

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



**ANALIZA RISCULUI SEISMIC
A TERITORIULUI MUNICIPIULUI
CHIȘINĂU – REPUBLICA MOLDOVA**

Cutia Evgheni

Conducător de doctorat : prof. univ. dr. ing. Petru Mihai

IAȘI, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 26 septembrie 2024 la ora 12:00 în sala 0.1R, corp R , va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"ANALIZA RISCULUI SEISMIC A TERITORIULUI MUNICIPIULUI CHIȘINĂU –
REPUBLICA MOLDOVA"**

elaborate de doamna **CUTIA EVGHENI** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. Prof. univ. dr. ing. Andrei Burlacu
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | președinte |
| 2. Conf. univ. dr. ing. Petru Mihai
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | conducător de doctorat |
| 3. Prof. univ. dr. ing. Radu Văcăreanu
Universitatea Tehnică de Construcții București | referent oficial |
| 4. Conf. univ. dr. ing. Anatolie Taranenco
Universitatea Tehnică a Moldovei, Republica Moldova | referent oficial |
| 5. Conf. univ. dr. ing. Ionuț-Ovidiu Toma
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | referent oficial |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof. univ. dr. ing. Dan Cașcaval

Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagîț

Cuprins

Capitolul 1. Introducere. Obiectivele cercetării, stadiul pe plan național și internațional	1
1.1. Necesitatea și oportunitatea cercetării	1
1.2. Stadiul actual al cercetării pe plan național și internațional	1
1.3. Obiectivele cercetării.....	2
Capitolul 2. Hazardul seismic.....	4
2.1. Metode de analiză a hazardului seismic	4
2.1.1. Analiza deterministă de hazard seismic.....	4
2.1.2. Analiza neodeterministă de hazard seismic	5
2.1.3. Analiza probabilistă de hazard seismic.....	5
2.1.4. Incertitudini în analiza hazardului seismic.....	6
2.2. Determinarea hazardului seismic al Republicii Moldova.....	7
2.2.1. Catalogul de cutremure	8
2.2.2. Relația de recurență a magnitudinilor.....	8
2.2.3. Parametrii surselor seismice.....	10
2.2.4. Condiții locale de teren	14
2.2.5. Relații de atenuare	14
2.2.6. Calculul hazardului.....	15
Capitolul 3. Vulnerabilitatea seismică.....	18
3.1. Metode de evaluare a vulnerabilității seismice	18
3.1.1. Metode empirice	18
3.1.2. Metode analitice	20
3.2. Caracteristica generală a fondului locativ din municipiul Chișinău	22
3.2.1. Clasificarea fondului locativ	22
3.2.2. Specificul zonei cercetate și metodologia propusă.....	24
3.3. Vulnerabilitatea fondului construit în zona cercetată.....	27
3.4. Incertitudinile în funcțiile de vulnerabilitate și fragilitate	30
Capitolul 4. Calculul riscului seismic	31
4.1. Estimarea daunelor structurii și pierderilor economice.....	31

4.2. Estimarea numărului de victime posibile	33
4.2.1. Metodologia HAZUS.....	33
4.2.2. Metodologia propusă de (Cobrun & Spence, 2002)	34
4.3. Scenarii de simulări	35
4.3.1. Scenariu 1. Moment magnitudine $M_w=7,7$	36
4.3.2. Scenariu 2. Accelerația de vârf a terenului $a_g=0.2g$	38
Capitolul 5. Măsuri și soluții la îmbunătățirea siguranței fondului construit în municipiul Chișinău.....	41
5.1. Recomandări tehnice	42
5.1.1. Recomandări pentru clădiri noi	42
5.1.2. Recomandări pentru clădiri la clădiri existente.....	43
5.2. Recomandări legislative pentru îmbunătățirea siguranței seismice a fondului locativ	44
Capitolul 6. Concluzii generale, contribuții și valorificarea cercetărilor.....	47
6.1. Concluzii generale.....	47
6.2. Contribuțiile autorului	48
6.3. Direcții viitoare de cercetare.....	48
Bibliografie.....	50

Capitolul 1. Introducere. Obiectivele cercetării, stadiul pe plan național și internațional

1.1. Necesitatea și oportunitatea cercetării

Cutremurele de pământ sunt cele mai periculoase procese geologice pe suprafața planetei. Pe lângă schimbările de relief, mișcările scoarței terestre pot provoca și alte calamități naturale cum ar fi tsunami, alunecări de teren, lichefierea solului ș.a. Efectele cutremurelor în zonele urbane sunt și mai dezastruoase. Incendii puternice provocate de ruperea conductelor de gaz se pot extinde pe zone întinse așa cum s-a produs în urma cutremurului de pământ în Kobe din 1995 care a lăsat fără adăpost circa 300 000 de oameni (NIST, 1996); drumuri blocate, poduri distruse, colaps local sau total al edificiilor instituțiilor publice și private sunt doar câteva din consecințele acestui cutremur devastator.

În pofida faptului că cutremurele puternice sunt evenimente naturale rare, ele sunt caracterizate de o expunere largă pentru societate, în special în zone urbane aglomerate. Pentru micșorarea sau chiar evitarea daunelor economice și de vieți omenești, studiile de risc seismic pot ajuta în prevenirea daunelor potențiale prin fortificarea punctelor vulnerabile înainte de producerea unui cutremur și planificarea metodelor de intervenție post-seism. Termenul de *risc* este definit ca pierderi așteptate (de vieți omenești, persoane rănite, daune materiale și de activități economice) în urma unui hazard pentru o zonă cercetată într-o perioadă dată (WMO, 1999).

Din cele expuse mai sus se poate concluziona că teritoriul cercetat este afectat de un șir de cutremure majore și este oportună dezvoltarea și cercetarea temei de analiză a hazardului seismic, vulnerabilității și a produsului generic a acestor factori – riscul seismic.

1.2. Stadiul actual al cercetării pe plan național și internațional

Analiza riscului, de obicei, este văzută ca o procedură compusă din trei părți: (1) analiza hazardului, (2) definirea și evaluarea vulnerabilității elementelor supuse hazardului (riscului) și (3) evaluarea riscului ca convoluția a hazardului, vulnerabilității și valorii elementelor expuse riscului (Varnes, 1984). În alte cuvinte, analiza riscului seismic este un proces complex ce combină părțile slabe ce pot fi depistate într-un sistem cercetat și permite evaluarea informației efectelor produse de un hazard seismic dat cu scopul diminuării pagubelor provocate.

Analiza și monitorizarea hazardului și a riscului seismic reprezintă un subiect de studiu important la nivel mondial. În acest context, printre proiectele Europene derulate pe parcursul programului de cercetare doctorală le putem menționa pe următoarele:

- *Real-time earthquake rIsk reduction for reSilient Europe – RISE* (septembrie 2019 – februarie 2023).
- *Improving seismic risk assessment tools and methodologies for nuclear safety – METIS* (septembrie 2020 – septembrie 2022).

- **SEISMIC-RISK** (august 2020 – noiembrie 2023)
- *Seismic Hazard Harmonization in Europe – SHARE* (iunie 2009 – noiembrie 2012)

Un șir de proiecte europene au stat la baza creării proiectului SHARE; printre aceste proiecte se numără: SYNER-G, GEISER, PERPETUATE, NERA, NERIES, SAFER. (<http://www.share-eu.org/node/6.html>)

- *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns – RISK-EU* (februarie 2001 – septembrie 2004)

În ceea ce privește proiectele pe plan național, la acest capitol, Republica Moldova se află într-o etapă de stagnare. Instituția responsabilă de evaluarea hazardului și riscului seismic este Institutul de Geologie și Seismologie. Conform paginii oficiale a instituției, ultimele cercetări naționale la acest subiect au avut loc în anul 2014. Printre cercetările la acest subiect, se pot enumera (IGS, 2008):

- 11.817.08.37A Dezvoltarea sistemelor moderne de înregistrare, stocare și management a datelor în monitorizarea seismică a teritoriului Republicii Moldova.
- 1.817.08.38A Dezvoltarea metodelor de cuantificare a hazardului și riscului seismic, consistente cu pre standardul Eurocode 8 (Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur).
- 1.817.08.39A Cercetări complexe ale structurii geologice și condițiilor geologo-inginerești ale teritoriului Republicii Moldova privind evaluarea proceselor geologice distructive.
- *Rapid Earthquake Damage Assessment Consortium – REDACT.*
- *Integrated Networks for Hazard Risk Management – HAZARM.*

1.3. Obiectivele cercetării

Din cele relatate mai sus, se poate observa faptul că cercetări în domeniul hazardului, vulnerabilității și riscului seismic al Republicii Moldova nu s-au efectuat din 2014, iar despre riscul seismic în zone urbane nu există nici un proiect național care să reflecte această problemă. Așadar, această lucrare reprezintă o inițiativă de a cerceta hazardul, vulnerabilitatea și riscul seismic la care este expus zona municipiului Chișinău. Principalele obiective pe care le urmărește autorul (tabelul 1.1) sunt:

OBIECTIV 1 – Evaluarea hazardului seismic

Evaluarea hazardului seismic reprezintă cel mai important pas nu doar în analiza riscului seismic, dar are și un șir de posibilități de dezvoltare conexe.

În contextul în care Republica Moldova nu are oficial o hartă de zonare seismică în termeni fizici (PGA, PGV ș.a.) este imperativ de analizat și calculat pericolul asociat cu acest hazard. Astfel poate fi atins și un alt obiectiv colateral – crearea hărții hazardului seismic a teritoriului Republicii Moldova și generarea curbelor hazardului seismic pentru teritoriul municipiului Chișinău. Pe lângă harta hazardului seismic, evaluarea hazardului seismic reprezintă o etapă principală în evaluarea vulnerabilității fondului locativ și managementul riscului seismic.

