

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

Rezumatul tezei de doctorat

**Influența corelației spațiale a mișcărilor terenului asupra
rezultatelor analizelor de hazard și risc seismic în România**

Doctorand: *ing. Ionuț-Valentin Crăciun*

Conducător de doctorat: *Prof. univ. dr. ing. Radu Văcăreanu*

Februarie 2019

Mulțumiri

Teza de doctorat a reprezentat o provocare care m-a schimbat, atât prin dificultățile întâmpinate, cât și prin numeroasele lecții învățate. Am cunoscut numeroase persoane care și-au lăsat amprenta asupra mea, fie prin sfaturile oferite, fie prin lecțiile de viață acordate.

În primul rând aș dori să îi mulțumesc conducătorului de doctorat, profesor Radu Văcăreanu pentru numeroasele informații teoretice, lecții de viață și sfaturi oferite, precum și pentru oportunitatea de a face parte din colectivul Centrului de Cercetare Evaluarea Riscului Seismic pe parcursul celor trei ani de studii doctorale. Această experiență a fost una extraordinară de plăcută în principal datorită calităților pedagogice excepționale, a imensii răbdări și a respectului acordat.

De asemenea, le mulțumesc membrilor comisiei de doctorat pentru bunăvoința de a studia lucrarea de doctorat, dar și pentru sugestiile oferite: conferențiar Viorel Popa – președintele comisiei (Universitatea Tehnică de Construcții București), profesor Dan Lungu (Universitatea Tehnică de Construcții București), profesor Dan Dubină, membru al Academiei Române (Universitatea Politehnica Timișoara) și profesor Nicolae Țăranu, (Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași).

Aș dori să le mulțumesc profesorului Dan Lungu pentru numeroasele informații teoretice, istorice și practice, resursele materiale, precum și pentru lecțiile de viață oferite, regretatului profesor Sorin Demetriu pentru interesul acordat tezei de doctorat, pentru atenția acordată într-o perioadă dificilă, pentru sfaturile de neuitat legate de activitatea didactică și pentru spiritul cald pe care mi l-a oferit întotdeauna, și profesorului Alexandru Aldea pentru informațiile teoretice și organizatorice, precum și pentru numeroasele sfaturi oferite (și pentru amintirile de la examenele de Siguranța Construcțiilor).

Un ajutor considerabil l-au oferit colegii din Centrul de Cercetare Evaluarea Riscului Seismic. Le mulțumesc colegilor mei, conferențiar Cristian Arion pentru lecțiile de viață oferite, șef de lucrări Florin Pavel pentru profesionalismul arătat, lui Cristi Neagu pentru prietenia, amintirile frumoase și ajutorul necondiționat oferit în permanență și Veronicăi Colibă pentru ajutorul fizic, psihic și emoțional oferit, fără de care nu aș fi putut finaliza această provocare.

Prietenilor Ionuț, Cristi, Victoria, Bianca și Cătălina le mulțumesc pentru răbdarea avută și ajutorul moral acordat în cele mai grele momente, fiecare din voi într-o etapă diferită a lucrării.

Le mulțumesc și tuturor celor care m-au susținut de departe.

Cuprins

Mulțumiri	2
Lista figurilor.....	4
Lista tabelelor.....	5
Lista abrevierilor și a acronimelor	5
1. Introducere.....	6
2. Aspecte teoretice și principalele rezultate din literatură.....	7
3. Analiza corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului	12
4. Analiza hazardului seismic ținând cont de influența corelației spațiale a mișcărilor terenului.....	22
5. Analiza riscului seismic ținând cont de influența corelației spațiale a mișcărilor terenului 27	
6. Concluzii, contribuții personale, lista de publicații și direcții viitoare de cercetare.....	32
Bibliografie.....	36

Lista figurilor

Figura 3.1 – Valori experimentale și modele de corelație dezvoltate pentru media geometrică și componenta orientată aleator, pentru <i>PGA</i>	16
Figura 3.2 – Valori experimentale și modele de corelație dezvoltate pentru media geometrică și componenta orientată aleator, pentru <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	16
Figura 3.3 – Modele de corelație determinate pentru media geometrică, pentru <i>PGA</i> și <i>PSA</i> la $T = 0.1$ s, 0.2 s, 0.3 s și 0.4 s	16
Figura 3.4 – Modele de corelație determinate pentru media geometrică, pentru <i>PGA</i> și <i>PSA</i> la $T = 0.3$ s, 0.5 s, 0.7 s și 1.0 s	16
Figura 3.5 – Comparatii între modelele de corelație dezvoltate pentru mărimi ale clasei egale cu 2.5 km și 5 km, utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru <i>PGA</i> și <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	17
Figura 3.6 – Comparatii între modelele de corelație dezvoltate pentru mărimi ale clasei egale cu 2.5 km și 5 km, utilizând componenta orizontală orientată aleator pentru <i>PGA</i> și <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	17
Figura 3.7 – Comparatii între modelul de corelație intra-eveniment și modelul de corelație totală, pentru mărimea clasei de 5 km, utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru <i>PGA</i> și <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	18
Figura 3.8 – Comparatii între modelul de corelație intra-eveniment și modelul de corelație totală, pentru mărimea clasei de 5 km, utilizând componenta orizontală orientată aleator, pentru <i>PGA</i> și <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	18
Figura 3.9 – Studiul influenței condițiilor geotehnice asupra corelației spațiale utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru <i>PGA</i>	19
Figura 3.10 – Studiul influenței condițiilor geotehnice asupra corelației spațiale utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru <i>PSA</i> la $T = 0.5$ s	19
Figura 3.11 – Comparatie între modelul dezvoltat și cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017), pentru <i>PGA</i>	20
Figura 3.12 – Comparatie între modelul dezvoltat și cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017), pentru <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	20
Figura 3.13 – Comparatie între modelul dezvoltat, cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017) și alte modele din literatură, pentru <i>PGA</i>	21
Figura 3.14 – Comparatie între modelul dezvoltat, cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017) și alte modele din literatură, pentru <i>PSA</i> la $T = 1.0$ s	21
Figura 4.1 – Distribuția valorilor mediane <i>PGA</i> pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Municipiul București	24
Figura 4.2 – Distribuția reziduurilor normalizate intra-eveniment corespunzătoare <i>PGA</i> , în Municipiul București	24
Figura 4.3 – Distribuția valorilor <i>PGA</i> corelate spațial pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Municipiul București	25
Figura 4.4 – Distribuția valorilor mediane <i>PGA</i> pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Județul Ialomița	25
Figura 4.5 – Distribuția reziduurilor normalizate intra-eveniment corespunzătoare <i>PGA</i> , în Județul Ialomița	26
Figura 4.6 – Distribuția valorilor <i>PGA</i> corelate spațial pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Județul Ialomița	26
Figura 5.1 – Grade medii de avariere pentru Municipiul București, fără corelație, cazul RC1-HR-MC	30

Figura 5.2 – Grade medii de avariere pentru Municipiul București, cu corelație, cazul RC1-HR-MC.....	31
Figura 5.3 – Grade medii de avariere pentru Județul Ialomița, fără corelație, cazul RC1-HR-MC.....	31
Figura 5.4 – Grade medii de avariere pentru Județul Ialomița, cu corelație, cazul RC1-HR-MC.....	32

Lista tabelelor

Tabelul 3.1 – Caracteristicile bazei de date a cutremurelor de adâncime intermediară.....	13
Tabelul 3.2 – Parametrii modelului de corelație intra-eveniment dezvoltat pentru baza de date a cutremurelor de adâncime intermediară, pentru o mărime a clasei de 5 km	15
Tabelul 5.1 – Costuri economice directe pentru scenariul analizat.....	29
Tabelul 5.2 – Indicatori statistici ai pierderilor economice pentru scenariul analizat.....	29

Lista abrevierilor și a acronimelor

PGA – Peak Ground Acceleration (valoarea de vârf a accelerației terenului);
PGV – Peak Ground Velocity (valoarea de vârf a vitezei terenului);
SA – spectral acceleration (accelerație spectrală);
SV – spectral velocity (viteză spectrală);
SD – spectral displacement (deplasare spectrală);
PSA – pseudo-spectral acceleration (accelerație pseudo-spectrală);
PSV – pseudo-spectral velocity (viteză pseudo-spectrală);
PSD – pseudo-spectral displacement (deplasare pseudo-spectrală);
T – perioadă spectrală;
PSHA – Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Analiza Probabilistică a Hazardului seismic);
GMPE – Ground Motion Prediction Equation (relație de atenuare);
BIGSEES – Bridging the Gap between Seismology and Earthquake Engineering: from the seismicity of Romania towards a refined implementation of Seismic action EN1998-1 in earthquake resistant design of buildings

1. Introducere

Teza de doctorat are ca scop studierea hazardului și riscului seismic în România prin prisma unui concept relativ nou în seismologia inginerască și ingineria seismică, și anume corelația spațială a mișcărilor seismice ale terenului. Conceptele de hazard și risc seismic au fost amplu discutate în literatura de specialitate din a doua jumătate a secolului trecut, existând numeroase cărți de specialitate, teze de doctorat, articole științifice, lucrări teoretice și studii empirice etc. Pe de altă parte, subiectul corelației a mișcărilor seismice ale terenului este o noțiune relativ nouă, căpătând atenție în ultimii 10-20 ani prin numeroase studii și teze de doctorat existente în literatura de specialitate. Cu toate acestea, la momentul începerii tezei de doctorat, nu exista niciun studiu privind corelația spațială a mișcărilor seismice ale terenului pentru condițiile seismice din România.

Analiza tradițională probabilistică a hazardului seismic nu oferă nicio informație privind mișcările seismice simultane în amplasamente diferite, cum e cazul celor care solicită structurile distribuite pe teritoriu (clădiri, poduri, pasaje etc.) sau al sistemelor distribuite spațial (ex: rețele de utilități). Întrucât rezultatele analizei clasice probabilistice a hazardului seismic nu oferă nicio informație privind mișcările corelate ale terenului în două amplasamente diferite în timpul producerii unui cutremur, în ultimii ani a apărut o diferențiere între conceptul de analiza probabilistică a hazardului seismic de tip „point-wise” și analiza probabilistică a hazardului seismic de tip „multiple-wise”. În timp ce primul reprezintă varianta clasică a analizei probabilistice a hazardului seismic, fiind aplicabil în cazul unor structuri izolate situate la distanțe relativ mari, cel de-al doilea concept reprezintă un subiect recent de studiu pentru mulți cercetători, fiind aplicabil în cazul unor sisteme distribuite spațial sau în cazul unor structuri distribuite spațial (pe teritoriu). De asemenea, pentru efectuarea unor analize de risc (evaluarea pierderilor suferite în urma unui cutremur) pentru sisteme/structuri distribuite spațial este necesară considerarea corelației spațiale a mișcărilor seismice în efectuarea analizelor de hazard seismic.

În ultimii 10-20 de ani s-au realizat pe plan internațional mai multe studii privind corelația spațială a mișcărilor seismice. Conceptul corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului afirmă și demonstrează că amplitudinile mișcărilor seismice din două amplasamente diferite sunt corelate, coeficientul de corelație fiind dependent de distanța între amplasamente. Din această perspectivă, informațiile obținute în urma unei analize a hazardului seismic ținând cont de corelația spațială sunt aplicabile în cazul unor sisteme distribuite spațial (exemplu rețele de utilități) sau în cazul unor structuri distribuite spațial (clădiri, poduri, pasaje etc.). Altfel spus, este vorba despre o corelație a reziduurilor obținute (diferențele între valorile observate și valorile prezise). Se poate afirma că studiul corelației spațiale a intensităților mișcării terenului se rezumă la studiul corelației reziduurilor, justificarea provenind din relația liniară existentă între cei doi termeni. Ambii termeni (logaritmul natural al parametrului mișcării terenului și reziduurile) au o repartiție de tip normal și se află într-o relație liniară (valoarea parametrului este obținută ca valoarea mediană la care se adaugă valorile absolute ale reziduurilor), motiv pentru care corelația parametrilor poate fi analizată prin studiul corelației reziduurilor.

Teza de doctorat este structurată în șase capitole, dintre care prezentul capitol reprezintă o introducere în subiectul corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului, a hazardului și riscului seismic, precum și două anexe.

Capitolul 2 prezintă aspectele teoretice și principalele aspecte teoretice ale subiectului corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului, hazardului și riscului seismic precum și stadiul actual național și internațional al cunoașterii, aspecte care stau la baza calculului

efectuate în capitolele 3-5. Astfel, se detaliază principalele noțiuni matematice utilizate, opțiunile existente și modalitățile de obținere a modelelor matematice, modalitățile de considerare a corelației spațiale în evaluarea hazardului seismic, metodele disponibile privind estimarea pierderilor produse de un cutremur asupra unor structuri distribuite pe teritoriu sau sisteme distribuite spațial, precum și principalele rezultate existente în literatură.

Capitolul 3 prezintă metodologia de obținere a modelului de corelație spațială a mișcărilor seismice ale terenului utilizând baza de date BIGSEES. În baza modelului de corelație astfel determinat se efectuează comparații cu alte modele din literatură și o analiză de sensibilitate având ca scop studiul influenței diverșilor parametri asupra corelației spațiale (influența condițiilor geotehnice și a mărimii clasei de grupare asupra modelului de corelație, studiu asupra diferențelor obținute între coeficienții de corelație empirici determinați pentru mai multe evenimente seismice, determinarea coeficienților totali de corelație, comparație cu rezultatele obținute într-un alt studiu de cercetare care a utilizat o bază de date similară).

Capitolul 4 are ca scop obținerea unor distribuții ale intensității mișcării seismice pe diferite arii de calcul ținând cont de corelația spațială a mișcărilor terenului, pasul cel mai important fiind simularea parametrilor mișcării terenului corelați spațial. Utilizându-se trei scenarii de cutremur, capitolul obține rezultate comparative între analiza hazardului în varianta clasică (în care nu se cunosc informații despre mișcările seismice simultane în amplasamente diferite) și în varianta în care se utilizează modelul de corelație dezvoltat.

În capitolul 5 se efectuează o evaluare a riscului seismic pentru rezultatele hazardului obținute în capitolul 4 în scenariul de cutremur pentru Municipiul București, Județul Ialomița și Județul Prahova, considerând un fond construit fictiv alcătuit din structuri în cadre de beton armat în regim mare de înălțime în două variante ale nivelului proiectării seismice. Rezultatele sunt analizate în mod comparativ între cele două variante (cu/fără corelație spațială) și sunt comparate cu principalele rezultate din literatură.

În capitolul 6 sunt prezentate principalele concluzii ale tezei de doctorat, dificultățile întâmpinate, contribuțiile personale în subiectul corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului, direcțiile viitoare posibile de cercetare, precum și lista de publicații în domeniul cercetării științifice a autorului.

În Anexa A este prezentat, într-un format tabelar, stadiul actual al cunoașterii („state of the art”) cu privire la subiectul corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului, fiind utilă prin folosirea acesteia ca o bază de date extinsă în vederea dezvoltării altor studii cu caracter științific. Anexa B conține trei reprezentări grafice care prezintă punctele în care au fost discretizate cele trei arii de calcul (Municipiul București, Județul Ialomița și Județul Prahova) în vederea determinării valorilor parametrului mișcării terenului în cadrul analizei hazardului seismic.

2. Aspecte teoretice și principalele rezultate din literatură

Capitolul 2 prezintă principalele aspecte teoretice ale subiectului corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului, precum și stadiul actual național și internațional al cunoașterii („state of the art”). În acest sens, se detaliază: principalele noțiuni matematice utilizate, opțiunile existente și modalitățile de obținere a modelelor matematice, modalitățile de considerare a corelației spațiale în evaluarea hazardului seismic, metodele disponibile privind estimarea pierderilor produse de un cutremur asupra unor structuri distribuite pe teritoriu (ansambluri de clădiri) sau

sisteme distribuite spațial (rețele de utilități), precum și principalele rezultate existente în literatură.

Pentru a putea efectua analize de hazard sau risc seismic ce țin cont de corelația spațială a mișcărilor terenului, un prim pas îl reprezintă dezvoltarea unui model al corelației spațiale. Pe lângă disponibilitatea unei baze de date bine structurată ce cuprinde mișcări ale terenului înregistrate în timpul evenimentelor seismice, pentru dezvoltarea unui model de corelație spațială este necesară stabilirea metodei de analiză. În literatură există mai multe metode de analiză printre care: separarea valorilor reziduale în bin-uri (clase) în funcție de distanța dintre amplasamente și estimarea variației reziduurilor (diferențelor între valorile predictive și observate), ceea ce va duce la calculul coeficienților de corelație (Boore et al. 2003), utilizarea funcției de covarianță între două reziduuri (Wang și Takada 2005) sau evaluarea corelației intra-eveniment sub forma unor semi-variograme (Baker și Jayaram 2008; Jayaram și Baker 2009; Esposito și Iervolino 2011).

Analiza clasică probabilistică a hazardului seismic presupune utilizarea relațiilor de atenuare a amplitudinilor parametrilor mișcării terenului (GMPE – Ground Motion Prediction Equation). Relațiile de atenuare descriu amplitudinea aleatoare a unui parametru al mișcării seismice (atât ca valoare mediană, cât și ca abatere standard) în funcție de magnitudine, distanța între sursă și amplasament, adâncimea focarului, condițiile locale de teren și alți parametri.

Forma generală a unei relații de atenuare este:

$$\ln Y_{ij}(T_n) = f(M_i, R_{ij}, P_{ij}, T_n) + \eta_i(T_n) + \varepsilon_{ij}(T_n) \quad (2.1)$$

unde $i = \overline{1, s}$ și $j = \overline{1, r}$, $Y_{ij}(T_n)$ este valoarea variabilei aleatoare ce descrie parametrul mișcării terenului la o valoare a perioadei spectrale T_n , pentru amplasamentul j , în cadrul evenimentului seismic i , M_i este magnitudinea evenimentului seismic (de obicei magnitudine moment), R_{ij} este distanța sursă-amplasament (de ex. distanța epicentrală, hipocentrală sau distanța de tip Joyner-Boore), P_{ij} ține cont de alți parametri care au legătură cu sursa seismică, cu propagarea undelor seismice sau cu condițiile locale de teren, $f(M_i, R_{ij}, P_{ij}, T_n)$ este o funcție care furnizează valoarea așteptată (medie) a parametrului mișcării terenului în funcție de M_i, R_{ij}, P_{ij} ($f(M_i, R_{ij}, P_{ij}, T_n) = \overline{\ln Y_{ij}(M_i, R_{ij}, P_{ij}, T_n)}$), $\eta_i(T_n)$ reprezintă reziduul (termenul modelat ca variabilă aleatoare normală) inter-eveniment (între evenimente seismice) pentru un cutremur dat i , de medie zero și abatere standard $\sigma_\eta(T_n)$, $\varepsilon_{ij}(T_n)$ este reziduul intra-eveniment (în interiorul evenimentului seismic) pentru amplasamentul j , în cadrul cutremurului i , modelat ca variabilă aleatoare normală de medie zero și abatere standard $\sigma_\varepsilon(T_n)$.

