

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

TEZĂ DE DOCTORAT
- REZUMAT -

Simularea accelerogramelor specifice
cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară

Doctorand:

ing. Eliza Anabella COȚOVANU

Conducător de doctorat:

prof. univ. dr. ing. Radu VĂCĂREANU

BUCUREȘTI

2020

Cuprins

1. Introducere	3
1.1. Necesitatea și obiectul lucrării	3
1.2. Conținutul lucrării	4
2. Simularea mișcărilor seismice generate de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară.	
Metode de simulare. Aspecte pro și contra	6
2.1. Simularea mișcărilor terenului produse de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 27 octombrie 2004.....	9
2.2. Simularea seismului vrâncean de adâncime intermediară din 30 august 1986	12
2.3. Concluzii metode de simulare. Aspecte pro și contra	17
3. Modelarea eliberării de energie în simularea stochastică a accelerogramelor specifice cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară. Modelarea matematică a ferestrei de formă	19
3.1. Introducere	19
3.2. Eliberarea de energie a mișcărilor seismice înregistrate în timpul cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară	19
3.3. Modelul matematic al ferestrei de modelare implementat în SMSIM și EXSIM. Determinarea parametrilor ferestrei	22
3.3.1. Modelul matematic al ferestrei de modelare implementat în SMSIM și EXSIM.....	22
3.3.2. Determinarea parametrilor ferestrei de formă specifice mișcărilor seismice produse de sursa de adâncime intermediară Vrancea	24
3.4. Definirea unei ferestre cu două intervale pentru modelarea eliberării de energie specifice cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară.....	26
3.4.1. Modelarea funcției-anvelopă - problema continuității și a derivabilității.....	26
3.4.2. Definirea intervalelor ferestrei de modelare a zgomotului alb.....	27
3.4.3. Definirea funcției-anvelopă cu două intervale după Sharagoni și Hart (1974).....	28
3.4.4. Redefinirea parametrilor pentru fereastra normalizată în timp propusă după Boore (2003)	29
3.5. Simulări în SMSIM modificat cu fereastra nou definită	30
3.6. Concluzii	32
4. Determinarea parametrilor acțiunii seismice utilizați în simularea accelerogramelor produse de sursa subcrustală Vrancea	34
4.1. Introducere	34
4.2. Locațiile cutremurelor intermediare vrâncene	35
4.3. Durata dependentă de distanță.....	37
4.4. Concluzii	39
5. Simularea mișcărilor seismice generate de cutremure de magnitudine mare produse de sursa de adâncime intermediară Vrancea.....	42
5.1. Introducere	42
5.2. Simularea mișcării terenului din amplasamentul INCERC generate de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 30 August 1986	43
5.3. Simularea mișcării terenului din amplasamentul INCERC generate de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 4 martie 1977	45
5.4. Simularea mișcărilor terenului din amplasamentul INCERC pe baza unor scenarii de cutremure specifice sursei de adâncime intermediară Vrancea.....	47
5.5. Concluzii generale.....	54
6. Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare	56
7. Bibliografie.....	59

1. Introducere

1.1. Necesitatea și obiectul lucrării

Cea mai influentă acțiune din hazard natural la care se proiectează structurile de rezistență a clădirilor în România este acțiunea seismică. Teritoriul țării are un hazard seismic influențat de zonele seismogene Vrancea intermediar, Vrancea crustal, Depresiunea Bârladului, Depresiunea Predobrogeană, Făgăraș Câmpulung, Transilvania, Danubius, Banat, Crișana Maramureș, Serbia, Gorna, Shumen, Dulovo și Shabla (Pavel, et al., 2016), România fiind considerată una din țările cu cel mai ridicat nivel de hazard seismic din Europa. Dintre aceste zone seismogene, cel mai extins efect teritorial îl are sursa de adâncime intermediară Vrancea (aceasta fiind subiectul lucrării de față), ce afectează două treimi din teritoriul țării, efectele acesteia simțindu-se din Bulgaria până în Rusia.

Pentru analiza răspunsului seismic al structurilor, codul P100-1/2013 propune trei metode de calcul: metoda forțelor seismice statice echivalente, metoda de calcul modal cu spectre de răspuns și metoda de calcul dinamic. Pentru primele două metode acțiunea seismică poate fi determinată combinând accelerația de proiectare și spectrele elastice normalizate de răspuns, însă pentru calculul dinamic acțiunea seismică trebuie descrisă de variația în timp a accelerațiilor terenului (accelerograme), fiind necesar un minim de 3 accelerograme pentru realizarea analizei.

Accelerogramele înregistrate pot fi utilizate dacă sunt compatibile cu caracteristicile sursei (tipul și mecanismul de rupere), poziția amplasamentului analizat față de hipocentru, condițiile locale de teren; valoarea de vârf a accelerației terenului trebuie să corespundă nivelului de hazard dat în P100-1/2013 (MDRAP, 2014) și conținutul de frecvențe al mișcării trebuie să fie în concordanță cu spectrul elastic de răspuns corespunzător amplasamentului analizat. Pentru utilizarea accelerogramelor înregistrate se poate utiliza un factor de scalare al valorilor accelerațiilor pentru a ajunge la nivelul de hazard propus de cod, însă valoarea acestuia trebuie să fie mai mică 2.0. Din cauza faptului că au fost înregistrate doar patru evenimente seismice cu magnitudine moment minimă de 6.3, există puține accelerograme înregistrate care îndeplinesc condițiile impuse prin codul de proiectare; de aceea, de multe ori se apelează la utilizarea accelerogramelor artificiale sau simulate.

La nivel național, cele mai utilizate accelerograme sunt cele artificiale deoarece se obțin relativ simplu printr-o metodă de potrivire a spectrelor acestora cu spectrul de răspuns elastic pentru accelerații din amplasamentul de interes. Avantajul este că generarea acestora nu necesită o cunoaștere aprofundată a fenomenelor fizice care produc și influențează undele seismice în parcursul lor de la sursă la amplasament, însă accelerogramele artificiale nu au o semnificație fizică reală, nestaționaritatea mișcării seismice nu este reprodusă, conținutul lor de frecvențe este nerealist și introduc o energie nerealist de mare în structură.

În aceste condiții, o alternativă pentru evitarea neconcordanțelor produse de accelerogramele artificiale este utilizarea accelerogramelor simulate care pot îndeplini cu ușurință condițiile normative fără a introduce în structură un surplus de energie, păstrându-și în același timp și însemnătatea fizică. Accelerogramele simulate se generează pe baza fenomenelor reale care produc și influențează undele seismice, însă acestea nu sunt foarte utilizate deoarece presupun o cunoaștere

aprofundată a factorilor de influență a mișcării seismice și modele de cuantificare a acestora sunt mai complexe decât în cazul accelerogramelor artificiale.

La momentul actual există patru metode de generare a accelerogramelor simulate: metoda empirică a funcțiilor Green, modelarea stochastică, modelarea numerică și metode hibride. Utilizarea unei anumite metode este dependentă de nivelul de cunoaștere al proceselor de generare și modificare a undelor seismice și de aplicabilitatea principiilor metodelor pentru zonele seismogene pentru care se realizează simulările. În prezent, modelarea stochastică este cea mai accesibilă metodă de simulare pentru zona seismogenă Vrancea intermediară. Pentru aceasta este nevoie de a cunoaște caracteristicile materialului din vecinătatea hipocentrelor (viteza și densitatea), mecanismul de focar, energia eliberată, tiparul radiației, caracteristicile spectrale ale mișcării la nivelul sursei, duratele sursei și a drumului parcurs de unde, atenuările și împrăștierea produse de mediile de propagare parcurse de unde, comportarea straturilor geologice superficiale de teren ș.a.. Însă, în anumite condiții ale nivelului de hazard, ale geologiei superficiale sau ale topografiei, abordarea stochastică nu reușește să modeleze toate fenomenele fizice care influențează undele seismice. În aceste condiții, metodele hibride care combină modelarea stochastică și cea numerică se pot utiliza pentru realizarea cu succes a unor accelerograme simulate.

În lucrarea de față este modificată și aplicată o metodă hibridă de generare a accelerogramelor simulate. Pe baza unei cercetări amănunțite, sunt realizate cu succes simulări pentru sursa de adâncime intermediară Vrancea atât pentru mișcări seismice generate de evenimente trecute, cât și pentru scenarii de cutremur definite în așa fel încât să corespundă nivelului de hazard din Codul de proiectare P100-1/2013 (MDRAP, 2014). Utilitatea accelerogramelor simulate este dată atât de posibilitatea utilizării acestora în proiectarea structurilor prin metoda de calcul dinamic, cât și de posibilitatea utilizării acestora împreună cu accelerogramele înregistrate în analize de hazard, prin simularea evenimentelor istorice neînregistrate sau prin simularea unor evenimente ipotetice posibile prin care să se poată acoperi intervalele de magnitudini neacoperite de evenimentele reale și amplasamentele în care nu există înregistrări ale mișcărilor terenului.

1.2. Conținutul lucrării

Lucrarea „Simularea accelerogramelor specifice cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară” conține 6 capitole, 3 anexe (Anexa 3 este în format electronic), 262 pagini și 170 de referințe bibliografice.

Capitolul 1 prezintă succint conținutul lucrării, obiectivul tezei și necesitatea cercetării subiectului.

Capitolul 2 prezintă metodele de simulare a accelerogramelor, stadiul actual de dezvoltare a subiectului pentru evenimentele seismice care contribuie la hazardul seismic din România, rezultatele realizării unor simulări pe baza unor metode stochastice și hibride de simulare, analize comparative ale simulărilor cu mișcările reale și aspecte pro și contra metodelor aplicate. Acest capitol conține analize ale unor parametri și modele matematice ce contribuie la generarea accelerogramelor simulate, în această etapă fiind descoperit faptul că modelul matematic de modelare a zgometului alb (ce se încarcă ulterior cu caracteristicile evenimentelor) nu surprinde specificitatea mișcărilor seismice produse de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară.

În *Capitolul 3* este prezentată o analiză a modului de eliberare a energiei descris de 361 de înregistrări ale mișcărilor seismice din timpul cutremurelor din 4 martie 1977, 30 august 1986, 30 mai 1990, 31 mai 1990 și 27 octombrie 2004. Pe baza analizei s-a observat că aproape jumătate din accelerogramele analizate prezintă un comportament de eliberare rapidă a unei cantități mari de energie, urmat de o eliberare considerabil mai lentă (aproximativ 50% din energie este eliberată în primele 1.5-3.0 s ale mișcării puternice, în timp ce restul energiei este eliberat lent în 20-40 s). Pe baza descriptorilor statistici rezultați din analiza accelerogramelor care au prezentat comportamentul anterior menționat au fost determinați parametrii fereastrei de modelare a zgomotului alb implementate în programele de simulare stochastică utilizate în teză. Observând că modelul matematic al ferestrei utilizate nu poate surprinde cele două tipuri de eliberare de energie a fost definit și implementat într-unul din programele de simulare un nou model matematic al ferestrei de modelare a zgomotului specific sursei de adâncime intermediară Vrancea. Pentru noua fereastră de modelare definită au fost determinați parametrii medii în așa fel încât să poată fi utilizată pentru scenarii ipotetice de cutremure.

Capitolul 4 conține o cercetare amănunțită a tuturor parametrilor de intrare și a modelelor de definire a fenomenelor care modifică și generează undele seismice. Pentru parametrii pentru care în literatura de specialitate s-au găsit mai multe variante de definire s-au realizat analize comparative și s-a ales modelul cel mai potrivit pentru descriere a respectivului fenomen în simulările stochastice. Pentru parametrii pentru care nu există studii specifice, sau pentru care intervalele de definiție erau prea extinse și acest lucru introducea erori în simulare, s-au realizat studii specifice și au fost definite modelele necesare definirii acestora în simulări. Tot în acest capitol au fost definite patru intervale spațiale posibile cu parametrii aferenți de definire a unor scenarii de cutremure posibile.

În *Capitolul 5* au fost realizate simulări ale mișcărilor seismice din amplasamentul INCERC (București) produse de evenimentele seismice din 4 martie 1977, 30 august 1986, patru scenarii de cutremure definite în concordanță cu scenariile maxime din Capitolul 4 și patru scenarii de cutremure definite conform principiilor de proiectare din P100-1/2013 în funcție de stări limită și clase de importanță-expunere. Pentru simulare s-a utilizat o metodă hibridă compusă dintr-o metodă stochastică modificată de simulare a accelerogramelor până la nivelul rocii de bază și o metodă numerică de simulare a comportamentului și influenței condițiilor locale de teren. Simulările realizate pe baza cutremurelor reale au avut ca scop testarea metodei și analizarea unor ipoteze privind valorile parametrilor utilizați în analiză, rezultatele acestora fiind foarte bune. Pe baza metodei verificate s-au realizat simulările unor mișcări seismice generate în concordanță cu caracteristicile unor scenarii de cutremure și au fost realizate comparații cu nivelul de hazard propus de Codul de proiectare P100-1/2013, accelerogramele simulate pe baza cerințelor de proiectare fiind anexate la teza de doctorat în format electronic.

Capitolul 6 conține concluziile generale ale lucrării, contribuțiile personale și direcțiile viitoare de cercetare.

2. Simularea mișcărilor seismice generate de cutremurile vrâncene de adâncime intermediară. Metode de simulare. Aspecte pro și contra

La momentul actual există patru metode principale de simulare a mișcărilor seismice în domeniul timp: prin modele stochastice, prin metoda funcțiilor empirice Green, folosind modele numerice bazate pe caracteristici fizice și prin metode hibride ce combină modelarea numerică, metoda funcțiilor empirice Green și modelarea stochastică.

Metoda empirică a funcțiilor Green

Având în vedere că un cutremur de magnitudine mare este caracterizat de o suprafață mare de rupere și un cutremur de magnitudine mică este caracterizat de o suprafață mică de rupere, metoda empirică a funcțiilor Green se bazează pe ipoteza că o suprafață mare de rupere poate fi modelată de mai multe suprafețe mici de rupere; astfel, metoda propune modelarea cutremurului de magnitudine mare prin mai multe cutremure de magnitudini mici, considerate surse punctuale de-a lungul suprafeței de falie (rupere). Mișcarea terenului generată de evenimentul mare poate fi descrisă de suma unor mișcări generate de evenimente mici în care se iau în calcul defazajele datorate propagării ruperii și diferențele conținutului de frecvențe dintre cele două tipuri de evenimente seismice. Avantajul utilizării acestei metode este dat de faptul că mișcările seismice generate de evenimentele mici (funcțiile Green) înglobează caracteristicile geometriei de falie, caracteristicile propagării undelor și, în anumite condiții, influența condițiilor locale de teren din amplasamentul analizat. Lucrările de bază din literatura de specialitate despre metoda empirică a funcțiilor Green sunt Hartzell (1978), Kanamori (1979), Irikura (1983; 1986; 1999), Miyake et al. (2003).

Simularea stochastică a accelerogramelor

Hanks și McGuire (1981) demonstrează că accelerațiile cu frecvență înaltă pot fi descrise ca un zgomot Gaussian (cu o distribuție normală de probabilitate) pe o bandă limitată de frecvențe, 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 ipoteza că, practic, mișcările de frecvență înaltă sunt aleatoare (Hanks, 1979; McGuire & Hanks, 1980; Hanks & McGuire, 1981). Boore (1983) a generalizat abordarea precedentă pentru a permite folosirea modelor mai complexe, extinse pentru simularea seriilor de timp în care pot fi luate în considerare mai multe caracteristici ale mișcării seismice. Ecuația spectrului mișcării seismice utilizată de Boore (2003) este următoarea:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f)P(R, f)G(f)I(f) \quad (1)$$

unde M_0 – este momentul seismic, exprimat în Nm (Aki, 1966), transformarea dintre momentul seismic și magnitudinea moment fiind dată de relația $M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7$; 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 controlează tipul rezultatului.

În literatura de specialitate găsim, pentru modelarea sursei seismice, două metode: modelarea stochastică cu sursă punctiformă și modelarea stochastică cu sursă finită.

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 a factorului de atenuare dependent de frecvență (Irikura & Miyake, 2006). Metoda numerică 3D se folosește în special pentru simularea mișcărilor terenului din zona bazinelor sedimentare deoarece este singura care poate modela reflexiile și refracțiile undelor seismice. Această metodă presupune construirea unui model de viteze 3D pentru descrierea tuturor stratelor geologice parcurse de undele seismice și determinarea parametrului optim de atenuare, undele rezultate fiind 3D. Propagarea undelor este analizată într-un mediu izotrop liniar-elastic 3D și este definită prin ecuațiile pentru conservarea momentului și relațiile efort-deformație.

Metode hibride

Simularea mișcării seismice produse de un eveniment mare în apropierea sursei are o acuratețe bună dacă există o cunoaștere detaliată despre distribuția lunecării de-a lungul faliei și despre configurația geologică a stratificațiilor străbătute de undele seismice de la sursă la suprafață. Astfel, au fost dezvoltate metode hibride de simulare care combină metoda stochastică cu cea deterministă. 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 rezultă din însumarea mișcărilor de perioadă lungă și mișcărilor de perioadă scurtă după filtrarea acestora .

Aplicarea metodelor de simulare pentru sursele seismogene care contribuie la hazardul seismic din România

În România s-au realizat simulări de accelerograme doar pentru sursa de adâncime intermediară Vrancea folosindu-se metoda funcțiilor Green, metoda stochastică de simulare a seriilor de timp și metode hibride care presupun utilizarea metodei stochastice până la nivelul rocii de bază și a metodei analitice deterministe (numerice) pentru includerea influenței condițiilor locale de teren. Benetatos și Kiratzi (2004) utilizează metoda de simulare stochastică cu definirea sursei de tip falie pentru generarea mișcărilor seismice produse de cutremurul din 30 mai 1990 ($M_w=6.9$), Oth et al. (2009) utilizează metoda funcțiilor Green pentru simularea mișcărilor seismice produse de cutremurele din 4 martie 1977 ($M_w=7.4$), 30 august 1986 ($M_w=7.1$), 27 octombrie 2004 ($M_w=6.0$) și 14 mai 2005 ($M_w=5.2$), Pavel (2015) utilizează metoda stochastică cu sursă punctiformă pentru simularea mișcărilor seismice generate de cutremurele din august 1986 și mai 1990. Pavel și Văcăreanu (2015) simulează mișcările produse de cutremurele din noiembrie 1940 ($M_w=7.7$) și martie 1977 printr-o metodă hibridă ce combină metoda stochastică cu sursă tip punct și o metodă numerică pentru cuantificarea efectelor condițiilor locale de teren. Poiată și Miyake (2017) realizează simulări ale mișcărilor produse de cutremurele din 1977 și 2004 utilizând metoda funcțiilor empirice Green, Pavel (2017) și Pavel și Văcăreanu (2017) simulează mișcările seismice produse de evenimente ipotetice cu magnitudini moment cu valori între 5.5-7.5 utilizând metoda stochastică cu sursă de tip falie. Pavel et al. (2018) simulează mișcările seismice produse de evenimente ipotetice cu magnitudini cu valori între 5.5-7.5 utilizând metoda stochastică cu sursă de tip falie și modelarea numerică a influenței condițiilor locale. Principalele probleme ridicate în aceste lucrări sunt legate de cuantificarea efectului condițiilor locale de teren, utilizându-se diverse

metode pentru determinarea influenței acestora (prin funcții de amplificare, prin raportul spectral H/V, prin calculul impedanței sau prin utilizarea unor programe de analiză liniar-echivalentă sau dinamică neliniară a comportamentului stratelor superficiale de pământ). O neconcordanță observată în studii este reprezentată de definirea parametrului tensiunii de forfecare care în lucrarea lui Oth et al. (2009) este considerat cu o valoare de ordinul a 1000 bari, iar în literatura de specialitate acesta este găsit având valori de aproximativ 10 ori mai mici.

În acest capitol, pentru determinarea celei mai bune metode de simulare a mișcărilor seismice specifice cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară, au fost realizate seturi de simulări pentru generarea de accelerograme în amplasamentul INCERC (București) utilizând caracteristicile cutremurelor din 27 octombrie 2004 ($M_w=6.0$, $h=105$ km) și din 30 august 1986 ($M_w=7.1$, $h=131$ km). Pentru definirea condițiilor locale de teren au fost utilizate metoda H/V, metoda contrastului de impedanță și descrierea comportamentului neliniar al stratelor superficiale de teren. De asemenea pentru cutremurul din 2004 s-a realizat o analiză asupra parametrului tensiunii de forfecare. Cutremurul din 2004 a fost ales ca eveniment țintă deoarece comportamentul neliniar al stratificației geologice superficiale specifice amplasamentului INCERC (București) din timpul acestui cutremur poate fi neglijat. Pe baza acestor simulări au fost realizate analize comparative între metodele stochastice cu sursă de tip punct, de tip falie și metodele hibride formate din cele două metode stochastice și metoda numerică de cuantificare a influenței condițiilor locale de teren.

Pentru realizarea simulărilor s-au utilizat programele de simulare SMSIM (Boore, 2005), EXSIM (Motazedian & Atkinson, 2005), SITEAMP (Boore, 2005; Boore & Joyner, 1997) și DEEPSOIL (Hashash, et al., 2016). Primele două seturi de programe folosesc metoda stocastică pentru simularea mișcărilor seismice, în SMSIM sursa fiind definită punctiform, iar în EXSIM de tip falie. Ultimele două programe de calcul modelează modificările mișcărilor seismice care apar din cauza condițiilor locale de amplasament. Parametrii rezultați din utilizarea setului de programe SITEAMP (rezultatul fiind amplificarea calculată prin impedanță, dată de comportamentul liniar al terenului) sunt introduși în SMSIM și EXSIM, în timp ce accelerogramele de la nivelul rocii de bază realizate cu SMSIM și EXSIM sunt introduse în DEEPSOIL - prin care se cuantifică influența comportamentului neliniar al stratificației geologice superficiale.

În cele două seturi de programe, SMSIM și EXSIM, condițiile locale de teren sunt modelate folosind două funcții, o funcție de amplificare și o funcție de atenuare dependentă de frecvență. Pentru simulările pur stochastice s-a folosit o funcție de amplificare determinată prin metoda raportului H/V (raportul spectrelor Fourier ale mișcărilor pe direcție orizontală, respectiv verticală) și o alta determinată prin contrastul de impedanță utilizând subprogramul NRATTLE din setul de programe SITEAMP. Însă, pentru cutremurele medii și mari, unele tipuri de strate de pământ își pot modifica proprietățile (prin creșterea presiunii interstițiale, creșterea sau pierderea rezistenței la forfecare, creșterea densității, lichefiere, etc.), iar în aceste condiții trebuie luat în calcul comportamentul neliniar al stratelor de pământ. Din acest motiv, pentru efectuarea analizei neliniare în domeniului de timp, a fost utilizat programul DEEPSOIL, un program de analiză unidimensională a răspunsului terenului.

Pentru ambele programe de simulare stocastică, spectrul mișcării seismice și fereastra de modelare a zgomotului alb, cu excepția spectrului sursei, se definesc utilizând același tip de

parametri și același tip de modelare a fenomenelor care influențează unda seismică. Spectrul mișcării seismice $Y(M_0, R, f)$ (ecuația 1) este format din trei componente ce conțin caracteristicile mecanismului de faliere (rupere) $E(M_0, f)$, influența mediilor de propagare străbătute de undă $P(R, f)$ și influența condițiilor locale de amplasament $G(f)$.

2.1. Simularea mișcărilor terenului produse de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 27 octombrie 2004

Cutremurul din 27 octombrie 2004 face parte din categoria cutremurelor mijlocii având o magnitudine moment de 6.0 cu adâncimea de focar de 105.4 km și epicentru la 45.84° latitudine N și 26.63° longitudine E (Radulian, et al., 2019). Dimensiunile planului de rupere (faliei seismice), conform Oth et al. (2007), au fost de 1.2 x 1.8 km, iar parametrul tensiunii de forfecare (stress drop) a fost de 75 bari (Ganas, et al., 2010). Din punct de vedere al mecanismului de focar, conform Ganas et al. (2010), cutremurul a fost produs pe un plan de rupere (strike) de 219°, înclinația faliei fiind de 81° (dip), cu o orientare a mișcării faliei atârnată de 107° (rake).

Pentru viteza medie a undelor de forfecare β_s și densitatea ρ din apropierea sursei, în literatura de specialitate, există mai multe variante, astfel Martin et al. (2006) propune $\beta_s = 4.5$ km/s și densitatea $\rho = 3.2$ g/cm³, iar Sokolov (2008) propune $\beta_s = 3.8$ km/s și densitatea $\rho = 2.8$ g/cm³. Din rațiuni de calibrare, în simulare s-a considerat viteza medie a undelor de forfecare $\beta_s = 4.5$ km/s, iar densitatea $\rho = 2.8$ g/cm³. Pentru calculul constantei C s-au considerat următoarele valori: $\langle R_{\theta\phi} \rangle$ tiparul mediu al radiației 0.6, conform Oth et al. (2008), componenta orizontală V a energiei totale a undelor de forfecare dată de descompunerea pe două direcții fiind $1/\sqrt{2}$, efectul suprafeței libere este 2, iar distanță de referință a fost considerată 1 km.

Pentru calculul împrăștierii și atenuării, Pavel și Văcăreanu (2015) au observat o potrivire bună a împrăștierii, pentru frecvențe lungi și medii, de forma $1/R^{0.5}$, unde $R = \sqrt{D^2 + h^2}$.

Pentru distanța de la sursă la amplasament au fost realizate câte două seturi de simulări (considerând $D = 154$ km - distanța epicentrală față de București- și $h = 105.4$ km) unul pentru $R = 186$ km și altul pentru $R_{\text{eff}} = 191$ km - distanță efectivă care ia în calcul geometria faliei (rezultat în urma folosirii executabilului reff.exe din cadrul setului de programe SMSIM). În ceea ce privește atenuarea, în Pavel și Văcăreanu (2015) a fost determinată ca având forma $Q(f) = 100 \times f^{1.20}$.

Pentru modelarea diminuării efectelor, Radulian et al. (2000) au observat o dependență semnificativă a parametrului de magnitudinea cutremurelor și de condițiile locale de amplasament. De exemplu, pentru zona Bucureștiului valoarea medie k_0 este 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 simulare, valorile parametrului kappa au fost considerate cele din lucrarea Pavel și Văcăreanu (2015) care au folosit metoda de estimare propusă de Anderson și Housh (1984), valoarea parametrului kappa fiind dată de următoarea ecuație: $k = k_{\text{event}} + k_0$, unde $k_{\text{event}} = 0.022M_w - 0.127$. Un alt studiu, realizat de Sokolov et al. (2008), furnizează o relație pentru parametrul kappa de forma $k = 0.01M_w$. Durata surselor a fost considerată conform Boore (2003), iar durata dependentă de cale a fost considerată 0.0868 conform Pavel (2015). Pentru profilul undelor de forfecare pentru amplasamentul INCERC (București) a fost utilizată stratificația propusă de Constantinescu și Enescu (1985).

Pentru definirea spectrului sursei de tip punct (SMSIM) există trei tipuri de definire: printr-un spectru cu o singură frecvență de colț, printr-un spectru aditiv cu două frecvențe de colț și printr-un spectru multiplicativ cu două frecvențe de colț, caracteristicile comune ale modelelor fiind 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.

Din punct de vedere al sursei s-au realizat simulări pentru 3 tipuri de spectre ale sursei: cu o singura frecvență de colț (Sursa 1, S1), și cu două frecvențe de colț cu spectru multiplicativ (Sursa 11, S11) și aditiv (Sursa 12, S12). Pentru definirea surselor s-au utilizat modelele: ω^2 pentru Sursa 1 (Brune, 1970; 1971), H96 pentru Sursa 11 (Haddon, 1996) și AB95 pentru Sursa 12 (Atkinson & Boore, 1995) (tabel 2), iar frecvența de colț a fost definită conform Gusev et al. (2002) în funcție de magnitudine conform relației $M_w = -2\log(f_c) + 4.84$. Pentru acest tip de simulare au fost realizate mai multe seturi de simulări în care au fost testate diverse ipoteze pentru parametrul tensiunii de forfecare, alegerea tipului de distanță sursă-amplasament, fereastra de formă prin care se modelează eliberarea de energie și modalitatea de definire a profilelor de amplificare a condițiilor locale de teren. Rezultatele ultimului set de simulări sunt prezentate în figura 1 și tabelul 1 (în final a fost utilizată doar distanța efectivă).

