

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI  
ȘCOALA DOCTORALĂ  
DEPARTAMENTUL DE CONSTRUCȚII DE BETON ARMAT

Raportul 1 de cercetare

Simularea mișcărilor seismice generate de  
cutremurile vrâncene de adâncime intermediară.  
Interpretarea rezultatelor. Aspecte pro și contra

---

Doctorand: *ing. Eliza-Anabella COȚOVANU*

Conducător de doctorat: *prof. univ. dr. ing. Radu Sorin VĂCĂREANU*

*Septembrie 2018*

## Cuprins

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Listă de figuri .....                                                                                           | 3  |
| Listă de tabele.....                                                                                            | 5  |
| 1. Introducere.....                                                                                             | 6  |
| 2. Metoda empirică a funcțiilor Green .....                                                                     | 8  |
| 3. Simularea stochastică a accelerogramelor .....                                                               | 11 |
| 4. Modelare numerică. Simulări teoretice (3D).....                                                              | 17 |
| 5. Metode hibride .....                                                                                         | 18 |
| 6. Simularea seismului vrâncean de adâncime intermediară din 27 octombrie 2004. Interpretarea rezultatelor..... | 20 |
| 6.1. Caracteristici seism.....                                                                                  | 20 |
| 6.2. Primul set de simulări.....                                                                                | 21 |
| 6.2.1. Date de intrare .....                                                                                    | 21 |
| 6.2.2. Parametru modificat (de calibrare).....                                                                  | 23 |
| 6.2.3. Interpretarea rezultatelor .....                                                                         | 24 |
| 6.3. Al doilea set de simulări .....                                                                            | 29 |
| 6.4. Al treilea set de simulări.....                                                                            | 30 |
| 6.5. Al patrulea set de simulări .....                                                                          | 31 |
| 6.6. Al cincelea set de simulări.....                                                                           | 33 |
| 6.7. Al șaselea set de simulări .....                                                                           | 35 |
| 6.8. Setul final de simulări.....                                                                               | 40 |
| 7. Simularea seismului vrâncean de adâncime intermediară din 30 august 1986. Interpretarea rezultatelor.....    | 44 |
| 7.1. Caracteristici seism.....                                                                                  | 44 |
| 7.2. Parametrii de intrare .....                                                                                | 44 |
| 7.3. Rezultatele simulărilor.....                                                                               | 45 |
| 8. Concluzii. Aspecte pro și contra.....                                                                        | 48 |
| Bibliografie.....                                                                                               | 50 |

## Listă de figuri

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figură 1. Ilustrarea schematică a metodei funcțiilor empirice Green. (a) Ariile faliilor ale evenimentelor (mic și mare). (b) Filtrul de ajustare a diferențelor dintre funcțiile vitezelor de alunecare conform Irikura 1986 (funcția este o sumă între o funcție delta și boxcar. (c) Filtru modificat conform Irikura et al. 1997 cu o funcție exponențială în loc de o funcție boxcar unde T este timpul de producere a evenimentului mare. (d) Dispunerea schematică a amplitudinilor spectrale ale deplasărilor într-un model de sursă omega pătrat, presupunând fracțiunea de cădere de tensiune C. (e) Spectrul de amplitudini ale accelerațiilor pentru modelul de scalare a sursei de tip omega pătrat [Lecture Note on Strong Motion Seismology, K. Irikura and H. Miyake] ..... | 10 |
| Figură 2. Principiul obținerii accelerogramei simulate folosind modelul sursei finite (Boore 2003).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 13 |
| Figură 3. Efectul combinat al amplasamentului (luând în calcul atât amplificarea, cât și diminuarea) (Boore 2003) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 16 |
| Figură 4. Exemplu de grid spațial utilizat în simulările care utilizează metode numerice (Irikura and Miyake, Lecture Note) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 17 |
| Figură 5. Metoda hibrid de simulare a mișcării seismice pentru cutremurele mari (Irikura and Miyake, Lecture Note) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 19 |
| Figură 6. Exemple de filtre utilizate în metoda hibrid și exemplu de simulare a unui cutremur mare (Morikawa et al., 2006).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 19 |
| Figură 7. Mărimea faliilor cutremurelor din 27 octombrie 2004, 30 august 1986 și 4 martie 1977 (Oth et al., 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 21 |
| Figură 8. Variația accelerațiilor de vârf în cadrul a 400 de simulări realizate pentru cele 4 valori ale căderii de tensiune .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| Figură 9. Variația accelerațiilor de vârf în cadrul a 400 de simulări realizate pentru cele 3 tipuri de sursă a câte 2 tipuri de amplificare locală.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 25 |
| Figură 10. Energiile cumulative ale simulărilor și înregistrărilor reale .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 26 |
| Figură 11. Comparatie între spectrele normalizate de răspuns ale simulărilor și cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 27 |
| Figură 12. Comparatie între spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu sursa S1 și cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 27 |
| Figură 13. Comparatie între spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu sursa S11 și cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 28 |
| Figură 14. Comparatie între spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu sursa S12 și cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 28 |
| Figură 15. Comparatie între spectrele normalizate de răspuns ale simulărilor realizate fără influența condițiilor locale de teren și cutremurului din 27 octombrie 2004 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 29 |
| Figură 16. Comparatie între spectrele normalizate de răspuns a surselor simulărilor și cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 30 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figură 17. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale simulărilor realizate fără influența condițiilor locale de teren, spectrele surselor simulate și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004..... | 31 |
| Figură 18. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale surselor simulate cu tensiuni de 75 bari și 200 de bari și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004 .....                                      | 32 |
| Figură 19. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale sursei S12 simulate cu tensiuni de 75 bari și 200 de bari și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                     | 32 |
| Figură 20. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale sursei S11 simulate cu tensiuni de 75 bari și 200 de bari și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                     | 33 |
| Figură 21. Comparație între spectrele de răspuns ale mișcării simulate folosind sursa S12, împrăștierea geometrică 0,4 și durata drumului 0,09 și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004.....                 | 34 |
| Figură 22. Comparație între energiile cumulative simulate și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                                       | 34 |
| Figură 23. Comparație între energiile cumulative simulate cu diverse filtre și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004 (partea I) .....                                                                         | 37 |
| Figură 24. Comparație între energiile cumulative simulate cu diverse filtre și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004 (partea II).....                                                                         | 37 |
| Figură 25. Comparație între accelerogramele simulate utilizând filtrul 16 și filtrul 24 și accelerograma cutremurului din 27 octombrie 2004 înregistrată pe direcția NS.....                                        | 38 |
| Figură 26. Accelerogramă normalizată simulată utilizând filtrul 24 .....                                                                                                                                            | 38 |
| Figură 27. Accelerogramă normalizată seism 27 octombrie 2004 direcția EW.....                                                                                                                                       | 39 |
| Figură 28. Accelerogramă normalizată simulată utilizând filtrul 16.....                                                                                                                                             | 39 |
| Figură 29. Comparație între energiile cumulative simulate varianta finală și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004.....                                                                                       | 40 |
| Figură 30. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale.....                                                                | 41 |
| Figură 31. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale pentru sursa S1 .....                                               | 41 |
| Figură 32. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale pentru sursa S11 .....                                              | 42 |
| Figură 33. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale pentru sursa S12 .....                                              | 42 |
| Figură 34. Comparație între energiile cumulative simulate și cele ale cutremurului din 30 august 1986 .....                                                                                                         | 46 |
| Figură 35. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 30 august 1986 și spectrele de răspuns ale simulărilor pantru sursa S1 .....                                                         | 46 |
| Figură 36. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 30 august 1986 și spectrele de răspuns ale simulărilor pantru sursa S11 .....                                                        | 47 |
| Figură 37. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 30 august 1986 și spectrele de răspuns ale simulărilor pantru sursa S12 .....                                                        | 47 |

## Listă de tabele

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 Tipuri de spectre pentru definirea sursei (Boore, 2003).....                                                                                                                                        | 14 |
| Tabel 2 Mediile accelerațiilor de vârf pentru diferite valori ale căderii de tensiune.....                                                                                                                  | 24 |
| Tabel 3. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 pentru o cădere de tensiune de 200 bari .....                                                                         | 25 |
| Tabel 4. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 pentru o cădere de tensiune de 75 bari, împrăștierea geometrică 0,4 și durata drumului 0,09 .....                     | 35 |
| Tabel 5. Tipuri de filtre .....                                                                                                                                                                             | 36 |
| Tabel 6. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 pentru o cădere de tensiune de 75 bari, împrăștierea geometrică 0,4 și durata drumului 0,09, folosind filtrul 24..... | 43 |
| Tabel 7. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 30 august 1986 .....                                                                                                                    | 45 |

## 1. Introducere

Hazardul seismic din România este dat de sursa seismică de adâncime subcrustală Vrancea și de zonele seismogene de suprafață, distribuite pe întreg teritoriul țării: Făgăraș – Câmpulung, zona Danubiană, Banat, Crișana – Maramureș, depresiunea Bârlad, depresiunea Predobrogeană, falia Intramoiesică, depresiunea Transilvaniei (Radulian et al., 2000).

Zona seismogenă Vrancea se află la convergența a trei unități tectonice: placa Est – Europeana și subplăcile Intra – Alpină și Moesică (Constantinescu et al., 1976), aceasta cuprinde o suprafață epicentrală de circa 40x80 km<sup>2</sup>, având adâncimea focarelor între 60 și 170 km.

Cel mai puternic cutremur produs de această sursă este considerat a fi cel din 26 octombrie 1802, având magnitudinea moment de 7,9.

În secolul XX, în data de 10 noiembrie 1940, s-a produs, la o adâncime de 140-150 km, seismul cu cea mai mare magnitudine a secolului (magnitudinea moment fiind de 7,7), iar în data de 4 martie 1977 a fost înregistrată prima accelerogramă a unui cutremur puternic. Fiind cutremurul cu cel mai distrugător efect al secolului XX, evenimentul seismic din '77 a înregistrat o magnitudine moment de 7,4, având adâncimea de focar 94 km și distanța epicentrală medie față de București de 130 km. În condițiile de teren predominant argilos din amplasamentul INCERC, din estul Bucureștiului, a fost înregistrată o accelerație maximă a terenului de 0,2g, cu o perioadă predominantă a vibrației terenului foarte lungă, de 1,6s.

În data de 30 august 1986, s-a produs un seism de magnitudine moment de 7,1 la o adâncime de focar de 133 km. Acesta a înregistrat în zona epicentrală, la Focșani, o accelerație maximă a terenului de 0,3g, iar în nordul Bucureștiului (în Piața Presei Libere) o accelerație maximă a terenului de 0,16g.

În data de 30 mai 1990, un cutremur de magnitudine moment de 6,9 pe și adâncime de 91 de km a înregistrat accelerații maxime ale terenului în București între 0,07g și 0,13g.

Conform catalogului de cutremure Romplus INFP, furnizat de [www.infp.ro](http://www.infp.ro), de la începutul secolului XX până în prezent au avut loc 14 cutremure cu magnitudinea moment mai mare de 6,3, cel mai mare fiind cel din 10 noiembrie 1940, însă doar 4 din aceste cutremure au fost înregistrate. Cutremurele cu magnitudinea moment mai mică de 6.3 se consideră ne semnificative pentru calculul construcțiilor.

Codul de proiectare seismică P100-1-2013 oferă posibilitatea proiectării prin metoda calcului dinamic folosind accelerograme reale, artificiale sau simulate, însă respectând anumite restricții în ceea ce privește numărul de accelerograme folosite, compatibilitatea acestora cu hazardul zonei, factorii de scalare și altele. Aceste restricții determină necesitatea folosirii unor accelerograme artificiale sau simulate. Dintre acestea, accelerogramele artificiale sunt realizate pe baza spectrelor de răspuns elastic (deși sunt utilizate la scară largă deoarece imită spectru de răspuns sunt în general irealiste deoarece nu reproduc

nestaționaritatea mișcării seismice naturale – R. Pavic et al. 2000), iar cele simulate sunt realizate pornind de la caracteristicile mecanismului sursei seismice, influența drumului parcurs de unda seismică și influența condițiilor de teren din amplasament. Astfel, folosirea accelerogramelor simulate în proiectarea unor clădiri noi sau consolidarea celor existente este metoda care surprinde caracteristicile fenomenului natural într-o complexitate mai mare, ceea ce implică o cunoaștere mai aprofundată a hazardului, iar acest lucru determină reducerea riscului.

La momentul actual există patru metode principale de predicție a mișcării seismice: ecuații de predicție a mișcării (rezultatul metodei fiind parametri mișcării), modelare stochastică, funcții empirice Green și modelare numerică bazată pe caracteristicile fizice (ultimele trei metode având ca rezultat mișcarea în domeniul timp). În ultimii ani se utilizează metode hibride ce combină modelarea numerică, funcțiile empirice Green și modelarea stochastică. Dificultatea metodelor de simulare a cutremurelor este dată de complexitatea datelor de intrare. Dacă pentru ecuațiile de predicție în principal este necesară identificarea caracteristicilor generale ale sursei seismice, delectarea geometriei, definirea rupturii (moment seismic, mecanism tectonic, tipul lunecării), pentru metoda stochastică este nevoie și caracterizarea influenței căii de propagare în termeni de viteze ale undelor seismice, densități de masă și comportării locale a terenului în apropierea suprafeței libere. Modelarea numerică necesită și mai multe date de intrare: o caracterizare corespunzătoare a sursei seismice (cinematică sau dinamică) și o definiție mai amănunțită a complexului geologic care poate influența răspunsul seismic local.

Câteva exemple de metode de simulare sunt:

Beresnev, I. A. and Atkinson, G. M. (1998). FINSIM — A FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults. *Seismol. Res. Lett.*, 69:27–32.

Boore DM (2005) SMSIM—Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 2.3—a revision of OFR 96-80-A. U.S. Geological Survey Report OFR 00–509

Furumura, T., Hayakawa, T., Nakamura, M., Koketsu, K., and Baba, T. (2006). Development of Long-Period Ground Motions from Earthquakes Within the Nankai Trough, Japan: Observations and Computer Simulation of the 1944 Tonankai (Mw 8.1) and 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw 7.4) Earthquakes. *Pure Appl. Geophys.*, submitted.

Furumura, T., Koketsu, K., and Wen, K.-L. (2002). Parallel PSM/FDMHybrid Simulation of Ground Motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Pure Appl. Geophys.*, 159:2133–2146.

Kamae, K., Irikura, K., and Pitarka, A. (1998). A Technique for Simulating Strong Ground Motion Using Hybrid Green's Function. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88:357–367.

Miyake, H., Iwata, T., and Irikura, K. (2003). Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulations: Kinematic Heterogeneous Source Model and Strong Motion Generation Area. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93:2531–2545.

Suzuki, W., Iwata, T., Asano, K., and Yamada, N. (2005). Estimation of the Source Model for the Foreshock of the 2004 off the Kii Peninsula Earthquakes and Strong Motion Simulation of the Hypothetical Tonankai Earthquake Using the Empirical Green's Function Method. *Earth Planets Space*, 57:345–350.

## 2. Metoda empirică a funcțiilor Green

Metoda presupune modelarea unui seism mare (suprafață de rupere mare) printr-o mulțime de cutremure mici ce reprezintă surse punctuale (cu un mecanism de focar similar cu seismul țintă) de-a lungul unei falii, luându-se în calcul propagarea rupturii prin faze de întârziere. Lucrări de bază din literatura de specialitate despre metoda empirică a funcțiilor Green sunt Hartzell 1978, Kanamori 1979, Irikura 1983, 1986, Miyake 2003.

Hartzell 1978 asociază răspunsul fiecărei surse punctuale cu mișcarea celui mai apropiat aftershock asociat (care devine o funcție Green), astfel este surprins efectul structurii pământului și nu mai este nevoie de cunoașterea mecanismului de focar.

Metoda funcțiilor empirice Green formulată de Irikura (1986) se bazează pe legea de scalare a parametrilor faliei pentru evenimente mari și mici a lui Kanamori și Anderson (1975) și sursa spectrală omega pătrat definită de Aki (1967). Forma undelor seismice ale unui eveniment mare este sintetizată prin însumarea unor evenimente înregistrate mici corectate pentru diferențele vitezei de rupere.

Însumarea evenimentelor mici se realizează prin următoarele ecuații:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r}{r_{ij}} F(t) * (C \cdot u(t))$$

$$F(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[ \delta\left\{t - t_{ij} - \frac{(k-1)T}{(N-1)n'}\right\}\right]$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_o}{V_s} + \frac{\xi_{ij}}{V_r}$$

unde

$U(t)$  este simularea undelor seismice ale evenimentului mare,  $u(t)$  evenimentul mic,  $N$  și  $C$  sunt fracțiuni din dimensiunile faliei și căderea de tensiune ce iau în calcul diferențele dintre evenimentul mare și evenimentele mici.

$F(t)$  este funcția de corecție care ajustează diferențele între funcțiile de rupere dintre evenimentele mici și cele mari

$V_s$  și  $V_r$  sunt vitezele din apropierea sursei și viteza de rupere în falie

$T$  este durata de producere a evenimentului mare (risetime)

$n'$  este un întreg care slăbește periodicitatea artificială dată de  $n$ .

Prin lucrarea din 1997 Irikura et al. se propune modificarea funcției  $F(t)$ :

$$F(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'(1 - \frac{1}{e})} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[ \frac{1}{e^{\frac{(k-1)}{(N-1)n'}}} \delta\left\{t - t_{ij} - \frac{(k-1)T}{(N-1)n'}\right\}\right]$$

Valorile lui  $N$  și  $C$  sunt determinate din ecuațiile:

$$\frac{U_o}{u_o} = \frac{M_o}{m_o} = CN^3$$

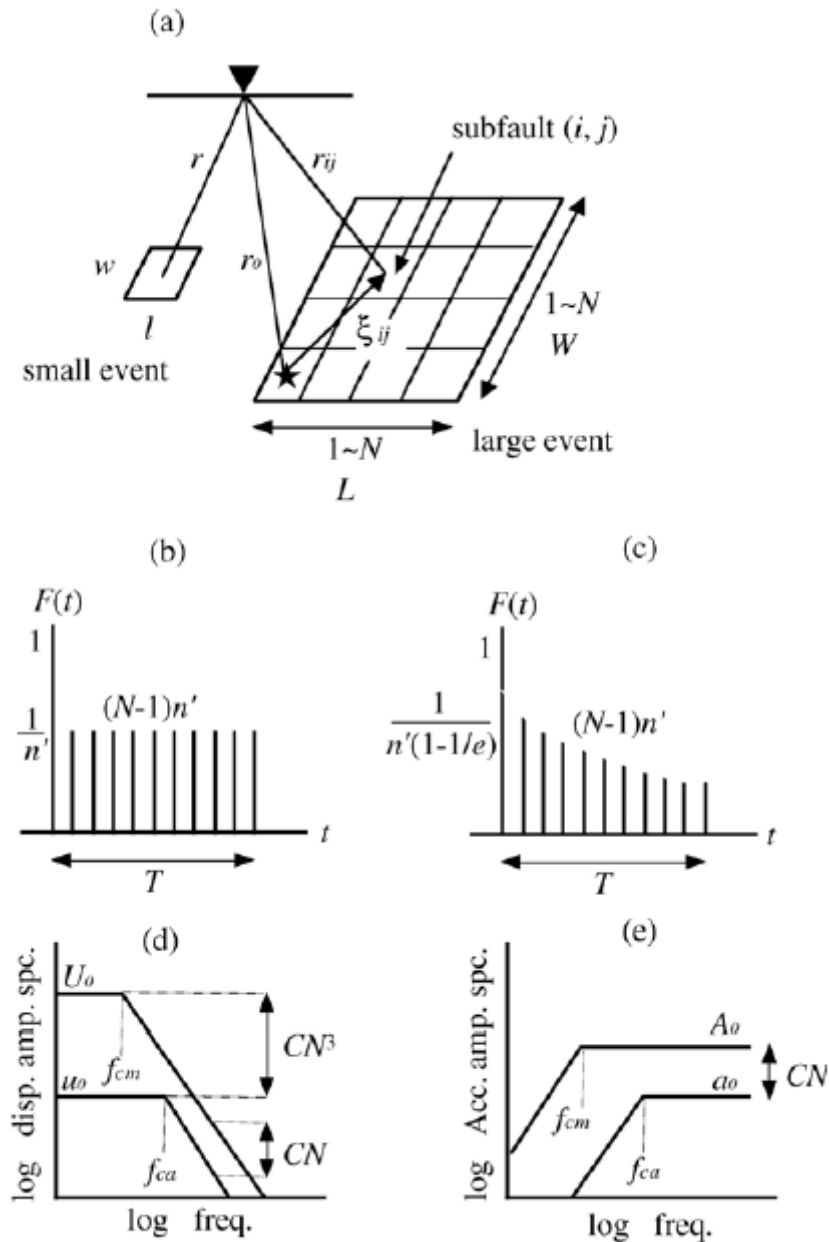
$$\frac{A_o}{a_o} = CN$$

unde  $U_o$  și  $u_o$  sunt amplitudinile spectrale ale evenimentului mare, respectiv a celui mic,  $M_o$  și  $m_o$  sunt momentele seismice ale evenimentelor,  $A_o$  și  $a_o$  nivelele de amplitudine spectrală constantă ale evenimentelor.

În urma rezolvării sistemului de ecuații rezultă:

$$N = \left(\frac{U_o}{u_o}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a_o}{A_o}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$C = \left(\frac{u_o}{U_o}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{A_o}{a_o}\right)^{\frac{3}{2}}$$



Figură 1. Ilustrarea schematică a metodei funcțiilor empirice Green. (a) Ariile faliilor ale evenimentelor (mic și mare). (b) Filtrul de ajustare a diferențelor dintre funcțiile vitezelor de alunecare conform Irikura 1986 (funcția este o sumă între o funcție delta și boxcar. (c) Filtru modificat conform Irikura et al. 1997 cu o funcție exponențială în loc de o funcție boxcar unde  $T$  este timpul de producere a evenimentului mare. (d) Dispunerea schematică a amplitudinilor spectrale ale deplasărilor într-un model de sursă omega pătrat, presupunând fracțiunea de cădere de tensiune  $C$ . (e) Spectrul de amplitudini ale accelerațiilor pentru modelul de scalare a sursei de tip omega pătrat (Lecture Note on Strong Motion Seismology, K. Irikura and H. Miyake)

### 3. Simularea stohastică a accelerogramelor

Hanks și McGuire (1980) demonstrează că accelerațiile cu frecvență înaltă pot fi descrise ca un zgomot Gaussian de bandă limitată, cu anumite caracteristici spectrale. Se poate presupune, de asemenea, că faza accelerațiilor mișcării seismice este aleatoare. Astfel aceștia au combinat modele spectrale de amplitudini ale mișcării seismice cu noțiunea că, practic, mișcările de frecvență înaltă sunt aleatoare (HANKS, 1979; McGuire și HANKS, 1980; și McGuire, 1981). În lucrarea lui Hanks și McGuire 1980, aceștia au presupus că accelerațiile pe un semi-spațiu elastic sunt de bandă limitată, de durată finită, de tip zgomot alb Gaussian, și că spectrul sursei este descris printr-un model cu o singură frecvență de colț ce depinde de mărimea seismului, conform lui Brune (1970, 1971), și au derivat o relație simplă ce descrie accelerația de vârf a unui seism.

