



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

**HĂRȚI DE RISC SEISMIC UNIFORM. DEZVOLTĂRI ȘI
APLICAȚII PENTRU CONDIȚIILE SEISMICE ALE
ROMÂNIEI**

-Rezumat-

Doctorand

ing. Veronica Mihaela Colibă

Conducător științific

Prof. dr. ing. Radu Văcăreanu

BUCUREȘTI

2019

Mulțumiri

În primul rând, aș vrea să-mi arăt sincera recunoștință îndrumătorului meu de doctorat, profesor Radu Văcăreanu, pentru răbdarea, încurajările entuziastice și suportul moral arătat de-a lungul anilor de cercetare, cât și pentru împărtășirea vastelor cunoștințe în domeniu și nu numai. A fost și va fi întotdeauna o onoare să fac parte din prima generație de doctoranzi îndrumați de către dumnealui.

Aș vrea să mulțumesc membrilor comisei de susținere, atât pentru sfaturile practice și ajutoare ce au completat această teză, cât și pentru disponibilitatea de a o citi: conf. dr. ing. Viorel Popa (Universitatea Tehnică de Construcții București), prof. dr. ing. Dan Lungu (Universitatea Tehnică de Construcții București), prof. dr. ing., membru al Academiei Române, Dan Dubină (Universitatea Politehnica Timișoara) și prof. dr. ing. Nicolae Țăranu (Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași).

De asemenea, doresc să-mi exprim recunoștința domnului profesor Alexandru Aldea, fără de care parcursul meu profesional ar fi fost total diferit. Țin să-i mulțumesc pentru inspirația pe care mi-a oferit-o, datorită pasiunii arătate acestui domeniu de studiu, cât și pentru toate sfaturile primite de la acesta pe parcursul celor mulți ani în care mi-a fost profesor.

Colegilor din colectivul Centrului de Cercetare Evaluarea Riscului Seismic: conf. dr. ing. Cristian Arion, dr. ing. Cristi Neagu și s.l. dr. ing. Florin Pavel, le mulțumesc pentru încurajări și pentru tot sprijinul acordat de-a lungul celor trei ani pe care i-am petrecut împreună, cât și colegului de doctorat Ionuț Crăciun, fără de care drumul ar fi fost fără îndoială mai greu și mai plictisitor.

Familiei îi mulțumesc pentru sprijinul acordat în decizia de a urma acest parcurs în viață, cât și pentru suportul moral oferit de-a lungul anilor de studiu, și nu numai.

Totodată, țin să-mi exprim recunoștința Ioanei Teodorescu, pentru toate sfaturile și susținerea pe care mi le-a oferit de-a lungul anilor în care am fost colege și prietene, și pentru tot timpul petrecut împreună.

De asemenea, mulțumesc prietenilor pentru sprijinul moral oferit pe parcursul anilor în care a fost elaborată această lucrare, cât și pentru distragerea de la aceasta atunci când a fost necesar: Alin, Andreea, Cristina, Irina, Luiza, Maria și Raluca.

*București, 2019
Veronica Colibă*

CUPRINS

LISTĂ DE FIGURI	4
LISTĂ DE TABELE ȘI ABREVIERI	5
1. INTRODUCERE	6
1.1. Actualitatea și importanța temei de cercetare	6
1.2. Structura tezei de doctorat	6
2. ASPECTE TEORETICE REZULTATE DIN LITERATURĂ PRIVIND HĂRȚILE DE RISC SEISMIC UNIFORM.....	9
2.1. Elemente generale de obținere a riscului seismic	10
2.2. Rezultate pentru Statele Unite ale Americii, conform Luco et al. (2007, 2015) ..	12
2.3. Rezultate pentru Europa.....	13
2.3.1 Rezultate pentru Franța, conform Douglas et al. (2012)	13
2.3.2 Rezultate preliminare pentru Italia, conform Fiorini et al. (2014).....	16
2.3.3 Rezultate pentru întreg teritoriul Europei, conform Silva et al. (2014).....	18
3. EVALUAREA PROBABILISTICĂ A FRAGILITĂȚII SEISMICE A ELEMENTELOR EXPUSE LA RISC	21
3.1. Elemente de teorie generală	21
3.2. Metode pentru obținerea funcțiilor de fragilitate	24
3.3. Metodologia FRACAS de obținere a funcțiilor de fragilitate.....	25
3.3.1 Sisteme structurale.....	25
3.3.2 Stări limită	26
3.3.3 Curbe de capacitate.....	26
3.3.4 Obținerea funcțiilor de fragilitate	28
4. METODOLOGII DE OBȚINERE A HĂRȚILOR DE RISC SEISMIC UNIFORM. REZULTATE PENTRU TERITORIUL ROMÂNIEI	31
4.1. Analiza probabilistică a hazardului seismic pentru România	32
4.2. Metodologii de obținere a hărților de risc seismic uniform.....	32
4.3. Rezultate pentru România.....	36
4.3.1 Rezultate anterioare pentru România	36
4.3.2 Rezultate actuale pentru România	37
5. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	42
5.1. Contribuții personale.....	43
5.2. Direcții viitoare de cercetare	44
LISTĂ DE PUBLICAȚII ȘI ACTIVITĂȚI EXTRA-CURRICULARE	45
BIBLIOGRAFIE	46

LISTĂ DE FIGURI

Fig. 1.1 Schemă de calcul a riscului seismic.....	7
Fig. 2.1 Hartă de risc seismic uniform, în termeni de PGA [m/s^2] pentru Franța (Douglas et al. 2012).....	15
Fig. 2.2 Hartă de coeficienți de risc pentru Franța (Douglas et al. 2012)	15
Fig. 2.3 Hartă de coeficienți de risc pentru o probabilitate de cedare de 1% în 50 ani și o abatere standard de 0.8 (Fiorini et al. 2014).....	17
Fig. 2.4 Hartă de coeficienți de risc pentru o probabilitate de cedare de 0.05% în 50 ani și o abatere standard de 0.5 (Fiorini et al. 2014).....	18
Fig. 3.1 Curbe pushover pentru clădirile din beton armat și pentru clădirile metalice	27
Fig. 3.2 Spectrele de răspuns ale accelerogramelor folosite	27
Fig. 3.3 Funcții de fragilitate pentru clădirile din beton armat pentru starea limită de serviciu (stânga) și starea limită ultimă (dreapta)	28
Fig. 3.4 Funcții de fragilitate pentru clădirile metalice pentru starea limită de serviciu (stânga) și starea limită ultimă (dreapta).....	29
Fig. 4.1 Raportul dintre hazardul uniform pentru un IMR de 475 ani și riscul uniform având ca țintă o probabilitate de colaps de $2 \cdot 10^{-4}$, $\beta = 0.8$ și fractili 0.1 și 0.001 (Văcăreanu et al. 2017a)...	36
Fig. 4.2 Coeficienți de risc pentru o probabilitate de colaps de $5 \cdot 10^{-3}$ comparată cu o probabilitate de depășire de 10% în 50 ani, respectiv 20% în 50 ani (Colibă et al. 2017)	37
Fig. 4.3 Hartă de hazard seismic uniform, în termeni de PGA, pentru IMR de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani)	38
Fig. 4.4 Hartă de risc seismic uniform, în termeni de PGA, pentru o probabilitate anuală de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 10%/50	38
Fig. 4.5 Raportul dintre valorile pentru o probabilitate anuală de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 10%/50 și PGA pentru o probabilitate de depășire de 10% în 50 ani.....	39
Fig. 4.6 Hartă de hazard seismic uniform, în termeni de PGA, pentru IMR de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani)	39
Fig. 4.7 Hartă de risc seismic uniform, în termeni de PGA, pentru o probabilitate anuală de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 2%/50	40
Fig. 4.8 Raportul dintre valorile pentru o probabilitate anuală de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 2%/50 și PGA pentru o probabilitate de depășire de 2% în 50 ani.....	40
Fig. 4.9 Probabilități de cedare pentru un interval mediu de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani)	41
Fig. 4.10 Parametrul pentru colaps structural (depășire a stării limită ultime) pentru modelul BIGSEES (Pavel et al. 2016).....	41

LISTĂ DE TABELE ȘI ABREVIERI

Tab. 3.1 Caracteristicile înregistrărilor.....	27
Tab. 3.2 Parametrii funcțiilor de fragilitate pentru clădirile din beton armat.....	29
Tab. 3.3 Parametrii funcțiilor de fragilitate pentru structurile metalice	29
Tab. 3.4 Probabilitățile de cedare pentru amplasamentul București, β obținut din FRACAS	29
Tab. 3.5 Probabilitățile de cedare pentru amplasamentul București, $\beta=0.6$	30
Tab. 4.1 Valori PGA pentru orașele selectate pentru care se face comparația.....	35
Tab. 4.2 Coeficienți de risc și valori probabilistice pentru orașele pentru care se face comparația. 35	

ADRS - Acceleration-Displacement Response Spectrum

APHS - Analiza Probabilistică a Hazardului Seismic

ASCE - American Society of Civil Engineers

ATC - Applied Technology Council

BIGSEES - Bridging the Gap between Seismology and Earthquake Engineering

BSSC - Building Seismic Safety Council

EDP - Engineering Demand Parameter

EMS - European macroseismic scale

FEMA - Federal Emergency Management Agency

FRACAS - FRAGility through CAPacity Spectrum assessment

GEO-TER - Géologie Tectonique Environnement et Risques

HAZUS-MH - Multi-hazard Loss Estimation Methodology

IBC - International Building Code

IM - Intensity MEasure

IMR - Interval Mediu de Recurență

INGV - Institute of Geophysics and Volcanology

MCE - Maximum Considered Earthquake

MCER - Risk-targeted Maximum Considered Earthquake

MCS - Mercalli–Cancani–Sieberg scale

MM - Modified Mercalli Intensity scale

NEHRP - National Earthquake Hazards Reduction Program

NIBS - National Institute of Building Science

NSHM - National Seismic Hazard Model

PGA - Peak Ground Acceleration

PGD - Peak Ground Displacement

PGV - Peak Ground Velocity

PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Assessment

SA - Spectral Acceleration

SHARE - Seismic Hazard Harmonization in Europe

Syner-G - Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Building, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain

USGS - United States Geological Survey

1. INTRODUCERE

1.1. Actualitatea și importanța temei de cercetare

În ultimul deceniu metodologia de elaborare a hărților de risc seismic uniform a devenit scopul multor proiecte de cercetare. Lucrări recente includ articolele lui Fiorini et al. (2014) pentru Italia, Silva et al. (2014) pentru Europa, Douglas et al. (2012) pentru Franța, cât și liderul subiectului în cauză Luco et al. (2007) pentru Statele Unite, toate acestea fiind detaliate în capitolele ce urmează. Rezultatele obținute folosind metodologia vizării riscului seismic uniform pentru toate teritoriile enunțate mai sus sunt detaliate în capitolul 2 al prezentei teze.

România este împărțită în zone caracterizate de un hazard seismic uniform al cărui nivel este presupus a fi constant, ce pune în evidență faptul că valorile accelerațiilor de proiectare sunt asociate unui interval mediu de recurență constant (cu o valoare de 225 ani în codul de proiectare seismică în vigoare P100-1/2013 (MDRAP 2013), ce corespunde unei probabilități de depășire de 20% în 50 ani) pe întreg teritoriul României.

Așa cum se menționează în Luco et al. (2007), zonele de hazard seismic uniform nu pot fi asociate cu zone de risc seismic uniform deoarece riscul implică o convoluție între curba de hazard seismic și funcția de fragilitate seismică. Hărțile de hazard seismic uniform folosesc o singură valoare caracteristică din curba de hazard pentru un amplasament dat, pe când evaluarea riscului seismic folosește toată informația conținută în curba de hazard. În concluzie, zonele de hazard uniform nu se suprapun cu zonele de risc uniform.

Prin urmare, apare posibilitatea ca următoarele ediții ale hărților de proiectare să aibă în vedere ipoteza unui risc uniform și să ia în considerare un anume nivel de risc, definit de exemplu prin valoarea acceptată a probabilității anuale de cedare sau de depășire a stării limită de siguranță a vieții.

Având în vedere cele prezentate anterior, subiectul principal al tezei de doctorat este de a dezvolta hărți de risc seismic uniform pentru teritoriul României, ce ar putea fi folosite la proiectarea clădirilor noi și, în cazurile necesare, pentru reabilitarea seismică a celor existente (numărul acestora este destul de ridicat, numai în centrul Bucureștiului fiind raportate în Lungu et al. (2004) 115 clădiri fragile cu regim mediu și mare de înălțime, construite înainte de anul 1940 cu risc ridicat de colaps în cazul unui eveniment seismic puternic).

Această metodologie poate sta la baza viitoarelor coduri de proiectare seismică, în sensul în care o cunoaștere a nivelului de risc seismic la care sunt supuse clădirile ar fi necesară.

1.2. Structura tezei de doctorat

Teza cu titlul „Hărți de risc seismic uniform. Dezvoltări și aplicații pentru condițiile seismice ale României” își propune obținerea unor hărți de risc seismic uniform pentru România, ce ar putea fi ulterior folosite la proiectarea seismică a construcțiilor noi și/sau reabilitarea celor existente. Pe parcursul tezei de doctorat se trec în revistă actualitatea și importanța subiectului în domeniul științific, cât și cum se încadrează acesta în contextul național. Teza de doctorat cuprinde cinci capitole și trei anexe, ce vor fi prezentate pe scurt în continuare.

În primul capitol al tezei se prezintă introducerea în subiectul lucrării, detalii despre metodologia folosită și rezultatele obținute în studii anterioare pe același subiect, cât și descrierea pe scurt a ceea ce urmează a fi expus în fiecare capitol din teză.

În cel de-al doilea capitol, intitulat „Aspecte teoretice și principale rezultate din literatură privind analizele de risc seismic”, s-au descris metodologia utilizată și pașii de parcurs pentru a dezvolta hărțile de risc seismic uniform, începând cu obținerea de curbe de hazard pentru diferite amplasamente din teritoriul analizat, trecând prin dezvoltarea funcțiilor de fragilitate pentru diferite tipuri de structuri (în cazul de față, structuri din beton armat și structuri metalice) și culminând cu produsul de convoluție a celor două cantități menționate pentru a evalua riscul seismic la care sunt supuse clădirile proiectate în zonele din teritoriul respectiv. Calculul urmează schema prezentată în Fig. 1.1, astfel:

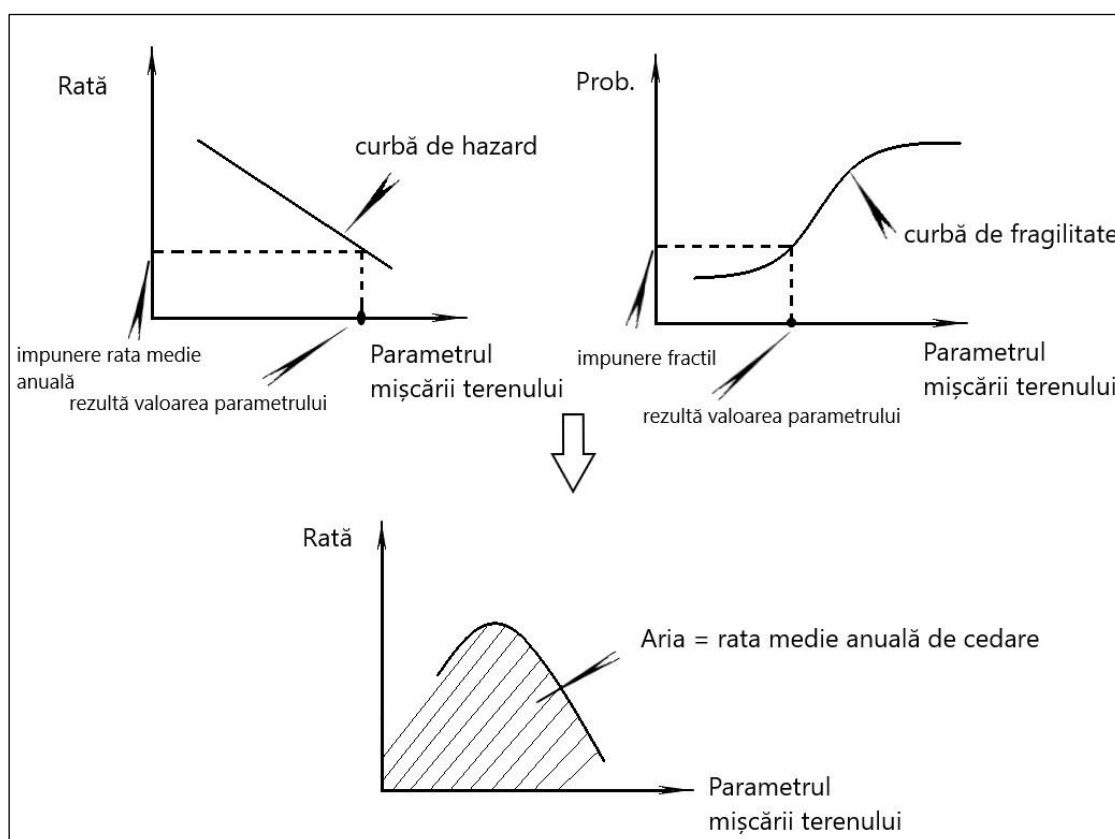


Fig. 1.1 Schemă de calcul a riscului seismic

Tot în acest capitol sunt descrise în detaliu și rezultatele unor studii anterioare, dar recente privind obținerea hărților de risc seismic uniform. Pentru prima dată subiectul a fost atins în articolul „Risk-Targeted versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States” publicat de Luco et al. (2007), unde s-a descris metodologia utilizată pentru determinarea riscului seismic la care sunt supuse clădirile. Metodologia a stat la baza actualizării prevederilor din NEHRP 2009 (BSSC, 2009), unde s-au folosit modelele de hazard dezvoltate de către USGS, dar având în vedere cutremurul maxim ce are ca țintă riscul seismic uniform (notat MCE_R), prevederile anterioare folosind hărți obținute pe baza conceptului de spectru de răspuns al accelerațiilor fără a lua în considerare riscul.

Următorul studiu care a abordat subiectul a fost dezvoltat de către Douglas et al. (2012), pentru teritoriul continental al Franței, descris în articolul intitulat „Risk targeted seismic design maps for mainland France”. Scopul studiului a fost de a obține hărți de risc seismic uniform pentru Franța continentală (adică excluzând departamentele și teritoriile

extra-continentale) pe baza analizelor de hazard efectuate în Martin et al. (2002) și totodată, de a observa dacă valorile accelerațiilor de vârf ale terenului ar suferi mari schimbări prin abordarea riscului uniform.

Pentru Italia, în studiul Fiorini et al. (2014), se face o comparație între procedura descrisă de Luco et al. (2007) și cea propusă de Douglas et al. (2012) și se aplică aceste proceduri pentru teritoriul Italiei.

Pentru întreg teritoriul Europei, în Silva et al. (2014 și 2016) s-au obținut valori ale accelerației de vârf ale terenului asociate riscului seismic uniform, bazat pe rezultatele analizei de hazard obținute în cadrul proiectului SHARE (www.shareeu.org) și s-au calculat hărți de risc seismic uniform, având ca țintă o probabilitate anuală de cedare de 10^{-5} . Diferența dintre cele două studii este introdusă de valoarea abaterii standarde a funcției de fragilitate, în Silva et al. (2014) s-a folosit o valoare de 0.5 (la fel ca în Douglas et al. 2012), în timp ce în Silva et al. (2016) aceasta a fost mărită la 0.6, din cauza faptului că, așa cum e precizat în FEMA (2013), în ciuda progreselor recente în domeniul modelării structurale, încă există limitări în abilitatea de a evalua cu suficientă acuratețe capacitatea clădirilor de a rezista la un eveniment seismic.

În al treilea capitol se prezintă teoretic evaluarea probabilistică a fragilității seismice a elementelor, metodele de a obține funcții de fragilitate pentru diferite structuri și elemente generale ce descriu funcțiile de fragilitate și în ce măsură pot fi folosite la evaluarea riscului seismic. Tot aici se descrie și metodologia FRACAS, utilizată în această lucrare la obținerea funcțiilor de fragilitate. Acest capitol cuprinde și tipologiile de structuri ce au fost folosite în studiul fragilității seismice, descrierea nivelurilor de performanță și stările limită utilizate, precum și diversele măsuri de intensitate a mișcării terenului în funcție de care pot fi determinate funcțiile de fragilitate, cu precădere accelerația de vârf a terenului PGA (ce a fost folosită în acest studiu), împreună cu incertitudinile apărute de-a lungul studiului acestora.

