

# CONSTATĂRI BAZATE PE DATE ACCELEROGRAFICE ASUPRA FENOMENULUI DE ATENUARE ȘI ASUPRA EFECTULUI CONDIȚIILOR LOCALE, ÎN TIMPUL CUTREMURELOR VRÂNCENE PUTERNICE RECENTE

**Dr. ing. Horea SANDI,**

membru al Academiei de Științe Tehnice din România,  
profesor onorific al Universității Tehnice de Construcții – București



Absolvent al Institutului de Construcții – București (1955) și al Facultății de Matematică – București (1954).  
Doctorat la Institutul de Construcții – București (1966), bursă „Humboldt” la Universitatea Tehnică din  
Hanovra (1968-1969). Activitate de trei ani în proiectare și de peste 45 de ani în cercetare (ingineria  
structurilor, cercetări experimentale, inginerie seismică, seismologie inginerască, analize de hazard și risc).  
Două cărți ca autor singur și șase cărți în calitate de coautor. Circa 180 de articole și comunicări, dintre care  
circa 50 la conferințele de inginerie seismică mondiale sau europene. Decorat cu ordinul „Steaua României”  
în grad de cavaler (2000). A primit diploma și medlia AICPS pentru *Opera omnia* (2004).

**REZUMAT.** Este prezentată o sinteză succintă a studiilor de seismologie inginerască efectuate pe baza datelor accelerografice obținute în timpul cutremurelor vrâncene puternice recente. Aceste studii se referă la analiza statistică a fenomenului de radiație seismică / atenuare și la factorii care influențează compoziția spectrală a mișcării terenului. Sunt prezentate elemente metodologice și principalele rezultate obținute, împreună cu o serie de interpretări și elemente de sinteză.

**ABSTRACT.** The engineering seismology studies conducted on the basis of the accelerographic data obtained during the recent strong Vrancea earthquakes are briefly summarized. These studies concern the statistical analysis of the phenomenon of seismic radiation / attenuation and the factors influencing the spectral content of ground motion. Methodological elements, some main results obtained, as well as a discussion and summarizing statements are presented.

## 1. INTRODUCERE

Lucrarea prezintă o sinteză a studiilor efectuate în cadrul proiectului de cercetare “Studii asupra influenței mecanismului de sursă și a condițiilor locale în cazul cutremurelor vrâncene”, desfășurat în perioada 2001-2003 în cadrul programului de cercetare MENER (contract 092/2001, beneficiar Universitatea „Politehnica” – București, Facultatea de Energetică). Lucrările din cadrul proiectului au fost efectuate de un consorțiu alcătuit din ASTR (Academia de Științe Tehnice din România / coordonator), Institutul de Geodinamică “Sabba S. Ștefănescu” al Academiei Române, Universitatea Tehnică de Construcții București și GEOTEC. Director de proiect a fost autorul.

Au fost publicate mai multe lucrări conținând informații asupra studiilor efectuate și a rezultatelor obținute. Dintre acestea, cele mai recente și complete sunt lucrările [1] și [2], publicate în volumul lucrărilor

cele de a 13-a Conferințe Mondiale de Inginerie Seismică (Vancouver, Canada, 2004) și republicate în Buletinul AICPS, nr. 3 și 4 din 2004. Este de notat că în lucrările menționate a fost prezentat un material grafic ilustrativ bogat, care nu poate fi prezentat în această lucrare, datorită restricțiilor de spațiu.

Lucrările au fost orientate în două direcții principale:

- analiza statistică a fenomenului de radiație seismică / atenuare a intensităților;
- analiza influenței mecanismului de sursă, respectiv a condițiilor geologice locale, asupra compoziției spectrale a mișcării seismice a terenului.