Boore (1983) a generalizat munca lor pentru a permite folosirea modelelor mai complexe, extinse pentru simularea seriilor de timp și pentru a putea fi luate în considerare mai multe caracteristici ale mișcării seismice. Ecuația spectrului mișcării seismice utilizate de Boore (2003) este următoarea:

$$Y(M_0, R, F) = E(M_0, f)P(R, f)G(f)I(f), \text{ unde:}$$

$M_0$  – este momentul seismic (Aki, 1966), transformarea dintre momentul seismic și mărimea moment fiind dată de relația (Hanks și Kanamori, 1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7,$$

iar transformarea magnitudinii Gutenberg-Richter în mărime moment se realizează conform Lungu et al. cu următoarea relație:

$$M_w \cong M_{GR} + 0.3$$

$E$  – ecuația care descrie mecanismul de focar;

$P$  – ecuația care descrie influența mediilor de propagare a undelor;

$G$  – ecuația care descrie influența condițiilor locale de amplasament;

$I$  – ecuația ce ține cont de tipul seismului.

În literatura de specialitate găsim, pentru modelarea sursei seismice, două metode populare: modelarea stohastică ca sursă punctuală și modelarea stohastică ca sursă finită. De asemenea, spectrul sursei poate fi definit ca având una sau două frecvențe de colț. În cele ce urmează se vor prezenta, pe scurt, principiile fiecărui tip de modelare.

#### a. Modelarea stohastică a sursei punctuale

Modelul stohastic de sursă punctuală presupune că sursa este concentrată într-un punct și că accelerația generată prin serii de timp, într-un anumit amplasament, ține cont atât

de caracteristicile deterministe, cât și de caracteristicile aleatoare ale mișcării seismice. Caracteristicile deterministe sunt specificate prin media spectrului Fourier, printr-o funcție de magnitudine și distanță. Caracteristicile stochastice sunt generate prin modelarea mișcării seismice ca un zgomot cu anumite caracteristici spectrale.

Acest tip de modelare este avantajos dacă distanța sursă – suprafață este mai mare decât dimensiunile surse. (Boore, 1983, 2003; Boore and Atkinson, 1987; Atkinson and Boore, 1995, 1997; Atkinson and Silva, 1997, 2000).

Metoda empirică hibrid (Campbell 2000, 2003) metoda folosește simulările stochastice pentru a ajusta cuățiile de predicție a mișcării, aceste ajustări iau în considerare caracteristicile sursei, propagării și răspunsului local.

Pașii realizării unei simulări stochastice folosind modelarea sursei de tip punctual sunt următorii:

- Generarea unui semnal aleator distribuit normal sau Gaussian de medie zero și variație unitară
- Filtrarea semnalului prin înmulțirea lui cu o fereastră de filtrare
- Calcularea transformatei Fourier pentru semnalul îngustat de fereastră de filtrare
- Normalizarea spectrului rezultat astfel încât rădăcina medie pătratică (RMS) a spectrului amplitudinilor să fie egală cu unitatea
- Calcularea spectrului teoretic (determinist) al sursei punctuale  $E(M0, f)$ . Spectrul întregii mișcări seismice este prezentat anterior și are relația  $Y(M0, R, F) = E(M0, f)P(R, f)G(f)I(f)$
- Multiplicarea spectrului mișcării seismice cu spectrul normalizat al semnalului aleator pentru a obține spectrul Fourier al mișcării în amplasament
- Calcularea transformatei Fourier inverse a spectrului din amplasament și obținerea accelerogramelor simulate

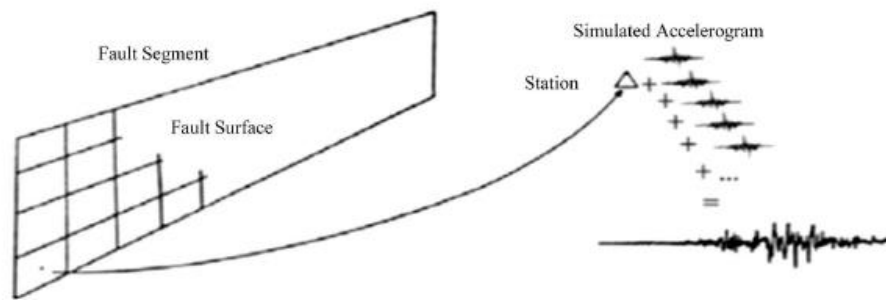
#### b. Modelarea stochastică a sursei finite

Pentru a lua în calcul și cele trei efecte pe care modelarea sursei punctuale nu le poate surprinde, Hartzell (1978) propune divizarea suprafeței de falie într-o grilă de subsurse și tratarea fiecăreia ca pe o sursă punctuală de tip Brune, cu spectre cu o singură frecvență de colț.

Mecanismul ruperii este descris de următoarele etape:

- alegerea aleatoare a unei subfalii din care să pornească ruperea (hipocentru),
- ruptura se propagă în toate direcțiile de-a lungul planului faliei,
- o subfalie este declanșată când propagarea rupturii ajunge în centrul său,
- simulările dintr-un punct de observație sunt generate prin însumarea seriilor de timp ale subfaliilor, decalate în timp considerând întârzierile provocate de propagarea rupturii,
- calcularea spectrelor Fourier pentru înregistrările simulate la mai multe azimute, amplasate la puncte de observare situate echidistant în jurul faliei

- utilizarea valorii medii a spectrelor Fourier pentru a defini forma și nivelurile de amplitudine ale unui spectru sursă punctiformă echivalent care imită efectele proprii faliei finite.



Figură 2. Principiul obținerii accelerogramei simulate folosind modelul sursei finite (Boore 2003)

#### c. Definirea spectrului sursei cu o singură frecvență de colț

Cel mai simplist și comun model de modelare al spectrului sursei este modelul  $\omega^2$  cu o singură frecvență de colț (Brune, 1970, 1971). Ignorând constantele multiplicative, spectrul Fourier al accelerațiilor (FAS) are următoarea formulă:

$$S_a(M_0, f) \propto \frac{M_0 f^2}{1 + (f/f_c)^2}$$

unde  $M_0$  este momentul seismic, iar  $f_0$  este frecvența de colț.

Spectrul accelerațiilor sursei este plat pentru frecvență suficient de îndepărtată față de frecvența de colț, pentru frecvențe înalte valoarea acestuia fiind dată de relația:

$$S_{aHF}(M_0, f) \propto M_0 f_c^2$$

În acest model frecvența de colț depinde de momentul seismic  $M_0$ , diferența de tensiune  $\Delta\sigma$  și viteza undelor de forfecare  $\beta_s$ .

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta_s \left( \frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3}$$

#### d. Definirea spectrului sursei cu frecvență de colț dublă

În urma analizării unor seturi de înregistrări Atkinson și Boore (1995) au dezvoltat un nou model pentru spectrul sursei, un model cu frecvență dublă. S-a demonstrat că acesta surprinde mai bine (decât modelul cu o singură frecvență de colț) caracteristicile spectrale ale surselor. Pentru modelul cu frecvență dublă există mai multe metode de definire a formei spectrale Atkinson și Boore (1995), Haddon (1996), Joyner (1997) și Atkinson și Silva (2000). Forma spectrului sursei depinde de cele două frecvențe de colț,  $f_a$  și  $f_b$ , iar acestea depind de momentul seismic. Modelele cu frecvență de colț dublă sunt multiplicative sau aditive, iar în tabelul prezentat mai jos sunt ilustrate diferitele modele cu formulele aferente pentru spectrul Fourier de accelerații al sursei:

$$S(M0,f) = S_a(M0,f) \times S_b(M0,f)$$

| Model <sup>†</sup> | $S_a$                                                           | $S_b$                           |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| BC92               | $f < f_a : 1$<br>$f \geq f_a : f_a/f$                           | $\frac{1}{(1+(f/f_b)^2)^{1/2}}$ |
| AB95               | $\frac{1-\epsilon}{1+(f/f_a)^2} + \frac{\epsilon}{1+(f/f_b)^2}$ | 1                               |
| Fea96*             | $\frac{1}{1+(f/f_a)^2}$                                         | 1                               |
| H96                | $\frac{1}{(1+(f/f_a)^8)^{1/8}}$                                 | $\frac{1}{(1+(f/f_b)^8)^{1/8}}$ |
| J97                | $\frac{1}{(1+(f/f_a)^2)^{3/4}}$                                 | $\frac{1}{(1+(f/f_b)^2)^{1/4}}$ |
| AS00               | $\frac{1-\epsilon}{1+(f/f_a)^2} + \frac{\epsilon}{1+(f/f_b)^2}$ | 1                               |

Tabel 1 Tipuri de spectre pentru definirea sursei (Boore, 2003)

Caracteristicile comune ale acestor modele sunt date de faptul că pentru frecvențe joase amplitudinea crește proporțional cu momentul seismic, iar pentru frecvențe înalte spectrul devine plat, cu o amplitudine egală cu cea a modelului cu o singură frecvență de colț.

Efectul mediilor de propagare ale undelor seismice este destul de complicat datorită unghiurilor de propagare a undelor și reflexia acestora, însă pentru majoritatea aplicațiilor, este recomandat să se reprezinte efectele mediilor de propagare prin funcții simple, care înglobează răspândirea geometrică a undelor, atenuare (obținută combinând atenuarea intrinsecă și atenuarea dată de împrăștiere) și creșterea generală a duratei cu distanța, ca efect al propagării și împrăștierii undelor.

Efectul simplificat al mediilor de propagare este dat de următoarea ecuației:

$$P(R, f) = Z(R)e^{[-\pi f R/Q(f)c_Q]}, \text{ unde}$$

$Z(R)$  – funcția de dispersie dată de următoarea ecuație:

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{R_0}{R} & R \leq R_1 \\ Z(R_1)(R_1/R)^{p_1} & R_1 < R \leq R_2 \\ \vdots & \\ Z(R_n)(R_n/R)^{p_n} & R_n \leq R \end{cases}$$

$R$  – distanța hypocentrală, însă în aplicații este luată ca distanța cea mai apropiată de suprafața de ruptură. În anumite aplicații este necesar să se includă, în funcție de modul de modelare a sursei, influența „pseudo-adâncimii”  $h$ , determinată empiric. Conform modelului Boore et al. (1997)  $R = \sqrt{D^2 + h^2}$ , unde  $D$  este distanța cea mai apropiată de proiecția verticală a suprafeței rupturii pe suprafața solului. În figura de mai jos este reprezentată răspândirea geometrică într-un model de predicție a mișcării seismice folosit de Atkinson și Boore (1995).

$Q(f)$  – atenuarea seismică, aceasta se determină în prin analiza unei baze de date;

$c_Q$  - viteză seismică folosită în determinarea atenuării  $Q(f)$ .

Practic, efectele condițiilor locale de amplasament ar fi incluse în efectele date de drumul parcurs de unde prin mediile de propagare de la sursă la suprafață, însă deoarece efectele locale sunt independente de distanța parcursă de la sursă (în cazul în care nu se iau în considerare efectele nelineare) este indicat să se separe de efectele date de drum. Separând efectul de amplificare  $A(f)$  de cel de atenuare  $D(f)$ , ecuația efectelor locale de amplasament este următoarea:

$$G(f) = A(f)D(f)$$

Funcția de amplificare  $A(f)$ , de obicei, este în raport cu sursa. Funcția de diminuare  $D(f)$  este utilizată pentru modelarea pierderii de energie independentă de drumul parcurs de unda seismică (partea dependentă de cale este exprimată prin termenul exponențial din ecuația influenței mediilor de propagare). În metoda tratată în această lucrare nu se ține cont de efectul nelinearității.

Amplificarea  $A(f)$  poate fi calculată fie printr-un calcul ce ține cont de reflexia undelor, fi printr-un calcul aproximativ presupunând că amplificarea undelor este dată de rădăcina pătratică a raportului dintre impedența sursei și cea de la suprafață:

$$A(f(z)) = \sqrt{Z_s / \bar{Z}(f)}$$

$Z_s = \rho_s \beta_s$  - impedența seismică din apropierea sursei, unde  $\rho_s$ ,  $\beta_s$  sunt densitatea, respectiv viteza undelor seismice în apropierea sursei;

$$\bar{Z}(f) = \int_0^{t(z(f))} \rho(z)\beta(z)dt \bigg/ \int_0^{t(z(f))} dt$$

– media impedenței seismice în apropierea suprafeței, este o medie ponderată în funcție de timp pe o adâncime, de la suprafață, egală cu un sfert de lungime de undă;

$t(z(f))$  – timpul în care undele de forfecare ajung de la adâncimea  $z(f)$  până la suprafață;

$$f(z) = 1 / \left[ 4 \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz \right]$$

- adâncimea este o funcție de frecvență și este aleasă astfel încât  $z$  este un sfert din lungimea de undă a undelor seismice cu viteza medie  $\bar{\beta} = z(f) / \int_0^{z(f)} [1/\beta(z)] dz$

În practică, este mai ușor de folosit imepdanța seismică din apropierea suprafeței ca o funcție de adâncime:

$$\bar{Z}(f) = \int_0^{z(f)} \rho(z) dz \bigg/ \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz$$

simplificat avem  $\bar{Z}(f) = \bar{\rho}\bar{\beta}$ , unde

$$\bar{\rho} = \frac{1}{z(f)} \int_0^{z(f)} \rho(z) dz$$

$$\bar{\beta} = z(f) \left[ \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz \right]^{-1}$$

Atenuarea  $D(f)$  reprezintă pierderea independentă de cale a mișcării cu frecvență înaltă. Această pierdere poate fi datorită unui efect de sursă (Papageorgiou și Aki 1983B), ununui efect de condiții locale (Hanks 1982) sau unei combinații a acestor efecte. Astfel pentru modelarea diminuării efectelor se pot utiliza două filtre (care pot fi folosite separat sau combinat):

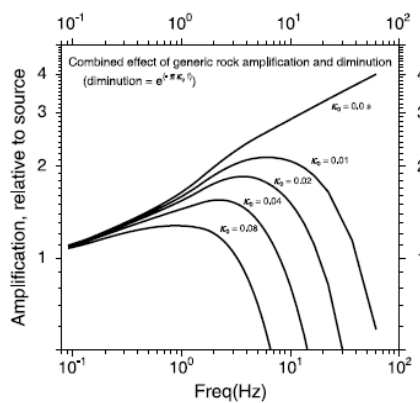
- filtrul  $f_{\max}$  (Hans 1982, Boore 1983)

$$D(f) = [1 + (f/f_{\max})^8]^{-1/2}$$

- filtrul  $k_0$  (Anderson și Hough 1984)

$$D(f) = \exp(-\pi k_0 f)$$

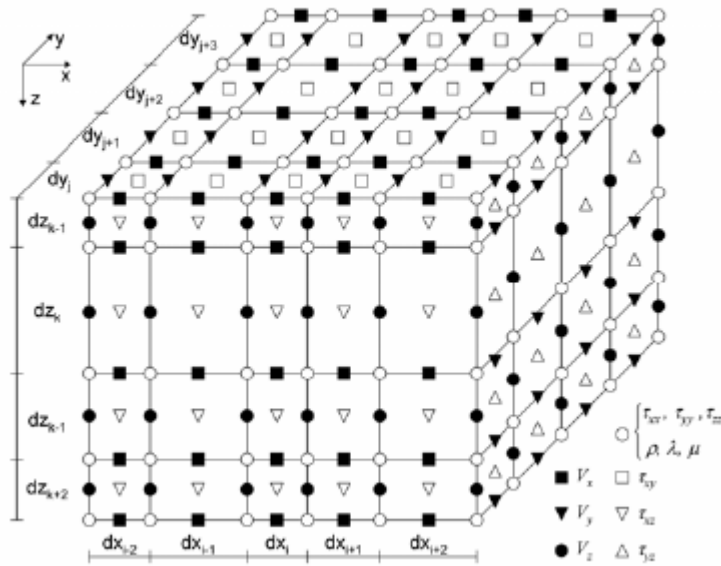
Un exemplu de efect combinat este prezentat în figura de mai jos (Boore și Joyner, 1997):



Figură 3. Efectul combinat al amplasamentului (luând în calcul atât amplificarea, cât și diminuarea) (Boore 2003)

#### 4. Modelare numerică. Simulări teoretice (3D).

Cea mai potrivită metodă de simulare a mișcărilor seismice de perioade lungi este metoda diferenței finite de ordinul patru cu variabile de grid spațial (Pitarka 1999) și factor de atenuare dependent de frecvență [Irikura and Miyake, Lecture Note]. Această metodă presupune construirea unui model de viteze 3D și determinarea parametrului optim de atenuare, unde rezultate fiind 3D.



Figură 4. Exemplu de grid spațial utilizat în simulările care utilizează metode numerice (Irikura and Miyake, Lecture Note)

Următorul set de ecuații descrie propagarea undelor 3D într-un mediu izotrop linear-elastic:

Ecuația pentru conservarea momentului:

$$\rho \partial_{tt} u_x = \partial_x \tau_{xx} + \partial_y \tau_{xy} + \partial_z \tau_{xz} + f_x,$$

$$\rho \partial_{tt} u_y = \partial_x \tau_{xy} + \partial_y \tau_{yy} + \partial_z \tau_{yz} + f_y,$$

$$\rho \partial_{tt} u_z = \partial_x \tau_{xz} + \partial_y \tau_{yz} + \partial_z \tau_{zz} + f_z.$$

Relații efort-deformații:

$$\tau_{xx} = (\lambda + 2\mu)\partial_x u_x + \lambda(\partial_y u_y + \partial_z u_z),$$

$$\tau_{yy} = (\lambda + 2\mu)\partial_y u_y + \lambda(\partial_x u_x + \partial_z u_z),$$

$$\tau_{zz} = (\lambda + 2\mu)\partial_z u_z + \lambda(\partial_x u_x + \partial_y u_y),$$

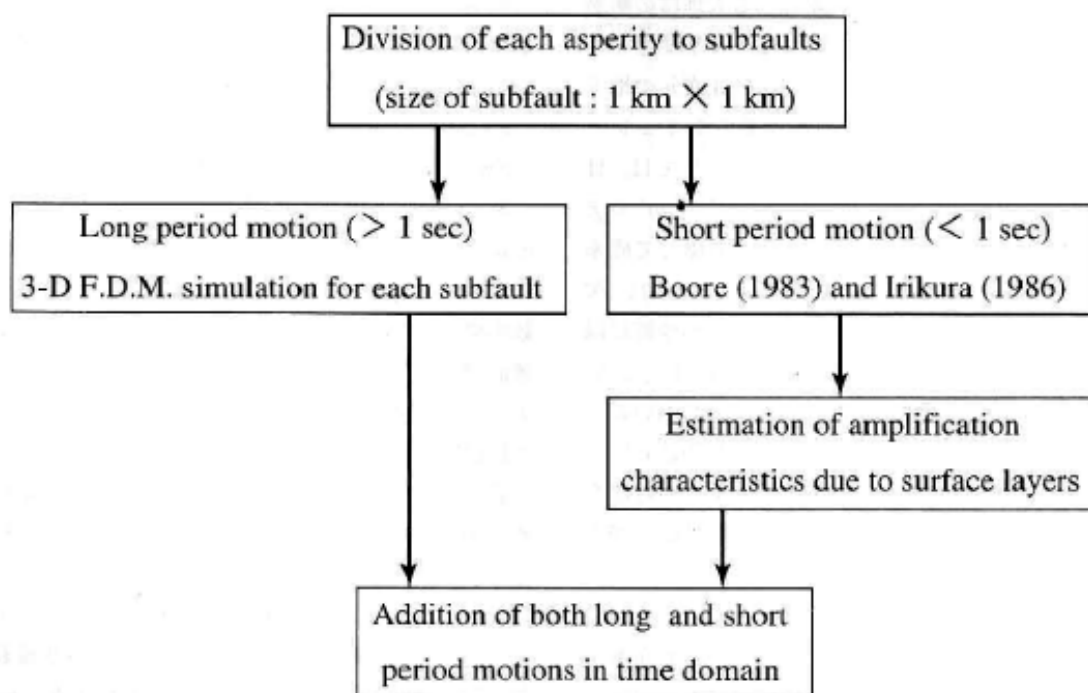
$$\tau_{xy} = \mu(\partial_y u_x + \partial_x u_y),$$

$$\tau_{xz} = \mu(\partial_z u_x + \partial_x u_z),$$

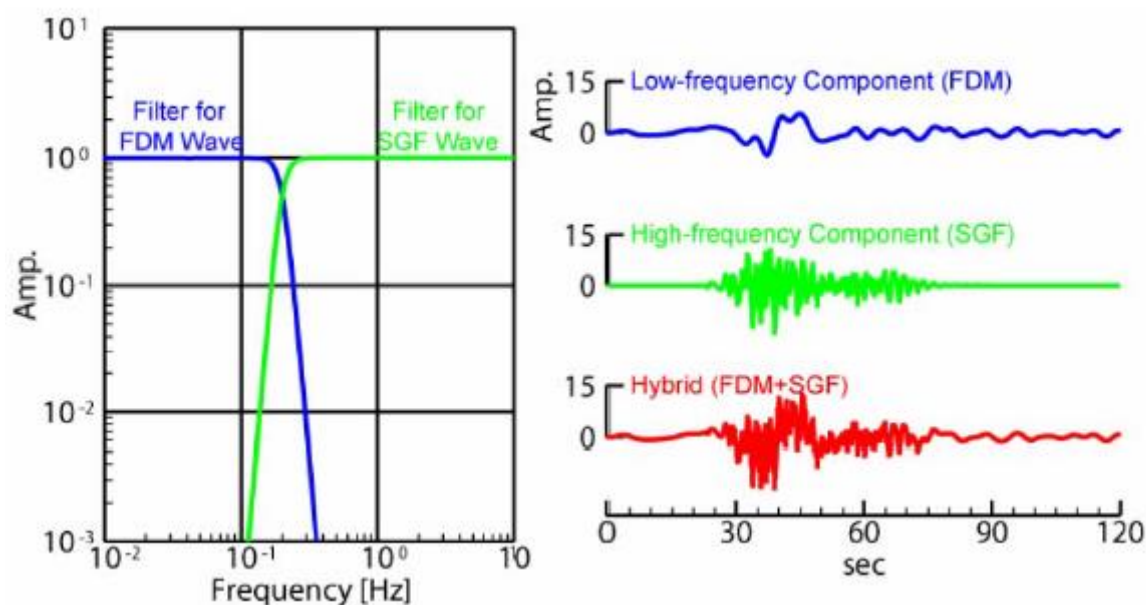
$$\tau_{yz} = \mu(\partial_z u_y + \partial_y u_z).$$

## 5. Metode hibride

Simularea mișcării seismice produse de un eveniment mare în apropierea sursei are o acuratețe bună dacă există o cunoaștere detaliată despre distribuția alunecării de-a lungul faliei și despre configurația geologică a structurii pământurilor străbătute de undă de la sursă la suprafață. Astfel au fost dezvoltate metode hibrid de simulare care combină metoda stochastică cu cea deterministă. Astfel mișcările de perioadă lungă date de un cutremur mare pot fi simulate prin metode deterministe, iar mișcările de perioade scurte pot fi simulate utilizând fie metode stochastice (ex. Boore 2003) potrivite cutremurelor mici, fie utilizând funcțiile empirice Green (ex. Irikura 1986) potrivite cutremurelor mari. Mișcarea seismică simulată rezultând din însumarea mișcărilor de perioadă lungă și mișcărilor de perioadă scurtă după filtrarea acestora.