OBIECTIV 2 – Evaluarea vulnerabilității seismice

Un alt punct vital îl constituie evaluarea fondului locativ al zonei cercetate (figura 1.2). Volumul imens de date necesare pentru a fi prelucrate se va prelucra în capitolul III al prezentei teze. Pentru a reduce și omogeniza structurile expuse evenimentelor seismice, s-a ales o zonă cu clădiri reprezentative municipiului Chișinău.

Pentru fiecare tip de structură cercetată s-a atribuit un indice de vulnerabilitate și s-au elaborat curbele de vulnerabilitate și fragilitate. Curbele de fragilitate sunt folosite la determinarea stării de avariere posibilă a unui tip de structură pentru o intensitate sau o valoare a accelerației terenului. Curbele de vulnerabilitate corelează starea de degradare medie a unei structuri cu un parametru a intensității și exprimă în termeni pierderile economice ca raportul dintre costul de reparație și costul construcției.

OBIECTIV 3 – Calculul riscului seismic a zonei municipiului Chișinău

Al treilea obiectiv reprezintă principalul rezultat așteptat în urma elaborării tezei. Acest obiectiv are ca bază determinarea pierderilor economice și sociale a teritoriului municipiului Chișinău în urma unui eveniment seismic major. În capitolul 4 sunt prezentate două scenarii de bază în care s-a determinat pierderile. Primul scenariu reprezintă cel mai probabil cutremur cu cea mai înaltă magnitudine, și este asociat cu un eveniment seismic istoric din anul 1940 când s-a înregistrat un cutremur puternic cu efecte fatale în România, Republica Moldova și Bulgaria. Încercând analiza acestui scenariu, se tinde spre o mai bună înțelegere a riscului seismic din teritoriul cercetat. În al doilea scenariu se determină pierderile economice cauzate de cel mai puternic seism ce poate apărea cu o probabilitate de 10% într-un an, pe o perioadă de 475 de ani și determinat probabilistic în capitolul 2. În primul scenariu se va considera cel mai puternic cutremur înregistrat în ultimii 100 de ani, iar în al doilea scenariu se va considera accelerația maximă de vârf a terenului pentru zona cercetată, care va fi determinată din obiectivul 1, capitolul 2. Estimarea victimelor posibile se va efectua conform metodologiei HAZUS (Hazard Analysis and Loss Estimation Methodology) propusă de FEMA (Federal Emergency Management Agency) pentru evaluarea potențialului de pierderi umane, de bunuri și de infrastructură în cazul unui cutremur. Rezultatele analizei vor fi prezentate în formă de histograme și hărți.

OBIECTIV 4 – Recomandări de completare a legislației și a normativelor în vigoare

Recomandările în urma calculelor și datelor obținute constituie ultimul obiectiv primar în cercetarea de față. Recomandările sunt împărțite în două categorii principale: recomandări tehnice și recomandări legislative. Recomandările tehnice țin de intervențiile fizice în structura clădirilor și obiectelor existente sau a celor în etapa de proiectare/implementare. Recomandările de natură legislativă și structurală vor fi analizate în capitolul 5 al prezentei lucrări. Reformele legislative în contextul hazardului și riscului seismic sunt importante deoarece pot ajuta la identificare și gestionarea riscurilor asociate cu cutremure.

Capitolul 2. Hazardul seismic

2.1. Metode de analiză a hazardului seismic

Hazardul sau pericolul generat de un cutremur de pământ și severitatea acestuia depind de niște factori cum ar fi: condițiile geologice și topografice a amplasamentului, tipul și direcția mecanismului de falie, energia eliberată din epicentrul cutremurului ș.a. Primele încercări de a caracteriza puterea cutremurelor de pământ se bazează pe descrieri calitative ale efectelor seismelor. Odată cu dezvoltarea tehnologiilor și mecanismelor ce permit monitorizarea vibrațiilor scoarței terestre, a fost posibil și caracterizarea cantitativă a cutremurelor.

Intensitatea seismică – reprezintă o metodă de a măsura calitativ efectele produse de un cutremur. Permite măsurarea efectelor locale percepute de oameni. Prima scară a intensității seismice a fost propusă de Michele de Rossi în 1874. La momentul actual, pe plan internațional, sunt folosite 4 scări a intensității seismice:

- Scara de intensitate seismică Mercalli Modificată (MM)
- Scara de intensitate seismică Medvedev-Sponheur-Karnik (MSK-64)
- Scara Microseismică Europeană (EMS-98)
- Scara intensității seismice JMA

Magnitudinea seismică – o măsură cantitativă de evaluare a energiei degajate la un cutremur ce permite caracterizarea acestuia. Măsurările magnitudinii sunt dictate de mișcarea maximă a seismografului. Există diferite scări de magnitudine, cele mai folosite sunt magnitudinea după scara Richter și magnitudinea momentului seismic.

Un alt parametru care caracterizează mișcările pământului este accelerația de vârf a terenului, (eng. **Peak Ground Acceleration – PGA**) ce descrie accelerația maximă a unui cutremur de pământ într-o zonă determinată.

Analiza hazardului seismic presupune evaluarea cantitativă și calitativă a parametrilor descriși mai sus. În prezent sunt răspândite mai multe metode de evaluare a hazardului seismic, printre acestea putând fi evidențiate următoarele: metoda deterministă, metoda neodeterministă și metoda probabilistă. Toate metodele se bazează pe același set de date analizate (Input), însă rezultatul final este diferit (Output).

2.1.1. Analiza deterministă de hazard seismic

Metoda de analiză deterministă se bazează pe evaluarea unui scenariu de cutremur predefinit și nu ține cont de probabilitatea apariției acestuia pe perioada de expunere specificată. Metodologia deterministă poate fi etapizată după cum urmează (vezi figura 2.1): (INFP, 2020)

- I. Identificarea și caracterizarea a tuturor surselor de cutremur.
- II. Selecția relațiilor de atenuare.
- III. Definirea cutremurului de control.

- IV. Exprimarea hazardului seismic a amplasamentului în termeni parametrilor de mișcare a solului (PGA , S_a).

2.1.2. Analiza neodeterministă de hazard seismic

În metoda neodeterministă sunt evaluate scenarii de cutremur ce oferă un șir de date ale mișcărilor terenului din care se pot extrage valorile maxime a deplasării, vitezei și accelerației terenului (Panza et al., 2011).

Abordarea neodeterministă produce scenarii de cutremur bazate pe serii de timp obținute analitic. Metoda de analiză furnizează valori ale parametrilor mișcărilor seismice a terenului pe baza modelării propagării undelor seismice la scara națională, regională sau locală. Metoda dată nu include în sine aplicarea relațiilor de atenuare, însă primește valorile mișcării terenului drept un produs generic a magnitudinii sursei seismice și funcția Green ce corespunde mediului de propagare a undelor seismice. (Văcăreanu et al., 2015).

2.1.3. Analiza probabilistă de hazard seismic

Analiza probabilistă de hazard seismic (APHS) a devenit un standard în inginerie, urbanism, planificarea teritoriului și alte domenii, mai mult de peste patru decenii. Acest tip de analiză este folosit de mult timp pentru a oferi date privind mișcările de teren la proiectarea structurilor inginerești, care necesită valorile hazardului în contextul duratei de viață a construcției. Pentru a înțelege mai bine aplicabilitatea acestei metode, este necesar de menționat conceptul de perioadă medie de revenire sau intervalul mediu de recurență și probabilitățile asociate cu diferite grade de importanță ale clădirilor. Perioada medie de revenire (IMR) se referă la intervalul de timp estimat între două evenimente seismice de intensitate semnificativă. Probabilitatea asociată indică probabilitatea ca un astfel de eveniment să se producă într-o anumită perioadă, de obicei exprimată în ani. Aceste valori sunt fundamentale în stabilirea nivelurilor de siguranță necesare pentru diverse tipuri de construcții. Metodologia probabilistă poate fi etapizată după cum urmează (INFP, 2020):

- I. Identificarea și caracterizarea tuturor surselor de cutremur
- II. Caracterizarea seismicității pentru fiecare sursă specificând relația de recurență a cutremurului
- III. Selectarea relațiilor de atenuare
- IV. Evaluarea atenuării energiei pentru a obține parametrul de mișcare a terenului cu o probabilitate dată într-o anumită perioadă de timp

Scopul principal al acestei metodologii constă în estimarea probabilității că un parametru (accelerația, intensitate ș.a.) va fi depășit într-o perioadă specificată pe un amplasament specificat. La final, hazardul seismic este reprezentat printr-o curbă numită "curba hazardului seismic" (figura 2.3), ce reprezintă reducerea probabilității de depășire a creșterii intensității sau a altui parametru ce caracterizează hazardul seismic.

Așadar, pentru determinarea hazardului seismic într-un amplasament dat, efectele tuturor cutremurelor de diferite magnitudini, ce au loc în diferite locații cu o probabilitate de apariție diferită, sunt integrate într-o curbă ce descrie probabilitatea de depășire a mișcărilor de teren de diferite nivele într-un amplasament dat pe o perioadă specificată, și în forma matematică poate fi scrisă (Cornell, 1968):

$$E(Z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \int_{m_0}^{m_u} \int_{r=0}^{\infty} f_i(m) f_r(r) P(Z > z | m, r) dr dm \quad (2.1)$$

, unde $E(Z)$ este numărul așteptat a mișcărilor de teren de nivel z pe o perioadă de timp t ; α_i – este rata medie de producere a cutremurelor cuprinsă între magnitudinile minimă m_0 și maximă m_u ; $f_i(m)$ – este densitatea de repartiție a funcției magnitudinii cu sursa i ; $f_r(m)$ – este densitatea de repartiție a funcției distanței epicentrale între diferite puncte din sursa i pentru amplasamentul analizat; $P(Z > z | m, r)$ – denotă probabilitatea a cutremurului cu o magnitudine m și distanța epicentrale r de a depăși valoarea z .