Utilizând metoda stochastică cu sursă de tip falie implementată în programul EXSIM s-au realizat două tipuri de simulări pentru fiecare profil de amplificare a condițiilor locale de teren. Într-un tip de simulare au fost utilizate subfalii statice, iar în celălalt tip de simulare s-au definit 50% din subfalii ca fiind pulsante (această definire elimină dependența simulărilor de numărul subfaliilor). Rezultatele sunt prezentate în figurile 2 și 3 și tabelul 2.

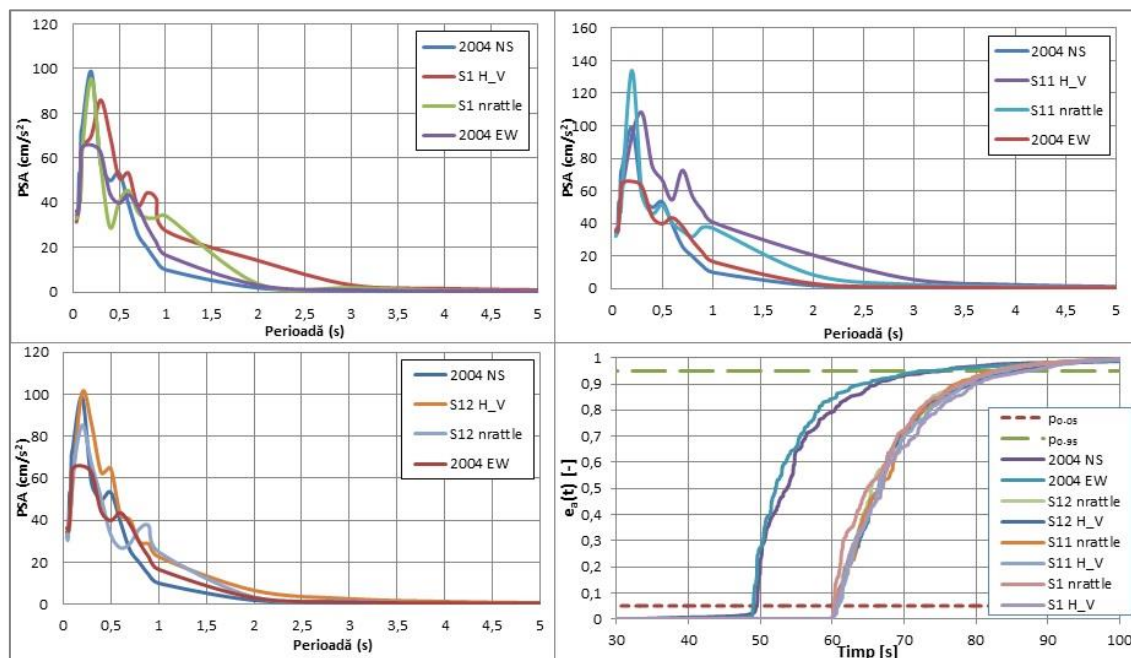


Figura 1. Comparație între energiile cumulative normalizate și spectrele de răspuns ale simulărilor și cele ale mișcărilor seismice din 27 octombrie 2004 înregistrate la stația INCERC București - pentru simulările finale realizate cu sursele S1, S11, S12 (Coțovanu, 2018)

Tabel 1. Caracteristicile mișcărilor simulate cu SMSIM pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 (Coțovanu, 2018)

Tip simulare	medie PGA (cm/s ²)	PGA simulare analizată (cm/s ²)	Durată sursă (s)	Durată drum (s)	Durată totală (s)	Durată semnificativă (s)	Rădăcina medie pătratică (cm/s ²)
S1 H/V	39.7	29.8	1.91	16.92	18.83	22.88	7.9
S1 nrattle	33.1	30.9	1.91	16.92	18.83	22.40	7.1
S11 H/V	42.7	33.6	1.51	16.92	18.43	23.97	9.4
S11 nrattle	34.8	29.6	1.51	16.92	18.43	21.95	8.0
S12 H/V	36.4	31.1	1.94	16.92	18.86	25.04	7.4
S12 nrattle	31.2	29.4	1.94	16.92	18.86	22.11	6.8

Tabel 2. Caracteristicile mișcărilor simulate cu EXSIM pentru cutremurul din 27 octombrie 2004 (Coțovanu, 2018)

Tip simulare	PGA (cm/s ²)	Durata semnificativă (s)	Rădăcina medie pătratică (cm/s ²)
2004 NS	29.8	25.65	5.0
2004 EW	30.9	24.80	4.4
EXSIM static nrattle	33.1	11.67	8.1
EXSIM static H/V	35.9	11.11	10.2
EXSIM pulse 50% nrattle	27.8	11.35	7.0
EXSIM pulse 50% H/V	25.5	12.23	7.9

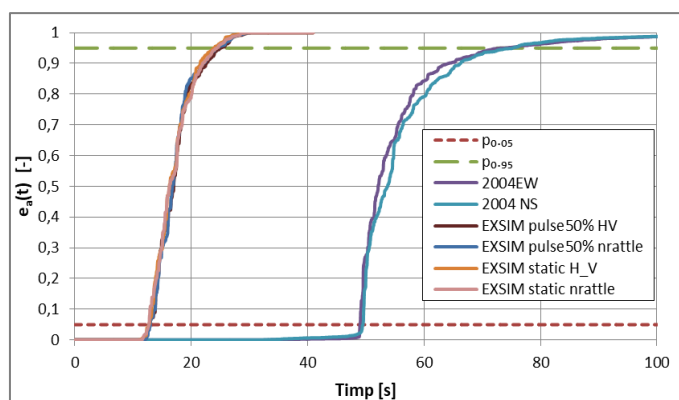


Figura 2. Comparație între energiile cumulate normalizate simulate în EXSIM și cele ale înregistrărilor cutremurului din 27 octombrie 2004 la stația INCERC București (Coțovanu, 2018)

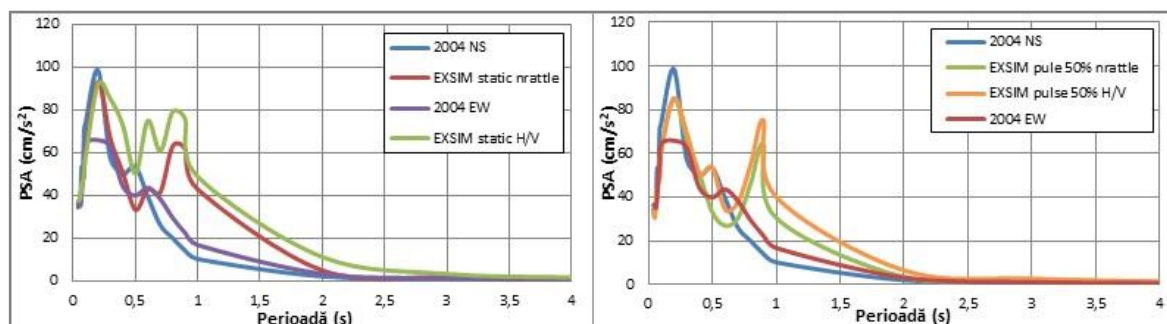


Figura 3. Comparație între spectrele de răspuns ale înregistrărilor cutremurului vrâncean din 27 octombrie 2004 la stația INCERC București și spectrele de răspuns ale simulărilor realizate în EXSIM utilizând subfalii statice și subfalii pulsante (Coțovanu, 2018)

Constatări

Simulările stocastice folosind SMSIM estimează corect forma spectrală și accelerația de vârf ale mișcărilor seismice reale; din punctul de vedere al intensității, mișcarea simulată este practic de 1.5 ori mai mare. Simulările EXSIM amplifică considerabil mișcarea în intervalul de perioade de 0.5-1.0 s, dar estimează bine amplitudinile corespunzătoare perioadelor mici, intensitatea mișcărilor fiind de asemenea de 1.5-2.0 ori mai mare.

Pentru mișcările terenului generate de cutremurele medii produse de sursa de adâncime intermediară, simulările realizate prin metodele stocastice cu definirea funcției de tip punctiform și falie (realizate cu programele SMSIM și EXSIM) aproximează bine componentele spectrale corespunzătoare perioadelor mai mici de 0.5 s. Prin definirea sursei de tip punctiform și definirea sursei printr-un spectru aditiv cu două frecvențe de colț, accelerogramele simulate estimează bine mișcarea reală pe tot spectrul pe perioade 0-4 s.

Eliberarea energiei printr-un segment de eliberare bruscă și unul de eliberare progresivă și lentă nu a fost surprins de niciun tip de simulare.

2.2. Simularea mișcărilor terenului produse de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 30 august 1986

Cutremurul din 30 august 1986 face parte din categoria cutremurelor mari având o magnitudine moment de 7.1, focarul fiind la o adâncime de focar de 131 km (Radulian, et al., 2019). Simularea mișcărilor seismice generate de acest cutremur a fost realizată în principal pentru a cerceta variantele prin care se pot cuantifica influențele condițiilor locale de teren în situațiile în care stratele geologice superficiale au un comportament neliniar.

În următoarele lucrări de cercetare autorii au realizat simulări ale mișcărilor seismice generate de cutremure vrâncene care induc neliniaritate în stratele superficiale de pământ prin metode pur stocastice sau la care au adăugat metode numerice pentru cuantificarea influenței condițiilor locale de teren: Benetatos și Kiratzi (2004) au realizat simulări utilizând programul FINSIM (Beresnev & Atkinson, 1998) – o versiune mai veche a programului EXSIM, Pavel (2015) a folosit SMSIM, Pavel și Văcăreanu (2015) au generat accelerograme utilizând programele SMSIM și STRATA (Kotke & Rathje, 2009) - un program de analiză echivalent liniară a răspunsului terenului, Pavel (2017), Pavel și Văcăreanu (2017) au utilizat doar programul EXSIM și Pavel et al. (2018) folosind EXSIM și DEEPSOIL - un program de analiză dinamică neliniară a răspunsului terenului (Hashash, et al., 2016).

Pentru a analiza metodele de simulare a accelerogramelor din punct de vedere al cuantificării efectelor condițiilor locale de teren, au fost realizate simulări pentru amplasamentul INCERC utilizând metodele stocastice cu sursă punctiformă SMSIM și cu sursă de tip falie EXSIM în care amplificările terenului au fost definite prin metoda H/V și prin metoda contrastului de impedanță și utilizând două metode hibride în care la metodele stocastice anterior menționate s-a adăugat o analiză neliniară a contribuțiilor condițiilor locale de teren realizată cu programul DEEPSOIL.

Dimensiunea faliei seismice conform Oth et al. (2007) a fost de 12.8x 12.6 km, iar parametrul tensiunii de forfecare a fost de 50 bari (Ganas, et al., 2010; Oncescu & Bonjer, 1997). Din punct de vedere al mecanismului de focar conform Ganas et al. (2010) și Oncescu și Bonjer (1997)

cutremurul a fost produs la un unghi de rupere (strike) de 227° , înclinația faliei fiind de 65° (dip), cu o orientare a mișcării faliei atârnată de 104° (rake). În simulări s-a considerat viteza medie a undelor de forfecare din apropierea suprafeței de rupere $\beta_s = 4.5$ km/s, iar denistatea din apropierea suprafeței de rupere $\rho = 2.8$ g/cm³ (Martin, et al., 2006; Sokolov, et al., 2008).

Împrăștierea a fost definită ca $1/R^{0.5}$ conform Pavel și Văcăreanu (2015). Pentru distanța hipocentrală s-a utilizat $R_{\text{eff}} = 182.2$ 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 $Q(f) = 100 \times f^{1.2}$ conform Pavel și Văcăreanu (2015). Pentru aplicație valorile parametrului kappa au fost considerate cele din lucrarea lui Pavel și Văcăreanu (2015) $k = k_{\text{event}} + k_0$, unde $k_{\text{event}} = 0.022M_w - 0.127$. Durata surselor a fost definită conform Boore (2003), iar durata dependentă de cale conform Pavel (2015).

Din punct de vedere al amplificării condițiilor de teren în simulări au fost utilizate 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. Comportamentul nelinier al terenului a fost simulat utilizând programul DEEPSOIL pentru profilul definit de Constantinescu și Enescu (1985).

Pentru definirea spectrului sursei de tip punct s-au realizat simulări pentru 3 tipuri de spectre ale sursei: cu o singură frecvență de colț (S1) și cu două frecvențe de colț cu spectru multiplicativă (S11) și aditivă (S12). Pentru fiecare definiție a spectrului sursei, au fost generate 400 de accelerograme folosind SMSIM cu cele două tipuri de amplificări pentru comportamentul linier al terenului. A fost analizată simularea cu cea mai apropiată valoarea de vârf a accelerației de mada setului de simulări. Rezultatele simulărilor sunt ilustrate în figura 4 și tabelul 3.

Utilizând metoda stochastică cu sursă de tip falie implementată în programul EXSIM s-au realizat două tipuri de simulări pentru fiecare profil de amplificare a condițiilor locale de teren. Într-un tip de simulare au fost utilizate subfalii statice, iar în celălalt tip de simulare s-au definit 50% din subfalii ca fiind pulsante. EXSIM returnează o singură accelerogramă. Rezultatele sunt ilustrate în figurile 5, 6 și tabelul 4.

Pentru metoda hibridă au fost realizate simulări ale mișcării seismice de la nivelul rocii de bază utilizând seturile de programe SMSIM și EXSIM, iar cu ajutorul programului DEEPSOIL s-a simulat comportamentul nelinier al terenului pentru profilul undelor de forfecare al amplasamentului INCERC propus de Constantinescu și Enescu (1985). Variația rigidității și a amortizării stratelor de pământ cu deformația specifică de forfecare a fost adoptată pentru pământurile argiloase conform Vucetic și Dobry (1991), iar pentru pământurile nisipoase conform Seed și Idriss (1970).

Pentru metoda hibridă realizată din SMSIM și DEEPSOIL, primul set de simulări a fost realizat cu accelerogramele cu valorile PGA cele mai apropiate de mediile celor câte 400 de simulări pentru fiecare tip de sursă, al doilea cu accelerogramele maxime salvate, iar al treilea cu accelerogramele cu valorile PGA minime. Rezultatele sunt ilustrate în figura 7 și tabelul 3. Având în vedere faptul că rezultatul programului EXSIM este dat printr-o singură realizare pentru simulările hibride realizate cu acest program și DEEPSOIL, setul de simulări conține o

accelerogramă pentru sursa statică și o accelerogramă pentru sursa pulsantă. Rezultatele pot fi văzute în figura 8 și tabelul 4.

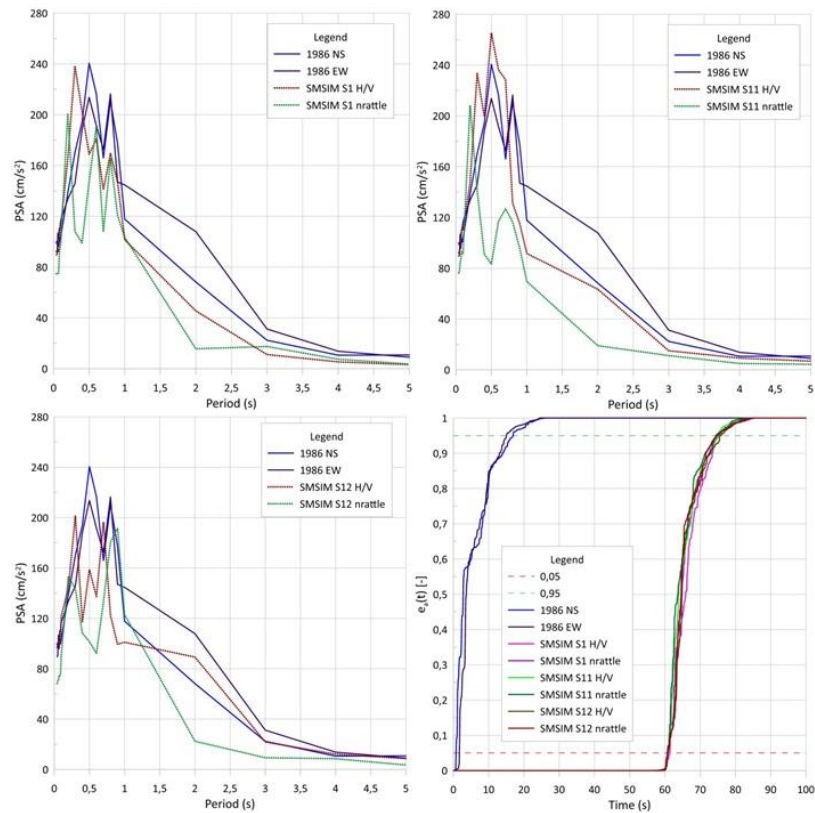


Figura 4. Comparație între energiile cumulative normalizate și spectrele simulărilor realizate cu SMSIM și cele ale înregistrărilor cutremurului din 30 august 1986 la stația INCERC București (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

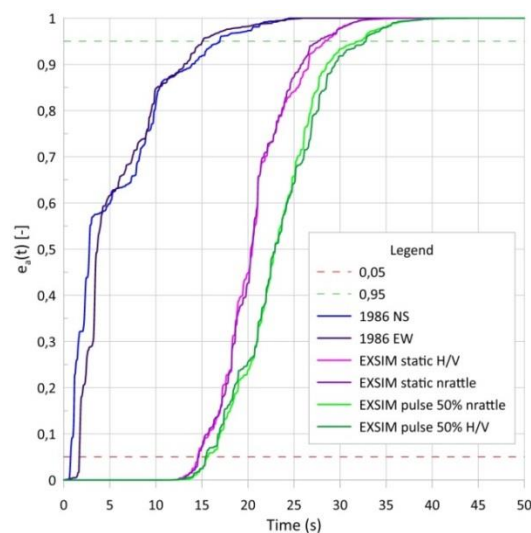


Figura 5. Comparație între energiile cumulative normalizate simulate în EXSIM și cele ale înregistrărilor cutremurului din 30 august 1986 la stația INCERC București (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

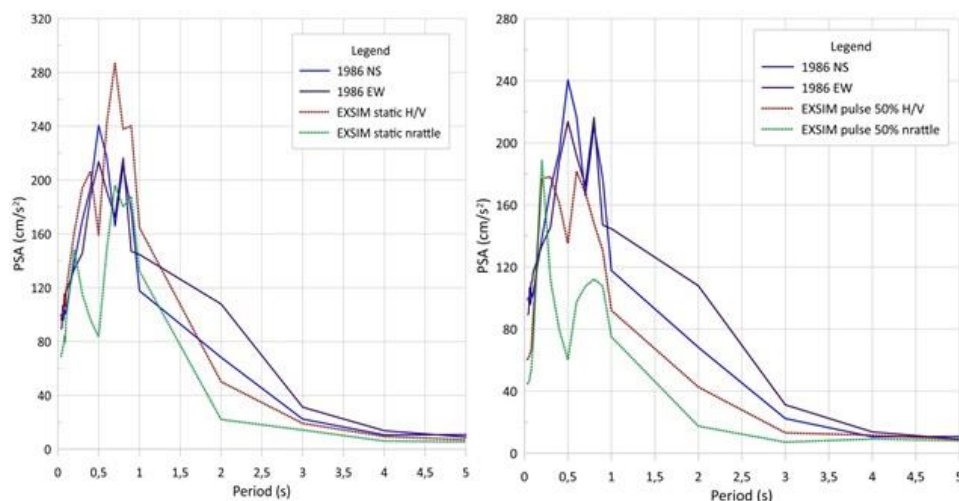


Figura 6. Comparație între spectrele de răspuns ale înregistrărilor cutremurului vrâncean din 30 august 1986 la stația INCERC București și spectrele de răspuns ale simulărilor realizate în EXSIM utilizând subfalii statice (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

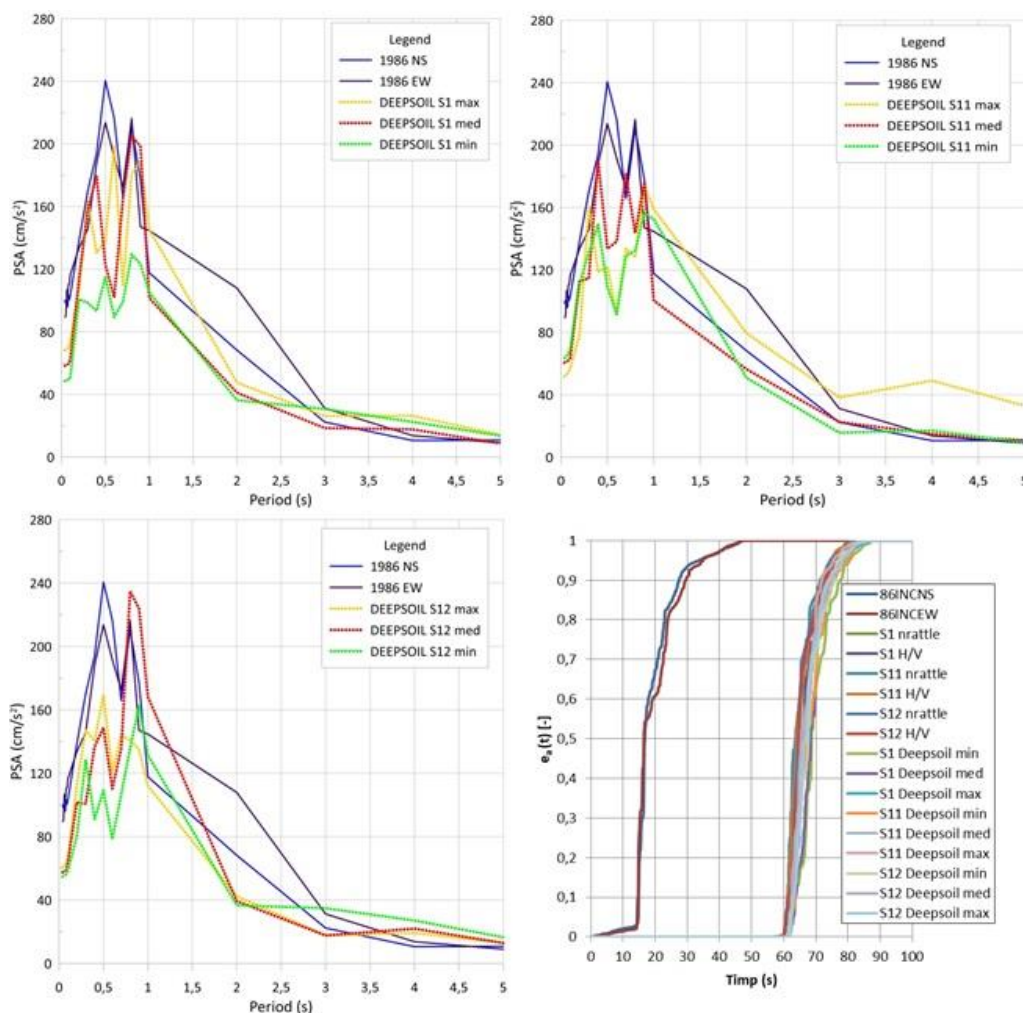


Figura 7. Comparație între energiile cumulate normalizate spectrele de răspuns ale înregistrărilor cutremurului vrâncean din 30 august 1986 la stația INCERC București și spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu SMSIM cu DEEPSOIL pentru sursa S11 pentru accelerogramele simulate la nivelul rocii de bază cu valoarea de vârf maximă, minimă și medie (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

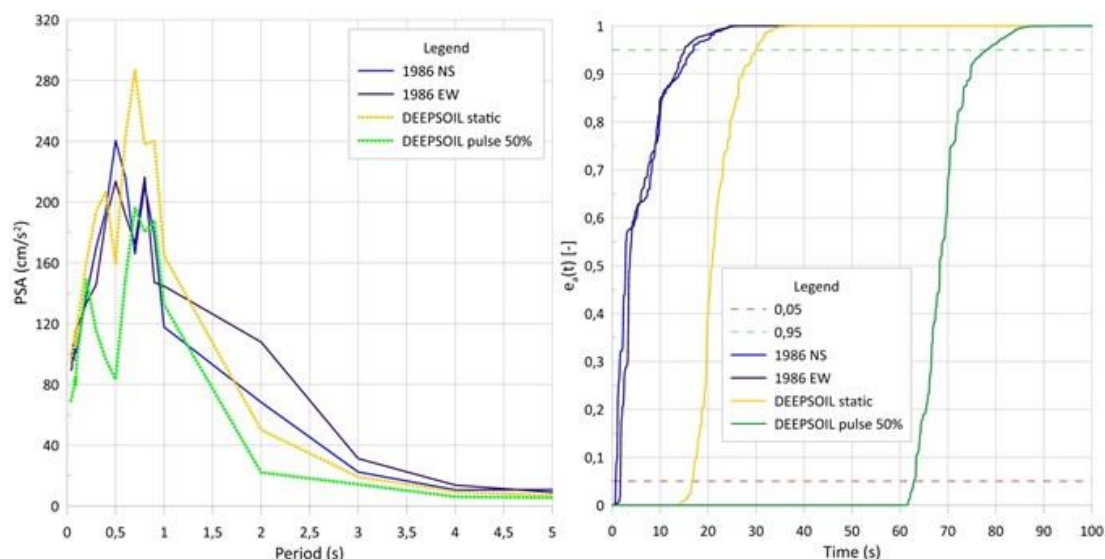


Figura 8. Comparație între energiile cumulative normalizate ale înregistrărilor cutremurului vrâncean din 30 august 1986 la stația INCERC București și spectrele de răspuns ale simulărilor realizate cu EXSIM și DEEPSOIL pentru sursă cu subfalii statice și pulsante (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

Tabel 3. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 30 august 1986 (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

Tip simulare	PGA simulare analizata (cm/s ²)	Durată semnificativă (s)	Arms (cm/s ²)	DsNS-DsSIM	DsEW-DsSIM	DsMediu-DsSIM	ArmsSIM/ArmsNS	ArmsSIM/ArmsEW	ArmsMediu/ArmsSIM
1986 NS	96.9	18.9	20.8	0	-1.58	-0.79	1.00	0.92	0.96
1986 EW	109.1	20.48	19.0	1.58	0	0.79	1.09	1.00	1.05
S1 H/V	88.7	13.86	22.1	-5.04	-6.62	-5.83	0.94	0.86	0.90
S1 nrattle	59.5	14.38	16.7	-4.52	-6.10	-5.31	1.24	1.14	1.19
S11 H/V	90.1	14.21	23.1	-4.69	-6.27	-5.48	0.90	0.82	0.86
S11 nrattle	65.3	14.30	15.3	-4.6	-6.18	-5.39	1.36	1.25	1.30
S12 H/V	89.9	14.94	20.4	-3.96	-5.54	-4.75	1.02	0.94	0.98
S12 nrattle	66.4	13.64	15.5	-5.26	-6.84	-6.05	1.34	1.22	1.28
DEEPSOIL S1 max	67.9	16.69	17.6	-2.21	-3.79	-3.00	1.18	1.08	1.13
DEEPSOIL S1 min	48.5	17.47	13.3	-1.43	-3.01	-2.22	1.56	1.43	1.50
DEEPSOIL S1 med	58.0	15.73	17.2	-3.17	-4.75	-3.96	1.21	1.11	1.16
DEEPSOIL S11 max	51.1	13.34	18.3	-5.56	-7.14	-6.35	1.13	1.04	1.09
DEEPSOIL S11 min	63.0	16.81	16.5	-2.09	-3.67	-2.88	1.26	1.15	1.20
DEEPSOIL S11 med	60.1	15.21	16.2	-3.69	-5.27	-4.48	1.29	1.18	1.23
DEEPSOIL S12 max	60.2	15.80	16.9	-3.1	-4.68	-3.89	1.23	1.13	1.18
DEEPSOIL S12 min	54.4	15.36	15.5	-3.54	-5.12	-4.33	1.34	1.23	1.29
DEEPSOIL S12 med	57.1	15.69	18.1	-3.21	-4.79	-4.00	1.15	1.05	1.10

Tabel 4. Caracteristicile mișcărilor simulate pentru cutremurul din 30 august 1986 (Coțovanu & Vacareanu, 2019)

Tip simulare	PGA (cm/s ²)	Durată semnifi- cativă (s)	Arms (cm/s ²)	DsNS- DsSIM	DsEW- DsSIM	DsMediu- DsSIM	ArmsSIM/ ArmsNS	ArmsSIM/ ArmsEW	ArmsMediu /ArmsSIM
1986 NS	96.9	18.9	20.8	0.00	-1.58	-0.79	1.00	0.92	0.96
1986 EW	109.1	20.48	19.0	1.58	0.00	0.79	1.09	1.00	1.05
EXSIM static nrattle	66.9	12.93	18.0	-5.97	-7.55	-6.76	1.15	1.06	1.11
EXSIM static H/V	94.3	13.79	25.8	-5.11	-6.69	-5.90	0.81	0.74	0.77
EXSIM pulsat 50% nrattle	43.0	16.42	13.8	-2.48	-4.06	-3.27	1.51	1.38	1.44
EXSIM pulsat 50% H/V	59.9	17.39	19.7	-1.51	-3.09	-2.30	1.06	0.97	1.01
DEEPSOIL pulsat 50%	71.6	15.11	22.1	-3.79	-5.37	-4.58	0.94	0.86	0.90
DEEPSOIL static	58.3	13.45	17.6	-5.45	-7.03	-6.24	1.18	1.08	1.13

Constatări

Realizarea unor simulări în care se ia în calcul comportamentul neliniar al pamânturilor duce la o aproximare mai bună a mișcării pentru perioade mai mici de 1.1 s, însă pentru aproape toate tipurile de simulări amplitudinile corespunzătoare perioadelor mai mari de 1.1 s sunt subestimate.