Figură 5. Metoda hibrid de simulare a mișcării seismice pentru cutremurele mari (Irikura and Miyake, Lecture Note)



Figură 6. Exemple de filtre utilizate în metoda hibrid și exemplu de simulare a unui cutremur mare (Morikawa et al., 2006)

## **6. Simularea seismului vrâncean de adâncime intermediară din 27 octombrie 2004. Interpretarea rezultatelor.**

### **6.1. Caracteristici seism**

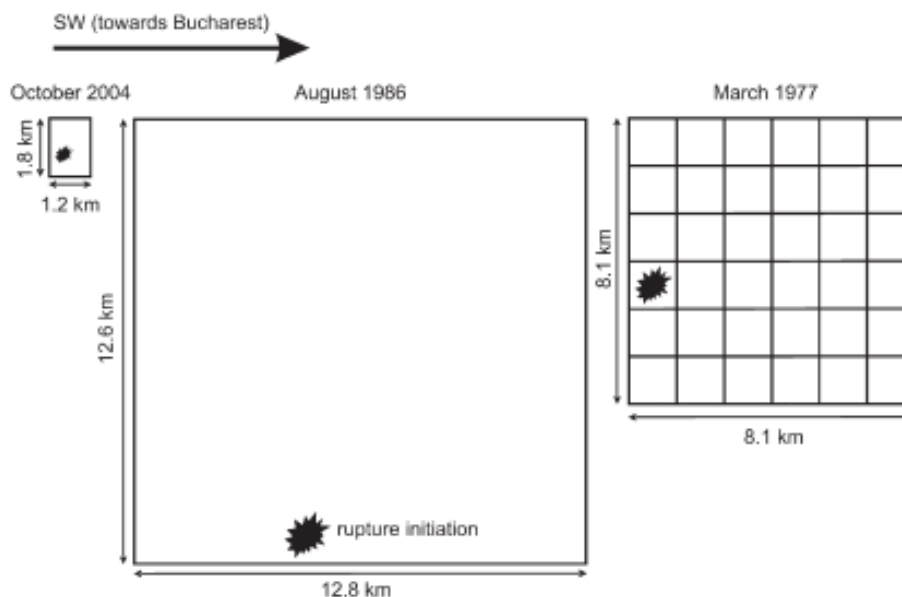
Sursa seismică Vrancea este caracterizată de un fenomen de rupere de tip falie inversă (Radulian et.al., 2000). Mecanismul de focar este dat de fenomenul de împingere ce generează compresiune pe orizontală și întindere pe verticală (Constantinescu și Enescu 1964). Focarul cutremurelor vrâncene este un focar de volum mic și adâncime intermediară, aceste caracteristici fiind date de faptul că razele de la toate hipocentrele la o stație sunt aproximativ egale și cea mai mică distanță hipocentrală este de 90 km. O altă proprietate a focarului este neomogenitatea laterală a sursei datorită geometriei acesteia.

Cutremurele vrâncene intermediare se produc în interiorul unui bloc litosferic provenit dintr-o placă tectonică veche ce a fost într-un proces de subducție cu milioane de ani în urmă. Conform unor modele geodinamice segmentul de placă este considerat a fi într-un proces de desprindere, acesta fiind fie desprins parțial, într-un proces de scufundare în atenosferă (Sperner et al., 2004), fie desprins total (Girbacea și Frish, 1998; Wortel și Spakman, 2000). Corpul seismic (slab-ul) este acționat din mai multe direcții de subplăcile convergente în zona de Curbură a Carpaților, acest lucru determină apariția unor stări de eforturi în interiorul slab-ului, considerat a fi întins pe direcție verticală, comprimat orizontal, iar în anumite studii este considerat a suferi o ușoară răsucire.

În interiorul blocului litosferic subdus se găsesc zone de minimă rezistență numite asperități sau perili (Constantinescu și Enescu 1964) care au apărut în decursul procesului de subducție. Stabilitatea și persistența în timp a mecanismului de focar al cutremurelor vrâncene este dată de orientarea asperităților cu alungiri pe direcția NE-SV. În funcție de dimensiunea asperității de rupere și volumul litosferic în care s-a acumulat tensiunea de compresiune (stress-ul), ruperea primei asperități generează succesiv noi ruperi de asperități, în cascadă, până când se atinge limita volumului de litosferă în care s-au acumulat tensiunile de compresiune. Practic asperitățile sunt concentratori de tensiune, iar mecanismul de rupere a acestora determină caracterul de multișoc al cutremurelor vrâncene.

Cantitatea totală de energie eliberată de cutremurele intermediare vrâncene este comparabilă cu cea a întregii Californii de sud (Wenzel et al., 1998).

Cutremurul din 27 octombrie 2004 face parte din categoria cutremurelor mijlocii având o magnitudine moment de 5,8 la o adâncime de focar de 99km (conform Oth et al. 2007) sau 105km (conform Văcăreanu et al. 2014). Epicentrul acestui cutremur fiind la 45,78° latitudine N și 26,73° longitudine E (conform Oth et al. 2007) sau la 45,78° latitudine N și 26,73° longitudine E (conform Văcăreanu et al. 2014). Dimensiunea faliei seismice conform Oth et al. 2007 a fost de 1,2x 1,8km, iar căderea de tensiune a fost de 75bari (conform Ganas et al. 2010). Din punct de vedere al mecanismului de focar conform Ganas et al. 2010 cutremurul a fost produs printr-un unghi de rupere (strike) de 219°, înclinația faliei fiind de 81° (dip), cu o orientare a mișcării faliei atârnată de 107° (rake).



Figură 7. Mărimea faliilor cutremurelor din 27 octombrie 2004, 30 august 1986 și 4 martie 1977 (Oth et al., 2007)

S-au realizat simulări pentru cutremurul subcrustal vrancean din 27 octombrie 2004 utilizându-se programul SMSIM realizat de D.Boore.

## 6.2. Primul set de simulări

### Date de intrare

Pentru viteza medie a undelor de forfecare  $\beta_s$  și densitatea  $\rho$  din apropierea sursei, în literatura de specialitate, se vehiculează mai multe variante, astfel Martin et al. (2006) propune  $\beta_s = 4,5$  km/s și densitatea  $\rho = 3,2$  g/cm<sup>3</sup>, iar Sokolov (2008) propune  $\beta_s = 3,8$  km/s și densitatea  $\rho = 2,8$  g/cm<sup>3</sup>. În simulare s-a considerat viteza medie undelor de forfecare  $\beta_s = 4,5$  km/s, iar densitatea  $\rho = 2,8$  g/cm<sup>3</sup>, valori între cele două variante propuse.

Pentru constanta  $C = \langle R_{\theta\phi} \rangle VF / (4\pi\rho_s\beta_s^3 R_0)$ , s-au considerat următoarele valori:

$\langle R_{\theta\phi} \rangle$  – distribuția radiației este 0.6 (tiparul mediu de radiație) conform Oth et al. (2008)

V - componenta orizontală a energiei totale a undelor de forfecare dată de descompunerea pe două direcții ( $= 1/\sqrt{2}$ );

F - efectul suprafeței libere este 2;

$R_0$  - distanță de referință se ia 1 km

Din punct de vedere al sursei s-au realizat simulări pentru 3 tipuri de spectre pentru sursă: Sursa cu o singura frecvență de colț (S1) și cu două frecvențe de colț cu spectru aditivă

(S11) și multiplicativă (S12). Folosind modelele (conform tabelului nr....) BC92 pentru Sursa 1 (Boatwright and Choy 1992), H96 pentru Sursa 11 (Haddon 1996) și AB95 pentru sursa 12 (Atkinson and Boore 1995). Frecvența de colț fiind definită conform Gusev et al. 2002 în funcție de magnitudine prin relația:  $M_w = -2\log(f_c) + 4.84$ .

Pentru calculul împrăștierii și atenuării Pavel și Văcăreanu (2015) au modelat prin regresii spectrele de amplitudină Fourier din amplasamentele în care condițiile de sol erau de clasa B sau C (conform EN 1998-1:2004) pentru terenuri de clasă A. Pentru cutremurele cu magnitudini mai mari de 6.9 au observat o potrivire bună a împrăștierii, pentru frecvențe lungi și medii, de forma  $1/R^{0.5}$ , unde  $R = \sqrt{D^2 + h^2}$ . Astfel  $Z(R)$  – funcția de împrăștiere dată de următoarea ecuație:

$$Z(R) = (1/R)^{0.5}$$

Pentru distanța hipocentrală au fost realizate câte două seturi de simulări, unul pentru unde  $D = 154\text{km}$  (distanța epicentrală față de București),  $h = 99\text{ km}$ , adică  $R = 183\text{ km}$  și altul pentru  $R_{\text{eff}} = 188\text{km}$  distanța efectivă care ia în calcul geometria faliei (rezultat în urma folosirii executabilului reff.exe din cadrul setului de programe SMSIM). Distanța efectivă rezultă din rezolvarea ecuației:

$$G(R_{\text{EFF}}) \exp(-\pi f_Q R_{\text{EFF}} / Q(f_Q) V_s) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{G(R_i) \exp(-\pi f R_i / Q(f) V_s)\}^2 \right]^{1/2}$$

unde  $G(R)$  este împrăștierea geometrică,  $R_i$  este distanța hipocentrală a fiecărei subfalii,  $Q(f)$  este atenuarea,  $f_Q$  este frecvența de referință (de obicei 10Hz), iar  $V_s$  viteza undelor seismice de forfecare. Conform Boore 2009 utilizarea distanței efective în simulările realizate în SMSIM (program de simulare stohastică pentru surse punctuale realizat de Boore) se ia în calcul geometria faliei și rezultatele sunt apropiate de cele date de EXSIM (program de simulare stohastică pentru surse de tip falie realizat de Motazedian și Atkinson) dacă se folosește sursa pulsată 50%.

Benetatos et al. 2003 definește împrăștierea geometrică ca  $1/R$  pentru  $R < 100\text{km}$  și  $1/R^{0.5}$  pentru  $R > 100\text{km}$ , distanța de referință fiind  $R_0 = 1\text{km}$ , iar Oth et al. 2008 o definește ca  $R_0/R$ , distanța de referință fiind  $R_0 = 90\text{km}$ .

În aceste seturi de simulări împrăștierea geometrică a fost considerată conform Pavel și Văcăreanu 2015.

În ceea ce privește atenuarea, în aceeași lucrare menționată anterior Pavel și Văcăreanu (2015) au determinat-o ca având forma  $Q(f) = 100 \times f^{1.20}$  (formă folosită în simularea realizată). În urma analizei atenuării undelor seismice, Oth (2007) a găsit forma ecuației de atenuare  $Q(f) = 100 \times f^{0.80}$ , Măndrescu et al. (1993) o definește ca  $Q(f) = 109 \times f^{0.81}$ , iar în Pavel 2015 poate fi găsită ca  $Q(f) = 165 \times f^{1.20}$ . Pentru simulări s-a considerat atenuarea din lucrarea lui Pavel și Văcăreanu (2015).

Pentru modelarea diminuării efectelor se pot utiliza două filtre (care pot fi folosite separat sau combinat):

- filtrul  $f_{\max}$

$$D(f) = [1 + (f/f_{\max})^8]^{-1/2}$$

- filtrul  $k_0$

$$D(f) = \exp(-\pi k_0 f)$$

A fost observată o dependență semnificativă a parametrului de magnitudinea cutremurelor și de condițiile locale de amplasament (Radulian et al. 2000). De exemplu, pentru zona Bucureștiului valoarea medie  $k_0$  are o valoare relativ mare 0.071, în zona Moldovei valoarea medie  $k_0$  este de 0.057, iar în zona epicentrală  $k_0$  are o valoare medie de 0.101.

Pentru aplicație valorile parametrului kappa au fost considerate cele din lucrarea lui Pavel și Văcăreanu (2015) care au folosit metoda de estimare propusă de Anderson și Housh (1984). Parametrul degradării spectrale kappa a fost calculat folosind înregistrările provenite din timpul a nouă cutremure vrâncene înregistrate de 57 de stații seismice, iar metoda presupune potrivirea lineară între două frecvențe  $f_E$  și  $f_{\max}$  ale spectrului Fourier de amplitudini al undelor S. Valoarea finală a parametrului kappa este dată de următoarea ecuație  $k = k_{event} + k_0$ , unde  $k_{event} = 0.022M_w - 0.127$ .

Un alt studiu, realizat de Sokolov et al. (2008), furnizează o relație pentru parametrul kappa de forma  $k = 0.01M_w$ . Astfel, pentru aplicația din această lucrare  $k = 0.074$ .

Durata surselor a fost considerată conform Boore 2003, iar durata dependentă de cale a fost considerată 0,0868 conform Pavel 2015.

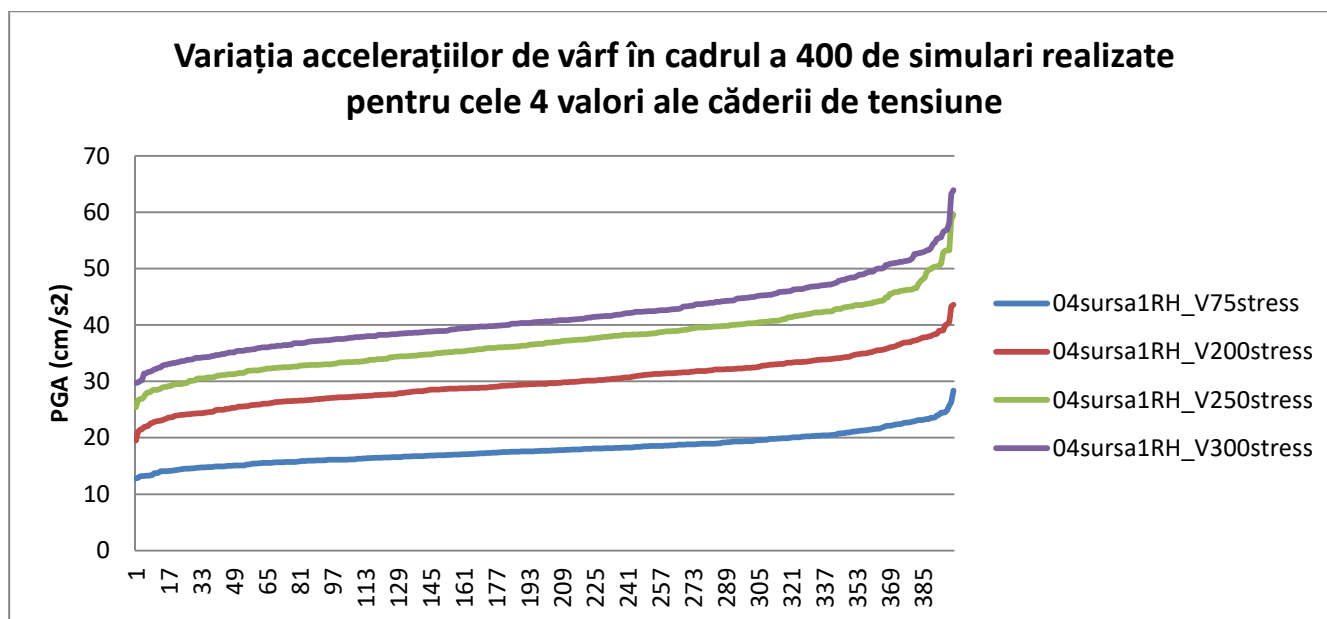
Din punct de vedere al amplificării condițiilor de amplasament în simulări au fost folosite două profile de amplificări, unul rezultat din calculul realizat cu programul NRATTLE din setul de programe SMSIM pentru profilul undelor de forfecare pentru amplasamentul INCERC București Constantinescu și Enescu (1985), iar cel de-al doilea este un profil de amplificări (conform Pavel 2015) rezultat din metoda H/V.

#### **Parametru modificat (de calibrare)**

Pornind de la premisa că în simulările realizate de Boore, Pavel și Văcăreanu 2015, Oth 2007, Sokolov 2008 parametrul de cădere de tensiune a fost ales mai mare decât putea fi găsit în lucrările de specialitate (de exemplu pentru cutremurele din 1977, 1986 – Ganas et al. 2010, Oncescu și Bonjer 1997), parametrul de cădere de tensiune a fost modificat de la 75 bari la 300 bari să realizeze 4 seturi a câte 400 de simulări pentru Sursa 1, profilul de amplificări H/V. S-a obținut o medie aritmetică a accelerației de vârf de tip de simulare ce variază între 17,97 cm/s<sup>2</sup> și 41,92 cm/s<sup>2</sup> conform tabelului de mai jos.

| Tip Simulare          | Medie aritmetică | Medie geometrică |
|-----------------------|------------------|------------------|
| 04sursa1RH_V75stress  | 17,97            | 17,79            |
| 04sursa1RH_V200stress | 29,96            | 29,69            |
| 04sursa1RH_V250stress | 37,27            | 36,90            |
| 04sursa1RH_V300stress | 41,49            | 41,10            |

Tabel 2 Mediile accelerațiilor de vârf pentru diferite valori ale căderii de tensiune

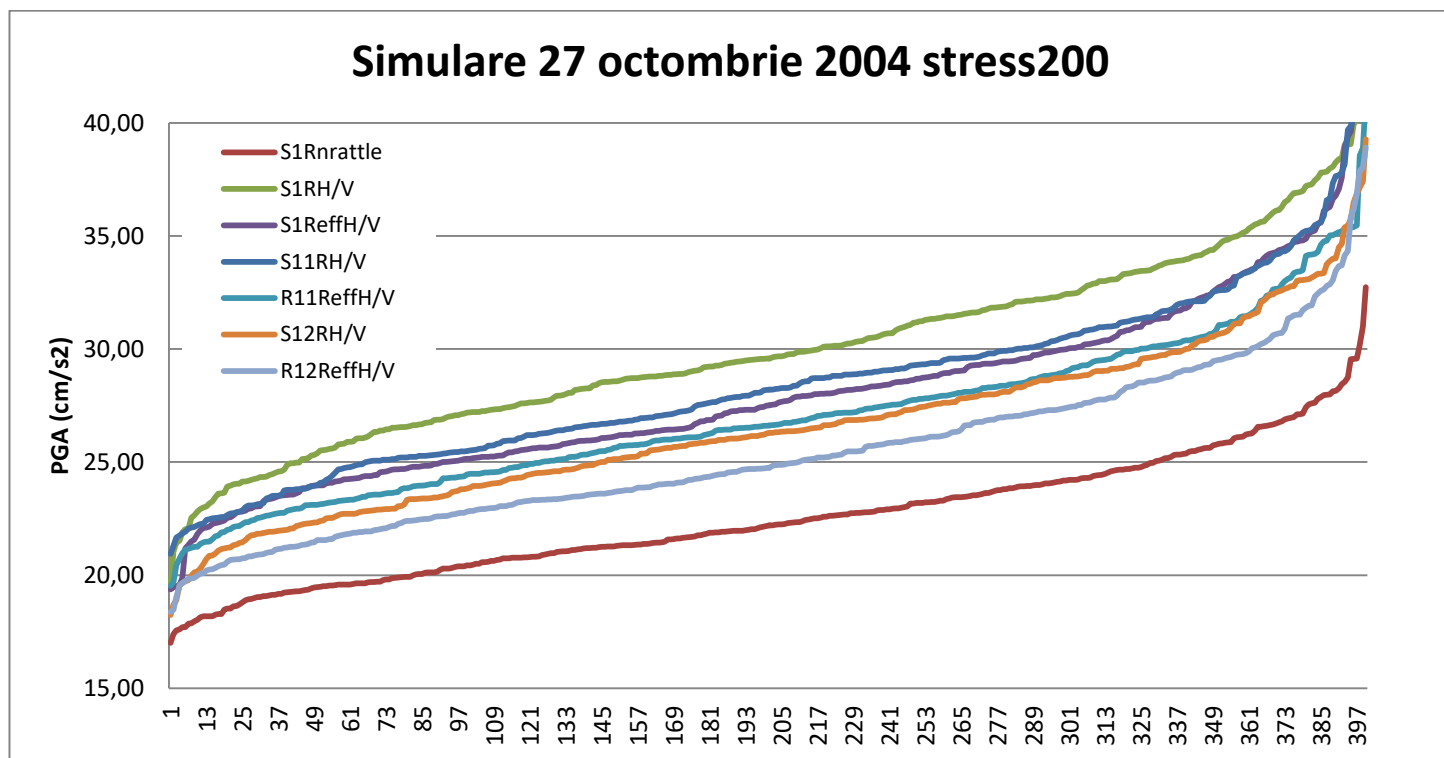


Figură 8. Variația accelerațiilor de vârf în cadrul a 400 de simulări realizate pentru cele 4 valori ale căderii de tensiune

### Interpretarea rezultatelor

Stabilind parametrul de tensiune la 200 bari s-au realizat simulări pentru cele 3 tipuri de sursă, câte două distanțe sursă-stație (una geometrică 183 km, iar cealaltă de referință de 188 km care ia în calcul geometria faliei) și pentru sursa S1 două tipuri de amplificări ale condițiilor locale de teren (rezultate din NRATTLE și profilul H/V).

Din seturile de 400 de simulări a fost analizată câte o accelerograma cu cea mai apropiată valoare PGA media setului de simulări.