Partea finală de cercetare și cel de-al patrulea capitol al tezei, intitulat „Metodologii de obținere a hărților de risc seismic uniform” prezintă rezultatele analizei probabilistice a hazardului seismic pentru România, obținute în cel mai recent studiu elaborat în cadrul proiectului BIGSEES (<http://infp.infp.ro/bigsees/default.htm>). De asemenea, acest capitol cuprinde metodologia obținerii hărților de risc seismic uniform pentru teritoriul României, cât și interpretarea rezultatelor de la capitolele precedente în vederea realizării hărților. Tot în această parte sunt descrise alegerile făcute în ceea ce privește probabilitatea anuală de cedare acceptată, și variabilitatea funcțiilor de fragilitate.

În capitolul cinci al prezentei teze se descriu concluziile fiecărui capitol, precum și cele finale. Tot aici sunt raportate și contribuțiile personale și originale ale autorului, cât și propunerea unor alte viitoare teme de cercetare pe acest subiect. Totodată, lista publicațiilor în care au fost diseminate rezultatele obținute este prezentată la sfârșitul capitolului.

Prezenta teză cuprinde și trei anexe, în Anexa 1 se găsesc armările grinzilor clădirilor din beton utilizate în studiu, cea de a doua cuprinde codul Matlab ce a fost scris pentru determinarea riscului uniform, iar Anexa 3 cuprinde rezultatele obținute în urma iterațiilor riscului seismic, pentru toate amplasamentele (anexe care sunt prezentate în varianta extinsă a tezei).

2. ASPECTE TEORETICE REZULTATE DIN LITERATURĂ PRIVIND HĂRȚILE DE RISC SEISMIC UNIFORM

Conform raportului „Methodology for Developing Seismic Fragilities” (1994), prima atestare formală a aplicării metodei estimării riscului seismic a apărut în studiul WASH-1400, publicat în 1975, unde frecvența anuală de producere a unei avarii a miezului unui reactor nuclear, cauzată de un eveniment seismic, a fost estimată ca fiind 10^{-5} . La sfârșitul acestui studiu, s-a ajuns la concluzia că riscul producerii accidentelor ce afectează reactoarele nucleare nu poate fi pus, în principal, pe seama cutremurelor. Potrivit aceluiași raport, la sfârșitul anilor 1970, un alt studiu a fost elaborat, folosind metoda estimării riscului seismic, la reactorul nuclear Diablo Canyon Nuclear Power Plant, unde însă contribuțiile seismelor au fost estimate a fi mai mari.

În căutarea unei uniformități geografice în ceea ce privește probabilitatea de cedare, codul american pentru proiectarea centralelor nucleare ASCE Standard 43-05 (ASCE 2005b) a definit un factor care, atunci când este aplicat valorii parametrului de mișcare al terenului la o anumită probabilitate anuală de depășire (ex. 10^{-4} pe an), rezultă într-o probabilitate de cedare pentru structura respectivă (Luco et al. 2007). Acest factor reprezintă în totalitate capacitatea structurală și este descris ca fiind o funcție a pantei curbei de hazard exprimată în valori spectrale de răspuns pentru un anumit amplasament și o perioadă de vibrație specifică (Luco et al. 2007).

La nivel internațional această abordare a fost deja implementată de către Statele Unite ale Americii începând cu anul 2009, în NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (pe scurt “2009 NEHRP Provisions”; BSSC 2009); ulterior, acest normativ a suferit mai multe schimbări și actualizări.

În ceea ce privește Europa, prima încercare de a obține hărți de risc seismic uniform a apărut în „Risk-targeted seismic design maps for mainland France” (Douglas et al. 2012), unde s-a aplicat metoda estimării riscului seismic pentru actualizarea hărților de proiectare din anexa națională a Eurocodului 8 (EN 1998-1, CEN 2004), cu scopul de a investiga eventuala necesitate de schimbări majore în ceea ce privește valoarea de proiectare a accelerației terenului aplicând această metodă.

Conform Douglas et al. (2012), scopul studiului a fost să se prezinte rezultatele implementării abordării bazate pe riscul uniform aplicând metodele din Luco et al. (2007) pentru teritoriul Franței (excepție făcând regiunile și teritoriile aflate în afara continentului european), folosind modelul de hazard seismic dezvoltat de Martin et al. (2002) împreună cu valorile accelerației de proiectare (PGA), pentru a defini spectrul impus de codul seismic de proiectare francez. Totodată, este stipulat faptul că acest studiu privește mai degrabă clădirile noi, decât cele existente (Douglas et al. 2012). Concluzia la care s-a ajuns pentru teritoriul Franței continentale a fost că, în cazul în care se adoptă valori rezonabile pentru nivelul de risc acceptat de către societate, hărțile obținute nu prezintă diferențe considerabile față de cele în vigoare, bazate pe un nivel de hazard uniform.

Aceste hărți se obțin prin cuantificarea valorii accelerației orizontale a terenului ce este asociată unui nivel de risc acceptabil. Riscul efectiv se obține prin produsul de convoluție dintre curbele de hazard obținute printr-o analiză probabilistă și curbele de fragilitate exprimând probabilitatea ca o anumită structură să se găsească într-o stare de avariere, sau

să o depășească. Valoarea accelerației orizontale a terenului corespunzătoare unui nivel de risc predefinit se obține iterativ. Această metodă a fost deja implementată în codurile de proiectare din Statele Unite, a fost încercată în Franța, Italia și la nivel european, iar la nivel național au fost tatonate.

Dezvoltarea hărților de risc seismic uniform se bazează, în principal, pe trei parametri: curbele de hazard obținute printr-o analiză probabilistă pentru fiecare amplasament de pe hartă, curbe de fragilitate ce arată probabilitatea ca o structură (proiectată conform codului de proiectare seismică în vigoare) să fie într-o anumită stare de avariere sau să o depășească, pentru un nivel de hazard dat, și cunoașterea nivelului de risc acceptat de populație și autoritățile centrale cu competențe decizionale în această privință.

O problemă este ridicată de fondul construit pentru care se utilizează funcțiile de fragilitate. În mod ideal, curbele de fragilitate ar trebui să fie bazate pe codul de proiectare în vigoare (de ex. P100-1/2013 (MDRAP 2013) pentru România) și ar trebui să ia în considerare toate tipurile de clădiri acoperite de cod (clădiri de beton armat, structuri metalice, de zidărie și de lemn), utilizând o curbă medie care să ia în considerare această variabilitate epistemică.

Hărțile de proiectare seismică având ca țintă riscul uniform ar conduce la o uniformitate pe întreg teritoriul țării în ceea ce privește probabilitatea ca o structură să se găsească într-o anumită stare de avariere, ceea ce le face un instrument potrivit pentru reducerea riscului seismic.

2.1. Elemente generale de obținere a riscului seismic

▪ Curbe de hazard

Rezultatele unei analize probabilistice a hazardului seismic pot fi exprimate prin diferite metode. Toate acestea necesită calcule probabilistice pentru a combina incertitudinile de mărime, amplasament, rată anuală și efecte pentru estimarea hazardului. O metodologie comună este aceea de obținere a curbelor de hazard, ce indică probabilitatea anuală de depășire a diferitelor valori ale unui parametru de mișcare a terenului (Kramer 1996).

Curbele de hazard seismic pot fi obținute pentru surse seismice individuale și apoi combinate pentru a exprima hazardul agregat într-un amplasament specific. Probabilitatea de depășire a unui anumit prag y^* , a unui parametru de mișcare a terenului Y , este calculată pentru un cutremur posibil, într-un amplasament particular și apoi înmulțit cu probabilitatea ca acel cutremur de magnitudine și poziție date să se producă. Procesul este repetat pentru toate magnitudinile, distanțele sursă-amplasament și sursele posibile, cu probabilitățile fiecăruia asociate, și însumate în final.

▪ Funcții de fragilitate

Cea mai importantă ipoteză în evaluarea vulnerabilității clădirilor, a infrastructurilor și a rețelelor este aceea că structurile și componentele acestora, având caracteristici structurale de același fel și fiind în aceleași condiții geotehnice, sunt așteptate a avea același răspuns în cazul unui eveniment seismic. În acest context, avariile seismice sunt direct legate de proprietățile structurale ale elementelor supuse la risc. Din acest motiv, taxonomia fondului construit este un element fundamental în definirea unui sistem structural. Geometria, proprietățile materialelor, morfologia aspectului exterior, vârsta, nivelul de proiectare

seismică, ancorarea echipamentelor, condițiile de teren și detaliile de fundație sunt printre cei mai uzuali parametri în ceea ce privește tipologia. Clădirile de beton armat, cele de zidărie, monumentele, podurile, rețelele de utilități, tunelurile și căile ferate, au setul lor specific de tipologii (Pitilakis et al. 2014).

Cunoașterea inventarului fondului construit într-o anumită regiune și capacitatea de a crea tipologii structurale sunt printre principalele provocări atunci când se vrea evaluarea generală a riscului seismic pentru un oraș (fiind aproape imposibil de evaluat la nivel de clădire). Este absolut necesară clasificarea clădirilor și a celorlalte elemente expuse la risc, clasificare pe cât posibil de omogenă în tipologii având mai mult sau mai puțin aceleași caracteristici ale răspunsului în caz de mișcări seismice. Astfel, obținerea funcțiilor de fragilitate potrivite pentru orice tip de structură depinde în întregime de crearea unei tipologii rezonabile ce poate clasifica diferitele tipuri de structuri și infrastructuri în orice fel de sistem expus la risc seismic (Pitilakis et al. 2014).

În metodologiile de evaluare a riscului seismic, capacitatea unei structuri este definită prin praguri de avariere numite stări limită. O stare limită este definită ca granița dintre două stări diferite de afectare, des întâlnite sub numele de stări de avariere. Diferite criterii au fost propuse depinzând de tipologiile elementelor supuse la risc și de metoda folosită pentru obținerea funcțiilor de fragilitate. Cea mai comună metodă de a defini consecințele unui cutremur este clasificarea în funcție de următoarele stări de avariere: neavariată, minoră, moderată, extinsă și completă.

▪ Expunere seismică

Expunerea clădirilor este considerată a fi totală.

În ceea ce privește populația expusă, există numeroase cauze pentru pierderea vieților omenești în caz de cutremur: prăbușirea totală sau parțială a clădirilor, a podurilor și a altor construcții, etc. Apoi, există cele legate de fenomenele asociate provocate de cutremure: alunecări de teren, lichefierea terenului, tsunami sau incendii.

În general, se poate estima, cu o anumită marjă de eroare și în special pentru cutremurele foarte mari, câți oameni și-au pierdut viața, folosind calcule bazate pe numărul de clădiri prăbușite sau sever avariate. Mai multe date de intrare sunt necesare:

- numărul de locatari dintr-o anumită clădire;
- data și ora evenimentului seismic;
- numărul ieșirilor de urgență ale clădirii;
- posibilitatea de deces chiar în cazul în care primul ajutor a fost deja acordat etc.

▪ Calcul iterativ al riscului seismic

Pentru a putea determina probabilitatea anuală de cedare, este necesară folosirea unui proces iterativ de estimare a valorilor mișcărilor terenului ce corespund pragului impus de vizează riscul seismic țintă. În acest raport a fost folosită metoda prezentată în Douglas et al. (2013), ce este bazată pe metodologia din Kennedy (2011) și este exprimată prin convoluția hazardului seismic cu funcțiile de fragilitate cu oricare dintre următoarele două relații:

$$P_F = \int_0^\infty H_A(a) \cdot \frac{dP_{F|a}}{da} da \quad 2.1$$

$$P_F = - \int_0^\infty P_{F|a} \cdot \frac{dH_A(a)}{da} da \quad 2.2$$

unde $P_{F|a}$ este funcția de fragilitate (probabilitate de cedare condiționată de parametrul de intensitate a mișcării terenului a), $H_A(a)$ este curba de hazard seismic (frecvența de depășire a unui parametru de intensitate a mișcării terenului a).

În teza de doctorat a fost folosită prima relație în care se derivează funcția de fragilitate, deoarece, așa cum a fost precizat în Douglas et al. (2013), hazardul este, în general, calculat pentru un număr finit de valori de intensitate a mișcării pământului (de exemplu PGA) rezultând într-o derivată mai puțin exactă decât cea a unei funcții de fragilitate, care este, în general, definită de o expresie analitică.

2.2. Rezultate pentru Statele Unite ale Americii, conform Luco et al. (2007, 2015)

Conform Luco et al. (2015), începând cu codul NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (pe scurt “NEHRP Provisions”; BSSC 1997a) apărut în anul 1997, hărțile de hazard seismic folosite la proiectarea clădirilor noi și a altor structuri s-au bazat pe modelele de hazard NSHM (National Seismic Hazard Model) obținute de către USGS (United States Geological Survey). Hărțile ce cuprind cutremurele maxime considerate (MCE) pentru teritoriul Statelor Unite în prevederile din 1997 au fost bazate pe modelele de hazard din 1996 și au fost adoptate de către ASCE (American Society of Civil Engineers) în 1998 în standardul Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (cunoscut ca și ASCE 7 Standard; ASCE 1998) și de către IBC (International Building Code, ICC2000) în 2000. Hărțile din aceste coduri stau la baza celor folosite în reabilitarea construcțiilor existente (e.g., ASCE 2013) și altele (ICC 2014, ICC2015).

Însă, începând cu prevederile NEHRP 2009, modelele de hazard ale USGS-ului au fost folosite pentru a obține hărți ce consideră cutremurul maxim ce are ca țintă riscul seismic (MCE_R , folosite la proiectarea clădirilor noi). Cerința de proiectare este definită în funcție de spectrul de răspuns al accelerațiilor la perioade de 0.2 secunde și 1 secundă, notate cu SS și $S1$. Valorile de proiectare sunt luate ca minimele dintre rezultatele deterministe și probabiliste. Valorile probabiliste sunt obținute din curbele de hazard seismic exprimând frecvența medie anuală de depășire a unui anumit nivel de mișcare a terenului, ce constituie rezultatul primar al unui model de hazard seismic (NSHM). Cele deterministe sunt calculate din modelele de surse seismice și propagări ale mișcărilor terenului ce stau la baza unui NSHM (Luco et al. 2015)

▪ Calcul al probabilității de cedare

Așa cum a mai fost precizat, proiectarea bazată pe hazard seismic uniform nu rezultă în probabilități de cedare egale pentru toate structurile atunci când se cunoaște faptul că există incertitudini în ceea ce privește capacitatea seismică a acestora. Există diverse motive pentru care capacitatea asociată stării limită de evitare a colapsului a unei structuri este incertă. Unul dintre acestea se referă la accelerația spectrală asociată mișcării terenului la care o structură poate rezista fără să cedeze, ce depinde, în general, de alte caracteristici ale mișcării terenului, de exemplu de istoria în timp a accelerațiilor. În timp ce forma de undă este incertă la fel va fi și accelerația spectrală la care clădirea poate rezista fără să cedeze. Această formă de incertitudine poartă numele de variabilitate intra-eveniment (de la înregistrare la înregistrare) (Luco et al. 2007).

Un alt motiv este faptul că, deși pot fi cunoscute toate celelalte caracteristici de mișcare a terenului, accelerația spectrală asociată clădirii va depinde de detaliile de construcție. Acestea sunt incerte din cauza variabilității asociate cu calitatea construcției, proprietățile mecanice ale materialelor, caracteristicile geometrice, aportul componentelor nestructurale și altele. Faptul că există o sursă de incertitudini venită din insuficienta cunoaștere și lipsa informațiilor (incertitudini epistemice) este și dificil de cuantificat. În orice caz, acestea pot influența puternic incertitudinea totală legată de capacitatea asociată stării limită de evitare a colapsului (Luco et al. 2007).

Conform Luco et al. (2007), este totuși important de precizat faptul că probabilitatea de cedare rezultată din producerea unui cutremur maxim considerat este, conceptual și numeric, diferită de probabilitatea de cedare a unei structuri în 50 ani (sau orice alt număr de ani). Prima se referă la probabilitatea de cedare a unei structuri atunci când este supusă la cutremurul maxim considerat, iar cea de a doua se referă la probabilitatea de cedare pe o perioadă de 50 ani sau orice alt număr de ani, fiind însă dependentă de hazardul seismic în amplasamentul considerat. În cazul Statelor Unite, cutremurul maxim considerat (MCE) este definit prin accelerația spectrală la perioada de vibrație fundamentală a clădirii, notată cu S_{MT} în ATC-63. Cu toate că în codul NEHRP există doar valori pentru perioadele de 0.2 și 1 secundă, pentru celelalte perioade de timp acestea pot fi obținute utilizând forma spectrului de răspuns de proiectare existent în codul menționat (e.g., pp. 38-39 din NEHRP Provisions 2003).

▪ Exemple de probabilități de cedare

Folosind integrala de convoluție detaliată în subcapitolul precedent, în acest studiu se prezintă două exemple de calcul pentru probabilitatea de cedare în 50 ani a unor structuri proiectate la un cutremur maxim considerat, urmând norma NEHRP din 2003. În ambele exemple, perioada fundamentală de vibrație a structurii este de 0.2 secunde. Primul exemplu este pentru San Francisco și cel de al doilea pentru un amplasament din regiunea metropolitană a orașului Memphis. Accelerațiile spectrale (la perioada de vibrație de 0.2 secunde) pentru cele două amplasamente sunt 1.38 g, respectiv 1.29 g, distribuțiile lor fiind parametrizate de valoarea fractil de 10% și o abatere standard de 0.8. Cu toate că aceste valori sunt similare, și mai ales că probabilitățile lor de depășire (2% în 50 ani) sunt egale, probabilitățile de cedare corespunzătoare celor două amplasamente prezintă diferențe semnificative (Luco et al. 2007).

2.3. Rezultate pentru Europa

2.3.1 Rezultate pentru Franța, conform Douglas et al. (2012)

În prezent, harta de zonare seismică a Franței se bazează pe conceptul de hazard uniform, adică accelerațiile sunt obținute pentru un interval mediu de recurență propus, ce este constant pe întreg teritoriul țării. Intervalul mediu de recurență considerat este de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani).

Scopul studiului făcut de Douglas et al. (2012) de a obține hărți de risc seismic uniform se bazează pe procedura inițiată de Luco et al. (2007), aplicată Franței continentale (adică fără a considera departamentele și teritoriile extra-continentale), și folosind analizele de hazard efectuate de către Martin et al. (2002). În lucrare se investighează dacă recomandările

curente în ceea ce privește valorile PGA folosite în prezent ar presupune schimbări considerabile în cazul optării pentru metodologia de obținere a riscului seismic uniform.

- Hărți de hazard seismic

În 2002, GEO-TER (Géologie Tectonique Environnement et Risques) a efectuat o analiză probabilistă a hazardului seismic, bazată pe o metodologie clasică Cornell – McGuire, ce s-a soldat cu hărți de accelerații de vârf ale terenului (PGA) pentru intervale medii de recurență de 100, 475, 975 și 1975 ani, toate acestea fiind detaliate în Martin et al. (2002).

Aceste două studii au fost folosite ca date de intrare pentru analiza de risc. Deoarece hărțile obținute din Martin et al. (2002) nu au fost suficiente pentru studiul lui Douglas et al. (2012), hazardul a fost recalculat, rezultatele fiind destul de apropiate de cele din primul studiu menționat, cu mici excepții cauzate de folosirea a două versiuni diferite ale aceluiași program de calcul de risc seismic.

- Curbe de fragilitate

Valoarea abaterii standard β a repartiției lognormale de probabilitate are un efect important asupra funcțiilor de fragilitate, deoarece influențează considerabil probabilitatea de cedare X pentru o valoare de vârf a accelerației de proiectare PGA cu un IMR (e.g. 475 ani, asociat unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani). Atunci când abaterea standard β are valori mari (e.g. 0.8) și probabilitatea anuală de cedare țintă pentru un PGA dat, X , are valori mici, curba de fragilitate asociată este nerealistă, în sensul în care prezice probabilități de cedare reduse chiar și pentru un nivel de hazard seismic ridicat (Douglas et al. 2012).