Comportamentul neliniar al stratelor de pământ duce la o micșorare a valorilor de vârf, ceea ce înseamnă că la nivelul rocii de bază se înregistrează mișcări seismice mai mari decât cele rezultate din simulările realizate cu SMSIM și EXSIM.

Mișcarea simulată doar cu SMSIM și EXSIM depinde foarte mult de modul în care se alege modelarea comportamentului stratelor de pământ ce alcătuiesc condițiile locale de teren, ceea ce poate produce erori în alegerea profilului de amplificări (din cauza numărului limitat de puncte în care se poate introduce amplificarea). Această limitare poate duce la o alegere a profilelor de amplificare a condițiilor locale de teren potrivită realității urmărite, dar care nu are neapărat o justificare fizică.

Modul de eliberare a energiei în două trepte nu este surprins de niciun tip de simulare. O modelare a eliberării energiei mai apropiată de cea reală (surprinderea comportamentului de puls) poate duce la o mărire a valorilor de vârf a mișcării la baza rocii de bază, crescând astfel și valorile de vârf de la suprafața terenului după modelarea comportamentului neliniar.

2.3. Concluzii metode de simulare. Aspecte pro și contra

S-au realizat simulări pentru mișcările de teren din amplasamentul INCERC (București) generate de două cutremure vrâncene de adâncime intermediară, 27 octombrie 2004 (eveniment mediu) și 30 august 1986 (eveniment mare). Pentru realizarea simulărilor s-au utilizat programele de simulare SMSIM (Boore, 2005), EXSIM (Motazedian & Atkinson, 2005), SITEAMP (Boore & Joyner, 1997; Boore, 2005) și DEEPSOIL (Hashash, et al., 2016). Primele două seturi de programe conțin metoda stochastică de simulare a mișcărilor seismice, în SMSIM sursa fiind definită punctiform, iar în EXSIM de tip falie. Condițiile locale de teren au fost descrise prin funcții de amplificare determinate prin metoda H/V și prin metoda contrastului de impedanță (cu programul

SITEAMP - nrattle) și, pentru simularea mișcărilor produse de evenimentul mare, prin descrierea comportamentului neliniar al straturilor superficiale de teren utilizând programul DEEPSOIL. Pe baza acestor simulări au fost realizate analize comparative între metodele stochastice cu sursă de tip punct, de tip falie și metodele hibride formate din cele două metode stochastice și metoda numerică de cuantificare a influenței condițiilor locale de teren.

S-au constatat următoarele:

- a. Parametrul tensiunii de forfecare modifică valorile de vârf ale mișcării, conținutul de frecvențe al spectrului de amplitudini și durata sursei.
- b. Utilizarea distanței efective sursă-amplasament R_{eff} care ține cont de mecanismul de focar conduce la o aproximare mai bună a mișcărilor seismice.
- c. Duratele semnificative și accelerațiile medii pătratice sunt foarte sensibile la fereastra utilizată pentru modelarea zgomotului alb.
- d. Accelerația medie pătratică este influențată semnificativ și de profilul de amplificări folosit.
- e. Împrăștierea geometrică influențează mult valorile de vârf ale mișcării.
- f. 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 o fereastră de formă pe două intervale, cu două pante.
- g. 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 mutându-le către perioade mai lungi.
- h. Pentru seismul din 2004 sursa 12 (spectru aditiv cu două frecvențe de colț) este cel mai puțin influențată de profilul de amplificări al condițiilor locale de teren.
- i. Pentru cutremurele mari simularea pur stochastică nu surprinde comportamentul neliniar al terenului. Modelarea comportamentului neliniar al terenului duce la rezultate mai bune din punct de vedere spectral, dar din punct de vedere al accelerațiilor de vârf subestimează mișcarea din cauza eliberării de energie determinate de transformările intrinseci ale pământului. Pentru evenimentul mare mișcarea de la nivelul rocii de bază este cel mai probabil mai mare ca amplitudini.
- j. Pentru obținerea unor simulări care să descrie mai bine realitatea este nevoie de realizarea unei cercetări mai amănunțite a tuturor parametrilor pe baza cărora se generează simulările.

3. Modelarea eliberării de energie în simularea stocastică a accelerogramelor specifice cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară. Modelarea matematică a ferestrei de formă

3.1. Introducere

Simularea stocastică în domeniului timp implică generarea unui zgomot alb sau a unui zgomot Gaussian pentru o durată corespunzătoare duratei mișcării seismice, modelarea acestuia printr-o fereastră de formă care controlează distribuția energiei în domeniul timpului, transformarea și normalizarea zgomotului în domeniul frecvențelor, înmulțirea acestuia cu spectrul mișcării și transformarea lui înapoi în domeniul timpului (Boore, 2003). Specificitatea și caracteristicile mișcării seismice sunt implementate prin fereastra de modelare și spectrul mișcării. Spectrul mișcării este împărțit în patru componente care conțin caracteristicile sursei, influența drumului parcurs de undele seismice, modificările produse de condițiile locale de teren și un filtru care controlează tipul rezultatului (accelerogramă, vitezogramă sau seismogramă).

În urma realizării simulărilor pentru cele două cutremure vrâncene de adâncime intermediară din 27 octombrie 2004 (eveniment mediu) și 30 august 1986 (eveniment mare) utilizând seturile de programe realizate de Boore SMSIM versiunea 7.04 (Boore, 2005) și EXSIM (Motazedian & Atkinson, 2005) s-a constatat, printre altele, că duratele semnificative și accelerațiile medii pătratice ale simulărilor sunt foarte sensibile la alegerea ferestrei de formă prin care se îngustează zgomotul alb și că ferestrele de modelare implementate în programe nu pot modela specificitatea mișcărilor țintă (în care până la 35-55% din energie este eliberată brusc, în mai puțin de 5 secunde după ce se atinge limita de 5% din energia cumulativă, restul energiei, până la 95%, fiind eliberat treptat în 20-40 de secunde). Programele au implementat două tipuri de ferestre de modelare: de tip box și exponențială; în simulări a fost utilizată doar fereastra exponențială deoarece aceasta dă accelerogramelor o formă mai realistă.

Acest capitol conține două etape principale: o primă etapă în care se analizează un set de 371 de componente orizontale ale mișcărilor seismice înregistrate la diferite stații în timpul a cinci cutremure vrâncene de adâncime intermediară cu magnitudinea moment de cel puțin 6.0 (4 martie 1977, 30 august 1986, 30 mai și 31 mai 1990, 27 octombrie 2004) pentru a cerceta dacă eliberarea de energie observată anterior poate fi găsită și în alte locații pentru alte evenimente seismice și o etapă finală în care se caută o fereastră potrivită pentru eliberarea observată a energiei.

3.2. Eliberarea de energie a mișcărilor seismice înregistrate în timpul cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară

Pentru a cerceta dacă eliberare de energie observată anterior a fost specifică numai stației INCERC (București), a fost analizată o bază de date care conține 371 componente orizontale ale mișcărilor seismice înregistrate la diferite stații seismice în timpul celor cinci cutremure cu magnitudini moment mai mari sau egale cu 6.0 produse de sursa de adâncime intermediară Vrancea. Metadatele acestor evenimente seismice, precum și numărul de înregistrări analizate pentru fiecare eveniment sunt prezentate în tabelul 5. Locațiile stațiilor și epicentrele cutremurelor sunt ilustrate în figura 9. Pentru că s-a urmărit să se cerceteze dacă modelul de eliberare a energiei observat poate fi

găsit în alte locații și în timpul altor cutremure medii și mari, baza de date conține accelerograme nesortate în funcție de condițiile locale de teren sau de distanța sursă-amplasament.

După procesarea energiilor normalizate cumulative ale celor 371 de componente orizontale ale mișcărilor terenului (fracțiunea analizată fiind de 0.05-0.95, adică pe segmentul duratei semnificative), au rezultat cinci tipuri de modele (comportamente) de eliberare a energiei, clasificat în: categoria A sau categoria „funcție” (model de eliberare de energie observat la mai mult de jumătate din înregistrări) și categoria B sau categoria „excepții” cu excepții de tip I, II, III și IV (figura 10). Categoria A (cea mai frecventă) conține înregistrări în care evoluția în timp a energiilor cumulative are o primă eliberare bruscă de energie și apoi o eliberare de energie lentă, progresivă; categoria B, excepții tip I conține înregistrările în care eliberarea bruscă a energiei se manifestă pentru mai mult de aproximativ 70-80% din energia totală eliberată (procentul depinde de comportamentul energiilor cumulative intra-eveniment), excepțiile de tip II au o eliberare de energie mai lentă decât normal pe al doilea segment (normal se referă la un comportament similar intra-eveniment), excepțiile de tip III au mai mult de două segmente de eliberare bruscă și lentă a energiei, iar tipul IV are o eliberare lentă de energie de la începutul până la sfârșitul duratei efective. În cele din urmă, în categoria A au rămas 169 de înregistrări, pentru care s-au determinat parametri funcției-fereastră. În categoria B, setul de excepții de tip I conține 45 de accelerograme, tipul II conține 25, setul de excepții de tip III conține 120 de înregistrări, iar tipul IV conține 12 înregistrări.

Tabel 5. Caracteristicile cutremurelor analizate confor catalogului ROMPLUS (Radulian, et al., 2019)

Nr. crt.	Data	Epicentru Latitudine (°N)	Epicentru Longitudine (°E)	Adâncime focar (km)	Moment magnitudine Mw	Nr. înregistrări	Abrevieri evenimente
1	04.03.1977	45.77	26.76	94	7.4	2	1977
2	30.08.1986	45.52	26.49	131.4	7.1	85	1986
3	30.05.1990	45.83	26.89	90.9	6.9	108	1990-1
4	31.05.1990	45.85	26.91	86.9	6.4	66	1990-2
5	27.10.2004	45.84	26.63	105.4	6.0	110	2004

Studiul mișcărilor de teren din categoria B nu este scopul acestei lucrări, dar la prima vedere comportamentul diferit poate fi explicat de influența condițiilor locale de teren, influența topografiei, a directivității și a atenuării date de drumul parcurs de undă. Practic, excepțiile de tip I și II au același model de eliberare de energie ca cel descris de accelerogramele din categoria A, având două segmente de eliberare de energie, dar cu un procent mai mare sau mai mic de energie pentru segmentul abrupt. Excepțiile de tip III sunt cel mai probabil influențate de condițiile locale ale amplasamentului, iar în simulări nu este nevoie de o fereastră de modelare diferită de cea utilizată pentru categoria A dacă se folosește un program de analiză neliniară (de exemplu, DEEPSOIL) pentru cuantificarea comportamentului straturilor superficiale de pământ; întreruperile segmentului abrupt arată un comportament neliniar și o pierdere a energiei în acest proces, iar cu o mișcare adecvată la nivelul rocii de bază (care poate fi obținută cu simulări stochastice) și un profil de teren bine descris, programul de analiză a comportamentului neliniar al condițiilor locale de teren va simula modificările. Excepțiile de tip IV pot fi simulate cu fereastra de modelare implementată prin SMSIM.

Pentru accelerogramele încadrate în categoria funcție (A) s-au determinat descriptorii statistici atât pentru fiecare cutremur separat, cât și pentru toate cele cinci cutremure analizate împreună (figura 11). Se poate observa comportamentul similar al eliberării de energie: în general, există o

eliberare bruscă de energie până la aproximativ 50% din energia totală și apoi o eliberare lentă, progresivă. De asemenea, se poate observa că mișcările terenului înregistrate în timpul cutremurului din 1990-2 (31 mai 1990) au o eliberare bruscă de energie până la 60% din energia totală (diferența poate fi explicată de faptul că acest cutremur a avut un mecanism de focar diferit față de celelalte).

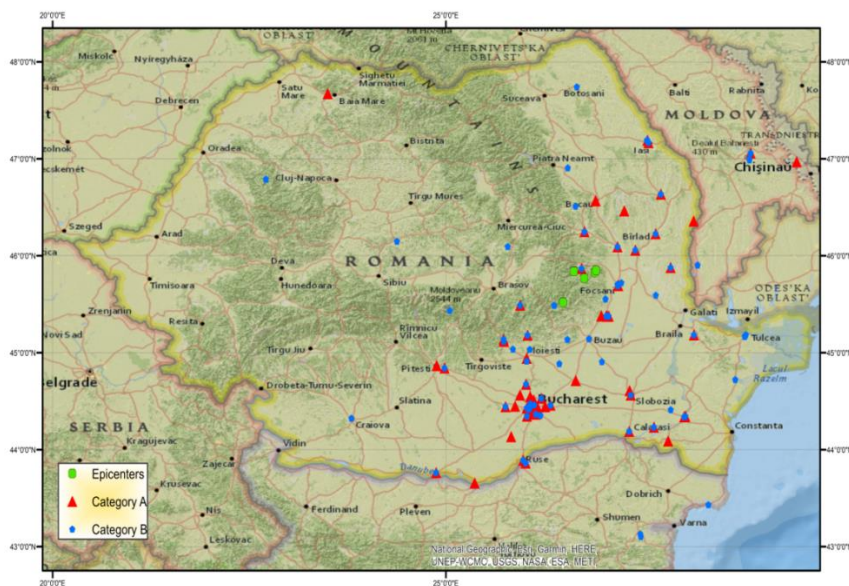


Figura 9. Harta cu locațiile stațiilor seismice în care au fost înregistrate componentele orizontale analizate produse de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară din 4 martie 1977, 30 august 1986, 30 mai și 31 mai 1990, 27 octombrie 2004 și locațiile epicentrelor cutremurelor. Cercurile verzi sunt epicentrele cutremurelor, triunghiurile roșii sunt stațiile unde au fost înregistrate componente orizontale din categoria A, cercurile albastre sunt stațiile unde au fost înregistrate componente orizontale din categoria B (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

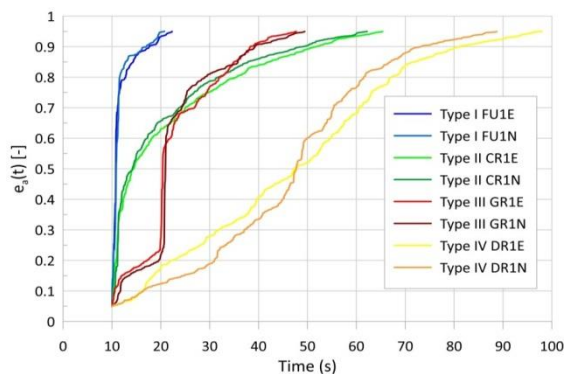


Figura 10. Exemple de energii cumulative din categoria B - excepții; exemplele sunt pentru mișcările terenului înregistrate în direcția EW (E) și NS (N) în timpul cutremurului vrâncan de adâncime intermediară din 27 octombrie 2004, la stațiile Fulga (FU1E, FU1N; 44.888°N, 26.442°E), Craiova (CR1E, CR1N; 44.325°N, 23.800°E), Greabanul (GR1E, GR1N; 45.380°N, 26.975°E) și Valea Drăganului (DR1E, DR1N; 46.792°N, 22.711°E). $e_a(t)$ este energia cumulativă normalizată (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

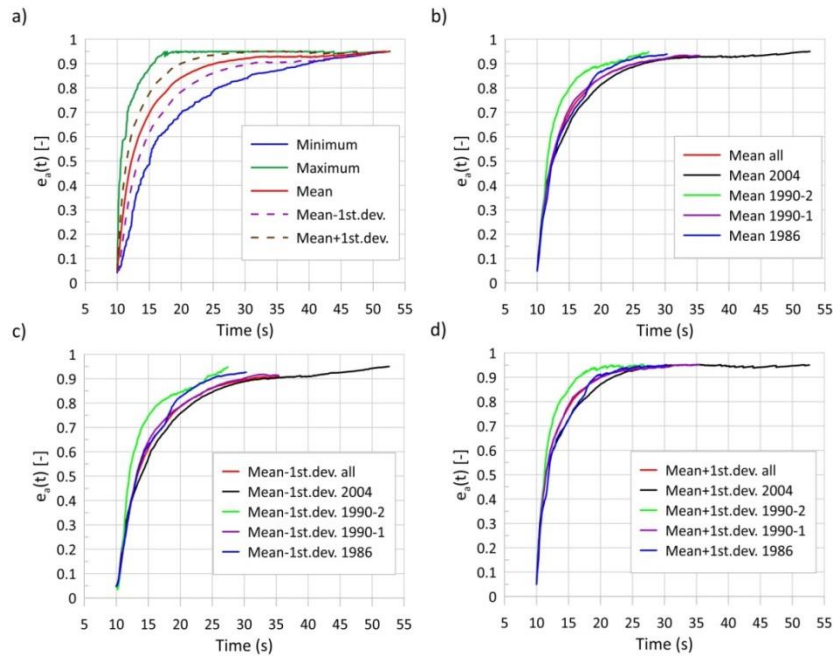


Figura 11. Descriptori statistici pentru înregistrările din categoria A: a - media, media minus/plus o abatere standard, valorile maxime și minime a energiilor cumulative ale tuturor componentelor orizontale din categoria funcție înregistrate în timpul celor 5 cutremure analizate (4 martie 1977, 30 august 1986, 30 și 31 mai 1990, 27 octombrie 2004); b, c, d - comparație între valorile medii, medii minus o abatere standard, respectiv medii plus o abatere standard a energiilor cumulative a accelerogramelor incluse în categoria A determinate atât pentru fiecare cutremur separat, cât și pentru toate cele cinci cutremure. $e_a(t)$ este energia cumulativă normalizată (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

3.3. Modelul matematic al ferestrei de modelare implementat în SMSIM și EXSIM. Determinarea parametrilor ferestrei

3.3.1. Modelul matematic al ferestrei de modelare implementat în SMSIM și EXSIM.

Primii pași ai simulărilor accelerogramelor implementați în SMSIM implică generarea unui zgomet alb sau Gaussian corespunzător duratei mișcării seismice și modelarea acestuia cu o fereastră de tip „casetă” sau exponențial. Când se utilizează fereastra exponențială, durata mișcării T_d (determinată ca suma duratelor sursei și a drumului) este extinsă printr-un factor f_{ib} și un factor f_{textnd} astfel încât fereastra să nu interfereze cu durata determinată pe baza caracteristicilor fizice.

Pentru surprinderea comportamentului de tip puls specific seismelor vrâncene intermediare, în simulări a fost utilizată fereastra de tip exponențial a cărei formă a fost propusă de Boore (2003) după Saragoni și Hart (1974):

$$w(t, \epsilon, \eta, t_\eta) = a \left(\frac{t}{t_\eta} \right)^b \exp \left[-c \frac{t}{t_\eta} \right], \text{ unde} \quad (2)$$

$$a = (\exp(1)/\epsilon)^b \quad (3)$$

$$b = -\epsilon \ln \eta \cdot [1 + \epsilon(\ln \epsilon - 1)]^{-1} \quad (4)$$

$$c = b/\epsilon \quad (5)$$

$$t_\eta = f_{T_g} \cdot T_d \quad (6)$$

unde: t – timpul; a, b, c – parametri de formă t_η – timpul de normalizare; ε - timpul normalizat unde fereastra are o valoare egală cu unitatea; η – valoarea ferestrei când timpul normalizat este 1; T_d – durata sursei și a drumului; $f_{Tg} = f_{tb}$ – factor de extindere a duratei, f_{tb} este notația folosită în programul de simulare

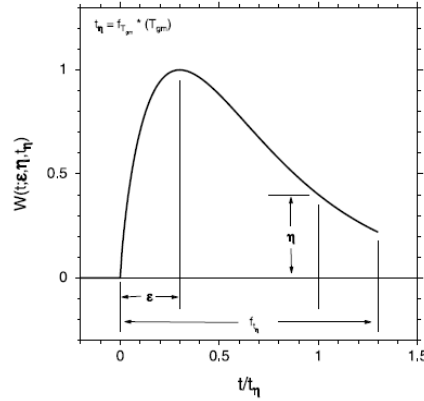


Figura 12. Fereastra exponențială de modelare și variabilele care îi controlează forma (Boore, 2003)

În articolul *Simulation of artificial earthquakes* (Saragoni & Hart, 1974), autorii propun o metodă de simulare a accelerogramelor ce presupune modelarea variației valorilor medii pătratice ale accelerației folosind o funcție-anvelopă de modelare în timp, iar pentru variația conținutului de frecvențe utilizează 3 regiuni cu densități spectrale de putere unimodale și unice. Aceștia demonstrează că funcția-anvelopă de modelare depinde valoarea medie pătratică a accelerației:

$$E[a^2(t)] = \psi^2(t) \quad (7)$$

Și, folosind expresia postulată pentru accelerația medie pătratică așteptată:

$$E[a^2(t)] = \beta t^\gamma e^{-\alpha t} \quad (8)$$

determină forma funcției-anvelopă de modelare a variației amplitudinii în timp ca fiind:

$$\psi(t) = \sqrt{\beta} t^{0,5\gamma} e^{-0,5\alpha t} \text{ (formă utilizată în SMSIM și EXSIM)} \quad (9)$$

unde β – parametru de intensitate; α, γ – parametrii de caracterizare a formei anvelopei; $a(t)$ – variația accelerației terenului în timp

Funcția ce descrie valoarea medie a energiei induse de accelerația terenului este definită prin:

$$E[W_a(t)] \equiv \int_0^t E[a^2(\tau)] d\tau \quad (10)$$

$$E[W_a(t)] = \int_0^t \beta \tau^\gamma e^{-\alpha \tau} d\tau = \beta P(\gamma + 1, \alpha t) \frac{\Gamma(\gamma + 1)}{\alpha^{\gamma + 1}} \text{ unde} \quad (11)$$

$$P(a, x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt \quad (12)$$

$P(a, x)$ este funcția gamma incompletă; $\Gamma(a)$ este funcția gamma.

Metoda de determinare a parametrilor funcției-anvelopă presupune determinarea prin interpolare a celei mai potrivite curbe pentru descrierea valorii medii a energiei.

3.3.2. Determinarea parametrilor ferestrei de formă specifici mișcărilor seismice produse de sursa de adâncime intermediară Vrancea

Parametrii funcției-anvelopă au fost determinați pentru media, media plus o abatere standard și media minus o abatere standard a energiilor cumulative normalizate ale tuturor înregistrărilor incluse în categoria A. Determinarea s-a realizat folosind procesul de curve-fitting din Matlab pentru funcția impusă $\beta P(\gamma + 1, \alpha t) \frac{\Gamma(\gamma+1)}{\alpha^{\gamma+1}}$ care este funcția energiei medii definită conform Saragoni și Hart (1974). Valorile corelație pătratică (R-sq) între media energiilor cumulative analizate și funcțiile determinate sunt mai mari de 99,60%, iar abaterea medie pătratică (RMSE) este mai mică de 0.011 pentru toate cele trei cazuri, acestea indicând o estimare foarte bună a parametrilor funcțiilor.

Cu parametrii obținuți (a se vedea tabelul 6), funcțiile-anvelopă $\psi(t)$ sunt calculate după Saragoni și Hart (1974) (figura 13) și apoi transformate în formatul $w(t, \epsilon, \eta, t_\eta)$ implementat în SMSIM (Boore, 2003). După cum se poate observa din figura 14, fereastra implementată în SMSIM, recalculată pentru cerințele programului cu parametrii ϵ și η (tabelul 7), nu păstrează aceeași formă. Parametrii ϵ și η au fost determinați conform definițiilor din Boore (2003), ϵ fiind timpul normalizat în care fereastra are un vârf cu valoare unitară și η este valoarea ferestrei pentru care timpul normalizat este 1. Calculul invers al lui ϵ și η (de la a, b, c la ϵ și η) nu poate fi realizat, deoarece ϵ ar fi negativ, iar formula pentru b implementată în program are un logaritm de ϵ care nu ar fi definit.