Figură 9. Variația accelerațiilor de vârf în cadrul a 400 de simulări realizate pentru cele 3 tipuri de sursă a câte 2 tipuri de amplificare locală

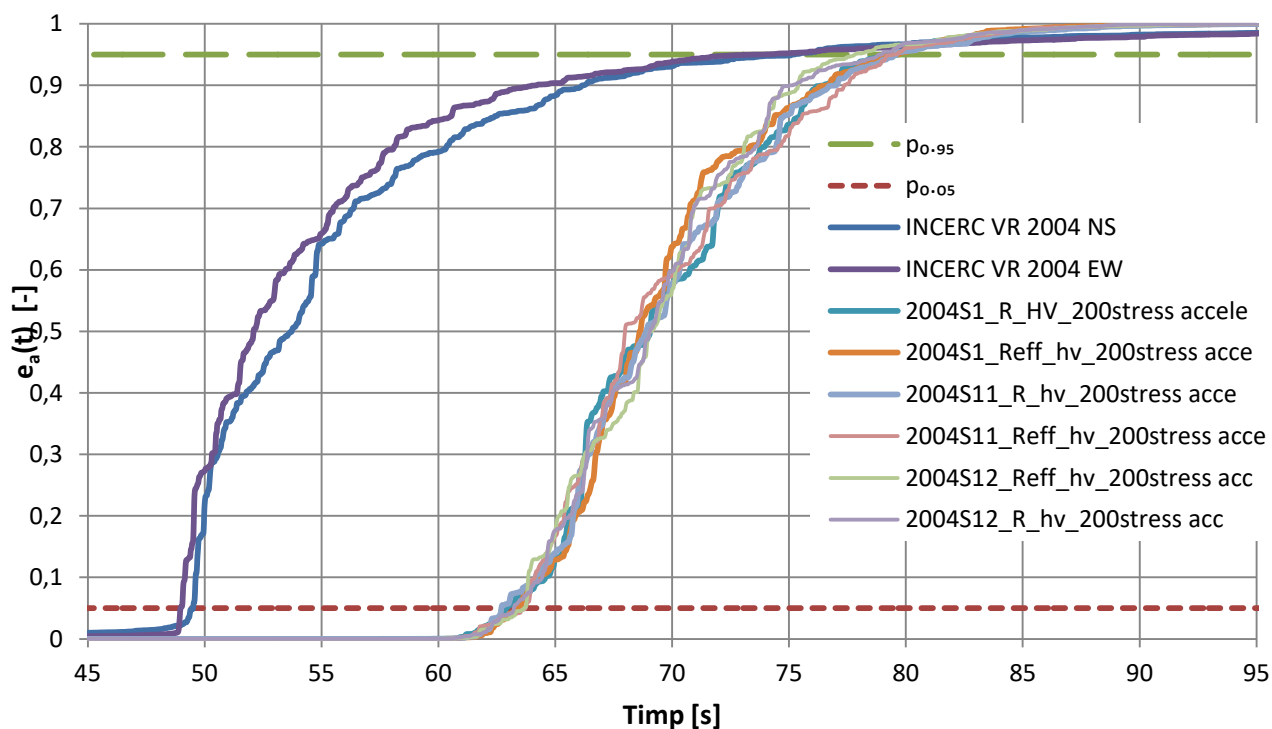
| Tipul accelerogramei | Durata semnificativă | Rădăcina medie pătratică | PGA (cm/s <sup>2</sup> ) | Durață sursă | Durață cale | Durață totală | fa    | fb    | Obs.                     |
|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------|---------------|-------|-------|--------------------------|
| Vrancea 2004 NS      | 21,39                | 3,8                      | 30,01                    |              |             |               | 0,35  | 0,35  | *f0 cf. Gusev et al 2002 |
| Vrancea 2004 EW      | 20,92                | 3,4                      | 29,72                    |              |             |               | 0,35  | 0,35  |                          |
| Sursa1 R H/V         | 16,73                | 7,8                      | 30,65                    | 1,37         | 15,8        | 17,26         | 0,726 | 0,726 | fa=fb=f0                 |
| Sursa1 Reff H/V      | 17,1                 | 8,1                      | 28,36                    | 1,37         | 16,31       | 17,69         | 0,726 | 0,726 |                          |
| Sursa1 R nrrattle    | 15,93                | 5,9                      | 22,59                    | 1,37         | 15,88       | 17,26         | 0,726 | 0,726 |                          |
| Sursa11 R H/V        | 15,89                | 8,3                      | 28,75                    | 2,22         | 15,88       | 18,11         | 0,25  | 2,09  |                          |
| Sursa11 Reff H/V     | 15,79                | 8,7                      | 27,1                     | 2,22         | 16,31       | 18,54         | 0,25  | 2,09  |                          |
| Sursa12 R H/V        | 16                   | 7,9                      | 26,93                    | 1,32         | 15,88       | 17,21         | 0,5   | 1,52  |                          |
| Sursa12 Reff H/V     | 14                   | 7,4                      | 25,42                    | 1,32         | 16,31       | 17,64         | 0,5   | 1,5   |                          |

Tabel 3. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 pentru o cădere de tensiune de 200 bari

#### Concluzii:

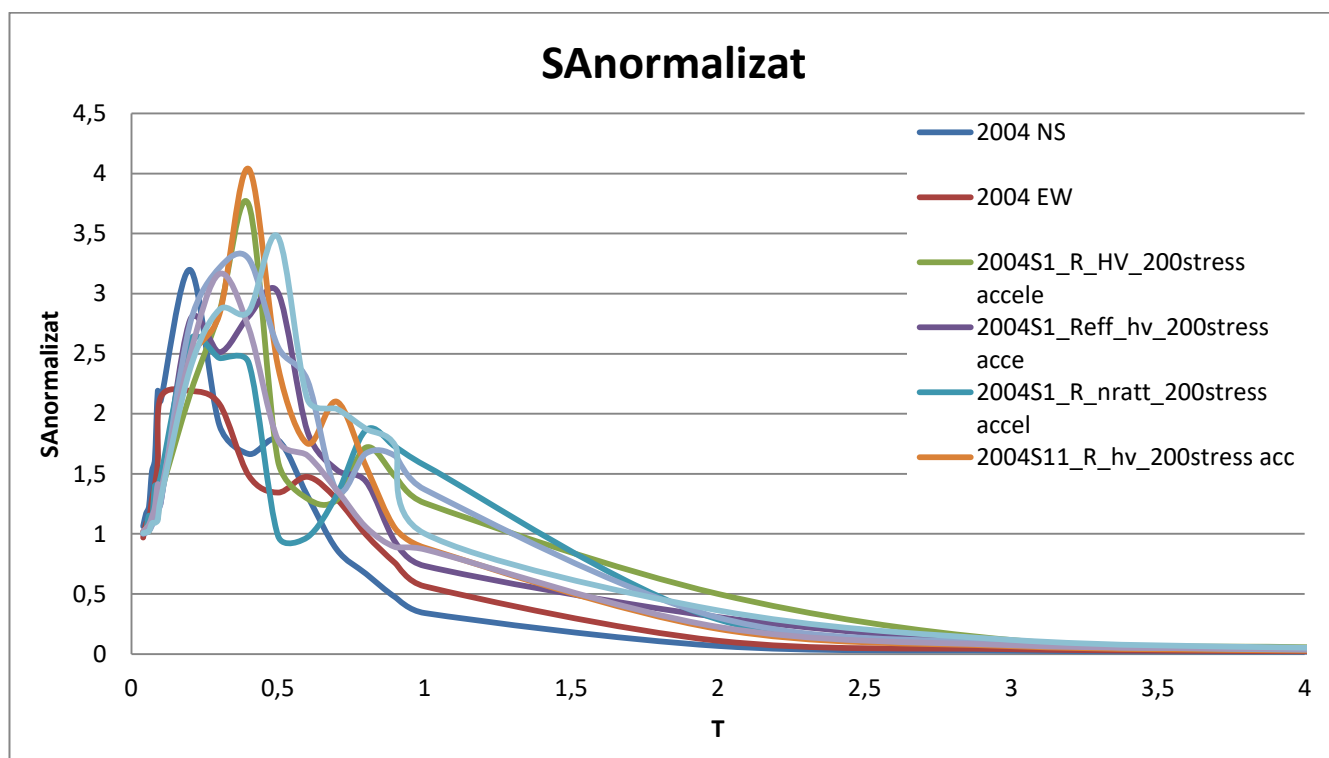
1. Din punct de vedere al amplificării date de condițiile locale se poate observa o scădere a valorilor de vârf a simulărilor de aproximativ 1,35 de ori între profilul de amplificare H/V și nrrattle.

2. Utilizarea distanței de referință duce la o scădere a accelerațiilor de vârf în medie cu 2,3 cm/s<sup>2</sup> pentru sursa 1 și cu 1,6 cm/s<sup>2</sup> pentru sursele 11 și 12 față de simulările în care s-a utilizat distanța hipocentrală.
3. Durata semnificativă a seismului înregistrat în 2004 este în medie cu aproximativ 4 secunde mai mare decât durata simulărilor.
4. Se poate observa că accelerația medie pătratică (parametru ce măsoară efectele amplitudinii și conținutului de frecvență) este de aproximativ 2,2 ori mai mare pentru simulările realizate utilizând profilul de amplificare H/V, iar pentru simularea realizată cu profilul de amplificare nrattle este de aproximativ 1,6 ori mai mare (diferența se poate explica prin diferența mare între accelerațiile de vârf).
5. Energia seismului se eliberează mai rapid și mai brusc prin accelerogramele simulate decât prin accelerogramele reale.

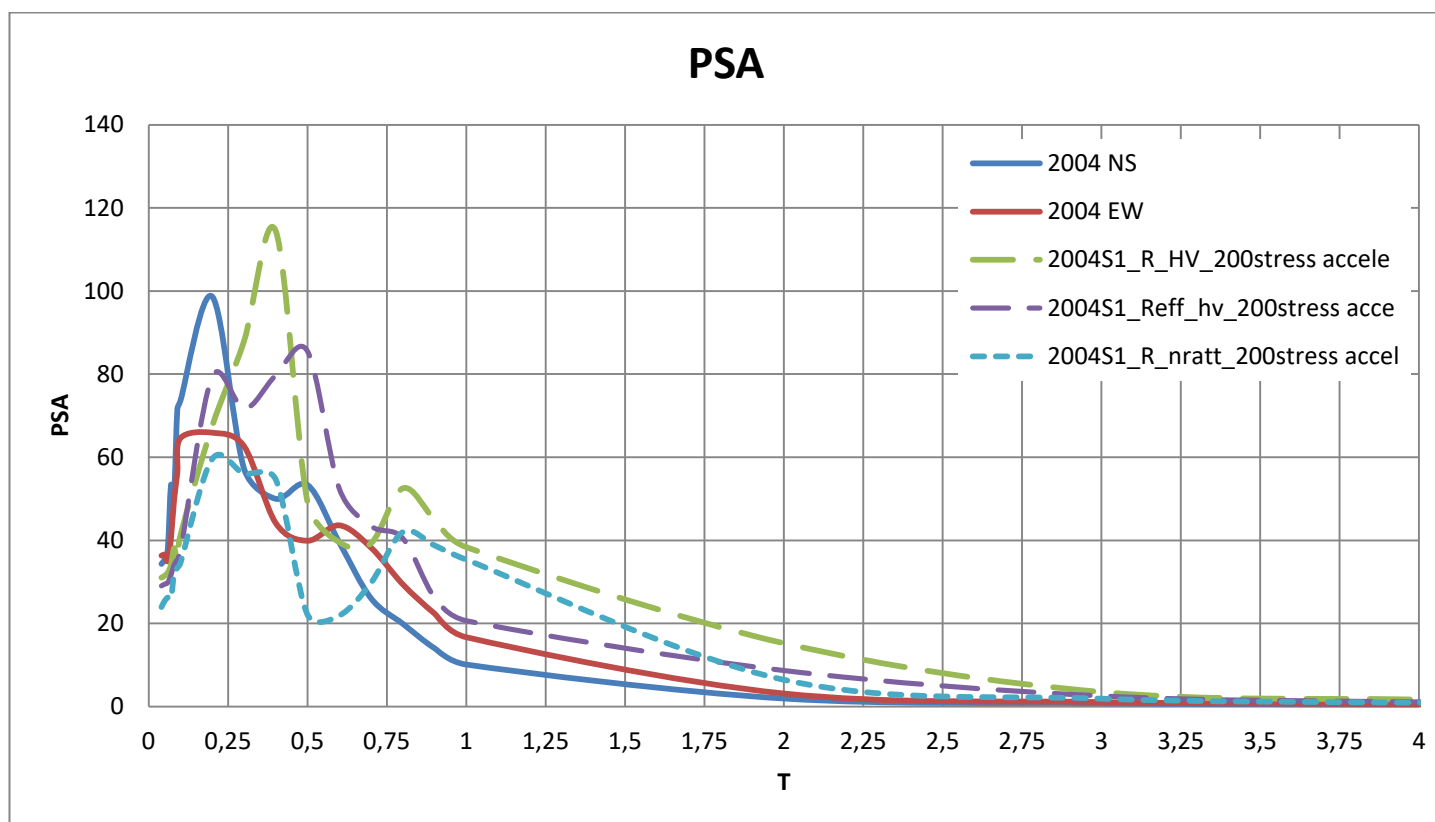


Figură 10. Energiile cumulate ale simulărilor și înregistrărilor reale

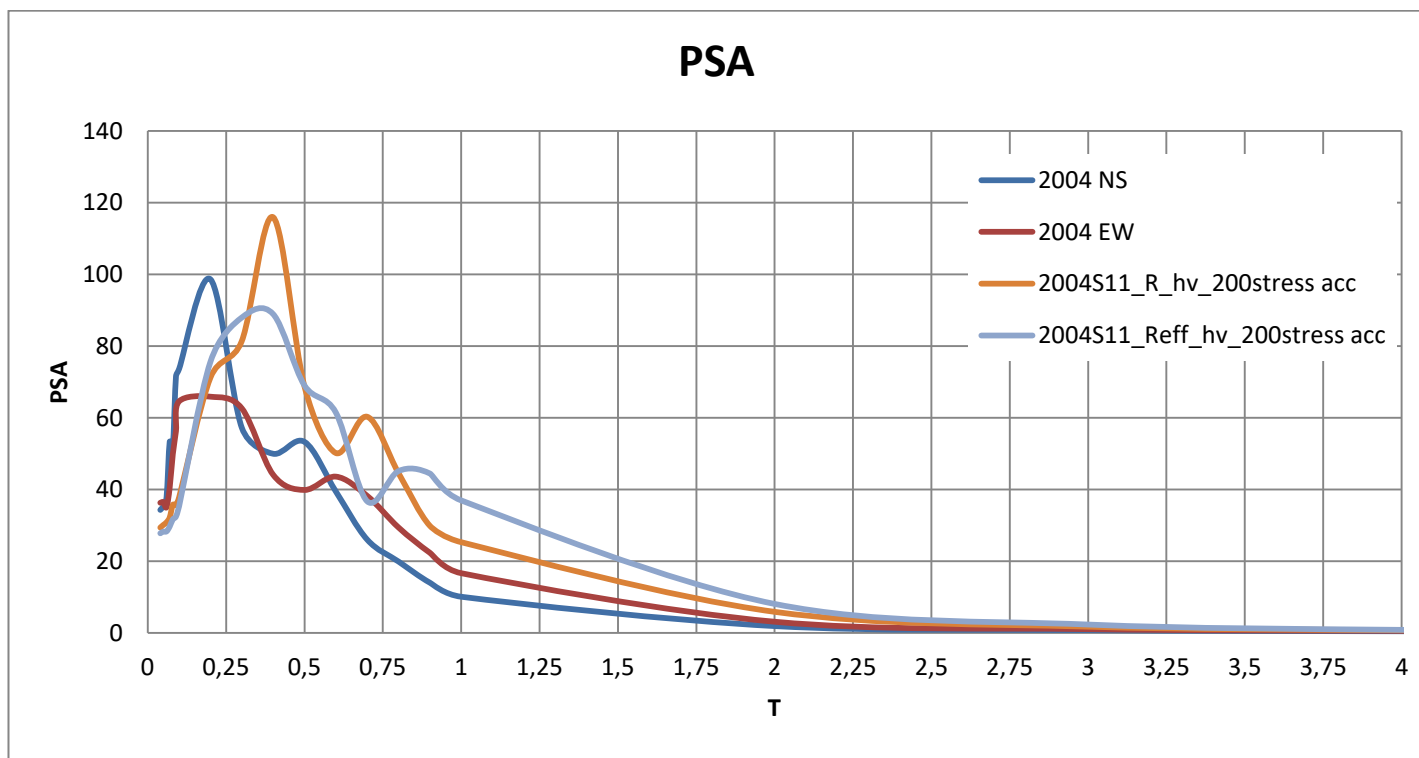
6. Se poate observa că nici o simulare nu reușește să surprindă amplificările date de cutremurul din 2004 pentru perioade mai mici de 0,25s (frecvențe mai mari de 4Hz).



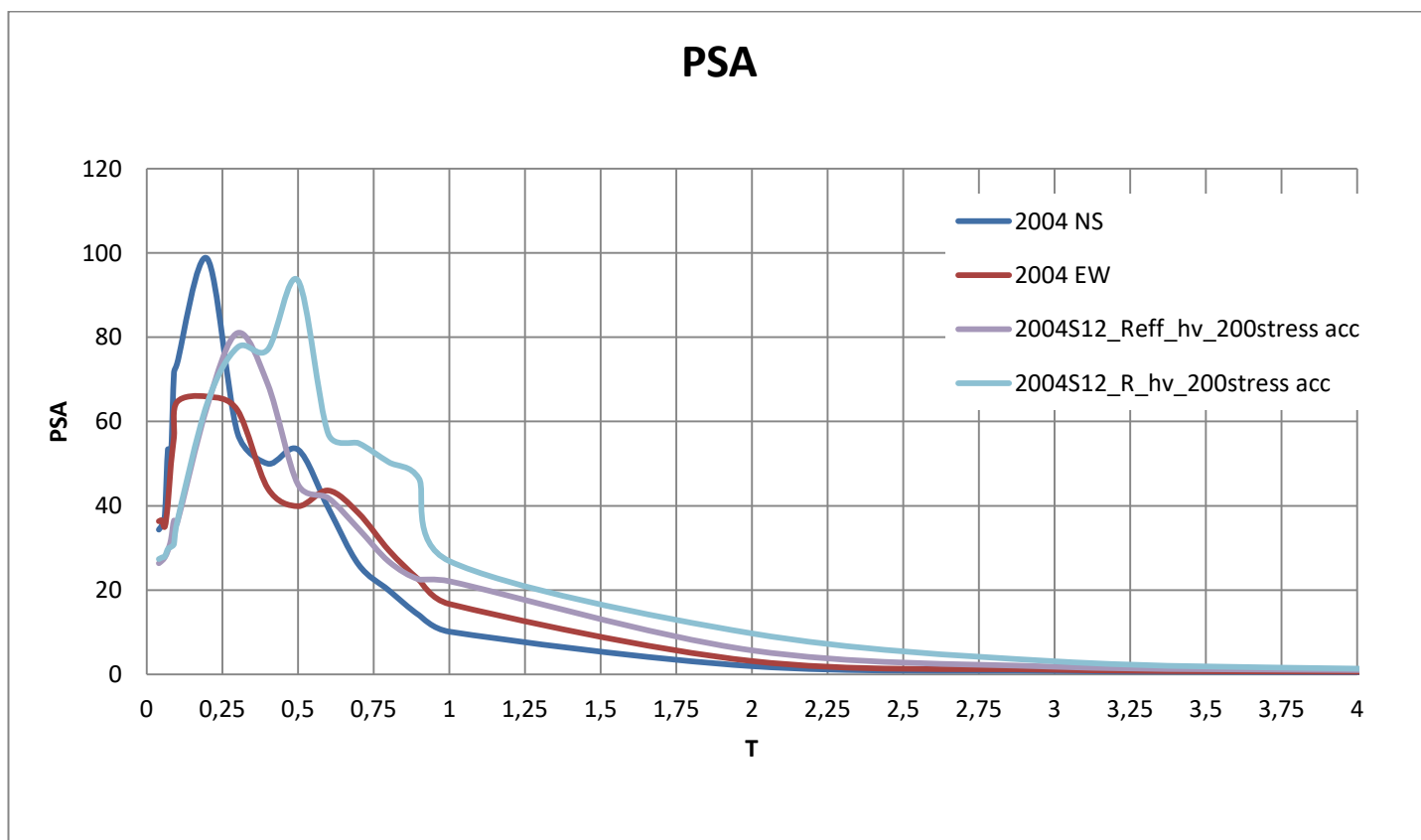
Figură 11. Comparare între spectrele normalizate de răspuns ale simulărilor și cutremurului din 27 octombrie 2004



Figură 12. Comparare între spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu sursa S1 și cutremurului din 27 octombrie 2004



Figură 13. Comparație între spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu sursa S11 și cutremurului din 27 octombrie 2004



Figură 14. Comparație între spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu sursa S12 și cutremurului din 27 octombrie 2004

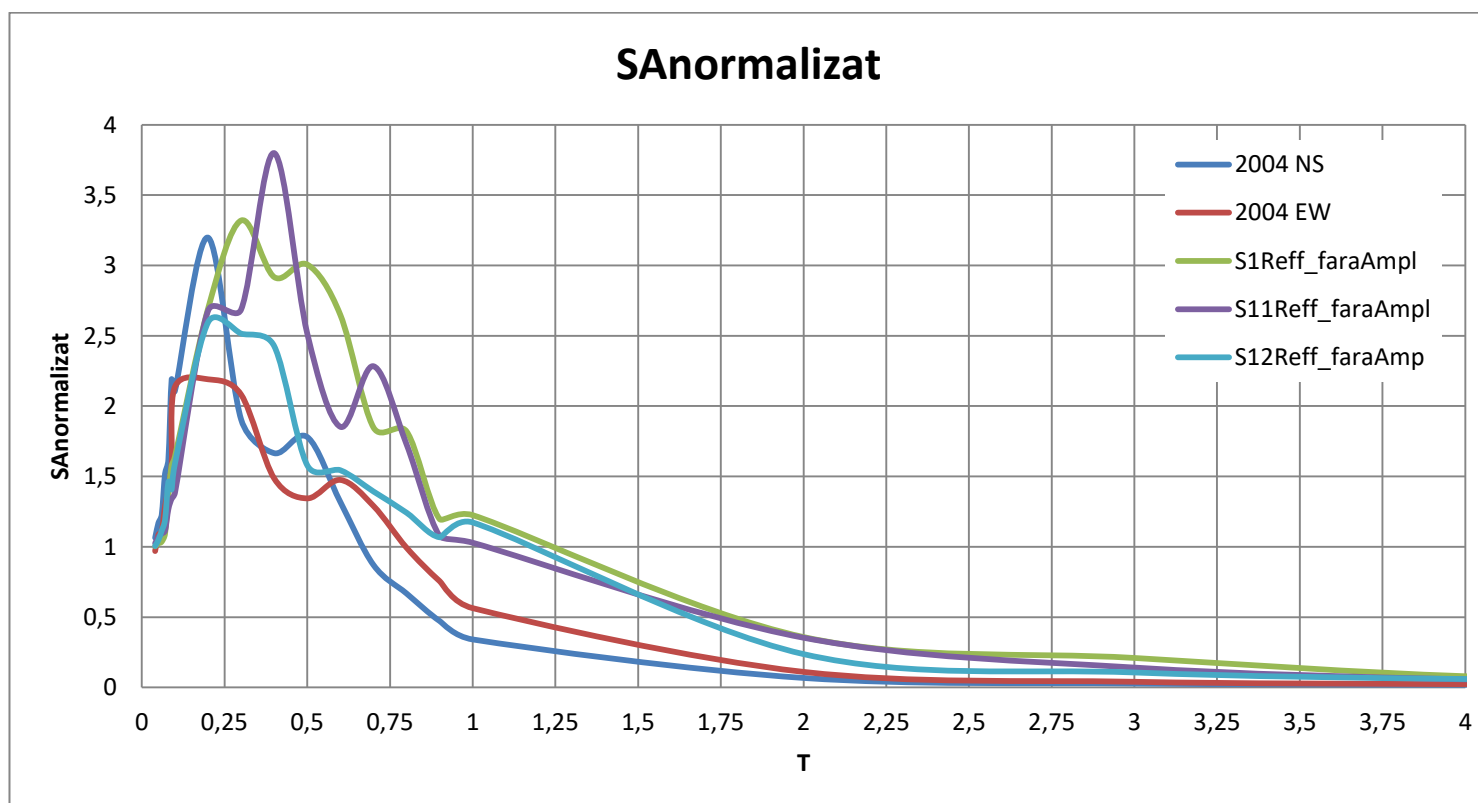
7. Simulările în care s-a utilizat distanța de referință amplificările maxime tind să surprindă un vârf pentru perioade de 0,20s (S1) – 0,3 s (S11, S12). De asemenea, pentru sursele cu două frecvențe de colț la perioade mai mari amplificarea are o diminuare mai apropiată de realitate.