2.1.4. Incertitudini în analiza hazardului seismic

În APHS pot apărea incertitudini. De obicei, aceste incertitudini pot fi clasificate în două categorii, prezentate în tabelul 2.1 (SSHAC, 1997) (Klügel, 2007):

- *Incertitudini epistemice* – incertitudine atribuită cunoștințelor incomplete despre un fenomen care afectează capacitatea noastră de a-l modela. Incertitudinea epistemică poate fi reprezentată prin diferite moduri, de exemplu, printr-o serie de modele viabile, multiple interpretări ale experților pe marginea aceluiași subiect, incertitudinea statistică a parametrilor de modelare sau poate reprezenta o combinație a acestor abordări.
- *Variabile aleatoare* – reprezintă partea reziduală a incertitudinii totale care nu este luată în calcul în modelul nostru. Se numește și incertitudine de modelare.

Tabel 2.1 Incertitudinile asociate cu elementele de analiza probabilistică a hazardului seismic (SSHAC, 1997)

Aleatoare	Epistemice
Magnitudinea evenimentului	Catalogul de cutremure
Epicentrul evenimentului	Zona seismică
Adâncimea evenimentului	Rata seismicității
Relația de recurență (locația și magnitudinea următorului eveniment)	Propagarea undelor și relațiile de atenuare

Diferența dintre incertitudinea aleatoare și epistemică este dependentă de model. Până la urmă, toate incertitudinile sunt considerate epistemice. Pentru luarea deciziilor practice nu este necesar să se facă distincția între aceste tipuri de incertitudini, atâta timp cât incertitudinea totală este luată în calcul. În aplicațiile practice, încercarea de a separa aceste diferite tipuri de

incertitudini dus la probleme, deoarece nu a fost luată în considerare dependența dintre diferiți parametri ai modelului aleatoriu în analiza PHS (Klügel, 2005). Incertitudinile epistemice sunt tratate în mod tradițional cu arbori logici (valori discrete cu greutate asociate), în timp ce incertitudinile aleatorii sunt adesea tratate cu distribuții probabilistice pentru comoditate.

2.2. Determinarea hazardului seismic al Republicii Moldova

Hazardul seismic primar al teritoriului Republicii Moldova este influențat de hazardul regional, ce depinde funcție de proprietățile solurilor, relieful teritoriului și condițiile hidro-geologice.

Hazardul seismic regional în mare parte este influențat de cutremurele subcrustale de adâncime medie din Zona Vrancea, România și este reprezentat în forma de hărți a distribuției intensității seismice sau a accelerației de teren pentru diferite intervale medii de recurență.

Institutul de Geologie și Seismologie al Republicii Moldova este responsabil de evaluarea hazardului seismic al teritoriului Republicii Moldova și al localităților acesteia. Cea mai recentă hartă elaborată de IGS în anul 2010 (fig. 2.4), divizează teritoriul Republicii Moldova în 3 zone a intensității seismice conform scării MSK-64, după cum urmează:

- Zona cu intensitatea de 8 grade după scara MSK-64 – partea de sud-vestică care include aproximativ 17 % din teritoriu.
- Zona cu intensitatea de 7 grade după scara MSK-64 – partea centrală a ce include aproximativ 65 % din teritoriu.
- Zona cu intensitatea de 6 grade după scara MSK-64 – partea nord-est, centru-est și sud-est ce include aproximativ 18 % din teritoriu.

Pe lângă sursa seismică subcrustală Vrancea, este necesar de evidențiat și alte surse seismice ce pot afecta teritoriul Republicii Moldova. Unii autori (Drumea & Alcaz, 2005), (Drumea, 2000) accentuează că nu pot fi neglijate și sursele seismice crustale din zona de sud-est a României.

Fenomenul de lichefiere a solurilor este, de asemenea, un alt factor care determină riscul seismic pe teritoriul Republicii Moldova; acest fenomen a fost observat în urma cutremurului din 4 martie 1977, precum și la cel din 30 august 1986. În toate cazurile de lichefiere a solurilor s-a putut observa că pământurile sunt formate din nisipuri fine, uneori amestecate cu un procent redus de prafuri argiloase de consistență afânată și saturate cu apă. În baza datelor reale ale cutremurelor majore a fost elaborată o hartă schematică (fig. 2.6) care ilustrează abilitatea solurilor teritoriului Republicii Moldova la lichefiere (Alcaz, 2007).

Municipiul Chișinău, situat în partea centrală a Republicii Moldova, conform hărții de zonare seismică, este amplasat în zona cu 7 grade de intensitate seismică. Însă cum s-a demonstrat în lucrările (Drumea, 2000), (Alcaz, 2007), această valoare este nejustificată. În unele sectoare ale orașului, seismicitatea amplasamentului poate ajunge chiar și până la 9 grade, scara MSK. Aceasta se datorează, în mare parte, condițiilor de teren, unde straturile de soluri moi (cu viteza de propagare

a undelor $V_s = 200 - 400$ m/s) , care sunt răspândite în limitele orașului, pot atinge adâncimi de peste 300 metri .

Hazardul seismic actual reprezentat în termeni de intensitate seismică (scara MSK-64) nu reflectă obiectiv efectele cutremurelor de pământ, totodată harta de zonare seismică (vezi **Error! Reference source not found.**) nu se încadrează în noile normative de proiectare adoptate (Eurocode 8). Așadar, pentru o analiză obiectivă a hazardului, vulnerabilității și riscului seismic este necesară o evaluare complexă a pericolului seismic folosind date și metodologii moderne raportate la practici internaționale.

2.2.1. Catalogul de cutremure

Cataloagele de cutremure conțin date istorice privind evenimentele seismice ce s-au petrecut și includ în sine informații, precum: timpul producerii cutremurului, focarul acestuia, mărimea cutremurului (cantitativă și/sau calitativă) și alți factori ce pot caracteriza sursa seismică. Pentru România sunt cunoscute și publicate mai multe cataloage ce reflectă procesele geologice din zona munților Carpați, Depresiunea Predobrogeană, Depresiunea Bârladului; printre acestea pot fi menționate cataloagele, Radu, 1970,1974,1980,1994, Constantinescu & Mârza, 1980, Trifu & Radulian, 1991.

În scopul cercetării hazardului seismic, autorul a selectat catalogul ROMPLUS, care în prezent reprezintă catalogul oficial al Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INFP, 2020). Catalogul ROMPLUS poate fi descărcat gratuit de pe site-ul INFP (INFP-ROMPLUS, 2020). Catalogul cuprinde un șir de evenimente seismice începând cu secolul X până în prezent.

Declustering este un alt pas importat după alegerea catalogului și reprezintă procesul de separare a evenimentelor din catalogul de cutremure în preșocuri, cutremurele principale și replici. Acest proces este pe larg folosit în seismologie, în particular în analiza și evaluarea hazardului seismic (Stiphout et al., 2012). Până în prezent sunt cunoscute un șir de algoritmi pentru declustering, însă dintre cele mai des folosite se pot evidenția doi algoritmi propuși de Gardner & Knopoff, 1974 și Reasenberg, 1985.

În lucrarea dată pentru analiza catalogului de cutremure, a fost selectat algoritmul propus de Reasenberg, 1985; acest algoritm a fost digitalizat în mediul de programare MATLAB în premieră de către Wiemer, 2001 și ulterior modernizat cu noi funcții de către Reyes & Wiemer, 2019.

2.2.2. Relația de recurență a magnitudinilor

Relația recurenței magnitudinilor propusă pentru prima dată de (Gutenberg & Richter, 1944), care au sistematizat datele cutremurelor din California în funcție de numărul de cutremure N ce depășesc o anumită magnitudine m într-un interval de timp t este folosită în analiza seismicității teritoriului până în prezent. Împărțind numărul de cutremure N pe intervalul de timp

examinat t , se obține numărul mediu anual de cutremure n_M cu magnitudinea mai mare decât un anumit prag M (Atanasiu & Galea, 2009). Relația liniară numită relația de recurență a magnitudinilor sau relația lui Gutenberg-Richter are următoarea formă:

$$\log(\lambda_M) = a - bM \quad (2.2)$$

, unde λ_M – este numărul mediu anual de cutremure cu magnitudinea mai mare sau egale cu M , M – magnitudinea cutremurelor, a, b – coeficienți numerici dependenți de setul de date. Valoarea coeficientului b , numită și b , este de obicei în jurul valorii 1 pentru cutremurele de origine tectonică și aproximativ egale cu 2 pentru cutremurele vulcanice (UBC, 2011). În forma exponențială expresia (2.1) devine:

$$\lambda_m = \exp(\alpha - \beta M) \quad (2.3)$$

, unde valorile α și β sunt coeficienții relației de recurență exponențiali egali cu $\alpha = a \cdot \ln 10 = 2,303 \cdot a$ și $\beta = b \cdot \ln 10 = 2,303 \cdot b$.

Rata activității $\lambda_{m_{min}}$ cu cutremure de magnitudinea $m \geq m_{min}$ poate fi determinată folosind metoda verosimilității maxime, de unde rezultă că cea mai verosimă valoare pentru $\lambda_{m_{min}}$ este rata activității observate (McGuire, 2004):

$$\lambda_{m_{min}} = \frac{N_{m_{min}}}{t} = \exp(\alpha - \beta m_{min}) \quad (2.4)$$

unde t reprezintă perioada de timp în care aceste cutremure au avut loc.

Pentru cutremurele cu magnitudinea cuprinse între valorile m_{min} și m_{max} rata medie anuală a cutremurelor cu magnitudinea mai mare ca m poate fi determinată conform relației (McGuire, 2004):

$$\lambda_m = \exp(\alpha - \beta m_{min}) \cdot \frac{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m)]}{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m_{min})]} \quad (2.5)$$

Din relația de mai sus se poate ușor de determinat intervalul mediu de recurență a unei valori de magnitudine mai mare ca m (Văcăreanu et al., 2015):

$$IMR(> m) = \frac{1}{\lambda_m} = \frac{1}{\lambda_{m_{min}} \cdot [1 - F_M(m)]} \quad (2.6)$$

, unde $F_M(m)$ – este funcția de repartiție a magnitudinilor cutremurului și n – este numărul de cutremure observate.