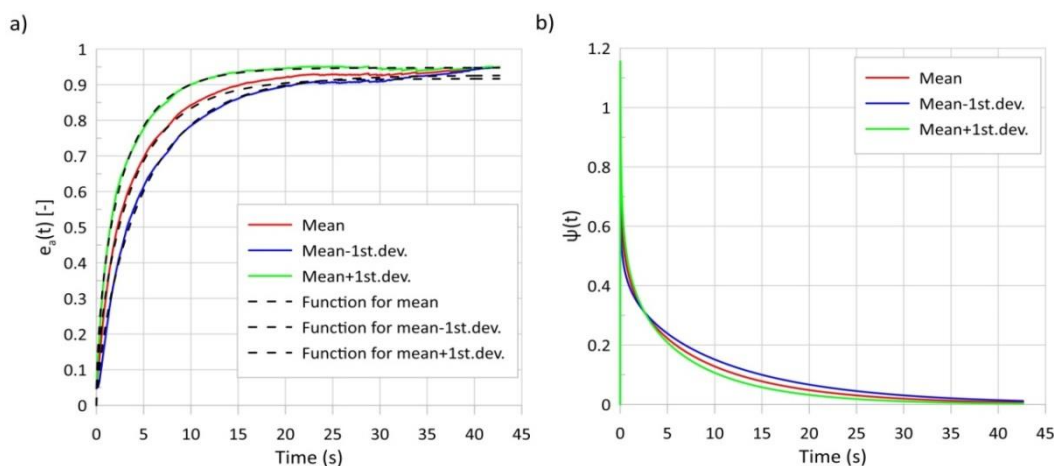


Figura 13. a Comparație între energiile cumulative analizate și funcția estimată; b Funcțiile-anvelopă $\psi(t)$ de modelare a variației amplitudinii în timp (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Tabel 6. Valorile parametrilor rezultați din interpolare (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

	Medie cu intervale de încredere de 95%			Medie-1 st.dev cu intervale de încredere de 95%			Medie+1 st.dev cu intervale de încredere de 95%		
		med			med			med	
α	0.1627	0.1693	0.1651	0.1443	0.146	0.1476	0.208	0.2099	0.2114
β	0.2099	0.2106	0.2113	0.1797	0.1804	0.181	0.2481	0.2491	0.2501
γ	-0.3778	-0.3744	-0.371	-0.2685	-0.2624	-0.2563	-0.4333	-0.4303	-0.4273

Tabel 7. Valorile parametrilor care au rezultat din interpolare și transformarea lor în formatul implementat în SMSIM entru energia cumulativă medie (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Parametri rezultati din interpolare pentru forma ferestrei propuse de Saragoni and Hart (1974) $\psi(t) = \sqrt{\beta} t^{0,5\gamma} e^{-0,5\alpha t}$		Parametri transformați pentru forma propusă de Boore (2003) - ecuația (39)		Parametri recalculați după ε și η - ecuațiile (40), (41), (42) $w(t, \varepsilon, \eta, t_\eta)$	
α	0.1693	$a = \sqrt{\beta} / \psi(dt/t_\eta)$	0.2440	a	1.004687
β	0.2106	$b = 0,5\gamma$	-0.1872	b	0.000803
γ	-0.3744	$c = 0,5\alpha$	0.08465	c	1.501765
f_{t_b} (parametru de normalizare a ferestrei și extindere a duratei mișcării)	1.0	$\eta = \psi(1)/\psi(dt/t_\eta)$	0.22426	$t_\eta = T_D \cdot f_{T_g}$ T_D =durată sursă+drum	
$f_{t_{ext}}$ (parametru de extindere a duratei de aplicare a ferestrei)	5.0	$\varepsilon = \frac{dt}{t_\eta}$	0.00053	$f_{T_g} = f_{t_b}$ dt – pas de timp	

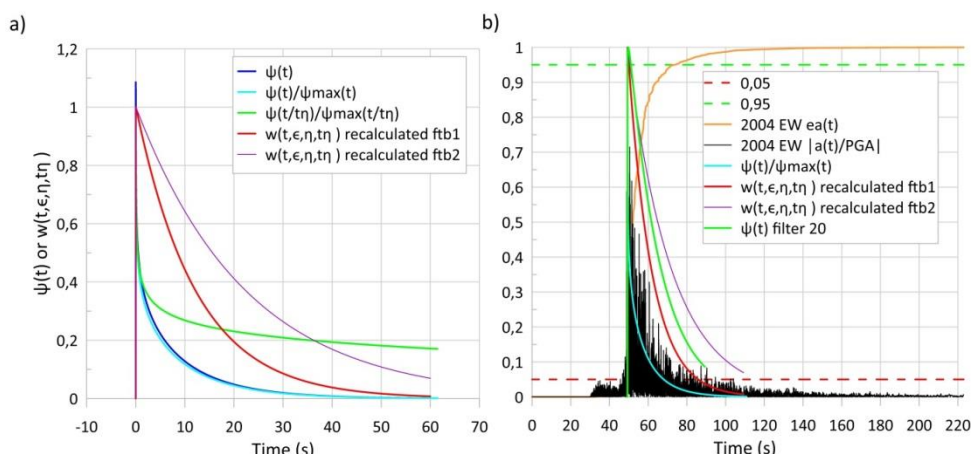


Figura 14. a Comparație între funcția-anvelopă $\psi(t)$, funcția-anvelopă normalată la 1 $\psi(t)/\psi_{\max}(t)$, funcția-anvelopă cu timp normalizat scalată la 1 $\psi(t/t_\eta)/\psi_{\max}(t/t_\eta)$ și funcția-anvelopă recalculată cu ε și η pentru energia medie cumulativă a celor cinci cutremure; b Comparație între accelerograma normalizată și energia cumulată a mișcării terenului înregistrate la stația INCERC (direcția EW) în timpul cutremurului vrâncean din 2004 și funcția-anvelopă normalizată $\psi(t)/\psi_{\max}(t)$ în forma propusă de Saragoni și Hart (1974), $w(t, \varepsilon, \eta, t_\eta)$ recalculat cu ε și η după Boore (2003) cu f_{t_b} 1 și 2 și fereastra utilizată în simulările din capitolul 2 (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Când timpul tinde la zero, funcția $\psi(t)$ tinde asimptotic la infinit, astfel încât scalarea la 1 și parametrul ε depind de pasul de timp ales (originea funcțiilor din figuri a fost impusă în 0 în scop ilustrativ). De asemenea, așa cum se poate vedea în figura 14a, funcția cu timp normalizat se schimbă semnificativ. În figura 14b se poate observa că funcția $\psi(t)$ calculată după Saragoni și Hart (1974) și scalată ar aproxima bine linia imaginată care trece prin vârfurile accelerogramei dacă fereastra ar fi transpusă pe ambele axe.

Fereastra recalculată descrie (Figura 14), în funcție de factorul f_{t_b} ales, amplitudini mai mari sau mai mici comparativ cu fereastra 20 (utilizată la simulările prezentate în capitolul 2 pentru

seismul din 2004), dar scăderea amplitudinilor este descrisă tot progresiv. După cum se poate observa, parametrii determinați în funcție de media energiei nu îmbunătățesc forma utilizată ca fiind cea mai potrivită în capitolul 2 (în subcapitolul 3.5. sunt realizate simulări cu ferestrele „medii” dintr-o singură porțiune).

3.4. Definirea unei ferestre cu două intervale pentru modelarea eliberării de energie specifice cutremurelor vrâncene de adâncime intermediară

3.4.1. Modelarea funcției-anvelopă - problema continuității și a derivabilității

Având în vedere că se propune utilizarea unei ferestre cu mai multe intervale, se va analiza problema continuității și derivabilității acesteia. Se va păstra forma funcției-anvelopă conform celei definite de Saragoni și Hart (1974), doar că se vor defini două seturi de parametri, astfel:

$$\psi(t) = \begin{cases} \sqrt{\beta_1} t^{0,5\gamma_1} e^{-0,5\alpha_1 t} & t \in (0, t_0) \\ \sqrt{\beta_2} t^{0,5\gamma_2} e^{-0,5\alpha_2 t} & t \in [t_0, t_{final}) \end{cases} \quad (13)$$

$$E[W_a(t)] = \begin{cases} \beta_1 P(\gamma_1 + 1, \alpha_1 t) \frac{\Gamma(\gamma_1 + 1)}{\alpha_1^{\gamma_1 + 1}} & t \in (0, t_0) \\ \beta_2 P(\gamma_2 + 1, \alpha_2 t) \frac{\Gamma(\gamma_2 + 1)}{\alpha_2^{\gamma_2 + 1}} & t \in [t_0, t_{final}) \end{cases} \quad (14)$$

Condiții:

1. Funcția energiei medii trebuie să fie continuă în t_0 :
2. Funcția energiei medii trebuie să fie derivabilă în t_0 :
3. Dacă respectă forma prezentată de Boore (2003), fereastra are un maxim local în primul interval de definiție

Deoarece t_0 va fi definit ca un parametru variabil în funcție de baza de date utilizată pentru determinarea parametrilor, se alege momentan un t_0 oarecare pentru a studia problema continuității și a derivabilității.

Se determină parametri pentru două intervale 0 - 10 s și 8 s - t_{final} utilizând procesul de curve-fitting din Matlab pentru funcția impusă $\beta P(\gamma + 1, \alpha t) \frac{\Gamma(\gamma + 1)}{\alpha^{\gamma + 1}}$. Intervalele de interpolare se intersectează pe porțiunea 8-10 s deoarece se încearcă realizarea unei treceri line între cele două funcții.

Funcția astfel definită nu este nici derivabilă, nici continuă în niciun punct din intervalul $t_0 \in (8, 10)$. Chiar dacă se pot modifica ușor parametri în așa fel încât să devină continuă în t_0 , funcția nu poate fi derivabilă în acest punct deoarece prin definirea ferestrei pe două intervale se încearcă tocmai schimbarea bruscă a pantei (adică a tangentei la grafic în acel punct, cu alte cuvinte a derivatei). Din acest motiv s-a încercat definirea funcției-anvelopă pe trei intervale, folosind o funcție polinomială de legătură.

În ceea ce privește a treia condiție, derivata de ordin doi a primului interval al funcției energiei așteptate $E''[W_a(t_x)]$ tinde asimptotic la $-\infty$ când $t \rightarrow 0$ și tinde la 0 când $t \rightarrow \infty$, deci nu există un punct maxim în primul interval al funcției. Aceasta înseamnă că primul punct al ferestrei

depinde de pasul de timp ales pentru simulare, iar fereastra va avea nevoie de scalare pentru a atinge un vârf egal cu unitatea.

Pentru fereastra definită pe trei intervale, pentru primul și al treilea interval se consideră forma anterioară de definire a energiei, iar pentru al doilea interval se consideră o funcție polinomială de gradul 3 a cărei parametri sunt determinați din condițiile de continuitate și derivabilitate.

$$\psi(t) = \begin{cases} \sqrt{\beta_1} t^{0,5\gamma_1} e^{-0,5\alpha_1 t} & t \in (0, t_0) \\ \sqrt{3p_1 t^2 + 2p_2 t + p_3} & t \in [t_0, t_1) \\ \sqrt{\beta_2} t^{0,5\gamma_2} e^{-0,5\alpha_2 t} & t \in [t_1, t_{final}) \end{cases} \quad (15)$$

$$E[W_a(t)] = \begin{cases} \beta_1 P(\gamma_1 + 1, \alpha_1 t) \frac{\Gamma(\gamma_1 + 1)}{\alpha_1^{\gamma_1 + 1}} & t \in (0, t_0) \\ p_1 t^3 + p_2 t^2 + p_3 t + p_4 & t \in [t_0, t_1) \\ \beta_2 P(\gamma_2 + 1, \alpha_2 t) \frac{\Gamma(\gamma_2 + 1)}{\alpha_2^{\gamma_2 + 1}} & t \in [t_1, t_{final}) \end{cases} \quad (16)$$

Determinarea parametrilor pentru primul și al treilea interval al funcției se realizează prin interpolare cu Matlab pentru intervalele 0-8 s și 12 s-final, iar pentru al doilea interval 8-12 s se realizează rezolvând sistemul de 4 ecuații cu 4 necunoscute rezultat din condițiile de continuitate și derivabilitate. Realizată astfel funcția este continuă și derivabilă; însă se observă că normalizând timpul conform metodei implementate în SMSIM și EXSIM funcția astfel definită își pierde continuitatea, însă dacă normalizăm funcția doar pentru a avea maximul unitar, aceasta își păstrează continuitatea. Deoarece punctele de schimbare a intervalelor ce definesc funcția se determină în funcție de baza de date, se verifică păstrarea continuității și derivabilității pe un alt interval de timp de definiție pentru ecuația de legătură (s-a ales intervalul 12-16 s). Se observă că în aceste condii se pierde atât continuitatea cât și derivabilitatea funcției; mai mult, pentru un timp mai mare de 15.75 s funcția devine negativă.

Simularea accelerogramelor se realizează cu variabile discrete. O modelare cu o fereastră care nu este continuă și derivabilă presupune că în punctul t_0 funcția nu va coincide la limită. Deoarece multiplicarea zgomotului alb cu fereastra se realizează în domeniul discret, zgomotul nu are valori între t_0 și $t_0 + dt$, de aceea simularea nu va fi influențată.

3.4.2. Definirea intervalelor ferestrei de modelare a zgomotului alb

Pentru a determina intervalele de definire a celor două ramuri ale ferestrei s-a căutat punctul în care se observă o modificare mai bruscă a tangentei la graficele energiei medii. Pentru acest lucru s-au considerat trei ipoteze: ultima pantă mai mare de 0.1, ultima pantă mai mare decât 0.05 și prima pantă negativă (pantele negative apar din cauză că energiile sunt mediate și înseamnă că pe anumite zone apar descreșteri, ceea ce în realitate nu este posibil, iar acest comportament nu va fi observat la accelerogramele reale înregistrate).

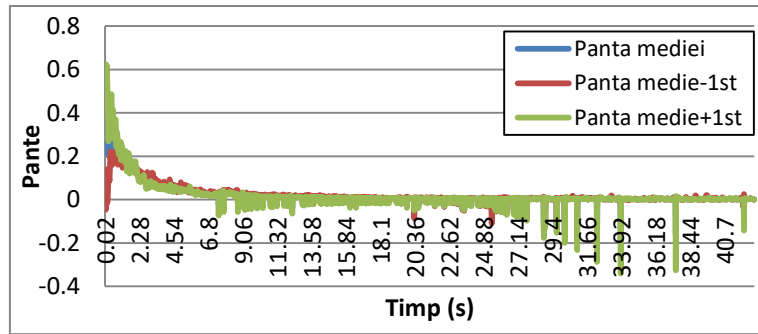


Figura 15. Evoluția pantelor la medie, medie plus o abatere standard și medie minus o abatere standard a curbelor energiilor cumulative ale accelerogramelor din categoria A „funcție” a celor cinci cutremure analizate (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Tabel 8. Punctul de timp și energia cumulativă normalizată, unde se observă o modificare mai bruscă a tangentei la energiile medii preconizate pentru cele trei cazuri: Cazul I - ultima pantă mai mare de 0.1, Cazul II - ultima pantă mai mare de 0.05 și Cazul III - prima pantă negativă (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Cazul I	Timp (s)	ea(t) [-]	Ultima pantă >0.1
Medie	2.50	0.528	0.107
Medie+ 1 abatere standard	2.54	0.636	0.114
Medie -1 abatere standard	3.18	0.494	0.102
Cazul II	Timp (s)	ea(t) [-]	Ultima pantă>0.05
Medie	5.42	0.716	0.052
Medie + 1 abatere standard	5.60	0.803	0.056
Medie -1 abatere standard	5.44	0.639	0.055
Cazul III	Timp (s)	ea(t) [-]	Prima pantă <0
Medie	7.46	0.779	-0.025
Medie + 1 abatere standard	7.46	0.850	-0.074
Medie -1 abatere standard	12.30	0.825	-0.011

3.4.3. Definirea noii funcții-anvelopă cu două intervale după Sharagoni și Hart (1974)

Se va păstra forma funcției-anvelopă conform celei definite anterior (Saragoni & Hart, 1974) doar că vor exista două seturi de parametri, astfel:

$$\psi(t) = \begin{cases} \sqrt{\beta_1} t^{0.5\gamma_1} e^{-0.5\alpha_1 t} & t \in (0, t_0) \\ \sqrt{\beta_2} t^{0.5\gamma_2} e^{-0.5\alpha_2 t} & t \in [t_0, t_{final}) \end{cases} \quad (17)$$

$$E[W_a(t)] = \begin{cases} \beta_1 P(\gamma_1 + 1, \alpha_1 t) \frac{\Gamma(\gamma_1 + 1)}{\alpha_1^{\gamma_1 + 1}} & t \in (0, t_0) \\ \beta_2 P(\gamma_2 + 1, \alpha_2 t) \frac{\Gamma(\gamma_2 + 1)}{\alpha_2^{\gamma_2 + 1}} & t \in [t_0, t_{final}) \end{cases} \quad (18)$$

$$P(a, x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt \quad (19)$$

$P(a, x)$ – funcție gamma incompletă; $\Gamma(a)$ – funcție gamma; $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ – parametrii de formă; t_0 – punctul în care se observă o schimbare mai bruscă a tangentei la energiile medii așteptate; t_{final} – durata totală a simulării determinată în SMSIM în funcție de durata sursei, durata drumului și influența parametrilor de extindere a duratei determinate pe baza caracteristicilor fizice.

Parametrii funcției-anvelopă au fost determinați folosind interpolarea în MATLAB pentru funcția impusă $\beta P(\gamma + 1, \alpha t) \frac{\Gamma(\gamma+1)}{\alpha^{\gamma+1}}$ pentru fiecare interval și fiecare caz (tabelul 9). Indicatorii statistici ai procesului de interpolare indică o potrivire foarte bună (R-sq este mai mare de 98.80% și RMSE este mai mică de 0.0082).

Tabel 9. Parametrii rezultați în urma procesului de interpolare pentru cele 3 cazuri de intervale (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Pentru medie	Caz I $t_0=2.5$ cu intervale de încredere de 95%			Caz II $t_0=5.46$ cu intervale de încredere de 95%			Caz III $t_0=7.46$ cu intervale de încredere de 95%		
		mediu			mediu			mediu	
$a=\alpha_1$	0.1241	0.1892	0.2544	0.2832	0.3941	0.305	0.257	0.2634	0.2699
$b=\beta_1$	0.2243	0.243	0.2618	0.2641	0.2691	0.2741	0.2531	0.2562	0.2593
$g=\gamma_1$	-0.2948	-0.2604	-0.2265	-0.2364	-0.2245	-0.2129	-0.2596	-0.2511	-0.2427
$a=\alpha_2$	0.1437	0.1448	0.1459	0.1433	0.1451	0.1469	0.1454	0.1481	0.1509
$b=\beta_2$	0.1995	0.2002	0.2008	0.1993	0.2003	0.2014	0.2005	0.2019	0.2033
$g=\gamma_2$	-0.4458	-0.4421	-0.4384	-0.4482	-0.4409	-0.4335	-0.4387	-0.4261	-0.4135

3.4.4. Redefinirea parametrilor pentru noua fereastră normalizată în timp propusă după Boore (2003)

Așa cum se poate observa în figura 14, funcția-anvelopă cu timp normalizat propusă de Saragoni și Hart își pierde semnificativ forma. De aceea, pentru a folosi fereastră cu timp normalizat trebuie redefiniți parametrii în conformitate cu Boore (2003). Pentru aceasta, algoritmul trebuie discutat, deoarece a doua ramură a ferestrei depinde de parametrii primei ramuri. Deci, dacă fereastră este rescrisă, transformările ar trebui să fie făcute în așa fel încât să se păstreze diferența dintre valorile ramurilor funcției în punctul t_0 , iar normalizarea trebuie realizată în funcție de primul interval pentru a avea un maxim unitate. Fereastră sub forma propusă după Boore (2003) este:

$$w(t, \epsilon, \eta, t_\eta) = \begin{cases} a_1 \left(\frac{t}{t_\eta}\right)^{b_1} \exp\left[-c_1 \frac{t}{t_\eta}\right] & t \in (0, t_0) \\ a_2 \left(\frac{t}{t_\eta}\right)^{b_2} \exp\left[-c_2 \frac{t}{t_\eta}\right] & t \in [t_0, t_{final}) \end{cases}, \text{ unde} \quad (20)$$

$$a_1 = (\exp(1)/\epsilon_1)^{b_1} \quad (21)$$

$$b_1 = -\epsilon_1 \ln \eta_1 \cdot [1 + \epsilon_1 (\ln \epsilon_1 - 1)]^{-1} \quad (22)$$

$$c_1 = b_1 / \epsilon_1 \quad (23)$$

$$a_2 = \frac{1}{\left(\frac{t_0}{t_\eta}\right)^{b_2} \exp\left[-c_2 \frac{t_0}{t_\eta}\right]} \cdot \frac{\psi_2\left(\frac{t_0}{t_\eta}\right)}{\psi_1\left(\frac{dt}{t_\eta}\right)} \quad (24)$$

$$b_2 = -\epsilon_2 \ln \eta_2 \cdot [1 + \epsilon_2 (\ln \epsilon_2 - 1)]^{-1} \quad (25)$$

$$c_2 = b_2 / \epsilon_2 \quad (26)$$

$$\eta_1 = \psi_1(1) / \psi_1(dt/t_\eta) \quad (27)$$

$$\eta_2 = \psi_2(1) / \psi_2(dt/t_\eta) \quad (28)$$

$$\epsilon_{1,2} = \frac{dt}{t_\eta} \quad (29)$$

unde $t_\eta = f_{T_g} \cdot T_d$ – timpul de normalizare; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – parametrii de formă; ϵ_1, ϵ_2 – timpul normalizat în care fiecare ramură a ferestrei $\psi(t)$ are un vârf de valoare 1; η_1, η_2 – valoarea fiecărei ramuri în punctual în care timpul normalizat este 1; $\psi_1(t)$ – prima ramură a ferestrei $\psi(t)$,

$t \in (0, t_0)$; $\psi_2(t)$ – a doua ramură a ferestrei $\psi(t)$, pentru $t \in (t_0, t_{final})$; $f_{T_g} = f_{t_b}$ – factorul care extinde durată mișcării și controlează forma ferestrei, f_{t_b} notația folosită în SMSIM; algoritmul de transformare este valabil pentru cazul în care maximum primei ramuri este la primul pas de timp; dacă maximum este în intervalul $t \in (dt, t_0)$ normalizarea se va face la acel maximum.

Fereastra definită prin ambele metode poate fi văzută în figura 16. Deoarece forma funcției propuse după Boore (2003) este influențată de timpul de normalizare, considerând fereastra cu două ramuri se poate utiliza un factor de extensie diferit f_{tb} pentru ramuri. Pentru ferestrele prezentate în figura 16 și utilizate în simulări, primul interval are $f_{tb} = 1.00$, iar al doilea interval $f_{tb} = 2.25$.

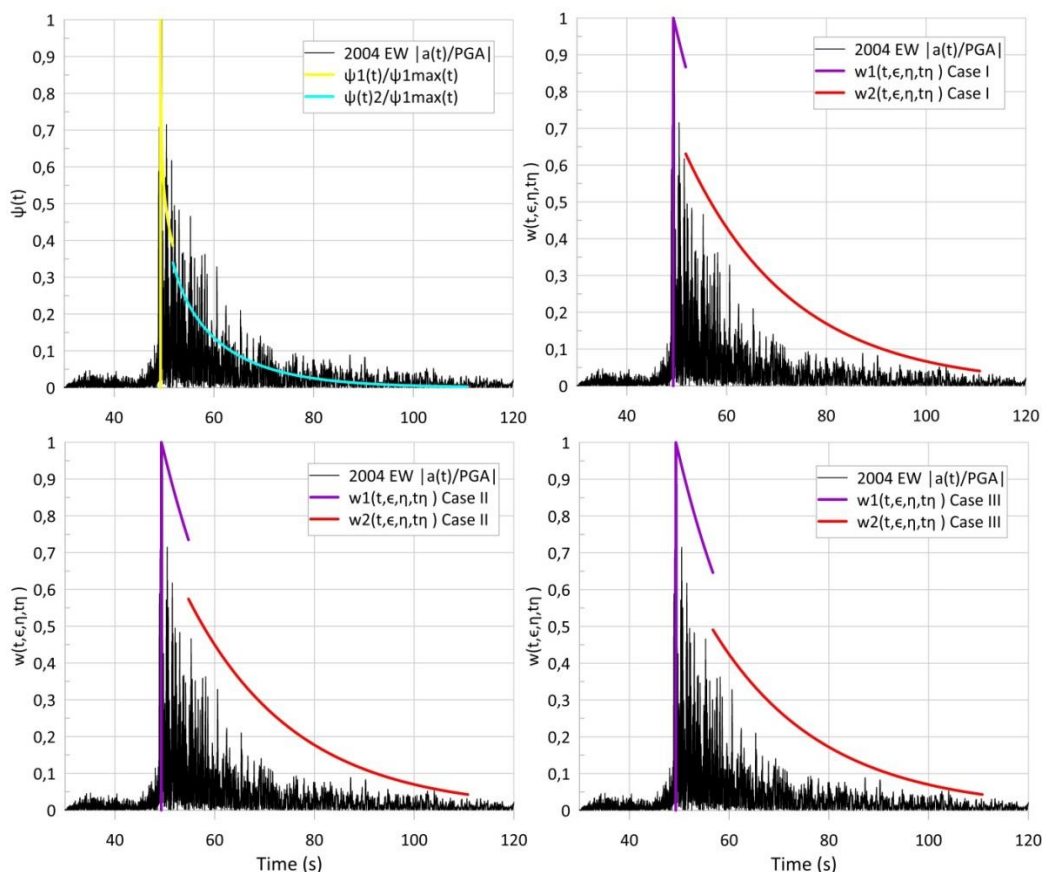


Figura 16. Comparație între accelerogramele normalizate ale mișcării seismice înregistrate la stația INCERC pe direcția EW în timpul cutremurului din 27 octombrie 2004 și fereastra de formă definită pe două intervale în forma propusă după Saragoni and Hart (1974) scalată la 1 ($\psi_1(t)/\psi_{1max}(t)$ – primul interval, $\psi_2(t)/\psi_{1max}(t)$ – al doilea interval), și funcția-fereastră definită pe două intervale recalculată pentru fiecare caz definit ($w_1(t, \epsilon, \eta, t_\eta)$ – primul interval, $w_2(t, \epsilon, \eta, t_\eta)$ – al doilea interval) (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

3.5. Simulări în SMSIM modificat cu fereastra nou definită

Pentru verificarea noii ferestre, au fost realizate 400 de simulări, utilizând programul SMSIM modificat pentru fiecare caz al definirii punctului de schimbare a intervalului, pentru mișcarea terenului din amplasamentul INCERC produsă de cutremurul din 27 octombrie 2004 (accelerograma analizată este cea care are cea mai apropiată ca valoare de vârf a accelerației de media valorilor de vârf a simulărilor). Codul SMSIM a fost modificat astfel încât noua fereastră să poată fi implementată. Au fost realizate două tipuri de simulări: unul cu parametrii exacti - definiți

după Shargoni și Hart (1974) și unul cu parametrii redefiniți pentru forma propusă după Boore (2003). Pentru ilustrarea modificărilor s-au realizat și simulări cu fereastra „medie” dintr-un singur interval. Pentru a doua ramură a funcțiilor și pentru una dintre ferestrele „medii” dintr-un singur interval, factorul de extensie f_{tb} a fost considerat 2.25, iar pentru prima ramură și pentru cealaltă fereastră dintr-un singur interval factorul de extensie f_{tb} a fost considerat 1. Ceilalți parametri considerați în simulări sunt cei din capitolul 2 cu modificarea duratei drumului la valoarea inițială de 0.0868 și considerarea împrăștierii $R^{(-0.45)}$.

Din figura 17 și din tabelul 10 se poate observa că fereastra dintr-o bucată cu $f_{tb}=1$ și funcția cu două intervale în forma propusă după Sharagoni și Hart descriu în mod similar eliberarea de energie. Prin recalcularea parametrilor ferestrelor cu două intervale conform formei propuse de Boore (2003), se obține o aproximare bună a duratei semnificative, a rădăcinii medii pătratice a accelerațiilor și a accelerației de vârf a terenului. Comparând aceste rezultate cu simularea făcută cu fereastra dintr-o singură bucată cu $f_{tb} = 2.25$, se poate observa că prin incapacitatea sa de a descrie primul segment abrupt, energia este distribuită progresiv pe o durată semnificativă mai lungă, iar acest lucru conduce la o valoare de vârf mai mică. Toate cazurile cu două intervale descriu primul interval abrupt și al doilea interval progresiv, cazul III având primul segment puțin prea lung. În figura 18 sunt ilustrate simulările pentru cazurile I și II. Se poate observa că prima porțiune puternică este surprinsă și că vârfurile cozii sunt semnificativ mai mici decât cele din prima porțiune.

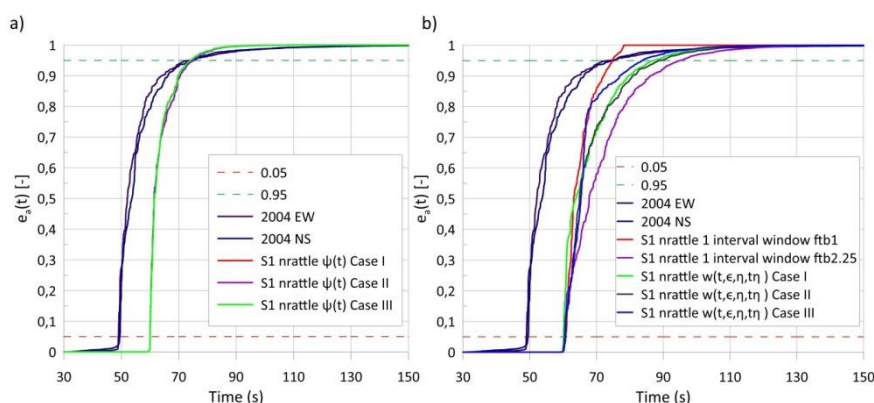


Figura 17. a Comparație între energiile normalizate cumulative ale simulărilor realizate cu noua funcție fereastră definită pe două intervale și cele ale înregistrărilor din timpul cutremurului din 27 octombrie 2004, de la stația INCERC; b Comparatie între energiile cumulative normalizate ale simulărilor realizate cu noua funcție fereastră definită pe două intervale recalculată pentru forma propusă de Boore (2003) cele ale înregistrărilor din timpul cutremurului din 27 octombrie 2004, de la stația INCERC (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

O problemă rămâne în continuare, rădăcinile medii pătratice ale accelerațiilor sunt încă ușor mai mari, dar acest lucru poate fi explicat prin contribuția undelor P în acceleroramele înregistrate care nu sunt incluse în simulări (simulările se realizează doar pentru undele S). De asemenea, ar trebui făcute cercetări suplimentare pentru a stabili de ce fereastra cu valorile originale ale parametrilor determinați cu Matlab cu indicatori statistici atât de buni nu poate estima eliberarea de energie adecvată și de ce prin recalcularea lor se obține rezultatul scontat, dar ar trebui menționat cu

privire la această problemă că în prima formă a programului (Boore, 1983) fereastra nu a fost normalizată cu timpul, normalizarea fiind adăugată ulterior.

