procedura standard in evaluarea riscului seismic nu tine seama de aceste efecte instantanee sau speciale.

i) Cutremurele majore vrance, prin specificul lor, pot induce amplificari importante datorita neliniaritatii in cadrul efectelor produse de fenomenele de directivitate. Exista posibilitatea ca riscul seismic sa fie subevaluat din cauza neconsiderarii efectelor neliniare de ordinul trei (neconsiderate aici) sau a reflexiilor si refractiilor undelor seismice.

-Metoda hibrida. Pentru evaluarea efectelor seismice locale s-a folosit metoda hibridă care este concepută pentru tratarea structurilor geologice bidimensionale cu neomogenități laterale. Această metodă este o combinație între tehnica analitică de sumare a modurilor de vibrație a unei structuri geologice „de bază” prin care se propagă semnalul seismic de la sursă până la profilul de calcul și tehnica diferențelor finite pentru structura geologică locală a orașului, parte în care sunt incluse și neomogenitățile laterale (analiza 2D). Rezultatele simulărilor constau în serii temporale complete de deplasări, viteze și accelerații la suprafața terenului, aceste seismograme putând fi prelucrate ca și cele reale pentru obținerea spectrelor de răspuns, Fourier, proiectare, amplificare locală etc.

-putem conchide că structura locală are efect de amplificare al semnalului seismic similar pentru componentele radială și transversală cu valori medii între 1,2 și 1,5 (funcții de transfer) pentru evenimentele cu magnitudine $M_w < 7$ (VR901, VR902, VR04) în timp ce pentru componenta verticală a mișcării seismice simulate comportamentul general evidențiază amplificări importante, de exemplu $A_{\max}(2D)/A_{\max}(1D) = 2,6$ și 2,1 (funcții de transfer) pentru evenimentele VR902 și VR04, amplificări care scad rapid de-a lungul secțiunii până la valori subunitare ce indică atenuarea semnalului seismic propagat pe direcția verticală. Pentru magnitudini $M_w > 7$ apar amplificări ceva mai mari pentru componentele radiale și transversale de-a lungul structurii, cu valori 1,8-1,9 (cazul simulat al cutremurului din 30 august 1986), iar componenta verticală atinge cea mai mică valoare.

-amplificările (valori și distribuția lor spațială) semnalului seismic vertical depind mai puțin de mărimea cutremurului decât de mecanismul de producere și adâncimea hipocentrală, după cum se poate vedea și din studiul parametric al influenței adâncimii hipocentrale.

-apreciem că răspunsul spectral relativ al structurii locale determinat de componentele RAD și VER este foarte sensibil (practic, diferit) la schimbarea mecanismului focal al cutremurului, în timp ce RSR determinat de componenta TRA a mișcării seismice este relativ stabil. De asemenea, deplasarea maximelor RSR de la 0.4 Hz la 0.9 Hz pentru componenta RAD și de la 0.6 Hz la 0.9 Hz pentru componenta VER indică faptul că și conținutul de frecvențe al mișcării seismice se schimbă în funcție de mecanism și/sau mărimea cutremurului.

-concluzia care se conturează în urma acestor simulări este că: la evenimentele vrance intermediare, energia seismică este repartizată mult mai diferit pe componente decât la seismele superficiale, ceea ce impune calcularea integrală a inputului seismic nu numai pentru componenta TRA, ci pentru toate cele trei componente;

- Metoda hibridă folosită aici are o mare importanță în evaluarea efectelor locale și, în final, la evaluarea hazardului seismic (microzonare) iar procedura în sine este complexă, necesită multe informații și programe de calcul complexe, ținând cont de toți factorii ce intervin într-un asemenea studiu (serii temporale de accelerații, caracteristicile sursei, localizare, moment seismic, soluții de plan de falie, neomogenități laterale, caracteristici fizico-mecanice). Comparându-le cu seismogramele reale, cele obținute în aceste calcule prin simulări sunt credibile și complete, conțin toate fazele undelor de volum și superficiale care se propaga prin structură.