Prin magnitudine maximă se înțelege pragul superior a magnitudinii unei zone seismice sau al unei regiuni în care nu pot exista cutremure mai mari ca magnitudinea maximă m_{max} . Forma ecuației generice de determinare a m_{max} este:

$$m_{max} = m_{max}^{obs} + \int_{m_{min}}^{m_{max}} [F_M(m)]^n dm \quad (2.7)$$

în această formula m_{max}^{obs} – este magnitudinea maximă observată a zonei cercetate. Din ecuația (2.7) se observă că magnitudinea maximă m_{max} este egală cu magnitudinea maximă observată,

m_{max}^{obs} majorată cu $\Delta = \int_{m_{min}}^{m_{max}} [F_M(m)]^n dm$. Așadar, folosind funcția de repartiție a magnitudinilor pentru cutremurele ce respectă distribuția Gutenberg-Richter, ecuația (5) ia forma:

$$m_{max} = m_{max}^{obs} + \int_{m_{min}}^{m_{max}} \left[\frac{1 - \exp[-\beta(m - m_{min})]}{1 - \exp[-\beta(m_{max}^{obs} - m_{min})]} \right]^n dm \quad (2.8)$$

Pentru prima aproximare, limita superioară a integralei m_{max} poate fi folosită valoarea m_{max}^{obs} , următoarea aproximare fiind înlocuirea valorii limitei superioare cu soluția precedentă (Andrzej, 2004).

2.2.3. Parametrii surselor seismice

Sursa seismică reprezintă o delimitare teoretică a ariilor în interiorul cărora activitatea seismică este omogenă. Pentru România sunt cunoscute 13 surse de adâncime crustală și o sursă de adâncime intermediară (fig. 2.7), în zona județului Vrancea fiind cea mai activă sursă din regiunea cercetată.

Totodată, nu pot fi neglijate și sursele crustale seismice care afectează teritoriul României și ale Republicii Moldova ce se află în nemijlocita vecinătate a sursei subcrustale Vrancea. În cercetarea de față, pentru determinarea hazardului seismic se va lua în considerare sursa subcrustală Vrancea și 3 surse crustale (Vrancea, Depresiunea Bârladului și, Depresiunea Predobrogeană).

2.2.3.1. Sursa seismică subcrustală Vrancea (VRI)

Din toate sursele prezentate în figura 2.7, sursa subcrustală Vrancea este cea mai activă și puternică ce afectează 2/3 din teritoriul României, întregul teritoriul Republicii Moldova și o parte din teritoriul Bulgariei.

Pentru evaluarea recurenței cutremurelor s-a stabilit pragul inferior al magnitudinii zonei să fie $M_{w,min} = 4,5$ și cel superior, care a fost determinat cu ajutorul formulelor (2.3) și (2.4), $M_{w,max} = 8,1$. Analizând datele din catalogul de cutremure s-a stabilit următoare relație de recurență a sursei Vrancea Intermediar:

$$\lg N(M_{w,min}) = 3,24 - 0,65M_w \quad (2.9)$$

, unde $a = 3,240$ și $b = -0,65 \pm 0,04$. De aici se poate determinat coeficienții α și β și de substituit în relația 2.2, obținând:

$$\lambda_m = \exp(7,462 - 1,497M) \quad (2.10)$$

În figura 2.12 sunt prezentate grafic relația de recurență determinată folosind metoda descrisă mai sus. În figura 2.13, relația trunchiată de recurență este prezentată și evaluată cu ajutorul ecuației:

$$\lambda_m = \exp(7,462 - 6,737) \cdot \frac{1 - \exp[-1,497(8,1 - M)]}{1 - \exp[-1,497(8,1 - 4,5)]} \quad (2.11)$$

În figurile de mai jos (Figura 2.10 și Figura 2.11) este prezentată distribuția geografică a focarelor cutremurelor din sursa seismică subcrustală Vrancea. Evenimentele seismice majore, cu

magnitudine moment $M_w > 7$, sunt evidențiate cu o stea galbenă. Din aceste figuri se poate observa că cele mai puternice cutremure au avut loc într-o zonă restrânsă, mai exact în limitele coordonatelor 26,5 – 26,8 grade longitudine nordică și 45,5 – 45,8 grade latitudine estică. Acest fapt subliniază concentrarea cutremurelor în această zonă, precum și caracterul adânc al focarelor, care se situează într-un interval de 120-150 km de la suprafață.

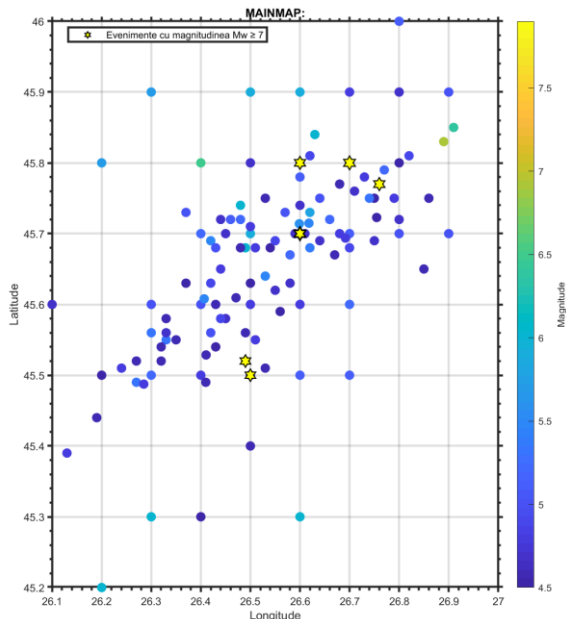


Figura 2.1 Distribuția focarelor cutremurelor zonei Vrancea intermediar

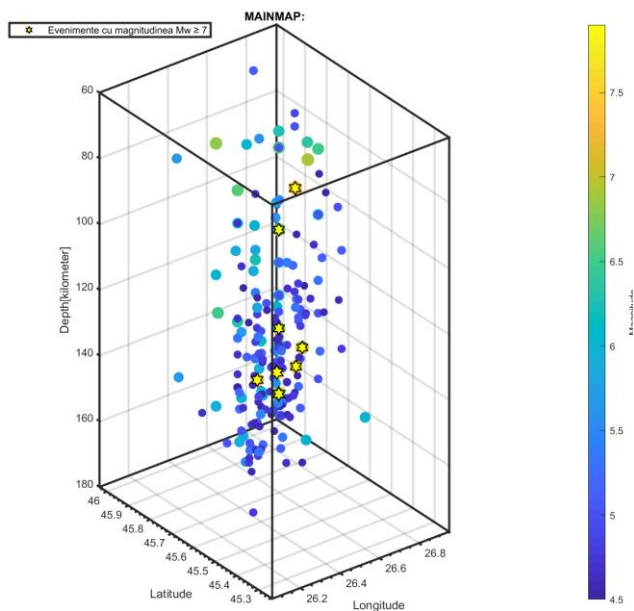


Figura 2.2 Distribuția focarelor pe adâncime a cutremurelor din zona Vrancea intermediar

În figura 2.12 este prezentat grafic relația de recurență a magnitudinilor.

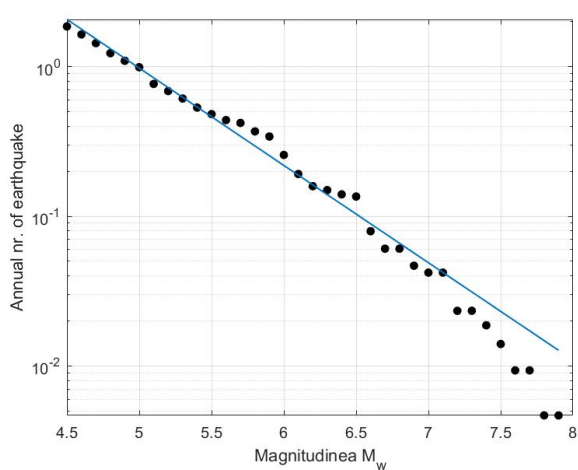


Figura 2.3 Reprezentarea grafică a relației de recurență Gutenberg-Richter

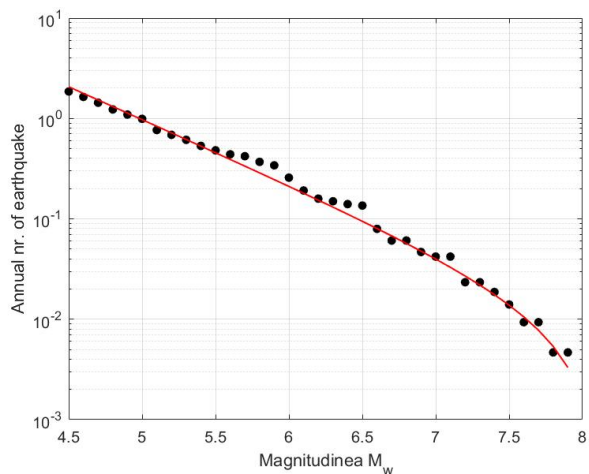


Figura 2.4 Reprezentarea grafică a relației de recurență trunchiată Gutenberg-Richter

2.2.3.2. Sursa seismică crustală Vrancea

Sursa seismică Vrancea se află în zona de curbură a Munților Carpați, la intersecția plăcii est-europene cu sub-plăcile inter-alpină, Moesică și a Mării Negre. Cutremurele din zona dată sunt mai