Lucrările efectuate au avut la bază utilizarea fondului de date instrumentale obținute în timpul cutremurelor vrâncene puternice recente, din 04.03.1977 ( $M_{GR} = 7,2$ ), 30.08.1986 ( $M_{GR} = 7,0$ ), 30.05.1990 ( $M_{GR} = 6,7$ ) și 31.05.1990 ( $M_{GR} = 6,1$ ) (un total de cca. 150 de accelerograme). Este de notat faptul important că disponibilitatea fondului de date instrumentale menționat

situează țara noastră în rândul țărilor cu informație instrumentală bogată și deosebit de semnificativă, întrucât se dispune de date obținute în timpul unor cutremure puternice provenind din aceeași zonă de sursă, care permit să se evidențieze într-o bună măsură ceea ce este stabil și ceea ce este variabil de la un eveniment la altul.

Desfășurarea lucrărilor a impus efectuarea unor dezvoltări analitice specifice, care să permită abordarea problematicii prelucrării și interpretării informației instrumentale disponibile. Sub raport metodologic, sunt de menționat următoarele dezvoltări principale, pentru care sunt date referințe bibliografice în lucrările [1] și [2]:

- metodologie de cuantificare a intensității mișcării seismice a terenului pe baza datelor instrumentale (accelerografice), definiții alternative ale unor intensități globale, respectiv ale unor intensități raportate la o bandă spectrală și/sau la o direcție de mișcare;

- adoptarea unei expresii pentru legea de atenuare medie, combinându-se legea clasică a lui Blake cu datele obținute de Radu în legătură cu relația magnitudine - intensitate epicentrală, pentru diferite adâncimi de focar;

- metodologie de analiză statistică a fenomenului de radiație / atenuare, în termeni globali, respectiv în termeni direcționali și spectrali;

- metodologie de caracterizare spectrală a mișcării seismice a terenului, prin determinarea unor rozete de spectre pentru câte 12 direcții orizontale, azimutal echidistante;

- metodologie de analiză a compoziției spectrale a agitației microseismice a terenului (adaptarea tehnicilor de determinare a spectrelor Fourier glisante, adaptarea tehnicilor de analiză de corelație);

- metodologie de determinare a funcțiilor de transfer scalare și, respectiv, spațiale, pentru pachetele geologice superficiale de la diferite amplasamente.

## 2. ANALIZĂ STATISTICĂ ASUPRA FENOMENULUI DE RADIAȚIE / ATENUARE

Analiza statistică asupra fenomenului de radiație / atenuare s-a efectuat în două etape: o etapă inițială, anterioară proiectului de cercetare menționat, și o etapă mai cuprinzătoare, încadrată în acest proiect. În ambele etape s-a făcut uz de datele instrumentale bogate obținute în timpul celor trei cutremure din 30.08.1986, 30.05.1990 și 31.05.1990 (datele obținute în timpul cutremurului din 04.03.1977 erau prea puține pentru a

permite astfel de analize). Între cele două etape au existat unele diferențe metodologice, determinate în primul rând de faptul că, în a doua etapă, s-a efectuat și o analiză spectrală.

În prima etapă au fost efectuate două cicluri de analiză: un ciclu cu caracter global, fără diferențieri privind directivitatea radiației, și un ciclu în cadrul căruia s-a urmărit și o examinare a directivității radiației. În cadrul primului ciclu s-au determinat drepte de regresie în raport cu o distanță epicentrală adimensionalizată (introdusă pe baza sugestiei oferite de legea de atenuare a lui Blake), pentru șase parametri: logaritmi în baza 2 pentru accelerația de vârf a mișcării terenului, viteza de vârf a mișcării terenului, deplasarea de vârf a mișcării terenului, accelerația spectrală de vârf, viteza spectrală de vârf, respectiv intensitatea bazată pe spectru (ultima corespunzând, practic, unei medieri aritmetice între logaritmi în baza 2 ai accelerației spectrale și ai vitezei spectrale). De asemenea, s-au determinat abaterile medii pătratice ale parametrilor enumerați. În cadrul celui de al doilea ciclu s-a trecut la o analiză Fourier a dependenței fenomenului de atenuare în raport cu unghiul azimutal determinat în raport cu epicentrul instrumental al cutremurului.