Valoarea abaterii standard folosită în cele din urmă în acest studiu a fost de 0.5, valoare ce este relativ în concordanță cu prevederile codului ASCE 7-10 (Standard ASCE/SEI 7-10 2010), unde se stipulează că aceasta ar trebui să fie de 0.6. Chiar folosind 0.5 pentru abaterea standard, valoarea lui μ (adică PGA-ul ce corespunde unei probabilități de cedare de 0.5 pentru curba de fragilitate în zona considerată) pentru o regiune cu o activitate seismică medie duce la rezultate nerealiste atunci când este folosită o valoare mică pentru probabilitatea de cedare la valoarea de proiectare, X , motiv pentru care a fost folosită o valoare mare pentru X (de ordinul 10^{-5}).

- Probabilitate țintă anuală de cedare, Y

Bazându-se pe recenzii din literatură și coduri de proiectare, valoarea adoptată pentru probabilitatea anuală de cedare ce se dorește a fi atinsă este de 10^{-5} . Această valoare arată că funcțiile de fragilitate pentru valoarea abaterii standard β de 0.5 nu implică structuri nerealist de rezistente, valorile pentru μ fiind destul de mici (Douglas et al. 2012).

- Probabilitate de cedare la valoarea de proiectare PGA, notată cu X

Accelerația de vârf PGA de proiectare ce a fost folosită la definirea funcțiilor de fragilitate a fost luată din hărțile de zonare din anexa națională pentru Franța, și este bazată pe o analiză a hazardului seismic efectuată pentru un interval mediu de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani). Din această cauză, nu s-au putut folosi aceleași valori pentru X ca cele din studiul lui Luco et al. (2007), ce erau bazate pe un interval mediu de recurență de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani). S-a admis valoarea de 10^{-5} pentru X , la un IMR de 475 (probabilitate de depășire de 10% în 50 ani) deoarece asta duce la modificări minore în ceea ce privește hărțile de

proiectare pentru cele mai multe locuri din Franța continentală. Asta înseamnă că aplicarea nivelurilor de proiectare definite de Eurocod 8 ar duce la clădiri cu probabilități foarte mici de cedare atunci când sunt supuse la acțiunea seismică de proiectare.

▪ Hărți de risc seismic uniform pentru Franța continentală

Metodologia de evaluare a riscului pentru o valoare țintă (sau admisă) a acestuia poate să producă hărți de proiectare cu un nivel de risc constant, prin fixarea lui X , Y și β , pentru a calcula accelerațiile ce constrâng funcțiile de fragilitate. Deci, dacă probabilitatea anuală de cedare, pentru valoarea accelerației de vârf de proiectare presupusă, este mai mare decât valoarea țintă, atunci accelerația de proiectare ar trebui mărită (astfel făcând structurile să fie mai rezistente) și viceversa.

Ca exemplu, harta de proiectare pentru Franța continentală obținută, presupunând că $X=10^{-5}$, $Y=10^{-5}$ și $\beta = 0.5$ este ilustrată în Fig. 2.1 (Douglas et al. 2012):

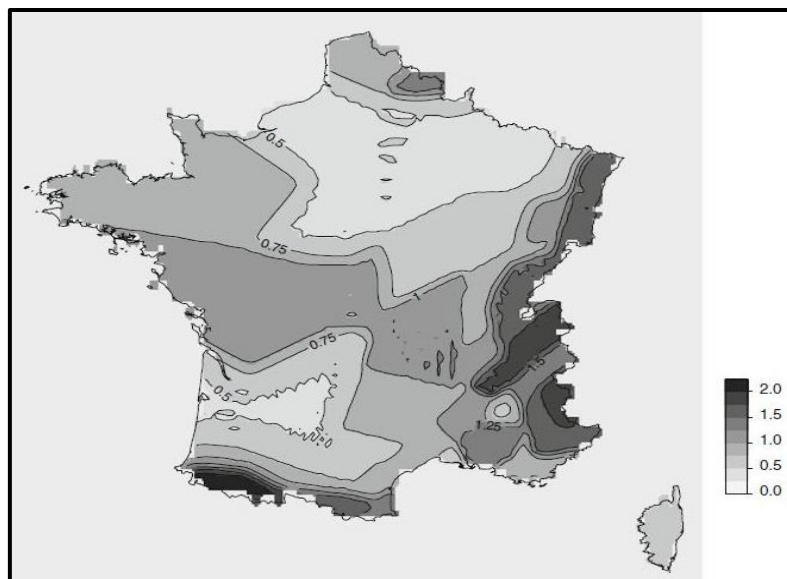


Fig. 2.1 Hartă de risc seismic uniform, în termeni de PGA [m/s^2] pentru Franța (Douglas et al. 2012)

Hartă de coeficienți de risc (Douglas et al. 2012):

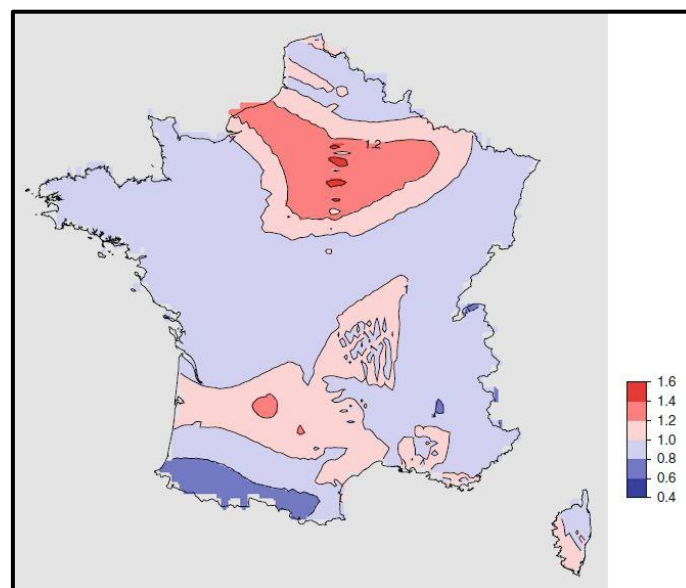


Fig. 2.2 Hartă de coeficienți de risc pentru Franța (Douglas et al. 2012)

2.3.2 Rezultate preliminare pentru Italia, conform Fiorini et al. (2014)

În prezent, în Italia, hărțile de proiectare seismică urmează metodologia clasică ce necesită ca proiectarea să fie făcută pentru niveluri de mișcare a terenului ce corespund unui interval mediu de recurență pe tot teritoriul țării. Însă, această metodă nu asigură un nivel de siguranță uniform pentru toate clădirile.

Deoarece în prezent probabilitatea de cedare a clădirilor, proiectate conform normelor de proiectare seismică italiene, nu este cunoscută, Fiorini et al. (2014) a făcut o comparație între procedura descrisă de Luco et al. (2007) și cea propusă de Douglas et al. (2012). În prima, se presupune că structurile au o probabilitate de cedare în 50 de ani de 10% atunci când sunt supuse nivelului de hazard asociat intervalului mediu de recurență de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani), și cea de a doua presupune o probabilitate anuală de colaps de 10^{-5} pentru valori de proiectare cu un IMR de 475 ani (Fiorini et al. 2014).

- Funcții de fragilitate pentru fondul construit italian

Codul italian de proiectare în vigoare necesită definirea valorilor de proiectare ale mișcărilor terenului considerând hazardul seismic în amplasament, importanța unei structuri, durata de viață, starea limită de avariere considerată etc. În special, pentru starea limită ultimă, codul impune proiectarea clădirilor la acțiuni seismice având 5% probabilitate de depășire în 50 ani, adică un interval mediu de recurență de 975 de ani (Fiorini et al. 2014).

În primă fază, parametrii mișcărilor terenului ce vizează evaluarea riscul seismic au fost estimați folosind parametri propuși de Luco et al. (2007) pentru Statele Unite ale Americii. Capacitatea de colaps este reprezentată ca o variabilă aleatoare având o repartiție log-normală, cu o abatere standard de 0.8 și cu valoarea PGA de proiectare pentru un IMR de 2475 ani (probabilitate de depășire de 2% în 50 ani) luată ca fractil de 10%. În partea a doua, valorile pentru aceiași parametri au fost considerate de 0.5, respectiv 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani), valori acceptate de Silva et al. (2014) pe baza estimărilor statistice din analiza mai multor curbe de fragilitate pentru clădirile din fondul construit european (Fiorini et al. 2014).

Parametrii folosiți au fost cei definiți de Douglas et al. (2012), pentru a obține curbele de capacitate pentru un set de orașe din Italia cu niveluri diferite de seismicitate. Folosind aceste curbe a fost calculată probabilitatea de cedare corespunzătoare valorilor PGA pentru intervalul mediu de recurență de 975 ani. Valoarea medie ale acestor probabilități a fost de ordinul $8 \cdot 10^{-5}$, ce a fost rotunjit la 10^{-4} și adoptată în acest studiu pentru a parametriza curbele de capacitate obținute cu metoda Douglas et al. (2012). Apoi, același lucru a fost făcut și pentru a estima parametrii curbilor de capacitate conform metodei Luco et al. (2007), în acest caz probabilitatea de cedare fiind de 5% (Fiorini et al. 2014).

- Curbe de hazard seismic

Curbele de hazard utilizate au fost obținute de către Institutul de Geofizică și Vulcanologie (INGV, Italia), pentru 9 intervale medii de recurență, de la 30 la 2475 ani, cu accelerații de vârf clasate între 0.01g și 0.6g pe tot teritoriul țării. Partea care contribuie cel mai mult la probabilitatea de cedare se găsește între valoarea de proiectare a mișcării terenului și mediana curbei de capacitate, însă curbele de hazard folosite nu dispun de mediană, fapt pentru care o extrapolare a fost necesară, deși nu recomandată. Această extrapolare a fost

făcută până la o valoare de 10^{-5} pentru frecvența anuală de depășire și până la o valoare de PGA de 0.01 (Fiorini et al. 2014).

Pentru a testa eroarea introdusă de extrapolarea calculului probabilității de cedare, s-au folosit curbele de hazard elaborate în cadrul proiectului european SHARE (www.shareeu.org), ce sunt calculate pentru un interval mai mare al frecvenței anuale de depășire. Calculele au fost făcute folosind două curbe de capacitate cu două probabilități de cedare țintă, una parametrizată cu o abatere standard de 0.8 și o probabilitate de depășire de 1% în 50 ani, iar cea de a doua cu 0.5, respectiv 0.05% în 50 ani. Pentru a trage o concluzie în ceea ce privește metodologia vizării riscului seismic, se folosește raportul dintre valorile mișcării terenului definite de codurile de proiectare în vigoare pentru Italia și cele calculate pentru a asigura un risc uniform pe întreg teritoriul țării, raport ce exprimă coeficientul de risc (Fiorini et al. 2014).

▪ Hărți de coeficienți de risc

Rezultatele obținute sub formă de hărți de coeficienți de risc, generate prin cele două metode pentru a asigura o uniformitate în ceea ce privește probabilitățile de cedare pe întreg teritoriul italian, sunt ilustrate în Fig. 2.3 și Fig. 2.4.

Harta coeficienților de risc obținută prin metoda Luco et al. (2007) arată majoritatea valorilor ca fiind mai mari decât 1, ceea ce înseamnă că folosind această curbă de capacitate, probabilitățile de cedare obținute vor fi mai mari de 1% în 50 ani în mare parte din teritoriul Italiei. Astfel, valorile accelerației de vârf ar trebui mărite pentru a putea atinge probabilitatea de cedare propusă inițial.

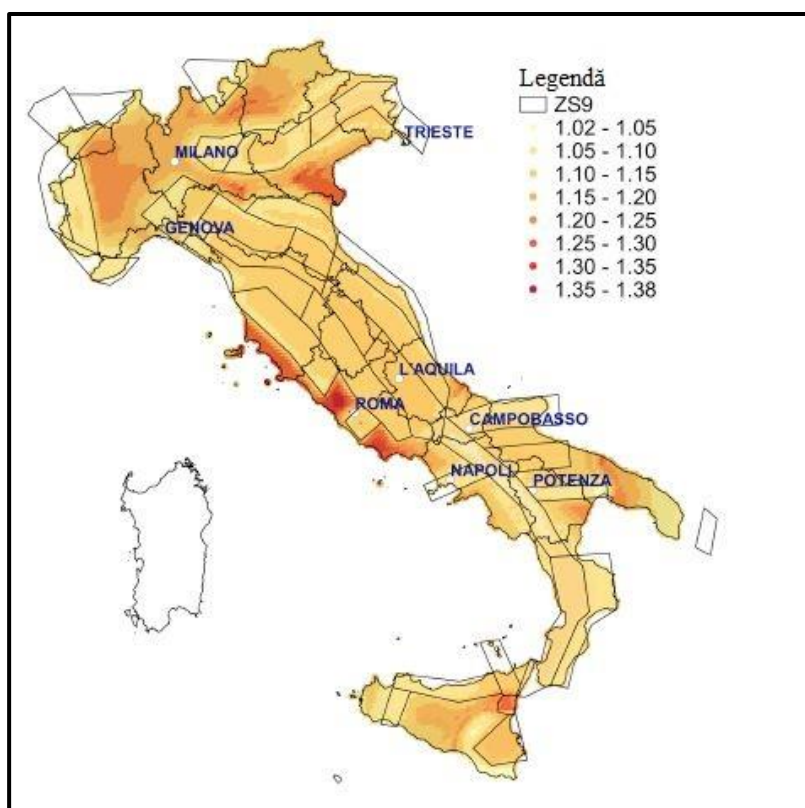


Fig. 2.3 Hartă de coeficienți de risc pentru o probabilitate de cedare de 1% în 50 ani și o abatere standard de 0.8 (Fiorini et al. 2014)

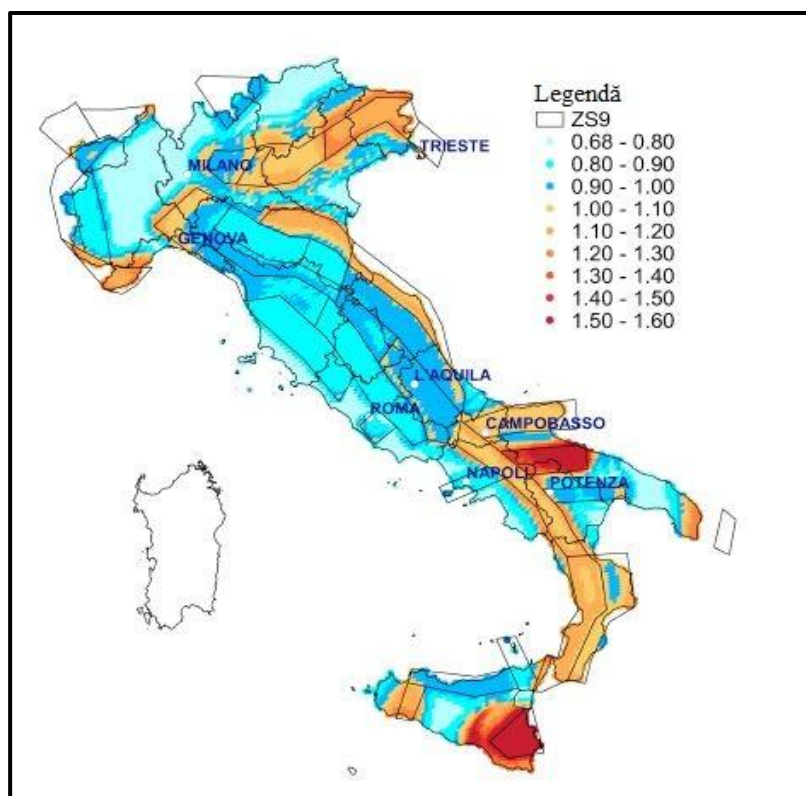


Fig. 2.4 Hartă de coeficienți de risc pentru o probabilitate de cedare de 0.05% în 50 ani și o abatere standard de 0.5 (Fiorini et al. 2014)

Cea generată cu parametrii din Douglas et al. (2012), arată faptul că mulți dintre coeficienții de risc sunt mai mici decât 1 pentru cele mai multe regiuni din Italia, cu valori de proiectare ce ar putea fi micșorate cu până la 30% pentru a atinge probabilitatea de 0.05% în 50 ani. În regiuni limitate, însă, acestea trebuie mărite cu un factor de 1.3 până la 1.6 pentru a atinge probabilitatea propusă. În ambele cazuri este foarte evident efectul pe care îl are panta curbelor de hazard din zona dată de studiul pus la dispoziție de INGV (Fiorini et al. 2014).

2.3.3 Rezultate pentru întreg teritoriul Europei, conform Silva et al. (2014)

▪ Definiția repartiției de probabilitate de cedare

Una dintre cele mai importante surse de incertitudine în estimarea probabilității de cedare este legată de definiția repartiției probabilităților de cedare a structurilor proiectate cu ajutorul codurilor de proiectare seismică. Fondul construit european a fost ținta multor studii ce au avut ca rezultat numeroase funcții de fragilitate. De aceea, în Crowley et al. (2014) ca parte din proiectul Syner-G (Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Building, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain), aceste rezultate au fost folosite pentru a alcătui o bază de date cu modele de fragilități pentru întreg teritoriul european. Cu toate acestea, este important de subliniat faptul că scopul este de a evalua probabilitatea de cedare pentru clădiri singulare, și cele mai multe modele de fragilitate sunt făcute pentru tipologii de clădiri, dar acestea pot fi oricum folosite pentru a investiga tendințele așteptate pentru probabilitățile de cedare (Silva et al. 2014).

Evaluarea incertitudinilor epistemice în fragilitatea structurală pentru anumite structuri sau tipologii de clădiri a demonstrat o mare variabilitate. Pot fi identificate diferite cauze pentru această variabilitate, cum ar fi utilizarea diferitelor metode de construcție,

considerarea diferitelor coduri de proiectare și cel mai important, faptul că fiecare structură a fost proiectată pentru diferite cerințe ale acțiunii seismice. Mai mult, este important de luat în considerare incertitudinea epistemică legată de aplicarea diferitelor metodologii de obținere a funcțiilor de fragilitate (Silva et al. 2013a).

Influența valorii parametrului de intensitate a mișcării terenului în probabilitățile de cedare rezultate a fost demonstrată în diferite studii (e.g. Ulrich et al. 2014; Silva et al. 2014). Repartiția probabilităților de cedare poate fi definită printr-o funcție de repartiție log-normală de medie logaritmică μ și abatere standard logaritmică β a unui parametru ce descrie mișcarea terenului. (Silva et al. 2014).

În studiul făcut de Luco et al. (2007), au fost analizate structuri tipice, proiectate conform codului în vigoare ASCE Standard 7-05 (ASCE 2005a), pentru a obține curbe de fragilitate medii, concluzionând cu faptul că există o probabilitate de cedare de aproximativ 10% pentru un interval mediu de recurență de 2745 ani pentru o abatere standard logaritmică de 0.8.

În Douglas et al. (2012) se sugerează valori diferite față de cele obținute de Luco et al. pentru cele două variabile, acestea fiind de 10^{-5} pentru un interval de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani) și o abatere standard de 0.5. În mod evident, aceste ipoteze vor duce la probabilități diferite de cedare, creând un impact direct asupra calculelor riscului seismic (Silva et al. 2014).

Urmând ipotezele din cele două studii (Luco et al. 2007 și Douglas et al. 2012), în Silva et al. (2014) s-a adoptat valoarea de 0.5 pentru abaterea standard logaritmică, valoare ce pare a fi în concordanță cu evaluarea curbelor de fragilitate existente până în prezent. Însă, este important de amintit faptul că toate acele curbe au fost făcute pentru tipologii de clădiri, și nu țin cont de un spectru foarte larg de incertitudini epistemice asociate cu obținerea funcțiilor. Totodată, folosirea valorilor mari pentru abaterea standard β în regiunile cu un nivel de hazard seismic ridicat duce la curbe de fragilitate ce indică o probabilitate de cedare extrem de mare pentru acele valori ale parametrilor de mișcare a terenului, ceea ce pare nerealist (Silva et al. 2014).

▪ Probabilități de cedare acceptate

Conceptul de hartă de risc seismic uniform se bazează pe alegerea unui nivel acceptat de risc (fie anual sau pe toată durata de viață a structurii), pentru care trebuie calculată o valoare a unui parametru al mișcării terenului. Acest nivel de risc poate depinde de diferiți factori, cum ar fi importanța clădirii, despre care în Douglas et al. (2012) se spune că ar trebui stabilită prin implicarea nu numai a inginerilor structuriști, ci și a altor organizații competente, politicieni, sociologi etc.

Luco et al. (2007) estimează această probabilitate de cedare pentru teritoriul Statelor Unite și a determinat că un risc național de 1% în 50 ani (în jur de $2 \cdot 10^{-4}$ anual) este un nivel acceptabil. Douglas et al. (2012) a estimat acest risc acceptat la o valoare de 10^{-5} .