împrăștiată cu o magnitudine maximă observată de $M_w \sim 5,5$. Relația de recurență a sursei seismice crustale Vrancea este reprezentată conform următoarei formule:

$$\lg N(M_{w,min}) = 2,78 - 0,91M_w \quad (2.12)$$

, unde $a = 2,78$ și $b = -0,91 \pm 0,09$. Pentru evaluarea recurenței cutremurelor s-a stabilit pragul inferior al magnitudinii zonei să fie $M_{w,min} = 3,0$ și cel superior, care a fost determinat cu ajutorul formulelor (2.3) și (2.4), $M_{w,max} = 6,5$. De aici se poate determinat coeficienții α și β și de substituit în relația 2.2, obținând:

$$\lambda_m = \exp(6,402 - 2,096M) \quad (2.13)$$

În figura 2.18 sunt prezentate grafic relația de recurență determinată folosind metoda descrisă mai sus. În figura 2.19, relația trunchiată de recurență este prezentată și evaluată cu ajutorul ecuației:

$$\lambda_m = \exp(6,402 - 6,287) \cdot \frac{1 - \exp[-2,096(6,5 - M)]}{1 - \exp[-2,096(6,5 - 3)]} \quad (2.14)$$

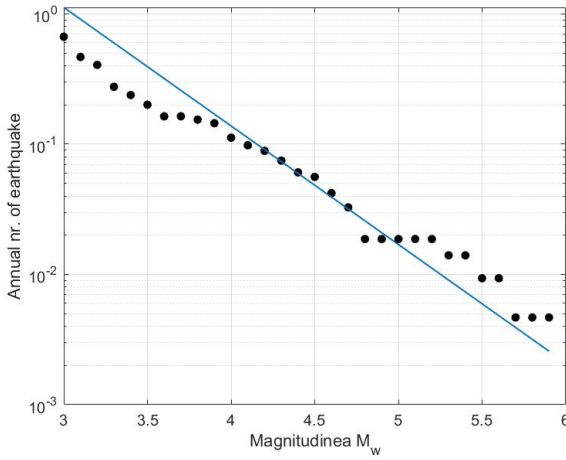


Figura 2.5 Reprezentarea grafică a relației de recurență Gutenberg-Richter

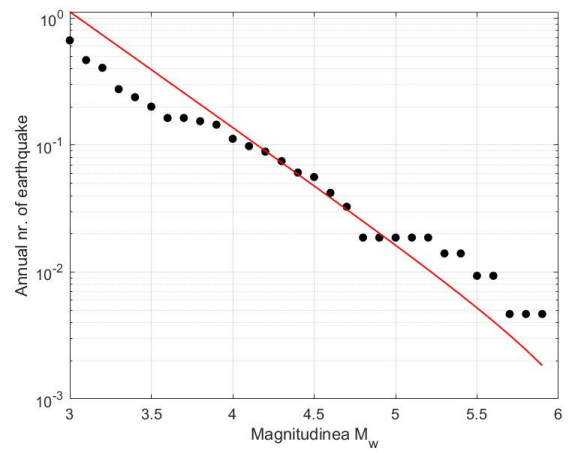


Figura 2.6 Reprezentarea grafică a relației de recurență trunchiată Gutenberg-Richter

2.2.3.3. Sursa seismică crustală Depresiunea Predobrogiană

Zona seismogenă a Depresiunii Predobrogiei urmărește falia Sfântului Gheorghe, unde activitatea seismică este moderată cu cutremure la adâncimi superficiale. În total din catalogul ROMPLUS pentru zona seismică DP s-au extras 79 de cutremure cu magnitudinea $M_{w,min} \geq 3,0$ din perioada cuprinsă între anii 1871-2020. Relația de recurență a sursei seismice crustale Vrancea este reprezentată conform următoarei formule:

$$\lg N(M_{w,min}) = 2,122 - 0,80M_w \quad (2.15)$$

, unde $a = 2,122$ și $b = -0,80 \pm 0,10$. Pentru evaluarea recurenței cutremurelor s-a stabilit pragul inferior al magnitudinii zonei să fie $M_{w,min} = 3,0$ și cel superior, care a fost determinat cu ajutorul formulelor (2.3) și (2.4), $M_{w,max} = 5,7$. De aici se poate de determinat coeficienții α și β și de substituit în relația 2.2, obținând:

$$\lambda_m = \exp(4,887 - 1,842M) \quad (2.16)$$

În figura 2.22 sunt prezentate grafic relația de recurență determinată folosind metoda descrisă mai sus. În figura 2.23, relația trunchiată de recurență este prezentată și evaluată cu ajutorul ecuației:

$$\lambda_m = \exp(4,887 - 5,527) \cdot \frac{1 - \exp[-1,842(5,7 - M)]}{1 - \exp[-1,842(5,7 - 3)]} \quad (2.17)$$

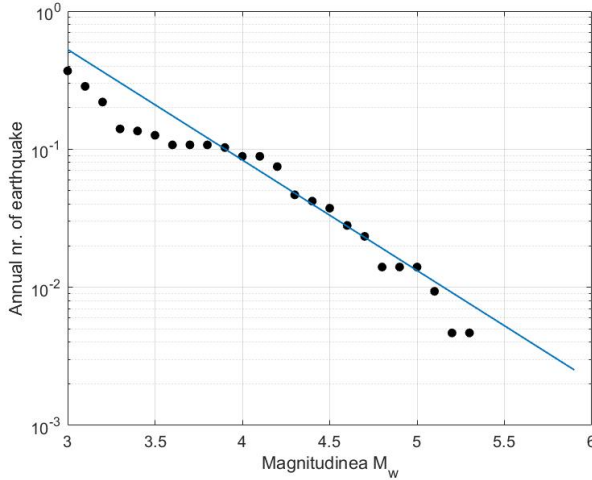


Figura 2.7 Reprezentarea grafică a relației de recurență Gutenberg-Richter

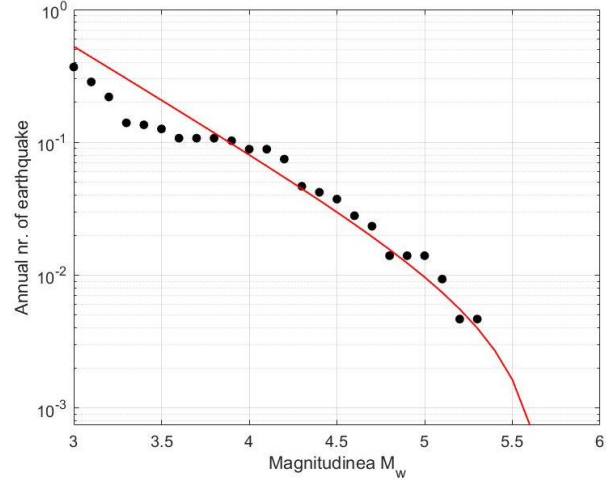


Figura 2.8 Reprezentarea grafică a relației de recurență trunchiată Gutenberg-Richter

2.2.3.4. Sursa seismică crustală Depresiunea Bârlad

Depresiunea Bârlad, situată în Nord-Estul zonei seismice Vrancea se caracterizează prin evenimente seismice moderate. Relația de recurență a sursei seismice crustale Bârlad este reprezentată conform următoarei formule:

$$\lg N(M_{w,min}) = 2,241 - 0,88M_w \quad (2.18)$$

, unde $a = 2,241$ și $b = -0,888 \pm 0,20$. Pentru evaluarea recurenței cutremurelor s-a stabilit pragul inferior al magnitudinii zonei să fie $M_{w,min} = 3,0$ și cel superior, care a fost determinat cu ajutorul formulelor (2.3) și (2.4), $M_{w,max} = 5,9$. De aici se poate determinat coeficienții α și β și de substituit în relația 2.2, obținând:

$$\lambda_m = \exp(5,161 - 2,027M) \quad (2.19)$$

În figura 2.30 sunt prezentate grafic relația de recurență determinată folosind metoda descrisă mai sus. În figura 2.31, relația trunchiată de recurență este prezentată și evaluată cu ajutorul ecuației:

$$\lambda_m = \exp(5,161 - 6,08) \cdot \frac{1 - \exp[-2,027(5,9 - M)]}{1 - \exp[-2,027(5,9 - 3)]} \quad (2.20)$$

Punctele negre din grafic indică datele empirice obținute din catalogul de cutremure. În Figura 2.30, linia albastră reprezintă modelul teoretic al relației de recurență Gutenberg-Richter, care arată că frecvența cutremurelor scade exponențial pe măsură ce crește magnitudinea. În Figura 2.31, linia roșie reprezintă modelul teoretic trunchiat al aceleași relații. Se observă că linia roșie coboară brusc

după magnitudinea de 5,5, indicând o scădere accentuată a frecvenței cutremurelor de magnitudine mare și sugerând că nu se așteaptă cutremure mai mari de 6,0 grade în această regiune.

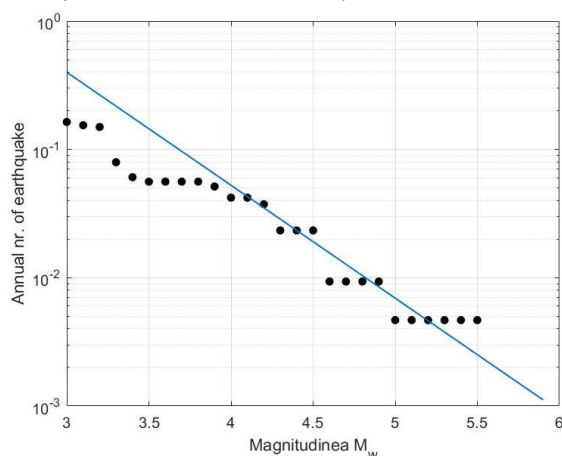


Figura 2.9 Reprezentarea grafică a relației de recurență Gutenberg-Richter

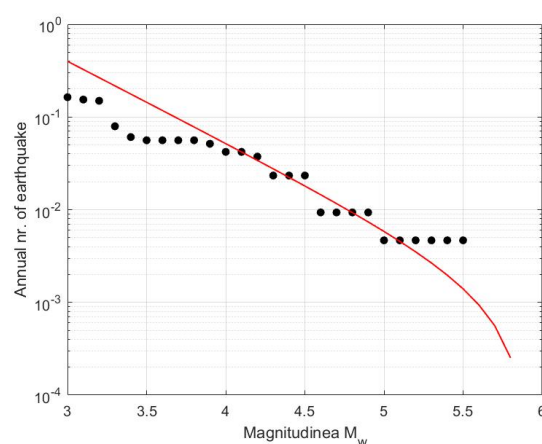


Figura 2.10 Reprezentarea grafică a relației de recurență trunchiată Gutenberg-Richter

2.2.4. Condiții locale de teren

Hazardul seismic obținut prin analiza probabilistă sau deterministă, de regulă, folosește parametrii mișcării terenului referită la o rocă. În acest strat de rocă, viteza de propagare a undelor este egal cu 800 m/s , așa cum este menționat și în proiectul SHARE (Giardini et al., 2014). În diferite straturi geologice, undele seismice se propagă cu o viteză diferită. Acest fenomen complex este numit condiții de teren. În general este recunoscut faptul că efectele cutremurelor sunt mai devastatoare când undele seismice se propagă în formațiuni geologice moi. Acest fapt este important, deoarece un număr mare de zone urbane sunt amplasate de-a lungul râurilor, unde sunt prezente depozite de soluri moi. Relieful amplasamentului joacă un rol important în modificarea caracteristicilor undelor seismice, cauzând mai multe pagube pentru structuri amplasate vârfurile dealurilor. Efectele solurilor și a reliefului sunt cunoscute sub denumirea *condiții locale de teren*.