Principalele rezultate obținute în cadrul primei etape au fost următoarele:

- dreptele de regresie au traversat norul de puncte de observație de așa manieră, încât expresia adoptată pentru legea de atenuare medie a fost bine confirmată;

- dreptele de regresie obținute au diferit mult de la un eveniment la altul. În timp ce, pentru evenimentul din 30.08.1986 rata (sau gradientul) de regresie s-a situat în vecinătatea valorilor așteptate, în cazul evenimentelor din 30.05.1990 (în special) și din 31.05.1990, rata de atenuare a fost neașteptat de redusă, în ciuda faptului că adâncimile de sursă erau mai mici;

- abaterile medii pătratice, exprimate în unități de intensitate, au fost cuprinse, pentru fiecare dintre evenimente, considerat individual, aproximativ între 0,6 și 1,0 unități de intensitate. Cele mai mari valori s-au obținut pentru valorile de vârf ale accelerației, vitezei și deplasării terenului, în timp ce cele mai reduse valori s-au obținut pentru intensitatea bazată pe spectru. Dacă s-ar fi considerat cele trei evenimente în ansamblu, abaterile medii pătratice ar fi depășit considerabil unitatea, precum și limitele superioare date în literatura de specialitate;

- analiza Fourier în raport cu unghiul azimutal a arătat că, în timp ce pentru primele două evenimente epicentrul macroseismic s-a situat în apropierea epicentrului instrumental, pentru ultimul eveniment a apărut o

diferență importantă, epicentrul macroseismic fiind puternic deplasat spre est. Pe de altă parte, directivitatea radiației a fost puternică în toate cazurile. În ceea ce privește directivitatea observată, s-a constatat că, în timp ce pentru primul eveniment aceasta a corespuns direcției NE-SW, cum au arătat, de altfel, și rezultatele anchetelor macroseismice pentru cutremurele din 10.11.1940, 04.03.1977 și 30.08.1986, pentru ultimele două evenimente directivitatea radiației a fost considerabil diferită. Astfel, pentru evenimentul din 30.05.1990, caracterizat și printr-o atenuare foarte redusă, direcția principală de radiație a fost, cu aproximație, N-S (observațiile macroseismice din nord-estul Bulgariei au evidențiat efecte care concordă cu aceste constatări).

În cea de a doua etapă, analiza a fost reluată într-un cadru largit, utilizându-se un fond de date mai bogat (la fondul de date obținut de INCERC, utilizat în mod exclusiv în prima etapă, s-au adăugat datele obținute de rețeaua INFP, precum și date obținute în Bulgaria) și efectuându-se analize în termeni spectrali. Astfel, pe lângă intensitățile globale bazate pe spectru, au fost luate în considerare și intensități mediate pentru patru benzi de frecvență de câte 6 dB: (0,5 Hz, 1,0 Hz), (1,0 Hz, 2,0 Hz), (2,0 Hz, 4,0 Hz) și (4,0 Hz, 8,0 Hz), benzi care au fost considerate drept cele mai semnificative. Rezultatele obținute în această a doua etapă le-au confirmat, în general, pe cele anterioare. Alături de analiza statistică a fost efectuată și o analiză calitativă, vizuală, a rezultatelor înregistrărilor accelerografice (compararea diagramelor de deplasări rezultate din integrarea accelerogramelor înregistrate în stații situate în lungul unor aliniamente).

Examinarea diagramelor de deplasări pe direcțiile N-S, respectiv E-W, determinate pentru stații situate în lungul unor aliniamente N-S și, respectiv, E-W, care traversează Municipiul București, au arătat asemănări neașteptat de bune ale variației în timp, chiar dacă accelerogramele de pornire prezentau diferențe mari.