▪ Analiză probabilistă a hazardului seismic pentru Europa

Obținerea hărților de risc seismic uniform implică disponibilitatea curbelor de hazard seismic pentru regiunea de interes. Din nevoia pentru un model de hazard seismic cât mai uniform din punct de vedere probabilistic ce ar acoperi întreaga teritoriul european, în acest

studiu s-au folosit rezultatele obținute în proiectul SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe – Danciu et al. 2013, www.shareeu.org).

Printre rezultatele folosite din SHARE (www.shareeu.org), se amintesc curbele de hazard și hărțile în termeni de accelerație de vârf și ordonate spectrale de până la 10 secunde, și probabilități de depășire între 1% și 50% în 50 ani.

Diferite rezultate pentru teritoriul European sunt ilustrate în Fig. 2.5:

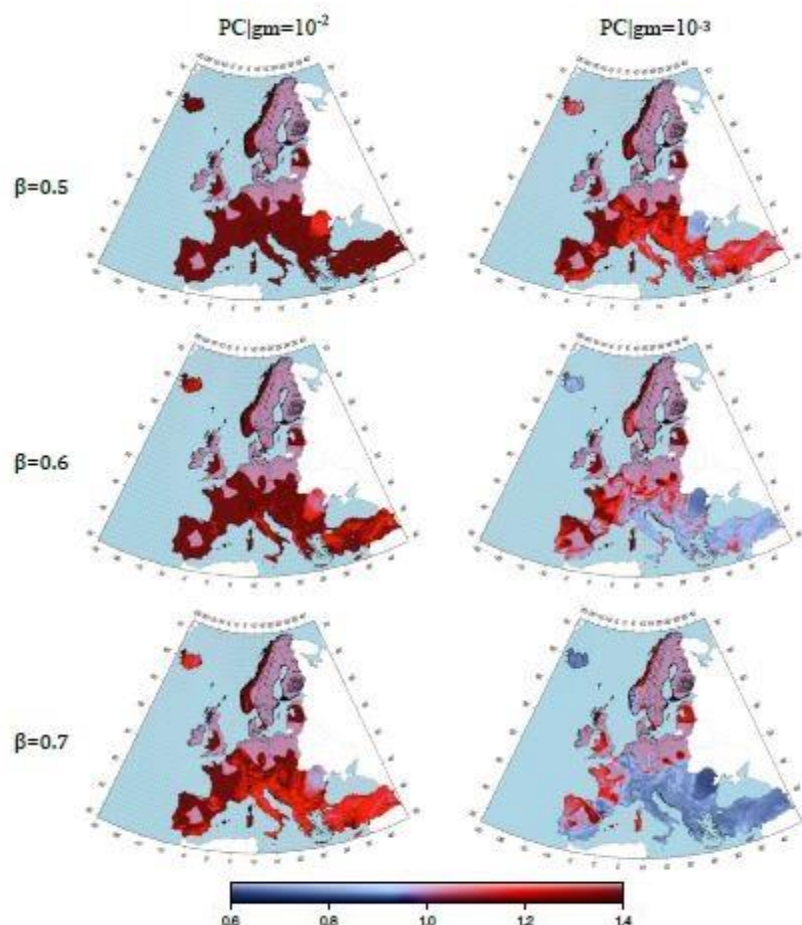


Fig. 2.5 Coeficienți de risc pentru Europa, pentru diferite valori de β și PC (Silva et al. 2016)

▪ Concluzii și rezultate

În acest capitol ce poartă titlul de „Aspecte teoretice și principale rezultate din literatură privind analizele de risc seismic” s-au expus, în principal, elemente teoretice din literatura de specialitate și stadiul actual în ceea ce privește subiectul propus (hărți de risc seismic uniform). După consultarea bibliografiei de specialitate s-au analizat în detaliu metodologiile folosite în literatură referitoare la subiectul ales și s-au sintetizat concluziile în ceea ce privește metoda aleasă pentru obținerea unor rezultate cât mai clare și mai exacte.

3. EVALUAREA PROBABILISTICĂ A FRAGILITĂȚII SEISMICE A ELEMENTELOR EXPUSE LA RISC

Al treilea capitol poartă titlul „Evaluarea probabilistică a fragilității seismice a elementelor expuse la risc” și cuprinde, în principal, elemente teoretice din literatura de specialitate și stadiul actual în ceea ce privește subiectul propus, precum și influența funcțiilor de fragilitate în elaborarea hărților de proiectare bazate pe risc seismic. După consultarea bibliografiei de specialitate, s-au analizat în detaliu metodologiile folosite în literatură referitoare la subiectul ales și s-au sintetizat concluziile în ceea ce privește metoda aleasă pentru obținerea unor rezultate cât mai clare și mai exacte.

Prima metodologie, care conține modele pentru estimarea riscului de a avea potențiale pierderi (curbe de fragilitate pentru clădiri, rețele de transport etc.) provocate de acțiunea cutremurelor de pământ, a fost prezentată în HAZUS (versiunea curentă fiind HAZUS MH v2.1), metodologie ce a plecat de la avariile provocate de seisme (ex. versiunea HAZUS 97), urmând ca ulterior să fie actualizată și cu alte tipuri de hazard (inundații, uragane). În primele ediții, cele mai multe funcții de fragilitate erau bazate pe metodologii și date extrase din ATC-13 (ATC 1985) și ATC-25 (ATC 1991) și urmau o abordare bazată pe părerile experților în domeniu (Pitilakis et al. 2014).

Elementele principale expuse la risc sunt clădirile, rețelele de utilități, infrastructura transporturilor și edificiile critice. Tipologiile structurale difera de la cod la cod, printre exemple amintind: HAZUS, RISK-UE și SYNER-G.

În HAZUS (FEMA 2009), diferențierea tipologiilor structurale se face, în principal, după materialul de construcție: beton armat, oțel, zidărie și lemn, sistemul structural, regim de înălțime și nivelul proiectării antiseismice (LC – low code, MC – moderate code și HC – high code).

În cadrul proiectului RISK-UE, s-a făcut o matrice pentru clasificarea tipologiilor structurale europene, diferențierea fiind făcută după materialul folosit, regimul de înălțime, nivelul de proiectare antiseismică. Au rezultat 23 tipologii (10 de zidărie, 7 de beton armat, 5 de oțel și una de lemn), fiecare urmând regimuri de înălțime scăzut (low-rise), moderat (mid-rise) și ridicat (high-rise), la fel ca și proiectarea antiseismică (none, low-code, moderate-code, high-code).

În metodologia SYNER-G, diferențierea se face după sistemul structural, astfel: Force Resisting Mechanism (FRM1), FRM Material (FRMM1), Plan (P), Elevation (E), Cladding (C), Detailing (D), Floor System (FS), Roof System (RS), Height Level (HL), Code Level (CL), și la fel ca și în celelalte clasificări, după nivelul de înălțime și nivelul de cod de proiectare antiseismică.

3.1. Elemente de teorie generală

▪ Fragilitate seismică

O funcție de fragilitate seismică se definește ca o funcție matematică ce exprimă probabilitatea ca un eveniment seismic dat să poată afecta defavorabil starea fizică a unei construcții (cum ar fi depășirea unui prag impus) în funcție de un parametru de intensitate seismică, fie acesta accelerație de vârf a terenului, accelerație spectrală sau altele.

Avariile cauzate de cutremure pot fi importante în regiunile în care populația este numeroasă și unde fondul construit nu a fost proiectat urmând reguli de proiectare seismică. Cu cât este mai mare regiunea în cauză, cu atât avarierile vor fi mai mari (Văcăreanu 2007).

În Europa prima inițiativă de a obține o metodologie pentru estimarea riscului seismic al clădirilor este inclusă în proiectul RISK-UE (2004), urmată de LESSLOSS (2007), unde s-au propus curbe de fragilitate prin stabilirea unei noi taxonomii potrivite pentru Europa și care au fost finanțate de către European Commission framework programmes for Research and Technological Development (Pitilakis et al. 2014).

- Elemente generale ale funcțiilor de fragilitate

Conceptul de funcție de fragilitate a apărut pentru prima dată în Kennedy et al. (1980), unde o funcție de fragilitate era definită ca fiind o relație probabilistică între frecvența de cedare a unei componente dintr-o centrală nucleară și accelerația de vârf a terenului (Porter 2016).

Axa verticală a unei funcții de fragilitate reprezintă probabilitatea de cedare a elementului la risc, condiționată de parametrul reprezentat pe axa orizontală (în acest caz reprezentată de parametrul de mișcare al terenului).

Cea mai uzuală formă a unei funcții de fragilitate seismică este funcția log-normală de repartiție de probabilitate, dar aceasta nu este universală și nu întotdeauna folosită. Alte tipuri de repartiții pot fi folosite (de ex., Weibull, normală, binomială), dar cea log-normală are unele proprietăți particulare ce sunt ușor de implementat în analizele de fragilitate (Reed et al. 1994). Această repartiție se potrivește cu o varietate de moduri de cedare ale elementelor structurale supuse la risc seismic, pentru cele nestructurale dar și pentru rezultatele analizelor dinamice incrementale (Porter et al. 2007).

Principalii parametri prin care este descrisă o repartiție log-normală sunt: valoarea mediană a repartiției (notată cu θ , x_m) și abaterea standard logaritmică (notată cu β), parametri ce sunt calculați pentru fiecare element la risc în parte.

- Taxonomie, tipologie

Cea mai importantă ipoteză în evaluarea vulnerabilității clădirilor, a infrastructurilor și a rețelelor este aceea că structurile și componentele acestora, având caracteristici structurale de același fel și fiind în aceleași condiții geotehnice, sunt așteptate a avea același comportament în timpul unui eveniment seismic. În acest context, avariile sunt direct legate de proprietățile structurale ale elementelor supuse la risc. Prin tipologie se înțelege clasificarea pe parametri ca geometrie, nivel de proiectare seismică, iar prin taxonomie, pentru clădiri, se înțeleg diferitele tipuri de sisteme structurale.

- Niveluri de performanță și stări de avariere

În metodologiile de evaluare a riscului seismic, capacitatea unei structuri, de exemplu o clădire din beton armat ce aparține unei anumite tipologii, poate fi definită prin praguri de avariere numite stări limită. O stare limită este definită ca granița dintre două stări diferite de avariere. Diferite criterii au fost propuse depinzând de tipologiile elementelor supuse la risc și de metoda folosită pentru derivarea funcțiilor de fragilitate. Cea mai comună metoda de a defini consecințele unui cutremur este clasificarea în funcție de următoarele stări de avariere: neavariată, minoră, moderată, extinsă, completă (Pitilakis et al. 2014).

Numărul stărilor de avariere este variabil și legat de funcționalitatea componentelor și/sau durata reparației și costul acestora. În acest fel, pot fi estimate pierderile totale ale sistemului (economic sau funcțional). În particular, avariile fizice sunt legate de posibilitatea de exploatare a componentei (întreagă sau parțială, operațională sau nu) și funcționalitatea corespondentă. Aceste corelații asigură măsuri cantitative ale capacității componentelor și pot fi aplicate pentru definiția indicatorilor de performanță (notați IP), ce sunt introduși în analiza sistematică a fiecărei rețele. Așadar, costul reparațiilor, atunci când acestea sunt făcute, este dat sub formă de procent din costul de înlocuire (Pitilakis et al. 2014).

- Măsuri de intensitate

O altă problemă delicată legată de funcțiile de fragilitate este selecția potrivită a intensității ce caracterizează mișcarea seismică și care se corelează cel mai exact răspunsul fiecărui element (clădire, conductă etc). Diferite măsuri ale intensității mișcării terenului au fost dezvoltate (notate IM). Fiecare măsură poate descrie diferite caracteristici ale mișcării, în funcție de structura sau sistemul considerat. Cele mai optime mărimi ale intensității sunt definite în termeni de practicalitate, eficiență, suficiență, robustețe și eficacitate în rezolvare (Pitilakis et al. 2014).

Practicalitatea poate fi verificată analitic prin cuantificarea dependenței de răspunsul structural a proprietăților fizice, cum ar fi energia, răspunsul structural corespunzător modului fundamental sau a modurilor superioare etc. Deasemenea, practicalitatea poate fi verificată numeric prin interpretarea răspunsului structurii printr-o analiză neliniară utilizând serii de timp existente ale mișcării seismice. Suficiența descrie limita până la care măsurile de intensitate sunt statistic independente de caracteristicile mișcărilor terenului, cum ar fi magnitudinea cutremurului sau distanța sursă-amplasament. Eficacitatea determină abilitatea unei IM de a evalua relația cu un anumit parametru, astfel încât frecvența medie anuală a unei valori ale variabilei ce depășește valoarea limită dată să poată fi determinată analitic. Eficiența se referă la variabilitatea totală a unui parametru ingineresc pentru descrierea cerinței seismice (EDP) pentru un IM dat. Robustețea descrie eficiența perechilor IM-EDP la diferite perioade fundamentale de vibrație pentru diferite structuri (Pitilakis et al. 2014).

Funcțiile de fragilitate empirice sunt, în mod uzual, exprimate în termeni de intensitate macroseismică, definite conform diferitelor scări de intensități macroseismice (EMS, MCS, MM). Cele analitice și cele hibrid sunt, din contră, legate de IM-uri instrumentale, ce au legătură cu parametrii mișcării terenului (PGA, PGV, PGD) sau a răspunsului unui sistem elastic cu un singur grad de libertate (S_a , S_d , pentru o valoare a perioadei de vibrație) (Pitilakis et al. 2014).

- Incertitudini

În procesul obținerii unui set de funcții de fragilitate pentru un anumit element supus la risc sunt introduse diverse incertitudini. Acestea sunt asociate cu parametrii curbelor de fragilitate și cu metodologia de obținere a acestora, precum și cu relația dintre stările de avariere fizice și capacitatea (PI) elementelor. Incertitudinile sunt de obicei clasificate în epistemice și aleatoare. Aleatoare sunt cele presupuse a fi provenite din caracterul aleator intrinsec al unui fenomen, iar cele epistemice din cauza unei înțelegeri incomplete a fenomenelor studiate, sau în ceea ce privește metoda obținerii setului de date disponibile (Pitilakis et al. 2014).

În general, incertitudinea în ceea ce privește parametrii de fragilitate este estimată prin abaterea standard logaritmică β_{tot} ce descrie variabilitatea totală asociată fiecărei curbe de fragilitate. Trei surse principale de incertitudini sunt de obicei considerate: definirea stărilor de avariere β_{DS} (din cauza faptului că pragurile utilizate la definirea stărilor limită nu sunt cunoscute cu suficientă precizie), capacitatea elementului β_C (reflectă variabilitatea proprietăților structurii) și datele de intrare în ceea ce privește excitația seismică β_D (vine din faptul că acțiunea seismică poate avea efecte diferite asupra aceleiași structuri).

3.2. Metode pentru obținerea funcțiilor de fragilitate

Diverse metodologii sunt folosite pentru a dezvolta funcții de fragilitate. Acestea sunt grupate în patru mari categorii: empirice, analitice, hibrid și de tip expert. Metodele empirice sunt bazate pe investigații post-cutremur și observații ale avariilor apărute în urma unui eveniment seismic. Acestea sunt specifice anumitor amplasamente, condiții seismice, geologice și geotehnice, și anumitor proprietăți ale structurilor avariate. De aceea utilizarea lor în alte regiuni nu este întotdeauna recomandată.

Metodele analitice de obținere a funcțiilor de fragilitate sunt bazate pe estimarea distribuției avarierii prin simularea numerică a răspunsului unui element structural supus la o acțiune seismică. Încărcările seismice la care sunt supuse structurile pot fi reprezentate de un spectru de răspuns sau de o analiză time-history, aceasta fiind o metodă dinamică de evaluare. Metodele de tip expert se bazează pe judecata experților ce sunt solicitați să estimeze un nivel de pierderi sau o probabilitate de avariere al unui element supus la risc seismic. Metodele hibrid de obținere a funcțiilor de fragilitate reprezintă o combinație între metodele menționate anterior, utilizând, de exemplu, metoda analitică împreună cu cea empirică, sau completată de opinia expertului. Avantajul acestei metode este că poate corecta dezavantajele celorlalte metode. De exemplu, metodele analitice pot fi modificate și îmbunătățite prin integrarea post-seismică a observațiilor inițiale.

- Folosirea funcției de repartitie log-normală pentru evaluarea funcțiilor de fragilitate

Există patru motive principale pentru care această repartitie log-normală este recomandată (Porter 2016):

- Simplitate: are o formă simplă, parametrică pentru aproximarea cantităților incerte ce pot lua valori pozitive, utilizând doar o estimare a valorii centrale;
- Există precedente: este foarte des utilizată în ingineria seismică;
- Există informații în ceea ce privește alte funcții de fragilitate dezvoltate pentru diferite tipuri de structuri, aflate în diferite zone seismice, deci acestea pot fi comparate;
- De cele mai multe ori se potrivește cu setul de date observate: cum ar fi evenimente seismice condiționate de magnitudine și distanță, curbe de capacitate ale structurilor și distribuții marginale de pierdere.

Manualul tehnic HAZUS-MH (NIBS și FEMA 2009) oferă o multitudine de funcții de fragilitate pentru diferite tipologii de clădiri, structuri sau rețele, definind probabilitățile ca o structură să se afle într-o stare de avariere (ușoară, medie, extinsă și completă) în funcție de răspunsul structural al acesteia (acelerație spectrală sau deplasare spectrală a unui sistem echivalent, cu un singur grad de libertate care reprezintă întreaga clădire) (Porter 2016), ceea

ce face din aceasta cea mai completă metodologie apărută până în prezent în ceea ce privește obținerea și utilizarea funcțiilor de fragilitate.

Indiferent de metoda utilizată pentru a dezvolta o funcție de fragilitate (empirică, analitică, de tip expert sau hibrid), obținerea acesteia ne oferă o multitudine de informații în ceea ce privește starea în care se află o structură (fie clădiri, poduri etc) atunci când este supusă la o acțiune seismică mai mult sau mai puțin distructivă.

3.3. Metodologia FRACAS de obținere a funcțiilor de fragilitate

FRACAS (FRAgility through CAPacity Spectrum assessment) reprezintă o metodă de a obține funcții de fragilitate ce a fost dezvoltată în 2005 pe baza metodei spectrului de capacitate (Rossetto et al. 2005). Această metodă folosește răspunsul inelastic la mișcări seismice ale terenului pentru a obține funcții de fragilitate.

Spre deosebire de alte metode ce utilizează metoda spectrului de capacitate, aceasta folosește analize time-history, cu ajutorul cărora se calculează spectre elastice și inelastice, astfel găsind punctele de performanță. Metodologia este eficientă, în sensul în care curbele de fragilitate sunt obținute prin analiza mai multor clădiri supuse la mai multe cutremure cu caracteristici diferite. Astfel, se ține cont de incertitudinile legate de accelerogramele folosite și de cele introduse de caracteristicile structurale diferite (Rossetto et al. 2016).

Funcțiile de fragilitate sunt obținute prin următorii pași (Rossetto et al. 2016):

- Modelul matematic al populației de clădiri este generat prin introducerea unei singure clădiri, numită “clădire index”, pe baza căreia se generează alte modele cu sisteme structurale și proprietăți geometrice diferite;
- Modelele sunt analizate prin metodele statice pushover sau pushover adaptată prin care se obțin curbe de capacitate forță tăietoare de bază – deplasare laterală la vârful clădirii;
- Aceste curbe sunt apoi transformate în curbe de capacitate în format ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum);
- Este apoi obținută o curbă idealizată ce reprezintă curba de capacitate pentru populația de clădiri;
- Curbă idealizată este discretizată într-un număr de puncte de analiză, fiecare reprezentând un sistem cu un grad de libertate, urmând ca răspunsurile sistemelor (supuse la mișcările terenului folosite) să fie obținute prin metoda de integrare Newmark-beta;
- Utilizând părțile elastice și inelastice din spectrul de răspuns, se estimează punctul de performanță prin intersecția celor două curbe, cea de capacitate și cea de răspuns;
- Pașii sunt repetați pentru fiecare curbă de capacitate ce produce un punct de performanță, la diferite niveluri de intensitate a mișcării terenului, urmând ca funcțiile de fragilitate să fie obținute prin metode statistice adecvate.