Normativul în vigoare pe teritoriul Republicii Moldova (SNiP II-7-81*) specifică 3 condiții de teren în dependență de componența litologică și proprietățile fizico-mecanice ale stratului superficial de 10 m.

2.2.5. Relații de atenuare

Relațiile de atenuare fiind numite și modele de predicție ale mișcării terenului, reprezintă niște funcții ce descriu parametrii seismici în funcție de magnitudinea cutremurului, condițiile geologice, distanța de la epicentru până la punctul de interes și alți factori. Forma generică a unei relații de atenuare este următoarea:

$$\ln Y = \overline{\ln Y}(M, R, P_i) + \sigma(M, R, P_i)\varepsilon \quad (2.21)$$

, unde Y reprezintă amplitudinea mișcării seismice, M – magnitudinea seismică, R – distanța de la sursă până la amplasament și argumentul P_i care ia în calcul alți factori ce țin de sursa seismică, propagarea undelor seismice sau condițiile de teren.

2.2.5.1. Relații de atenuare pentru zona seismică Vrancea intermediar (VRI)

Conform proiectului SHARE, sursa seismică subcrustală Vrancea se încadrează, împreună cu partea de sud a Spaniei, într-o zonă de non-subducție cu cutremure de adâncime. Autorii Giardini et al., 2014 recomandă folosirea relațiilor de atenuare propuse de Atkinson & Boore, 2003, Zhao et al., 2006, Youngs et al., 1997, Lin & Lee, 2008. De asemenea, subiectul dat a fost cercetat în România. Primele relații de atenuare obținute pentru zona intermediară Vrancea erau efectuate de către Lungu et al., 1997, Musson, 1999. Dintre ultimele cercetări este necesar de menționat lucrarea lui Văcăreanu et al., 2015 unde se obține o nouă generație a modelelor empirice a relațiilor de atenuare, special dezvoltate pentru zona subcrustală Vrancea, care ia în calcul diferența de atenuare a undelor seismice pentru regiuni back-arc și fore-arc.

2.2.5.2. Relații de atenuare pentru zone seismice crustale

În literatura de specialitate (Văcăreanu et al., 2015), (Atanasiu & Galea, 2009), (Pavel & Văcăreanu, 2017) pentru zone seismice crustale din regiunea carpatică se propun relațiile de atenuare dezvoltate de Abrahamson et al., 2018, Akkar & Bommer, 2010, Cauzzi & Faccioli, 2008 și Idriss, 2008. Totodată se pot remarca și alte funcții dezvoltate în urma unor proiecte mari cum ar fi NGA West (Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models) și NGA West 2 coordonate de PEER (Pacific Earthquake Research Center), USGS (United States Geological Survey) și Southern California Earthquake Center (INFP, 2016).

2.2.6. Calculul hazardului

Calculul hazardului seismic se va face cu ajutorul softului specializat numit R-CRISIS. Programul R-CRISIS dezvoltat de profesorul Mario Ordaz (Figura 2.34), apărut în premieră în anul 1986, reprezintă o aplicație dezvoltată în limbajul de programare FORTRAN. La momentul actual, softul este în continuă dezvoltare și permite utilizatorului să aplice o abordare probabilistă la analiza hazardului seismic.

2.2.6.1. Map data

În acest compartiment se importă harta regiunii studiate în format *.sph. În cazuri particulare se pot introduce coordonatele și denumirile orașelor pentru analiza hazardului seismic a unui amplasament dat. Softul folosește sistemul de proiecție *World Geodetic System 84* (WGS-84).

2.2.6.2. Source geometry data

Compartimentul ”geometria surselor seismice” este destinat pentru determinarea geometriei sursei seismice. Softul permite introducerea a trei modele geometrice a sursei: *area*, *line* și *dot*.

2.2.6.3. *Seismicity data*

Se introduc valorile parametrilor ce descriu sursa seismică. În cazul de față, deoarece modelul de seismicitate este de tip Poisson, trebuie introduse valori pentru fiecare sursa seismică ce o descrie.

2.2.6.4. *Attenuation data*

Relația de atenuare poate fi aleasă din biblioteca existentă, poate fi creată cu ajutorul unui model hibrid sau poate fi introdusă o relație nouă prin definirea funcției ce descrie relația de atenuare. Opțiunea de model de atenuare hibrid este o alternativă a arborelui logic atunci când unica diferență în modele este relația de atenuare (Vavlas et al., 2019).

2.2.6.5. *Rezultate finale*

Rezultatele finale sunt obținute în formă de hărți de hazard seismic și curbe de hazard seismic. În figura 2.36 este prezentată curba hazardului seismic al mun. Chișinău pentru accelerația maximă la sol (PGA) pentru $T = 0,00$ s. Curba seismică a fost calculată folosind modelul de atenuare descris mai sus. La fel, în figura 2.37 se arată graficul spectrului de răspuns seismic pentru teren de categoria A.

În figura 2.38 este reprezentat hazardul seismic al Republicii Moldova în formă de hartă a hazardului seismic cu intervalul mediu de recurență de 475 de ani. Acest interval este recomandat de standardul Eurocode 8 – ”Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur”, deci harta creată poate fi folosită ca unul dintre parametri determinați național pentru Anexa Națională la Eurocod 8, partea I. IMR (Intervalul Mediu de Recurență) de 475 de ani, așa cum este prevăzut în EN 1998, reprezintă intervalul de timp în care se așteaptă ca un eveniment seismic specific să fie depășit cu o anumită probabilitate. Pentru un IMR de 475 de ani, probabilitatea ca un cutremur să depășească valorile de PGA prezentate în hartă este de 10% într-o perioadă de 50 de ani. Aceasta înseamnă că există o șansă de 10% ca, într-o perioadă de 50 de ani, să apară un cutremur care să producă accelerații la sol egale sau mai mari decât valorile indicate.

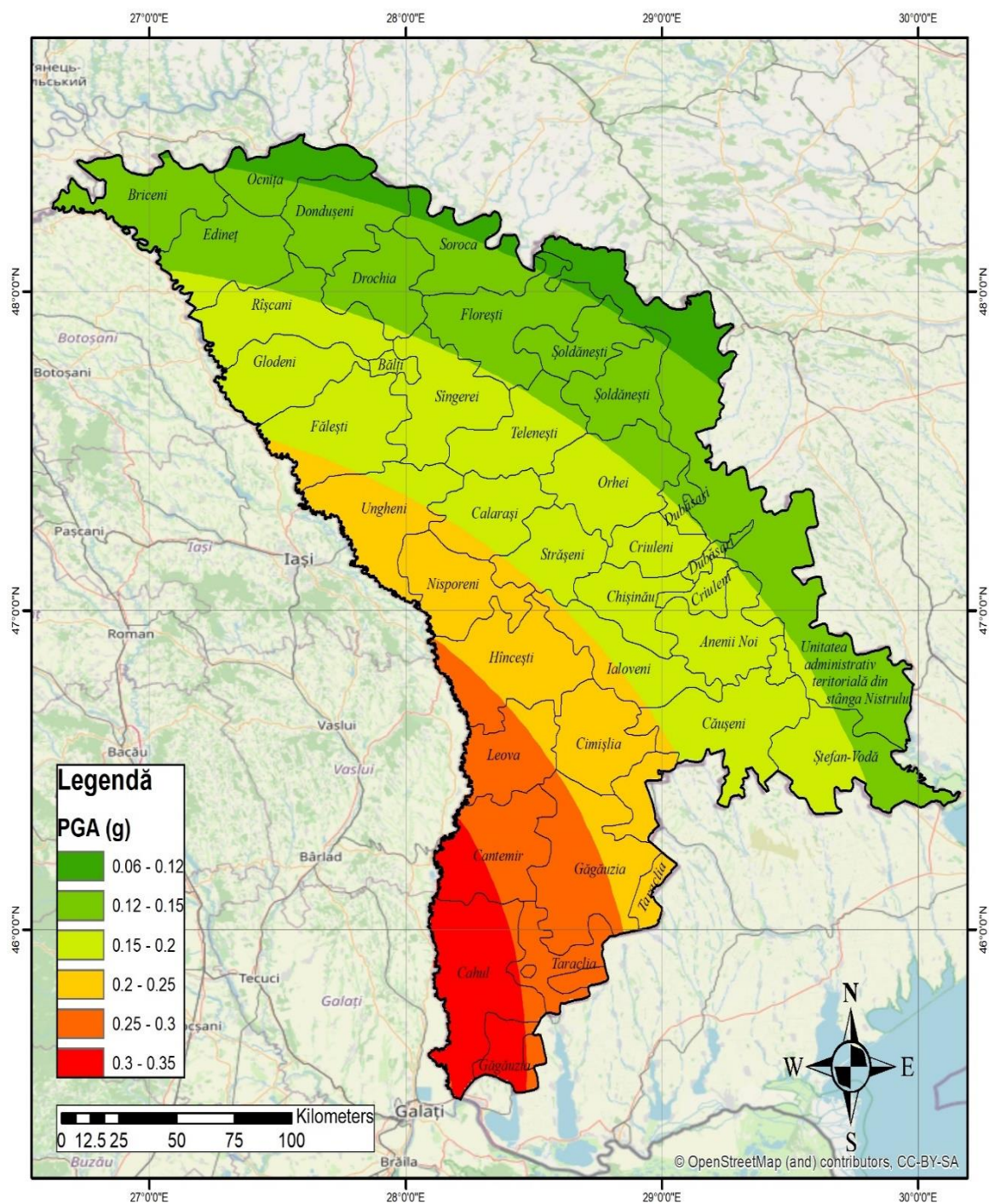


Figura 2.11 Harta Hazardului Seismic al Republicii Moldova cu IMR = 475 ani (sursa autor)