Printre rezultatele obținute în noua etapă de analiză statistică merită să fie relevate în special următoarele:

- dreptele de regresie au avut rate de atenuare care, pentru un eveniment individual, au prezentat diferențe sensibile de la o bandă de frecvențe la alta. Astfel, pentru evenimentul din 1968.08.30, banda de frecvențe care a prezentat atenuarea cea mai redusă a fost (2,0 Hz, 4,0 Hz), iar pentru evenimentul din 30.05.1990, aceasta a fost (1,0 Hz, 2,0 Hz), urmată de banda mai largă (2,0 Hz, 8,0 Hz);

- directivitatea radiației a fost diferită de la o bandă spectrală la alta, aceste diferențe fiind pregnante pentru ultimele două evenimente;

- principalele benzi de frecvență pentru radiația seismică au fost (2,0 Hz, 4,0 Hz), pentru primul

eveniment, și (2,0 Hz, 8,0 Hz), pentru cel de al doilea (pentru ultimul eveniment, care a avut o magnitudine mai mică, rezultatele respective sunt mai puțin semnificative);

- examinându-se relația aleatoare magnitudine - intensitate pentru câteva stații accelerografice luate individual, se constată că nu întotdeauna intensitatea este o funcție monoton crescătoare în raport cu magnitudinea, fapt care confirmă caracterul (puternic) aleator al fenomenului de atenuare. În ceea ce privește compoziția spectrală a mișcării seismice a terenului, pentru stațiile din Municipiul București s-a observat o tendință sistematică de creștere monotonă a perioadei de colț  $T_C$  (viteză / accelerație), dar, pentru o serie de stații din provincie, această tendință sistematică nu a mai fost observată.

### **3. ANALIZĂ ASUPRA COMPOZIȚIEI SPECTRALE A MIȘCĂRII SEISMICE A TERENULUI ȘI A FACTORILOR CARE AU INFLUENȚAT-O**

Analiza asupra compoziției spectrale a mișcării seismice a terenului și a factorilor care au influențat-o a cuprins mai multe activități, ulterioare procesării individuale a accelerogramelor:

- a) examinare calitativă comparativă privind variațiile constatate de la un eveniment la altul, respectiv de la o stație la alta;

- b) examinarea unor aspecte specifice ale condițiilor de teren, în corelare cu constatările activității menționate la pct. (a);

- c) înregistrarea agitației microseismice a terenului la amplasamente reprezentative pentru condițiile de teren diferite evidențiate de activitățile de la punctul (a) și analiza spectrală și de corelație a înregistrărilor respective;

- d) determinarea de funcții de transfer scalare, respectiv spațiale, pentru pachete geologice superficiale (relativ adânci), reprezentative pentru o serie de amplasamente pentru care se dispunea de date instrumentale;

- e) compararea și reconcilierea rezultatelor furnizate de activitățile menționate la punctele precedente;

- f) elaborarea de recomandări metodologice privind considerarea specificului condițiilor locale, în vederea anticipării compoziției spectrale a viitoarelor mișcări seismice.

Activitățile menționate la punctele (a) și (b) au condus la următoarele constatări principale:

- accelerogramele obținute au prezentat o varietate mare de compoziții spectrale, de la o stație la alta, de la

o direcție de mișcare la alta și, uneori, de la un eveniment la altul;

– au existat stații cu tendință marcantă de stabilitate a compoziției spectrale de la un eveniment la altul (prototip: stația Cernavodă - Primărie, pentru care s-a observat persistența unui vârf spectral pronunțat pentru o perioadă de cca. 0.4 s) și, respectiv, stații cu tendință marcată de variabilitate a compoziției spectrale de la un eveniment la altul (prototip: stația București – INCERC, pentru care s-au constatat importante diferențe de compoziție spectrală între evenimentele din 04.03.1977, 30.08.1986 și 30.05.1990). În cele ce urmează, cele două categorii de stații sunt numite stații de categorie *Ca*, respectiv de categorie *Cb*;

– examinarea condițiilor de teren de la diferite amplasamente de stații a permis să se constate că, în cazul stațiilor de categorie *Ca*, se întâlnește la o adâncime redusă, de câteva zeci de metri, un salt al proprietăților condițiilor de teren, în sensul existenței unui contrast puternic (cu valori crescătoare în jos) pentru vitezele de propagare ale undelor *S*, în timp ce în cazul stațiilor de categorie *Cb*, un astfel de salt pronunțat lipsește.