3.3.1 Sisteme structurale

Funcțiile de fragilitate din acest capitol au fost obținute pentru două tipuri de sisteme structurale: clădire din beton armat, cu sistem în cadre cu pereți, cu diferite regimuri de înălțime (15, 18, respectiv 21 etaje de câte 3.00m fiecare) și clădiri metalice cu sistem

structural cu contravântuiri în V întors, cu regimuri de înălțime de 5, 7 și 9 etaje, de câte 3.00m fiecare.

Clădirile de beton armat au fost proiectate conform codului de proiectare seismică în vigoare în România P100-1/2013 (MDRAP 2013), la diferite valori de vârf ale accelerației terenului ce reprezintă cerințele evolutive de proiectare pentru București, începând cu anul 2006 (0.24g, 0.30g, respectiv 0.36g). Acestea au înălțimi de 48m, 57m, respectiv 66m, și includ grinzi longitudinale și transversale, stâlpi și pereți de diferite secțiuni, iar materialele folosite sunt beton C40/50 și oțel S500. Procentele de armare variază, iar factorul de comportare q este de 4.

Clădirile metalice au fost proiectate în condiții asemănătoare (s-a folosit același cod de proiectare seismică în vigoare), la valori de accelerație de 0.2g, 0.25g și 0.3g (valori ce reprezintă cerințele evolutive de proiectare seismică în București începând cu 1978 și până în prezent). Regimurile de înălțime sunt de 18m, 24m, respectiv 30m, iar materialul folosit este oțel de marcă S235 pentru grinzi și contravântuiri, și S355 pentru stâlpi. Clădirile metalice au fost proiectate considerând un factor de comportare q de 2.5.

3.3.2 Stări limită

Supuse la încărcări seismice, clădirile prezintă stări de avariere ce pot fi exprimate în funcție de deplasarea relativă de nivel. În domeniul inelastic al răspunsului clădirii, avariile severe apar din deplasări relative foarte mari, chiar dacă forțele laterale rămân constante sau chiar descresc. De aceea, predicțiile corecte ale avariilor provocate de cutremure necesită estimări exacte ale răspunsului clădirilor în termeni de deplasări în domeniul inelastic (Duan & Pappin 2008).

Pentru scopul acestei teze de doctorat, la obținerea funcțiilor de fragilitate s-au considerat probabilitățile de depășire ale stărilor limită de serviciu (de limitare a degradărilor) și ultimă (evitarea pierderilor de vieți omenești), ale căror praguri au fost preluate din codul de proiectare seismică în vigoare în România, P100-1/2013 (MDRAP 2013). Așa cum sunt descrise în cod prin valorile admisibile ale deplasării relative de nivel, aceste praguri se clasifică în funcție de tipul componentelor (structurale sau nestructurale), valorile fiind de $5\% \times h$, $7.5\% \times h$, $10\% \times h$ pentru starea limită de serviciu, iar pentru starea limită ultimă de $25\% \times h$ (h fiind înălțimea de nivel).

3.3.3 Curbe de capacitate

Curba de capacitate este determinată prin încărcarea statică a structurii cu încărcări gravitaționale, combinate cu un set de forțe laterale crescătoare incremental pentru a putea calcula deplasarea ultimului nivel și a forței tăietoare de bază. Curba este creată prin suprapunerea fiecărui increment de deplasare, suprapunere ce poartă denumirea de pushover (Freeman 1998).

Curbele pushover pentru cele 18 modele structurale analizate în acest studiu de caz au fost obținute cu ajutorul programului de calcul STERA 3D versiunea 8.6 (<http://www.rc.ace.tut.ac.jp/saito/software-e.html>).

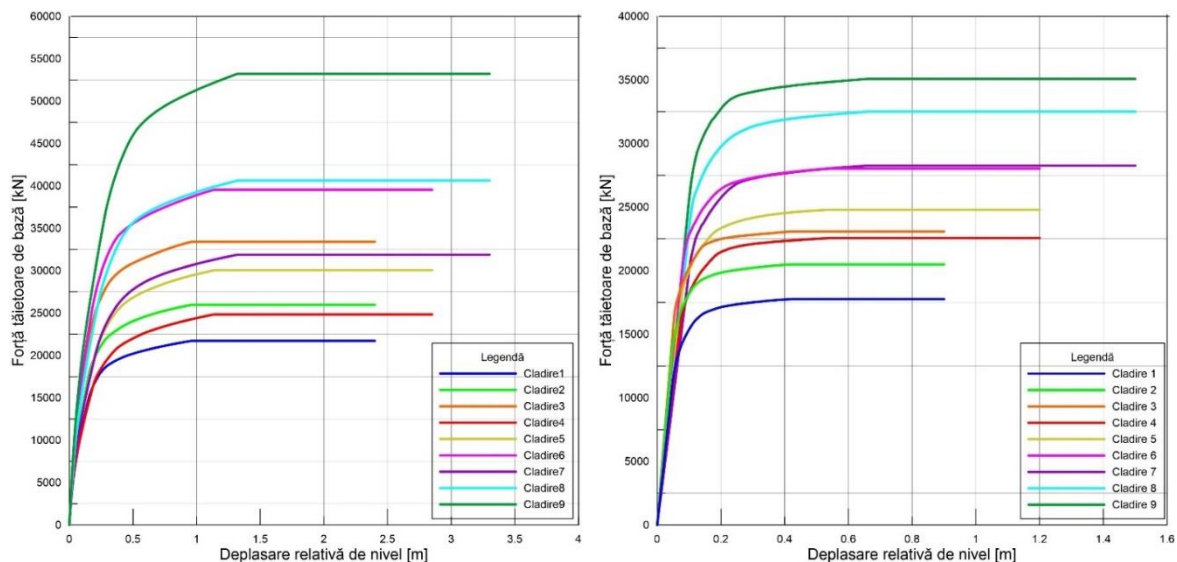


Fig. 3.1 Curbe pushover pentru clădirile din beton armat și pentru clădirile metalice

Datele de intrare pentru analizele dinamice neliniare în ceea ce privește cerința seismică (mai exact înregistrările seismice folosite la generarea funcțiilor de fragilitate) corespund amplasamentului București, și sunt compatibile cu terenul existent.

Acestea sunt reprezentate în Fig. 3.2:

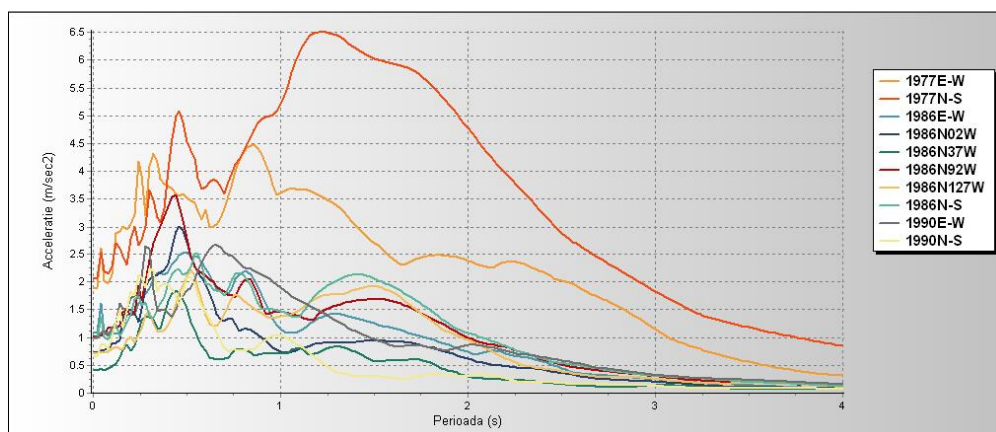


Fig. 3.2 Spectrele de răspuns ale accelerogramelor folosite

Caracteristicile înregistrărilor sunt prezentate în Tab. 3.1:

Tab. 3.1 Caracteristicile înregistrărilor

Cutremur	Componentă	Stație seismică	PGA (m/s^2)
1977	E-W	București INCERC (INC)	1.88
1977	N-S	București INCERC (INC)	2.06
1986	E-W	București INCERC (INC)	1.09
1986	N-S	București INCERC (INC)	0.96
1990	E-W	București INCERC (INC)	0.98
1990	N-S	București INCERC (INC)	0.66
1986	N37W	București Metalurgiei (MET)	0.40
1986	N127W	București Metalurgiei (MET)	0.71
1986	N02W	București Militari (MLT)	0.72
1986	N92W	București Militari (MLT)	1.00

Numărul înregistrărilor necesare pentru o analiză static neliniară depinde de diferiți factori, ca răspunsul structural ce se dorește a fi obținut, dacă se doresc a fi obținute valori

mediane sau repartiții de probabilitate a răspunsurilor, acuratețea valorilor mediane și a dispersiei, posibilitatea de a obține răspunsuri maxime sau de cedare etc (Haselton et al. 2012). În acest caz, au fost alese 10 accelerograme, înregistrate la București, acestea fiind scalate cu valori între 0.1g și 3g, urmând un pas de 0.2g.

În FRACAS, idealizarea curbei de capacitate printr-o curbă biliniară sau multiliniară se poate face automat prin mai multe metode, fiecare având particularitățile ei și motivele pentru care sunt mai potrivite pentru anumite sisteme structurale. Sunt disponibile diverse opțiuni de ajustare a curbelor, cu diferite opțiuni pentru considerarea punctului de curgere (d_y , a_y) (Rossetto et al. 2016).

Pentru a ameliora eficiența analizei punctelor de performanță, programul FRACAS discretizează curba de capacitate într-un număr de perioade pre și post curgere, perioade ce sunt folosite ca puncte de analiză. Acest număr poate fi ales de către utilizator, iar pentru o evaluare mai exactă, în acest caz, acestea au fost alese ca fiind 5 perioade pre-curgere, respectiv 25 post curgere, așa cum este și recomandat.

3.3.4 Obținerea funcțiilor de fragilitate

Pentru fiecare dintre modelele structurale introduse în program, supuse la mișcări ale terenului ce cresc liniar în intensitate (prin scalarea acestora cu coeficienți pornind de la 0.2g până la 3g, cu un pas de 0.2), se efectuează o evaluare a spectrului de capacitate. În programul de calcul FRACAS există diverse opțiuni pentru modelul de regresie: modelul liniar generalizat (GLM), metoda verosimilității maxime sau metoda celor mai mici pătrate (Rossetto et al. 2016).

Pentru a aproxima forma curbei de fragilitate s-a folosit un model de regresie liniar generalizat, astfel valorile de accelerație de vârf sunt transformate în variabile binare (1 dacă există avariere, și 0 dacă nu) și parametrii funcționali sunt estimați în funcție de această distribuție a variabilelor cu valorile de drift utilizate.

Funcțiile de fragilitate obținute pentru primele modele structurale (clădiri din beton armat) sunt prezentate în Fig. 3.3, pentru starea limită de serviciu și cea ultimă:

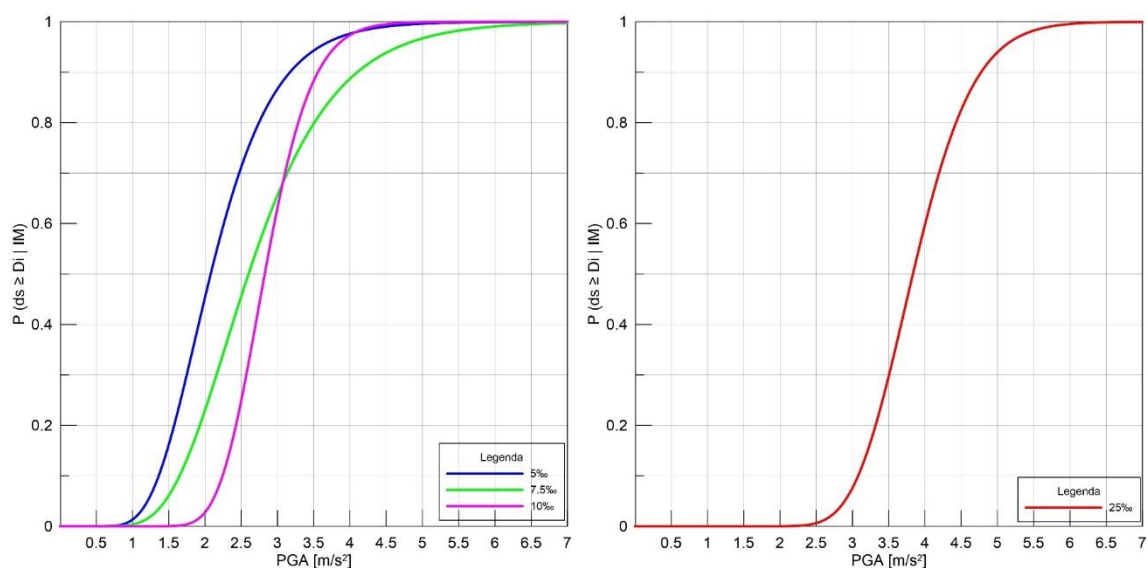


Fig. 3.3 Funcții de fragilitate pentru clădirile din beton armat pentru starea limită de serviciu (stânga) și starea limită ultimă (dreapta)

Valorile parametrilor funcțiilor de fragilitate se găsesc în Tab. 3.2:

Tab. 3.2 Parametrii funcțiilor de fragilitate pentru clădirile din beton armat

Parametru	5‰	7.5‰	10‰	25‰
Mediană (m/s^2) α	2.079	2.601	2.825	3.834
Abatere standard β	0.330	0.355	0.180	0.171

Rezultatele obținute pentru modelele structurale metalice sunt prezentate în Fig. 3.4, pentru starea limită de serviciu și cea ultimă:

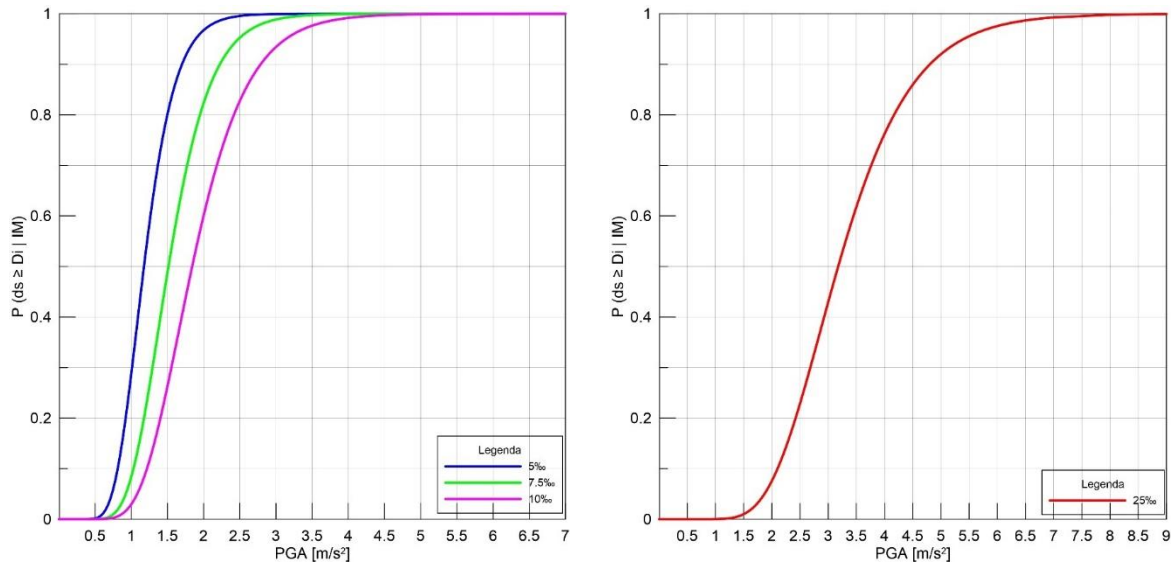


Fig. 3.4 Funcții de fragilitate pentru clădirile metalice pentru starea limită de serviciu (stânga) și starea limită ultimă (dreapta)

Valorile parametrilor funcțiilor de fragilitate se găsesc în tabelul următor:

Tab. 3.3 Parametrii funcțiilor de fragilitate pentru structurile metalice

Parametru	5‰	7.5‰	10‰	25‰
Mediană (m/s^2) α	1.176	1.514	1.842	3.177
Abatere standard β	0.288	0.300	0.323	0.323

Media abaterii standard β , pentru cele două sisteme structurale alese (reprezentate prin clădirile în beton armat și cele metalice), este în jurul valorii de 0.35. Având în vedere că în literatura de specialitate valoarea abaterii standard a fost, în toate cazurile, considerată cel puțin 0.6, arată că pentru a obține rezultate sigure este necesară o analiză mai amănunțită ce ar cuprinde mai multe studii de caz. Din această cauză, valoarea abaterii standard a fost considerată, și în cazul acesta, 0.6.

Probabilitățile de cedare pentru amplasamentul București utilizând curbele de fragilitate obținute anterior pentru stările limită de serviciu și ultimă sunt prezentate în Tab. 3.4:

Tab. 3.4 Probabilitățile de cedare pentru amplasamentul București, β obținut din FRACAS

Beton				Metal			
SLS			SLU	SLS			SLU
5‰	7.5‰	10‰	25‰	5‰	7.5‰	10‰	25‰
$2.15 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-5}$	$1.48 \cdot 10^{-6}$	$3.83 \cdot 10^{-7}$	$2.44 \cdot 10^{-5}$	$2.23 \cdot 10^{-5}$	$2.30 \cdot 10^{-5}$	$9.93 \cdot 10^{-6}$

Valorile probabilităților de cedare folosind valoarea de 0.6 pentru abaterea standard sunt prezentate în Tab. 3.5:

Tab. 3.5 Probabilitățile de cedare pentru amplasamentul București, $\beta=0.6$

Beton				Metal			
SLS			SLU	SLS			SLU
5‰	7.5‰	10‰	25‰	5‰	7.5‰	10‰	25‰
$1.94 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-4}$	$1.49 \cdot 10^{-4}$	$1.03 \cdot 10^{-4}$	$2.65 \cdot 10^{-4}$	$2.37 \cdot 10^{-4}$	$2.11 \cdot 10^{-4}$	$1.31 \cdot 10^{-4}$

■ Concluzii și rezultate

În acest capitol, ce poartă titlul de „Evaluarea probabilistică a fragilității seismice a elementelor expuse la risc” s-au expus, în principal, elemente teoretice din literatura de specialitate și stadiul actual în ceea ce privește subiectul propus (funcții de fragilitate pentru elementele expuse riscului seismic). După consultarea bibliografiei de specialitate s-au analizat în detaliu metodologiile folosite în literatură referitoare la subiectul ales și s-au sintetizat concluziile în ceea ce privește metoda aleasă pentru obținerea unor rezultate cât mai clare și mai exacte.

Este important de menționat faptul că această analiză a fragilității clădirilor din beton armat și a celor metalice este una preliminară, în sensul în care o analiză complexă necesită mult mai multe date de intrare pentru a putea ajunge la rezultate concludente. Abordarea aceasta se bazează pe faptul că se consideră valori mediane pentru parametrii asociați capacității și răspunsului seismic (de exemplu tipul de material sau sistemul structural), prin alegerea unui caz tipic de clădire.

4. METODOLOGII DE OBȚINERE A HĂRȚILOR DE RISC SEISMIC UNIFORM. REZULTATE PENTRU TERITORIUL ROMÂNIEI

Al patrulea capitol poartă titlul „Metodologii de obținere a hărților de risc seismic uniform. Rezultate pentru teritoriul României” și are la bază metodologia obținerii hărților de risc seismic uniform pentru teritoriul României și interpretarea rezultatelor din capitolele precedente în vederea realizării acestora. După consultarea bibliografiei de specialitate, s-au detaliat metodologiile folosite în literatură pentru obținerea riscului seismic și s-au sintetizat concluziile în ceea ce privește metoda aleasă pentru obținerea unor rezultate cât mai clare și mai exacte.

Această parte a lucrării scoate în evidență importanța și actualitatea temei, ceea ce permite încadrarea acesteia în contextul național, capitolul de față propunându-și realizarea unor hărți de risc seismic uniform pentru România, pentru o mai bună proiectare a clădirilor noi și evaluarea și reabilitarea celor existente și fragile la acțiunea seismică.

În ultimul deceniu metodologia obținerii unor valori ale parametrilor ce descriu mișcarea terenului ce conduc la proiectarea clădirilor pentru un risc seismic uniform a devenit scopul multor proiecte de cercetare. Lucrări recente în ceea ce privește elaborarea hărților de risc seismic uniform includ articolele lui Douglas et al. (2013) pentru Franța, Fiorini et al. (2014) pentru Italia, Silva et al. (2016) pentru Europa, cât și liderul subiectului în cauză Luco et al. (2007) pentru Statele Unite ale Americii. Pentru România, astfel de hărți au fost obținute în Văcăreanu et al. (2017a și b) și Colibă et al. (2017) considerând diferite probabilități de cedare, intervale medii de recurență și valori pentru abaterea standard ce descrie funcția de fragilitate.