### 6.3. Al doilea set de simulări

Pentru a observa mai ușor modificările conținutului de frecvențe al simulărilor am realizat cel de-al doilea set de simulări fără amplificarea dată de condițiile locale de teren, pentru distanța de referință de 188km.

Concluzii:

1. Mediile aritmetice ale accelerațiilor de vârf pe cele 400 de simulări pentru fiecare tip de sursă sunt 7,50cm/s<sup>2</sup> pentru S1, 8,08 cm/s<sup>2</sup> pentru S11 și 6,10 cm/s<sup>2</sup> pentru S12. Amplificările date de condițiile locale de teren cresc amplitudinile mișcărilor de 3,5-4 ori.
2. Rămâne tendința de diminuare a accelerațiilor de vârf a sursei 12 (Spectru aditiv).



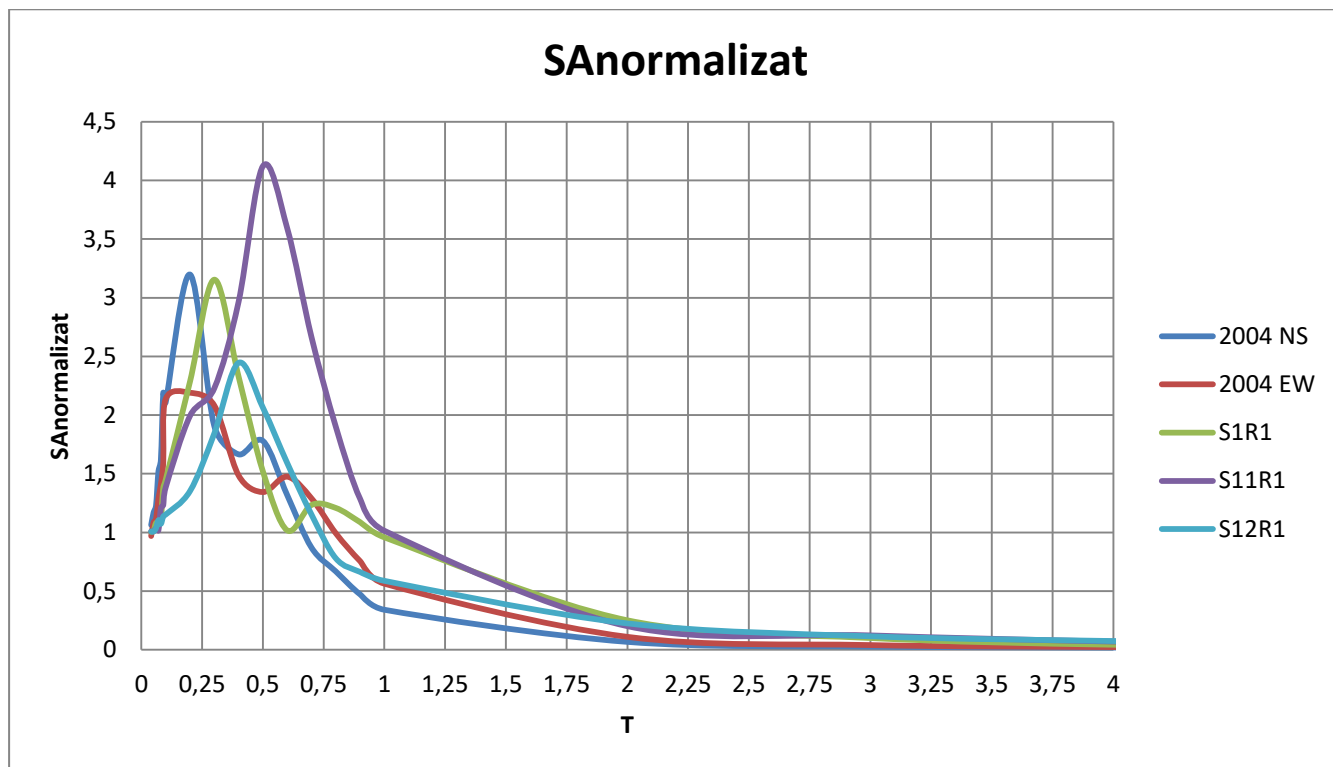
Figură 15. Comparare între spectrele normalizate de răspuns ale simulărilor realizate fără influența condițiilor locale de teren și cutremurului din 27 octombrie 2004

3. După cum era de așteptat conținutul de frecvență nu este modificat de amplificarea condițiilor locale de teren.

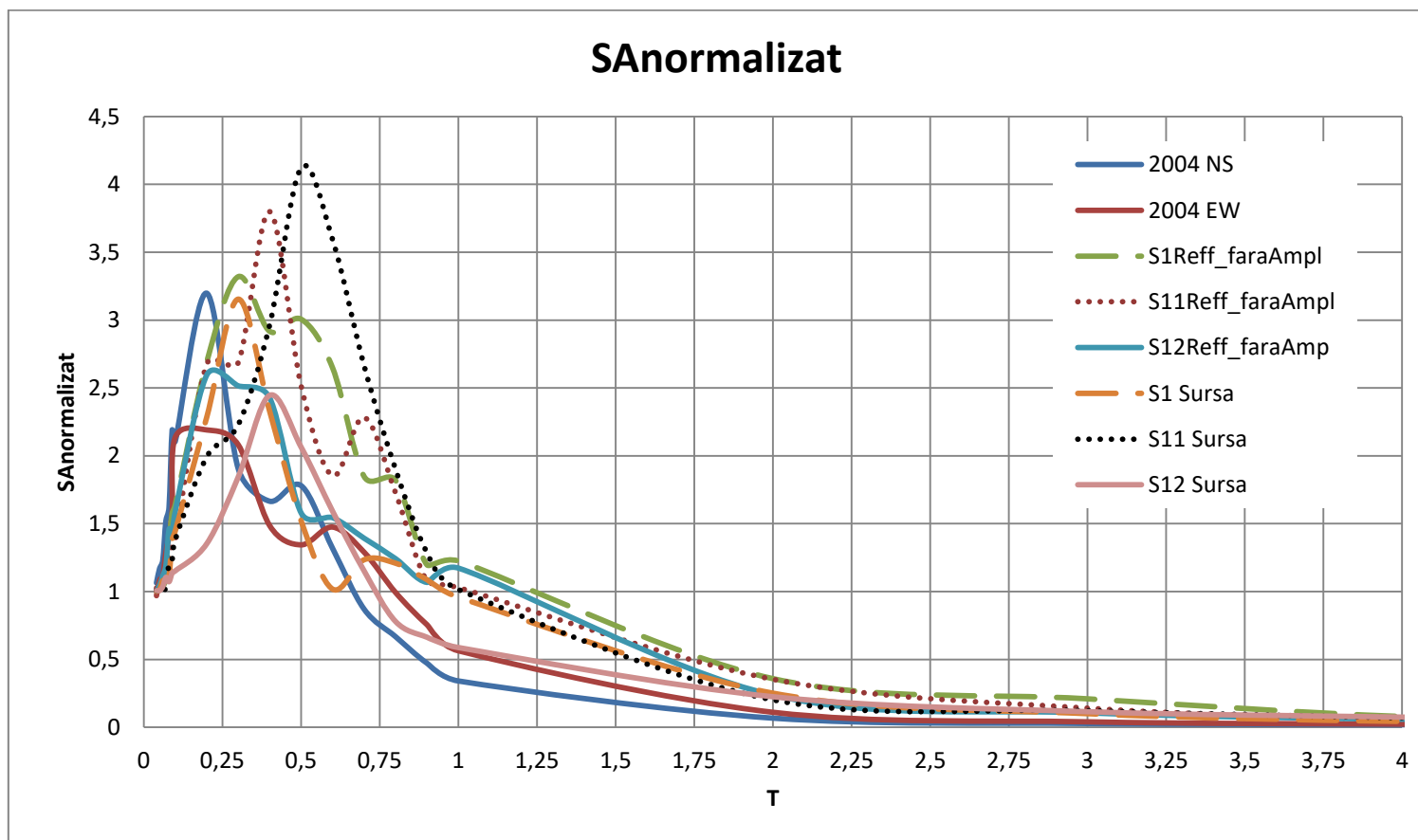
4. Considerând o amplificare constantă de 4 pentru toate perioadele se observă că sursa multiplicativă S12 se apropie ca spectru de mișcarea înregistrată pe direcția EW, deși nu reușește să surprindă amplificările pentru perioade scurte.

#### 6.4. Al treilea set de simulări

Al treilea set de simulări este realizat pentru o distanță  $R=1\text{km}$  (în apropierea sursei), astfel se elimină și efectele date de drumul parcurs de la sursă la site.



Figură 16. Comparare între spectrele normalizate de răspuns a surselor simulărilor și cutremurului din 27 octombrie 2004



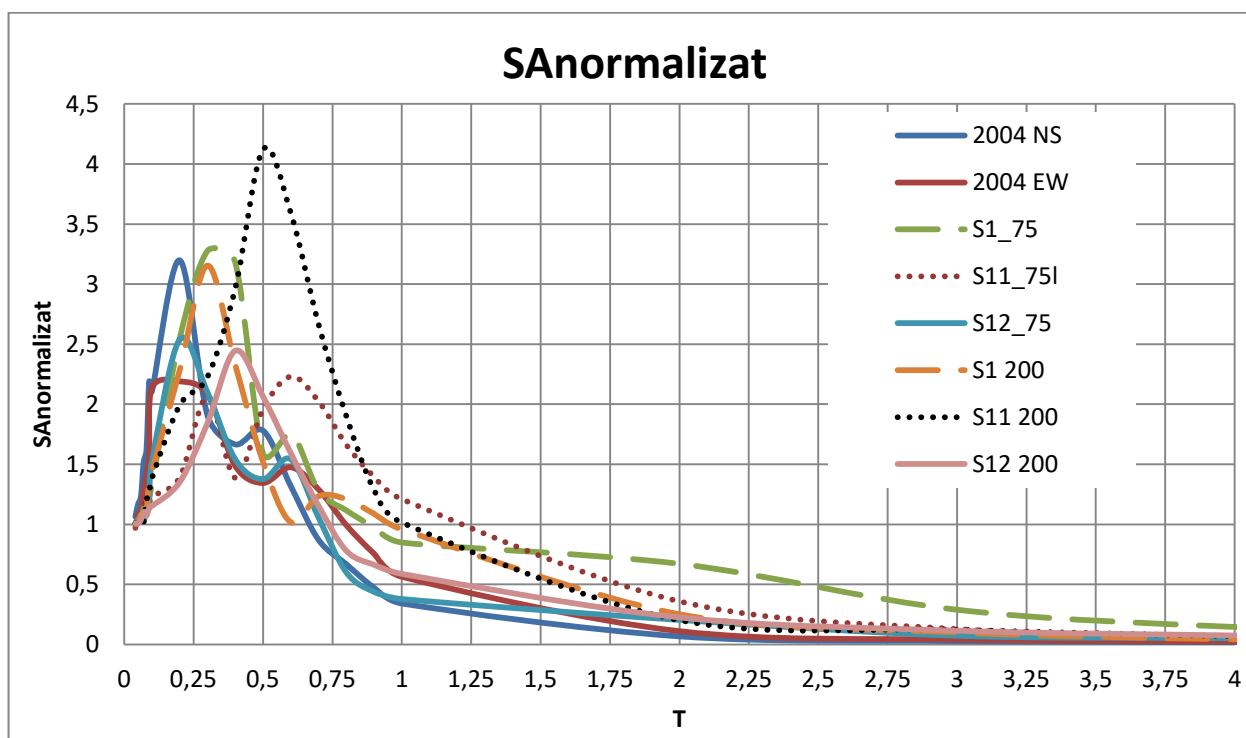
Figură 17. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale simulărilor realizate fără influența condițiilor locale de teren, spectrele surselor simulate și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004

#### Observații:

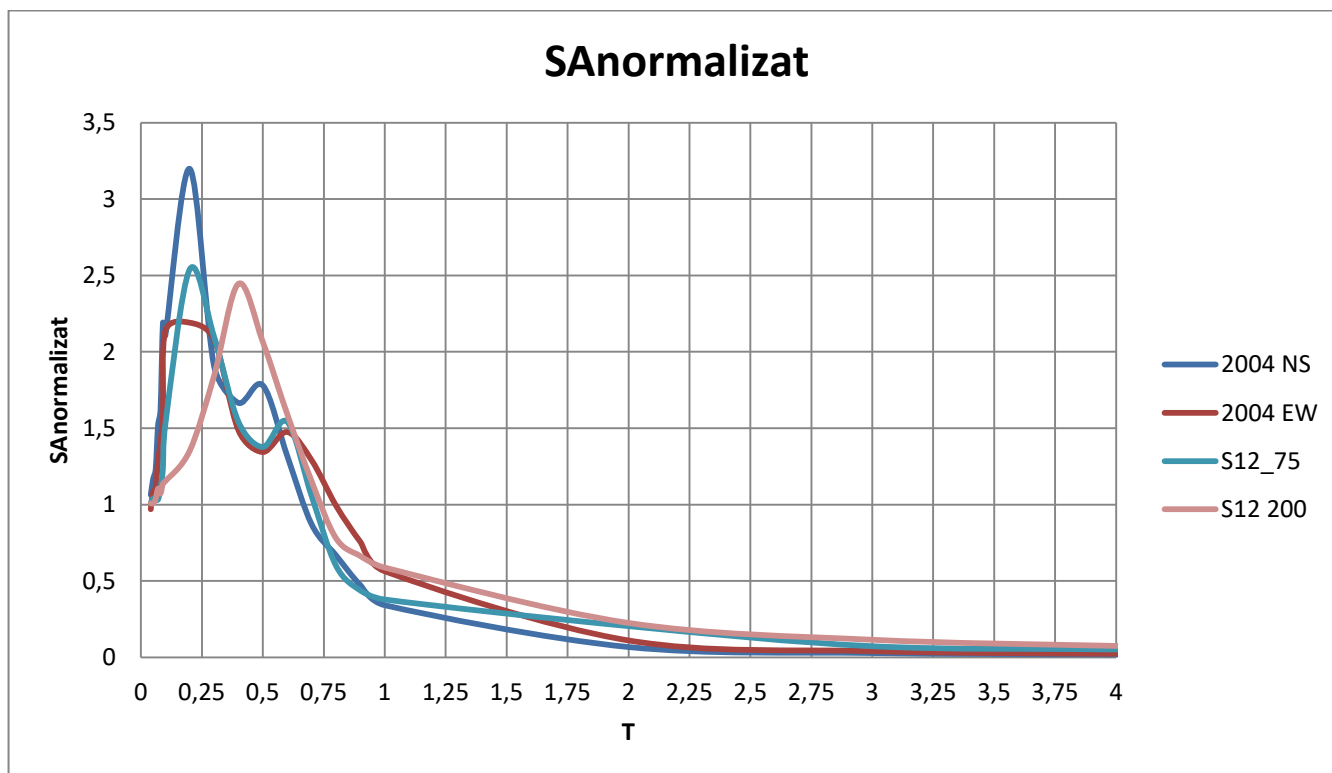
1. Se observă cum conținutul de frecvență este afectat de drumul parcurs de unde de la sursă la site, amplificând mișcarea pe un spectru mai mare de frecvențe, cu tendința de a amplifica perioadele scurte.
2. Ca accelerații de vârf mediile aritmetice arată același lucru ca în celelalte simulări: relativ la sursa S1, Sursa S12 diminuează amplitudinile, iar sursa S11 le amplifică.

#### 6.5. Al partulea set de simulări

Având în vedere faptul că parametrul de tensiune controlează destul de mult conținutul de frecvențe al mișcării și că setul inițial de simulări a fost realizat prin variația acestuia, setul patru de simulări conține mișcări în apropierea sursei cu valori pentru tensiune de 75 bari și 200 bari.

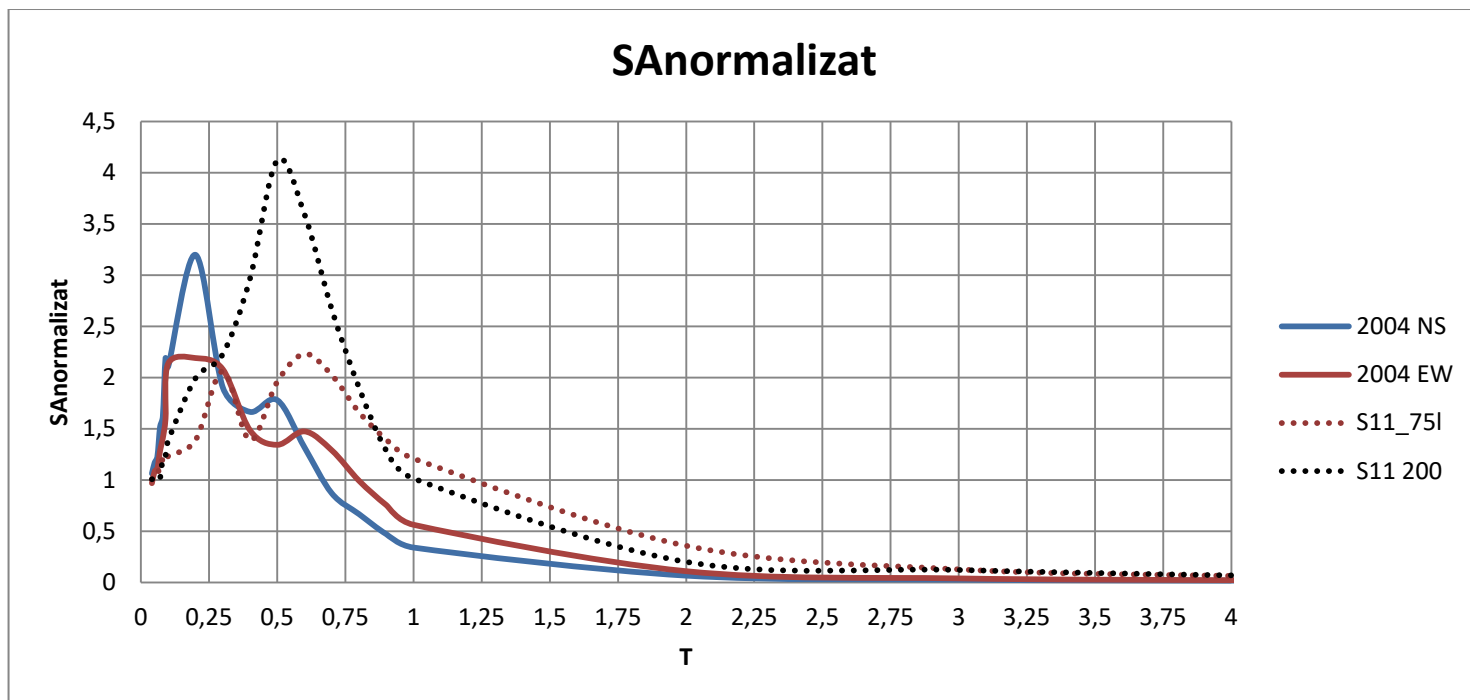


Figură 18. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale surselor simulate cu tensiuni de 75 bari și 200 de bari și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004



Figură 19. Comparație între spectrele normalizate de răspuns ale sursei S12 simulate cu tensiuni de 75 bari și 200 de bari și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004

1. Se poate observa că pentru o valoare mai mică a tensiunii Sursa 12 reușește să surprindă destul de bine anvelopa spectrală a cutremurului din 2004.



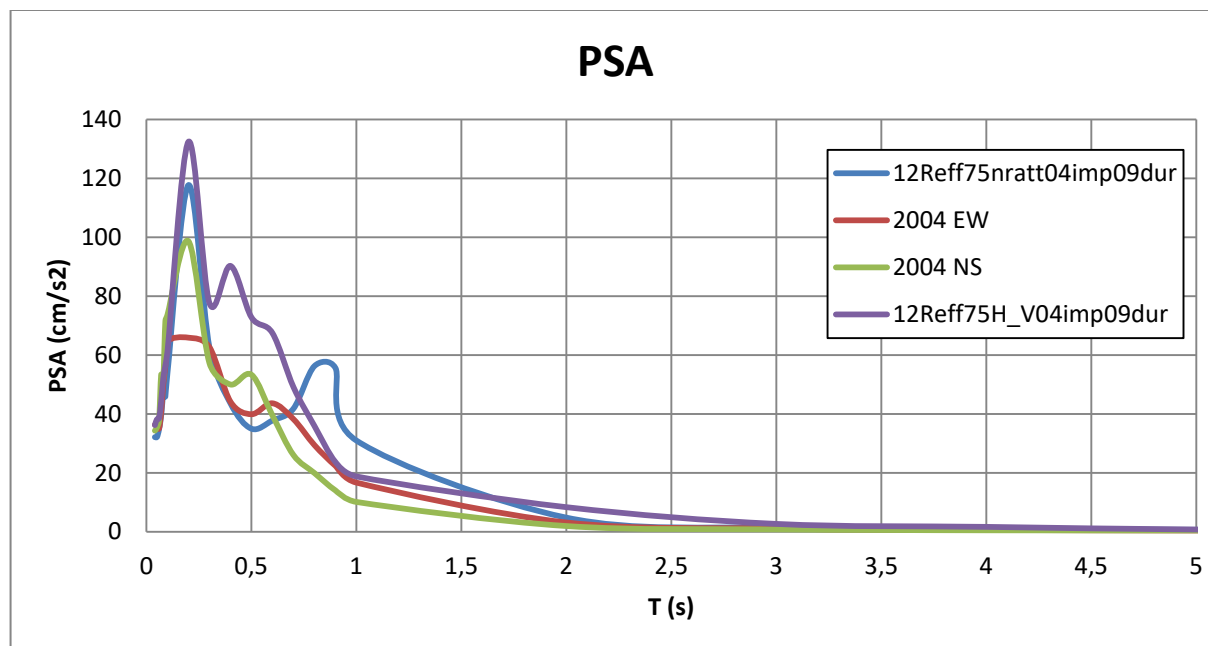
Figură 20. Comparare între spectrele normalizate de răspuns ale sursei S11 simulate cu tensiuni de 75 bari și 200 de bari și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004

2. Sursele cu două frecvențe de colț sunt cele mai influențate din punct de vedere spectral de modificarea tensiunii.
3. Pentru sursele S1 și S12 se observă o creștere a duratei surselor cu scăderea tensiunii (de la 1,37s la 1,91s pentru S1 și de la 1,78 la 1,94s pentru S12). Pentru sursa S11 durata sursei rămâne aproape constantă
4. Scăderea tensiunii produce de asemenea o scădere a perioadelor de colț.
5. Parametrul de tensiune controlează conținutul de frecvențe al spectrului sursei, utilizarea valorii de 75bari (conform Ganas et al. 2010) face ca valoarea maximă a amplitudinii spectrale să se găsească la perioade mai mici (mai apropiate de realitate).