Capitolul 3. Vulnerabilitatea seismică

3.1. Metode de evaluare a vulnerabilității seismice

În orașe mari subiectul vulnerabilității este una stringentă. Cu cât orașul este mai mare cu atât problemele legate de administrare și control sunt mai dificile. O cantitate considerabilă de populație urbană trăiește în zone locative restrânse cu clădiri multietajate care pot fi afectate de diferite tipuri de calamități naturale. Când se produce un cutremur de pământ, e mult mai greu de organizat lucrări de căutare, salvare și reabilitare în orașe, unde nu există nici o preocupare urbanistică de amenajare a teritoriului din punct de vedere al riscului seismic. Așadar, se poate afirma că vulnerabilitatea unei zone depinde de infrastructura orașului și tipul structurii.

3.1.1. Metode empirice

Metodele empirice de evaluare a vulnerabilității seismice folosesc procedee simplificate bazate pe analiza și evaluarea structurilor afectate de cutremure. Aceste procedee sunt adesea adoptate și folosite la analiza performanței construcțiilor la scară largă (în zone urbane), deoarece acestea implică cost și timp redus.

3.1.1.1. Matricele probabilității de avariere și funcțiile de vulnerabilitate

Conform Calvi et al., 2006 sunt două tipuri principale de metode empirice: matricele probabilității de avariere și funcții de vulnerabilitate. Matricele probabilității de avariere au fost prezentate în premieră în lucrarea Whitman et al., 1973 conceptul de bază fiind că un anumit tip de clădiri ce se încadrează într-o schemă constructivă dată va avea aceleași degradări la un eveniment seismic dat.

3.1.1.2. Funcțiile de vulnerabilitate

Funcțiile de vulnerabilitate sunt elaborate pe baza unor degradări produse în urma unor cutremure de pământ, așadar este nevoie de un șir de date statistice privind degradările produse în urma unui cutremur pentru o anumită clasă de structuri. Prin urmare, principala problemă ce apare la crearea funcțiilor de vulnerabilitate este lipsa sau insuficiența datelor statistice. Această lipsă de date, în special pentru intervalul de magnitudini 6-8 grade, duce la o eroare de precizie și face dificilă crearea distribuțiilor cumulative adecvate.

Absența datelor conduce la utilizarea altor metode empirice cum ar fi opinia experților sau folosirea unor procedee mai sofisticate cum sunt cele prezentate în metode analitice (Făh et al., 2001).

3.1.1.3. Indicele de vulnerabilitate

O altă metodă, indirectă, folosită la determinarea vulnerabilității este metoda indicilor, folosită pe larg în ultimele decenii în Italia. În metoda indicilor de vulnerabilitate se pot evidenția

două abordări principale: Metodologia descrisă în GNDT – nivel II și Metodologia propusă în cadrul proiectului RISK-UE (EMS).

- Metodologia descrisă în GNDT – nivel II

Metodologia descrisă în Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) – Grupul Național de apărare împotriva cutremurelor - cuprinde 2 nivele de clasificare. Primul nivel, denumit și GNDT-nivel I clasifică structurile în trei clase de vulnerabilitate și GNDT- nivel II ce clasifică fondul construit în patru clase de vulnerabilitate pentru structuri din zidărie și trei clase de vulnerabilitate pentru structuri din beton armat.

GNDT -nivel II se folosește pentru determinarea și caracterizarea vulnerabilității seismice a unei clădiri cu ajutorul a unor parametri ce descriu componentele de rezistență ale structurii (tabelul 3.1). Această metodologie se bazează pe date post-seismice de observare și de cercetare a daunelor care acoperă un număr mare de elemente, concentrându-se pe cele mai importante aspecte și caracteristici care definesc daunele clădirii (Shakya, 2015).

Tabel 3.1 Coeficienții w_i pentru determinarea indicelui de vulnerabilitate (proponere autor)

Nr.	Parametru	Clasa				Coeficient w_i
		A	B	C	D	
1	Tipul și structura de rezistență	0	5	20	45	1,00
2	Calitatea sistemului de rezistență	0	5	25	45	0,25
3	Rezistența agregatelor	0	5	25	45	1,5
4	Amplasarea și tipul fundațiilor	0	5	15	45	0,75
5	Diafragme și elemente orizontale	0	5	25	45	1,00(poate varia de la 0 la 1,00)
6	Configurația structurii în plan	0	5	25	45	0.5
7	Configurația structurii pe înălțime și elevație	0	5	25	45	1,00(poate varia de la 0 la 1,00)
8	Distanța optimă dintre pereți	0	5	25	45	0,25
9	Acoperișul	0	5	25	45	1,00 (poate varia de la 0 la 1,00)
10	Elemente nestructurale	0	5	25	45	0,25
11	Reparații și întreținerea clădirii	0	5	25	45	1,00

Fiecare parametru are o valoare (k_i) pentru o clasă de vulnerabilitate specificată și este ”însoțit” de un de un coeficient (w_i) care ia în calcul importanța parametrului cercetat; în final indicele de vulnerabilitate este determinat cu următoarea relație:

$$I_v = \sum_{i=1}^{i=11} \frac{k_i w_i}{382,5} \quad (3.1)$$

, unde I_v – indicele de vulnerabilitate cu o valoare cuprinsă între 0 și 382,5. În mod general, scara este normalizată de la un interval de la 0 la 100, unde 0 semnifică structura puțin vulnerabilă și 100 structură foarte vulnerabilă.

Pentru orice interval al valorilor I_v se consideră că variația avarierilor este liniară și se determină cu relațiile (Hamed et al., 2016):

$$y_i = 0,155 \exp[-0,0207(I_v + 25)] \quad (3.2)$$

$$y_c = [0,625 + 0,00029(I_v + 25)^{2,145}]^{-1} \quad (3.3)$$

- Metodologia propusă în cadrul proiectului RISK-UE

Aceasta metodologie este bazată pe scara macroseismică EMS-98. Scara macroseismică EMS-98 este o metodologie de analiza a intensității macroseismice, bazată pe o caracterizare a topologiei structurii cu referire la clase de vulnerabilitate, folosește grade de intensitate seismică și atribuie grad de daune structurale unui anumit tip de structuri. Similar, în contextul multitudinilor metode prezente în țările UE, apare necesitatea de a integra toate metodologiile de evaluare a riscului și vulnerabilității seismice pe fondul unor cutremure ce au avut loc în Turcia, Grecia și Italia.

Această metodă este prezentată în lucrarea Lagomarsino & Giovinazzi, 2004 și idea centrală constă în introducerea a unei distribuții de probabilitate discretă a gradului de avariere, deoarece precizarea gradului de avariere în EMS-98 este vagă și se redă prin termeni ”Puțin”, ”Multe” și ”Majoritatea”. Așadar, s-a propus calcularea indicelui de vulnerabilitate cu formula:

$$V_i^{tot} = V_i^* + \Delta V_r + \Delta V_m \quad (3.4)$$

, unde V_i^{tot} – este indicele de vulnerabilitate total, V_i^* - este indicele de vulnerabilitate ce ține să ia în considerare tipologia structurii (conform tabelului 3.2), ΔV_r – indicele de vulnerabilitate regional ce ia în considerare comportarea clasei reprezentative de structuri de aceeași tipologie în regiunea cercetată și ΔV_m – reprezintă factorul ce contribuie la modificarea comportamentului structurii la acțiuni seismice și se determină cu formula 3.5.

$$\Delta V_m = \sum_k r_k V_{m,k} \quad (3.5)$$

, în care r_k – este raportul dintre structura afectată de factorul de comportare k caracterizat prin $V_{m,k}$ (tabel 3.3). În final se poate determina gradul mediu de avariere μ_D ($0 < \mu_D \leq 5$ ce corespunde gradelor de avariere D_i pentru $i = \overline{1,5}$ descrise în EMS-98) pentru intensitatea I și coeficientul de ductilitate β , cu ecuația:

$$\mu_D = 2,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6,25V_i - 13,1}{\beta} \right) \right] \quad (3.6)$$

3.1.2. Metode analitice

Metodele analitice se bazează în mare măsură pe analiza unei anumite structuri sau unui set de structuri reprezentative folosind tehnici și metode numerice. Fiabilitatea rezultatelor depinde totalmente de veridicitatea datelor furnizate ce caracterizează structura sau tipologia structurii

evaluate. Evaluarea analitică este dependentă de metodele și/sau softurile utilizate și de capacitatea inginerului (utilizatorului) de a analiza și interpreta rezultatele.

Majoritatea metodelor analitice folosesc patru pași în analiza vulnerabilității (fig. 3.3): primul pas este analiza hazardului seismic și estimarea frecvenței apariției cutremurelor cu o magnitudine care ar putea afecta structural obiectivul cercetat. Pasul doi și trei constă în analiza structurală în care se determină eforturile, deformațiile și deplasările ce apar în urma unor mișcări de teren.