-Metoda MS-SH reprezintă o alternativă de evaluare a răspunsului seismic și efectelor seismice locale, dezvoltată special pentru cazurile structurilor sedimentare expuse unui important hazard generat de surse seismice de adâncime intermediară. Ea beneficiază de avantajele tehnicii sumării modale MS pentru calcularea mișcării de excitație a pachetului de straturi care alcătuiesc structura locală combinată cu simplitatea determinării răspunsului seismic local prin propagarea verticală a undelor seismice folosind tehnici „Shake” sau derivate ulterior din acesta.

- Calculul inputului seismic se face folosind tehnica MS care ține cont nu numai de parametri sursei seismice (localizare, adâncime, soluții plan de falie) dar și de caracteristicile structurilor geologice prin care se propagă semnalul seismic de la sursă până în amplasament și în care se pot modela discontinuități laterale ce intervin pe distanțe epicentrale mari cum este cazul zonei Vrancea-București. Inputul seismic al metodei MS-SH ia în considerare

toate aceste variabile și depășește limitările - de fapt, supraevaluările - ce rezidă din folosirea obișnuitului semispațiu elastic liniar pentru modelarea rocii de bază în abordările SH clasice.

-O condiție autoimpusă în abordarea folosită aici este completitudinea spectrală a semnalului seismic calculat cu MS, condiție necesară dat fiind faptul că tehnicile SH păstrează conținutul de frecvențe al accelerogramei constant, modificând doar amplitudinile și durata semnalului calculat la suprafață.

-De o importanță deosebită în evaluarea răspunsului seismic pentru toate tehnicile SH este alegerea nivelului rocii de bază, de fapt, a adâncimii la care este plasată excitatia seismică a pachetului de strate prin care este modelată structura geologică locală. Abordarea acestei probleme arată că efectele induse de propagarea undelor seismice transversale pe distanța rocă de bază – suprafața terenului se datorează în principal dependenței neliniare a amortizării și modulilor de forfecare caracteristici fiecărui strat de valoare a deformației, în conformitate cu studiile dezvoltate în etapele anterioare. **Concluziile acestui test se referă la:**

- efectele de neliniaritate introduse de un anumit strat din pachetul considerat sunt cu atât mai pronunțate cu cât adâncimea la care se află stratul este mai mică și cu cât factorul său de calitate este mai mic;

- identificarea efectelor individuale ale fiecărui strat din pachetul considerat: stratul de marne nisipoase cu intercalații de nisip din Terțiar cu grosimea de 113 m care se întinde până la adâncimea de 500 m induce o atenuare de cca 30% în amplitudinea accelerației la nivelul suprafeței libere și lasă neschimbată forma acesteia; pe când stratul de amestecuri de pietrișuri cu nisip care se întinde de la 160 la 283 m induce o amplificare cu cca 40% a amplitudinii semnalului seismic la suprafață schimbând și forma acestuia;

- răspunsul masivului de pământ este foarte individualizat în funcție de adâncimea inputului seismic, acesta putând să fie diferit chiar cu 45% pentru unele cazuri;

-stratele cu sedimente slab consolidate din Cuaternar induc atenuarea cea mai importantă din întregul pachet considerat în analiză, aceasta fiind o urmare firească a fenomenelor reologice importante care apar la propagarea undelor seismice;

Ca o concluzie generală putem spune că atât inputul seismic dar și nivelul (adâncimea) la care acesta este aplicat au o importanță majoră în evaluarea răspunsului seismic și a efectelor seismice locale.