Se poate afirma că $\ln Y_{ij}(T_n)$ este modelată ca o variabilă aleatoare normală cu media $\overline{\ln Y_{ij}(M_i, R_{ij}, P_{ij}, T_n)}$ și abaterea standard:

$$\sigma_T(T_n) = \sqrt{\sigma_\eta^2(T_n) + \sigma_\varepsilon^2(T_n)} \quad (2.2)$$

Pentru un cutremur dat i , $\eta_i(T_n)$ este o constantă pentru toate amplasamentele, considerându-se că mișcările terenului pentru un anumit cutremur au anumite elemente comune care le deosebesc de cele produse de alte cutremure.

Având în vedere cele prezentate, relația (2.1) se poate rescrie după cum urmează:

$$\ln Y_{ij}(T_n) = \overline{\ln Y_{ij}(M_i, R_{ij}, P_{ij}, T_n)} + \bar{\eta}_i(T_n)\sigma_\eta(T_n) + \bar{\varepsilon}_{ij}(T_n)\sigma_\varepsilon(T_n) \quad (2.3)$$

unde $\bar{\eta}_l(T_n)$ și $\bar{\varepsilon}_{lj}(T_n)$ sunt denumite reziduuri normalizate inter- și respectiv intra-eveniment, fiind variabile aleatoare normale standard, de medie zero și abatere standard egală cu unitatea, iar $\sigma_\eta(T_n)$ și $\sigma_\varepsilon(T_n)$ sunt abaterile standard inter- și respectiv intra-eveniment.

În literatura de specialitate noțiunea de variabilitate aleatoare (incertitudini aleatoare) este considerată a fi compusă din două tipuri de variabilități: variabilitate inter-eveniment (variabilitate între cutremure) și variabilitate intra-eveniment (variabilitate între amplasamente în cadrul aceluiași cutremur). În acest sens, se definesc în literatura de specialitate coeficienți de corelație inter-eveniment, intra-eveniment și totali, care sunt utilizați în studiul corelației spațiale a mișcărilor seismice.

Pentru prezentarea unor aspecte teoretice privind coeficienții de corelație se vor considera două amplasamente separate de distanța Δ . Similaritatea variabilității mișcărilor seismice pentru un cutremur i selectat aleator în amplasamentele j și k (altfel spus $\eta_i(T_n) + \varepsilon_{ij}(T_n)$ și $\eta_i(T_n) + \varepsilon_{ik}(T_n)$) poate fi reprezentată de către coeficientul de corelație $\rho_T(\Delta, T_n)$, denumit coeficient total de corelație (de exemplu: Park et al. 2007; Goda și Hong 2008a), dat de Sokolov și Wenzel (2013b):

$$\rho_T(\Delta, T_n) = \frac{\sigma_\eta^2(T_n) + \rho_\varepsilon(\Delta, T_n)\sigma_\varepsilon^2(T_n)}{\sigma_T^2(T_n)} = \rho_\eta(T_n) + \rho_\varepsilon(\Delta, T_n)\frac{\sigma_\varepsilon^2(T_n)}{\sigma_T^2(T_n)} \quad (2.4)$$

$$= \rho_\eta(T_n) + \rho_\varepsilon(\Delta, T_n)(1 - \rho_\eta(T_n))$$

unde $\rho_\varepsilon(\Delta, T_n)$ reprezintă coeficientul de corelație intra-eveniment (între ε_{ij} și ε_{ik}), iar $\rho_\eta(T_n)$ reprezintă coeficientul de corelație inter-eveniment, având următoarea expresie (Wesson și Perkins, 2001):

$$\rho_\eta(T_n) = \frac{\sigma_\eta^2(T_n)}{\sigma_T^2(T_n)} = \frac{\sigma_\eta^2(T_n)}{\sigma_\eta^2(T_n) + \sigma_\varepsilon^2(T_n)} \quad (2.5)$$

Trebuie menționat faptul că forma generală a coeficientului total de corelație este $\rho_T(\Delta, T_{n,1}, T_{n,2})$, cea a coeficientului de corelație intra-eveniment $\rho_\varepsilon(\Delta, T_{n,1}, T_{n,2})$ și cea a coeficientului de corelație inter-eveniment $\rho_\eta(T_{n,1}, T_{n,2})$. Cu toate acestea, pentru simplitate, cei trei coeficienți au fost prezentați pentru cazul $T_{n,1} = T_{n,2} = T_n$.

Coeficientul total de corelație $\rho_T(\Delta, T_n)$ mai poate fi exprimat astfel (Goda și Hong, 2008a):

$$\rho_T(\Delta, T_n) = 1 - \frac{\sigma_d^2(\Delta, T_n)}{2\sigma_T^2(T_n)} \quad (2.6)$$

unde $\sigma_d^2(\Delta, T_n)$ reprezintă dispersia variabilei aleatoare $(\eta_i(T_n) + \varepsilon_{ij}(T_n)) - (\eta_i(T_n) + \varepsilon_{ik}(T_n))$ (Boore et al. 2003).

Coeficientul de corelație intra-eveniment $\rho_\varepsilon(\Delta, T_n)$ poate fi definit ca:

$$\rho_\varepsilon(\Delta, T_n) = \frac{COV[\varepsilon_{ij}(T_n), \varepsilon_{ik}(T_n)]}{\sigma_\varepsilon^2(T_n)} \quad (2.7)$$

unde $COV[\varepsilon_{ij}(T_n), \varepsilon_{ik}(T_n)]$ exprimă covarianța între $\varepsilon_{ij}(T_n)$ și $\varepsilon_{ik}(T_n)$.

În Goda și Hong (2008a) este oferită o altă expresie a coeficientului de corelație $\rho_\varepsilon(\Delta, T_n)$, după cum urmează:

$$\rho_\varepsilon(\Delta, T_n) = 1 - \frac{\sigma_d^2(\Delta, T_n)}{2\sigma_\varepsilon^2(T_n)} \quad (2.8)$$

De menționat este faptul că relațiile precedente sunt valabile pentru reziduuri calculate pentru logaritmul unei componente orizontale singulare ale mișcării. În cazul în care se dorește utilizarea logaritmului mediei geometrice a celor două componente orizontale ale mișcării se utilizează relația (Goda și Hong 2008a):

$$\rho_{\varepsilon}(\Delta, T_n) = \rho_{gm}(\Delta, T_n) \frac{1 + \rho_c(T_n)}{2} \quad (2.9)$$

unde $\rho_{gm}(\Delta, T_n)$ reprezintă coeficientul de corelație bazat pe media geometrică a două componente orizontale, iar $\rho_c(T_n)$ reprezintă coeficientul de corelație între parametrii mișcării terenului pentru cele două componente orizontale ale mișcării, pentru care, în Baker și Cornell (2006), se oferă următoarea relație empirică care depinde de perioada spectrală T_n :

$$\rho_c(T_n) = 0.79 - 0.023 \ln(T_n) \quad (2.10)$$

Următorul pas este reprezentat de calculul/determinarea modelului de corelație spațială. În general se utilizează o funcție de tip exponențial sau un model de tip exponențial, în funcție de metoda utilizată. În cazul utilizării abordării cu coeficienți de corelație, forma funcțională a funcției de tip experimental este dată în literatură (exemplu Boore et al. 2003; Goda și Hong 2008a; Sokolov și Wenzel 2011a, b):

$$\rho_{\varepsilon}(\Delta) = \exp(a\Delta^b) \quad (2.11)$$

unde a și b sunt parametrii modelului de corelație folosit.

În vederea efectuării unor analize de risc seismic asupra unor sisteme distribuite pe teritoriu, la valorile medii/mediane ale parametrului mișcării terenului considerat în analiză trebuie adăugate realizări (valori) simulate ale reziduurilor inter- și intra-eveniment (Jayaram 2010). Reziduurile, în conformitate cu cele discutate în prealabil, sunt corelate spațial într-o anumită măsură, în funcție de distanța de separație între amplasamente, deci simularea unor astfel de reziduuri trebuie să țină cont de un anumit model de corelație spațială. Simularea numerică a parametrilor mișcării terenului luând în considerare corelația spațială reprezintă ultimul pas în obținerea mișcărilor seismice corelate spațial, existând, în acest scop, mai multe metodologii în literatura de specialitate.

O primă metodologie de simulare a reziduurilor (în cazul acesta, reziduuri totale) este prezentată în Sokolov și Wenzel (2011a, 2013b și 2014). Pentru determinarea reziduurilor totale corelate spațial (adică pentru determinarea câmpului aleator de valori în r amplasamente), structura de dependență a acestora este descrisă cu ajutorul matricei de corelație Σ , pentru obținerea valorilor reziduurilor total corelate spațial fiind necesară generarea unui vector gaussian de variabile normale standard corelate, cu matricea de corelație Σ .

O altă procedură este prezentată în Jayaram (2010), unde este prezentată, similar abordării din Park et al. (2007), simularea mișcărilor corelate spațial ținând cont de înregistrările mișcărilor terenului și simularea fără a deține valori observate. Pentru cel de-al doilea caz, simularea fără a ține cont de înregistrări ale mișcării terenului (simularea în cazul unui cutremur *i* viitor), sunt prezentate două metode: tehnica simulării într-o singură etapă și tehnica simulării secvențiale. În ambele cazuri, simularea este efectuată separat pentru reziduurile inter-eveniment și pentru reziduurile intra-eveniment.

Tehnica simulării într-o singură etapă presupune evaluarea reziduurilor normalizate intra-eveniment printr-o procedură similară celei prezentate în Park et al. (2007) și Sokolov și Wenzel (2011a, 2013b și 2014), prezentându-se o procedură distinctă pentru evaluarea reziduurilor normalizate inter-eveniment.

Se arată faptul că reziduurile normalizate intra-eveniment urmăresc o repartiție normală multivariată definită de media și dispersia distribuțiilor marginale (egale cu 0, respectiv 1 în cazul reziduurilor normalizate intra-eveniment) și de corelația între perechile de reziduuri, care este la rândul ei definită prin intermediul modelului de corelație. În aceste condiții, reziduurile sunt simulate ca un vector de variabile aleatoare normale standard corelate. Media este, în acest caz, un vector de p zerouri, după cum urmează:

$$\mu = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Matricea covarianței, notată cu Σ , are expresia:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1p} \\ \rho_{21} & 1 & \vdots & \rho_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p1} & \rho_{p2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

unde ρ_{ij} este coeficientul de corelație între cele două reziduuri intra-eveniment;

Direcțiile de cercetare la nivel internațional pe subiectul corelației spațiale sunt diverse, remarcându-se, cu toate acestea, câteva tendințe: studiul factorilor ce influențează corelația spațială a mișcărilor seismice, studii comparative între analiza clasică probabilistică a hazardului seismic și rezultatele obținute cu conceptul „multiple-wise” (Rhoades și McVerry 2001; McVerry et al. 2004; Sokolov și Wenzel 2011a, b), obținerea unor modele de corelație care descriu corelația mișcărilor seismice în două amplasamente diferite, modele ce vor fi folosite la analizele de hazard și risc seismic (Goda și Hong 2008a; Goda și Atkinson 2009; Loth și Baker 2013), studiul condițiilor geotehnice asupra mărimii corelației spațiale (Jayaram și Baker 2009; Sokolov et al. 2012), studiul corelației anumitor parametri cum ar fi accelerația de vârf a terenului PGA (Boore et al. 2003; Wang și Takada 2005), viteza de vârf a terenului PGV (Sokolov și Wenzel 2013a), accelerații pseudo-spectrale PSA (Goda și Atkinson 2009), intensitatea Arias și viteza absolută cumulativă (Foulner-Piggot și Goda 2015) și studii ce au ca scop obținerea unor estimări privind pierderile economice așteptate la apariția unui seism major (Goda și Hong 2008b; Sokolov și Wenzel 2011a, b; Esposito și Iervolino 2012). Aceste direcții de cercetare au implicații asupra rezultatelor analizelor de hazard și risc seismic.

Bazele de date utilizate pentru obținerea unor modele de corelație spațială includ înregistrări de la: cutremurul Northridge, California din 1994 (Boore et al. 2003), alte cutremure californiene (Goda și Hong 2008a, Hong et al. 2009), cutremurul Chi-Chi, Taiwan din 1999 (Wang și Takada 2005, Goda și Hong 2008a și Sokolov et al. 2010), alte cutremure din Taiwan (Sokolov et al. 2010), cutremure din Japonia (rețelele K-NET and KiK-net în Goda și Atkinson 2009 și rețelele K-NET, KiK-net și SK-net în Goda și Atkinson 2010), cutremure din regiunea Istanbul (rețeaua IERREWS) în Wagener et al. 2016, și bazele de date European Strong-Motion Database (ESD) și Italian Accelerometric Archive (ITACA) în Esposito și Iervolino (2011, 2012).

În ceea ce privesc analizele riscului seismic, majoritatea studiilor existente în literatură care au analizat influența corelației spațiale asupra repartiției pierderilor pentru structuri distribuite spațial au considerat influența celor două tipuri de corelații (inter- și intra-eveniment) adoptând un singur model al corelației, sau analizând, în plus față de model, două cazuri extreme (fără corelație și cu corelație perfectă).

Influența corelațiilor inter- și intra-eveniment asupra estimărilor pierderilor seismice suferite de structuri distribuite spațial au fost analizate în Sokolov și Wenzel (2011b) pentru un singur cutremur (un singur scenariu de cutremur) și în Sokolov și Wenzel (2011a) pentru mai multe cutremure, aceste două opțiuni și comparații între cele două fiind utilizate des în literatura de specialitate.

Se menționează în Sokolov și Wenzel (2013b) preocuparea asiguratorilor pentru valoarea centrală a distribuției (medie sau mediană) și preocuparea reasiguratorilor pentru coada repartiției, cunoașterea distribuției pierderilor în jurul valorii medii (abatere standard sau dispersie) fiind de importanță majoră pentru luarea deciziilor și pentru activitățile de reducere a riscului seismic.

Mai multe studii (exemplu: Wesson și Perkins 2001, Crowley și Bommer 2006, Goda și Atkinson 2009, Sokolov și Wenzel 2011b) au efectuat analize de risc seismic pentru structuri distribuite spațial considerând ca parametrul al pierderilor raportul mediu al pierderilor, iar altele (exemplu: McVerry et al. 2004, Park et al. 2007, Goda și Hong 2008b, Sokolov și Wenzel 2011a, Wagener et al. 2016) au ales ca parametru pierderile financiare.

La nivel național, subiectul corelației spațiale a mișcărilor terenului a căpătat interes îndeosebi în ultimii ani. Anterior unor studii recente (Văcăreanu et al. 2017, Crăciun et al. 2018 și Pavel, Văcăreanu 2017 și Pavel et al. 2017a, b), nu au existat cercetări efectuate asupra influenței corelației spațiale asupra analizelor de hazard (sau risc) seismic pentru teritoriul României. Diferența majoră între Văcăreanu et al. (2017) și Pavel și Văcăreanu (2017) constă în modul de determinare a modelului de corelație spațială, primul studiu utilizând abordarea cu coeficienți de corelație, iar cel de-al doilea utilizând abordarea cu semi-variograme. Crăciun et al. (2018) reprezintă un studiu comparativ privind rezultatele celor doua studii, cu impact asupra influenței bazei de date și a metodei abordate asupra modelului de corelație obținut. În Pavel et al. (2017a, b) s-a studiat influența corelației spațiale a mișcărilor terenului asupra analizelor de risc seismic, având ca obiect de studiu Municipiul București.

3. Analiza corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului

Capitolul 3 are ca scop obținerea unor modele de corelație spațială utilizând o bază de date cu mișcări seismice înregistrate la cutremure produse de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea. În timpul programului de pregătire doctorală, autorul tezei a publicat anumite rezultate ale Capitolului 3 în lucrările „Correlation models for strong ground motions from Vrancea intermediate-depth seismic source” (Văcăreanu et al. 2017), în care s-a dezvoltat un model de corelație intra-eveniment având ca bază de date 10 cutremure de adâncime intermediară vrâncene, utilizând baza de date BIGSEES, și „On the ground motions spatial correlation for Vrancea intermediate-depth earthquakes” (Crăciun et al. 2018), în care s-a efectuat o comparație între modelul dezvoltat în acest studiu și cel dezvoltat în Pavel și Văcăreanu (2017).

S-a optat pentru dezvoltarea unui model de corelație spațială utilizând metoda coeficienților de corelație, în conformitate cu aspectele teoretice prezentate anterior, pentru o bază de date conținând mișcări seismice generate de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea, metodologia utilizată bazându-se pe procedurile existente în literatură (Goda și Hong 2008a, Goda și Atkinson 2009, 2010, Wagener et al. 2016).

Sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea este sursa cu cea mai mare contribuție la hazardul seismic al României, reprezentând unul din exemplele clare de seismicitate de adâncime intermediară nelocalizată în apropierea limitelor plăcilor tectonice active.