În cazul simulărilor accelerogramelor produse de cutremurele vrâncene, fereastra de modelare are o contribuție importantă, deoarece, practic, energia descrisă de spectrul mișcării este distribuită în timp în conformitate cu forma zgomotului, iar dacă zgomotul are o distribuție uniformă a vârfurilor, simulările au mai multe vârfuri cu valori apropiate de PGA. Ceea ce înseamnă că energia ar fi distribuită aproximativ uniform pe durata mișcării, iar în funcție de această durată, vârfurile accelerațiilor vor avea valori mai mari sau mai mici. Prin modelarea corectă a zgomotului, energia este ghidată să „umple” mai mult primul segment al mișcării și mai puțin coada descendentă și lungă.

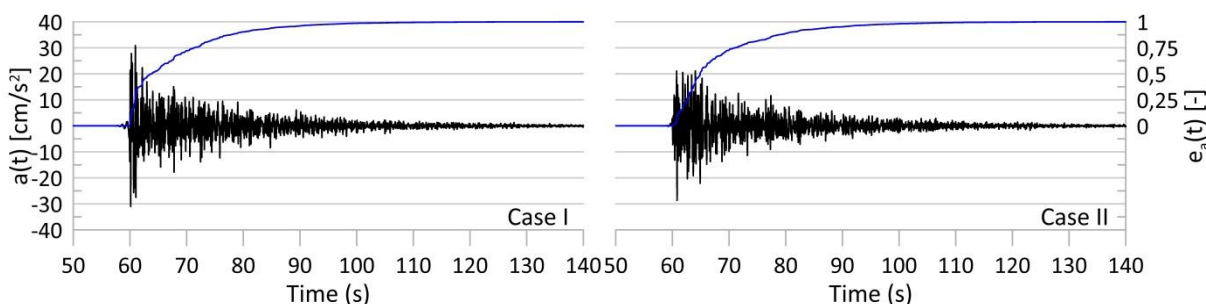


Figura 18. Exemple de accelerograme simulate folosind fereastra definită pe două intervale pentru cazul I și II pentru caracteristicile mișcării seismice produse de cutremurul din 27 octombrie 2004 la stația INCERC (București) (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Tabel 10. Caracteristicile accelerogramelor simulate cu SMSIM modificat cu noua fereastră de formă definită pe două intervale (Coțovanu & Vacareanu, 2020)

Tipul simulării	PGA (cm/s ²)	Durata semnificativă (s)	Rădăcina medie pătratică (cm/s ²)
S1 fereastra medie definită pe un interval $f_{t_b} = 1.00$	35.1	14.03	8.1
S1 fereastra medie definită pe un interval $f_{t_b} = 2.25$	23.0	34.73	4.8
S1 nrattle fereastra definită pe două intervale Cazul I	47.0	7.61	10.0
S1 nrattle fereastra definită pe două intervale Cazul II	45.3	7.95	9.7
S1 nrattle fereastra definită pe două intervale Cazul III	46.6	7.62	9.8
S1 nrattle fereastra definită pe două intervale recalculată Cazul I	31.0	26.91	5.6
S1 nrattle fereastra definită pe două intervale recalculată Cazul II	28.7	28.02	5.5
S1 nrattle fereastra definită pe două intervale recalculată Cazul III	29.1	23.25	5.9
Vrancea 2004 EW	29.7	24.80	4.4
Vrancea 2004 NS	30.0	25.65	5.0

3.6. Concluzii

În acest capitol s-a căutat o formă a ferestrei de modelare a zgomotului alb care să conducă la realizarea unor simulări potrivite din punct de vedere al eliberării de energie cu specificitatea mișcărilor terenului produse de cutremurele vrâncene.

În acest scop, au fost analizate un număr de 371 componente orizontale ale mișcărilor terenului înregistrate la diferite stații seismice în timpul cutremurelor vrâncene din 4 martie 1977,

30 august 1986, 30 și 31 mai 1990 și 27 octombrie 2004. Au fost definite cinci tipuri de comportamente de eliberare a energiei: categoria A (model tipic pentru aproape jumătate din înregistrări) în care aproximativ 50% din energie este eliberată în primele 1.5-3.0 s ale fazei puternice a mișcării, în timp ce restul energiei este eliberat lent în 20-40 s și categoria B cu excepții de tip I, II, III și IV. Pentru mișcările terenului încadrate în categoriei A, au fost determinați descriptorii statistici pentru fiecare cutremur separat, și pentru toate cele cinci cutremure împreună.

S-a arătat că fereastra exponențială implementată în SMSIM nu poate surprinde forma specifică a eliberării de energie a mișcărilor terenului generate de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară.

A fost definită și implementată în SMSIM o nouă fereastră cu două intervale. Pentru noua funcție definită a fost descris un algoritm pentru calcularea parametrilor și au fost determinați parametrii ferestrei noi pentru mișcările terenului încadrate în categoriei A. Utilizând funcția pe două intervale pentru a descrie eliberarea de energie specifică cutremurelor vrâncene au fost realizate simulări ale accelerogramelor din amplasamentul INCERC specifice cutremurului din 2004.

Pentru obținerea unor simulări mai bune trebuie făcute cercetări suplimentare cu privire la ceilalți parametri care influențează simularea. Parametrii duratei depind în principal de durata sursei și a drumului; de exemplu, dacă se ia considerare directivitatea durata sursei scade. De asemenea parametrii de amplitudine se vor schimba dacă s-ar utiliza alte funcții de atenuare a undelor. Pentru simulări stochastice, toți parametrii menționați în introducerea tezei influențează rezultatele, dar în această capitol a fost analizată doar fereastra de modelare a zgomotului și pentru aceasta a fost definită o nouă formă mai potrivită specificului vrâncen. Un set mai precis de parametri pentru fereastră ar putea fi găsit dacă accelerogramele din baza de date ar fi împărțite în grupuri conform unor reguli de clasificare mai complexe, ținând cont de distanța sursă-amplasament, directivitate, topografie, atenuare și condiții locale de teren. De asemenea, dacă se generează mișcări ale terenului pentru accelerograme existente, pentru rezultate mai bune, pe baza algoritmului dat, se pot determina parametrii specifici pentru noua fereastră cu două intervale.

4. Determinarea parametrilor acțiunii seismice utilizați în simularea accelerogramelor produse de sursa subcrustală Vrancea

4.1. Introducere

Simularea mișcării seismice produse de un cutremur prin metoda stochastică presupune generarea unui zgomot alb și modificarea acestuia cu caracteristicile specifice cutremurului țintă. Spectrul mișcării cu care se modifică spectrul modelat și normalizat al zgomotului înglobează caracteristicile sursei, drumului parcurs de unde și modificările date de condițiile locale de teren. Metoda stochastică este o metodă complexă de simulare deoarece încearcă să surprindă cât mai fidel fenomenele care produc și modifică undele seismice. Succesul metodei depinde de stabilirea parametrilor caracteristici, iar dacă pentru mișcările seismice produse într-un anumit amplasament de un cutremur real determinarea caracteristicilor este mai accesibilă, estimarea parametrilor pentru un scenariu ipotetic devine mai dificilă din cauza multitudinilor de variabile și incertitudini asociate.

Astfel, din punct de vedere al caracteristicilor sursei trebuie estimate locațiile cu probabilitate mare de generare a unui cutremur de tipul celui țintă ales, densitatea materialului și viteza undelor din apropierea hipocentrului, mecanismul de focar, energia eliberată (magnitudinea), parametrul tensiunii de forfecare (stress drop), durata sursei și influențele directivității asupra ei și tiparul radiației undelor dependent de sursă. Din punct de vedere al drumului de la sursă la stratele superficiale de pământ, trebuie determinate împrăștierea geometrice, atenuările, duratele dependente de drum în funcție de zonele pe care le străbat, apoi trebuie determinate amplificările și atenuările specifice condițiilor locale de teren, comportamentele liniare, neliniare și posibila apariție a fenomenelor de lichefiere în funcție de geologia superficială a amplasamentului în care se simulează mișcarea seismică.

Determinarea parametrilor pentru utilizarea metodei stochastice pentru simularea mișcării seismice este crucială, fiecare parametru influențând rezultatul final, iar o estimare deficitară poate duce la o simulare mai puțin realistă. Acest capitol își propune să stabilească un set de parametri care să poată fi utilizați pentru diverse scenarii țintă specifice cutremurelor intermediare vrâncene, pentru diverse zone din exteriorul arcului carpatic.

Zona intermediară vrânceană este definită ca un cuib seismic având o activitate staționară, dar intensă, persistentă în timp și izolată de activitatea seismică din apropiere. Cele mai cunoscute cuiburi seismice intrecontinentale sunt Bucaramanga (Columbia) – cel mai mic și mai activ -, Hindu Kush (Afganistan) – cel mai adânc - și Vrancea (România) (Manea, et al., 2011).

O particularitate importantă a regiunii Vrâncene este regimul de complexă convergență continentală, aceasta fiind în contact cu următoarele unități tectonice: în partea de Nord și Nord-Est Platforma Est-Europeană, Platforma Scitică în Est, Orogenul Dobrogei de Nord în partea de Sud-Est, Platforma Moesică în Sud și Sud-Vest și Orogenul Carpatic și Bazin Transilvănean (Placa Intra-Alpină) în Vest și Nord-Vest.

Pentru o cunoaștere mai aprofundată a tectonicii regionale, geodinamicii, seismicității, deformării litosferice și regimului de tensiune din regiunea Vrancea, de-a lungul anilor s-au realizat un număr mare de studii geologice, geodezice, geofizice, seismice, geoelectrice, gravimetrice,

termice și s-au dezvoltat mai multe modele. În lucrarea „*Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): Current state-of-the art*”, Ismail-Zadeh et al. (2012) prezintă stadiul actual al modelelor geodinamice.

În acest capitol al tezei au fost realizate analize comparative și au fost definiți toți parametrii necesari realizării simulărilor mișcărilor seismice generate de sursa de adâncime intermediară. Parametrii analizați au fost: locațiile cutremurelor intermediare vrâncene, densitatea materialului și viteza undelor seismice S din apropierea hypocentrului, mecanisme de focar predominante, energia eliberată (magnitudinea, momentul seismic), frecvența de colț a undelor S, parametrul tensiunii de forfecare, durata sursei și influențele directivității asupra ei, aria sursei, forma radiației undelor dependente de sursă, caracteristicile mediilor de propagare traversate de undele seismice produse de sursa de adâncime intermediară Vrancea, împărțire pe zone în funcție de efectele mediilor parcurse de unda seismică de la sursă la suprafață, împrăștierea geometrică, atenuare și dispersia, durata mișcării seismice dependente de distanță, modelarea condițiilor de amplasament în SMSIM și EXSIM, modelarea liniar echivalentă și neliniară a condițiilor locale de amplasament. În rezumat sunt prezentați în detaliu doar parametrii specifici locației cu potențial mare de producere a unor evenimente majore și durata mișcării dependente de drumul parcurs de undele seismice de la sursă la amplasament, pentru care s-au realizat studii speciale, problematica locațiilor fiind abordată în foarte multe lucrări (peste 20 de studii de specialitate) fără să se ajungă la o concluzie uniformă, iar durata drumului nu a fost studiată în nici o lucrare în forma necesară simulărilor.

4.2. Locațiile cutremurelor intermediare vrâncene

Alegerea parametrilor locației hypocentrului (latitudine, longitudine și adâncime) este probabil cel mai important pas în realizarea simulărilor unor cutremure ipotetice deoarece aceștia controlează distanța de la sursă la locația simulării (o mică variație - raportată la dimensiunile cuibului seismic - modifică semnificativ conținutul de frecvențe al accelerogramelor simulate), densitatea materialului și viteza undelor seismice din vecinătatea hypocentrului este dependentă de locație, mecanismele de faliere înregistrează diferențe pe adâncime, iar magnitudinea maxim posibilă este estimată pe intervale de adâncime.

Având în vedere faptul că în literatura de specialitate există mai multe variante de distribuție pe înălțime și mai multe propuneri pentru estimarea intervalelor cu potențial de a genera un cutremur mare, s-a realizat o analiză pe adâncime în funcție de procentul de energie eliberat de anumite zone. Această analiză a fost realizată pe 4 baze de date realizate din catalogul ROMPLUS (Radulian, et al., 2019): cutremurele din perioada 1984-2019, din perioada 1940-2019 și aceleași intervale de timp cu modificarea adâncimii celor 4 cutremure majore relocate de Hurokawa et al. (2008) (1940 – 124 km, 1977 - 98 km, 1986 - 135 km, 1990 – 84 km). Analiza a fost realizată pe intervale de 10 km (valoare uzuală a erorii acceptate) pornind o dată de la adâncimea de 55 km, iar apoi de la 60 km (adâncimi alese în baza limitei de aseismicitate pentru partea superioară a corpului seismic).

Apoi, prin intersecția rezultatelor pe cele 2 tipuri de intervale, s-a ajuns la o analiză pe intervale neregulate care cuprind cât mai restrâns adâncimile ce generează cele mai mari cantități de energie (figura 19).

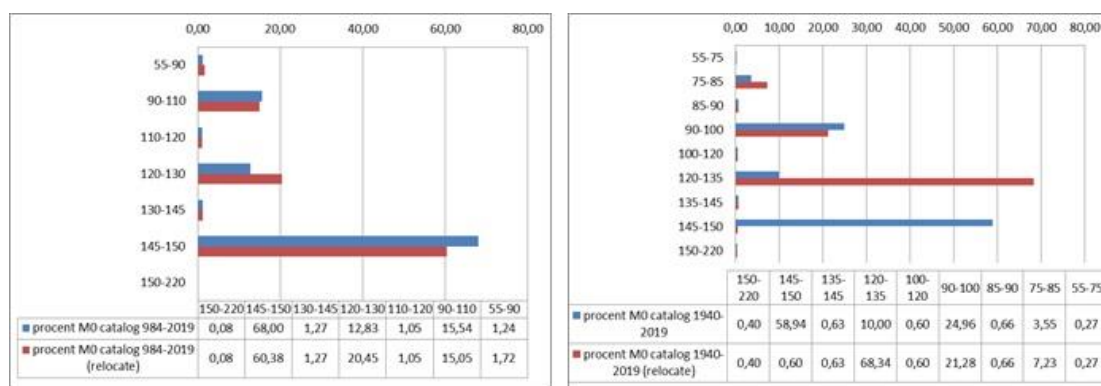


Figura 19. Energie seismică procentuală eliberată pe intervale de adâncime neregulate

Concluzii rezultate în urma analizei sunt:

- Un număr mare de cutremure pe un interval sau o magnitudine moment cumulativă mare pe interval nu înseamnă neapărat o energie seismică eliberată mare.
- În momentul în care se lucrează cu un catalog mai scurt, modificările restrânse au o influență mare.
- În funcție de catalogul prelucrat se pot observa 3 sau 4 intervale de eliberare mare de energie. Lucrând cu un catalog mai scurt pot fi evidențiate intervale „ascunse” de un catalog cu mai multe date.
- Intervalele 90-110 km, 120-135 km, 145-150 km cu procente mari de energie eliberată rezultate din analiză sunt în concordanță cu planurile de slăbire propuse de Ganas (2010) prin teoria transferului de tensiune și cu modelul triplei joncțiuni instabile propus de Beșuțiu (2006).
- Intervalul 95-105 km propus în diverse lucrări ca interval aseismic are un procent de energie eliberată mic doar în cazul în care se ia catalogul 1940-2019, altfel acest interval este inclus în zona de eliberare mare de energie 90-110.
- Intervalul aseismic 110-120 km propus de Bălă et al. (2019) se poate observa în toate cataloagele.
- Intervalul evidențiat de catalogul 1940-2019 (75-85 km) se încadrează conform lui Oncescu (1984) în zona de viteze scăzute, având capacitatea de a genera un cutremur maxim de $M_w=7$ (Pavel et al. 2015).
- Intervalul 90-110 km are capacitatea de a genera un cutremur maxim de $M_w=8$, iar segmentele 120-135 km și 145-150 km de $M_w=8.1$ (Pavel et al. 2015).
- Deasupra adâncimii de 75 km și sub adâncime de 150 km eliberarea de energie este foarte mică, în concordanță aproximativă cu observațiile făcute de Radulian et al. (2018) având în vedere că pentru cutremurele istorice din catalogul ROMPLUS adâncimile focarelor pot avea mici variații.

Pentru estimarea unor coordonate latitudine și longitudinale mai restrânse s-a prelucrat catalogul ROMPLUS 984-2019 calculând energia cumulativă pe dreptunghiuri de $0.2^\circ N \times 0.4^\circ E$ și intervale de adâncime din 10 în 10 km începând de la 60 km, păstrând pe fiecare interval de înălțime aria orizontală în care energia cumulativă a depășit 90% din întreaga energie eliberată pe respectivul interval de adâncime (figurile 20 și 21). Rezultatele sunt în concordanță cu centrii de disipare de energie propuși de Beșuțiu et al. (2009) și tind să susțină modelul triplei joncțiuni instabile.

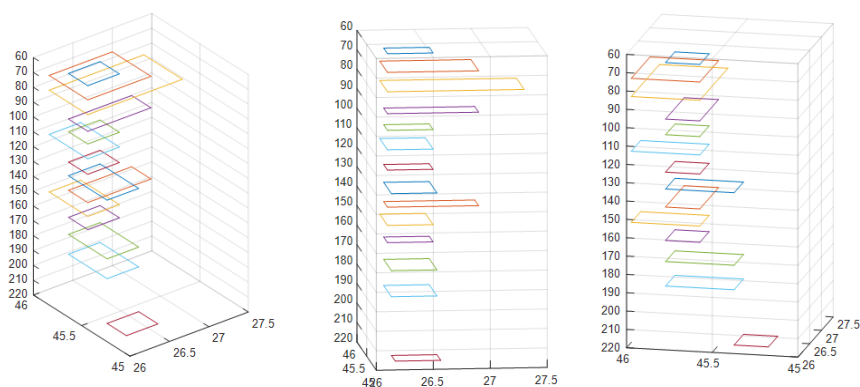


Figura 20. Repartiția 3D a suprafețelor ce conțin hipocentrele în care energia eliberată cumulativă a cutremurelor a depășit 90% din întreaga energie eliberată pe respectivul interval de adâncime

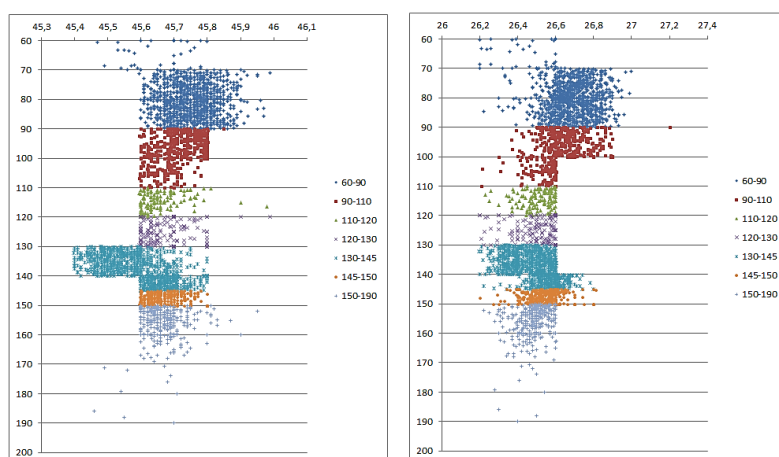


Figura 21. Repartiția pe adâncime a hipocentrilor în funcție de latitudine, respectiv longitudine din aria în care energia cumulativă a depășit 90% din întreaga energie eliberată pe respectivul interval de adâncime

În realitate, sursa unui cutremur nu este un punct, ci este o suprafață. Simularea stochastică se realizează fie prin simplificarea sursei considerând-o punctiformă (SMSIM), existând posibilitatea de a lua în calcul geometria acesteia prin calculul distanței de referință, fie prin considerarea sursei de tip falie (EXSIM). În același timp, estimarea hipocentrelelor nu poate fi restrânsă la nivelul de punct deoarece producerea unui cutremur este aleatoare și suprafețele potențiale de rupere se deplasează la fiecare cutremur. În acest capitol s-au identificat centrii seismici (în coordonate volumice) cu cea mai mare eliberare de energie din punct de vedere istoric.

4.3. Durata dependentă de distanță

În simulările stochastice durata drumului parcurs de undă este dată de o funcție de distanță definită pe intervale care cuprinde atât influența mediilor de la sursă până la roca de bază, cât și influența condițiilor locale. Boore și Thomson (2014) determină funcția duratei undelor S dependente de drum pentru baza de date NGA-West2 de 15,923 de înregistrări. Aceștia determină durata semnificativă în care se eliberează de la 5% la 95% din energia seismică (D_{95}) pentru fiecare înregistrare din care scad durata sursei și observă o distribuție a duratei medii cu distanța destul de aleatoare deoarece în anumite cazuri pragul de 5% din energia totală este atins prea devreme din cauza influenței undelor P, iar pragul de 95% este atins prea târziu din cauza condițiilor locale.

Pentru a evita aceste influențe, aceștia propun următoarea formulă pentru calculul duratei semnificative în care se eliberează de la 5% la 95%:

$$D'_{95} = 2(D_{80} - D_{20}) \quad (30)$$

unde D_{20} este timpul la care energia seismică eliberată atinge procentul de 20% (procent ales pentru a evita influența undelor P), iar D_{80} timpul la care energia seismică eliberată atinge procentul de 80% (o valoare aleasă subiectiv în funcție de concordanța funcției fereastră utilizate în simulări).

În cercetarea doctorală a fost utilizat același algoritm cu care au fost determinate, pe baza mai multor ipoteze, funcții ale duratei drumului undelor S dependente de distanță. A fost utilizată aceeași bază de date pentru care s-a determinat funcția fereastră (169 de accelerograme înregistrate în timpul cutremurelor din 04.03.1977, 30.08.1986, 30.05.1990, 31.05.1990 și 27.10.2004). Durata sursei a fost calculată în funcție de frecvența de colț a sursei determinată conform Gusev et al. (2002). Pentru calculul funcției duratei au fost analizate următoarele ipoteze pentru două baze de date (Baza 1 – cele 169 de componente orizontale utilizate în determinarea funcției fereastră și Baza 2 - 162 de componente orizontale utilizate în determinarea funcției fereastră fără înregistrările din perimetrul Bazinului Focșani):

- durata drumului este determinată ca durata semnificativă în care se eliberează de la 5% la 95% din energia seismică (D_{95}) din care se scade durata sursei;
- durata drumului este determinată ca dublul duratei semnificative în care se eliberează de la 20% la 80% din energia seismică (D'_{95}) din care se scade durata sursei (Boore și Thompson, 2014).

După cum se poate observa din figura 22, în intervalul de distanțe hipocentrale 90-150 km durata sursei are o influență mai mare decât durata drumului. După cum se poate observa din diferențele dintre mediile pentru cele două baze de date efectele topografice din Bazinul Focșani influențează puternic durata drumului parcurs de undă. Durate mai mari în raport cu cele înregistrate de alte accelerograme din intervalul de distanțe hipocentrale în care au fost încadrate au mai fost observate la stațiile seismice din Bacău, Adjud, Roman și Bârlad, orașe aflate în văi.

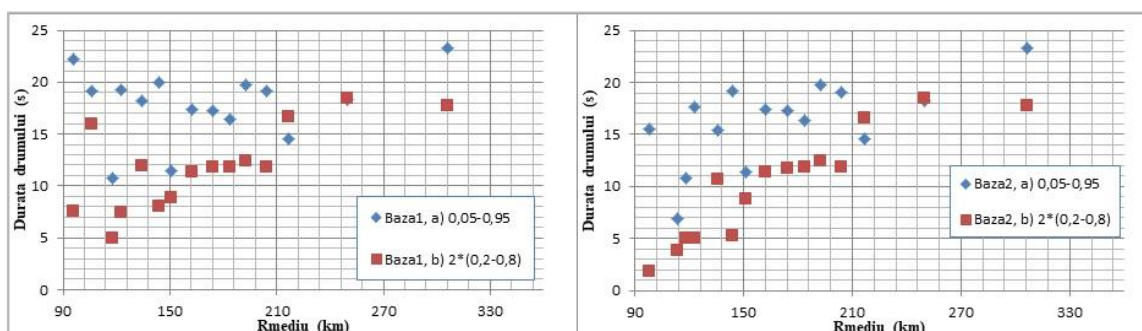


Figura 22. Valorile medii ale duratelor dependente de drumul undelor de la sursă la stație pentru Baza 1 de date (169 de componente orizontale ale mișcărilor seismice înregistrate în timpul cutremurelor din 04.03.1977, 30.08.1986, 30.05.1990, 31.05.1990 și 27.10.2004), Baza 2 de date (înregistrările din Baza 1 de date fără cele din Bazinul Focșani). Intervalele pe care s-au calculat duratele medii au fost de 10 km până la 210 km, apoi deoarece pentru distanțe mai mari de această valoare nu au existat destule înregistrări s-au utilizat următoarele intervale de distanță sursă-amplasament 210-230 km, 230-250 km și 270-350 km

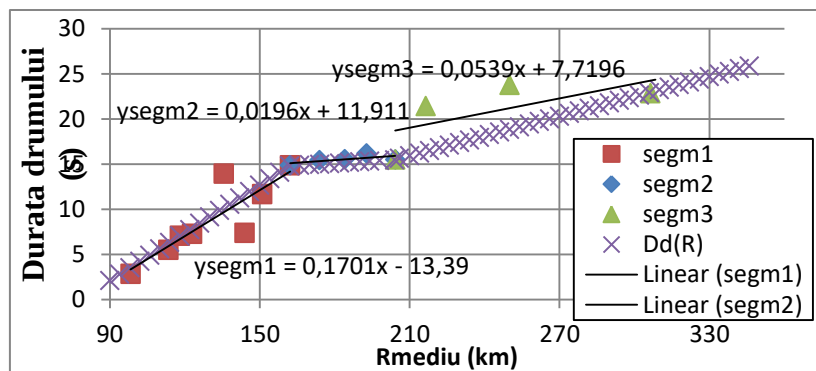


Figura 23. Valorile medii ale duratelor dependente de drumul undelor de la sursă la stație pentru Baza 2 de date împărțite pe trei segmente de intervale, cu dreptele de regresie ale fiecărui segment și modelul duratei dependente de drum propus $Dd(R)$ conform tabelului 11

Tabel 11. Model pentru durata undei dependentă de distanța de la sursă la stație

Modelul pentru durata drumului	
R (km)	Dd (s)
78	0
162	11.56
204	12.30
Panta ultimului segment 0.055	
$Dd(R) = Dd(R_{\text{ultim}}) + \text{panta} * (R - R_{\text{ultim}})$	

Având în vedere faptul că în programele de simulare stochastică durata drumului este definită pe segmente, pe baza ipotezei b, pentru baza de date din care au fost eliminate înregistrările din Bazinul Focșani, s-a definit model pentru durata undei dependentă de distanța de la sursă la stație conform tabelului 11. Având în vedere că pentru intervalul de distanță sursă-amplasament 205-350 km au existat puține înregistrări, ultimul segment al modelului pentru durata de drum ar trebui utilizat cu rețineri și realizată o altă cercetare cu un alt tip de metode de determinare a duratei (ex. simulări utilizând metoda elementelor finite pentru calculul duratei drumului). Durata drumului este dependentă de magnitudine, iar în baza de date au fost introduse înregistrările de la toate cutremurele vrâncene cu magnitudinea moment cel puțin 6. De asemenea combinarea bazei de date cu accelerograme de la alte surse seismice intermediare asemănătoare cu Vrancea nu va duce la un rezultat realist deoarece durata drumului depinde de geologia locală.