România este împărțită în zone caracterizate de un hazard seismic uniform al cărui nivel este presupus a fi constant, ce pune în evidență faptul că valorile accelerațiilor de proiectare sunt asociate unui interval mediu de recurență constant (cu o valoare de 225 ani în codul de proiectare seismică în vigoare P100-1/2013 (MDRAP 2013), ce corespunde unei probabilități de depășire de 20% în 50 ani) pe întreg teritoriul României.

Așa cum se menționează în Luco et al. (2007), zonele de hazard seismic uniform nu pot fi asociate cu zone de risc seismic uniform deoarece riscul implică o convoluție între curba de hazard seismic și funcția de fragilitate seismică. Hărțile de hazard seismic uniform folosesc o singură valoare caracteristică din curba de hazard pentru un amplasament dat, pe când evaluarea riscului seismic folosește toată informația conținută în curba de hazard. Prin urmare, zonele de hazard uniform nu se suprapun cu zonele de risc uniform.

Conform Douglas & Gkimprixis (2017), metodologia ce vizează riscul seismic uniform are trei mari avantaje față de modul clasic de a considera efectele cutremurelor asupra structurilor: transparența metodei, asigurarea aceluiași nivel de risc seismic pe tot teritoriul unei țări, și abilitatea de a compara riscul provenit din diferite hazarde naturale (e.g. cutremure vs. vânt). Însă, vine cu dezavantajul că este necesară luarea unor decizii în ceea ce privește nivelul de risc acceptabil.

4.1. Analiza probabilistică a hazardului seismic pentru România

O analiză probabilistică a hazardului seismic pentru un amplasament specific constă în determinarea frecvenței cu care o mărime caracteristică (e.g. accelerația de vârf) ia valori dintr-un interval definit într-un timp fix t în viitor (e.g. 50 ani) (McGuire 2004).

Analiza probabilistică a hazardului seismic ține cont de toate scenariile posibile și toate nivelurile de mișcare a terenului ce pot avea loc în orice sursă seismică ce afectează amplasamentul studiat. Pe scurt, APHS-ul încorporează un număr foarte mare de scenarii (toate magnitudinile posibile, distanțe etc.) ce pot fi generate de sursele seismice și calculează rata medie anuală a intensității parametrului în cauză ce ar putea depăși un anumit prag. Rata medie anuală poate fi exprimată ca o probabilitate pentru o anumită perioadă de timp prin ipoteza că intensitatea parametrului urmează la rândul ei o distribuție Poisson (Sucuoğlu și Akkar 2014).

Hărțile de risc uniform rezultate în această teză sunt bazate pe curbele de hazard obținute din cea mai nouă analiză probabilistică a hazardului seismic făcută pentru România în cadrul proiectului național de cercetare BIGSEES (<http://infp.infip.ro/bigsees/default.htm>). Curbele de hazard corespund celor 200 de amplasamente folosite în APHS, răspândite pe tot teritoriul României (Văcăreanu et al. 2016).

Sursele seismice ce influențează hazardul seismic al României considerate în Văcăreanu et al. (2016) și în Pavel et al. (2016), sunt în număr de 14 și reprezintă zone seismice omogene în termeni de rată de apariție și repartiție frecvență-magnitudine. În afară de acestea, s-a considerat și o seismicitate de fond ce acoperă restul teritoriului României (Pavel et al. 2016).

Modelele de predicție a mișcării terenului utilizate pentru analiza probabilistică a hazardului seismic au fost selectate pe baza unor studii recente (Văcăreanu et al. 2013; Pavel et al. 2014a și b) în care au fost obținute sau testate relații de atenuare atât pentru sursa intermediară Vrancea, cât și pentru sursele crustale. Baza de date folosită pentru relațiile de atenuare obținute cuprinde 431 înregistrări a 10 cutremure de adâncime intermediară din sursa Vrancea, cu o magnitudine mai mare de 5 și 125 de înregistrări din 25 cutremure crustale (Pavel et al. 2016).

4.2. Metodologii de obținere a hărților de risc seismic uniform

Scopul acestui capitol este de a prezenta metodologia folosită pentru a obține hărțile de risc seismic uniform, prin convoluția curbelor de hazard, prezentate în capitolul precedent, cu funcțiile de fragilitate obținute, în vederea cuantificării riscului seismic pentru fiecare amplasament considerat. Metoda utilizată folosește curbele de hazard, funcțiile de fragilitate obținute și integrându-le se obțin probabilitățile de cedare aferente fiecărui amplasament.

- Probabilitate de cedare acceptată

Prin cedare, în accepțiunea largă a siguranței structurilor, se înțelege depășirea unei stări limită, aici, prin cedare înțelegem depășirea stării limită ultime (așa cum este definită de P100-1/2013) sau a stării limită de prevenire a colapsului (așa cum este definită de ASCE 7).

Unul dintre cele mai importante aspecte de luat în considerare atunci când se obțin hărți de risc uniform este nivelul riscului seismic acceptat (fie anual sau pe toată durata de viață a unei construcții) pentru care se calculează valorile de proiectare a accelerațiilor de vârf ale terenului. Acest nivel depinde de diferiți factori, de la importanța structurii în cauză până la hotărârile luate de instituțiile statului competente de a lua astfel de decizii (Colibă et al. 2017).

În literatură, aceste valori diferă de la un teritoriu la altul, pentru Statele Unite în Luco et al. (2007) s-a folosit o probabilitate anuală de cedare pentru clădiri de 1% în 50 ani (în jur de $2 \cdot 10^{-4}$ anual), iar în Franța, în Douglas et al. (2013), se specifică o probabilitate de 10^{-5} . Pentru Italia s-au publicat rezultate preliminare în Fiorini et al. (2014) și s-au folosit două valori țintă: 1% în 50 ani împreună cu o valoare de 0.8 pentru abaterea standard ce caracterizează funcția de fragilitate și 0.05% în 50 ani împreună cu 0.5 pentru abaterea standard. În ceea ce privește teritoriul Europei, luând în considerare o rată a mortalității medii de 10% și riscul pierderii vieților omenești, s-a ajuns la o valoare a probabilității de colaps de $5 \cdot 10^{-6}$ (Silva et al. 2016).

- Variabilitatea funcțiilor de fragilitate

La fel ca la oricare variabilă aleatoare, incertitudinea în ceea ce privește capacitatea asociată stării limită de evitare a colapsului a unei structuri poate fi cuantificată prin abaterea standard a logaritmului natural din aceeași capacitate (notată cu β). În cazul Statelor Unite, au fost efectuate analize structurale dinamice neliniare (menționate în proiectul ATC-63 “Quantification of Building System Performance and Response Parameters”) în care s-a obținut valoarea de 0.8. Așa cum s-a precizat deja, capacitatea asociată stării limită de evitare a colapsului a unei structuri nu poate fi deterministă (fără să considere incertitudinile), ceea ce înseamnă că poate fi exprimată printr-o distribuție probabilistă. O astfel de repartitie, foarte des folosită, este repartitia log-normală, ce este parametrizată printr-o mediană și abaterea standard logaritmică deja menționată (Luco et al. 2007).

În studiul făcut de Luco et al. (2007) au fost analizate structuri tipice, proiectate conform codului în vigoare la acea dată ASCE Standard 7-05 (ASCE 2005a) pentru a obține curbe de fragilitate medii, concluzionând cu faptul că există o probabilitate de cedare de aproximativ 10% pentru valorile parametrului mișcării terenului cu un interval mediu de recurență de 2745 ani și cu o abatere standard de 0.8.

În Douglas et al. (2013) se sugerează valori diferite față de cele obținute de Luco et al. (2007) pentru cele două variabile, acestea fiind de 10^{-5} pentru valorile parametrului mișcării terenului cu un interval de recurență de 475 ani (echivalentul unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani) și o abatere standard de 0.5. În mod evident, aceste ipoteze vor duce la probabilități diferite de cedare, creând un impact direct asupra calculelor riscului seismic (Silva et al. 2014). Urmând ipotezele din cele două studii (Luco et al. 2007 și Douglas et al. 2013), în Silva et al. (2014) s-a adoptat valoarea de 0.5 pentru abaterea standard logaritmică, valoare ce pare a fi în concordanță cu evaluarea curbilor de fragilitate existente până în prezent. Însă, este important de amintit faptul că toate acele curbe au fost determinate pentru tipologii de clădiri, și nu țin cont de un spectru foarte larg de incertitudini epistemice asociate cu obținerea funcțiilor de fragilitate. Totodată, folosirea valorilor mari pentru abaterea standard β în regiunile cu un nivel de hazard seismic ridicat duce la curbe de fragilitate ce

indică o probabilitate de colaps extrem de mare pentru acele valori ale parametrilor de intensitate a mișcării terenului, ceea ce pare nerealist (Silva et al. 2014).

- Calcul iterativ al riscului seismic

În teza de doctorat a fost folosită relația 2.1 în care se derivează funcția de fragilitate, deoarece, așa cum a fost precizat în Douglas et al. (2013), hazardul este, în general, calculat pentru un număr finit de valori de intensitate a mișcării pământului (de exemplu PGA) rezultând într-o derivată mai puțin exactă decât cea a unei funcții de fragilitate, care este, în general, definită de o expresie analitică.

Pentru a obține o hartă de risc seismic uniform, este necesară, în prealabil, o analiză probabilistică a hazardului seismic și alegerea unei probabilități anuale de cedare țintă, ce definește nivelul de risc acceptabil, împreună cu o valoare pentru abaterea standard ce descrie funcția de fragilitate, intervalul mediu de recurență a parametrului de intensitate a mișcării terenului, precum și fractilul din funcția de fragilitate cu care se asociază parametrul de intensitate a mișcării terenului. Pentru fiecare amplasament, este aleasă o curbă de hazard, ce este transformată din probabilități de depășire a accelerației de vârf a terenului în 50 ani în frecvențe anuale de depășire a valorilor PGA. Apoi, se obțin funcțiile de fragilitate prin constrângerea abaterii standard la o anumită valoare, și prin alegerea valorii fractil cu care este asociat parametrul de intensitate a mișcării terenului determinat pentru un anumit interval mediu de recurență (Colibă et al. 2017).

Considerând diferite intervale medii de recurență, valorile de vârf ale accelerației terenului sunt obținute din curbele de hazard. Valorile PGA extrase sunt considerate ca fiind un fractil inferior din repartiția lognormală (de exemplu fractilul 0.2, ce arată că există o probabilitate de 0.2 ca limita de siguranță a vieții să fie depășită pentru valori mai mici decât cele de proiectare ale accelerației de vârf a terenului), de unde se obține valoarea mediană pentru funcția de fragilitate. Integrala de convoluție (2.1) sau (2.2) cuantifică numeric probabilitatea de cedare, sau probabilitatea de depășire a unei anumite stări limită (Văcăreanu et al. 2017a). Această probabilitate de depășire este convertită într-o probabilitate anuală de cedare presupunând un proces Poisson, și această valoare este comparată cu probabilitatea anuală de cedare acceptată. În funcție de valoarea probabilității obținute (mai mare sau mai mică decât valoarea selectată), se ajustează valoarea parametrului mișcării terenului până se atinge valoarea acceptată (cu o eroare de $\pm 1\%$).

Pentru a putea utiliza această metodă, este necesară stabilirea unei legături între accelerația de proiectare și funcțiile de fragilitate folosite la integrarea ecuației de risc. Pentru o funcție de fragilitate, descrisă de o repartiție lognormală, un singur punct de pe această curbă este necesar (atât timp cât abaterea standard este fixată) pentru a defini întreaga funcție de fragilitate a structurii. Pentru această teză de doctorat, acest punct a fost stabilit a fi valoarea fractil 0.1 definit de funcția de fragilitate, valoare fractil ce se consideră egală cu valoarea de vârf a accelerației terenului extrasă din curba de hazard seismic, pentru un interval mediu de recurență de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani), pentru fiecare dintre cele 200 amplasamente. Pornind de la aceste valori, s-au calculat valorile mediane în termeni de PGA pentru aceleași amplasamente, pentru a determina cu relația (2.1) probabilitatea de cedare aferentă fiecărui amplasament.

Odată găsite toate probabilitățile de cedare pentru cele 200 de amplasamente, s-a ales cea mai mare dintre acestea ($5 \cdot 10^{-4}$ pentru Râmnicu Sărat) și, folosind metoda indirectă celei

prezentate mai sus, s-au recalculat valorile mediane ale accelerațiilor, având ca țintă această probabilitate de cedare. Folosind valorile mediane astfel determinate și funcțiile de fragilitate, s-au determinat valorile fractil 0.1 pentru a putea face comparația cu valorile accelerațiilor de vârf ale terenului alese inițial și având un interval mediu de recurență de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani).

Din reprezentarea pantelor curbilor de hazard seismic într-un spațiu log-log s-au putut determina atât intervalele medii de recurență ale noilor valori fractil 0.1, cât și valorile accelerațiilor de vârf echivalente unui IMR de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani).

Valorile accelerației de vârf a terenului pentru un hazard uniform cu un interval mediu de recurență de 475 (echivalentul unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani), respectiv 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani) și pentru un risc uniform cu o probabilitate de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ pentru șase orașe prezentate în Tab. 4.1.

De asemenea, în Tab 4.2. se găsesc atât rapoartele celor două valori enunțate anterior, cât și IMR-urile obținute pentru valorile PGA cu care se asigură atingerea probabilității de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$, împreună cu valorile fractil determinate din noua curbă de fragilitate pentru valoarea PGA cu 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani).

Tab. 4.1 Valori PGA pentru orașele selectate pentru care se face comparația

Oraș	PGA (475) [g]	↔	PGA ($P_f=5 \cdot 10^{-4}$) [g]	PGA (2475) [g]	↔	PGA ($P_f=5 \cdot 10^{-4}$) [g]
BUCUREȘTI	0.381		0.369	0.588		0.565
CLUJ NAPOCA	0.143		0.107	0.354		0.246
SIBIU	0.183		0.141	0.430		0.309
SLATINA	0.237		0.227	0.372		0.351
SUCEAVA	0.218		0.208	0.343		0.323
TIMIȘOARA	0.216		0.173	0.459		0.347

Tab. 4.2 Coeficienți de risc și valori probabilistice pentru orașele pentru care se face comparația

Oraș	RU/HU(475)	RU/HU(2475)	IMR (475)	IMR (2475)	Fractil [%]
BUCUREȘTI	0.959	0.945	425	2149	2.239
CLUJ NAPOCA	0.984	0.978	282	1277	0.264
SIBIU	0.761	0.706	285	1297	0.286
SLATINA	0.960	0.946	406	2027	2.132
SUCEAVA	0.952	0.937	403	2010	2.098
TIMIȘOARA	0.799	0.754	294	1348	0.558

unde: HU – valoare de vârf a accelerației terenului considerând hazardul uniform cu un interval mediu de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani) sau 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani);

RU – valoare de vârf a accelerației terenului considerând riscul uniform ce corespunde unei probabilități de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$;

IMR (475) – interval mediu de recurență obținut pentru valorile PGA cu care se asigură atingerea probabilității de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$, determinate din noua curbă de fragilitate pentru valoarea PGA cu 475 (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani);

IMR (2475) – interval mediu de recurență obținut pentru valorile PGA cu care se asigură atingerea probabilității de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$, determinate din noua curbă de fragilitate pentru valoarea PGA cu 2475 (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani);

Fractil [%] - valori fractil determinate din noua curbă de fragilitate pentru valoarea PGA cu 2475 (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani).

4.3. Rezultate pentru România

4.3.1 Rezultate anterioare pentru România

Primele hărți de risc seismic pentru România au fost obținute în Văcăreanu et al. (2017a), unde s-au considerat abatere standard de 0.6 și 0.8 și probabilitatea de colaps de $2 \cdot 10^{-4}$, utilizate anterior în Luco et al. (2007) pentru SUA și Silva et al. (2016) pentru Europa, pentru valori fractili din PGA de 0.1 și 0.001. În acest studiu au fost folosite aceleași rezultate ale analizei probabilistice a hazardului seismic obținute în cadrul proiectului de cercetare BIGSEES, pentru aceleași 200 amplasamente, iar metoda de obținere a riscului seismic utilizată a fost aceeași ca în acest capitol.

În figurile următoare sunt prezentate rapoartele dintre hazardul uniform pentru un IMR de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani) și riscul uniform având ca țintă o probabilitate de colaps de $2 \cdot 10^{-4}$.

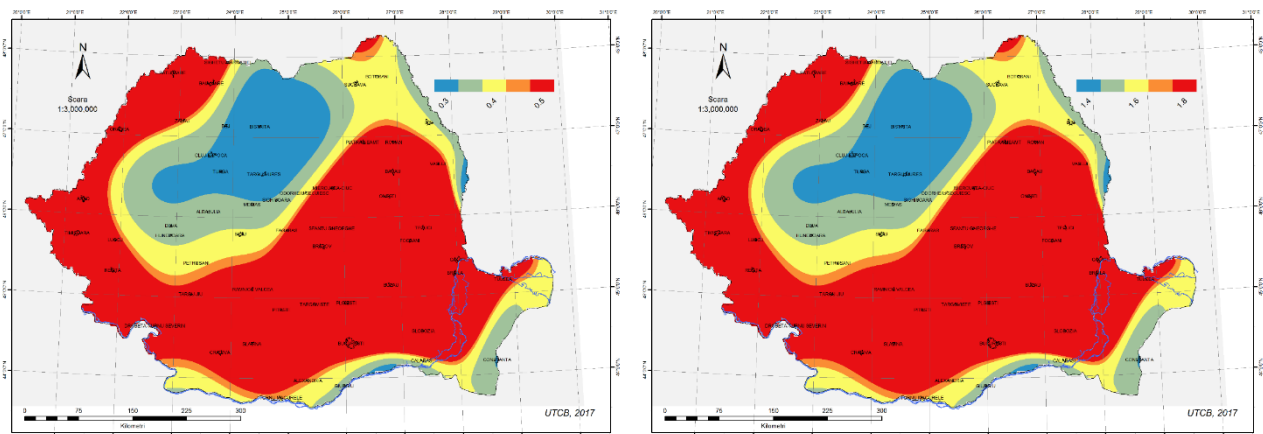


Fig. 4.1 Raportul dintre hazardul uniform pentru un IMR de 475 ani și riscul uniform având ca țintă o probabilitate de colaps de $2 \cdot 10^{-4}$, $\beta = 0.8$ și fractili 0.1 și 0.001 (Văcăreanu et al. 2017a)

Principalele observații făcute privind rezultatele obținute sunt că forma hărții nu se schimbă considerabil cu modificarea oricărei valori pentru abaterea standard și fractilul considerat (în schimb valorile sunt considerabil mai mari utilizând fractili diferiți), valorile PGA cresc odată cu creșterea abaterii standard logaritmice, iar forma hărții seamănă cu cea obținută în Pavel et al. (2016) pentru un hazard uniform (Văcăreanu et al. 2017a).

În cel de-al doilea studiu, Colibă et al. (2017), se folosește ca prag țintă probabilitatea de colaps de $5 \cdot 10^{-3}$ și se obțin hărți de risc seismic uniform pentru acesta, făcând apoi o comparație între valorile obținute și cele pentru un hazard uniform cu intervale medii de recurență de 225, respectiv 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani).