Baza de date a cutremurelor de adâncime intermediară cuprinde înregistrări ale mișcării terenului produse de cutremure cu magnitudinea $M_w > 5$ provenind din sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea, fiind utilizată pentru dezvoltarea unui model de corelație spațială pentru accelerația de vârf a terenului (PGA) și pentru accelerațiile spectrale la diferite perioade. Această bază de date a fost dezvoltată pentru proiectul național de cercetare BIGSEES (<http://infp.infp.ro/bigsees/default.htm>), constând în 431 accelerograme triaxiale înregistrate în timpul producerii a 10 evenimente seismice cu magnitudinea M_w variind între 5.2 și 7.4. Caracteristicile (data de producere, adâncimea focarului, poziția epicentrului și numărul înregistrărilor) celor 10 cutremure sunt prezentate în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1 – Caracteristicile bazei de date a cutremurelor de adâncime intermediară

Număr eveniment	Data	Latitudine	Longitudine	M_w	Adâncimea focarului [km]	Număr înregistrări
1	04.03.1977	45.34	26.30	7.4	109	2
2	30.08.1986	45.52	26.49	7.1	131	40
3	30.05.1990	45.83	26.89	6.9	91	52
4	31.05.1990	45.85	26.91	6.4	87	36
5	28.04.1999	45.49	26.27	5.3	151	25
6	27.10.2004	45.84	26.63	6.0	105	66
7	14.05.2005	45.64	26.53	5.5	149	40
8	18.06.2005	45.72	26.66	5.2	154	37
9	25.04.2009	45.68	26.62	5.4	110	46
10	06.10.2013	45.67	26.58	5.2	135	87

O primă etapă constă în alegerea unei relații de atenuare pentru baza de date. Pentru sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea a fost dezvoltată o relație de atenuare în Văcăreanu et al. (2014), alte relații de atenuare fiind recomandate în Delavaud et al. (2012) și Lungu et al. (1994, 1995, 1996). Cu toate acestea, pentru dezvoltarea unui model de corelație spațială, s-a hotărât alegerea relației de atenuare prezentată în Văcăreanu et al. (2015b), motivul fiind delimitarea clară a componentelor intra- și inter-eveniment ale abaterii standard aferente relației. Relația de atenuare utilizată a fost obținută utilizând evenimente seismice cu magnitudini moment în intervalul $5.2 \leq M_w \leq 8.0$ utilizând o bază de date națională (formată din primele nouă cutremure din baza de date prezentată) și o bază de date internațională (formată din 360 de înregistrări ale mișcării terenului din 29 de cutremure).

Forma funcțională a relației de atenuare dezvoltată în Văcăreanu et al. (2015b) este:

$$\ln y_{ij}(T) = c_1(T) + c_2(T)(M_{w,i} - 6) + c_3(T)(M_{w,i} - 6)^2 + c_4(T) \ln R_{ij} + c_5(T)(1 - ARC_j)R_{ij} + c_6(T)ARC_jR_{ij} + c_7(T)h_i + c_8(T)Sb_j + c_9(T)Sc_j + c_{10}(T)Ss_j + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (3.1)$$

unde i este indicele cutremurului, j este indicele amplasamentului, y_{ij} este media geometrică a celor două componente orizontale ale valorii de vârf a accelerației terenului (în cm/s^2) sau a accelerațiilor spectrale corespunzătoare unei valori de 5% a fracțiunii din amortizarea critică, pentru o anumită perioadă spectrală T , $M_{w,i}$ reprezintă magnitudinea moment a cutremurului i , R este distanța hipocentrală (în km), termenul ARC introduce efectul privind poziția amplasamentului în raport cu arcul carpatic ($ARC=0$ pentru amplasamente situate în spatele munților și $ARC=1$ pentru amplasamente situate în fața munților), h este adâncimea focarului (în km), c_k ($k = 1 - 10$) sunt coeficienți determinați prin analize de regresie la fiecare

perioadă spectrală T , $S_b = 1$ pentru teren de clasa B și $S_b = 0$ altfel, $S_c = 1$ pentru teren de clasa C și $S_c = 0$ altfel, iar $S_s = 1$ pentru condiții obișnuite de teren și $S_s = 0$ altfel.

Variabila independentă normală η_i reprezintă reziduurile inter-eveniment de medie zero și abatere standard τ ; variabila independentă ε_{ij} reprezintă reziduurile intra-eveniment de medie zero și abatere standard σ . Se poate menționa că dispersiile σ_T^2 , σ^2 și τ^2 sunt echivalente $\sigma_T^2(T_n)$, $\sigma_\varepsilon^2(T_n)$ respectiv $\sigma_\eta^2(T_n)$, așa cum au fost definite în capitolul 2. Valorile abaterilor standard totală, intra- și inter-eveniment sunt prezentate în Văcăreanu et al. (2015b) pentru PGA și accelerații spectrale corespunzătoare unor perioade spectrale variind de la $T = 0.1$ s la $T = 3.0$ s, fiind utilizate în acest studiu pentru efectuarea calculelor necesare obținerii coeficienților de corelație.

Analiza este efectuată în termeni de medie geometrică a valorilor accelerației de vârf a terenului pentru componentele orizontale ale mișcării și accelerațiilor spectrale la perioade variind între 0.1 s și 3.0 s, în concordanță cu parametrul relației de atenuare. Reziduurile sunt determinate utilizând media geometrică a celor două componente orizontale ale PGA respectiv PSA. Odată determinat modelul de corelație intra-eveniment, se poate determina un model de corelație și pentru componenta orizontală orientată aleator a PGA respectiv PSA, utilizând relația (2.9).

Sunt determinate perechile de reziduuri intra-eveniment pentru fiecare eveniment seismic. Pentru fiecare cutremur i , pentru fiecare pereche reziduală intra-eveniment între două amplasamente j și k sunt determinate diferențele $\varepsilon_{ij}(T_n) - \varepsilon_{ik}(T_n)$ având ca scop obținerea dispersiilor $\sigma_d^2(\Delta, T_n)$ în pasul următor. Perechile astfel determinate se sortează în bin-uri (numite mai departe clase) în funcție de distanța dintre amplasamente (distanța de separație) Δ . Mărimea clasei a fost aleasă a fi egală cu 5 km, având ca scop obținerea unui număr suficient de perechi pentru fiecare clasă, ceea ce implică erori mai mici, rezultând astfel un număr minim de perechi pe clasă egal cu 59 (dintr-un număr total de 11404 de perechi reziduale, au fost utilizate în analiză 2669 perechi, până la distanța de separație egală cu 100 km).

Dispersiile diferențelor perechilor reziduale $\sigma_d^2(\Delta, T_n)$ sunt calculate pentru fiecare clasă. Coeficienții de corelație intra-eveniment pentru media geometrică a celor două componente orizontale ale parametrului mișcării terenului se obțin utilizând relația (2.8), în care dispersiile $\sigma_d^2(\Delta, T_n)$ au fost determinate în etapa precedentă, iar dispersiile $\sigma_\varepsilon^2(T_n)$ sunt oferite de relația de atenuare, justificându-se în acest moment motivația privind alegerea unor relații de atenuare care consideră în mod separat componentele intra- și inter-eveniment ale abaterii standard corespunzătoare relațiilor respective. Coeficienții de corelație intra-eveniment calculați pentru componenta orizontală orientată aleator a parametrului mișcării terenului sunt determinați utilizând relația (2.9), în care $\rho_{gm}(\Delta, T_n)$ reprezintă coeficientul de corelație intra-eveniment calculat conform relației (2.8).

Următoarea etapă constă în alegerea unei forme funcționale pentru dezvoltarea unui model de corelație intra-eveniment. Mai multe studii din literatură (ex: Goda și Hong 2008a, b, Boore et al. 2003, Wang și Takada 2005, Goda și Atkinson 2009, 2010) utilizează o relație empirică pentru coeficienții de corelație intra-eveniment pe baza unei funcții continue care poate fi potrivită pe valorile coeficienților determinați experimental în etapa precedentă. În prezentul studiu, la fel ca în articolul autorului (Văcăreanu et al. 2017), forma funcțională aleasă pentru coeficienții de corelație intra-eveniment este prezentată în relația următoare:

$$\rho_\varepsilon(\Delta, T_n) = \exp(-\alpha(T_n)\Delta^{\beta(T_n)}) \quad (3.2)$$

unde $\alpha(T_n)$ și $\beta(T_n)$ sunt parametrii modelului; în mod identic cu cele prezentate în Văcăreanu et al. (2017) și în Wang și Takada (2005), în prezentul studiu, parametrul $\beta(T_n)$ a fost considerat egal cu 0.5, independent de valoarea perioadei spectrale, iar parametrul $\alpha(T_n)$ este determinat prin regresie neliniară.

În articolul Văcăreanu et al. (2017), determinarea parametrilor $\alpha(T_n)$ prin regresie neliniară s-a efectuat condiționată de anumite valori negative ale coeficienților empirici, a căror primă apariție (prima clasă care a furnizat un coeficient de corelație negativ) este diferită în funcție de perioada spectrală. Cu toate acestea, în acest studiu am decis efectuarea analizei de regresie cu numărul maxim de date disponibile, în ciuda numărului diferit de date disponibile între diferite valori ale perioadei, astfel încât, în Tabelul 3.2 sunt prezentate valorile parametrilor formei funcționale determinați în acest fel.

Tabelul 3.2 – Parametrii modelului de corelație intra-eveniment dezvoltat pentru baza de date a cutremurelor de adâncime intermediară, pentru o mărime a clasei de 5 km

Perioada [s]	Media geometrică a componentelor			Componenta orientată aleator		
	α	β	Lungimea de corelație [km]	α	β	Lungimea de corelație [km]
T = 0.0 s	0.211	0.500	22	0.220	0.500	21
T = 0.1 s	0.220		21	0.233		18
T = 0.2 s	0.259		15	0.274		13
T = 0.3 s	0.251		16	0.266		14
T = 0.4 s	0.262		15	0.278		13
T = 0.5 s	0.249		16	0.266		14
T = 0.6 s	0.199		25	0.217		21
T = 0.7 s	0.197		26	0.214		22
T = 0.8 s	0.168		35	0.186		29
T = 0.9 s	0.173		33	0.191		27
T = 1.0 s	0.143		49	0.160		39
T = 1.2 s	0.159		40	0.175		33
T = 1.4 s	0.162		38	0.178		32
T = 1.6 s	0.166		36	0.181		31
T = 1.8 s	0.201		25	0.216		21
T = 2.0 s	0.228		19	0.246		17
T = 2.5 s	0.150		44	0.172		34
T = 3.0 s	0.152		43	0.174		33

Valorile empirice și funcțiile continue obținute utilizând parametrii prezentați în Tabelul 3.2, pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului și pentru componenta orientată aleator al parametrului mișcării terenului, pentru PGA, PSA la $T = 1.0$ s sunt prezentate în Fig. 3.1 – 3.2.

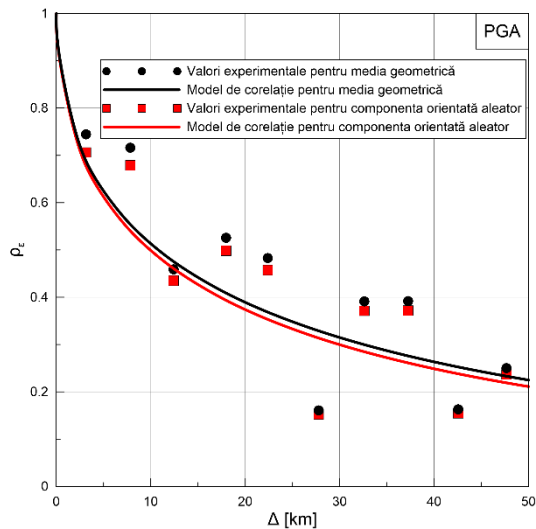


Figura 3.1 – Valori experimentale și modele de corelație dezvoltate pentru media geometrică și componenta orientată aleator, pentru PGA

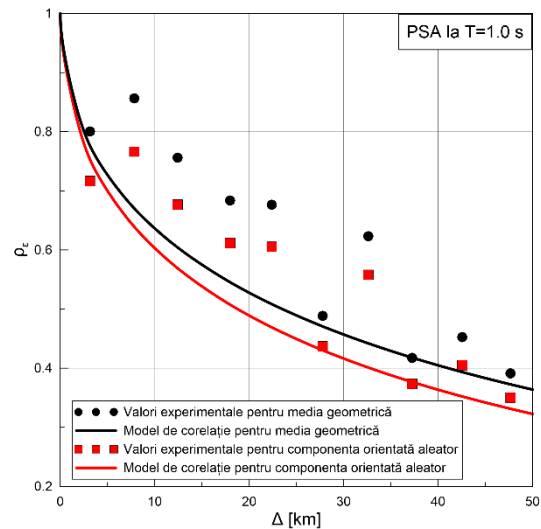


Figura 3.2 – Valori experimentale și modele de corelație dezvoltate pentru media geometrică și componenta orientată aleator, pentru PSA la $T = 1.0$ s

În Fig. 3.1 – 3.2 se poate observa scăderea coeficientului de corelație $\rho_\epsilon(\Delta, T_n)$ pe măsura creșterii distanței de separație Δ . De asemenea, se pot observa corelații mai mari pentru cazul utilizării mediei geometrice ale componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului față de cazul utilizării componentei orizontale orientate aleator, pentru ambele cazuri, aspect care confirmă rezultatele altor studii (ex: Goda și Hong 2008a, Hong et al. 2009).

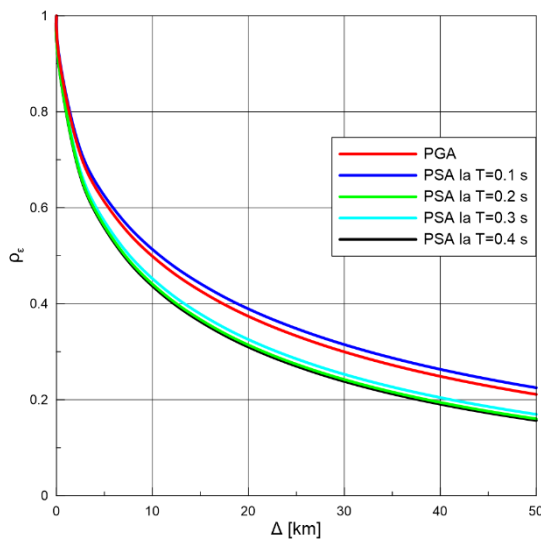


Figura 3.3 – Modele de corelație determinate pentru media geometrică, pentru PGA și PSA la $T = 0.1$ s, 0.2 s, 0.3 s și 0.4 s

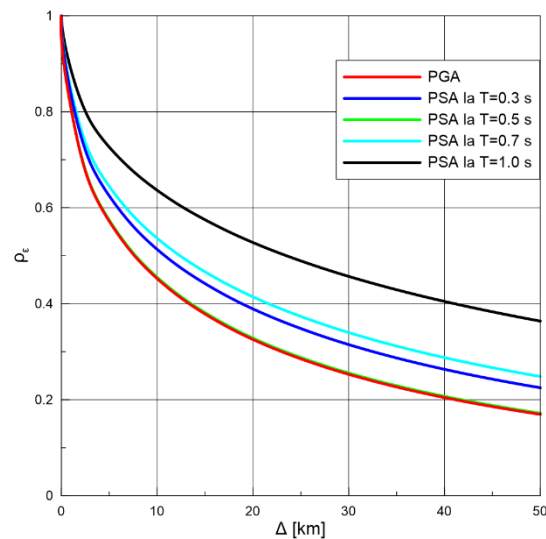


Figura 3.4 – Modele de corelație determinate pentru media geometrică, pentru PGA și PSA la $T = 0.3$ s, 0.5 s, 0.7 s și 1.0 s

În Fig. 3.3 și 3.4 se poate observa dependența coeficientului de corelație $\rho_\epsilon(\Delta, T_n)$ de perioada spectrală T_n , prezentându-se în acest sens, în mod comparativ, modele de corelație obținute pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului, pentru diferite perioade spectrale. În Figura 3.3 se poate observa o variație mică a coeficienților de corelație $\rho_\epsilon(\Delta, T_n)$ în cazul perioadelor scurte. De asemenea, în Figura 3.4 se poate observa o corelație ridicată în cazul perioadelor lungi, reziduurile fiind corelate pe distanțe relativ mari.

S-a efectuat o analiză de sensibilitate a modelului de corelație dezvoltat care include: analiza influenței mărimii clasei asupra parametrilor modelului de corelație, dezvoltarea unui model pentru corelație totală, analiza coeficienților de corelație empirici dezvoltați pentru diferite evenimente seismice, analiza influenței condițiilor geotehnice asupra corelației spațiale a mișcărilor seismice, precum și analize comparative cu rezultatele prezentate în alte studii.

O analiză a fost reprezentată de efectuarea unor comparații între coeficienții de corelație empirici obținuți pentru diferite evenimente seismice. În ciuda limitărilor cauzate de numărul redus de date disponibile, s-a remarcat o împrăștiere a valorilor coeficienților empirici la perioade scurte, existând însă o ușoară tendință de grupare a acestor valori în funcție de cutremurele de proveniență, la perioade lungi.

În vederea efectuării studiului influenței mărimii clasei de grupare asupra modelului de corelație spațială, perechile de reziduuri au fost împărțite în clase cu mărimea egală cu 2.5 km. De menționat este numărul minim rezultat al perechilor reziduale pe clasă egal cu 28. În Fig. 3.5 - 3.6 sunt prezentate, în mod comparativ, modelele de corelație dezvoltate pentru o mărime a clasei egală cu 5 km, respectiv 2.5 km, determinate pentru media geometrică a componentelor orizontale și pentru componenta orizontală orientată aleator, pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s. Se observă obținerea unor corelații mai puternice pentru modelul în care mărimea clasei este egală cu 2.5 km pentru majoritatea perioadelor spectrale.

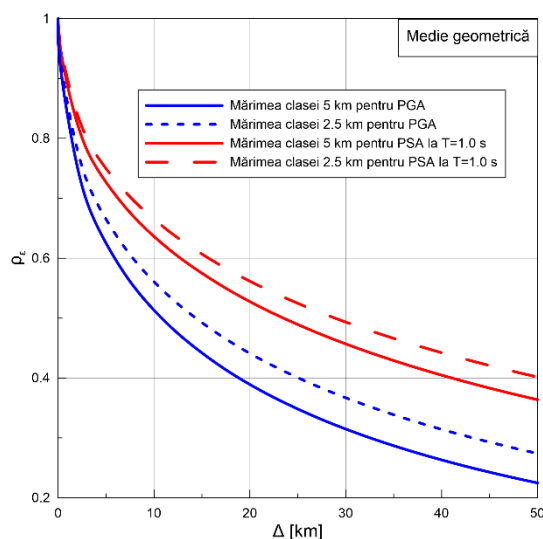


Figura 3.5 – Comparări între modelele de corelație dezvoltate pentru mărimi ale clasei egale cu 2.5 km și 5 km, utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s

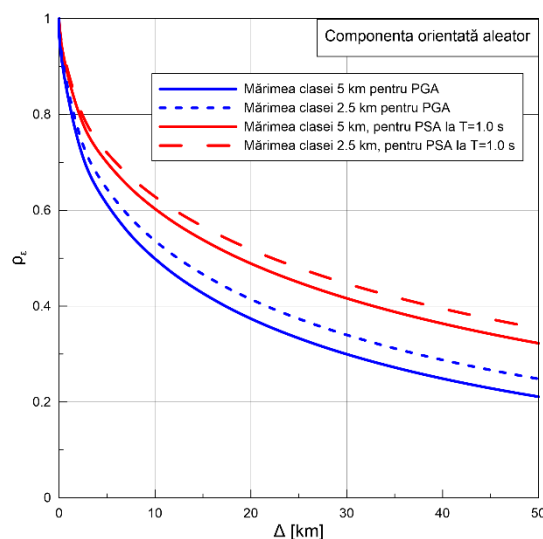


Figura 3.6 – Comparări între modelele de corelație dezvoltate pentru mărimi ale clasei egale cu 2.5 km și 5 km, utilizând componenta orizontală orientată aleator pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s

Modelele de corelație dezvoltate în Goda și Atkinson (2009) s-au arătat a fi independente de mărimea aleasă a clasei, aspect care nu este în acord cu cele obținute în lucrarea prezentă. Motivul obținerii acestor rezultate este considerat a fi numărul mic (în comparație cu modelul în care lățimea este egală cu 5 km și mai ales în comparație cu alte modele din literatură) de perechi reziduale pe clasă în cazul mărimii egale cu 2.5 km, care nu poate duce la rezultate reprezentative.