4.4. Concluzii

Simularea stochastică a mișcării seismice înglobează caracteristicile sursei, drumului parcurs de unde și modificările date de condițiile locale. Pentru cuantificarea efectelor date de condițiile locale se pot utiliza și metode numerice de simulare. Indiferent dacă se optează pentru o metodă pur stochastică sau pentru o metodă hibridă, succesul realizărilor depinde de stabilirea parametrilor caracteristici. Determinarea parametrilor pentru simularea mișcării seismice este crucială, fiecare parametru influențând rezultatul final, iar o estimare deficitară poate duce la o simulare mai puțin realistă. Acest capitol și-a propus să caute și să adopte un set de parametri cu ajutorul cărora să se realizeze simularea unor cutremure vrâncene ipotetice. În schemele de mai jos se găsesc toți parametrii sursei, ai drumului parcurs de undă și parametrii condițiilor locale de teren care pot fi considerați globali necesari simulării mișcării seismice prin metoda stochastică cu programele SMSIM și EXSIM. În ceea ce privește caracteristicile pachetului geologic superficial acestea trebuie determinate pentru fiecare amplasament în care se face simularea.

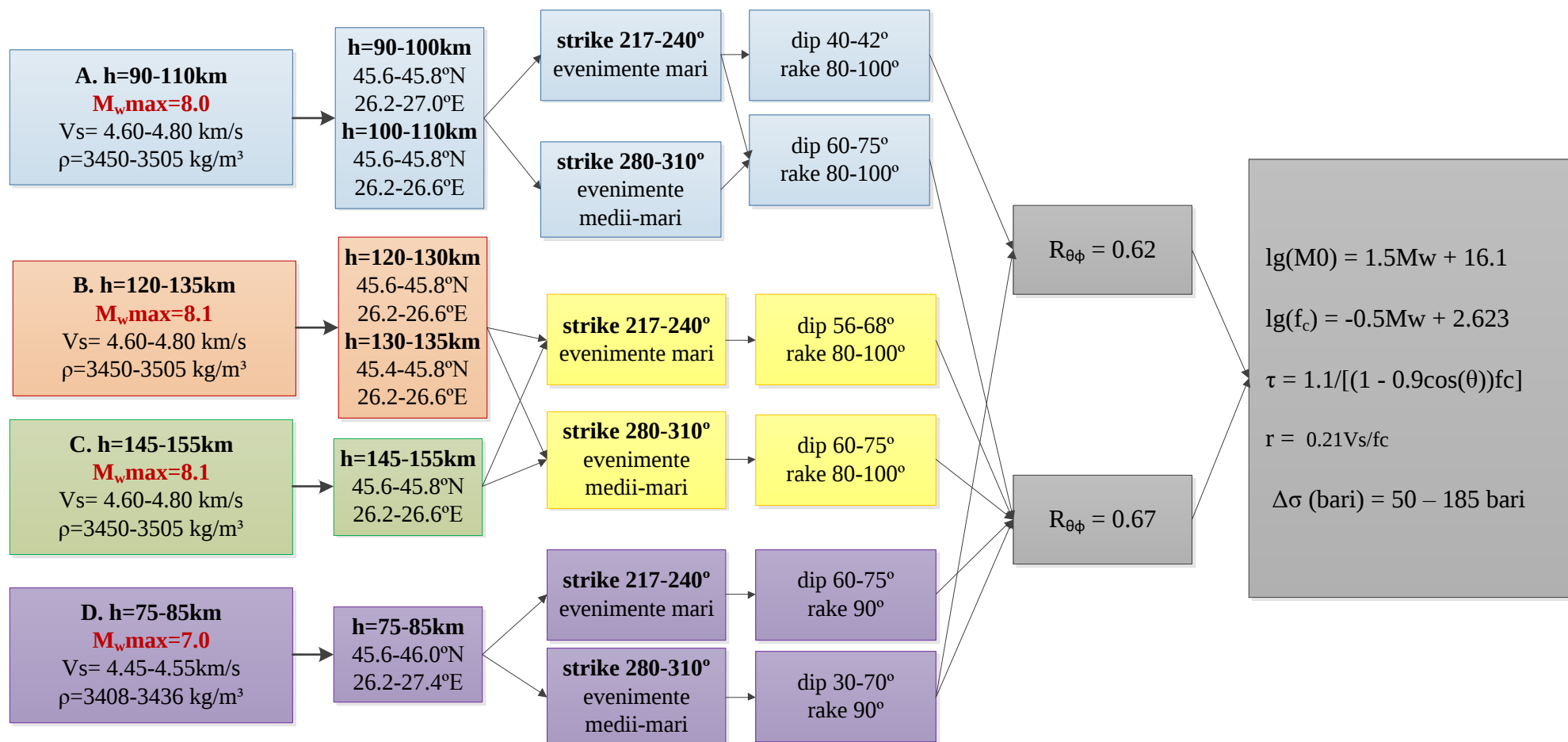


Figura 24. Ilustrarea parametrilor posibili specifici sursei, pe intervale de adâncime, necesari realizării unor simulări stochastice specifice mișcărilor seismice produse de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară

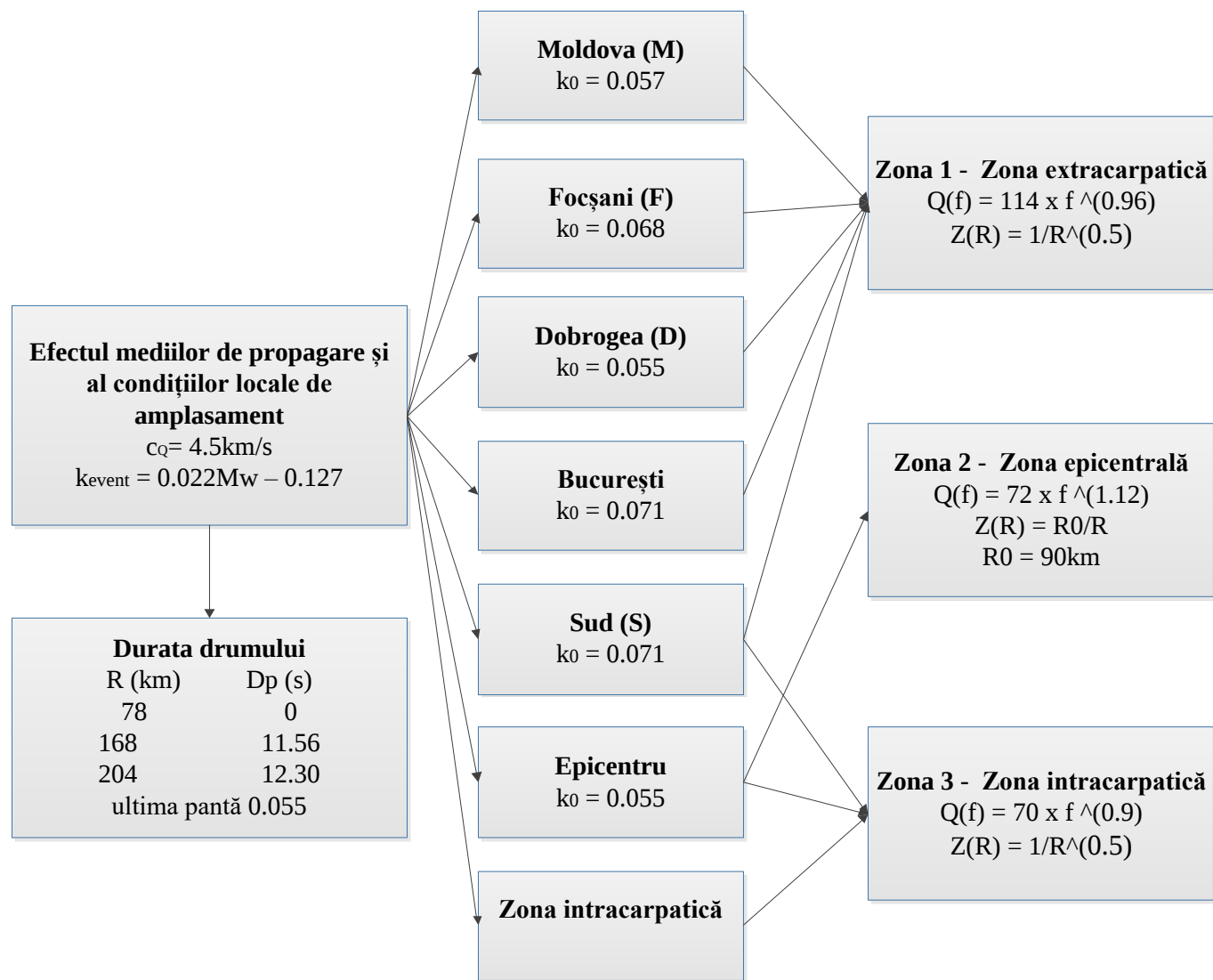


Figura 25. Ilustrarea parametrilor posibili specifici drumului parcurs de unde necesari realizării unor simulări stochastice specifice mișcărilor seismice produse de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară

5. Simularea mișcărilor seismice generate de cutremure de magnitudine mare produse de sursa de adâncime intermediară Vrancea

5.1. Introducere

Realizarea unor simulări de succes este dependentă de modul în care sunt definite fenomenele, de parametrii care le descriu, de luarea în calcul a specificităților fiecărei surse seismice și pachetului geologic străbătut de unde, iar acest lucru se obține în urma realizării unei cercetări temeinice și adaptării metodei în punctele în care modelul general nu se aplică. În capitolele anterioare a fost detaliat modul în care metoda a fost modificată pentru a descrie cât mai bine comportamentul specific mișcărilor terenului generate de sursa de adâncime intermediară vrânceană. De asemenea, a fost prezentat un studiu amănunțit a tuturor parametrilor care intră în calculul simulărilor, iar unde nu existau studii specifice în literatura de specialitate, fenomenele și parametrii au fost definiți. Intuitiv, următorul pas ce trebuie făcut în utilizarea metodei propuse este un pas de testare și verificare.

Astfel, pentru verificarea metodei de simulare a accelerogramelor au fost realizate simulări pentru amplasamentul INCERC (București) pentru mișcările terenului produse de cutremurele din 30 August 1986 ($M_w = 7.1$) și 4 Martie 1977 ($M_w = 7.4$). Fiind cutremure cu magnitudini mari, este de așteptat ca stratele geologice superficiale să aibă un comportament neliniar, ceea ce înseamnă că metoda stochastică implementată în SMSIM nu va putea să surprindă în totalitate fenomenele de modificare a undelor. Pentru a simula corect contribuțiile tuturor seturilor de parametri se va utiliza SMSIM pentru a simula mișcarea seismică de la nivelul rocii de bază, apoi va fi folosit programul DEEPSOIL pentru a lua în calcul modificările produse de comportamentul condițiilor locale de teren. Combinând cele două programe metoda de simulare devine o metodă hibridă compusă dintr-o metodă stochastică și una deterministă.

Din cauză că pentru anumiți parametrii în literatură există mai multe variante, verificarea a avut câteva etape intermediare de stabilire a acestora. Astfel, pentru atenuarea dată de drumul parcurs de undă au fost realizat câte un set de simulări pentru fiecare din cele 6 funcții de atenuare propuse (Oncescu, et al., 1999; Radulian, et al., 2000; Oth, et al., 2008; Pavel, 2015; Pavel & Vacareanu, 2015; Pavel & Vacareanu, 2018), funcția care estimează cel mai bine atenuarea fiind cea propusă de Oth et al. (2008). Ca definire a condițiilor locale de teren există 3 profile geologice de diferite adâncimi pentru amplasamentul INCERC: Constantinescu și Enescu (1985) cu un profil de aproximativ 1100m, Lungu et al. (1998) cu un profil de 127m și Neagu (2015) cu un profil de 153m (acest profil fiind de fapt amplasamentul stației seismice din CNRRS-INCERC). Definirea condițiilor locale de teren a ridicat mai multe probleme ce au fost discutate în teză: problema discretizării, problema adâncimii stratificației considerată în calcul și problema modelului de stratificație considerat. Un alt parametru care s-a dovedit a fi problematic prin sensibilitatea mare a rezultatelor în raport cu acesta este frecvența de colț a spectrului sursei.

Pentru realizarea simulărilor mișcărilor de la roca de bază, codul setului de programe SMSIM a fost modificat pentru a lua în considerare particularitățile sursei Vrancea-intermediar.

5.2. Simularea mișcării terenului din amplasamentul INCERC generate de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 30 August 1986

Pentru simularea cutremurului din 30 august 1986 a fost realizată o analiză liniar echivalentă și una neliniară cu programul DEEPSOIL pentru setul 20 de simulări realizate cu programul de simulare stochastică SMSIM (modificat). După cum se poate observa din figura 26, din punct de vedere al spectrelor medii, atât analiza neliniară cât și cea liniar echivalentă aproximează bine vârfurile amplitudinilor spectrale; cea liniar echivalentă având amplitudini ușor mai ridicate pentru anumite perioade. Însă, în ceea ce privește valorile de vârf ale accelerațiilor terenului, se poate observa din tabelul 12 că analiza neliniară diminuează, ca medie, mișcarea cu aproximativ 20 cm/s^2 , în timp ce analiza liniar echivalentă estimează bine mișcarea. Diferența dintre cele două analize de cunatificare a contribuției stratificației superficiale de pământ nu arată faptul că terenul nu a avut un comportament neliniar, ci analizele neliniare ale comportamentului pământului și modalitatea prin care acesta modifică unda seismică sunt un domeniu în curs de cercetare pentru condițiile specifice de teren din București; analiza liniar echivalentă este o analiză simplificată mai bine acoperită de cercetări, iar acest tip de analiză este recomandat să se realizeze și ca o verificare a analizei neliniare.

În figura 26 se observă că analiza neliniară „împrăștie” energia din primul segment abrupt de eliberare a energiei către cel de-al doilea segment, iar acest lucru transformă accelerograma într-o accelerogramă cu vârfuri de amplitudine ce scad treptat. Analiza liniar echivalentă în schimb, păstrează primul segment de eliberare de energie bruscă (puls de accelerație ce conține în medie 50% din energie). Din punct de vedere al duratei semnificative (perioada de timp în care se eliberează 90% din energie, începând din momentul depășirii primelor 5 procente până la atingerea procentului de 95%), ambele analize lungesc durata semnificativă în medie cu aproximativ 2s pentru analiza liniar echivalentă și 7s pentru analiza neliniară. Pentru analiza liniar echivalentă diferența poate fi explicată de influența undelor P din înregistrarea mișcării seismice reale (SMSIM este un program de simulare a mișcării undelor S, energia undelor P nefiind luată în calcul), iar diferența mai mare a duratei semnificative rezultată în urma analizei neliniare este dată de schimbarea distribuției energiei explicată anterior.

Pentru alegerea celei mai potrivite simulări, s-a realizat o analiză de tip misfit pe baza articolului lui Karimzadeh (2019) pentru următorii parametri: accelerația de vârf PGA, viteza de vârf PGV, raportul dintre accelerația de vârf și viteza de vârf PGV/PGA, viteza cumulativă absolută CAV, intensitatea ariei Ia, durata semnificativă t_{eff} sau t_D , intensitatea spectrală a accelerațiilor ASI (realizată între perioadele 0.1 s și 2.5 s) și pseudo-accelerația spectrală de răspuns PSA. În figura 26 sunt ilustrați coeficienții medii de potrivire pentru ambele seturi de 20 de accelerograme simulate. Deși ambele analize au coeficienți de potrivire foarte buni, se observă că analiza liniar echivalentă generează simulări mai bune.

Tabel 12. Caracteristicile accelerogramelor simulate cu SMSIM (modificat) și DEEPSOIL considerând o analiză neliniară și una liniară echivalentă pentru modelarea condițiilor locale de teren

Accelerograma	PGA roca de bază (cm/s ²)	PGA neliniar (cm/s ²)	PGA liniar echivalent (cm/s ²)
86INCNS	-	96.9	96.9
86INCEW	-	109.1	109.1
Medii real	-	103.0	103.0
S1 190	79.2	88.5	117.4
S1 191	85.3	94.6	112.8
S1 192	82.8	81.5	92.9
S1 193	86.0	82.5	112.3
S1 194	84.2	79.3	92.1
S1 195	91.0	88.2	108.1
S1 196	82.5	86.2	101.8
S1 197	73.2	83.5	92.6
S1 198	82.9	86.7	109.8
S1 199	90.0	89.9	111.3
S1 200	83.5	79.9	116.2
S1 201	110.6	100.7	163.1
S1 202	88.1	81.3	101.6
S1 203	90.8	83.8	90.9
S1 204	86.1	79.8	88.3
S1 205	104.1	88.8	90.8
S1 206	70.8	76.1	92.3
S1 207	83.0	82.9	107.7
S1 208	75.6	88.4	94.6
S1 209	111.2	88.7	143.7
Medii simulari	87.0	85.6	107.0

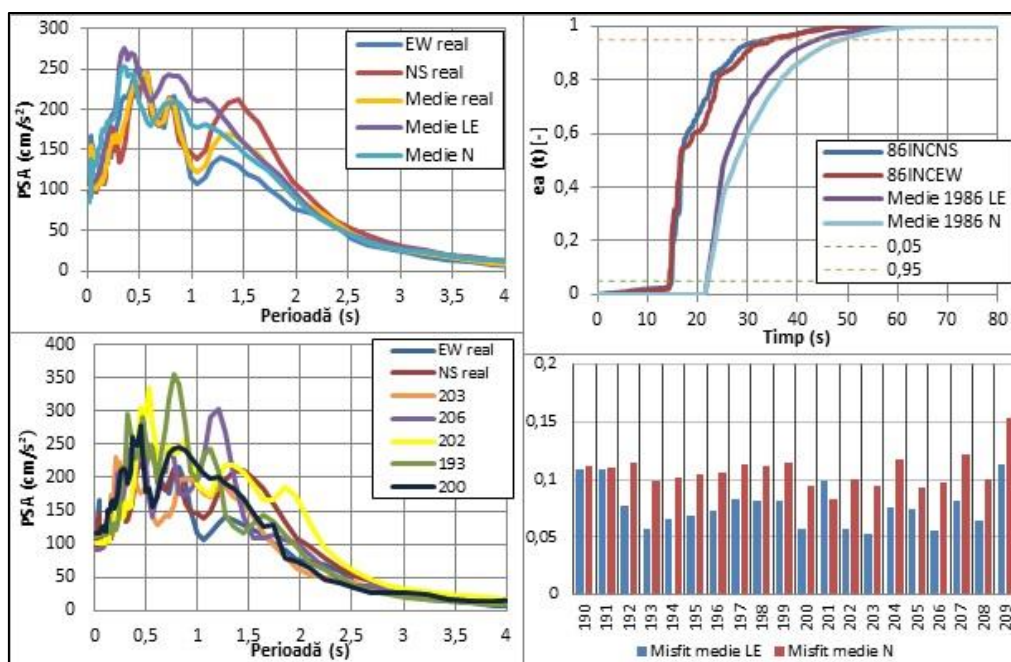


Figura 26. Comparație între accelerogramele înregistrate la stația INCERC în timpul cutremurului din 30 august 1986 și simulările realizate cu SMSIM modificat și DEEPSOIL considerând o analiză neliniară (N) și una liniară echivalentă (LE) pentru modelarea condițiilor locale de teren din punct de vedere a: a. media spectrelor simulărilor, b. energiei cumulative normalizate c. spectre ale simulărilor cu cei mai buni indici de potrivire, d. indicii de potrivire pentru toate realizările

5.3. Simularea mișcării terenului din amplasamentul INCERC generate de cutremurul vrâncean de adâncime intermediară din 4 martie 1977

Pentru simularea accelerogramelor generate de cutremurul din 4 Martie 1977 a fost realizată o analiza liniar echivalentă cu programul DEEPSOIL pentru setul 20 de simulări realizate cu programul de simulare stohastică SMSIM (modificat). În figura 27 se poate observa că media spectrelor celor 20 de simulări se încadrează între spectrele celor două înregistrări ortogonale NS și EW, aproximând foarte bine media celor două direcții ortogonale. Din punct de vedere al parametrilor de amplitudine (acelerația maximă) se poate observa din tabelul 13 că media simulărilor este aproximativ egală cu media înregistrărilor. Media rădăcinii pătratice a accelerogramelor și durata semnificativă sunt aproximativ egale cu mediile parametrilor reali. Este important de menționat că, după cum se observă din figura 27, nicio simulare nu depășește semnificativ spectrul mișcării seismice înregistrate pe direcția NS. De asemenea, se observă că, în medie, valorile de vârf ale accelerațiilor de la suprafața terenului scad cu aproximativ 90 cm/s^2 față de cele de la nivelul rocii de bază, ceea ce înseamnă că transformările neliniare ale terenului se produc cu eliberarea unei cantități destul de mari de energie (tabelul 13).

Pentru alegerea celor mai potrivite simulări s-au realizat trei analize de tip misfit (pe baza parametrilor prezentați în subcapitolul anterior): în raport cu media celor două direcții și în raport cu fiecare componentă ortogonală în parte deoarece diferențele dintre cele două înregistrări sunt semnificative. Se observă din figura 28 că, față de medie, toți coeficienții de tip misfit sunt mai mici de 0.15, ceea ce indică o potrivire foarte bună a simulărilor cu realitatea, iar în cazul analizelor față de fiecare componentă în parte depășirile valorii coeficientului de 0.15 pe o direcție sunt contrabalansate de valori foarte bune ale acestuia pe cealaltă direcție. Simulările cu cei mai buni coeficienți de potrivire (misfit) față de medie sunt 201, 202, 197, 205 și 196 (având valori între 0.052 și 0.064), pentru comparațiile cu direcția EW cea mai potrivită simulare este 196 (coeficient de potrivire 0.053), iar față de NS cea mai potrivită simulare este 209 (coeficient de potrivire 0.085). În figura 29 și în tabelul 13 se găsesc caracteristicile de amplitudine, spectrale și de durată pentru cele 6 simulări care reproduc cel mai bine caracteristicile mișcării reale a terenului din locația INCERC (București) înregistrate în timpul cutremurului de adâncime intermediară din 4 Martie 1977 produs de sursa Vrancea.

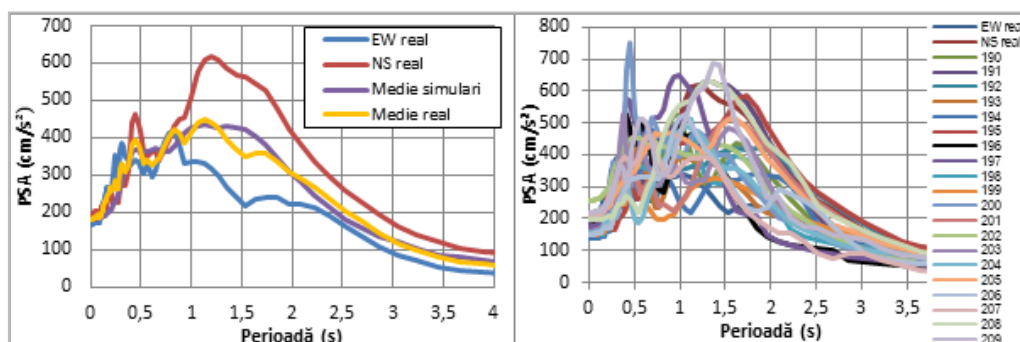


Figura 27. Comparație între spectrele accelerogramelor înregistrate la stația INCERC în timpul cutremurului din 4 martie 1977 și media spectrelor și spectrele simulărilor realizate cu SMSIM (modificat) și DEEPSOIL considerând un comportament liniar echivalent al condițiilor locale de teren

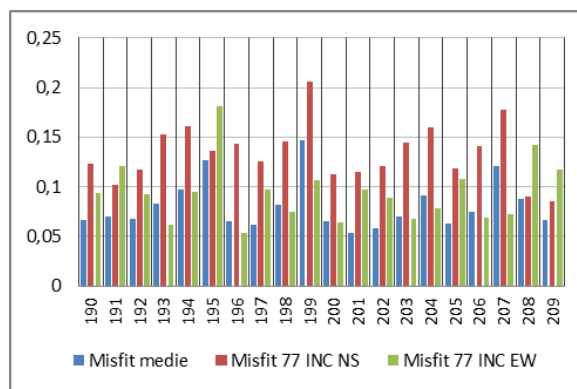


Figura 28. Valorile medii de potrivire dintre simulări și fiecare componentă ortogonală înregistrată și valorile medii de potrivire între simulări și parametrii medii ai înregistrărilor ortogonale

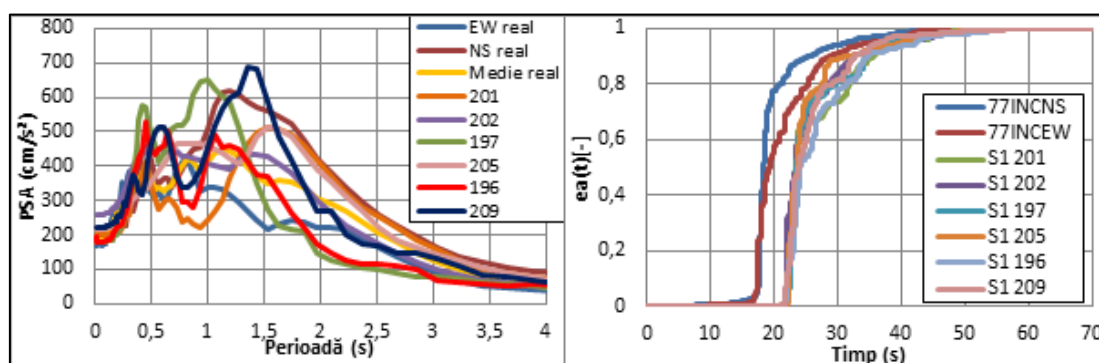


Figura 29. Spectrele simulărilor cu cei mai buni coeficienți de potrivire

Tabel 13. Caracteristicile accelerogramelor simulate cu SMSIM (modificat) și DEEPSOIL considerând un comportament linear echivalent al condițiilor locale de teren

Accelerograma	PGA roca bază (cm/s ²)	PGA suprafața (cm/s ²)	Rădăcina med. pătratică (cm/s ²)	Durata semnificativă (s)
77INCNS	-	193	55	14.14
77INCEW	-	165	36	18.42
Medii real	-	179	45	16.28
S1 190	332	172	45	14.78
S1 191	282	179	55	13.64
S1 192	284	198	44	15.47
S1 193	250	162	39	18.86
S1 194	270	138	42	16.58
S1 195	281	163	58	11.66
S1 196	244	176	39	20.53
S1 197	309	177	45	16.75
S1 198	254	149	40	19.30
S1 199	217	147	30	21.25
S1 200	264	203	45	18.97
S1 201	240	198	44	17.49
S1 202	294	256	45	16.78
S1 203	226	161	43	15.98
S1 204	221	156	38	19.43
S1 205	329	214	43	17.96
S1 206	255	150	43	17.42
S1 207	264	206	33	19.61
S1 208	332	195	54	14.00
S1 209	317	220	57	14.85
Medii simulari	273	181	44	17.07

5.4. Simularea mișcărilor terenului din amplasamentul INCERC pe baza unor scenarii de cutremure specifice sursei de adâncime intermediară Vrancea

Utilitatea accelerogramelor simulate este dată de posibilitatea de a reproduce mișcarea terenului în locații în care nu există înregistrări ale cutremurelor recente, pentru cuantificarea în domeniul timp a unor cutremure istorice și pentru predicția nivelului de hazard seismic pentru diverse scenarii posibile. Simularea mișcărilor înregistrate este utilă doar pentru verificarea metodelor alese și modului de definire a fenomenelor ce produc și modifică undele seismice. În acest sens au fost definite opt scenarii de cutremure specifice sursei de adâncime intermediară Vrancea și realizate simulări în amplasamentul INCERC București folosind metoda hibridă pe baza căreia s-au simulat accelerogramele din 30 august 1986 și din 4 martie 1977.