– se constată, în numeroase cazuri, prezența unor vârfuri spectrale (principale sau secundare) au perioade lungi, de peste 1 s;

– din punctul de vedere al variabilității compoziției spectrale, se poate menționa că, la stația INCERC – București, a existat, la 04.03.1977, un vârf principal la cca. 1.5 s, care a devenit vârf secundar la 30.08.1986 și a lipsit cu desăvârșire la 30.05.1990. La 30.08.1986 vârful spectral secundar respectiv a fost prezent la stațiile situate în lungul unor aliniamente N-S, respectiv E-W, care străbăteau Municipiul București. Se poate aprecia, astfel, că vârful spectral principal, de la cca. 1.5 s, a fost prezent, la 04.03.1977, la toate aceste stații;

– componentele spectrale cu perioadă în jurul a 1.5 s, care nu s-au mai manifestat la stația București – INCERC la 30.05.1990, s-au manifestat cu pregnanță, în cazul respectiv, la stațiile Focșani și Rm. Sărat.

Activitățile menționate la punctul (c), luate în considerare în corelare cu activitățile menționate la punctul (b), au condus la următoarele constatări principale, furnizate de datele obținute la prototipurile menționate, de stații de categoriile *Ca* și, respectiv, *Cb*:

– agitația microseismică a terenului prezintă, în general, un caracter haotic clasic, dar la o stație de categorie *Ca* există segmente de timp pentru care se constată o amplificare considerabilă a mișcării terenului, oscilațiile tinzând să devină sinusoidale, cu o perioadă foarte apropiată de perioada predominantă (stabilă) observată în cazul cutremurelor puternice. În

schimb, în cazul unei stații de categoria *Cb*, caracterul haotic clasic apare drept omniprezent;

– pentru spectrele Fourier glisante ale deplasărilor (uneori și ale vitezelor) se constată că există, în ambele cazuri, segmente de timp pentru care apar vârfuri spectrale au perioade foarte lungi (5-7 s), apropiate de perioadele observate ca fiind relativ importante în cazul teleseismelor.

Activitățile menționate la punctul (d) au avut la bază o modelare simplă a pachetului geologic superficial și a fenomenului de propagare a undelor seismice. S-au considerat, astfel:

– stratificații plan-paralele, cu interfețe orizontale;

– legi constitutive liniare ale materialelor geologice;

– direcție de propagare a undelor verticală și direcție de oscilație (unică) orizontală;

– mișcări sinusoidale, cu frecvențe variabile parametric, caracterizate prin amplitudini complexe.

Aceste puncte de plecare au permis determinarea de:

– funcții de transfer scalare (raporturi între amplitudinile complexe ale mișcării sinusoidale la suprafața terenului și, respectiv, la roca de bază sau la fața inferioară a pachetului geologic considerat);

– funcții de transfer spațiale (raporturi între amplitudinile complexe ale mișcării sinusoidale într-un punct curent, cu cotă variabilă parametric, și, respectiv, la roca de bază sau la fața inferioară a pachetului geologic considerat).

Calcululele au fost efectuate pentru frecvențe circulare variind parametric între  $1 \text{ s}^{-1}$  și  $100 \text{ s}^{-1}$ . S-au considerat, de fiecare dată, pachete geologice superficiale groase, cu grosimi cel puțin în jurul a 1000 m (în cazul stației București – INCERC, grosimea considerată a fost de 2800 m). Pentru pachetele groase, corespunzând unei stratificații de tip *Cb*, s-a adoptat o abordare parametrică, luându-se în considerație, în mod alternativ: numai primul strat, numai primele două strate, ... toate stratele considerate (numerotarea făcându-se de sus în jos). Pe marginea rezultatelor acestor calcule se pot formula următoarele constatări:

– pentru stratificația de tip *Ca* a apărut la funcția de transfer scalară, un vârf spectral principal stabil, la o perioadă apropiată de perioada fundamentală a subpachetului moale superior. Alura funcției de transfer nu a fost influențată sensibil de ipotezele alternative privind subpachetul inferior mai rigid (grosimea acestuia și viteza corespunzătoare de propagare a undelor *S*). Vârful spectral principal al funcției de transfer a fost foarte apropiat de vârful spectral principal observat la spectrele de răspuns pentru cutremurele puternice, respectiv la spectrele Fourier glisante determinate pentru agitația microseismică;

– pentru stratificația de tip *Ca* au apărut la funcția de transfer spațială, în mod stabil, amplitudini mult mai mari în subpachetul superior, moale, decât în subpachetul inferior, rigid. Alura amplitudinilor de oscilație a fost, în subpachetul superior, apropiată de alura unui strat subțire (având grosimea subpachetului superior) rezemat pe un suport perfect rigid;

– pentru stratificația de tip *Cb*, funcția de transfer scalară a prezentat modificări considerabile în funcție de numărul de strate luate în calcul, ajungându-se, însă, la o tendință de stabilizare după depășirea unei anumite adâncimi (în cazul stratificației de tip INCERC, un pachet de patru strate, cu adâncime totală de cca. 1000 m, din totalul de 8 strate considerate). În acest caz au apărut, dacă se considera un număr suficient de strate, mai multe vârfuri spectrale cu ordonate apropiate, fapt care este compatibil cu variabilitatea constatată, de la un eveniment la altul, a compoziției spectrale a mișcării seismice în timpul cutremurelor puternice;

– rezultatele obținute pentru cazul menționat mai sus permit să se evidențieze o corespondență interesantă între vârfurile funcției de transfer și vârfurile spectrale observate pentru cutremurele puternice. Vârful spectral fundamental, cu o perioadă de aproape 6 s, se situează în vecinătatea vârfurilor observate pentru teleseisme. Al doilea vârf spectral, cu o perioadă de cca. 2,8 s, nu s-a manifestat în timpul cutremurelor puternice observate. Al treilea vârf spectral, cu o perioadă de cca. 2,2 s, corespunde unui vârf secundar, observat pentru componenta E-W la 04.03.1977. Al patrulea vârf spectral, cu o perioadă de cca. 1,5 s, corespunde vârfului spectral principal observat la 04.03.1977. Vârfurile spectrale observate la 30.08.1986 și 30.05.1990 se situează în vecinătatea celui de la șaptelea vârf al funcției de transfer.

## 4. CONSIDERAȚII FINALE

În încheiere, se pot menționa următoarele:

● Atenuarea specifică evenimentelor seismice vrâncene prezintă o variabilitate ridicată. Aceasta are o importanță mare și trebuie luată în considerație pentru studiile de hazard seismic.

● Pentru situațiile de categorie *Ca* există o tendință marcată de stabilitate a compoziției spectrale a mișcării terenului și, deci, o bună predictibilitate a acesteia, pe când pentru situațiile de categorie *Cb* există o tendință de variabilitate ridicată și, deci, incertitudini apreciabile asupra compoziției spectrale a viitoarelor mișcări ale terenului.

● Pentru anticiparea compoziției spectrale a mișcării seismice a terenului, este de dorit să se utilizeze o metodologie complexă, care să facă uz de datele accelerografice disponibile, de datele instrumentale privind agitația microseismică a terenului și de determinarea funcțiilor de transfer pentru pachete geologice superficiale suficient de groase (de dorit, de cel puțin 1000 m grosime).

● Este de dorit ca, în dezvoltarea bazei normative de specialitate, să se facă uz de rezultatele obținute în studiile prezentate.

## BIBLIOGRAFIE

1. **H. Sandi, I. S. Borcia, M. Stancu.** "Analysis of attenuation for recent Vrancea intermediate depth earthquakes". *Proc. 13-th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004*, respectiv *Buletinul AICPS nr.3, 2004*.
2. **H. Sandi, I. S. Borcia, M. Stancu, O. Stancu, I. Vlad, N. Vlad.** "Influence of source mechanism versus that of local conditions, upon spectral content of ground motion". *Proc. 13-th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004*, respectiv *Buletinul AICPS nr.4, 2004*.