Scopul analizei privind coeficienții totali de corelație este reprezentat de dezvoltarea unor modele de corelație utilizând coeficienții de corelație totali, precum și comparația acestora cu modele dezvoltate pentru corelația intra-eveniment. Obținerea unor astfel de modele și

comparațiile cu modele de corelație intra-eveniment își justifică importanța, în cazul utilizării anumitor metodologii de simulare a parametrilor și utilizarea acestora în analizele de hazard și risc seismic. Coeficienții totali de corelație $\rho_T(\Delta, T_n)$ pot fi calculați utilizând relația (2.6), etapele în ceea ce privește dezvoltarea unui model de corelație totală fiind identice cu cele descrise anterior. Forma funcțională aleasă este identică cu cea utilizată în determinarea modelelor de corelație intra-eveniment.

În Fig. 3.7 și 3.8 sunt prezentate, în mod comparativ, modelele de corelație intra-eveniment și de corelație totală, pentru o mărime a clasei de 5 km, pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului și respectiv pentru componenta orizontală orientată aleator a parametrului mișcării terenului, pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s. Se confirmă un aspect evident, și anume corelații totale mai ridicate decât cele intra-eveniment (aspect evident prin prisma relațiilor de calcul a coeficienților experimentali pe baza cărora s-au dezvoltat modelele, $\sigma_T^2(T_n)$ având în mod evident valori mai mari ca $\sigma_\varepsilon^2(T_n)$, lucru care conduce la corelații totale mai mari).

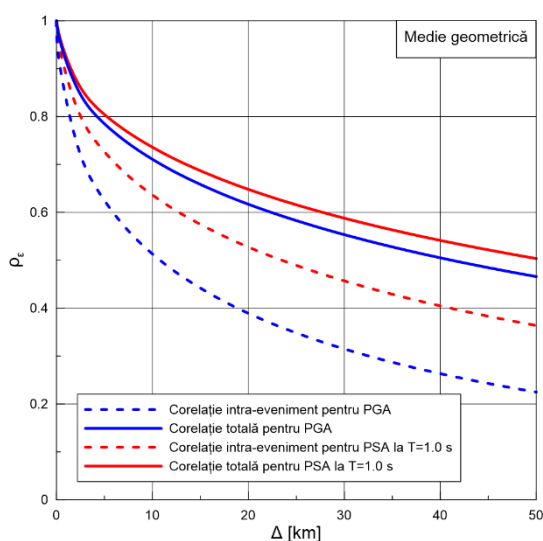


Figura 3.7 – Comparatii între modelul de corelație intra-eveniment și modelul de corelație totală, pentru mărimea clasei de 5 km, utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s

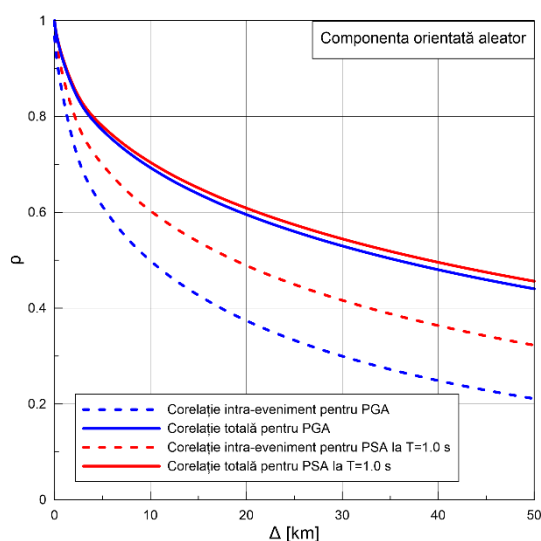


Figura 3.8 – Comparatii între modelul de corelație intra-eveniment și modelul de corelație totală, pentru mărimea clasei de 5 km, utilizând componenta orizontală orientată aleator, pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s

Un alt studiu a constatat în determinarea modului în care condițiile geotehnice influențează corelația spațială a mișcărilor terenului. S-au obținut în acest sens modele de corelație spațială totală pentru înregistrări aparținând doar clasele de teren B și C, definite conform EN 1998-1 (CEN 2004), ulterior eliminării din analiză a perechilor reziduale ce conțin înregistrări obținute în terenuri de clase diferite, pentru o mărime a clasei de grupare egală cu 15 km. Astfel au rezultat următoarele: pentru înregistrările aparținând clasei de teren B: un număr minim de perechi pe clasă egal cu 9 și un număr mediu de perechi egal cu 49, iar în cazul înregistrărilor aparținând clasei C de teren: un număr minim egal cu 150 și un număr mediu egal cu 218. Trebuie menționat că un număr mai mic al mărimei clasei ar fi dus la valori și mai mici ale acestora, valoarea de 15 km fiind considerată optimă pentru cazul de față.

Un scop al acestei analize este realizarea unor comparații cu rezultatele obținute pentru întreaga bază de date, efectuându-se, în acest sens, o analiză a bazei de date a cutremurelor de

adâncime intermediară și pentru o mărime a clasei egală cu 15 km (egală cu mărimea clasei în cazul de față).

În Fig. 3.9 – 3.10 sunt prezentate, în mod comparativ, modelele de corelație totală dezvoltate pentru categoriile conținând doar înregistrări din clasa B de teren, din clasa C de teren și pentru întreaga bază de date, pentru o mărime a clasei egală cu 15 km și pentru întreaga bază de date, pentru o mărime a clasei egală cu 5 km. Rezultatele sunt prezentate pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului pentru *PGA* și *PSA* la $T = 0.5$ s.

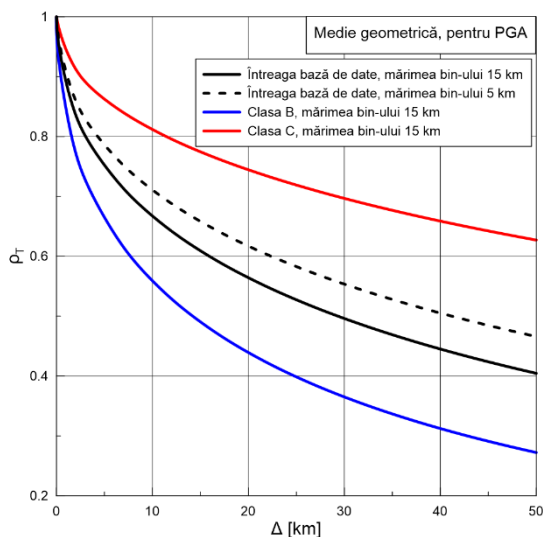


Figura 3.9 – Studiul influenței condițiilor geotehnice asupra corelației spațiale utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru *PGA*

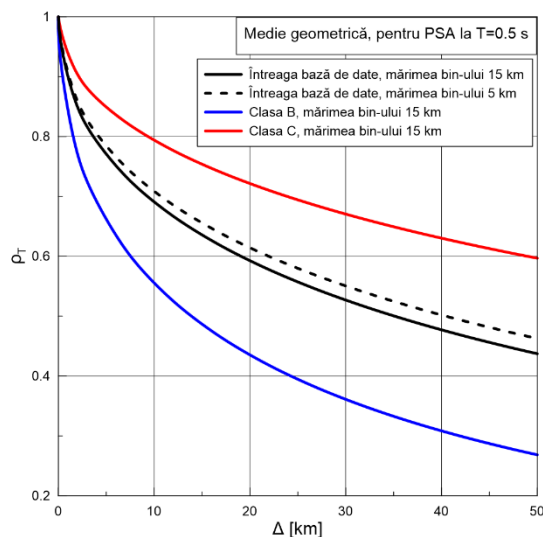


Figura 3.10 – Studiul influenței condițiilor geotehnice asupra corelației spațiale utilizând media geometrică a componentelor orizontale, pentru *PSA* la $T = 0.5$ s

Din analiza Fig. 3.9 – 3.10 se observă faptul că influența condițiilor geotehnice asupra corelației spațiale se manifestă în mod evident prin modul diferit de atenuare a acestora în cazurile analizate. Astfel, se remarcă atenuări diferite între categoria conținând doar înregistrări aparținând clasei B de teren și cea conținând doar înregistrări aparținând clasei C de teren.

Un aspect important care trebuie menționat este diferența rezultatelor obținute față de cele prezentate în Sokolov et al. (2010). În acest studiu s-a obținut o atenuare mult mai lentă pentru categoria care conține înregistrări aparținând clasei C de teren decât pentru care conține înregistrări aparținând clasei B de teren, deci o atenuare mai lentă a terenurilor mai puțin rigide, iar în Sokolov et al. (2010) s-a obținut o atenuare mai lentă a terenurilor mai rigide, diferența între rezultate putând fi atribuită caracteristicilor surselor seismice, caracteristicilor regionale sau unor efecte topografice.

Un ultim studiu a constatat în efectuarea unor comparații între modelul dezvoltat în această teză de doctorat și modelul dezvoltat în Pavel și Văcăreanu (2017), precum și compararea celor două cu alte modele existente în literatură. S-au remarcat diferențe privind modul diferit de atenuare a corelației spațiale între cele două modele, în ciuda utilizării unei baze de date similare, care pot fi atribuite modului diferit de obținere a coeficienților de corelație, Pavel și Văcăreanu (2017) utilizând abordarea cu semi-variograme, restricțiilor impuse în cazul unei metode, dar și eliminării din analiză a unor înregistrări disponibile (au fost eliminate înregistrările aparținând interiorului Carpaților și au fost păstrate doar clasele de teren B și C), în cazul Pavel și Văcăreanu (2017).

În Fig. 3.11 – 3.12 sunt prezentate reprezentările grafice ale celor două modele de corelație pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului (dezvoltat în prezentul studiu și cel dezvoltat în Pavel și Văcăreanu, 2017), pentru PGA și PSA la $T = 1.0$ s.

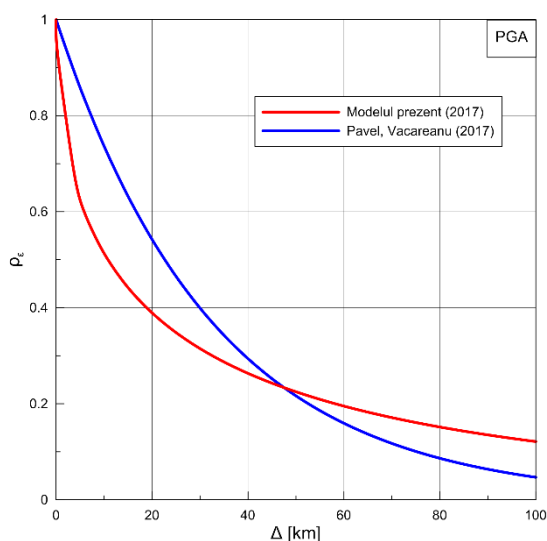


Figura 3.11 – Comparare între modelul dezvoltat și cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017), pentru PGA

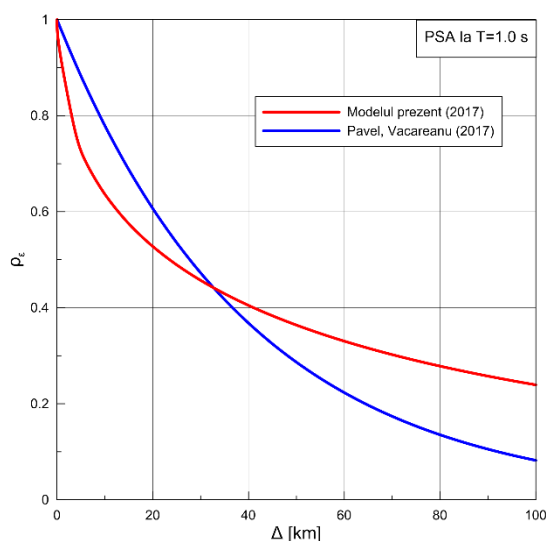


Figura 3.12 – Comparare între modelul dezvoltat și cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017), pentru PSA la $T = 1.0$ s

S-au efectuat comparații între cele două modele și alte modele de corelație, prezentându-se în acest sens și posibile explicații cu privire la diferențele existente, în Fig. 3.13 și 3.14 fiind prezentate comparații ale modelului dezvoltat în prezentul studiu, modelul dezvoltat în Pavel și Văcăreanu (2017) și alte modele existente în literatură, pentru PGA , respectiv pentru PSA la $T = 1.0$ s. Modelele din literatură utilizate ca termeni de comparație sunt: Wang și Takada (2005), Goda și Atkinson (2010), Goda și Hong (2008a) și Esposito și Iervolino (2012).

Baza de date din Goda și Hong (2008a) este formată din înregistrări ale unor cutremure din California și Taiwan (Chi-Chi) tratate separat (pentru comparație s-au utilizat doar rezultatele obținute utilizând baza de date a cutremurelor californiene), baza de date utilizată în Goda și Atkinson (2010) cuprinde cutremure înregistrate în Japonia (în rețelele K-NET, KiK-net și SK-net), iar baza de date utilizată în Wang și Takada conține cutremure înregistrate în Japonia și Taiwan (Chi-Chi). În Esposito și Iervolino (2012) s-au dezvoltat modele de corelație spațială pentru două baze de date aparținând ITACA (Italian Accelerometric Archive) și ESD (European Strong-Motion Database), prezenta comparație bazându-se doar pe rezultatele obținute în cazul primei baze de date.

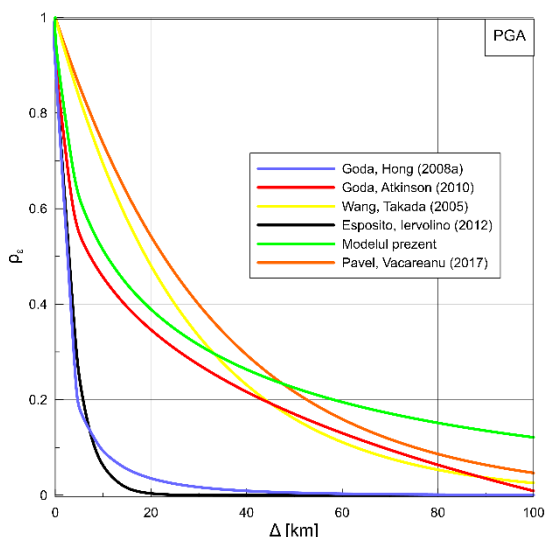


Figura 3.13 – Comparație între modelul dezvoltat, cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017) și alte modele din literatură, pentru PGA

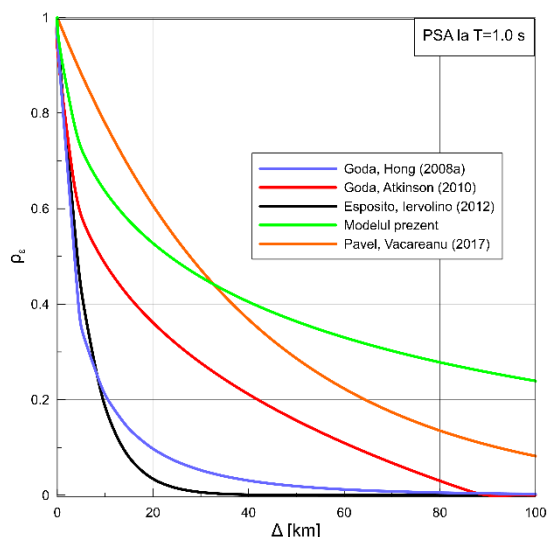


Figura 3.14 – Comparație între modelul dezvoltat, cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017) și alte modele din literatură, pentru PSA la $T = 1.0$ s

Se poate remarca un aspect menționat în Wagener et al. (2016), și anume faptul că modelele de corelație dezvoltate pentru cutremurele din Japonia prezintă o diminuare lentă a corelației spațiale și lungimi de corelație mult mai mari comparativ cu cele californiene. Modelul de corelație dezvoltat în acest studiu prezintă atenuarea cea mai lentă a corelației spațiale, dar oferă rezultate comparative cu modelele bazate pe cutremure din Japonia, în cazul PGA. De asemenea, modelul prezent oferă cele mai ridicate valori ale coeficientului de corelație în cazul distanțelor mari și valori relativ ridicate pentru distanțe scurte.

Se remarcă similaritatea între modelul dezvoltat și modelul prezentat în Goda și Atkinson (2010), dar și cea între modelul din Pavel și Văcăreanu (2017) și cel prezentat în Wang și Takada (2005), în cazul accelerației de vârf a terenului. În timp ce, pentru distanțe mai mici de 40÷50 km, modelul prezent oferă rezultate comparative cu cel prezentat în Goda și Atkinson (2010), pentru distanțe dincolo de acest interval, modelul japonez oferă rezultate similare mai degrabă cu cel prezentat în Pavel și Văcăreanu (2017). De asemenea, ambele modele oferă rezultate mult mai ridicate ale corelației față de modele prezentate în Esposito și Iervolino (2012) și Goda și Hong (2008a).

În cazul ambelor modele, se remarcă o atenuare mai rapidă în cazul perioadelor lungi față de perioadele scurte (la o distanță de separație de 100 km, modelul prezent oferă un coeficient de corelație de aproximativ 0.15 în cazul PGA și de aproximativ 0.25 în cazul PSA pentru $T = 1.0$ s, iar modelul din Pavel și Văcăreanu (2017) prezintă un coeficient de corelație de 0.05 în cazul PGA și de aproximativ 0.10 în cazul PSA pentru $T = 1.0$ s).