Pe baza parametrilor prezentați în capitolul 4 au fost definite patru scenarii de cutremure specifice analizelor de hazard (A, B, C, D) prezentate în tabelul 14 și patru scenarii specifice cerințelor de proiectare realizate în funcție de stările limită și clasele de importanță-expunere din P100-1/2013 (tabelu 15). Având în vedere faptul că la verificarea metodei prin simularea mișcărilor seismice generate de evenimentele din 1977 și 1986 s-a observat că frecvența de colț a sursei modifică semnificativ simulările chiar dacă este aleasă din intervalul valorilor de încredere, ca un prim pas s-a realizat o etapă de evaluare a influenței acesteia. Astfel pentru scenariul A au fost realizate 3 variante a câte 20 de simulări: în prima variantă s-a definit frecvența de colț în funcție de Gusev et al. (2002), în a doua a fost definită conform Frankel et al (1996), iar în varianta 3 a fost utilizată formula cu care s-a simulat mișcarea seismică generată de evenimentul din 1977 (pe baza acestei relații s-a obținut valoarea frecvenței de colț a acestui eveniment determinată de Gusev et al. (2002)).

Diferențele dintre frecvențele de colț ale acestor variante sunt de ordinul erorilor acceptate, însă aceste variații influențează foarte mult simulările. Pentru a ilustra varianta cea mai dezavantajoasă a scenariilor (și cea mai realistă) se vor ilustra în continuare rezultatele scenariilor în care frecvența de colț a sursei a fost definită conform simulărilor mișcărilor seismice generate de cutremurul din 4 martie 1977 (varianta 1 și 2 subestimează semnificativ mișcările comparativ cu 1977 având în vedere scenariul A este definit cu o magnitudine moment de 8.0 și o distanță efectivă cu aproximativ 10 km mai mică decât 1977). Pentru toate scenariile a fost utilizată fereastra de formă medie cu două intervale definită în Subcapitolul 3.4, pentru normalizarea în timp a fost utilizată durata medie a sumei duratei sursei și a drumului a celor patru scenarii specifice analizelor de hazard, iar pentru parametru de extensie a duratei a fost utilizată valoarea recomandată de Boore (2003).

Tabel 14. Valorile parametrilor considerați în scenariile specifice analizelor de hazard

Parametri	Scenariu A	Scenariu B	Scenariu C	Scenariu D
Mw	8.0	8.1	8.1	7.0
h (km)	100	130	150	80
Epicentru	45.7° lat. N 26.6° long. E	45.6° lat. N 26.4° long. E	45.7° lat. N 26.4° long. E	45.8° lat. N 26.6° long. E
Distanța de referință sursă-amplasament INCERC- R_{eff}	175	188	211	175
Geometria faliei Strike/Dip (°)	220°/70°	218°/62°	225°/63°	236°/63°
Lungime/Lățime falie	28.84/28.84	32.36/32.36	32.36/32.36	8.82/8.82
Densitatea din apropierea sursei (g/cm^3)	3.45	3.45	3.45	3.41
Viteza din apropierea sursei (km/s)	4.60	4.60	4.60	4.45
Tiparul de radiație	0.67	0.67	0.67	0.67
Spectrul sursei	$S = \frac{1}{(1 + \frac{f}{f_c})^2}$	$S = \frac{1}{(1 + \frac{f}{f_c})^2}$	$S = \frac{1}{(1 + \frac{f}{f_c})^2}$	$S = \frac{1}{(1 + \frac{f}{f_c})^2}$
Frecvența de colț a sursei *V1: Gusev et al. 2002 *V2: Frankel et al. 1996 *V3: Subcapitol 5.3	V1: 2.48 – 0.5Mw V2: 2.623 – 0.5Mw V3: 2.779 – 0.5Mw V1: 0.02463Hz V2: 0.0419Hz V3: 0.0601Hz	2.779 – 0.5Mw	2.779 – 0.5Mw	2.779 – 0.5Mw
Împrășrirea geometrică	$R^{-0.5}$	$R^{-0.5}$	$R^{-0.5}$	$R^{-0.5}$
Durata sursei cu directivitate	0.1385	0.1805	0.2425	0.2556
Durata drumului	78.0 0.0 162.0 11.56 204.0 12.3 0.055			
Atenuarea dependentă de eveniment k_{event}	$0.022Mw - 0.127$			
Funcția de atenuare corespunzătoare drumului parcurs de undele seismice	$114f^{0.96}$			
Condiții locale de teren	Profil Neagu (2015) și Constantinescu și Enescu (1985)			
Fereastra de formă (fereastra medie cazul I, Subcapitolul 3.4)	$1.005517(\frac{t}{t_e})^{0.000656}e^{1.062245(\frac{t}{t_e})}$ intervalul 1; $f_{ib}=1$ $0.7026(\frac{t}{t_e})^{0.000575}e^{1.864424(\frac{t}{t_e})}$ intervalul 2; $f_{ib}=2$ valoare recomandată de Boore (2003) $t_0 = 2.5 s$			

Tabel 15. Valorile parametrilor considerați în scenariile specifice proiectării

Parametri	Scenariu SLS	Scenariu SLU cl. III	Scenariu SLU cl. II	Scenariu SLU cl. I
Mw	7.06	7.38	7.45	7.55
D (km)	164	166	164	162

Tabel 16. Caracteristicile accelerogramelor simulate pe baza parametrilor specifici celor patru scenarii de analiză de hazard

Accelerograma	Scenariu A		Scenariu B		Scenariu C		Scenariu D	
	PGA (cm/s ²)	Tc (s)	PGA (cm/s ²)	Tc (s)	PGA (cm/s ²)	Tc (s)	PGA (cm/s ²)	Tc (s)
S1 190	222	2.15	166	1.74	148	1.60	119	1.10
S1 191	211	1.61	220	2.15	196	1.83	149	1.33
S1 192	166	1.63	220	1.74	204	1.68	139	1.21
S1 193	183	1.67	177	2.57	162	1.80	148	1.09
S1 194	228	1.63	160	1.85	210	2.09	177	1.34
S1 195	214	2.00	219	1.49	222	2.37	197	0.79
S1 196	163	1.54	181	1.91	132	2.10	180	1.54
S1 197	224	1.46	163	1.59	181	1.95	172	0.78
S1 198	155	2.00	223	2.21	193	1.52	132	1.04
S1 199	206	2.41	180	1.32	143	1.58	170	0.76
S1 200	199	1.97	212	1.59	166	1.63	190	1.33
S1 201	225	1.74	162	2.23	209	1.66	152	1.27
S1 202	204	1.97	256	2.08	182	2.07	136	1.11
S1 203	227	2.05	183	2.13	163	2.14	157	0.50
S1 204	266	1.80	249	2.03	229	1.98	160	1.29
S1 205	184	1.64	135	1.61	186	2.16	139	1.42
S1 206	200	2.13	174	1.32	172	1.60	175	1.49
S1 207	161	1.14	253	2.23	227	2.12	153	0.81
S1 208	195	1.36	251	2.00	178	1.55	143	1.35
S1 209	178	1.97	193	1.49	213	1.63	127	0.83
Medii similari	200	1.79	199	1.86	186	2.03	156	1.12

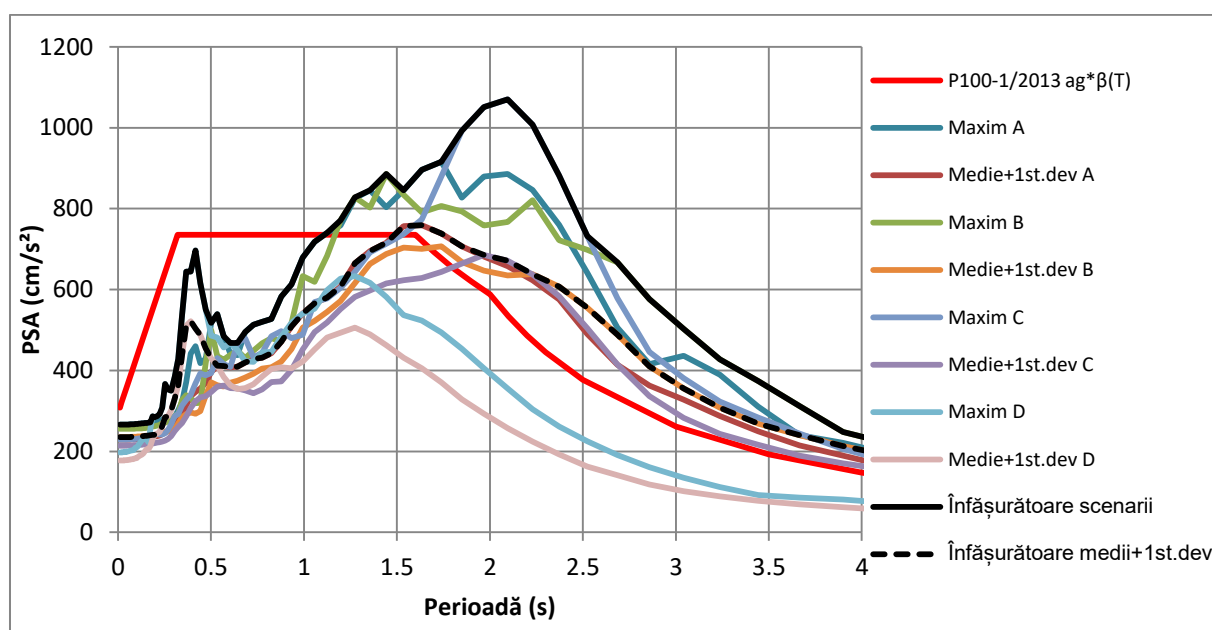


Figura 30. Descriptori statistici spectrali pentru seturile de simulări realizate pentru fiecare scenariu în parte și înfășurătoarea tuturor celor patru scenarii specifice analizelor de hazard

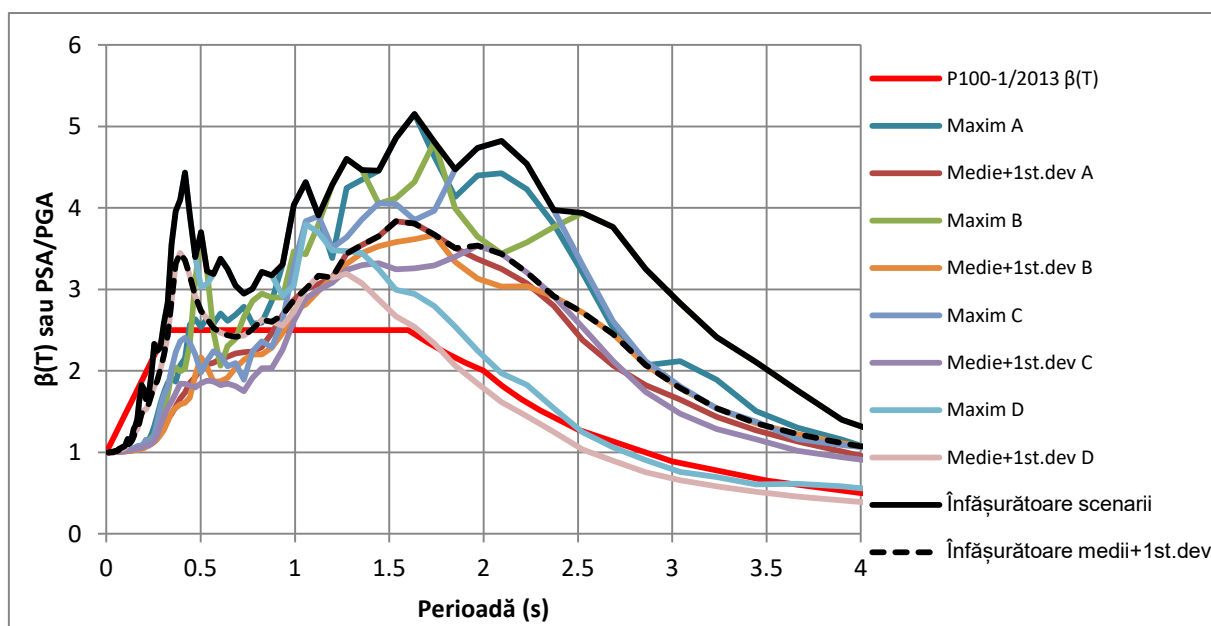


Figura 31. Descriptori statistici ai spectrelor normalizate pentru seturile de simulări realizate pentru fiecare scenariu în parte și înfășurătoarea tuturor celor patru scenarii specifice analizelor de hazard

Ca aspecte generale, se observă o creștere a perioadei de colț până la 2.57 s, perioada de colț medie a simulărilor realizate pentru scenariile A, B și C depășind perioada de colț propusă de codul de proiectare P100-1/2013 cu 0.2-0.4 s. Accelerațiile maxime de vârf ale scenariilor sunt de 265 cm/s^2 pentru scenariul A, 255 cm/s^2 pentru scenariul B, 228 cm/s^2 pentru scenariul C și 196 cm/s^2 pentru scenariul D. Însă trebuie precizat faptul că față de nivelul înregistrat la roca de bază accelerațiile de vârf de la suprafață scad în medie cu $150\text{-}200 \text{ cm/s}^2$ pentru scenariile A și B și cu $100\text{-}50 \text{ cm/s}^2$ pentru scenariile C și D, ceea ce înseamnă că transformările neliniare ale terenului se produc cu un consum foarte mare de energie, iar pentru o locație cu o stratificație superficială mai tare mișcările terenului ar putea înregistra accelerații de vârf mult mai mari. De asemenea, având în vedere faptul că, relativ la cod, valoarea de vârf PGA (a_g) dictează punctul de ancorare al spectrului de proiectare (când perioada este 0.01) și valoarea de amplificare a spectrului normalizat $\beta(T)$, și ținând cont de faptul că spectrele simulărilor nu rezultă din același algoritm ca spectrul de proiectare din cod, trebuie menționat că singura implicație a PGA-ului mai mic al simulărilor este că pentru perioade mici (sub 0.25s – structuri foarte rigide) există o diferență de până la 100 cm/s^2 între accelerațiile spectrale ale simulărilor și nivelul de hazard propus în cod.

Se observă că pentru condițiile locale din amplasamentul INCERC un seism mai mare produce amplitudini spectrale mai mari pentru perioade mai mari de 1s. Mișcarea de la nivelul rocii de bază încărcată cu perioade scurte și cu vârfuri de accelerații mari este transformată de comportamentul stratelor superficiale de pământ într-o mișcare bogată în perioade lungi, cu vârfuri de accelerație mai mici (din cauza consumului de energie din timpul proceselor de deformare neliniară a terenului). O altă observație generală este aceea că pachetul de straturi de pământ prin care au fost definite condițiile locale de teren are o perioadă proprie de aproximativ 5.5 s, ceea ce înseamnă că pentru cutremure de magnitudini și mai mari, tendința de creștere a perioadei de colț poate continua.

Până la perioada de 1s, din punct de vedere spectral se observă că simulările scenariilor A, B și C au amplitudini mai mici cu aproximativ $200-300\text{cm/s}^2$ față de spectrul din Codul de proiectare seismică P100-1/2013, însă scenariul mai mic (D) produce amplificări mai mari în acest interval de perioade. Revenind la modul de calcul al spectrului din cod, pentru definirea acestuia au fost utilizate accelerograme înregistrate în timpul cutremurelor din 4 Martie 1977 ($M_w = 7.4$), 30 August 1986 ($M_w = 7.1$) și 30 Mai 1990 ($M_w = 6.9$). După cum se poate observa din capitoul anterior, cutremurul din 1986 nu a avut îndeajuns de multă putere ca cel din 1977 pentru ca modificarea comportamentului terenului să poată duce la foarte multe componente spectrale de perioade lungi, astfel că energia acestuia (la fel ca în cazul scenariului D) a rămas pe componentele spectrale de perioade mai mici. În cazul în care se dorește construirea unui spectru de proiectare în care să fie luate în calcul și simulări realizate pe baza anumitor scenarii, plaja de magnitudini din scenarii trebuie să fie bogată în așa fel încât să ia în calcul și ipotezele în care cutremurul nu are puterea să conducă la o comportare neliniară a terenului atât de mare încât să conducă la mișcări bogate în amplitudini spectrale mari pentru perioade mari. Important de menționat este faptul că în conformitate cu Eurocode 8 (SR-EN1998-1:2004, 2004) terenul din amplasamentul INCERC (București) este încadrat în tipul C de condiții locale, iar rezultatele simulărilor pentru alte tipuri de condiții locale vor fi diferite.

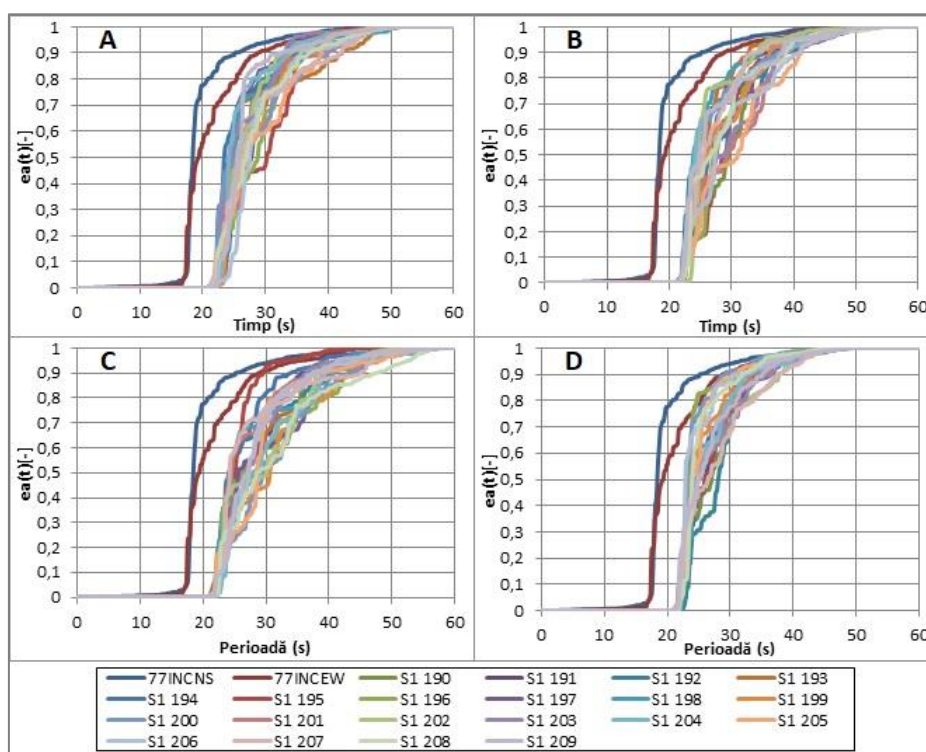


Figura 32. Comparație între energiile cumulative normalizate ale accelerogramelor înregistrate la stația INCERC în timpul cutremurului din 4 martie 1977 și energiile cumulative normalizate ale simulărilor realizate pentru fiecare scenariu

Din punct de vedere al energiilor cumulative normalizate se observă „împrăștierea” energiei de pe segmentul de eliberare buscă pe segmentul de eliberare lentă a energiei, remarcându-se mai multe segvențe de fază puternică – fază lentă (segmentele aproape verticale reprezentând accelerații de tip puls cu valori mari, iar segmentele înclinate reprezintă accelerații cu valori de vârf mai mici). Acest fenomen indicând pierderile de energie rezultate în urma modificărilor neliniare suferite de

teren. Această „împrăștiere” conduce (împreună cu creșterea duratei sursei produsă de magnitudinea cutremurului și durata drumului parcurs de unde) la o creștere a duratei semnificative a mișcărilor seismice de până la 10 s față de media înregistrărilor din 1977 din amplasamentul INCERC (cele mai mari creșteri fiind înregistrate la scenariul C). Din punct de vedere a rădăcinii medii pătratice a accelerațiilor scenariile A și B înregistrează valori medii de aproximativ 60 cm/s^2 , ceea ce indică o intensitate cu 33% mai mare față de intensitatea medie a accelerogramelor înregistrate în 1977. Valorile medii ale rădăcinilor medii pătratice a accelerațiilor scenariilor C și D se încadrează între valorile celor două componente ortogonale din 1977.

Având în vedere faptul că acțiunea seismică încarcă structurile în funcție de modurile proprii de vibrație trebuie subliniat faptul că din primele trei scenarii specifice analizelor de hazard au rezultat accelerații spectrale de până la $900 - 1100 \text{ cm/s}^2$ pentru perioade mai mari de 1 s, depășind nivelul hazardului propus de codul de proiectare cu până la 500 cm/s^2 , ceea ce înseamnă că în cazul unui eveniment seismic mare structurile flexibile vor fi încărcate cu o energie seismică foarte mare.

În Codul de proiectare P100-1/2013 Partea I, *Anexa D. Procedeu de calcul static neliniar (biografic) al structurilor*, și Partea a II-a, *Capitolul C3. Acțiunea seismică*, se precizează faptul că „pentru calculul dinamic al structurilor se utilizează accelerograme, acestea putând fi de mai multe tipuri: artificiale, înregistrate și simulate” (MDRAP, 2014). Din cauza complexității metodelor de simulare și a parametrilor care descriu fenomenele care generează și influențează undele seismice, la momentul actual nu există accelerograme simulate specifice hazardului seismic din România la îndemâna proiectanților. Având în vedere faptul că structurile de rezistență ale clădirilor se proiectează pe baza conceptului de stări limită și clase de importanță, al doilea set de scenarii a fost realizat utilizând datele din articolul lui Pavel et al. (2017) rezultate din dezagregarea hazardului seismic pentru stările limită și clasele de importanță definite în P100-1/2013. Astfel se consideră patru scenarii pentru: starea limită de serviciu SLS pentru toate clădirile, starea limită ultimă SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere III, starea limită ultimă SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere II și starea limită ultimă SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere I. Pentru fiecare scenariu au fost realizate câte un set de câte 10 accelerograme în baza metodei hibride definite. Cele 40 de simulări rezultate sunt anexate tezei în format electronic.

Pentru cele patru scenarii realizate în ipotezele proiectării toți parametrii în afară de magnitudinea moment și distanța sursă-amplasament au fost identici. Se observă că magnitudinile mari transformă amplitudinile spectrale corespunzătoare perioadelor scurte în componente corespunzătoare perioadelor lungi (figurile 34 și 35). Perioada de colț a mișcărilor simulate crește de la media de 1.51 s pentru scenariul SLS pentru toate clădirile la media de 1.66 pentru scenariul SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere I. De asemenea se observă că rădăcina medie pătratică a accelerațiilor crește o dată cu creșterea magnitudinilor de la o medie de 42.77 cm/s^2 (scenariul SLS pentru toate clădirile) la 57.84 cm/s^2 (scenariul SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere I). Din punct de vedere al accelerațiilor de vârf se remarcă o creștere a diferențelor dintre accelerațiile de la nivelul rocii de bază și cele de la nivelul suprafeței libere o dată cu creșterea mărimii hazardului (pentru SLS pentru toate clădirile accelerația de vârf de la suprafață fiind cu 50 cm/s^2 mai mică decât cea de la nivelul rocii de bază în timp ce pentru SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere I este cu 115 cm/s^2 mai mică); această creștere a diferențelor demonstrând încă o dată creșterea cantității de energie disipată din cauza

comportamentului neliniar al straturilor superficiale de pământ din amplasamentul INCERC (București).