-În abordarea propagării verticale a undelor seismice, tehnicile SH pot aplica mai multe modele matematice pentru pământuri (elastic neliniar, vâsco-elastic liniar și neliniar) în aproximația liniară echivalentă (Shake91, EERA, ProShake etc.), dar sunt posibile și modelări histeretice neliniare (ex. NERA, Tess etc.). În metoda MS-SH aplicată aici se optează pentru modelul vâscoelastic neliniar ca fiind cel mai complet și potrivit la descrierea fenomenelor fizice induse de seisme puternice în strate superficiale. Prin aplicarea acestei metode pentru strate uniforme subțiri și groase din loess, argilă, nisip cu pietriș și marnă, se evidențiază dependențele neliniare ale valorilor efective ale funcțiilor modul de torsiune și amortizare dinamice de magnitudinea cutremurelor intermediare. Aceste dependențe țin numai de natura materialului (tipului de pământ) analizat, ele induc efectele seismice locale observate și/sau evaluate prin metoda MS-SH. Studiul dependenței parametrilor dinamici ai pământurilor de magnitudinea cutremurelor evidențiază faptul că la magnitudini $M_w \geq 6$ comportamentul neliniar al masivului de pământ trebuie neapărat luat în considerare pentru evaluarea parametrilor mișcării seismice la suprafața liberă, adică la evaluarea hazardului seismic local, mai ales pentru strate de grosimi mari (de ordinul zecilor de metri) și aplicarea unui model vâscoelastic neliniar devine imperios necesară.

-Verificarea rezultatelor metodei MS-SH s-a făcut prin compararea spectrului de răspuns al accelerației transversale înregistrate cu cel al accelerației la suprafață simulat pentru evenimentul respectiv. Modelele cu care s-au obținut cele mai mici erori (de exemplu 7,438% pentru un amplasament bucureștean, neprezentat în acest raport, dar existent în raportul extins) au fost folosite mai departe la evaluarea predictivă a mișcării de suprafață și a efectelor specifice structurii.

-Un avantaj indubitabil al metodei MS-SH asupra altor metode deterministe de evaluare a răspunsului și efectelor seismice locale este faptul că s-a reușit aplicarea și verificarea ei la un nivel foarte satisfăcător din punct de vedere al ingineriei seismice pentru cazul cutremurelor de adâncime intermediară (60 - 150 km) într-un domeniu de frecvențe de până la 2 Hz. Eforturile continuă însă în domeniul extinderii intervalului de frecvențe pentru care se pot calcula și suma modurilor normale de vibrație. Intervalul de frecvențe 0.05 - 1 Hz care se folosește de obicei în aceste aplicații

corespunde perioadelor lungi (1 - 20 sec.) în care se găsesc doar perioadele naturale de oscilație ale clădirilor cu 10 și mai multe etaje. Dar în marile orașe există un important fond de construcții cu mai puțin de 10 etaje ale căror perioade de oscilație sunt mai mici de 1 secundă. Din simulările **numerice cât și din înregistrări se poate observa că răspunsul maxim spectral al terenului se deplasează către frecvențe mai mari de 1 Hz (perioade scurte) atunci când magnitudinea cutremurelor scade. Studiile de microzonare seismică ar trebui să folosească deci un domeniu mai larg de frecvențe; pentru cazul particular al municipiului București, expus cutremurelor intermediare vrâncene, consideram necesara extinderea domeniului de frecvențe până la 3 Hz.**

Concluzii si rezultate pentru etapa IV:

- a) Aceasta aproximatie, numita si cuasi-clasica fiind folosita in mod uzual in propagarea undelor, este derivata printr-o noua metoda matriciala, bazata pe divizarea in strate infinitezimale a mediului slab neomogen.**
- b) Metoda constituie un instrument puternic in cazul includerii efectului neomogenitatilor mediului in propagarea undelor, a defectelor, localizate, extinse, corelate spatial, si, in general, pentru a aduce corectii de tip unda la aproximatia razelor geometrice.**
- c) Dezvoltarea unei relatii de recurenta matriciala pentru amplitudinile undelor reflectate si transmise, ecuatie rezolvata in ipoteza unui numar infinit de strate suficient de subtiri.**
- d) In particular, metoda permite includerea efectelor de ordin superior in studiul dispersiei. In cazul in care distantele pe care se propaga undele sint mult mai mari decit lungimea de unda, atunci undele pot fi privite ca unde plane, sau, echivalent, ca raze geometrice similare cu razele de lumina din optica geometrica**

Director proiect,

Dr. Bogdan Apostol