Corelația ridicată obținută în cazul ambelor modele, în special prin comparație cu alte modele dezvoltate în literatură, se poate atribui naturii cutremurelor produse de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea. Studiile utilizate ca termen de comparație în analiză conțin majoritar cutremure crustale și cutremure cu adâncimi focale mult mai mici ca în cazul celor analizate în prezentul studiu. Particularitățile regionale, geologia locală, particularitățile căii de propagare sau conținutul de frecvență a mișcării terenului caracteristice bazei de date analizate pot reprezenta alte motive privind natura ridicată a corelației spațiale obținută în cele două modele.

Scopul prezentului capitol a fost dezvoltarea unui model de corelație spațială utilizând o bază de date formată din cutremure generate de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea care contribuie la hazardul seismic al României. Modelul de corelație spațială este important pentru simularea numerică a parametrilor mișcării terenului spațial corelați, având ca scop final efectuarea de analize ale riscului seismic în România ținând cont de corelația spațială a mișcărilor terenului, cu impact deosebit asupra structurilor distribuite pe teritoriu (clădiri, poduri, pasaje etc.) sau al sistemelor distribuite spațial (ex: rețele de utilități).

4. Analiza hazardului seismic ținând cont de influența corelației spațiale a mișcărilor terenului

Capitolul 4 are ca scop obținerea unor distribuții ale intensității mișcării seismice pe diferite arii de calcul ținând cont de corelația spațială a mișcărilor terenului. Principala provocare în acest sens o reprezintă simularea reziduurilor apărute ca urmare a folosirii relațiilor de atenuare, valori care trebuie adăugate la valorile mediane ale parametrului mișcării terenului. În acest sens, s-au prezentat în capitolul 2 principalele metodologii existente în literatură privind simularea parametrilor mișcării terenului corelați spațial, alegându-se în cadrul acestui studiu metoda dezvoltată în Jayaram (2010).

Modelul de corelație spațială prezentat în capitolul 3 a fost dezvoltat pentru valoarea de vârf a accelerației terenului (PGA) și accelerații spectrale la perioade de până la 3 s, atât pentru componenta orizontală orientată aleator, cât și pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului. Calculele din acest capitol sunt efectuate utilizând doar rezultatele obținute pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului, motivul având legătură cu forma relației de atenuare adoptată pentru obținerea valorilor mediane ale parametrilor mișcării terenului. De asemenea, calculele se efectuează doar în termeni de PGA și SA ($T=0.4$ s).

Metodologia adoptată pentru obținerea realizărilor spațial corelate este cea prezentată în Jayaram (2010). Procedura constă în simularea doar a reziduurilor normalizate intra-eveniment, prin metodologia tehnicii simulării într-o singură etapă, utilizându-se în acest sens prima variantă descrisă în Jayaram (2010), și anume simularea directă a vectorului de repartitie normală multivariată. Motivul simulării doar a reziduurilor normalizate intra-eveniment este legat de scopul studiului, și anume analiza modului în care corelația spațială a mișcărilor terenului afectează rezultatele hazardului seismic utilizând în acest sens diferite scenarii de cutremur. Având în vedere utilizarea acestora, nu este necesară simularea reziduurilor inter-eveniment. Cu toate acestea, în cazul în care se dorește efectuarea unei analize probabilistice de hazard/risc seismic ținând cont de corelația spațială totală a mișcărilor seismice, este necesară simularea ambelor tipuri de reziduuri.

Pentru efectuarea analizelor s-a considerat un scenariu de cutremur având caracteristicile cutremurului de la 4 Martie 1977, care va fi denumit în continuare, pentru simplitate, “Scenariul de cutremur Vrancea intermediar”, caracterizat de următoarele:

- Cutremur produs de sursa seismică subcrustală Vrancea;
- Magnitudine moment: $M_W=7.4$;
- Adâncimea focarului: $h=109$ km;
- Poziția epicentrului (coordonate geografice): 45.34 (latitudine nordică) și 26.30 (longitudine estică);

Pentru simularea reziduurilor și determinarea valorilor mediane ale parametrului mișcării terenului considerat în analiză s-au considerat trei arii de calcul, și anume: Municipiul București, Județul Prahova și Județul Ialomița. Municipiul București a fost ales datorită riscului seismic ridicat întâlnit în această arie de interes, precum și datorită faptului că reprezintă una din capitalele cu cel mai înalt grad de risc seismic din Europa. Întreaga suprafață a fost discretizată astfel încât a rezultat o rețea de 264 puncte interioare în care se pot calcula parametri de interes. Județul Prahova a fost ales datorită proximității față de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea, dar și datorită numărului relativ mare de unități administrative teritoriale (în număr de 104). Județul Ialomița a fost selectat datorită întinderii sale semnificative de la vest la est, aspect ce permite obținerea unor valori mediane foarte diferite ale parametrilor ce descriu mișcările terenului produse de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea. Parametrii mișcării terenului și reziduurile au fost calculate, respectiv simulate, în punctele definite ca fiind centroidul unității administrative teritoriale respective, atât pentru Județul Prahova, cât și Județul Ialomița, cel din urmă cuprinzând un număr de 66 unități administrative teritoriale. Acest aspect nu a fost posibil în cazul Municipiului București din cauza numărului foarte mic de puncte rezultate (ar fi rezultat șase puncte de calcul în centroidele celor șase unități teritoriale administrative reprezentate de cele șase sectoare ale Municipiului București), acesta fiind motivul discretizării mult mai fine a suprafeței.

Valorile mediane ale parametrului mișcării terenului luat în considerare în analiză, *PGA* și *SA* ($T=0.4$ s), au fost determinate utilizând relația de atenuare prezentată în Văcăreanu et al. (2015b), datorită aplicabilității acesteia pentru cutremure generate de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea și datorită utilizării acesteia în vederea dezvoltării modelului de corelație.

Reziduurile normalizate intra-eveniment au fost simulate pentru modelul de corelație determinat pentru media geometrică a componentelor orizontale ale parametrului mișcării terenului, pentru accelerația de vârf a terenului (*PGA*) și pentru accelerația spectrală la 0.4 s, *SA* ($T=0.4$ s). Acestea pot fi adăugate valorii mediane, în conformitate cu forma funcțională a relației de atenuare, rezultând valori corelate spațial ale parametrului mișcării terenului.

Valorile mediane, reziduurile normalizate intra-eveniment și valorile parametrului mișcării terenului corelat spațial pentru *PGA*, obținute pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar sunt prezentate în Fig. 4.1 – 4.6, pentru Municipiul București și Județul Ialomița. În lipsa unor informații geofizice și geotehnice complete și fiabile pentru zonele analizate, ce sunt caracterizate de adâncimi foarte mari până la roca de bază, valorile obținute nu pot lua în considerare influențe locale produse de geologia superficială a amplasamentelor.

Corelația reziduurilor (normalizate intra-eveniment în cazul de față) este evidentă încă o dată din analiza Fig. 4.1 – 4.6, punctele situate la distanțe mici având valori similare. Este încă o dată evident faptul că valorile extreme ale reziduurilor sunt comparative în valoare absolută, ceea ce este de așteptat în cazul repartiției normale.

Important de menționat este modul evident în care corelația spațială afectează valoarea mediană a parametrului mișcării terenului (*PGA* sau accelerații spectrale), distribuția valorilor parametrului mișcării terenului fiind puternic influențată de considerarea reziduurilor. Introducerea reziduurilor în relația de atenuare influențează în mod evident și scara de valori a parametrului mișcării terenului. Se remarcă, în acest sens, valori maxime mai mari și valori minime mai mici decât în cazul intensităților ale mișcării terenului necorelate spațial.

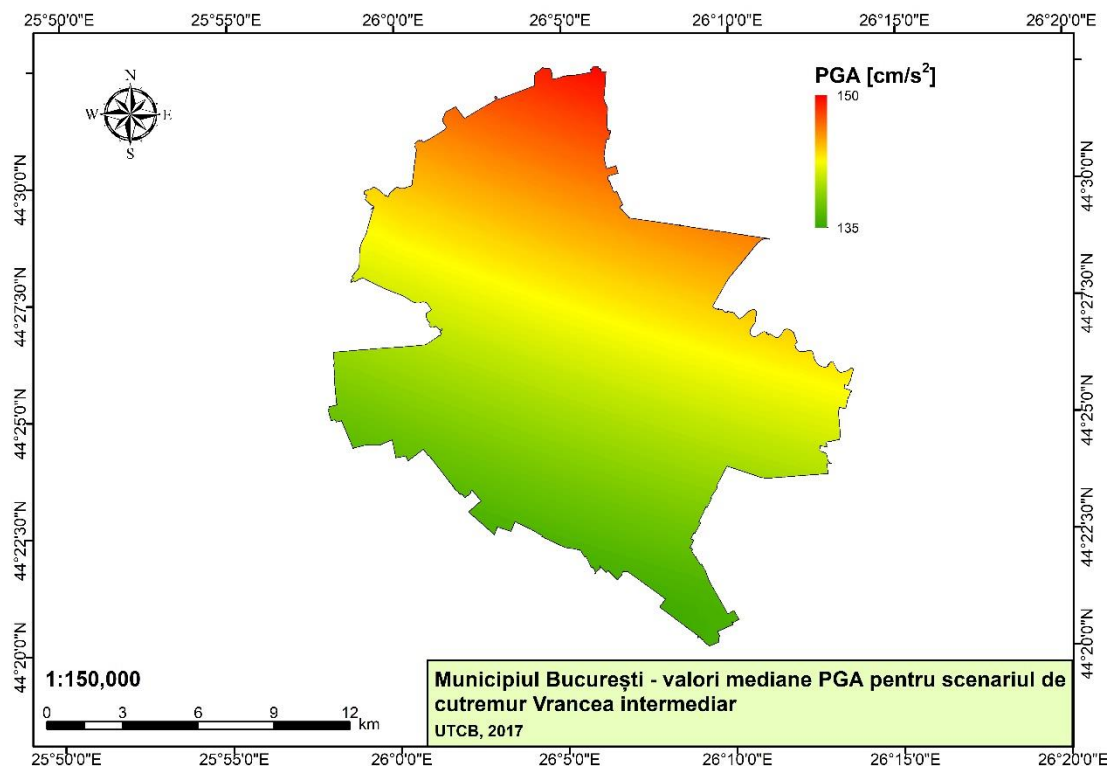


Figura 4.1 – Distribuția valorilor mediane PGA pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Municipiul București

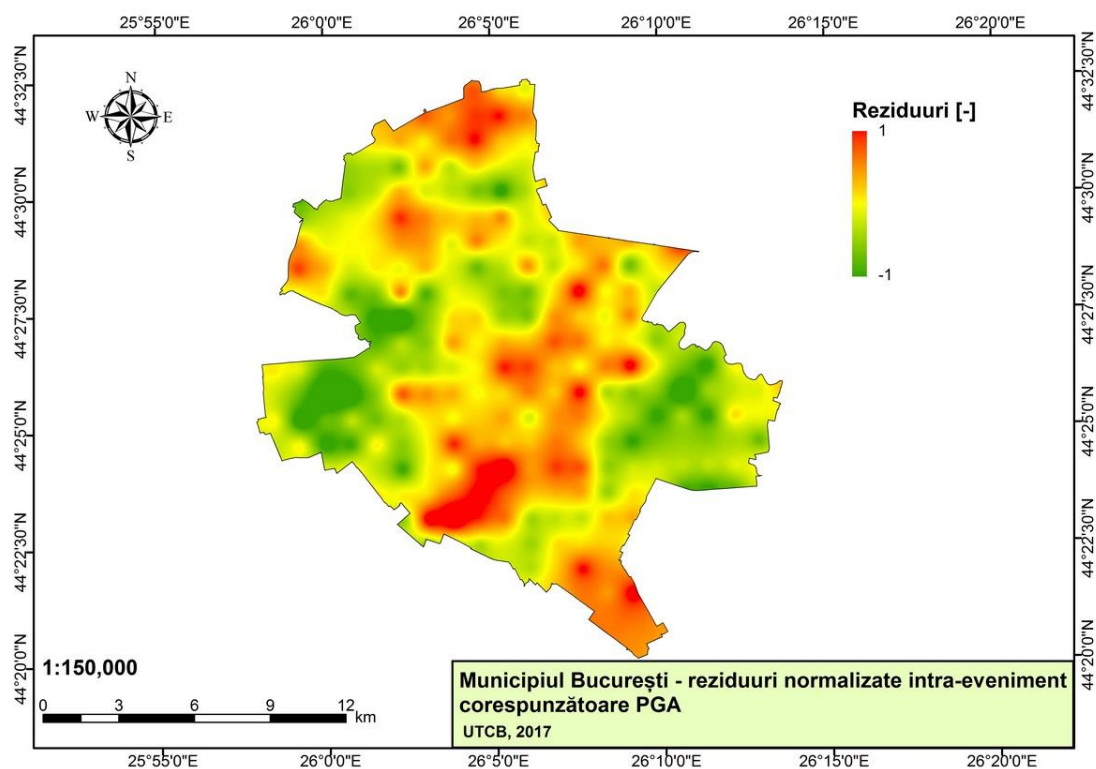


Figura 4.2 – Distribuția reziduurilor normalizate intra-eveniment corespunzătoare PGA, în Municipiul București

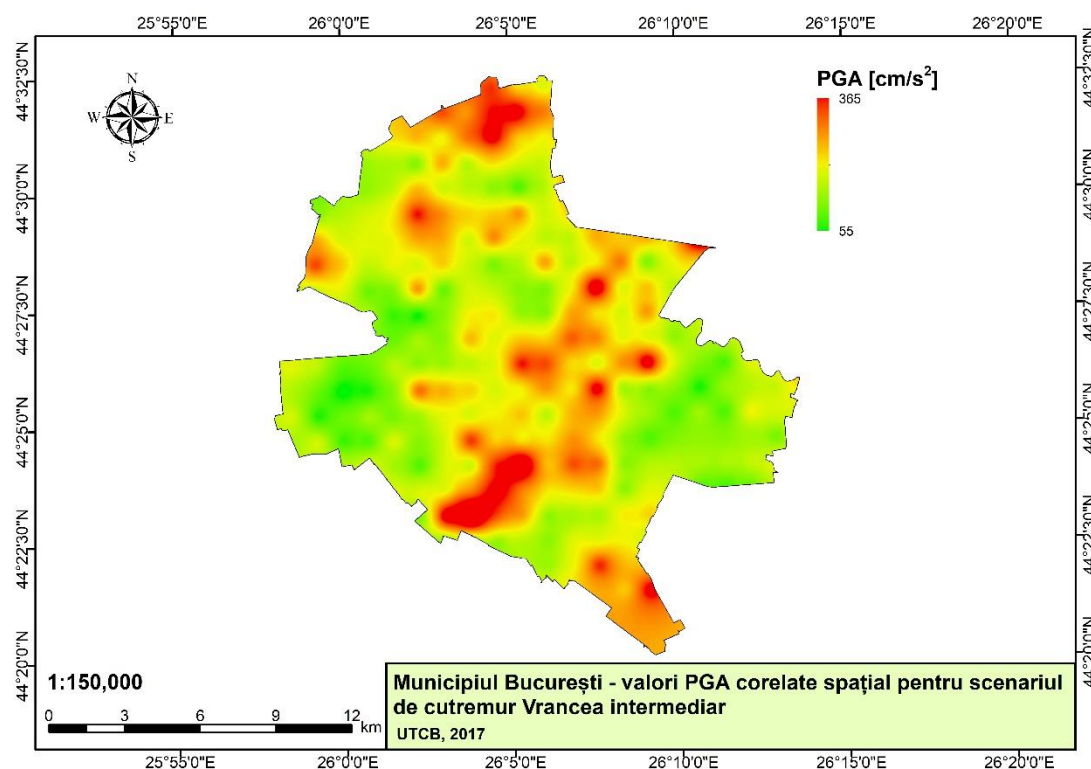


Figura 4.3 – Distribuția valorilor *PGA* corelate spațial pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Municipiul București

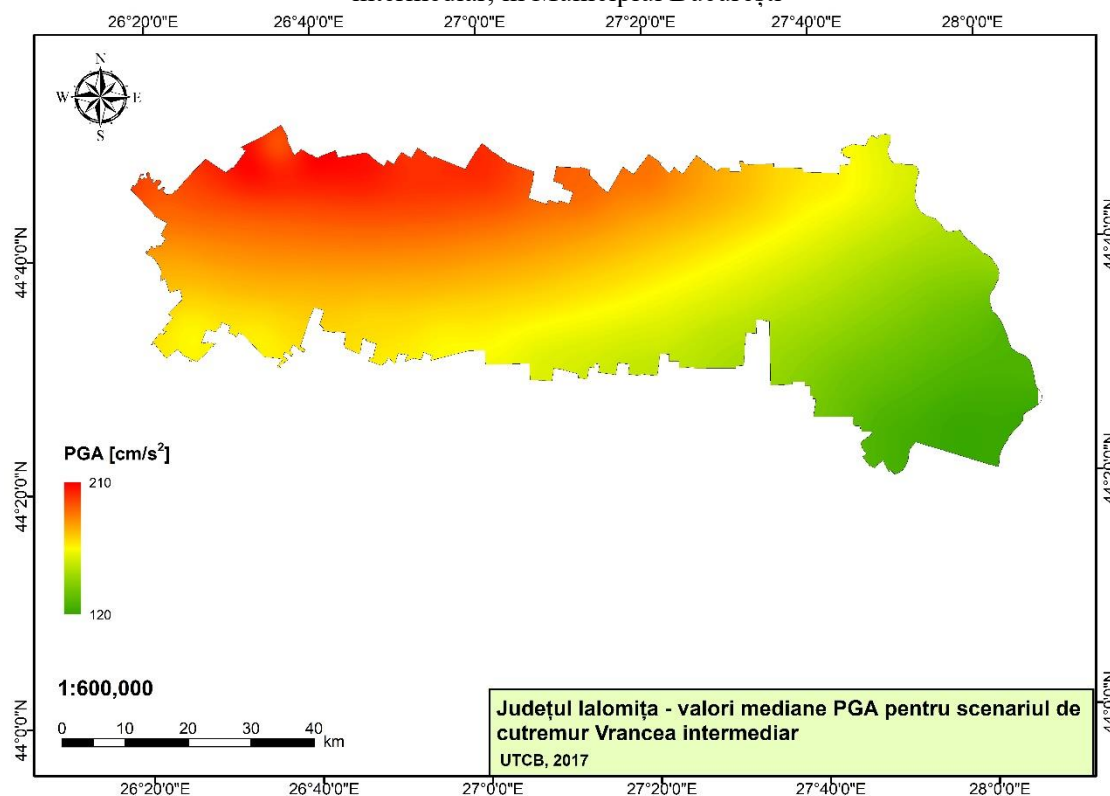


Figura 4.4 – Distribuția valorilor mediane *PGA* pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Județul Ialomița