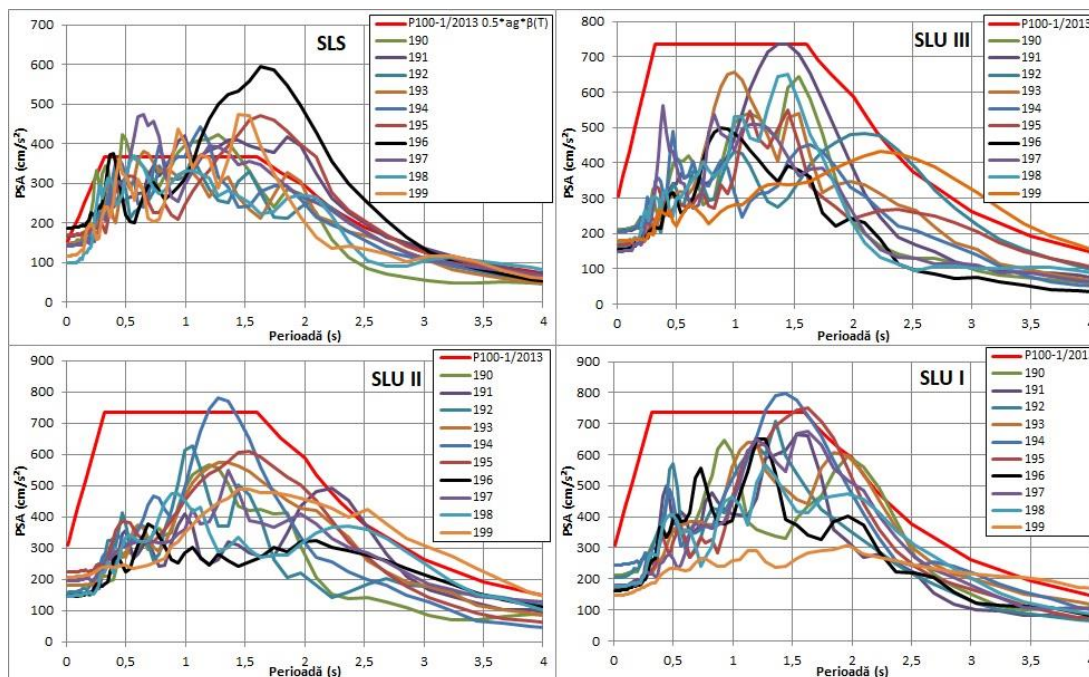


Figura 33. Comparație între spectrele accelerogramelor înregistrate la stația INCERC în timpul cutremurului din 4 martie 1977, spectrul de răspuns elastic din P100-1/2013 și spectrele simulărilor realizate pentru scenariile SLS, SLU clasa a III-a, SLU clasa a II-a și SLU clasa I

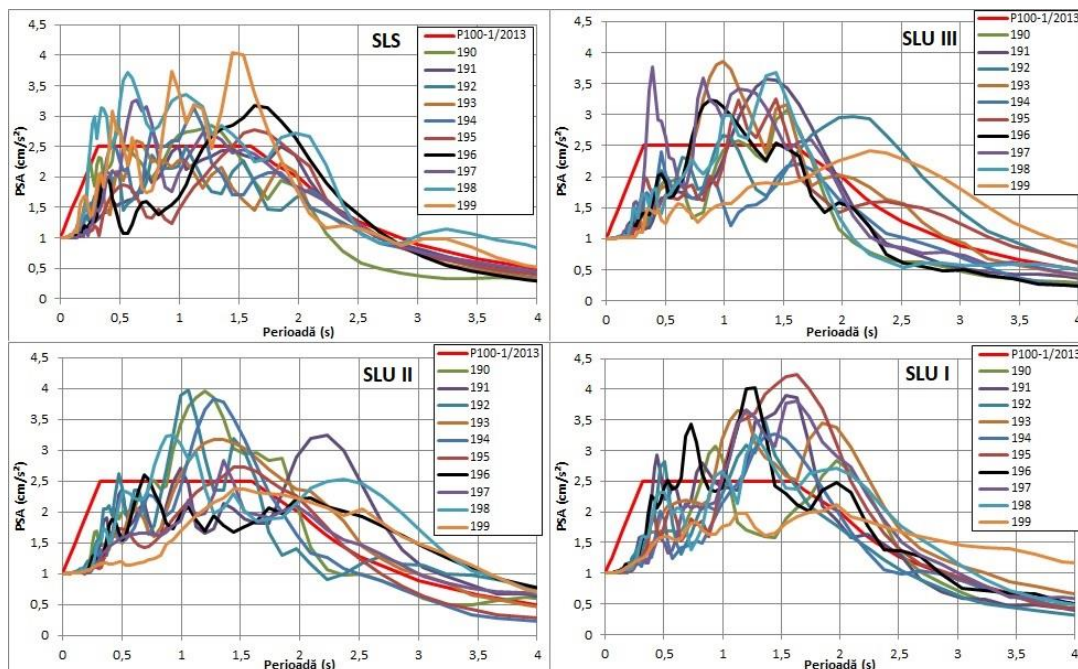


Figura 34. Comparație între spectrele normalizate ale accelerogramelor înregistrate la stația INCERC în timpul cutremurului din 4 martie 1977, spectrul de răspuns elastic normalizat din P100-1/2013 și spectrele normalizate ale simulărilor realizate pentru scenariile SLS, SLU clasa a III-a, SLU clasa a II-a și SLU clasa I

Tabel 17. Caracteristicile accelerogramelor simulate pe baza parametrilor specifici celor patru scenarii de proiectare

Accelerograma	Scenariu SLS		Scenariu SLU clasa III		Scenariu SLU clasa II		Scenariu SLU clasa I	
	PGA (cm/s ²)	Tc (s)	PGA (cm/s ²)	Tc (s)	PGA (cm/s ²)	Tc (s)	PGA (cm/s ²)	Tc (s)
S1 190	148	1.29	210	1.54	144	1.34	210	1.82
S1 191	167	1.85	207	1.47	151	2.23	171	1.62
S1 192	146	1.50	163	2.20	157	1.16	203	1.36
S1 193	146	1.60	171	1.26	180	1.54	176	1.83
S1 194	142	1.22	204	1.54	204	1.34	244	1.49
S1 195	169	1.70	168	1.44	222	1.62	177	1.64
S1 196	187	1.72	155	1.18	145	1.86	162	1.27
S1 197	145	1.20	149	1.19	194	1.46	177	1.63
S1 198	100	1.50	177	1.44	146	1.91	175	1.69
S1 199	117	1.52	180	2.40	207	2.19	146	2.29
Medii similari	147	1.51	178	1.57	175	1.66	184	1.66

Tabel 18. Caracteristicile spectrale ale accelerogramelor simulate pentru scenariile SLS și SLU cl. III

Scenariu	Scenariu SLS				Scenariu SLU clasa III			
	SA@1.0s (cm/s ²)	SA@1.0s /PGA	SA@1.6s (cm/s ²)	SA@1.6s /PGA	SA@1.0s (cm/s ²)	SA@1.0s /PGA	SA@1.6s (cm/s ²)	SA@1.6s /PGA
S1 190	405	2.73	285	1.93	536	2.55	581	2.77
S1 191	355	2.13	387	2.32	542	2.62	654	3.16
S1 192	366	2.50	277	1.90	428	2.63	395	2.42
S1 193	328	2.25	213	1.46	636	3.72	419	2.45
S1 194	409	2.88	281	1.98	246	1.21	451	2.21
S1 195	279	1.65	471	2.79	481	2.86	334	1.99
S1 196	349	1.87	594	3.18	463	2.99	361	2.33
S1 197	332	2.29	346	2.39	498	3.34	383	2.57
S1 198	334	3.34	224	2.24	531	3.00	480	2.71
S1 199	338	2.89	395	3.37	283	1.57	349	1.94
Medie	343	2.45	463	2.70	463	2.70	463	2.70
Abatere standard	33	0.49	98	0.67	98	0.67	98	0.67

Tabel 19. Caracteristicile spectrale ale accelerogramelor simulate pentru scenariile SLU cl. II și SLU cl. I

Scenariu	Scenariu SLU clasa II				Scenariu SLU clasa I			
	SA@1.0s (cm/s ²)	SA@1.0s /PGA	SA@1.6s (cm/s ²)	SA@1.6s /PGA	SA@1.0s (cm/s ²)	SA@1.0s /PGA	SA@1.6s (cm/s ²)	SA@1.6s /PGA
S1 190	533	3.70	424	2.95	511	2.43	435	2.07
S1 191	372	2.46	275	1.82	408	2.38	660	3.86
S1 192	627	3.99	394	2.51	520	2.56	486	2.39
S1 193	508	2.82	517	2.87	614	3.49	442	2.51
S1 194	587	2.88	560	2.74	566	2.32	728	2.98
S1 195	485	2.18	591	2.66	538	3.04	750	4.24
S1 196	302	2.08	270	1.86	473	2.92	343	2.12
S1 197	424	2.19	380	1.96	511	2.89	677	3.82
S1 198	416	2.85	270	1.85	437	2.50	414	2.37
S1 199	375	1.81	478	2.31	262	1.79	282	1.93
Medie	463	2.70	416	2.35	484	2.63	522	2.83
Abatere standard	98	0.67	114	0.43	93	0.45	159	0.80

5.5. Concluzii

În acest capitol a fost realizată cu succes simularea mișcărilor terenului din amplasamentul INCERC (București) produse de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară din 4 Martie 1977 ($M_w = 7.4$) și 30 August 1986 ($M_w = 7.1$) și simularea unor accelerograme pentru cutremure ipotetice (patru scenarii specifice analizelor de hazard și patru scenarii specifice cerințelor de proiectare în funcție de stările limită și clasele de importanță a clădirilor definite în P100-1/2013). Metoda de simulare hibridă propusă presupune utilizarea setului de programe de simulare SMSIM (modificat) pentru generarea accelerogramelor la nivelul rocii de bază și adăugarea influenței condițiilor locale de teren utilizând analiza liniar-echivalentă a comportării pământurilor implementată în programul DEEPSOIL. Pentru definirea parametrilor și fenomenelor care influențează unda seismică, în acest capitol, a fost realizată o analiză comparativă a rezultatelor în funcție de funcția de atenuare a undelor, a fost prezentată modalitatea de definire a stratificației condițiilor locale de teren, discuția fiind necesară din cauza faptului că, în literatura de specialitate nu au fost identificate descrieri mai aprofundate ale straturilor geologice de pământ mai adânci, iar pentru cele mai de suprafață (superficiale) s-au găsit 3 variante cu definiții ușor diferite una față de cealaltă. În cazul frecvenței de colț a sursei s-au observat variații semnificative ale simulărilor date de variațiile mici ale acesteia. În cazul discretizării stratificației geologice utilizate în programul DEEPSOIL a fost observat faptul că în funcție de aceasta sunt percepute sau nu mișcările cu perioade mici, în acest sens fiind definită o discretizare optimă.

Validând metoda prin simularea mișcărilor terenului generate de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară din 4 martie 1977 și 30 august 1986, au fost definite opt scenarii de cutremure pentru diferite adâncimi de focar și magnitudini și au fost realizate accelerograme simulate pe baza acestora. S-a observat că din punct de vedere spectral nivelul de hazard propus prin normativul de proiectare seismică P100-1/2013 este mai mic pentru perioade mai mari de 1 s față de anumite accelerograme simulate, înregistrându-se amplitudini spectrale semnificativ mai mari pentru perioadele de până la 2.75-3.0 s. Pentru scenariile A, B, C, SLU clasa II și SLU clasa I perioada medie de colț a simulărilor depășește valoarea propusă de codul de proiectare, valoarea maximă a perioadei de colț a simulărilor fiind de 2.57 s. Cele 40 de accelerograme simulate pe baza ipotezelor de proiectare (SLS pentru toate clădirile, SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere III, SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere II și SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere I) sunt anexate la prezenta lucrare în format electronic pentru a furniza proiectanților o metodă alternativă de definire a acțiunii seismice.

6. Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare

În lucrarea de față este modificată și aplicată o metodă de generare a accelerogramelor simulate. Pe baza unei cercetări amănunțite, au fost realizate cu succes simulări pentru sursa de adâncime intermediară Vrancea atât pentru mișcări seismice generate de evenimente trecute, cât și pentru scenarii de cutremur. Utilitatea accelerogramelor simulate este dată atât de posibilitatea utilizării acestora în proiectarea structurilor prin metoda de calcul dinamic, cât și de posibilitatea utilizării acestora împreună cu accelerogramele înregistrate în analize de hazard (prin simularea evenimentelor istorice neînregistrate sau prin simularea unor evenimente ipotetice posibile prin care să se poată acoperi intervalele de magnitudini neacoperite de evenimentele reale și locațiile în care nu există înregistrări ale mișcărilor terenului).

Pentru realizarea accelerogramelor simulate au fost inițial testate două metode stochastice de simulare (cu sursă punctiformă și cu sursă de tip falie) și două metode hibride în care au fost combinate cele două metode stochastice cu metoda numerică de simulare a efectelor neliniare specifice stratificației geologice superficiale din amplasament. În această primă etapă au fost analizați parametrii tensiunii de forfecare, modalitățile diferite de definire a spectrelor sursei, durata drumului parcurs de undele seismice și influența modalităților de calcul a efectelor condițiilor locale de teren. De asemenea a fost observat faptul că fereastra de modelare a zgomotului alb, generat ca realizare unitate în procesul stochastic, nu surprinde specificitatea mișcărilor seismice generate de evenimentele subcrustale vrâncene din punct de vedere al modului de eliberare al energiei în domeniul timp.

Pe baza acestor observații, au fost analizate un număr de 371 componente orizontale ale mișcărilor terenului înregistrate la diferite stații seismice în timpul cutremurelor vrâncene din 4 martie 1977, 30 august 1986, 30 și 31 mai 1990, 27 octombrie 2004 și au fost definite cinci tipuri de comportamente de eliberare a energiei. Tipurile de comportament au fost împărțite astfel: categoria A (model tipic pentru aproape jumătate din înregistrări) în care aproximativ 50% din energie este eliberată în primele 1.5-3.0 s ale mișcării puternice, în timp ce restul energiei este eliberat lent în 20-40 și categoria B cu excepții de tip I, II, III și IV. Pentru mișcărilor terenului încadrate în categoriei A, au fost determinați descriptorii statistici pentru fiecare cutremur separat, și pentru toate cele cinci cutremure împreună. Apoi, pe baza descriptorilor statistici, au fost determinați parametrii specifici ferestrei de modelare a zgomotului implementate în programele de simulare stochastică. Realizând că fereastra definită pentru programele SMSIM și EXSIM nu surprinde comportamentul urmărit, a fost definită o nouă fereastră de modelare a zgomotului alb, pe baza căreia a fost surprinsă eliberarea de energie specifică mișcărilor produse de cutremurele vrâncene de adâncime intermediară.

În următoarea etapă s-a realizat o cercetare amănunțită a tuturor parametrilor care se constituie în date de intrare pentru realizarea simulărilor stochastice. Pe baza literaturii de specialitate, pentru fiecare parametru s-au realizat analize comparative între variantele de definiție a acestora și au fost stabilite cele mai bune metode de definire și cuantificare a lor. Pentru câțiva parametri au fost realizate studii specifice de determinare a acestora deoarece fie nu au existat studii de definire a parametrilor, fie intervalele lor de definiție erau prea variate și extinse, acest lucru putând introduce erori în simulări. Astfel, au fost determinate intervale restrânse de adâncimi de focar și epicentre în care ar putea avea loc cutremure viitoare și a fost definită o relație pentru

durata drumului parcurs de undele seismice (acest parametru nefiind determinat în nicio lucrare de specialitate). Pe baza acestei cercetări au fost definite intervale spațiale posibile de producere a unui viitor cutremur, iar pentru fiecare interval au fost definite intervale restrânse de caracterizare a parametrilor necesari realizării simulărilor accelerogramelor.

Ulterior au fost realizate cu succes simulări pentru testarea ipotezelor de definire a parametrilor și a metodei de simulare pentru mișcările seismice produse de cutremurele din 4 martie 1977 și 30 august 1986 în amplasamentul stației INCERC (București). În cadrul acestei etape au fost realizate analize comparative pentru atenuarea undelor seismice, frecvența de colț a sursei și definirea stratificației condițiilor locale de teren. S-a ales o formulă potrivită pentru atenuarea dată de drumul parcurs de undele seismice de la sursă la amplasament, s-a discutat sensibilitatea simulărilor la frecvența de colț a sursei, a fost stabilit un profil pentru definirea condițiilor locale de teren din amplasamentul INCERC și s-a arătat că utilizarea unui profil geologic superficial de adâncime mică nu generează modificările specifice condițiilor locale de teren și că amplificările specifice perioadelor lungi de colț observate în INCERC/București sunt produse de întregul pachet sedimentar care se întinde până la geologia specifică Cretacicului (aproximativ 1 km). Pe baza acestor ultime observații metoda propusă și parametrii au fost testați, rezultând accelerograme simulate care înglobează foarte bine toate caracteristicile accelerogramelor reale.

În final, s-au definit opt scenarii de cutremure și pe baza acestora au fost simulate accelerograme în amplasamentul INCERC (patru scenarii specifice analizelor de hazard cu magnitudini moment maxime posibile pe intervalul de adâncime corespunzător și patru scenarii specifice cerințelor de proiectare în funcție de stările limită și clasele de importanță a clădirilor definite în P100-1/2013). S-a observat că din punct de vedere spectral nivelul de hazard propus prin normativul de proiectare seismică P100-1/2013 este mai mic pentru perioade mai mari de 1 s față de anumite accelerograme simulate, înregistrând-se amplitudini spectrale semnificativ mai mari pentru perioade de până la 2.75-3 s. Pentru cinci din cele opt scenarii, perioada medie de colț a simulărilor depășește valoarea propusă de codul de proiectare, valoarea maximă a perioadei de colț a simulărilor fiind de 2.57 s. Din punct de vedere al accelerațiilor de vârf, accelerogramele simulate înregistrează o scădere a amplitudinilor de până la 200 cm/s² față de accelerațiilor de vârf înregistrate la nivelul rocii de bază, comportamentul neliniar al condițiilor locale de teren producându-se prin consum de energie și modificarea conținutului spectral către perioade mai mari.

Pentru cele patru scenarii definite în funcție de cerințele de proiectare pe baza stărilor limită și a claselor de importanță a clădirilor (SLS pentru toate clădirile, SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere III, SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere II și SLU pentru clădiri din categoria de importanță-expunere I) au fost realizate 40 de accelerogramele simulate pe baza ipotezelor de proiectare care au fost anexate la teza de doctorat în format electronic pentru a furniza proiectanților o metodă alternativă pentru definirea acțiunii seismice.

Accelerogramele simulate pot deveni o resursă importantă în analizele de hazard deoarece sunt generate luându-se în calcul caracteristicile reale (simplificate) ale mediilor care generează și influențează undele seismice. Spre deosebire de accelerogramele înregistrate provenite de la cutremure de magnitudini mai mici decât cele pe baza cărora se construiește nivelul hazardului seismic de proiectare și față de accelerogramele artificiale, accelerogramele simulate înglobează mult mai bine influența condițiilor locale de teren. Accelerogramele simulate pot fi realizate pentru

locații în care nu există înregistrări ale mișcărilor seismice, pentru cutremurele istorice și pentru scenarii ipotetice plauzibile, și alături de accelerogramele înregistrate pot constitui o bază de date mai completă pentru analizele de hazard.

Dezavantajul accelerogramelor simulate (dar în același timp și motivul pentru care sunt mai realiste) este dat de complexitatea și multitudinea parametrilor care definesc mișcarea seismică, fiind necesară o cercetare amănunțită a acestora. Tratarea cu superficialitate a definirii fenomenelor și parametrilor care generează și modifică undele seismice poate duce la rezultate nerealiste.

Direcții viitoare de cercetare:

Pe viitor sunt necesare cercetări mai complexe ale condițiilor locale de teren în care să se determine caracteristicile straturilor de pământ pentru profile adânci de teren, pentru mai multe locații. În urma acestor cercetări se pot realiza simulări și pentru alte amplasamente. Parametrii ferestrei de modelare a zgomotului alb ar putea fi determinați pentru baze de date mai restrânse definite în funcție de condițiile locale de teren, topografie, atenuare și directivitate. Este de interes studierea fenomenelor care produc modificările observate la accelerogramele încadrate în categoria excepții în analiza eliberării de energie. Pentru frecvența de colț a sursei ar trebui încercat să se determine formule mai exacte, cu intervale de încredere mai restrânse deoarece simulările sunt extrem de sensibile la modificările acestui parametru. O serie de parametri precum atenuarea dată de drum ar trebui studiați mai aprofundat deoarece în literatura de specialitate definițiile acestora sunt foarte variate. Ca direcție viitoare de cercetare mai complexă, ar fi ideal să se urmărească cercetarea mai amănunțită a fenomenelor care produc și modifică undele seismice în așa fel încât să se poată realiza simulări 3D în care să se poată lua în considerare măcar topografia (având în vedere că în anumite condiții influențează foarte mult undele seismice).

7. Bibliografie

- Aki, K., 1966. Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of Earthquake Moment, Released Energy, and Stress-strain Drop from the G-Wave Spectrum. *Bull. Earthq. Res. Inst.* 44, 73–88.
- Anderson, J. & Hough, S., 1984. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bull Seism. Soc. Am.* 74, 1969–1993.
- Atkinson, G. & Boore, D. M., 1995. New ground motion relations for eastern North America. *Bull Seism. Soc. Am.* 85, 17–30.
- Benetatos, C. & Kiratzi, A., 2004. *Stochastic strong ground motion simulation of intermediate depth earthquakes: The cases of the 30 May 1990 Vrancea (Romania) and of the 22 January 2002 Karpathos island (Greece) earthquakes*, s.l.: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24(1):1–9.
- Beresnev, I. & Atkinson, G., 1998. FINSIM — A FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults. *Seismol. Res. Lett.*, 69:27–32.
- Besutiu, L., 2006. Alternative geodynamic model for Vrancea intermediate-depth seismicity: the unstable triple junction. In: Geodynamic studies in Romania - Vrancea zone. Monograph compiled in the frame of the Project CERGOP-2/Envirent. *Reports on Geodesy*, no.6 (81), 17–42, Warszawa.
- Besutiu, L., Radulian, M., Zlagnean, L. & Atanasiu, L., 2009. *Some peculiarities of the seismicity within the bending zone of the East Carpathians. Integrated research on the intermediate depth earthquake genesis within Vrancea zone*. s.l.:Vergiliu Publishing House pp.36–111.ISBN978-973-7600-59-2.
- Boore, D. M., 1983. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73, 1865–1894.
- Boore, D. M., 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure Appl Geophys* 160:635–676.
- Boore, D. M., 2005. SMSIM-Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes. Version 7.04. *U.S. Geol. Surv. Open-Field Report*, p. 55.
- Boore, D. M. & Joyner, W. B., 1997. Site amplifications for Generic Rock Sites. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87, pp. 327–341.
- Boore, D. & Thompson, E., 2014. Path durations for use in the stochastic-method simulation of ground motions. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, 2541–2552.
- Brune, J. N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* 75, p. 997–5009.
- Brune, J. N., 1971. Correction. *J. Geophys. Res.* 76, p. 5002.
- Constantinescu, L. & Enescu, E., 1985. *Vrancea earthquakes from scientific and technologic point of view*. s.l.: Editura Academiei.
- Coțovanu, A., 2018. Stochastic Simulation of Ground Motions Generated by Vrancea Intermediate-Depth Seismic Source. *Journal of Military Technology*, vol.1, no.2, Dec. 2018, 10.32754/JMT.2018.2.05.
- Coțovanu, A. & Vacareanu, R., 2019. Local site conditions modeling in stochastic simulation of ground motions generated by Vrancea (Romania) intermediate-depth seismic source. *Journal of Seismology*, DOI: 10.1007/s10950-019-09892-5.
- Coțovanu, A. & Vacareanu, R., 2020. Modeling energy release parameters in stochastic simulation of ground motions generated by Vrancea intermediate-depth seismic source. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Ganas, A., Grecu, B., Batsi, E. & Radulian, M., 2010. Vrancea slab earthquake triggered by static stress transfer. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2565–2577.
- Gusev, A., Radulian, M., Rizescu, M. & Panza, G. F., 2002. Source scaling of intermediate-depth Vrancea earthquakes. *Geophysical Journal International*, Volume 151, Issue 3.
- Haddon, R., 1996. Earthquake source spectra in Eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86,1300–1313.
- Hanks, T., 1979. Values and $\omega^{\gamma}(\gamma)$ Seismic Source Models: Implications for Tectonic Stress Variations along Active Crustal Fault Zones and the Estimation of High-frequency Strong Ground Motion. *J. Geophys. Res.* 84, 2235–2242.
- Hanks, T. C. & McGuire, R. K., 1981. The character of high-frequency strong ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 2071–2095.
- Hartzell, S. H., 1978. Earthquake aftershocks as Greens functions. *Geophys. Res. Lett.* 5.
- Hashash, Y. și alții, 2016. DEEPSOIL 6.1, User Manual. *Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign*.
- Hurukawa, N., Popa, M. & Radulian, M., 2008. Relocation of large intermediate-depth earthquakes in the Vrancea region, Romania, since 1934 and a seismic gap. *Earth Planets Space*, 60, 565–572.
- Irikura, K., 1983. Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes. *Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 33, Part 2, No. 298.
- Irikura, K., 1986. *Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function*. Tokyo, s.n.
- Irikura, K., 1999. *Techniques for the Simulation of Strong Ground Motion and Deterministic Seismic Hazard Analysis*. Kefallinia, Proceedings of the Advanced Study Course Seismotectonics and Microzonation Techniques in Earthquake Engineering: Integrated Training in Earthquake Risk Reduction Practices.
- Irikura, K. & Miyake, H., 2006. *Lecture note on Strong Motion Seismology*. Trieste, Italy, Proc. of the 8th Workshop on Three-Dimensional Modeling of Seismic Waves Generation, Propagation and Their Inversion.
- Ismail-Zadeh, A. și alții, 2012. Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): current state-of-the art. *Tectonophysics* 530, 50–79.
- Kanamori, H., 1979. A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69, 1645–1670.
- Karimzadeh, S., 2019. Seismological and Engineering Demand Misfits for Evaluating Simulated Ground Motion Records. *Applied Sciences* 9(21):4497.
- Kotke, A. R. & Rathje, E. M., 2009. *Technical manual for Strata. PEER Report 2008/10*, Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

- Lungu, D. și alții, 1998. Surface geology and dynamic properties of soil layers in Bucharest, in Vrancea Earthquakes. *Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, Kluwer Academic publisher, Wenzel F., Lungu D.-Editors.
- Manea, V. C. și alții, 2011. *Studiu privind analiza modelelor geodinamice existente*, Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice: Proiect: Infrastructură cibernetică pentru studii geodinamice relaționate cu zona seismogenă Vrancea: ID-593, cod SMIS-CSNR 12499; Etapa 1: Construirea și testarea sistemului hardware (HPCC, HPVC și GeoWall).
- Martin, M., Wenzel, F. & group, a. t. C. w., 2006. High-Resolution Teleseismic Body Wave Tomography Beneath SE-Romania (II): Imaging of a Slab Detachment Scenario. *Geophys. J. Int.*, 164:579–595.
- McGuire, R. & Hanks, T., 1980. RMS Accelerations and Spectral Amplitudes of Strong Ground Motion during the San Fernando, California, Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70, 1907-1919.
- MDRAP, 2014. *P100-1/2013 Cod de proiectare seismică – Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri*. București, România.: Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice.
- Miyake, H., Iwata, T. & Irikura, K., 2003. Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulation: Kinematic Heterogeneous Source Model and Strong Motion Generation Area. *Bulletin of the Seismological Society of America* (2003) 93 (6): 2531-2545.
- Motazedian, D. & Atkinson, G. M., 2005. Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3, June, p. 995–1010.
- Neagu, C., 2015. Influența condițiilor locale de amplasament și a comportării neliniare a terenului asupra acțiunii seismic de proiectare. *Teză de doctorat, UTCB*.
- Onescu, M. C. & Bonjer, K.-P., 1997. A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes. *Tectonophysics*, 272, 291-302.
- Onescu, M. C., Bonjer, K.-P. & Rizescu, M., 1999. Weak and strong ground motion of intermediate depth earthquakes from the Vrancea region. În: F. Wenzel, L. D. & N. O., ed. *Vrancea earthquakes: tectonics, hazard and risk mitigation*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 27-42.
- 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. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- 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.
- Oth, A., Wenzel, F. & Radulian, M., 2007. Source parameters of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes from empirical Green's functions modeling. *Tectonophysics* 438 (2007) 33–56.
- Pavel, F., 2015. Investigation on the stochastic simulation of strong ground motions for Bucharest area. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 69 (2015) 227–232.
- Pavel, F., 2017. Investigation on the Variability of Simulated and Observed Ground Motions for Bucharest Area. *Journal Of Earthquake Engineering*, DOI 10.1080/13632469.2017.1297266.
- Pavel, F., Popa, V. & Vacareanu, R., 2018. Evaluation of Soil Conditions in Bucharest. În: *Impact of Long-Period Ground Motions on Structural Design: A Case Study for Bucharest, Romania*, DOI:10.1007/978-3-319-73402-6_2. s.l.:s.n.
- Pavel, F. & Vacareanu, F., 2017. Ground motion simulations for seismic stations in southern and eastern Romania and seismic hazard assessment. *J Seismol*, DOI 10.1007/s10950-017-9649-1.
- Pavel, F. & Vacareanu, R., 2015. Assessment of the ground motion levels for the Vrancea (Romania) November 1940 earthquake. *Nat Hazards*, DOI 10.1007/s11069-015-1767-x.
- Pavel, F. & Vacareanu, R., 2015. Kappa and regional attenuation for Vrancea (Romania) earthquakes. *J Seismol*. doi:10.1007/s10950-015-9490-3.
- Pavel, F. & Vacareanu, R., 2018. Investigation on regional attenuation of Vrancea (Romania) intermediate-depth earthquakes. *Earthq Eng & Eng Vib* (2018) 17: 501-509.
- Pavel, F. și alții, 2017. Impact of spatial correlation of ground motions on seismic damage for residential buildings in Bucharest, Romania. *Nat Hazards*, Volumul 87, p. 1167–1187
- Pavel, F. și alții, 2016. An Updated Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Romania and Comparison with the Approach and Outcomes of the SHARE Project. *Pure and Applied Geophysics*, 173(6): 1881-1905.
- Pitarka, A., 1999. 3D elastic finite-difference modeling of seismic wave propagation using staggered grid with non-uniform spacing. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 54–68.
- Poiata, E. & Miyake, H., 2017. Broadband Ground Motion Simulation of the 2004 and 1977 Vrancea, Romania, Earthquakes Using Empirical Green's Function Method. *Pure Appl. Geophys.*, Issue DOI 10.1007/s00024-017-1605-z.
- Popescu, E., Radulian, M. P. M., Placinta, A. & Grecu, B., 2007. Source of Vrancea (Romania) intermediate-depth earthquakes: parameter variability test using a small-aperture array. *Rev. Roum. GEOPHYSIQUE*, 51, p. 15-34, 2007, Bucuresti.
- Radulian, M. și alții, 2019. Revised catalogue of earthquake mechanisms for the events occurred in Romania until the end of twentieth century: REFMC. *Acta Geodaetica et Geophysica* 54(1):3-18.
- Radulian, M. și alții, 2000. Characterization of seismogenic zones of Romania.
- Saragoni, G. R. & Hart, G. C., 1974. Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake engineering and Structural dynamics*, pp. 249-267.
- Seed, H. & Idriss, I., 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. *Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*.
- Sokolov, V. și alții, 2008. Ground-motion prediction equations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes. *Bull Earthquake Eng* (2008) 6:367–388.
- SR-EN1998-1:2004, 2004. *Eurocod 8: Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur. Partea 1: Reguli*, s.l.: s.n.
- Vucetic, M. & Dobry, R., 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, 89-107.