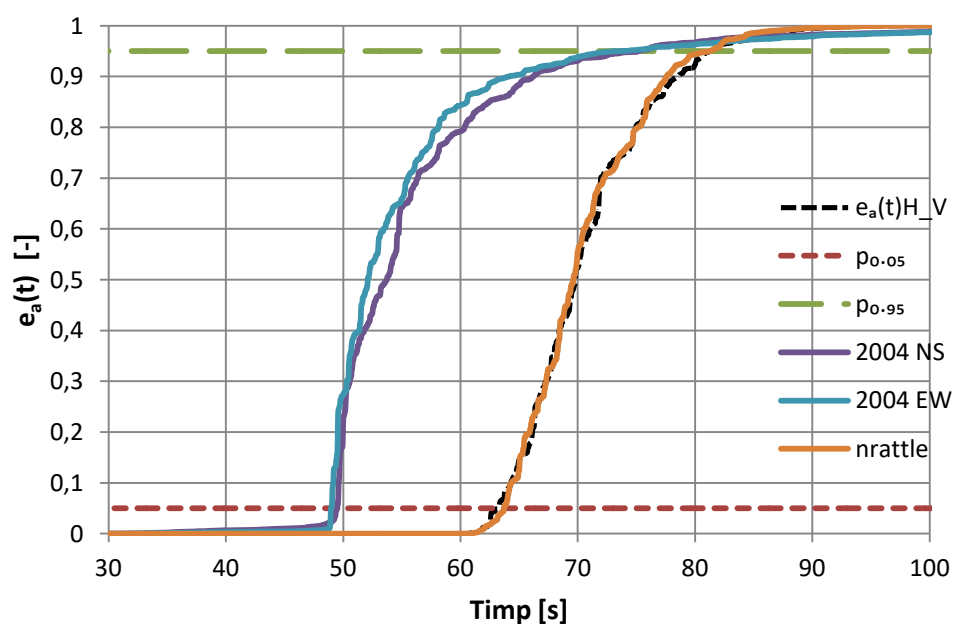
#### 6.6. Al cincelea set de simulări

S-au reluat seturile de simulări pentru sursa S12 utilizându-se o valoare de 75 de bari pentru căderea de tensiune. În primul set de simulări s-a utilizat o împrăștiere geometrică de  $R^{(-0,5)}$  conform Pavel și Văcăreanu 2015, însă această împrăștiere este mai potrivită pentru cutremure mari  $M_w > 6.9$ , iar seismul din 2004 este un cutremur mediu. Împrăștierea geometrică pentru cutremure mici și medii este mai mare decât pentru cele mari, astfel voi utiliza o împrăștiere  $R^{(-0,4)}$ . De asemenea, în încercarea de a mări

durata semnificativă a simulărilor s-a mărit durata drumului parcurs de la sursă la punctul de observare la 0,09.



Figură 21. Comparare între spectrele de răspuns ale mișcării simulate folosind sursa S12, împrăștierea geometrică 0,4 și durata drumului 0,09 și spectrele cutremurului din 27 octombrie 2004



Figură 22. Comparare între energiile cumulative simulate și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004

| Tipul<br>accelerogramei                                       | Durata<br>efectivă | Rădăcina<br>medie<br>pătratică | PGA<br>(cm/s <sup>2</sup> ) | Durată<br>sursă | Durată<br>cale | Durată<br>totală | fa    | fb    | Obs.                                       |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|------------------|-------|-------|--------------------------------------------|
| Vrancea 2004 NS                                               | 21,39              | 3,8                            | 30,01                       |                 |                |                  | 0,35  | 0,35  | *f <sub>0</sub> cf.<br>Gusev et<br>al 2002 |
| Vrancea 2004 EW                                               | 20,92              | 3,4                            | 29,72                       |                 |                |                  | 0,35  | 0,35  |                                            |
| Sursa12 Reff H/V<br>0,4imprastiere 0,9<br>durata drum         | 11,55              | 9,27                           | 35,14                       | 1,94            | 16,92          | 18,86            | 0,33  | 1,15  |                                            |
| Sursa12 Reff<br>nrrattle<br>0,4imprastiere 0,9<br>durata drum | 17,54              | 8,41                           | 29,91                       | 1,94            | 16,92          | 18,86            | 0,33  | 1,15  |                                            |
| Sursa1 R nrrattle<br>simulari initiale                        | 15,93              | 5,9                            | 22,59                       | 1,37            | 15,88          | 17,26            | 0,726 | 0,726 |                                            |
| Sursa12 Reff H/V<br>simulari initiale                         | 14                 | 7,4                            | 25,42                       | 1,32            | 16,31          | 17,64            | 0,5   | 1,5   |                                            |

Tabel 4. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 pentru o cădere de tensiune de 75 bari, împrăștierea geometrică 0,4 și durata drumului 0,09

#### Observații:

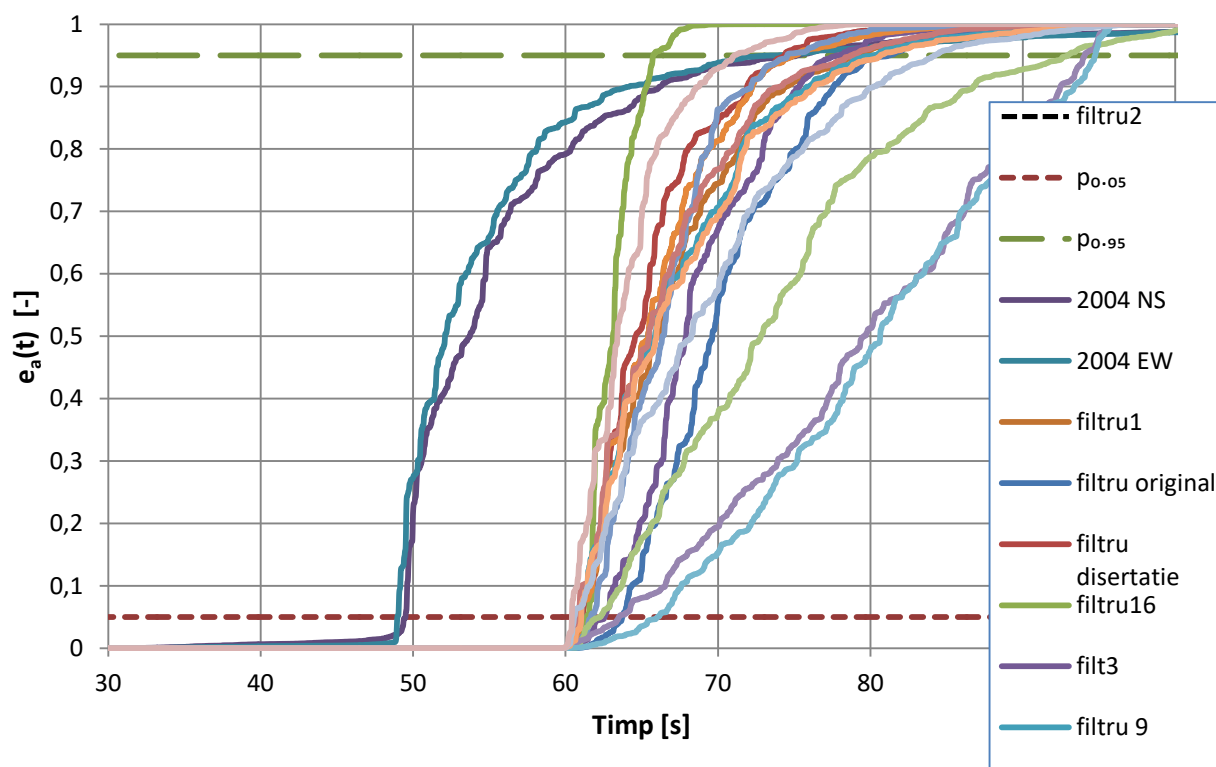
1. Sursa 12 cu parametrul de stress 75 aproximează convenabil mișcarea pentru perioade mici.
2. Modificarea împrăstierii conduce la mărirea rădăcinii medii pătratice, practic ultimele simulări au o putere de 3 ori mai mare decât seismul real.
3. Condițiile locale de teren influențează durata efectivă destul de mult.
4. Durata sursei și durata căii au crescut datorită modificării stress-ului, respectiv împrăstierii geometrice.
5. Amplificările locale în care s-a utilizat profilul H/V au supraestimat mișcarea.

#### 6.7. Al șaselea set de simulări

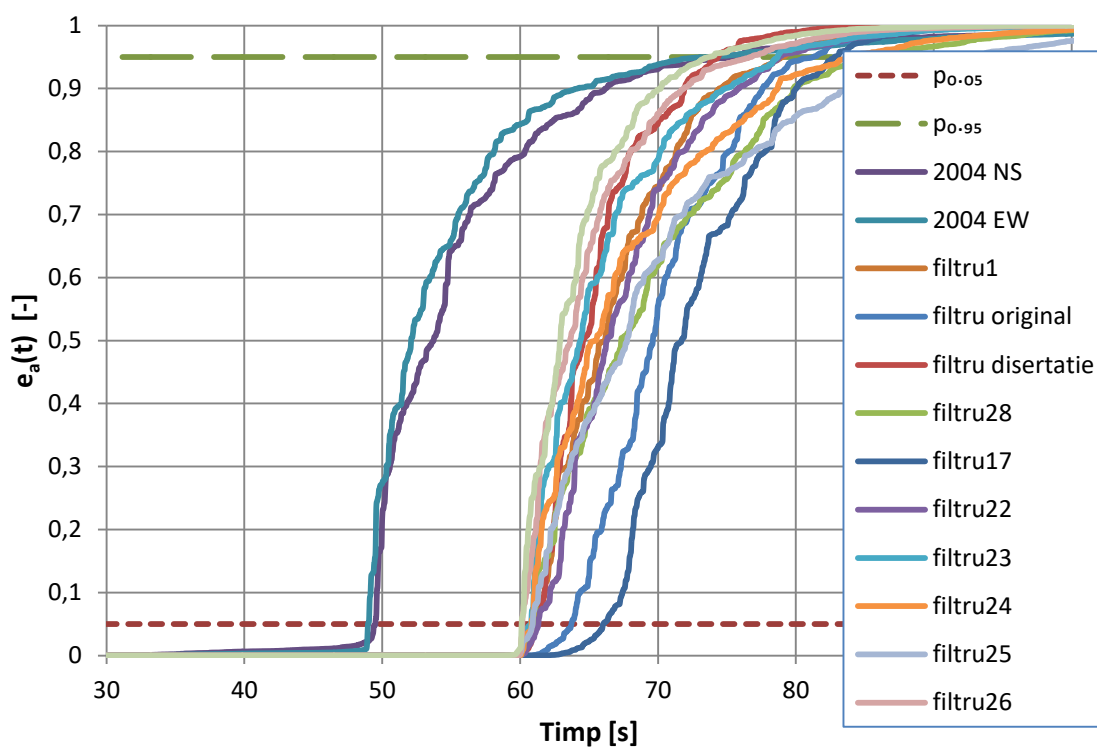
În SMSIM forma accelerogramei este controlată de un filtru de tip box sau exponențial. Acesta influențează foarte mult durata efectivă și rădăcina medie pătratică. În acest set de simulări s-a încercat găsirea unui filtru astfel încât puterea și timpul efectiv să fie cât mai apropiate de seismul real.

| filtru     | eps  | eta   | ftb   | ftext | arms  | tp efectiv |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|------------|
| original   | 0,20 | 0,05  | 2,00  | 1,00  | 8,41  | 17,57      |
| disertatie | 0,09 | 0,05  | 1,50  | 1,00  | 9,14  | 13,22      |
| 1          | 0,08 | 0,05  | 2,00  | 1,00  | 7,66  | 18,14      |
| 2          | 0,08 | 0,02  | 2,00  | 1,00  | 8,65  | 14,15      |
| 3          | 0,10 | 0,001 | 3,00  | 1,00  | 7,79  | 15,27      |
| 4          | 0,07 | 0,001 | 3,00  | 1,00  | 9,67  | 12,88      |
| 5          | 0,06 | 0,05  | 2,00  | 1,00  | 7,70  | 17,69      |
| 6          | 0,06 | 0,04  | 4,00  | 0,58  | 6,11  | 30,89      |
| 7          | 0,05 | 0,08  | 19,00 | 0,10  | 5,88  | 30,56      |
| 8          | 0,09 | 0,08  | 19,00 | 0,10  | 6,05  | 30,56      |
| 9          | 0,05 | 0,00  | 2,00  | 1,00  | 7,40  | 19,50      |
| 10         | 0,05 | 0,09  | 2,00  | 1,00  | 7,30  | 19,63      |
| 11         | 0,08 | 0,15  | 2,00  | 1,00  | 6,87  | 23,63      |
| 12         | 0,08 | 0,15  | 1,00  | 1,00  | 10,80 | 10,67      |
| 13         | 0,10 | 0,15  | 2,00  | 1,00  | 10,73 | 10,75      |
| 17         | 0,30 | 0,05  | 2,00  | 7,00  | 7,26  | 16,17      |
| 22         | 0,10 | 0,05  | 2,00  | 7,00  | 7,59  | 17,47      |
| 23         | 0,01 | 0,05  | 2,00  | 7,00  | 7,62  | 17,89      |
| 24         | 0,01 | 0,10  | 2,00  | 7,00  | 6,70  | 23,30      |
| 25         | 0,01 | 0,20  | 2,00  | 7,00  | 5,80  | 31,00      |
| 26         | 0,01 | 0,20  | 1,00  | 7,00  | 8,30  | 16,50      |
| 27         | 0,01 | 0,40  | 0,50  | 9,00  | 8,60  | 16,50      |
| 28         | 0,01 | 0,60  | 0,50  | 7,00  | 6,50  | 25,00      |
| 14         | 0,3  | 0,05  | 0,1   | 7     | 38    | 0,73       |
| 15         | 0,3  | 0,05  | 0,2   | 7     | 32    | 1,9        |
| 16         | 0,3  | 0,05  | 0,5   | 7     | 13,68 | 4,36       |

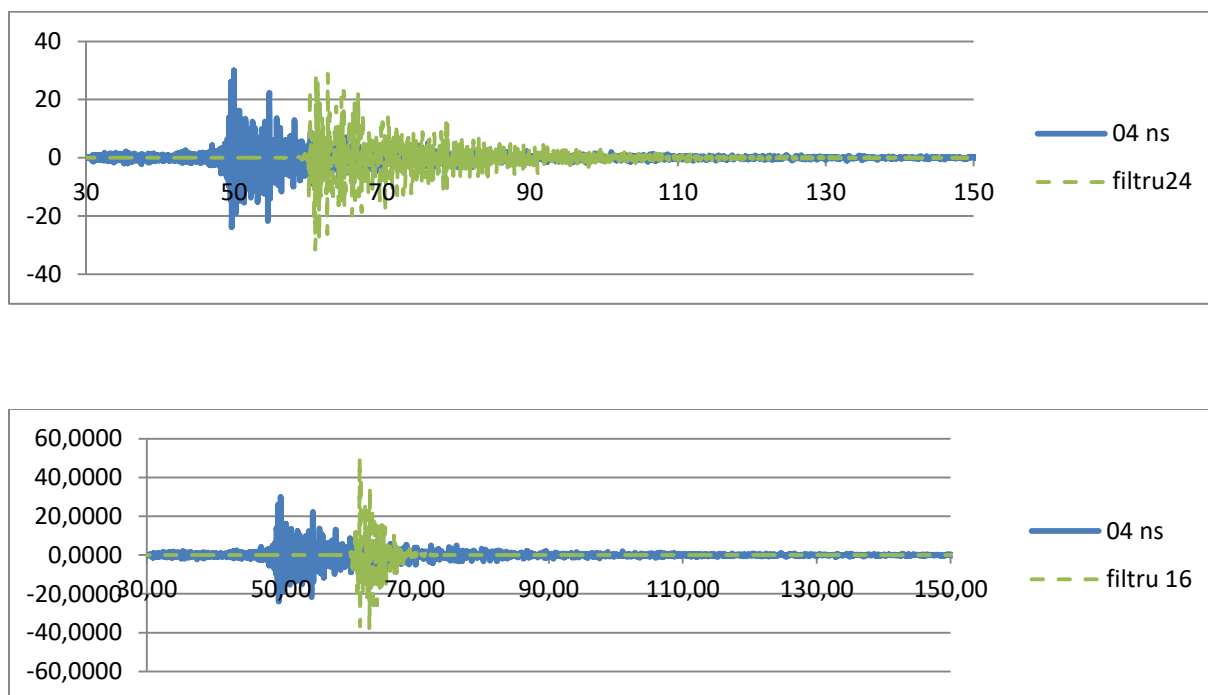
Tabel 5. Tipuri de filtre



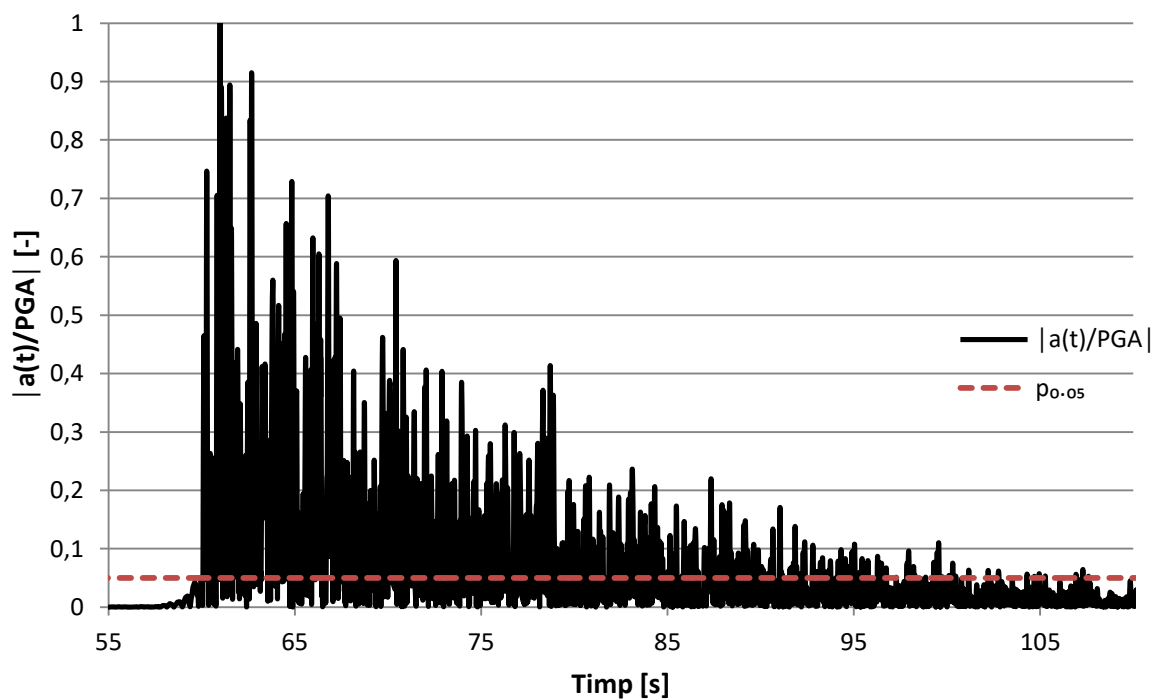
Figură 23. Comparație între energiile cumulate simulate cu diverse filtre și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004 (partea I)



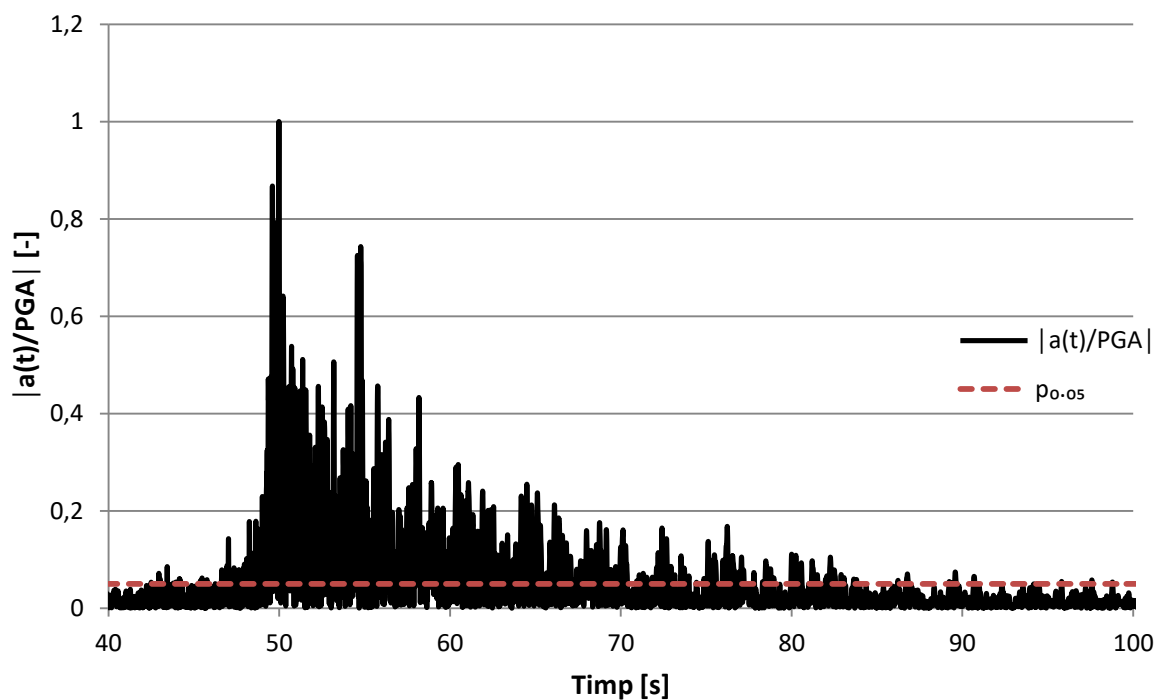
Figură 24. Comparație între energiile cumulate simulate cu diverse filtre și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004 (partea II)