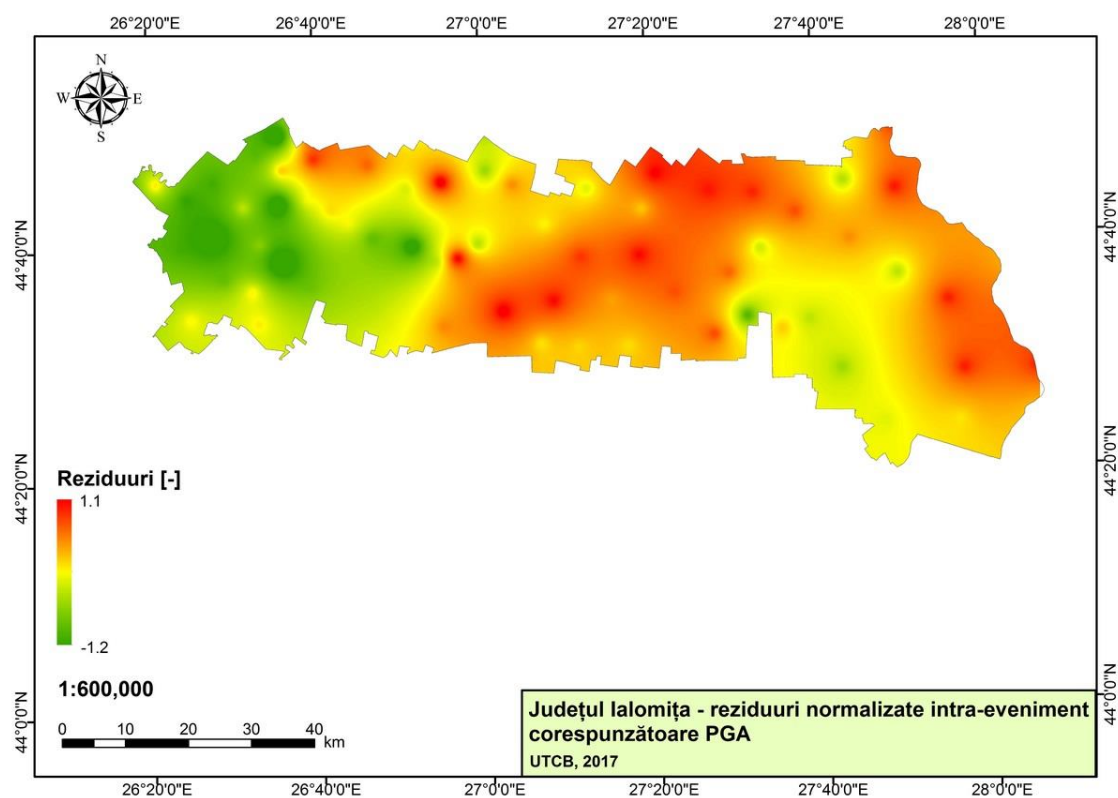


Figura 4.5 – Distribuția reziduurilor normalizate intra-eveniment corespunzătoare PGA, în Județul Ialomița

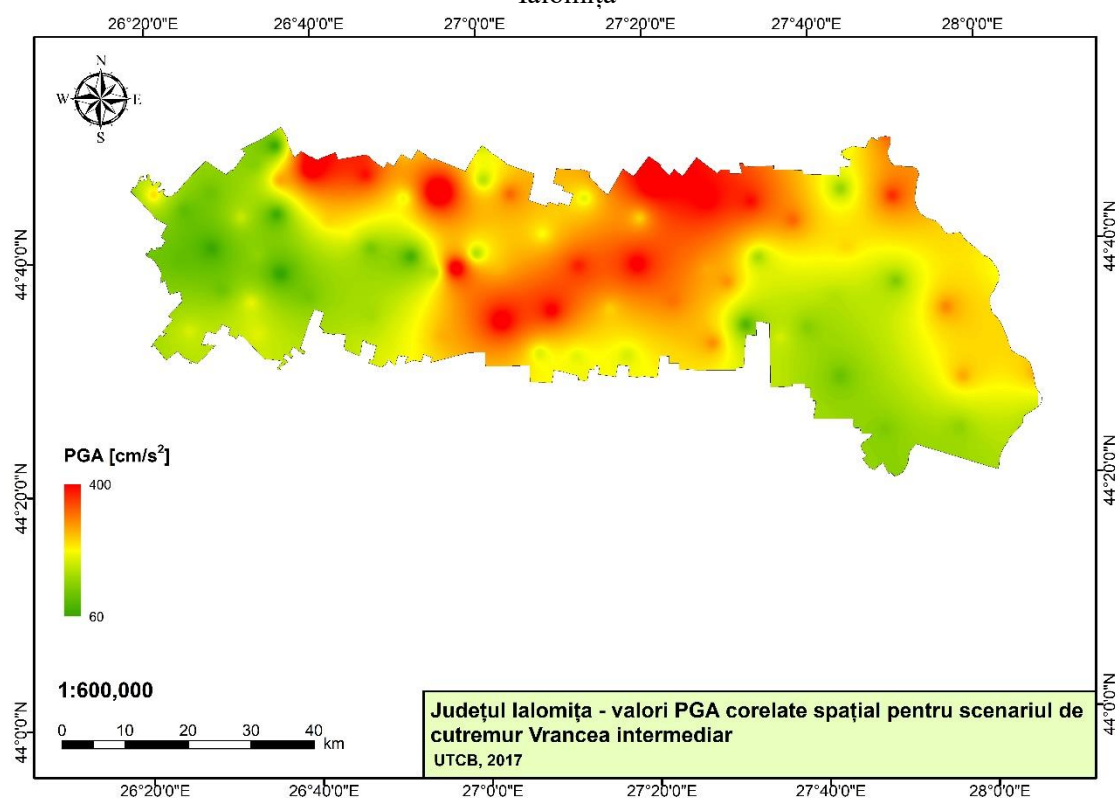


Figura 4.6 – Distribuția valorilor PGA corelate spațial pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar, în Județul Ialomița

Scopul prezentului acestui capitol a fost prezentarea realizărilor reziduale pentru trei arii de calcul de interes, dar și prezentarea și înțelegerea diferențelor între valoarea mediană și valoarea corelată spațial a parametrilor mișcării terenului. În baza celor prezentate se pot efectua analize probabilistice ale hazardului seismic ținând cont de corelația spațială a mișcărilor terenului, precum și analize de risc seismic pentru cele trei zone analizate, atât în varianta prezentată, cât și în cazul introducerii în calcul a mai multor evenimente seismice.

5. Analiza riscului seismic ținând cont de influența corelației spațiale a mișcărilor terenului

Scopul capitolului 5 este efectuarea unor analize asupra riscului seismic luând în considerare influența corelației spațiale a mișcărilor terenului asupra unor sisteme distribuite spațial (pe teritoriu), și anume Municipiul București, Județul Ialomița și Județul Prahova, precum și a unei comparații cu rezultatele prezentate în alte studii. Analiza se va efectua utilizând rezultatele analizei hazardului seismic prezentate în capitolul 4, precum și metodologiile existente în literatura de specialitate privind evaluarea riscului seismic, rezultatele fiind importante în mod special pentru autorități cu rol decizional în politica reducerii impactului dezastrelor naturale, precum și pentru firmele de asigurări și re-asigurări.

Din motivele prezentate anterior, evaluarea riscului seismic pentru structuri distribuite spațial sau pentru rețelele de utilități trebuie făcută numai în urma adoptării unui model de corelație spațială a mișcărilor seismice ale terenului adaptat sau conceput condițiilor seismice considerate în analiză.

Riscul seismic se obține prin combinarea informațiilor probabilistice privind hazardul seismic (intensitatea mișcării seismice) cu cele referitoare la fragilitatea/vulnerabilitatea seismică (susceptibilitatea structurilor de a fi avariate de mișcarea terenului) a elementelor expuse hazardului seismic. Altfel spus, riscul seismic se referă la recurența efectelor, fiind o consecință a producerii hazardului și a vulnerabilității construcțiilor.

Hazardul seismic se referă la recurența cauzelor (parametrii mișcării terenului în timpul unui cutremur) și nu poate fi redus. Evaluarea hazardului seismic are ca scop cuantificarea unui parametru al mișcării terenului produsă în urma apariției unui cutremur, adică evaluarea hazardului seismic estimează nivelul unui parametru ce caracterizează intensitatea mișcării seismice (acelerația de vârf a terenului, viteza de vârf a terenului, accelerații spectrale la diferite perioade etc.) ce va fi produs de un cutremur viitor (Sucuoglu și Akkar 2014).

Fragilitatea/vulnerabilitatea seismică reprezintă, în principiu, susceptibilitatea unor elemente expuse de a fi afectate defavorabil de incidența acțiunii seismice. Fragilitatea/vulnerabilitatea seismică este cuantificată prin gradul de avariere al unui element sau al unui ansamblu de asemenea elemente supus acțiunii seismice.

Expunerea este totală (permanentă), în cazul construcțiilor; pentru alte elemente la risc, expunerea este variabilă.

În acest capitol, analiza hazardului seismic se bazează pe rezultatele obținute în capitolul 4 pentru scenariul de cutremur Vrancea intermediar pentru cele trei arii de calcul reale, și anume Municipiul București, Județul Ialomița și Județul Prahova. Utilizate în cadrul acestui capitol sunt valorile *PGA*, pe baza acestora determinându-se spectrele de răspuns elastic în conformitate cu prevederile codului de proiectare seismică aflat în vigoare pentru teritoriul României, P100-1/2013 (MDRAP 2013).

De menționat este faptul că rezultatele analizei riscului seismic din acest capitol sunt obținute pentru o realizare a simulării reziduurilor normalizate intra-eveniment, pentru cele trei arii de calcul, utilizând un fond construit fictiv, neputând fi utilizate în calitate de analize ale riscului seismic pentru situația reală a celor trei arii de calcul, scopul capitolului fiind evidențierea influenței corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului asupra analizelor de risc seismic.

În vederea efectuării analizei influenței corelației spațiale asupra rezultatelor analizelor de risc seismic s-a utilizat un fond construit fictiv alcătuit din clădiri situate în amplasamentele în care s-au determinat valorile *PGA* în capitolul 4, motivația studiului nefiind efectuarea unei analize de risc a celor trei arii de calcul în baza fondului construit real, acesta putând fi obiectul unor altor studii, similar celor efectuate de Pavel et al. (2017a, b), ci studiul impactului corelației spațiale asupra rezultatelor analizelor de risc seismic. S-a ales, în acest sens, o tipologie structurală, structură în cadre de beton armat, în regim mare de înălțime (high-rise), în două ipoteze de calcul, și anume pentru un nivel moderat și un nivel avansat al proiectării seismice, notate în continuare cu RC1-HR-MC și respectiv RC1-HR-HC. Pentru cele două cazuri studiate s-au adoptat curbele de capacitate și funcțiile de fragilitate determinate în proiectul RISK-UE (Văcăreanu et al. 2009).

Evaluarea riscului seismic se efectuează (conform metodologiei HAZUS-MH (FEMA, 2012) și a altor studii existente în literatură) prin evaluarea performanței structurale. Concret, acest lucru se realizează utilizând metoda N2 (descrisă în Fajfar 1999, 2000) care se bazează pe Metoda Spectrului de Capacitate (Capacity Spectrum Method) dezvoltată de Freeman (1998).

Metoda N2 se bazează pe utilizarea spectrelor de răspuns inelastic în cadrul metodei spectrului de capacitate. Spectrele de răspuns (cerință) inelastice sunt obținute din spectrele elastice prin micșorarea acestora cu factori de ductilitate, în conformitate cu relațiile întâlnite în literatură (Fajfar 1999). Factorul de ductilitate μ a fost considerat, în acest studiu, egal cu 5, pentru cazul RC1-HR-MC, respectiv 6 în cel de-al doilea caz.

Metoda spectrului de capacitate este o metodă grafică care presupune reprezentarea în format accelerații spectrale-deplasări spectrale (*SA-SD*) a spectrului de răspuns (în metoda N2 a spectrului de răspuns inelastic obținut prin reducerea spectrului elastic cu factorii de ductilitate) și a spectrului de capacitate, ambele fiind obținute dintr-un sistem echivalent cu un grad de libertate. Prin noțiunea de spectru de capacitate se înțelege o curbă de capacitate în format *SA-SD*. Prin utilizare curbelor de capacitate RISK-UE (Văcăreanu et al. 2009), această conversie este deja efectuată. Conversia spectrului de răspuns inelastic din formatul *SA-T* în formatul *SA-SD* se efectuează conform relațiilor existente în literatură (Fajfar 1999).

În mod concret, metoda spectrului de capacitate constă în reprezentarea celor două spectre în format *SA-SD*, intersecția dintre cele două reprezentând așa numitul punct de performanță care reprezintă practic cerința de accelerație și respectiv cerința de deplasare. Cerințele de deplasare astfel determinate sunt utilizate pentru determinarea probabilităților de a fi în sau de a depăși o anumită stare de avariere, care pot fi transformate, conform prevederilor din HAZUS-MH (FEMA 2012) în pierderi.

Metodologia prezentată în HAZUS-MH (FEMA 2012) prezintă estimări asupra mai multor categorii de pierderi (pierderi economice directe, pierderi economice indirecte, pierderi sociale directe (persoane afectate) și pierderi sociale indirecte legate de imposibilitatea locuirii în locuința proprie și cele legate de găzduirea oamenilor în adăposturi). În acest capitol se vor detalia și analiza doar pierderile economice directe legate de reparația și înlocuirea elementelor structurale.

Conform metodologiei HAZUS (FEMA 2012), probabilitățile stărilor de avariere astfel determinate, produse ca urmare a incidenței evenimentului seismic, pot fi convertite în pierderi monetare (utilizând ca moneda dolarul american) în baza informațiilor statistice și a datelor economice. Pentru o anumită stare de avariere și o anumită destinație a clădirii, pierderile economice directe asociate cu reparația și înlocuirea elementelor structurale sunt estimate ca un produs între suprafața de nivel a clădirilor conform destinației acesteia, probabilitatea clădirii de a se afla în stare de avariere respectivă și costul de reparație pe m^2 în funcție de destinația clădirii. În acest studiu, structurile au fost considerate clădiri rezidențiale de tip multi-locuințe, cu un cost de reparație de 9.86 \$/m² și o suprafață curentă de nivel de 557 m², conform HAZUS (FEMA 2012).

Calcululele au fost efectuate atât în ipoteza în care nu este luată în considerare corelația spațială, cât și în cea în care se ține cont, rezultatele fiind prezentate în Tabelul 5.1 pentru cele trei arii de calcul, în ambele ipoteze (nivel moderat și avansat al proiectării seismice). Valorile din tabel reprezintă suma pierderilor pentru clădirile amplasate în amplasamentele analizate, pentru fiecare caz analizat.

Tabelul 5.1 – Costuri economice directe pentru scenariul analizat

Arie de calcul	Tip	Costuri economice directe [mil. \$]	
		Fără corelație spațială	Corelație spațială
Municipiul București	RC1-HR-MC	9.0	14.0
	RC1-HR-HC	1.6	2.7
Județul Prahova	RC1-HR-MC	13.3	17.6
	RC1-HR-HC	5.4	9.7
Județul Ialomița	RC1-HR-MC	1.2	3.0
	RC1-HR-HC	0.6	1.0

Rezultatele confirmă valorile mai mari (remarcate în alte studii de specialitate din literatură: Pavel et al. 2017a,b, Park et al. 2007, Goda și Hong 2008b, Sokolov și Wenzel 2011a, 2013b, Wagener et al 2016 etc.) ale pierderilor cauzate de un eveniment seismic, în cazul de față a pierderilor economice directe, în cazul utilizării în analiza hazardului seismic a unui model de corelație spațială, față de varianta în care nu se ține cont. Se remarcă totodată valori mai mici ale pierderilor în cazul unui nivel mai ridicat al proiectării seismice, ceea ce era de așteptat.

În Tabelul 5.2 sunt prezentați indicatorii statistici medie, abatere standard și coeficient de variație ai pierderilor economice pentru cazurile analizate.

Tabelul 5.2 – Indicatori statistici ai pierderilor economice pentru scenariul analizat

Arie de calcul	Tip	Medie [\$]		Abatere standard [\$]		Coeficient de variație [%]	
		Fără corelație	Corelație	Fără corelație	Corelație	Fără corelație	Corelație
Municipiul București	RC1-HR-MC	34,300	52,600	3,000	35,500	9	67
	RC1-HR-HC	6,000	11,500	750	20,000	12	82
Județul Prahova	RC1-HR-MC	115,000	155,000	30,000	140,000	26	90
	RC1-HR-HC	50,000	85,000	10,000	70,000	20	82
Județul Ialomița	RC1-HR-MC	15,000	35,000	4,000	30,000	26	85
	RC1-HR-HC	6,000	12,000	1,500	10,000	25	83

Din analiza indicatorilor statistici medie, abatere standard și coeficientul de variație ai pierderilor economice s-au observat următoarele: mediile sunt mai mari în cazul analizei ținând

cont de corelația spațială a mișcărilor terenului păstrând însă, în majoritatea cazurilor, un ordin de mărime similar, abaterile standard și coeficienții de variație în același caz fiind însă sensibil mai mari decât în cazul analizei care nu ține cont de corelația spațială. Acest aspect confirmă rezultatele altor studii din literatura de specialitate (Wagner et al 2016, Pavel et al. 2017a, b, Sokolov și Wenzel 2011a, 2013b, Goda și Hong 2008b etc.), demonstrând, încă o dată, importanța studierii corelației spațiale a mișcărilor terenului în vederea obținerii unor analize de risc cu grad ridicat de încredere în cazul sistemele distribuit spațial (pe teritoriu) sau a rețelelor de utilități, îndeosebi prin importanța distribuirii pierderilor în jurul valorilor medii.