Pentru o mai bună înțelegere în ceea ce privește diferențele dintre rezultatele celor două metodologii (hazard uniform vs. risc uniform) s-au calculat coeficienți de risc, ca raportul dintre valorile PGA pentru un risc uniform și cele obținute pentru un hazard uniform, astfel:

$$C_R = \frac{PGA_{Risc\ Uniform}}{PGA_{Hazard\ Uniform}}$$

4.1

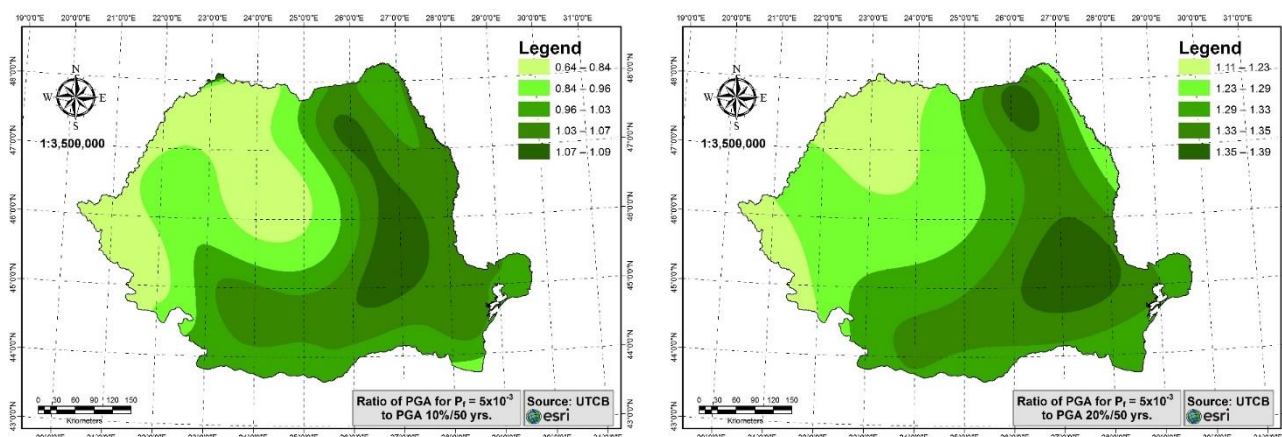


Fig. 4.2 Coeficienți de risc pentru o probabilitate de colaps de $5 \cdot 10^{-3}$ comparată cu o probabilitate de depășire de 10% în 50 ani, respectiv 20% în 50 ani (Colibă et al. 2017)

Rezultatele obținute arată că, în general, valorile accelerației de vârf a terenului asociate riscului uniform (comparate cu valorile având o probabilitate de depășire de 10% în 50 ani) ar crește în regiunile din fața Arcului Carpatic (inclusiv Vrancea) și ar scăde moderat în regiunile din spatele Arcului Carpatic, iar pentru o probabilitate de depășire de 20% în 50 ani, coeficienții de risc obținuți pe tot teritoriul României au valori cuprinse între 1.1 și 1.4.

4.3.2 Rezultate actuale pentru România

Hărțile de risc uniform rezultate în această teză de doctorat sunt bazate pe curbele de hazard obținute din cea mai nouă analiză probabilistică a hazardului seismic făcută pentru România, în cadrul proiectului național de cercetare BIGSEES (<http://infp.infp.ro/bigsees/default.htm>). Curbele de hazard corespund celor 200 de amplasamente folosite în APHS, răspândite pe tot teritoriul României (Văcăreanu et al. 2016). Valoarea abaterii standard logaritmice β , ce descrie funcțiile de fragilitate, a fost considerată 0.6, la fel ca în Văcăreanu et al. (2017a și b) pentru teritoriul României, Luco et al. (2007) pentru teritoriul Statelor Unite ale Americii și în Silva et al. (2016) pentru continentul European.

Pentru acest capitol, s-au obținut hărți de hazard seismic uniform pentru intervale medii de recurență de 475 ani (ce corespund unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani), respectiv 2475 ani (2% în 50 ani), hărți de risc seismic uniform pentru o probabilitate anuală de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ ce sunt asociate valorilor de accelerație având probabilități de depășire de 10%/50, respectiv 2%/50 ani, hărți de coeficienți de risc ce exprimă raportul dintre valorile din hărțile de hazard seismic uniform pentru 475 ani, respectiv 2475 ani și cele din hărțile de risc seismic uniform, hărți de intervale medii de recurență pentru valorile PGA obținute pentru o probabilitate de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ asociate probabilităților de depășire de 10%/50, respectiv 2%/50 ani, și harta fractililor obținuți pentru aceleași valori PGA.

Pentru o bună comparație între hărțile bazate pe un hazard seismic uniform și cele obținute utilizând riscul seismic uniform, în figurile următoare sunt expuse rezultatele în termeni de accelerații de vârf ale terenului, în Fig. 4.3 pentru un hazard uniform cu un interval mediu de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10%

în 50 ani) și în Fig. 4.4 pentru o probabilitate de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ pentru intervale medii de recurență între 122 și 475 ani, exprimând riscul uniform.

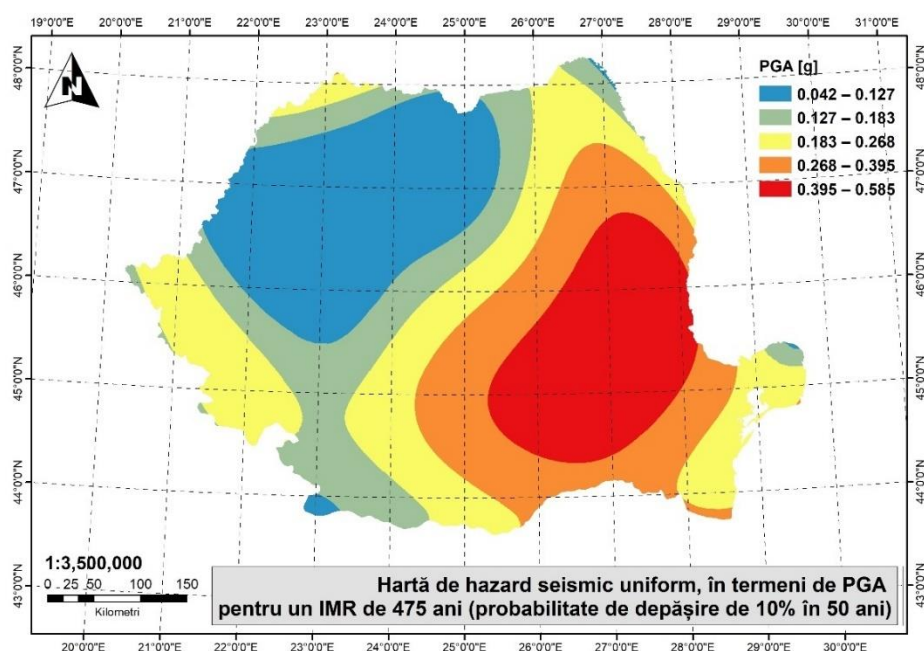


Fig. 4.3 Hartă de hazard seismic uniform, în termeni de PGA, pentru IMR de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani)

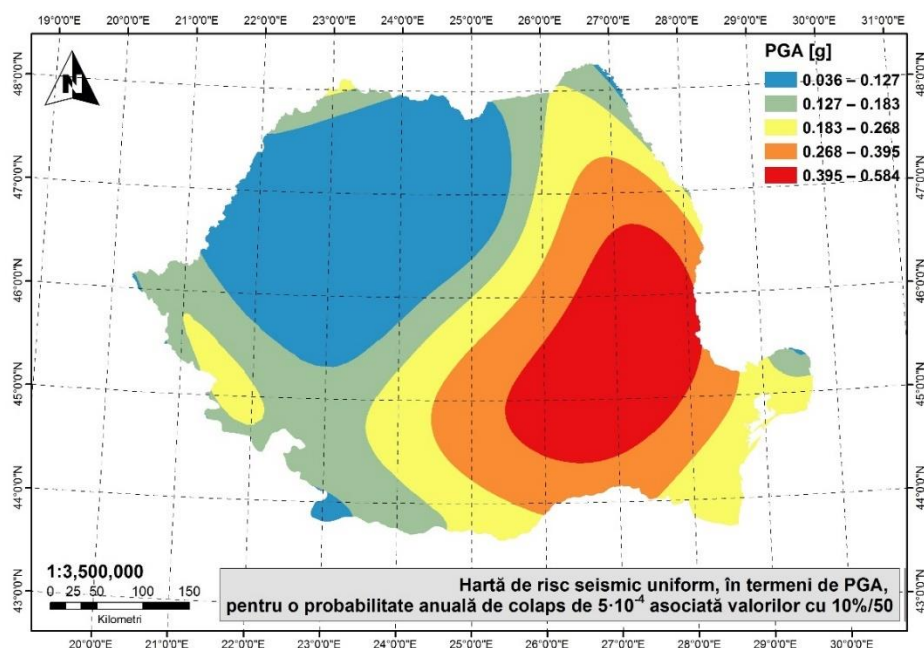


Fig. 4.4 Hartă de risc seismic uniform, în termeni de PGA, pentru o probabilitate anuală de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 10%/50

Forma hărților nu se schimbă considerabil prin utilizarea metodologiei de obținere a unui risc uniform, cu excepția faptului că valoarea minimă descrește de la 0.042g până la 0.036g în zona Bistrița, afectată de sursa Transilvania și în alte amplasamente valorile descreșc cu până la 0.064g, e.g. Mangalia.

Tot aici este reprezentată și harta ce reprezintă raportul dintre cele două, deoarece cuantifică cel mai bine diferențele dintre metodele utilizate și harta valorilor intervalelor

medii de recurență obținute din valorile accelerației de vârf a terenului pentru atingerea pragului de $5 \cdot 10^{-4}$.

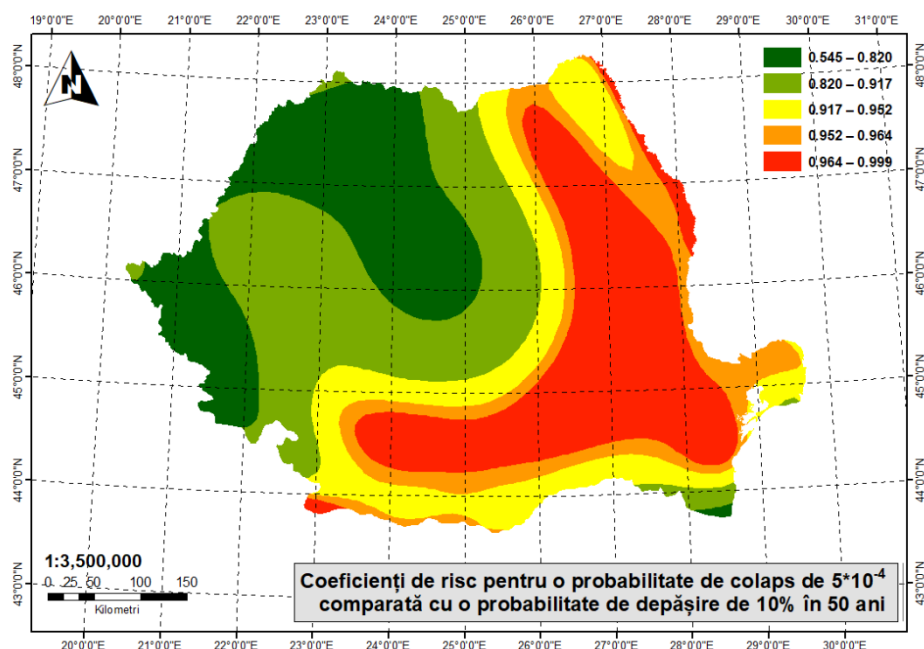


Fig. 4.5 Raportul dintre valorile pentru o probabilitate anuală de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 10%/50 și PGA pentru o probabilitate de depășire de 10% în 50 ani

În general, valorile accelerației de vârf a terenului de proiectare (pentru o probabilitate de depășire de 10% în 50 ani) ar rămâne aproape neschimbate în regiunile din fața Arcului Carpatic (inclusiv Vrancea) și ar scădea în regiunile din spatele Arcului Carpatic.

În figurile următoare este expus același tip de hărți, dar pentru un hazard uniform cu un interval mediu de recurență de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani), respectiv riscul uniform pentru o probabilitate de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ pentru intervale medii de recurență între 481 și 2480 ani.

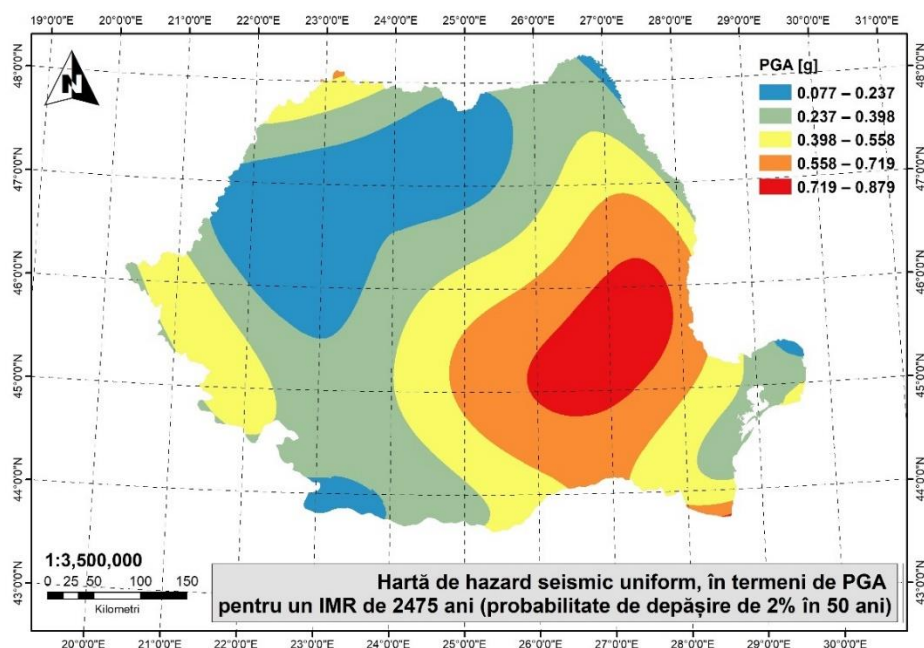


Fig. 4.6 Hartă de hazard seismic uniform, în termeni de PGA, pentru IMR de 2475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 2% în 50 ani)

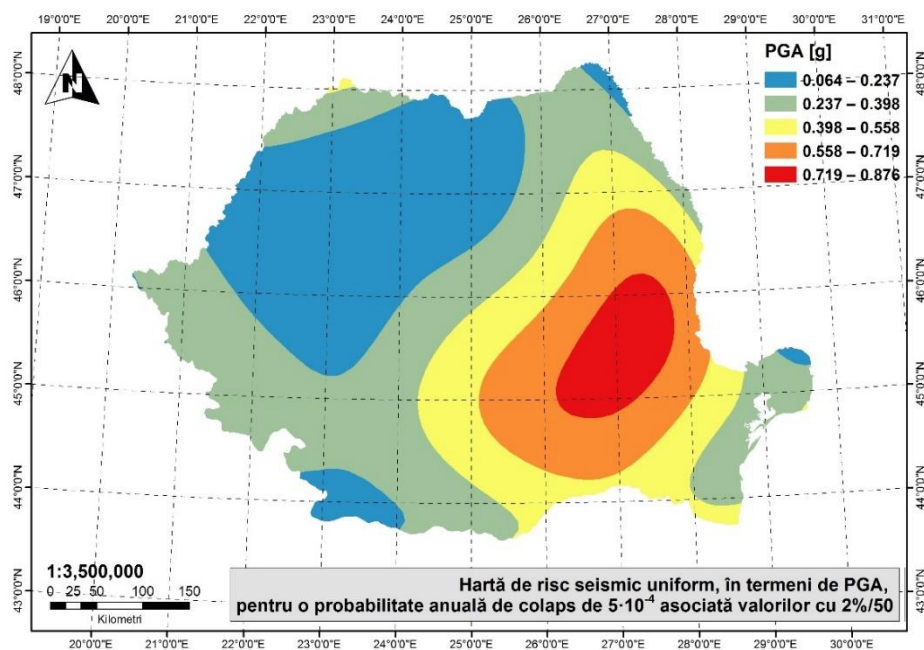


Fig. 4.7 Hartă de risc seismic uniform, în termeni de PGA, pentru o probabilitate anuală de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 2%/50

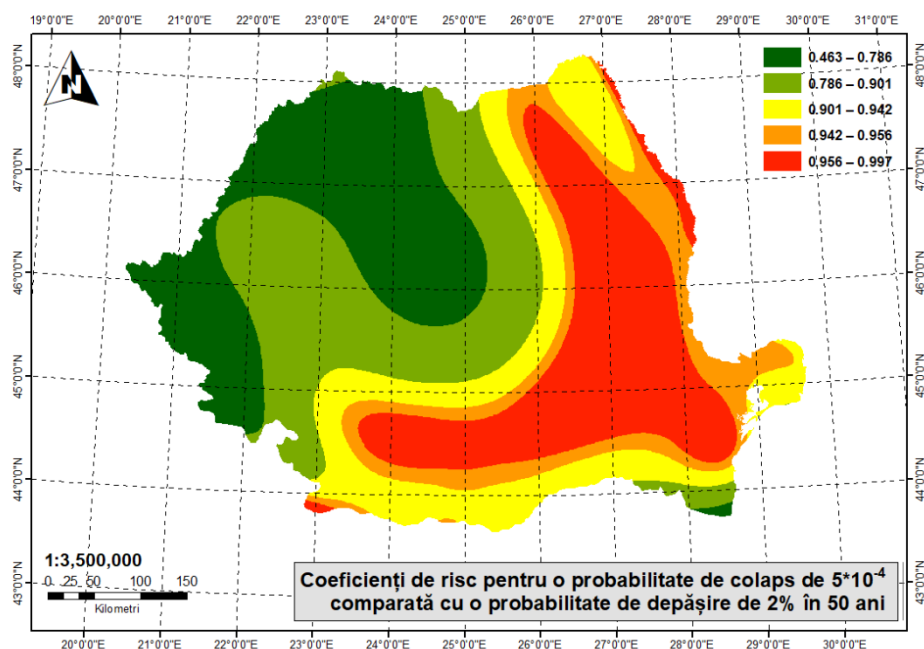


Fig. 4.8 Raportul dintre valorile pentru o probabilitate anuală de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ asociată valorilor cu 2%/50 și PGA pentru o probabilitate de depășire de 2% în 50 ani

Aceleași observații ca în cazul precedent pot fi făcute și pentru o probabilitate de depășire de 2% în 50 ani, și anume faptul că valorile accelerației de vârf a terenului de proiectare ar rămâne aproape neschimbate în regiunile din fața Arcului Carpat (inclusiv regiunile afectate de sursa intermediară Vrancea) și ar scădea considerabil în regiunile din spatele Arcului Carpat, cu rapoarte cu valori între 0.46 și 0.96.

Așa cum s-a observat, nivelul de risc este corelat, în principal, cu panta curbei de hazard, k . Astfel, se prezintă o hartă cu valorile probabilităților de cedare pentru un interval mediu de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani), ce poate fi comparată cu harta valorilor k obținută în Pavel et al. (2016), pentru a se

putea observa că valorile mari ale pantei de hazard k sunt asociate unor valori mari pentru probabilitățile de cedare, cu atât mai mult cu cât, acest lucru se întâmplă în zonele dominate de sursa seismică Vrancea intermediar.

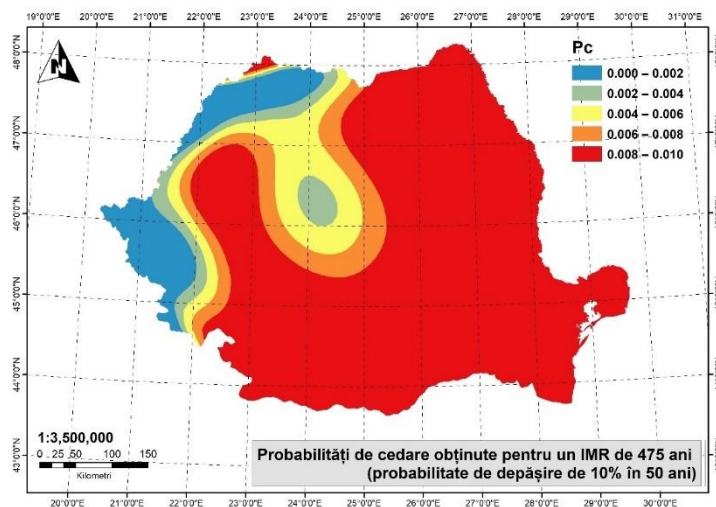


Fig. 4.9 Probabilități de cedare pentru un interval mediu de recurență de 475 ani (ce corespunde unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani)

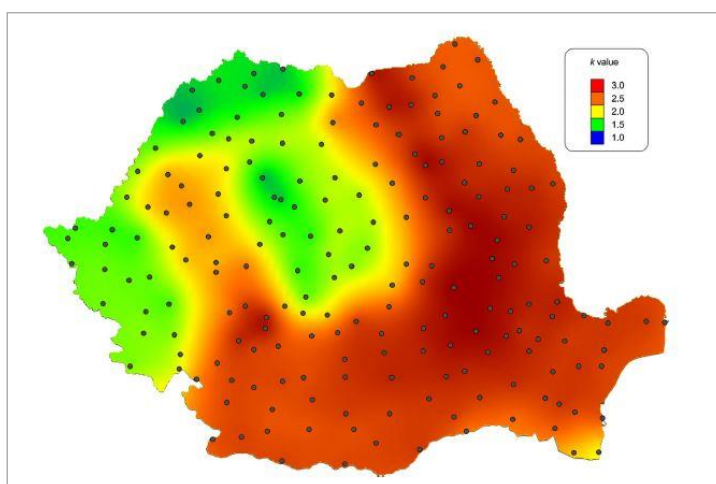


Fig. 4.10 Parametrul pentru colaps structural (depășire a stării limită ultime) pentru modelul BIGSEES (Pavel et al. 2016)

■ Concluzii

În acest capitol, ce poartă titlul de „Metodologii de obținere a hărților de risc seismic uniform”, s-au expus, în principal, rezultatele în ceea ce privește subiectul propus (hărți de risc seismic uniform). După consultarea bibliografiei de specialitate s-au analizat în detaliu metodologiile folosite în literatură referitoare la subiectul ales, s-au sintetizat concluziile în ceea ce privește metoda aleasă pentru obținerea unor rezultate cât mai clare și mai exacte, precum și rezultatele obținute. Hărțile de risc seismic uniform din acest raport s-au obținut prin cuantificarea valorii accelerației orizontale a terenului ce este asociată unui nivel de risc acceptabil. Riscul efectiv s-a obținut prin integrarea curbilor de hazard obținute dintr-o analiză probabilistică cu derivatele curbilor de fragilitate ce exprimă probabilitatea ca o anumită structură să se găsească într-o stare de avariere, sau să o depășească.

5. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

În prezenta teză s-au prezentat ajustările ce ar trebui făcute la valorile de proiectare ale accelerației de vârf a terenului pentru a putea atinge probabilități anuale uniforme în ceea ce privește cedarea unei structuri. În situația actuală a codurilor de proiectare bazate pe ipoteza unui hazard uniform, probabilitățile de cedare ar putea fi uniforme doar în cazul în care se consideră că nu ar exista nicio incertitudine în capacitatea unei clădiri de a rezista mișcării terenului pentru care a fost proiectată, ipoteză ce nu poate fi garantată.

În cazul în care se optează pentru valori rezonabile în ceea ce privește parametrii ce influențează rezultatele (adică abaterea standard ce descrie funcția de fragilitate sau probabilitate de cedare acceptată ce descrie nivelul de risc seismic), s-a observat că valorile accelerației de vârf a terenului de proiectare ar rămâne aproape neschimbate în regiunile din fața Arcului Carpatic (inclusiv Vrancea) și ar scădea în regiunile din spatele Arcului Carpatic, cu valori între 0.55 și 0.83. De asemenea, forma hărților nu se schimbă considerabil prin utilizarea metodologiei de obținere a unui risc uniform.

Accesul la informații și date, cât și cunoștințele actuale în ceea ce privește analiza probabilistă a hazardului seismic și modelarea structurală a structurilor oferă o înțelegere amănunțită a riscului seismic, lucru ce ar trebui luat în considerare în încercarea de a reduce riscul la care sunt supuse clădirile proiectate în zone susceptibile la astfel de dezastre naturale. Reducerea riscului seismic ar trebui să fie o prioritate pentru orice teritoriu aflat într-o zonă predispusă la cutremure, iar accentul ar trebui pus cu precădere pe reabilitarea clădirilor degradate și aducerea lor la același nivel de risc cu cele proiectate conform codurilor de proiectare în vigoare.

Evaluarea și reducerea pierderilor provocate de seisme ar trebui văzute ca o muncă de colaborare între stat, organizațiile guvernamentale locale, companii de asigurare din industrie și ingineri (Lungu et al. 2000).

Rezultatele studiilor în domeniu demonstrează că, în ciuda considerării aceleiași interval mediu de recurență, probabilitatea anuală de cedare a clădirilor noi diferă considerabil de la regiune la regiune. Această diferență provine din faptul că prăbușirea unei structuri nu este strict legată numai de valoarea accelerației de proiectare, ci și de alți parametri de intensitate ai mișcării terenului. În consecință, deși mișcarea terenului, dat fiind un interval mediu de recurență, este la fel pentru cele două amplasamente, probabilitățile de cedare asociate pot diferi semnificativ (Luco et al. 2007). Totodată, valorile absolute sunt sensibile la alegerea datelor de intrare (fractil, probabilitate țintă, IMR pentru PGA), dar valorile relative ale coeficientului de risc nu sunt sensibile, de aceea, se propune plecarea de la hărți de hazard uniform ajustate cu valorile coeficientului de risc pentru a obține riscul uniform.

Pierderile de vieți omenești și cele economice asociate dezastrelor provocate de cutremure sunt într-o creștere exponențială și acestea afectează societatea. Chiar și cu cele mai avansate tehnologii, este aproape imposibilă, în momentul de față, precizarea cu exactitate a locului și a momentului apariției unui cutremur, magnitudinii acestuia și consecințelor lui. Din această cauză, este importantă consolidarea clădirilor și a infrastructurii împotriva efectelor cutremurelor.

Este important de menționat faptul că această analiză a fragilității clădirilor din beton armat și a celor metalice este una preliminară, în sensul în care o analiză complexă necesită mult mai multe date de intrare pentru a putea ajunge la rezultate concludente. Abordarea aceasta se bazează pe faptul că se consideră valori mediane pentru parametrii asociați capacității și răspunsului seismic (de exemplu tipul de material sau sistemul structural), prin alegerea unui caz tipic de clădire.

Folosind mai multe clădiri index se ameliorează considerabil calitatea estimării funcțiilor de fragilitate, dar cu costul unor analize mai amănunțite și care consumă mai mult timp. Printre cele mai importante elemente ce pot fi considerate se regăsesc: regimul de înălțime al structurilor, diferitele tipuri structurale existente (clădiri în cadre, sisteme în cadre cu pereți etc.), neregularități geometrice sau structurale, în plan sau în înălțime. Deși programul de calcul folosit tinde să țină cont de diferitele variabilități ce pot apărea, un număr mai mare de clădiri supuse la mai multe înregistrări seismice este necesar.

5.1. Contribuții personale

De-a lungul realizării studiului teoretic al literaturii de specialitate și prin încercarea atingerii scopului acestei teze au fost aduse contribuții personale la elaborarea hărților de risc seismic uniform adaptate condițiilor de seismicitate din România, astfel:

- În capitolul 1 a fost descris stadiul actual în ceea ce privește elaborarea hărților de risc seismic uniform, împreună cu toate rezultatele disponibile până la această dată. În cel de al doilea capitol au fost expuse informațiile privind analizele de fragilitate, precum și stadiul actual ce privește subiectul acestora.

- În capitolul 3 al prezentei teze au fost descrise sistemele structurale proiectate pentru elaborarea unei analize de fragilitate. Astfel, au fost concepute și proiectate sistemele structurale, în număr de 18 (9 clădiri din beton armat și 9 clădiri metalice), și au fost calculate cu ajutorul software-ului ETABS (ver. 9.7). După proiectarea clădirilor, modelele structurale ale acestora au fost introduse în programul de calcul STERA 3D (ver. 8.6, 2016) și s-a făcut o analiză pentru a obține curbele de capacitate (de tip forță tăietoare de bază vs deplasare relativă de nivel) pentru fiecare structură în parte. Odată obținute curbele de capacitate, s-a făcut analiza de fragilitate a structurilor cu ajutorul programului FRACAS, în vederea obținerii valorilor mediane și ale abaterilor standard logaritmice ce descriu funcțiile de fragilitate. Tot aici s-a decis și justificat valoarea abaterii standard ce a fost folosită la elaborarea hărților de risc seismic uniform.

- În capitolul 4 a fost prezentată metodologia utilizată la dezvoltarea hărților de risc seismic uniform pentru România. Tot în cadrul acestui capitol a fost descris și calculul iterativ al riscului seismic și a fost elaborat un cod Matlab în vederea obținerii rezultatelor (cod ce este prezentat în Anexa A.2, varianta extinsă). În subcapitolul 4.3, au fost obținute rezultatele cele mai recente pentru teritoriul României. Cu ajutorul software-ului de cartografiere și analiză spațială, ArcMap (din cadrul setului de programe ARCGIS), s-au obținut hărți de hazard seismic uniform pentru intervale medii de recurență de 475 ani (ce corespund unei probabilități de depășire de 10% în 50 ani), respectiv 2475 ani (2% în 50 ani), hărți de risc seismic uniform pentru o probabilitate anuală de colaps de $5 \cdot 10^{-4}$ ce sunt asociate probabilităților de depășire de 10%/50, respectiv 2%/50 ani, hărți de coeficienți de risc ce exprimă raportul dintre valorile corespunzătoare din hărțile de hazard seismic uniform

și din cele de risc seismic uniform pentru 475 ani, respectiv 2475 ani, hărți de intervale medii de recurență pentru valorile PGA obținute pentru o probabilitate anuală de cedare de $5 \cdot 10^{-4}$ asociate probabilităților de depășire de 10%/50, respectiv 2%/50 ani, și harta fractililor obținuți pentru aceleași valori PGA.

5.2. Direcții viitoare de cercetare

Analizând situația actuală și elaborând hărțile de risc seismic uniform pentru România, s-au constatat următoarele dezvoltări viitoare de cercetare:

- Elaborarea unui set extins de clădiri index pentru a ameliora calitatea estimării funcțiilor de fragilitate, prin variația mai multor elemente ce influențează comportamentul unei structuri în timpul unui eveniment seismic. Printre acestea se pot găsi: regimul de înălțime al structurilor, diferitele tipuri structurale existente (clădiri în cadre, sisteme în cadre cu pereți etc.), neregularități geometrice sau structurale, în plan sau în elevație.
- Folosind metodologia curentă ce vizează riscul seismic uniform se obțin aceleași valori de proiectare pentru orice tip de clădire dintr-un anumit amplasament. Consider că ar fi benefică dezvoltarea hărților de risc seismic uniform pentru fiecare tipologie de clădire (metalică, beton armat, zidărie și lemn, sau chiar pentru structuri hibride). Pentru aceasta, este necesară obținerea valorilor abaterii standard logaritmice ce descriu funcțiile de fragilitate pentru diferite tipologii structurale ale clădirilor.
- În mod evident, orice schimbare în analiza hazardului seismic al României (de la utilizarea unor noi relații de atenuare la actualizarea catalogului de cutremure cu evenimente seismice) pot produce schimbări în curbele de hazard utilizate în acest studiu, deci rezultatele pot diferi în anumite amplasamente.
- Totodată, modelul poate fi extins și la altceva decât structuri pentru clădiri, și anume rețele de utilități, poduri sau alte tipuri de rețele de transport.

LISTĂ DE PUBLICAȚII ȘI ACTIVITĂȚI EXTRA-CURRICULARE

Articole în reviste cotate ISI:

Văcăreanu R, Pavel F, Craciun I, Colibă V, Arion C, Aldea A, Neagu C (2018) – Risk-targeted maps for Romania, *Journal of Seismology*, Springer, DOI 10.1007/s10950-017-9713-x, volume 22, issue 2, pp 407–417;

Articole în volume indexate ISI:

Olteanu P, Colibă V, Văcăreanu R, Pavel F, Ciuiu D (2016) - Analytical seismic fragility functions for dual RC structures in Bucharest, *Springer Natural Hazards: The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt. Proceedings of the Symposium Commemorating 75 years from November 10, 1940 Vrancea Earthquake*. ISBN 978-3-319-29844-3;

Craciun I, Văcăreanu R, Pavel F, Colibă V (2018) - On the Ground Motions Spatial Correlation for Vrancea Intermediate-Depth Earthquakes. In: Văcăreanu 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 la conferințe naționale și internaționale

Văcăreanu R, Pavel F, Colibă V, Craciun I (2016) - Uniform risk-targeted maps for Romania, ESC2016-336-1. Articol prezentat la 35th General Assembly of the European Seismological Commission, Trieste, Italia, 4-10 Septembrie, 2016;

Colibă V, Văcăreanu R, Pavel F, Craciun 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;

Văcăreanu R, Pavel F, Colibă V, Craciun I (2017) - 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, Văcăreanu R, Calotescu I, Colibă V (2017) - Design displacement response spectra for Southern and Eastern Romania, *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 16WCEE 2017, Santiago Chile, 9 – 13 Ianuarie, 2017;

Pavel F, Văcăreanu R, Colibă V, Calotescu I, (2017) - Life-cycle seismic loss assessment for RC frame structures in Bucharest, Romania, *12th International Conference on Structural Safety and Reliability ICOSSAR*, Viena, Austria, August 2017;

Pavel F, Stanescu D, Văcăreanu R, Colibă V, Craciun I (2018) - Life-cycle and resilience analysis of RC buildings in Bucharest, Romania. *16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE)*, Thessaloniki, Grecia, 18-21, Iunie 2018.

Articole în reviste:

Văcăreanu R, Colibă V (2017) - Risk-targeted maps for seismic design. A brief review of the state-of-the-art. *Romanian Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics*, 62(1), pp. 80–97.

Altele:

Membru al comisiei de organizare a conferinței „the 6th National Conference on Earthquake Engineering and 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology”, 14-16, Iunie 2016, București, România;

Membru al comisiei de organizare a simpozionului „Symposium Commemorating 75 Years from November 10, 1940 Vrancea Earthquake”, 10 Noiembrie 2015, București, România.

BIBLIOGRAFIE

1. ASCE STANDARD (2010) ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, ISBN 978-0-7844-1085-1;
2. ASCE (2005a) - Seismic Design Criteria for Structures, Systems and Components in Nuclear Facilities, (ASCE Standard 43-05). American Society of Civil Engineers, Reston, VA;
3. ASCE (2005b) - Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE Standard 7-05, Including Supplement No. 1). American Society of Civil Engineers, Reston, VA;
4. Building Seismic Safety Council (2009) - NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, FEMA P-750, Washington, D.C.;
5. CEN (2004) - Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1:2004. Brussels, Belgium;
6. Colibă V, Văcăreanu R, Pavel F, Craciun 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;
7. Danciu L, Woessner J, Giardini D and SHARE Consortium (2013) A community-based Probabilistic Seismic Hazard Maps for the Euro- Mediterranean Region. Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Viena, Austria;
8. Douglas J, Ulrich T, Negulescu C (2013) Risk-targeted seismic design maps for mainland France. Springer Science, 25 octombrie 2012 DOI 10.1007/s11069-012-0460-6;
9. Douglas J, Gkimprxis A (2017) – Using targeted risk in seismic codes: A summary of the state of the art and outstanding issues, Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering and 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Bucharest, CONSPRESS, p. 3-10;
10. Duan X, Pappin J (2008) A procedure for establishing fragility functions for seismic loss estimate of existing buildings based on nonlinear pushover, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China;
11. FEMA (2009) Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. Hazus®–MH 2.1. Technical Manual. <http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/24609?id=5120>;
12. FEMA - NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures Volume I: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary, FEMA P-1050-1/2015 Edition;

13. FEMA - NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures Volume II: Part 3 Resource Papers, FEMA P-1050-2/2015 Edition;
14. Fiorini E, Bazzurro P and Silva V (2014) Preliminary results of risk-targeted design maps for Italy, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turcia;
15. Freeman SA (1998) The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design;
16. Haselton CB, Whittaker AS, Hortacsu A, Baker JW, Bray J, Grant DN (2012) Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, Lisabona, Portugalia;
17. Kennedy RP (2011) - Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design 241(3): 648-656;
18. Kramer SL (1996) Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey;
19. Luco N, Ellingwood B, Hamburger RO, Hooper JD, Kimball JK, Charles A. Kircher CA (2007) Risk-Targeted versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States, SEAOC 2007 Convention Proceedings;
20. Luco N, Bachman RE, Crouse CB, Harris JR, Hooper JD, Kircher CA, Caldwell PJ, Rukstalesa KS (2015) Updates to Building-Code Maps for the 2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions, Earthquake Spectra, Volume 31, No. S1, pp S245–S271, Decembrie 2015;
21. Lungu D, Văcăreanu R, Aldea A, Arion C (2000) Advanced Structural Analysis. Conspress, București;
22. Lungu D , Aldea A, Demetriu S, Craifaleanu I (2004) Seismic strengthening of buildings and seismic instrumentation – two priorities for seismic risk reduction in Romania, Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, DOI: 10.1556/AGeod.39.2004.2-3.8
23. Martin C, Combes P, R S, Lignon G, Fioravanti A, Carbon D, Monge O, Grellet B (2002) Revision du zonage sismique de la France: Etude probabiliste. Technical report. Rapport de Phase 3, GEO-TER, Franța;
24. McGuire, R.K. (2004) - Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA;
25. MDRAP (2013) P100-1/2013. Cod de proiectare seismică – Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri, Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice, București, România;
26. Pavel F, Văcăreanu R, Douglas J, Radulian M, Cioflan C, Barbat A (2016) - An updated probabilistic seismic hazard assessment for Romania and comparison with the approach and outcomes of the SHARE project. Pure and Applied Geophysics 173(6): 1881-1905;
27. Pitilakis K, Crowley H, Kaynia A (Eds.) (2014) SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk. Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities, Springer;
28. Porter K (2016) A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk, noiembrie 2016;
29. Porter K, Kennedy R, Bachman R (2007) Creating Fragility Functions for Performance-Based Earthquake Engineering, Earthquake Spectra, 23(2): 471–48;

30. Reed JW, Kennedy RP (1994) Methodology for Development Seismic Fragilities, Final Report TR-103959, EPRI;
31. Rossetto T, Elnashai A (2005) A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures, *Engineering Structures* 27 (2005) 397–409;
32. Rossetto T, Gehl P, Minas S, Galasso C, Duffour P, Douglas J, Cook O (2016) FRACAS: A capacity spectrum approach for seismic fragility assessment including record-to-record variability, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*;
33. Rossetto T, Gehl P, Minas S, Duffour P, Douglas J, Galasso C, Nassirpour A (2016) FRAgility through CAPacity Spectrum assessment v.1.0 User Manual;
34. Silva V, Crowley H, Bazzurro P (2014) Risk-targeted hazard maps for Europe, Second European conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, 25 – 29 august, 2014;
35. Silva V, Crowley H, Bazzurro P (2016) - Exploring Risk-Targeted Hazard Maps for Europe. *Earthquake Spectra*: May 2016, Vol. 32, No. 2, pp. 1165-1186;
36. Sucuoğlu H, Akkar S (2014) - Basic Earthquake Engineering from Seismology to Analysis and Design, Springer, eBook ISBN 978-3-319-01026-7, Softcover ISBN 978-3-319-01025-0, DOI 10.1007/978-3-319-01026-7;
37. Ulrich T, Negulescu C, Douglas J (2014a) Fragility curves for risk-targeted seismic design maps, *Bull Earthquake Eng* 12:1479–1491 DOI 10.1007/s10518-013-9572-y;
38. Ulrich T, Douglas J and Negulescu C (2014b) Seismic risk maps for Eurocode 8 designed buildings, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turcia;
39. Văcăreanu R, Aldea A, Lungu D (2007) Structural Reliability and Risk analysis, note de curs, București, România.
40. Văcăreanu R., Pavel F, Aldea A. (2013) - On the selection of GMPEs for Vrancea subcrustal seismic source, *Bull. Eq. Eng.*, 11(6), 1867–1884;
41. Văcăreanu R, Aldea A, Lungu D, Pavel F, Neagu C, Arion C, Demetriu S, Iancovici M (2016) - Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Romania. *Earthquakes and Their Impact on Society*, Springer Natural Hazards Book Series DOI 10.1007/978-3-319-21753-6;
42. Văcăreanu R, Pavel F, Craciun I, Colibă V, Arion C, Aldea A, Neagu C (2017a) – Risk-targeted maps for Romania, *Journal of Seismology*, Springer, DOI 10.1007/s10950-017-9713-x;
43. Văcăreanu R, Pavel F, Colibă V, Craciun 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;
44. Vanzi I, Marano GC, Monti G, Nuti C (2015) - A synthetic formulation for the Italian seismic hazard and code implications for the seismic risk. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 77: 111–122;
45. <http://infp.infp.ro/bigsees/default.htm>;
46. Pagină web a Italian Civil Protection Department - Presidency of the Council of Ministers,
http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/en/descrizione_sismico.wp?pagtab=3#pag-content, accesat la data de: 24.06.2016.