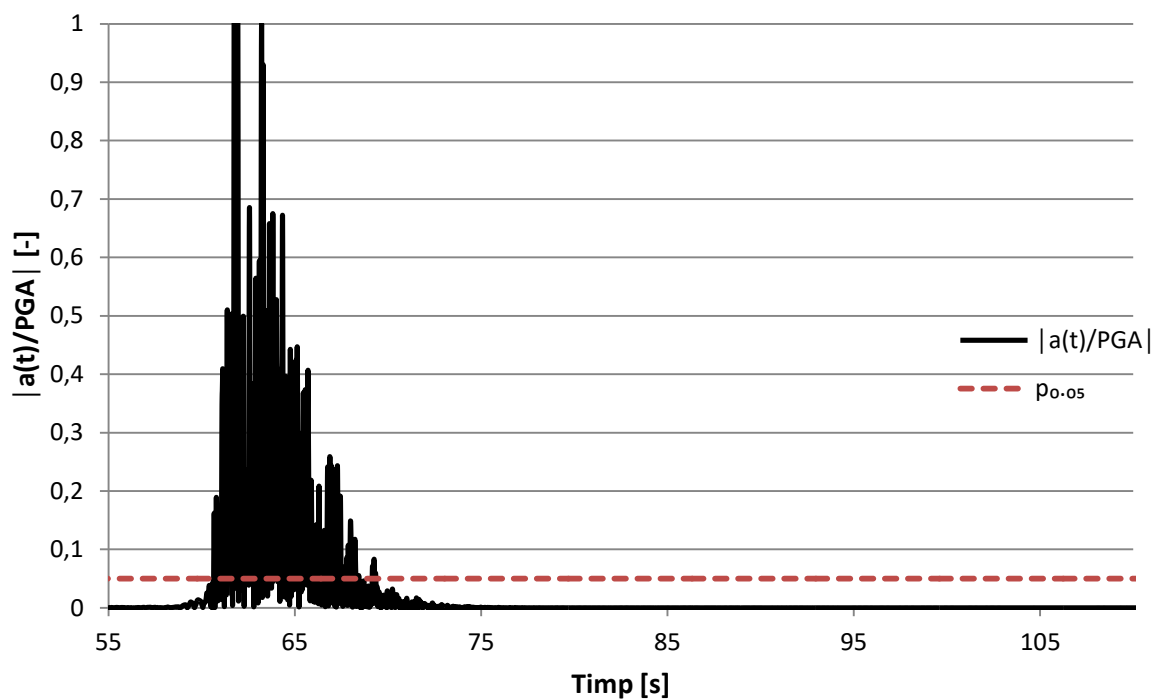
Figură 25. Comparație între accelerogramele simulate utilizând filtrul 16 și filtrul 24 și accelerograma cutremurului din 27 octombrie 2004 înregistrată pe direcția NS



Figură 26. Accelerogramă normalizată simulată utilizând filtrul 24



Figură 27. Accelerogramă normalizată seism 27 octombrie 2004 direcția EW



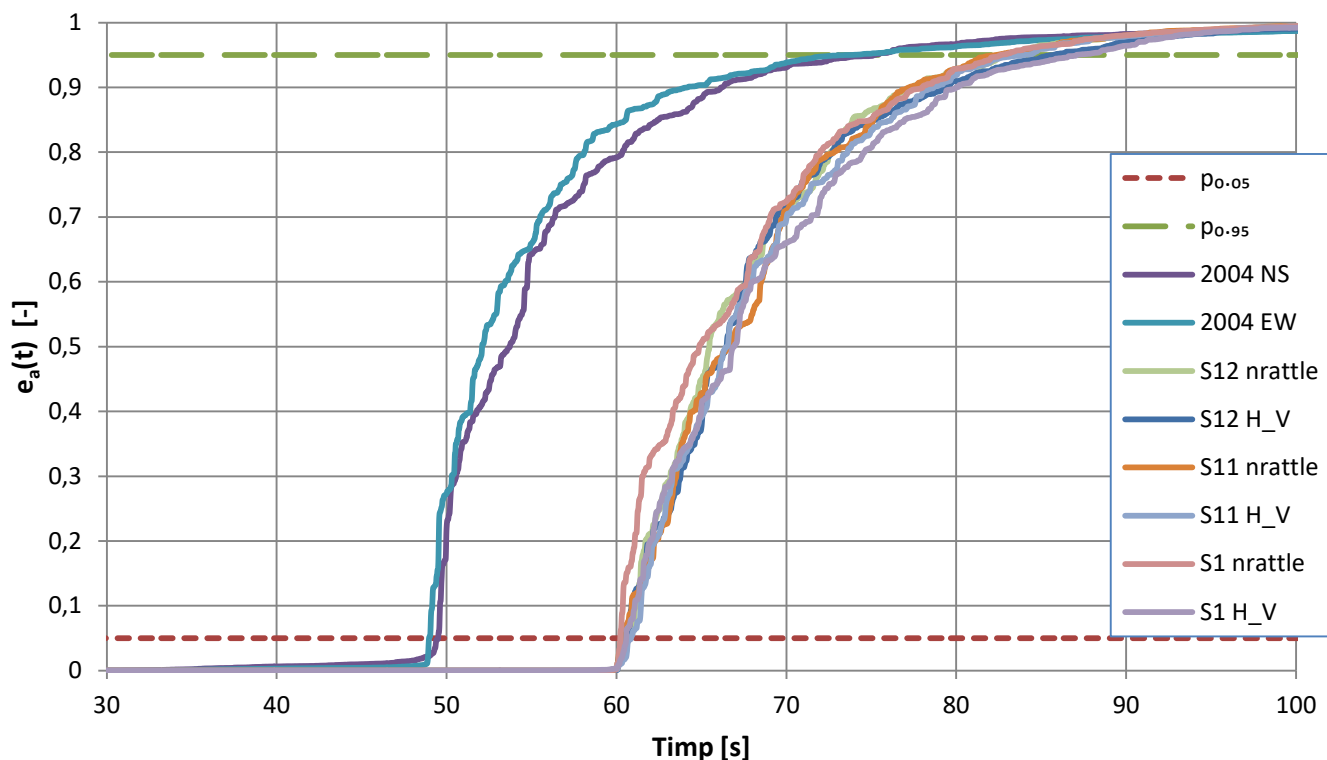
Figură 28. Accelerogramă normalizată simulată utilizând filtrul 16

S-a constatat faptul că filtru exponențial implementat în SMSIM nu reușește să conducă la forma specifică cutremurelor vrâncene subcrustale care are o primă mișcare de tip puls care conține

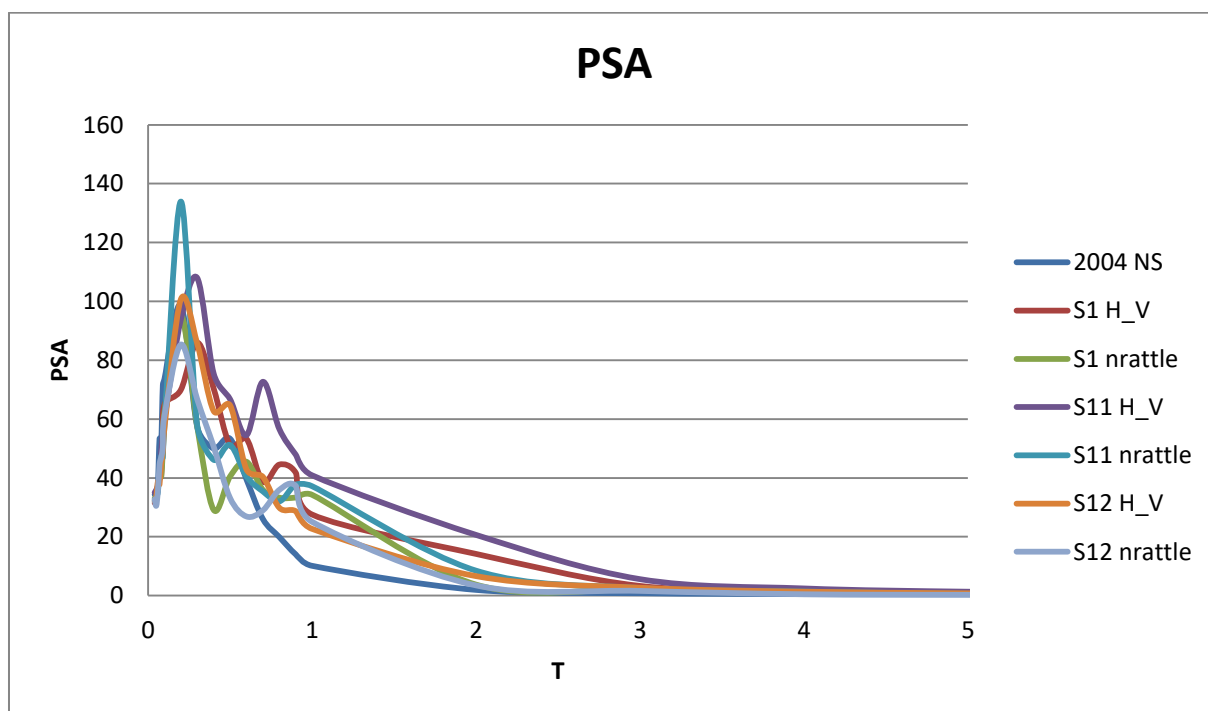
aproximativ 35% din energia totală eliberată, după care restul energiei este eliberată lent. Filtrul surprinde printr-o singură pantă eliberarea energiei mergând de la o eliberare foarte bruscă la o eliberare lentă. Pentru a reuși descrierea cutremurelor va fi nevoie de un filtru care să poată defini eliberarea de energie prin două pante.

#### 6.8. Setul final de simulări

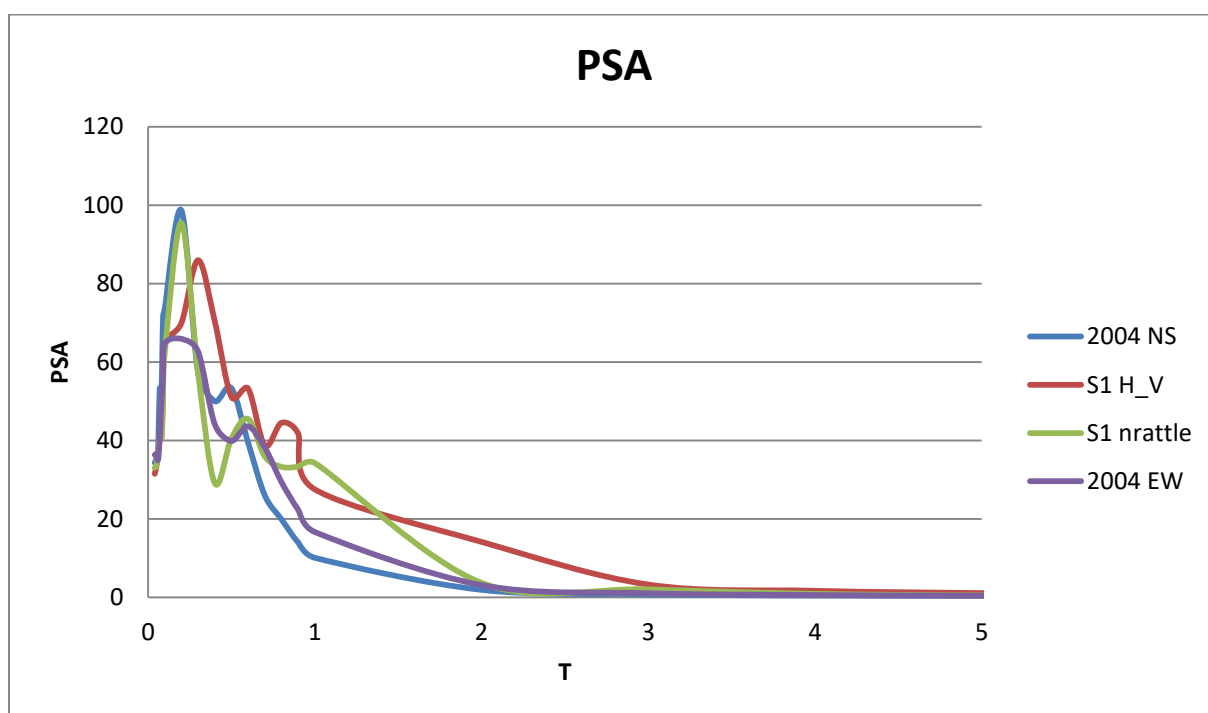
S-au reluat toate simulările utilizându-se filtrul nr. 24 definit în tabelul de mai sus, împrăștierea a rămas de 0,4, iar durata căii de 0,09, căderea de tensiune fiind de 75 de bari.



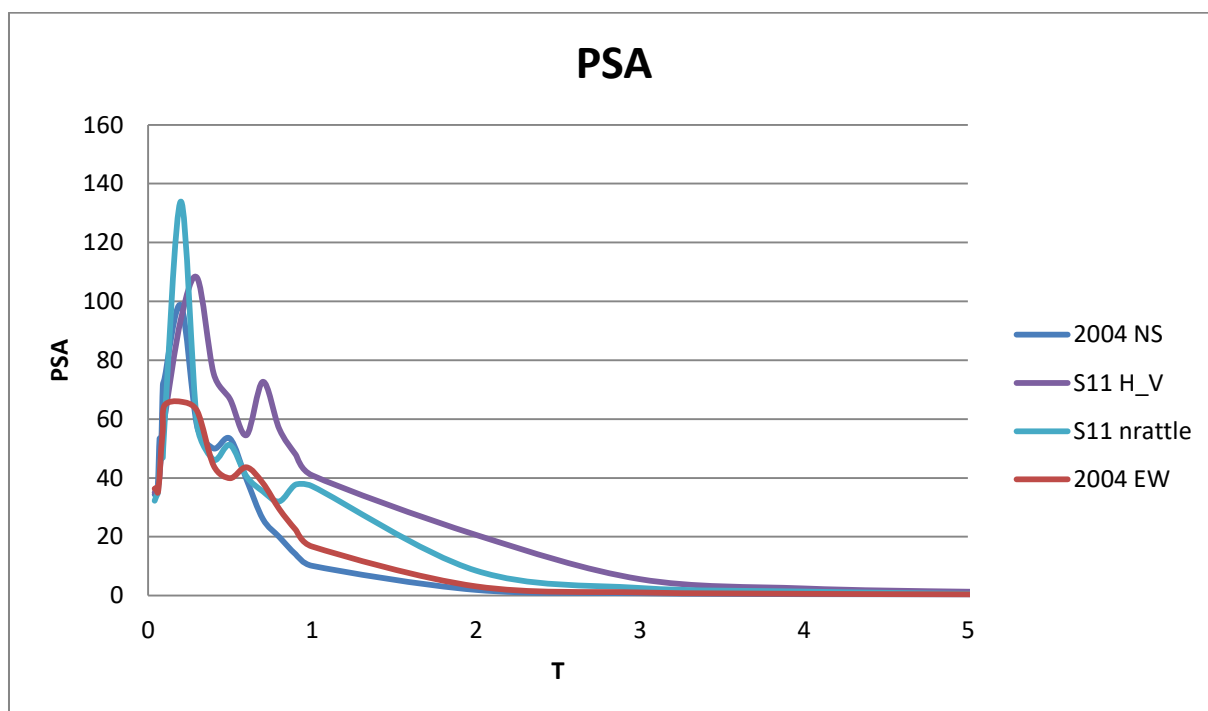
Figură 29. Comparare între energiile cumulative simulate varianta finală și cele ale cutremurului din 27 octombrie 2004



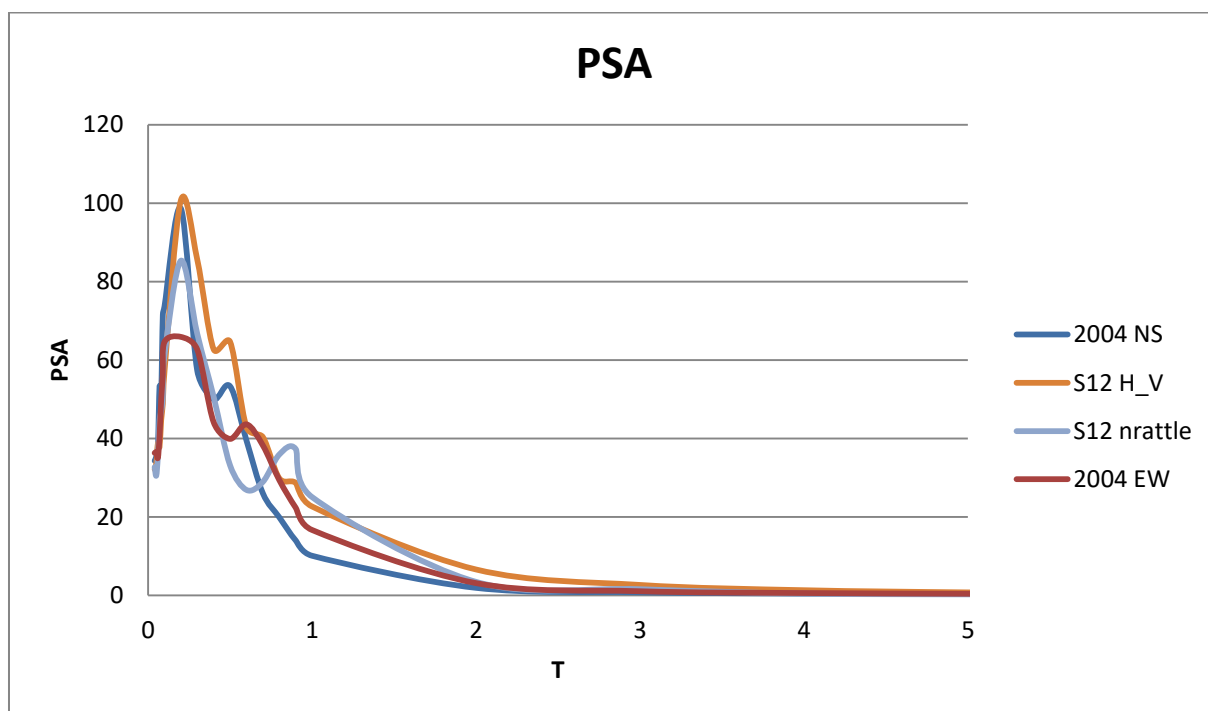
Figură 30. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale



Figură 31. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale pentru sursa S1



Figură 32. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale pentru sursa S11



Figură 33. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 și spectrele de răspuns ale simulărilor finale pentru sursa S12

| Tip simulare | medie<br>PGA | PGA<br>simulare<br>analizata | fa    | fb    | durata<br>sursei | durata<br>drumului | durata<br>totala | Timp<br>efectiv | Arms     |
|--------------|--------------|------------------------------|-------|-------|------------------|--------------------|------------------|-----------------|----------|
| S1 H_V       | 39,68        | 29,82                        | 0,523 | 0,523 | 1,91             | 16,92              | 18,83            | 22,88           | 7,922174 |
| S1 nrattle   | 33,13        | 30,86                        | 0,523 | 0,523 | 1,91             | 16,92              | 18,83            | 22,4            | 7,083665 |
| S11 H_V      | 42,73        | 33,56                        | 0,33  | 0,82  | 1,51             | 16,92              | 18,43            | 23,97           | 9,400073 |
| S11 nrattle  | 34,8         | 29,62                        | 0,33  | 0,82  | 1,51             | 16,92              | 18,43            | 21,95           | 7,992839 |
| S12 H_V      | 36,41        | 31,08                        | 0,33  | 1,15  | 1,94             | 16,92              | 18,86            | 25,04           | 7,398681 |
| S12 nrattle  | 31,23        | 29,39                        | 0,33  | 1,15  | 1,94             | 16,92              | 18,86            | 22,11           | 6,786087 |

Tabel 6. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 pentru o cădere de tensiune de 75 bari, împrăștierea geometrică 0,4 și durata drumului 0,09, folosind filtrul 24

#### Concluzii:

1. Din punct de vedere al energiei eliberate toate sursele au o putere de aproximativ 2 ori mai mare decât cutremurul normal (acest lucru este din cauza filtrului exponențial utilizat care nu surprinde comportamentul de puls specific cutremurelor subcrustale vrâncene). Un filtru mai potrivit ar putea fi alcătuit din două funcții exponențiale definite pe două intervale.
2. Timpul efectiv al simulărilor este de asemenea mai mare decât cel real (tot din cauza filtrului utilizat).
3. Amplificarea dată de profilul H/V pentru sursele S1 și S11 crește perioada la care se găsește primul vârf spectral de accelerații.
4. Pentru sursele S1 și S11 se observă o amplificare mai mare decât cea reală pentru perioadele mari.
5. Din punct de vedere al mediei accelerațiilor de vârf pe cele câte 400 de simulări se observă o supradimensionare a mișcării care poate să fie din cauza diferenței de eliberare de energie dată de filtrul ales, fie din cauza împrăștierii geometrice alese.
6. După cum se poate observa din diferența dintre mișcarea rezultată pentru cazul în care se folosește filtru 16 și cazul în care se folosește filtrul 24, distribuția energiei pe o mișcare mai scurtă și cu mai puține vârfuri de amplitudine duce la o creștere a accelerațiilor. Dacă filtrul ales ar fi putut evidenția comportarea de puls pe prima parte a mișcării și ulterior o eliberare a energiei lentă atunci distribuția energiei ar duce la o creștere și mai mare a PGA-urilor.
7. Teoretic un cutremur mai mic are o împrăștiere geometrică mai mare, însă modificarea împrăștierii pentru ultimele simulări a fost aleasă fără un studiu amănunțit.
8. Utilizarea unui filtru adecvat și modificarea împrăștierii bazată pe o cercetare mai amănunțită ar duce cel mai probabil la o potrivire mai bună a mediilor accelerațiilor de vârf utilizate.

## 7. Simularea seismului vrâncean de adâncime intermediară din 30 august 1986. Interpretarea rezultatelor.

### 7.1. Caracteristici seism

Cutremurul din 30 august 1986 face parte din categoria cutremurelor mari având o magnitudine moment de 7,1 la o adâncime de focar de 133km (conform Oth et al. 2007) sau 131km (conform Văcăreanu et al. 2014, Ganas et al. 2010, Oncescu et al. 1989). Epicentrul acestui cutremur fiind la 45,52° latitudine N și 26,49° longitudine E (conform Oth et al. 2007, conform Văcăreanu et al. 2014, , Ganas et al. 2010, Oncescu et al. 1989). Dimensiunea faliei seismice conform Oth et al. 2007 a fost de 12,8x 12,6km, iar căderea de tensiune a fost de 50bari (conform Ganas et al. 2010, Oncescu și Bonjer 1997). Din punct de vedere al mecanismului de focar conform Ganas et al. 2010 și Oncescu și Bonjer 1997 cutremurul a fost produs printr-un unghi de rupere (strike) de 227°, înclinația faliei fiind de 65° (dip), cu o orientare a mișcării faliei atârnată de 104° (rake).

### 7.2. Parametrii de intrare

În simulări s-a considerat viteza medie undelor de forfecare  $\beta_s = 4,5$  km/s, iar denistatea  $\rho = 2,8$  g/cm<sup>3</sup>, valori între cele două variante propuse. Din punct de vedere al sursei s-au realizat simulări pentru 3 tipuri de spectre pentru sursă: Sursa cu o singura frecvență de colț (S1) și cu două frecvențe de colț cu spectru aditivă (S11) și multiplicativă (S12). Folosind modelele (conform tabelului nr....) BC92 pentru Sursa 1 (Boatwright and Choy 1992), H96 pentru Sursa11 (Haddon 1996) și AB95 pentru sursa 12 (Atkinson and Boore 1995). Frecvența de colț fiind definită conform Gusev et al. 2002 în funcție de magnitudine prin relația:  $M_w = -2\log(f_c) + 4.84$ .

S-a considerat împrăștierea de forma  $1/R^{0.5}$  conform Pavel și Văcăreanu (2015). Pentru distanța hipocentrală s-a utilizat  $R_{eff} = 182,2$  km distanța efectivă care ia în calcul geometria faliei (rezultat în urma folosirii executabilului reff.exe din cadrul setului de programe SMSIM).