În Fig. 5.1 și 5.2 sunt prezentate, pentru Municipiul București, gradele medii de avariere pentru punctele considerate în analiză, în ipoteza unui nivel moderat al proiectării seismice și în ambele moduri în care s-a efectuat analiza (aplicând modelul de corelație și varianta fără a ține cont de corelația spațială). Se remarcă diferențe majore între cele două variante ale analizei, în varianta în care se ține cont de corelația spațială remarcându-se prezența structurilor analizate în trei stări de avariere (neavariată, ușoară și moderată), față de varianta în care nu se ține cont, unde întâlnim aceeași stare de avariere (ușoară).

În Fig. 5.3 și 5.4 sunt prezentate, pentru Județul Ialomița, gradele medii de avariere pentru punctele considerate în analiză (centroidele unităților teritorial-administrative), în ipoteza unui nivel moderat al proiectării seismice și în cele două variante ale analizei (cu/fără corelația spațială), remarcându-se diferențe majore între acestea. În timp ce în varianta în care nu se ține cont de corelația spațială se obține o singură stare de avariere (neavariată) a clădirilor analizate, în varianta în care se utilizează modelul de corelație spațială se obține o variabilitate a gradelor medii de avariere (stări de avariere moderată, ușoară și neavariată).

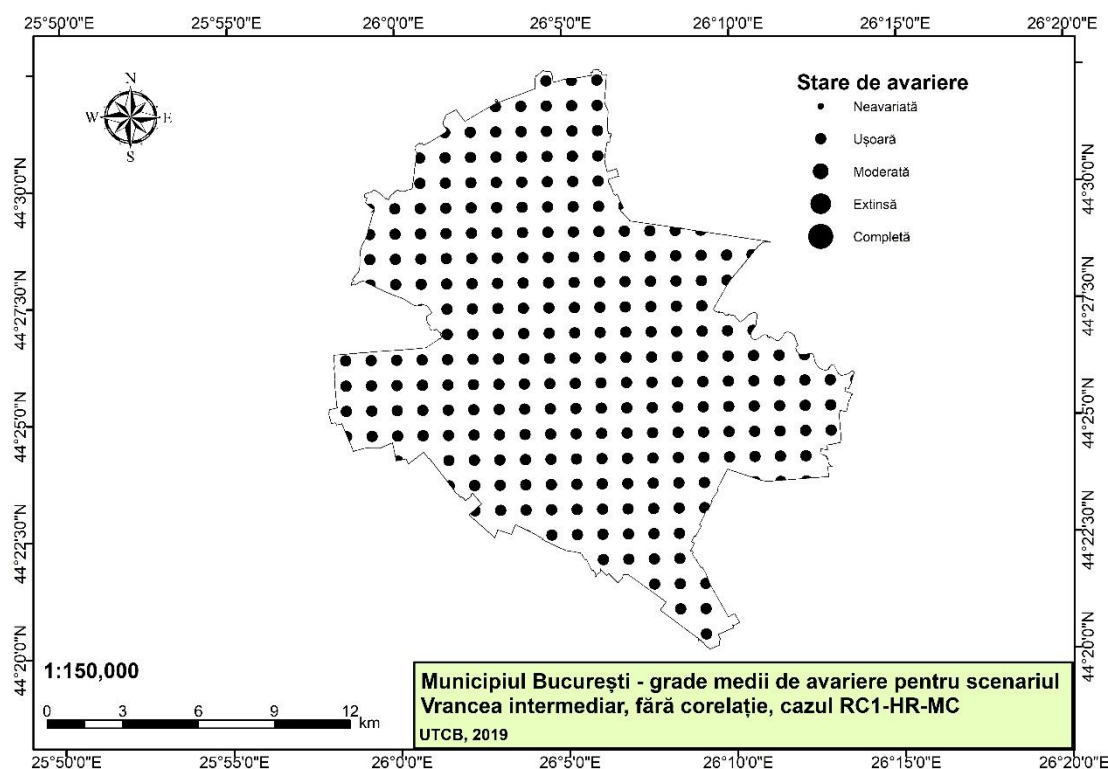


Figura 5.1 – Grade medii de avariere pentru Municipiul București, fără corelație, cazul RC1-HR-MC

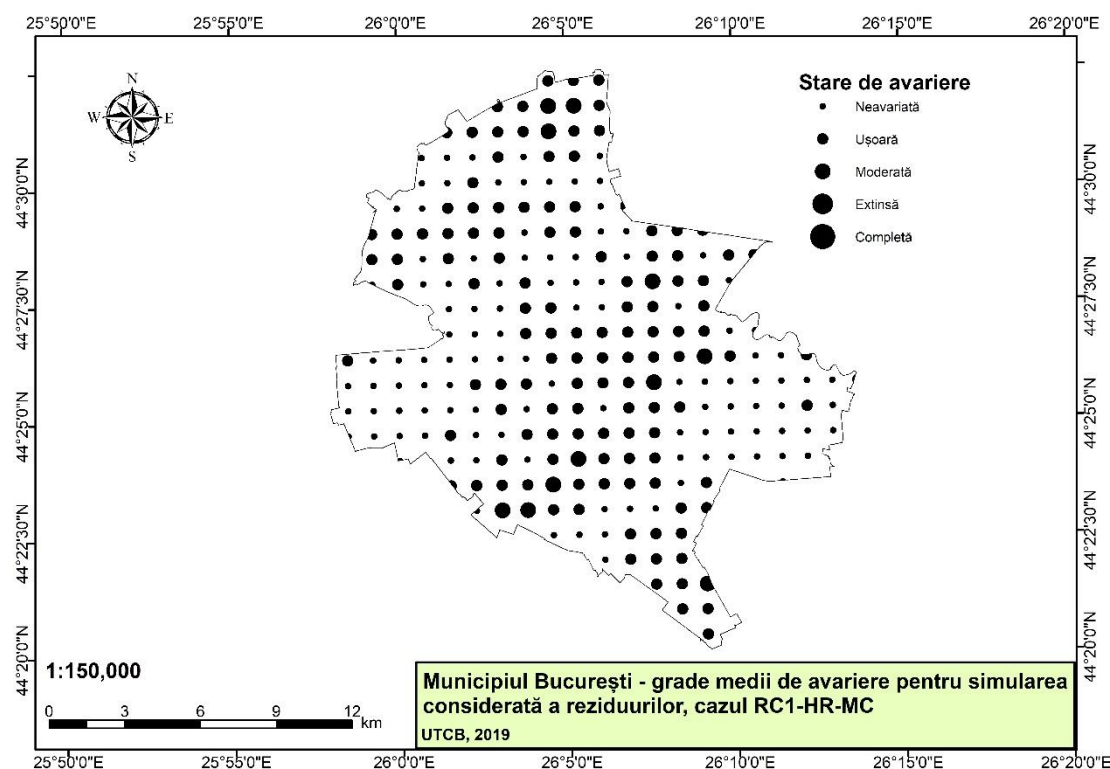


Figura 5.2 – Grade medii de avariere pentru Municipiul București, cu corelație, cazul RC1-HR-MC

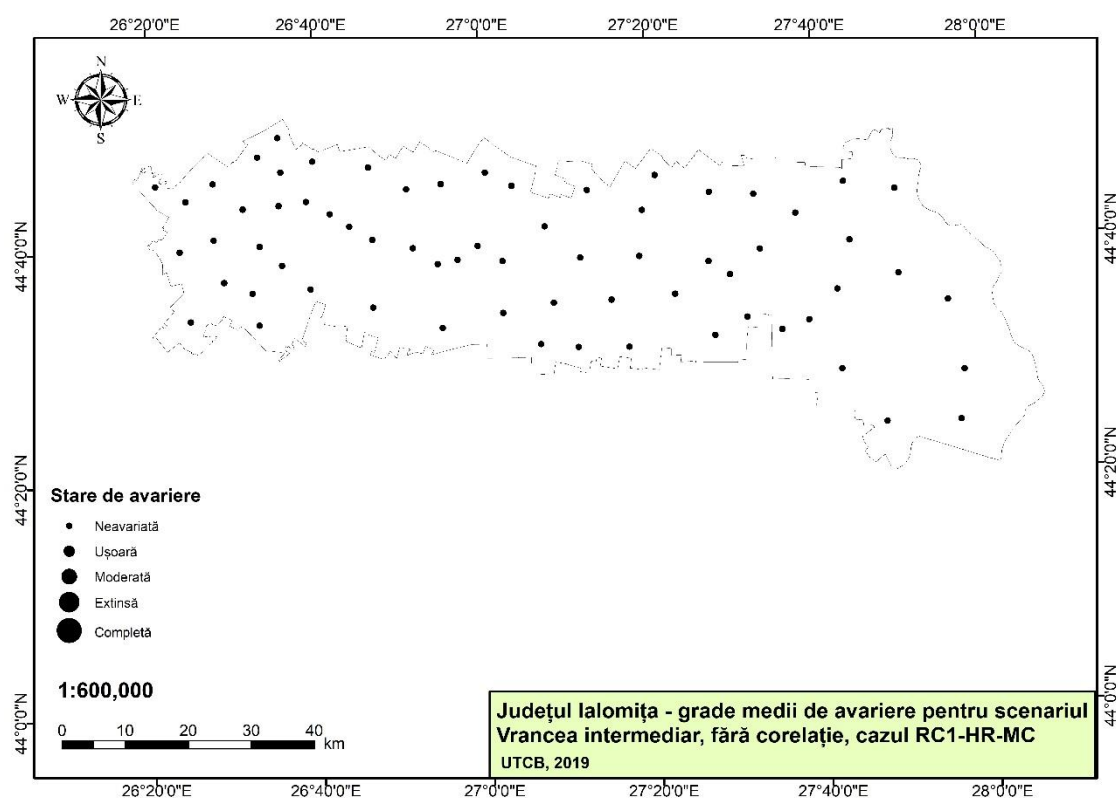


Figura 5.3 – Grade medii de avariere pentru Județul Ialomița, fără corelație, cazul RC1-HR-MC

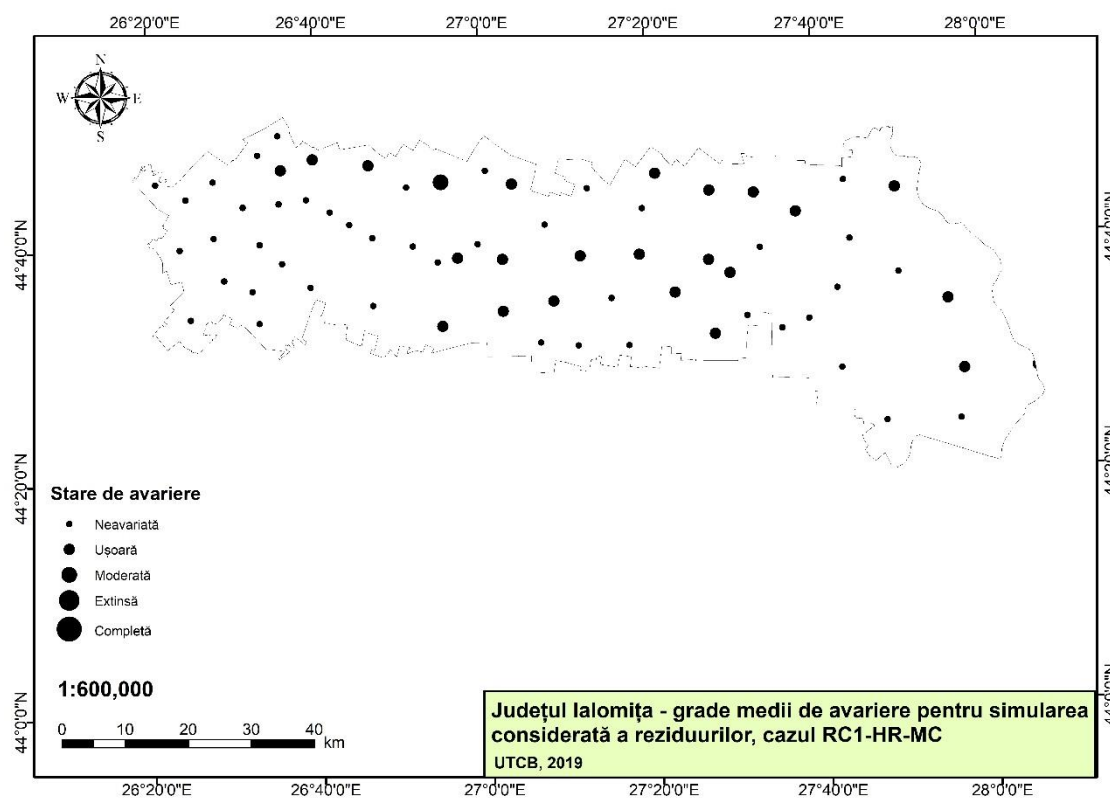


Figura 5.4 – Grade medii de avariere pentru Județul Ialomița, cu corelație, cazul RC1-HR-MC

Rezultatele acestui capitol au confirmat aspectele cunoscute în literatura de specialitate, și anume valori mai mari ale pierderilor în momentul efectuării analizei de risc seismic asupra unui sistem distribuit spațial (pe teritoriu) utilizând un model de corelație spațială a mișcărilor seismice ale terenului, precum și valori mai mari ale indicatorilor de împrăștiere (abatere standard, coeficient de variație), cu impact major asupra firmelor de asigurări și, în mod deosebit, a firmelor de re-asigurări față de varianta clasică, în care nu se ține cont de un model de corelație spațială în momentul efectuării unor astfel de analize.

6. Concluzii, contribuții personale, lista de publicații și direcții viitoare de cercetare

Concluzii și contribuții personale

Obiectivul tezei de doctorat a fost studiul hazardului și riscului seismic în România utilizând un concept relativ nou în seismologia inginerască și ingineria seismică, și anume corelația spațială a mișcărilor seismice ale terenului, care afirmă și demonstrează că amplitudinile mișcărilor seismice din două amplasamente diferite sunt corelate, coeficientul de corelație fiind dependent de distanța între amplasamente, informațiile obținute în urma unei astfel de analize a hazardului seismic fiind aplicabile în cazul unor sisteme distribuite spațial (exemplu rețele de utilități) sau în cazul unor structuri distribuite spațial (clădiri, poduri, pasaje etc.). Teza de doctorat poate fi considerată o lucrare de bază în ceea ce privește studiul corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului pentru condițiile seismice din România, la momentul începerii acesteia (2015) neexistând nici un studiu în acest sens.

Un prim rezultat important obținut în cadrul tezei de doctorat a fost dezvoltarea unui model de corelație pentru o bază de date formată din înregistrări ale mișcării terenului obținute la 10 cutremure produse de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea. Modelul de

corelație s-a dezvoltat alegând o mărime a clasei de grupare egală cu 5 km, calculele fiind efectuate utilizând ca parametru al mișcării terenului accelerația de vârf a terenului *PGA* și accelerațiile pseudo-spectrale *PSA* la diferite perioade spectrale, pentru o valoare a fracțiunii din amortizarea critică egală cu 5%. De asemenea, calculele s-au efectuat atât în termeni de medie geometrică a celor două componente orizontale ale parametrului mișcării terenului, cât și în funcție de componenta orizontală orientată aleator a parametrului mișcării terenului. Dezvoltarea modelului a confirmat anumite aspecte discutate în alte studii din literatură: dependența corelației de perioada spectrală și corelații mai mari pentru cazul utilizării mediei geometrice față de cazul utilizării componentei orizontale orientate aleator, efectuându-se în acest sens și comparații ale modelului cu alte modele din literatură.

O altă contribuție importantă în studiul corelației spațiale a mișcărilor seismice ale terenului este reprezentată de analiza de sensibilitate efectuată asupra modelului de corelație. O primă analiză a studiat influența mărimii clasei de grupare asupra rezultatelor obținute. Rezultatele au arătat o dependență a modelului de corelație în funcție de mărimea clasei, diferit de rezultatele altor studii existente în literatură, oferindu-se posibile explicații în acest sens, diferențele putând fi cauzate de numărul redus de date disponibile în cazul utilizării unei clase cu mărimea mai mică, de 2.5 km, în special în raport cu mărimea bazelor de date utilizate în alte studii.

Un alt studiu a constatat în determinarea unui model de corelație totală pentru baza de date a cutremurelor de adâncime intermediară, care este util în etapa simulării numerice a parametrilor mișcării terenului spațial corelați în cazul în care se dorește efectuarea unei analize probabilistice a hazardului seismic, remarcându-se totodată și corelații totale mai ridicate decât cele intra-eveniment.

S-au efectuat comparații între coeficienții de corelație empirici obținuți pentru diferite evenimente seismice prin care, în ciuda limitărilor cauzate de numărului redus de date disponibile, s-a remarcat o împrăștiere a valorilor coeficienților empirici la perioade scurte, existând însă o ușoară tendință de aranjare a acestora în funcție de cutremurele de proveniență, la perioade lungi.

Determinarea modului în care condițiile geotehnice influențează corelația spațială a mișcărilor terenului reprezintă un punct de interes în literatura de specialitate, în cadrul analizei de sensibilitate a modelului de corelație dezvoltat efectuându-se și o astfel de analiză. S-au obținut modele de corelație spațială pentru înregistrări seismice în terenuri aparținând claselor B, respectiv C de teren, definite conform EN 1998-1 (CEN 2004), pentru o mărime a clasei de grupare egală cu 15 km. Rezultatele au arătat faptul că modelul de corelație obținut pentru înregistrări aparținând clasei B de teren se atenuează mai rapid decât modelul de corelație obținut pentru întreaga bază de date, iar cel obținut pentru înregistrări aparținând clasei C de teren se atenuează mai lent. De asemenea, s-au obținut rezultate diferite de cele ale altor studii din literatură, printre motivele posibile enumerându-se caracteristicile surselor seismice, caracteristicile regionale sau unele efecte topografice.