Atenuarea a fost considerată de forma  $Q(f) = 100 \times f^1$ . Pentru aplicație valorile parametrului kappa au fost considerate cele din lucrarea lui Pavel și Văcăreanu (2015)  $k = k_{event} + k_0$ , unde  $k_{event} = 0.022M_w - 0.127$ .

Durata surselor a fost considerată conform Boore 2003, iar durata dependentă de cale a fost considerată 0,0868 conform Pavel 2015.

Din punct de vedere al amplificării condițiilor de amplasament în simulări au fost folosite două profile de amplificări, unul rezultat din calculul realizat cu programul NRATTLE din setul de programe SMSIM pentru profilul undelor de forfecare pentru amplasamentul INCERC București Constantinescu și Enescu (1985), iar cel de-al doilea este un profil de amplificări (conform Pavel 2015) rezultat din metoda H/V.

În simulări s-a folosit filtrul exponențial 16.

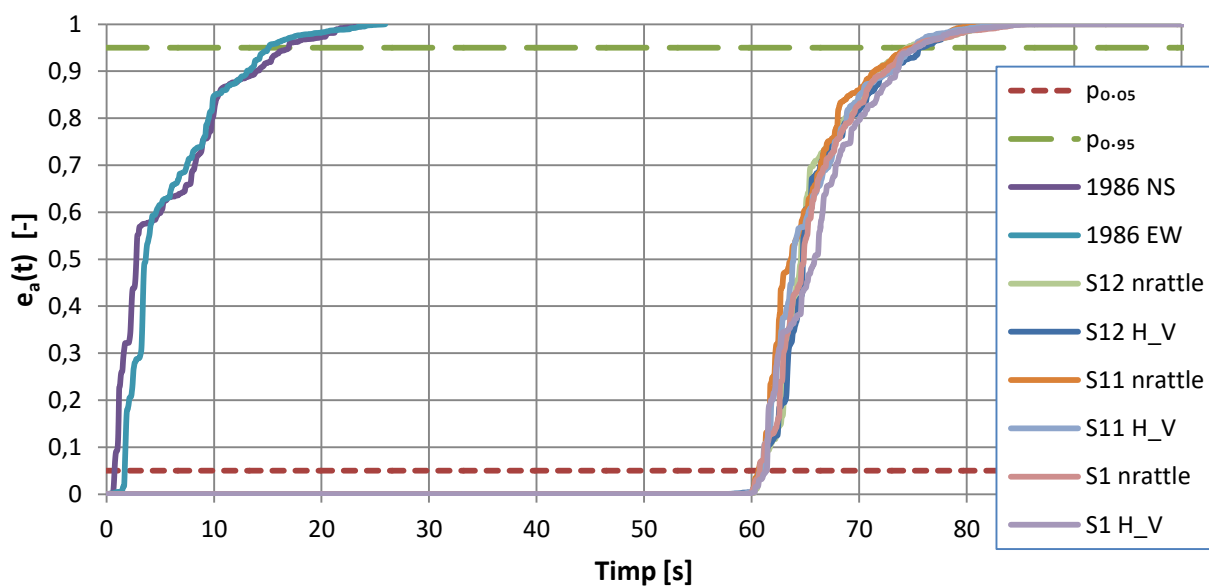
### 7.3. Rezultatele simulărilor

| Tip simulare | medie PGA | PGA simulare analizată | fa *pentru seismul real cf. Gusev et al. 2002 | fb   | durata sursei | durata drum | durata totală | Timp semnificativ | Arms  |
|--------------|-----------|------------------------|-----------------------------------------------|------|---------------|-------------|---------------|-------------------|-------|
| 1986 NS      |           | 95,3                   | 0,13                                          | 0,13 |               |             |               | 16,19             | 19,47 |
| 1986 EW      |           | 88,7                   | 0,13                                          | 0,13 |               |             |               | 13,35             | 23,86 |
| S1 H_V       | 69,82     | 88,66                  | 0,1                                           | 0,1  | 9,7           | 15,81       | 25,51         | 13,86             | 22,11 |
| S1 nrattle   | 49,27     | 59,52                  | 0,1                                           | 0,1  | 9,7           | 15,81       | 25,51         | 14,38             | 16,74 |
| S11 H_V      | 73,02     | 90,14                  | 0,07                                          | 0,14 | 6,74          | 15,81       | 22,55         | 14,21             | 23,09 |
| S11 nrattle  | 51,25     | 65,25                  | 0,07                                          | 0,14 | 6,74          | 15,81       | 22,55         | 14,3              | 15,26 |
| S12 H_V      | 69,64     | 89,88                  | 0,07                                          | 0,29 | 8,45          | 15,81       | 24,26         | 14,94             | 20,34 |
| S12 nrattle  | 49,53     | 66,36                  | 0,07                                          | 0,29 | 8,45          | 15,81       | 24,26         | 13,64             | 15,53 |

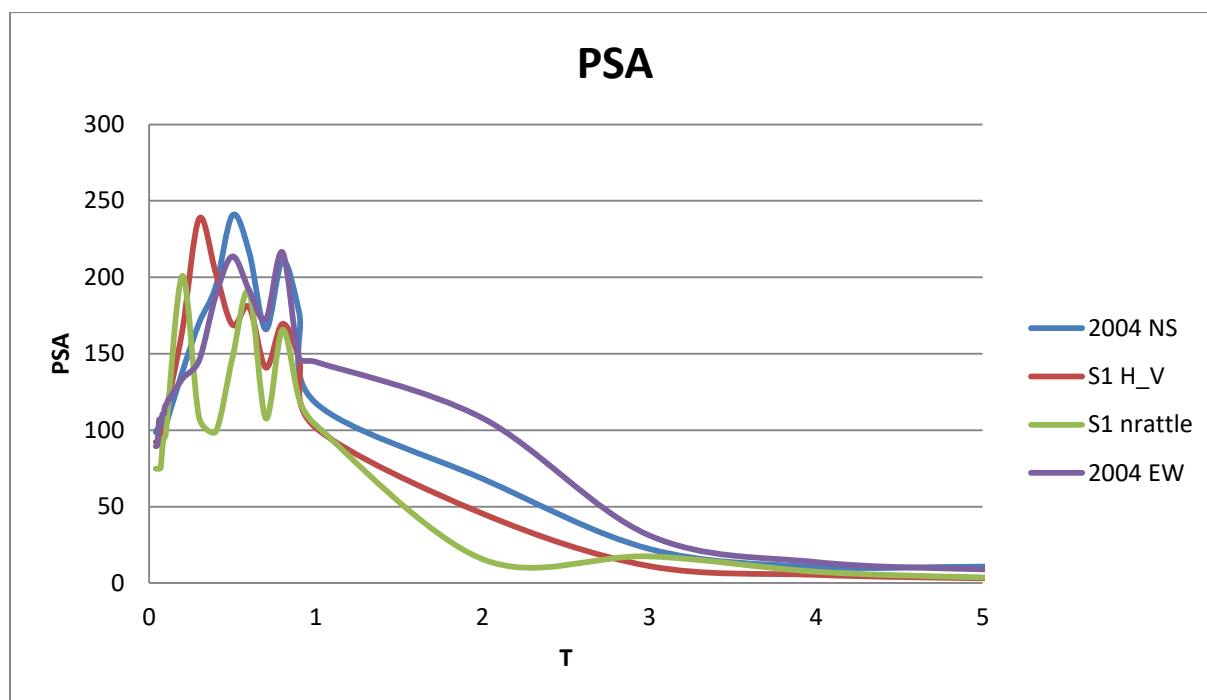
Tabel 7. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 30 august 1986

#### Concluzii:

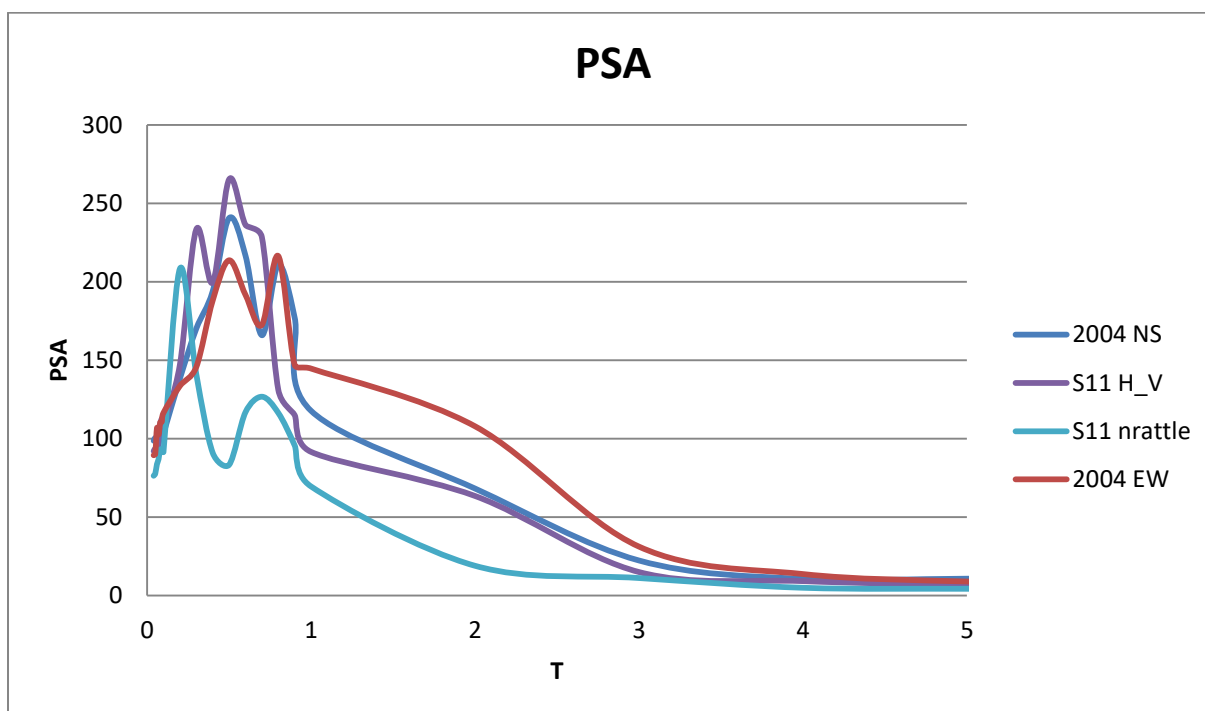
1. Din punct de vedere al valorilor de vârf medii pe cele câte 400 de simulări pentru fiecare caz, simulările au subdimensionat mișcărilor.
2. Valorile de vârf ale simulărilor în care s-a utilizat profilul de amplificări locale nrattle sunt cu aproximativ 33% mai mici decât cele în care s-a folosit profilul de amplificări H/V.
3. Din punct de vedere al timpului semnificativ se observă o diferență de 1-2s față de mișcarea înregistrată pe direcția NS și o bună potrivire cu timpul de pe direcția EW.
4. Având în vedere diferențele dintre accelerațiile de vârf între simulările cu profilul de amplificări nrattle și profilul de amplificări H/V putem spune că rădăcina medie pătratică a simulărilor și a evenimentului real este aproximativ aceeași.



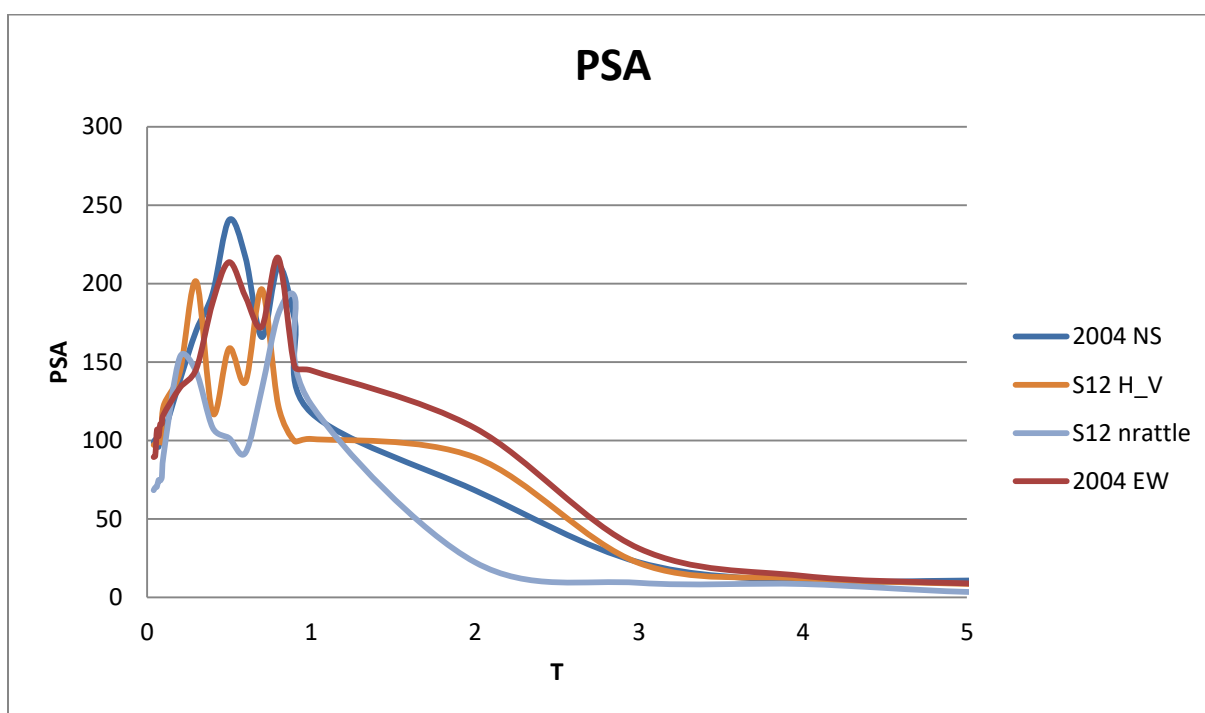
Figură 34. Comparație între energiile cumulative simulate și cele ale cutremurului din 30 august 1986



Figură 35. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 30 august 1986 și spectrele de răspuns ale simulărilor pantru sursa S1



Figură 36. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 30 august 1986 și spectrele de răspuns ale simulărilor pantru sursa S11



Figură 37. Comparație între spectrele de răspuns ale cutremurului vrâncean din 30 august 1986 și spectrele de răspuns ale simulărilor pantru sursa S12

5. Din punct de vedere spectral profilul de amplitudini nrattle subestimează foarte mult mișcarea pentru perioade lungi și în intervalul 0,4-0,6s.
6. Profilul H/V reușește să surprindă o amplificare a mișcării pentru perioade lungi.
7. Pentru toate tipurile de simulări a rămas un vârf de amplitudine spectrală în jurul perioadei de 0,2-0,3s cel mai probabil din cauză că programul nu ia în calcul comportamentul nelinear al terenului.
8. Sursele S11 și S12 estimează mai bine mișcarea seismică.

## **8. Concluzii. Aspecte pro și contra.**

S-au realizat simulări pentru două cutremure vrâncene de adâncime intermediară 27 octombrie 2004 (eveniment mediu) și 30 august 1986 (eveniment mare) utilizând setul de programe realizat de David Boore SMSIM versiunea 7.1. Cutremurele au fost simulate pentru 3 tipuri de sursă spectrală (cu o singură frecvență de colț, cu două frecvențe de colț spectru multiplicativ și aditiv) și două tipuri de amplificări ale condițiilor locale (una realizată cu programul NRATTLE, iar cealaltă cu metoda H/V).

S-au constatat următoarele:

- a. Parametrul de cădere de tensiune modifică valorile de vârf ale mișcării, conținutul de frecvențe al spectrului de amplitudini și durata sursei.
- b. Sursa 1 (punctuală) are cele mai mari diferențe între valorile de vârf ale mișcării (apr.  $10\text{cm/s}^2$  pentru seismul din 2004).
- c. Utilizarea distanței hipocentrale efective  $R_{\text{eff}}$  care ține cont de mecanismul de focar conduce la o aproximare mai bună a mișcărilor seismice.
- d. Duratele semnificative și accelerațiile medii pătratice sunt foarte sensibile la filtrul utilizat pentru modelarea mișcării.
- e. Accelerația medie pătratică este influențată semnificativ și de profilul de amplificări folosit.
- f. Împrăștierea geometrică influențează mult valorile de vârf ale mișcării.
- g. Pentru o formă a mișcării în care se eliberează inițial o energie mare într-un timp scurt, iar restul energiei se eliberează treptat și mai lent ar fi necesar un filtru pe două intervale, cu două pante.
- h. Pentru cutremurul din 2004 simulările realizate cu profilul de amplificări nrattle estimează destul de bine mișcarea pentru toate cele trei tipuri de surse. Simulările realizate cu profilul H/V tind să modifice vârfurile de amplificare către perioade mai lungi.
- i. Pentru seismul din 2004 sursa 12 este cel mai puțin influențată de profilul de amplificări al condițiilor locale de teren.
- j. Deoarece pentru cutremurul din 1986 s-a definit un filtru mai potrivit duratele semnificative și accelerațiile medii pătratice coincid aproximativ. În cazul simulărilor realizate pentru cutremurul din 2004 neconcordanța este dată probabil și de nepotrivirea filtrului și de modificarea împrăștierii geometrice.
- k. Pentru cutremurele mari programul nu surprinde comportarea nelineară a terenului.

În concluzie, programul simulează destul de bine cutremurele mijlocii care nu produc o comportare nelineară, însă pentru cutremure mari este nevoie de utilizarea altui program care să ia în calcul nelinearitatea terenului (ex. DEEPSOIL), simulările sunt sensibile la alegerea filtrului de modelare a zgomotului Gaussian, iar acesta nu reușește să surprindă două tipuri de eliberare de energie, iar parametrii de intrare trebuie de aleși în urma unor studii adecvate deoarece pot produce schimbări destul de majore în caracteristicile mișcărilor simulate.

## **Bibliografie**

1. Boore DM (2003) Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure Appl Geophys* 160:635–676
2. Boore DM (2005) SMSIM—Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 2.3—a revision of OFR 96-80-A. U.S. Geological Survey Report OFR 00–509
3. Boore DM, Joyner WB (1997) Site amplifications for generic rock sites. *Bull Seismol Soc Am* 87(2):327–341
4. Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73, 1865–18943
5. [http://www.daveboore.com/software\\_online.html](http://www.daveboore.com/software_online.html)
6. Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.* 75, 4997–5009.
7. Brune, J. N. (1971). Correction, *J. Geophys. Res.* 76, 5002
8. Irikura K., Miyake H. Lecture note on Strong Motion Seismology
9. ATKINSON, G. M. (1996), The High-frequency Shape of the Source Spectrum for Earthquakes in Eastern and Western Canada, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, 106–112.
10. ATKINSON, G. M. and SILVA, W. (2000), Stochastic Modeling of California Ground Motions, *Bull. Seismol.Soc. Am.* 90, 255–274.
11. Atkinson, G. M. and Silva, W. (1997). An Empirical Study of Earthquake Source Spectra for California Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87:97–113.
12. Atkinson, G. M., and D. M. Boore (2003). Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 93, 1703–1729.
13. Atkinson Gail M., Karen Assatourians, David M. Boore, Ken Campbell, and Dariush Motazedian, A Guide to Differences between Stochastic Point-Source and Stochastic Finite-Fault Simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 6, pp. 3192–3201, December 2009, doi: 10.1785/0120090058
14. Hanks, T. C., and R. K. McGuire (1981). The character of high-frequency strong ground motion, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 2071–2095.
15. Motazedian D., Atkinson G.M., Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3, pp. 995–1010, June 2005, doi: 10.1785/0120030207

16. Hartzell, S. H. (1978). Earthquake aftershocks as Greens functions, *Geophys. Res. Lett.* 5, 1–4.
17. AKI, K. (1967), Scaling Law of Seismic Spectrum, *J. Geophys. Res.* 72, 1217–1231.
18. ANDERSON, J. G. and HOUGH, S. E. (1984), A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequencies, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 74, 1969–1993.
19. Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Onescu, M., and Rizescu, M. (2005). Hard Rock Spectral Models for Intermediate Depth Vrancea (Romania) Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95:1749–1765.
20. Sperner, B., Lorenz, F. P., Bonjer, K.-P., Hettel, S., Müller, B., and Wenzel, F. (2001). Slab Break-off – Abrupt Cut or Gradual Detachment? New Insights from the Vrancea Region (SE Carpathians, Romania). *Terra Nova*, 13:172–179.
21. Constantinescu, L., Enescu, E., Vrancea earthquakes from scientific and technologic point of view, Editura Academiei, 230p., (in Romanian), 1985
22. Onescu, M. C. and K.-P. Bonjer (1997). A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes. *Tectonophysics*, 272, 291-302.
23. Oth A, Parolai S, Bindi D, Wenzel F (2009) Source spectra and site response from S waves of intermediate-depth Vrancea, Romania, earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 99:235-254
24. Martin, M., Wenzel, F., and the CALIXTO working group (2006). High-Resolution Teleseismic Body Wave Tomography Beneath SE-Romania (II): Imaging of a Slab Detachment Scenario. *Geophys. J. Int.*, 164:579–595.
25. Wenzel F., Sperner B., Lorenz F., Mocanu V. Geodynamics, tomografic images and seismicity of Vrancea region (SE-Carpatians, Romania), EGU Stephan Mueller Special Publication Series, 3, 95–104, 2002
26. Ganas A., Grecu B., Batsi E., Radulian M., Vrancea slab earthquake triggered by static stress transfer, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2565–2577, 2010, doi:10.5194/nhess-10-2565-2010
27. V. Sokolov · K P Bonjer · F. Wenzel · B. Grecu, M. Radulian, Ground-motion prediction equations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes, *Bull Earthquake Eng* (2008) 6:367–388 DOI 10.1007/s10518-008-9065-6
28. Oth A, Bindi D, Parolai S, Wenzel F (2008) S-wave attenuation characteristics beneath the Vrancea region in Romania: new insights from the inversion of ground-motion spectra. *Bull Seismol Soc Am* 98(5):2482–2497
29. Oth A., Wenzel F., Radulian M., Source parameters of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes from empirical Green's functions modeling, *Tectonophysics* 438 (2007) 33–56

30. Pavel F, Vacareanu R (2015) Kappa and regional attenuation for Vrancea (Romania) earthquakes. J Seismol. doi:10.1007/s10950-015-9490-3
31. Pavel F., Investigation on the stochastic simulation of strong ground motions for Bucharest area, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 69 (2015) 227–232
32. Radulian M, Popa M, Carbanar OF, Rogozea M (2008) Seismicity patterns in Vrancea and predictive features. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica 43:163–173
33. Pavel F., Ciuiu D., Văcăreanu R., Site Dependent Seismic Hazard Assessment for Bucharest Based on Stochastic Simulations, The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt Part of the series Springer Natural Hazards pp 221-233,
34. P100-1/2013 Cod românesc de proiectare seismică. Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice, București România.
35. Radulian M., Mândrescu M.N., Panza G.F., Popescu E. and Utale A., 2000. Characterization of seismogenic zones of Romania, Pure Appl. Geophys., 157, 57–77.
36. Constantinescu L., Marza V.I. (1980). A computer-compiled and computer-oriented catalogue of Romania's earthquakes during a millennium (AD 984-1979), Rev. Roum. Geophys. 24, 193 – 234