S-au efectuat comparații ale modelului de corelație cu alte modele existente în literatură, cu accent deosebit asupra modelului dezvoltat în Pavel și Văcăreanu (2017), datorită faptului că modelul din urmă este dezvoltat pentru condițiile seismice din România, utilizând o bază de date similară (aproape identică) cu cea utilizată în prezenta teză de doctorat. S-au remarcat diferențe privind modul diferit de atenuare a corelației spațiale între cele două modele care pot fi atribuite modului diferit de obținere a coeficienților de corelație (coeficienți de corelație respectiv semi-variograme), restricțiilor impuse în cazul modelului dezvoltat în prezenta

lucrare, dar și eliminării din analiză a unor înregistrări disponibile, în cazul Pavel și Văcăreanu (2017). S-au efectuat comparații între cele două modele și alte modele de corelație din literatură, primele prezentând valori mai ridicate ale coeficienților de corelație, precum și o atenuare mai lentă față de majoritatea studiilor alese ca termen de comparație. Acest lucru este, în principal, cauzat de natura cutremurelor generate de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea, studiile analizate ca termen de comparație utilizând, majoritar, cutremure crustale. Alte motive privind natura ridicată a corelației spațiale obținută în cele două modele pot include particularitățile regionale, geologia locală, particularitățile căii de propagare sau conținutul de frecvență a mișcării terenului caracteristice bazei de date analizate. Acest studiu comparativ evidențiază, încă o dată necesitatea studierii în detaliu a corelației spațiale a mișcărilor terenului pentru condițiile seismice din România, aspect care se poate realiza și prin îndeșirea rețelelor seismice.

O etapă importantă în vederea efectuării unor analize ale hazardului seismic care țin cont de corelația spațială a mișcărilor seismice ale terenului a fost obținerea unor realizări spațiale corelate ale intensităților mișcării terenului etapă care presupune alegerea unei metodologii de simulare și a unui model de corelație. A fost aleasă metodologia aplicabilă cazului de față (Jayaram 2010), dorindu-se simularea doar a reziduurilor intra-eveniment, cele inter-eveniment nefiind de interes în cazul utilizării scenariilor de cutremure, utilizându-se în acest sens modelul de corelație dezvoltat în capitolul 3.

A fost efectuată o analiză extinsă pentru un scenariu de cutremur produs de sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea, pentru trei arii de calcul (Municipiul București, Județul Ialomița și Județul Prahova), calculele efectuându-se doar în termeni de *PGA* și *SA* ($T=0.4$ s). S-a remarcat că valorile extreme ale reziduurilor sunt comparative în valoare absolută, de așteptat în cazul repartiției normale. Influența corelației reziduurilor este evidențiată încă o dată, de data aceasta asupra analizelor hazardului seismic, confirmând rezultatele altor studii de specialitate: punctele situate la distanțe apropiate au valori similare ale parametrului mișcării terenului, distribuția valorilor parametrului mișcării terenului este influențată de considerarea reziduurilor, iar scara de valori este puternic modificată prin introducerea influenței.

O ultimă analiză a efectuată a constatat în evaluarea riscului seismic ținând cont de corelația spațială a mișcărilor seismice ale terenului, utilizându-se scenariul de cutremur de adâncime intermediară Vrancea pentru Municipiul București, Județul Ialomița și Județul Prahova. Analiza s-a efectuat pentru o tipologie structurală, cadre din beton armat în regim mare de înălțime, în varianta unui nivel avansat, dar și moderat, al proiectării seismice, utilizând metoda N2 (Fajfar 1999) și metodologia HAZUS-MH (FEMA 2012). Rezultatele au confirmat aspectele semnalate în literatura de specialitate, și anume valori mai mari ale pierderilor în momentul efectuării analizei de risc seismic asupra unei structuri distribuite pe teritoriu utilizând un model de corelație spațială a mișcărilor seismice ale terenului, precum și valori mai mari ale indicatorilor de împrăștiere (abatere standard, coeficient de variație), cu impact major asupra firmelor de asigurări și, în mod deosebit, a firmelor de re-asigurări, față de varianta clasică, în care nu se ține cont de un model de corelație spațială.

Direcții viitoare de cercetare

Posibilitățile în ceea ce privesc direcțiile viitoare de cercetare, sunt în continuare numeroase, câteva dintre ele provenind din direcțiile pe care prezenta teză de doctorat nu le-a putut dezvolta din cauza motivelor discutate în secțiunea anterioară. Printre aceste se enumeră: dezvoltarea unui model de corelație a mișcărilor seismice ale terenului utilizând ca bază de date cutremure

crustale care provin din sursele seismice care contribuie la hazardul seismic al României, dezvoltarea unor modele de corelație spațială utilizând alți parametri ai mișcării terenului (*PGV*, intensitatea Arias, viteza absolută cumulativă etc.), efectuarea unor analize de sensibilitate mai amănunțite care se bazează pe un număr mult mai mare de date, incluzând aici studiul influenței condițiilor geotehnice asupra modelului de corelație spațială, a influenței mărimii clasei de grupare asupra parametrilor modelului, adoptarea altor modele disponibile (fie ca e vorba tot de coeficienți de corelație, fie de semi-variograme) și efectuarea unor comparații cu modelul dezvoltat în prezenta teză de doctorat, efectuarea unor analize probabilistice a hazardului seismic utilizând modelul de corelație obținut, pentru diferite arii de calcul (fictive sau reale), efectuarea unor analize probabilistice a riscului seismic pentru structuri distribuite pe teritoriu (fondul construit al Municipiului București, poduri, baraje, viaducte etc.) sau pentru sisteme distribuite spațial (rețele de utilități) care nu au fost abordate în prezenta teză de doctorat.

Lista de publicații și activități extra-curriculare

Articole publicate în reviste cotate ISI:

Vacareanu R, Pavel F, Crăciun I, Coliba V, Arion C, Aldea A, Neagu C (2018) Risk-targeted maps for Romania, *Journal of Seismology*, Springer, 22(2):407–417

Articole publicate în volume indexate ISI:

Crăciun I, Vacareanu R, Pavel F (2016) Spectral Displacement Demands for Strong Ground Motions Recorded During Vrancea Intermediate-Depth Earthquakes. In: Văcăreanu, R., Ionescu, C. (Eds) (2016). The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt. Proceedings of the Symposium Commemorating 75 Years from November 10, 1940 Vrancea Earthquake, Springer Natural Hazards Book Series, p. 169-188, eBook ISBN 978-3- 319-29844-3, Hardcover ISBN 978-3-319-29843-6, DOI 10.1007/978-3-319-29844-3_12

Crăciun I (2016) Appendix C – Testimonies on the aftermath of November 10th 1940 Vrancea earthquake in the Putna County. In: Văcăreanu, R., Ionescu, C. (Eds) (2016). The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt. Proceedings of the Symposium Commemorating 75 Years from November 10, 1940 Vrancea Earthquake, Springer Natural Hazards Book Series, p. 169-188, eBook ISBN 978-3- 319-29844-3, Hardcover ISBN 978-3-319-29843-6, DOI 10.1007/978-3-319-29844-3_12

Crăciun I, Vacareanu R, Pavel F, Coliba V (2018) On the Ground Motions Spatial Correlation for Vrancea Intermediate-Depth Earthquakes. In: Vacareanu R., Ionescu C. (eds) Seismic Hazard and Risk Assessment. Springer Natural Hazards. Springer, Print ISBN 978-3-319-74723-1, Online ISBN 978-3-319-74724-8

Articole publicate în volumele conferințelor naționale, internaționale și participări la conferințe:

Coliba V, Vacareanu R, Pavel F, Crăciun I (2017) Uniform risk-targeted seismic design maps for Romania, Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering and 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Bucharest, CONSPRESS, p. 249–256

Vacareanu R, Pavel F, Crăciun I, Aldea A, Calotescu I (2017a) Correlation models for strong ground motions from Vrancea intermediate-depth seismic source. 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, January 9th to 13th 2017. Paper no. 2026

Vacareanu R, Pavel F, Coliba V, Crăciun I (2017b) Risk-targeted seismic design maps for Romania, Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering and 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Bucharest, CONSPRESS, p. 453-460

Pavel F, Stanescu D, Vacareanu R, Coliba V, Crăciun I (2018) Life-cycle and resilience analysis of RC buildings in Bucharest, Romania. 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE), Thessaloniki, Greece, 18-21, June 2018

Vacareanu R, Pavel F, Coliba V, Crăciun I (2016) Uniform risk-targeted maps for Romania, ESC2016-336-1, 35th General Assembly of the European Seismological Commission, Trieste, Italia, 4-10 septembrie, 2016

Membru în proiecte de cercetare naționale:

Contractul de cercetare „Harta de risc natural la seisme și inundații a Județului Ialomița. Partea I – Evaluarea hazardului seismic” în perioada octombrie-decembrie 2015. Contract nr. 25 din 28.03.2006 – la Beneficiar – Consiliul Județean Ialomița. Contract nr. 238 din 2006 – la Executant – Universitatea Tehnică de Construcții București

EVALUAREA RISCURILOR DE DEZASTRE LA NIVEL NAȚIONAL (RO-RISK) - Asistență comunitară nerambursabilă a fost asigurată din Fondul Social European (FSE) prin Programul Operațional Capacitate Administrativă (POCA)

Contractul de cercetare „Inginerie seismică de performanță bazată pe comunitate” (CoBPPE) finanțat de Unitatea executivă pentru finanțarea învățământului superior, a cercetării, dezvoltării și inovării (UEFISCDI), proiect nr. PN-II-RU-TE-2014-4-0697

Membru în comitetele de organizare a:

6th National Conference on Earthquake Engineering and 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 14-16, Iunie 2016, București, România

Symposium Commemorating 75 Years from November 10, 1940 Vrancea Earthquake, 10 Noiembrie 2015, București, România

Bibliografie

Baker JW, Cornell CA (2006) Correlation of response spectral values for multicomponent ground motions. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(1): 215-227

Baker JW, Jayaram N (2008) Correlation of spectral acceleration values from NGA Ground Motion Models. Earthquake Spectra, 24(1):299-317

Boore D, Gibbs J, Joyner W, Tinsley J, Ponti D (2003) Estimated Ground Motion From the 1994 Northridge, California, Earthquake at the Site of the Interstate 10 and La Cienega Boulevard Bridge Collapse, West Los Angeles, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(6):2737-2751.

CEN (2004) Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings (Belgium). EN 1998–1:2004

Cimellaro G P, Stefano A, Reinhorn A M (2011) Intra-event spatial correlation of ground motion using L'Aquila earthquake ground motion data. 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Corfu, Greece, May 25-28, 2011. 3091-3108

Crăciun I, Vacareanu R, Pavel F, Coliba V (2018) On the Ground Motions Spatial Correlation for Vrancea Intermediate-Depth Earthquakes. In: Vacareanu R., Ionescu C. (eds) Seismic Hazard and Risk Assessment. Springer Natural Hazards. Springer, Print ISBN 978-3-319-74723-1, Online ISBN 978-3-319-74724-8

Crowley H, Bommer J (2006) Modelling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure. Bulletin of Earthquake Engineering, 4(3):249-273

Delavaud E, Cotton F, Akkar S, Scherbaum F, Danciu L, Beauval C, Drouet S, Douglas J, Basili R, Sandikkaya A, Segou M, Faccioli E, Theodoulidis N (2012) Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. Journal of Seismology, 16(3):451–473

Esposito S (2011) Systemic Seismic Risk Analysis of Gas Distribution Networks. Ph.D. Thesis. University of Naples Federico II. Department of Structural Engineering

Esposito S, Iervolino I (2011) PGA and PGV spatial correlation models based on European multievent datasets. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(5):2532-2541

Esposito S, Iervolino I (2012) Spatial correlation of spectral acceleration in European data. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(6):2781-2788

- Fajfar P (1999) Capacity Spectrum Method based on inelastic demand spectr, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28:979-993
- Fajfar P (2000) A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. Earthquake Spectra, 16:573–592
- Federal Emergency Management Agency (2012) Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. Hazus®–MH 2.1. Technical manual. <http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/24609?id=5120>
- Freeman SA (1998) Development and use of capacity spectrum method. Proceedings of the 6th U.S. National Conference Earthquake Engineering, Seattle
- Goda K, Atkinson G (2009) Probabilistic characterization of spatially correlated response spectra for earthquakes in Japan. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(5):3003-3020
- Goda K, Atkinson G (2010) Intraevent Spatial Correlation of Ground-Motion Parameters Using SK-net Data. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(6):3055-3067
- Goda K, Hong H P (2008a) Spatial correlation of peak ground motions and response spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(1):354-365
- Goda K, Hong H P (2008b) Estimation of seismic loss for spatially distributed buildings. Earthquake Spectra, 24(4):889-910
- Hong HP, Zhang Y, Goda K (2009): Effect of spatial correlation on estimated ground-motion prediction equations. Bulletin of Seismological Society of America, 99(2A), 928-934
- Jayaram N (2010) Probabilistic seismic lifeline risk assessment using efficient sampling and data reduction techniques. A dissertation submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Available online at <http://purl.stanford.edu/hp846fv1725>
- Jayaram N, Baker J W (2010) Considering spatial correlation in mixed-effect regression, and impact on ground motion models. Bulletin of Seismological Society of America, 100(6):3295-3303
- Jayaram N, Baker JW (2009) Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 38(15):1687-1708
- Loth C, Baker JW (2013) A spatial cross-correlation model of spectral accelerations at multiple periods, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(3):397-417
- Lungu D, Demetriu S, Radu C, Coman O (1994) Uniform hazard response spectra for Vrancea earthquakes in Romania. In Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, pp. 365–370
- Lungu D, Cornea T, Craifaleanu I, Aldea A (1995) Seismic zonation of Romania based on uniform hazard response ordinates. In Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation, I:445-452
- Lungu D, Cornea T, Craifaleanu I, Demetriu S (1996) Probabilistic seismic hazard analysis for inelastic structures on soft soils. In Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering
- Lungu D, Aldea A, Arion C (1999) State, insurance and engineering efforts for reduction of seismic risk in Bucharest, United Nations IDNDR Symposium “The RADIUS initiative – Towards Earthquake Safe Cities”, Tihuaná, Mexico, 11-14 October, 18p
- Lungu D, Aldea A, Arion C (2000) Engineering, state and insurance efforts for reduction of seismic risk in Romania. In: Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 2236
- Lungu D, Aldea A, Arion C, Cornea T, Văcăreanu R (2002) Risk-UE, WP1: European distinctive features, inventory database and typology. In: Lungu D, Wenzel F, Mouroux P, Tojo I (eds) Earthquake loss estimation and risk reduction. Contributions from the second international conference on Vrancea earthquakes, Bucharest, Romania, pp 251–271
- Lungu D, Văcăreanu R, Aldea A, Arion C (2000) Advanced Structural Analysis. Editura Conspress, București

- McVerry G H, Rhoades D A, Smith W D (2004) Joint hazard of earthquake shaking at multiple locations. Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004. Paper no. 646
- MDRAP (2013) P100-1/2013 Cod de proiectare seismică: Prevederi pentru clădiri. București, România
- Park J, Bazzurro P, Baker J W (2007) Modeling spatial correlation of ground motion intensity measures for regional seismic hazard and portfolio loss estimations. In: Kanda J, Takada T, Furuta H (Eds) Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering. Taylor & Francis Group, London, pp 1–8
- Pavel F, Văcăreanu R (2017) Spatial correlation of ground motions from Vrancea (Romania) intermediate-depth earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(1), doi: 10.1785/0120160095
- Pavel F, Văcăreanu R, Calotescu I, Sandulescu AM, Arion C, Neagu C (2017a) Impact of spatial correlation of ground motions on seismic damage for residential buildings in Bucharest, Romania. Springer Natural Hazards, 87:1167-1187
- Pavel F, Calotescu I, Văcăreanu R, Sandulescu AM (2017b) Assessment of seismic risk scenarios for Bucharest, Romania. Springer Natural Hazards, 93(1):25-37
- Sokolov V, Wenzel F (2011a) Influence of ground-motion correlation on probabilistic assessments of seismic hazard and loss: sensitivity analysis. Bulletin of Earthquake Engineering, 9(5):1339-1360
- Sokolov V, Wenzel F (2011b) Influence of spatial correlation of strong ground motion on uncertainty in earthquake loss estimation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40(9):993-1009
- Sokolov V, Wenzel F (2013a) Further analysis of the influence of site conditions and earthquake magnitude on ground-motion within-earthquake correlation: analysis of PGA and PGV data from the K-NET and the KiK-net (Japan) networks. Bulletin of Earthquake Engineering, 11(6):1909-1926
- Sokolov V, Wenzel F (2013b) Spatial correlation of ground motions in estimating seismic hazards to civil infrastructure. In: Tesfamariam S, Goda K (Eds) Handbook of seismic risk analysis and management of civil infrastructure systems. Woodhead, Cambridge, pp 57-78
- Sokolov V, Wenzel F (2014) On the modeling of ground-motion field for assessment of multiple-location hazard, damage, and loss: example of estimation of electric network performance during scenario earthquake. Natural Hazards, 74(3):1555-1575
- Sokolov V, Wenzel F, Jean W Y, Wen K L (2010) Uncertainty and spatial correlation of earthquake ground motion in Taiwan. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO), 21(6): 905-921
- Sokolov V, Wenzel F, Wen K-L, Jean W-Y (2012) On the influence of site conditions and earthquake magnitude on ground-motion within-earthquake correlation: analysis of PGA data from TSMIP (Taiwan) network. Bulletin of Earthquake Engineering, 10(5):1401-1429
- Sucuoğlu H, Akkar S (2014) Basic Earthquake Engineering. Springer International Publishing, Switzerland.
- Toma-Danila D, Zulfikar C, Manea EF, Cioflan CO (2015) Improved seismic risk estimation for Bucharest, based on multiple hazard scenarios and analytical methods. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 73:1–16
- Văcăreanu R, Lungu D, Arion C (2009) Capacity curves and fragility functions for representative building types in Bucharest. In: Proceedings of the 4th national conference on earthquake engineering, vol I, pp 183–192
- Văcăreanu R, Lungu D, Arion C (2009) Capacity curves and fragility functions for representative building types in Bucharest. In: Proceedings of the 4th national conference on earthquake engineering, I:183–192
- Văcăreanu R, Pavel F, Crăciun I, Aldea A, Calotescu I (2017) Correlation models for strong ground motions from Vrancea intermediate-depth seismic source. 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, January 9th to 13th 2017. Paper no. 2026.
- Văcăreanu R, Radulian M, Iancovici M, Pavel F, Neagu C (2015b) Fore-arc and back-arc ground motion prediction model for Vrancea intermediate depth seismic source. Journal of Earthquake Engineering, 19, 535-562

- Wagener T, Goda K, Erdik M, Daniell J, Wenzel F (2016) A spatial correlation model of peak ground acceleration and response spectra based on data of the Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85:166-178
- Wang M, Takada T (2005) Macrospatial correlation model of seismic ground motions. *Earthquake Spectra*, 21(4):1137-1156
- Wesson RL, Perkins DM (2001) Spatial correlation of probabilistic earthquake ground motion and loss. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(6):1498-1515
- <http://infp.infp.ro/bigsees/default.htm>