3.1.2.1. Metoda spectrului de capacitate

Această metodă a fost propusă în lucrarea Freeman et al., 1975. La baza metodei spectrului de capacitate se află analiza performanței unei structuri. Aceasta se obține printr-un calcul static nelinier denumit analiza push-over. Într-o astfel de analiză, structura cercetată este echivalată cu un sistem cu un grad dinamic de libertate și este supusă unei încărcări statice laterale. Acest sistem are aceeași frecvență naturală și proprietăți (ex. rigiditate) ca și structura considerată. Forța statică laterală este mărită monoton pentru a obține o relație dintre mărimea forței și deformațiile structurii (Figura 3.4) denumită și curba push-over sau curba de capacitate.

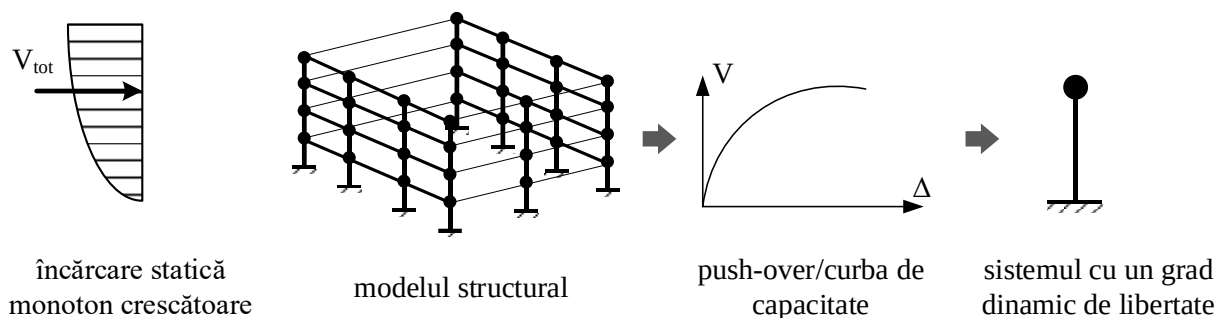


Figura 3.1 Schema de dezvoltare schematică a unui sistem cu un grad dinamic de libertate dintr-o curbă push-over (FEMA, 2005)

Curba de capacitate a unei structuri reflectă o serie de caracteristici seismice ale clădirii cum ar fi: rigiditate, ductilitatea, rezistența și fragilitatea materialului din care este executată structura D'Ayala et al., 2015. În literatură de specialitate se recomandă ca curba push-over să fie ajustată cu ajutorul curbei biliniare (utilizată pentru structuri metalice și din beton armat) sau multiliniare (se potrivește pentru structuri executate din zidărie armată și nearmată) pentru a idealiza comportarea sistemului.

3.1.2.2. Metode bazate pe mecanismul de prăbușire

Conceptul metodelor bazate pe mecanismul de prăbușire este de a evalua vulnerabilitatea prin definirea mecanismului de colaps și se aplică la structurile din zidărie sau structurile din beton armat cu înălțimi relativ mici. În prezent sunt folosite două concepte de bază de analiză a vulnerabilității bazată pe mecanismul de prăbușire: VULNUS și FaMIVE.

Metodologia VULNUS prezentată în lucrarea Bernardini, 1999 afirmă că probabilitatea de depășire a unei stări de colaps pentru un grup de structuri din zidărie este o funcție de patru parametri: coeficientul de comportare din plan și în plan, accelerația medie absolută (raportul dintre

forța tăietoare maximă și greutatea totală) și incertitudinea, un factor ce se determină ca o combinație de șapte factori de vulnerabilitate ca și calitatea îmbinărilor la pereți sau interacțiunea dintre sol și structură ș.a.

Metodologia FaMIVE descrisă în articolul D'Ayala & Speranza, 2002 a fost dezvoltată pentru evaluarea structurilor istorice din zidărie. La baza acestei proceduri stă ideea de a identifica și analiza mecanismul de prăbușire cel mai probabil prin calculul factorului de încărcare sau coeficientului de cedare.

3.1.2.3. Metode bazate pe deplasări

Metodologia se bazează pe compararea capacităților de deplasare ale modelului structurii echivalat la un sistem cu un singur grad de libertate la diferite stări de degradare cu performanța seismică la valorile corespunzătoare perioadei proprii de vibrații a modelului, care pot fi determinate din rigiditatea curbei de capacitate la fiecare stare. Deși metoda bazată pe deplasări are aspecte comune cu metoda spectrului de capacitate, procedurile sunt diferite, deoarece scopul principal al metodei spectrului de capacitate este evaluarea punctului de performanță, iar în metoda bazată pe deplasări capacitățile de deplasare sunt comparate cu cerința de deplasare considerând schimbarea rigidității clădirii și ca rezultat se obține probabilitatea de apariție a unei stări limite specifice.

3.2. Caracteristica generală a fondului locativ din municipiul Chișinău

3.2.1. Clasificarea fondului locativ

Municipiul Chișinău, în prezent, cu o arie de aproximativ 123 km^2 este divizat în cinci sectoare administrative: *Botanica* în partea de sud, *Buiucani* în partea centrală, *Centru* în partea centrală și de vest, *Ciocana* în partea de est, *Râșcani* în partea centrală și de nord

La sfârșitul secolului XIX, teritoriul orașului se încadra în limitele sectorului *Centru*, de unde și a început procesul de lărgire a orașului prin urbanizarea satelor și comunelor învecinate. La momentul actual, în limitele prezente, în oraș se pot găsi o varietate de clădiri diferite după vârstă, numărul de niveluri, gradul de uzură, materiale folosite, destinație, nivelul de protecție anti-seismică ș.a.

Tabel 3.2 Evoluția construcțiilor în orașul Chișinău, extras din (Ginsari et al., 2009)

Denumirea seriei	Perioada construcției	Nr. de nivele	Materialul folosit
1-256	1948-1956	2-4	Bloc de calcar
1.311C	1957-1962	4-5	Bloc de calcar
1-464C, 1-464AC	1957-1962	4-5	Panouri mari din BA
1M-438AC	1962-1968	4-5	Bloc de calcar
1-464AC	1962-1968	5, 9	Panouri mari din BA
102C	1969-1992	5	Bloc de calcar

1-464MC 1-464MCB	1971-1992	9	Panouri mari din BA
135	1971-1992	9	Panouri mari din BA
143, 143MK	1975-1992	9-14	Panouri mari din BA
92MCB	1982-1989	9	Panouri mari din BA

În prezent, fondul locativ al orașului Chișinău numără peste 25 de mii de clădiri ce diferă după destinație, vârstă și schema constructivă (tabelul 3.5). În ultimele două decenii, în oraș, predomină clădirile multietajate din beton armat monolit în zonele centrale a orașului și clădiri cu unu, două sau trei niveluri la periferiile orașului executate tot din beton armat monolit. Pe lângă clădirile noi, există și clădirile construite în anii '70-'80 ai secolului XX, în special blocurile cu 5 niveluri.

Deci o cerință importantă pentru caracterizarea structurilor ar fi clasificarea acestora într-un sistem clar pentru diferențierea soluțiilor structurale. Există un șir de clasificări descrise în diferite prescripții internaționale cum ar fi: metodologia HAZUS-MN (FEMA, 2010), scara macroseismică europeană (Grünthal, 1998), proiectul RISK-EU (Lagomarsino & Giovinazzi, 2004), (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006) și proiectul SYNER-G (Pitilakis et al., 2013). În cadrul cercetării date, s-a ales clasificarea structurilor conform tipologiilor structurale descrise în proiectul RISK-EU. Proiectul RISK-EU propune 4 tipuri de structuri care se ramifică în 28 de tipologii (tabel 3.6).

Tabel 3.3 Tipologii structurale descrise în proiectului RISK-EU

Nr.	COD	Descrierea sistemului structural
1	M1	Structuri cu pereți portanți din zidărie de piatră, compusă din:
2	M1.1	Piatră spartă, piatră naturală
3	M1.2	Piatră simplă
4	M1.3	Piatră masivă
5	M2	Chirpici
6	M3	Structuri cu pereți portanți din zidărie nearmată cu:
7	M3.1	Planșee de lemn
8	M3.2	Bolți de zidărie
9	M3.3	Planșee compozite oțel-zidărie
10	M3.4	Planșee de beton armat
11	M4	Structuri cu pereți portanți din zidărie armată
12	M5	Structuri realizate numai din zidărie armată
13	RC	Structuri din beton armat
14	RC1	Cadre din beton armat
15	RC2	Pereți structurali din beton armat
16	RC3	Cadre din beton armat cu umplutură pereți din zidărie nearmată
17	RC3.1	Structuri regulate
18	RC3.2	Structuri neregulate
19	RC4	Structuri duale din beton armat
20	RC5	Structuri cu pereți prefabricați din beton armat
21	RC6	Structuri cu pereți structurali și pereți prefabricați din beton armat

22	S	Structuri metalice
23	S1	Cadre metalice
24	S2	Structuri metalice cu contravântuiri
25	S3	Cadre metalice cu pereți de umplutură din zidărie nearmată
26	S4	Cadre metalice cu pereți structurali din beton armat
27	S5	Structuri compozite otel-beton
28	W	Structuri din lemn

3.2.2. Specificul zonei cercetate și metodologia propusă

Pentru studiul riscului seismic s-a decis analizarea zonei sectorului Râșcani, mai exact perimetrul cuprins între străzile Tudor Vladimirescu la sud, strada Studenților la nord, strada Florilor la est și strada Nicolae Dimo la vest (fig. 3.11), cu o aria aproximativ de $2,5 \text{ km}^2$. În perimetrul ariei cercetate sunt amplasate peste 700 de clădiri ce diferă după structură, vârstă, material, destinație ș.a.

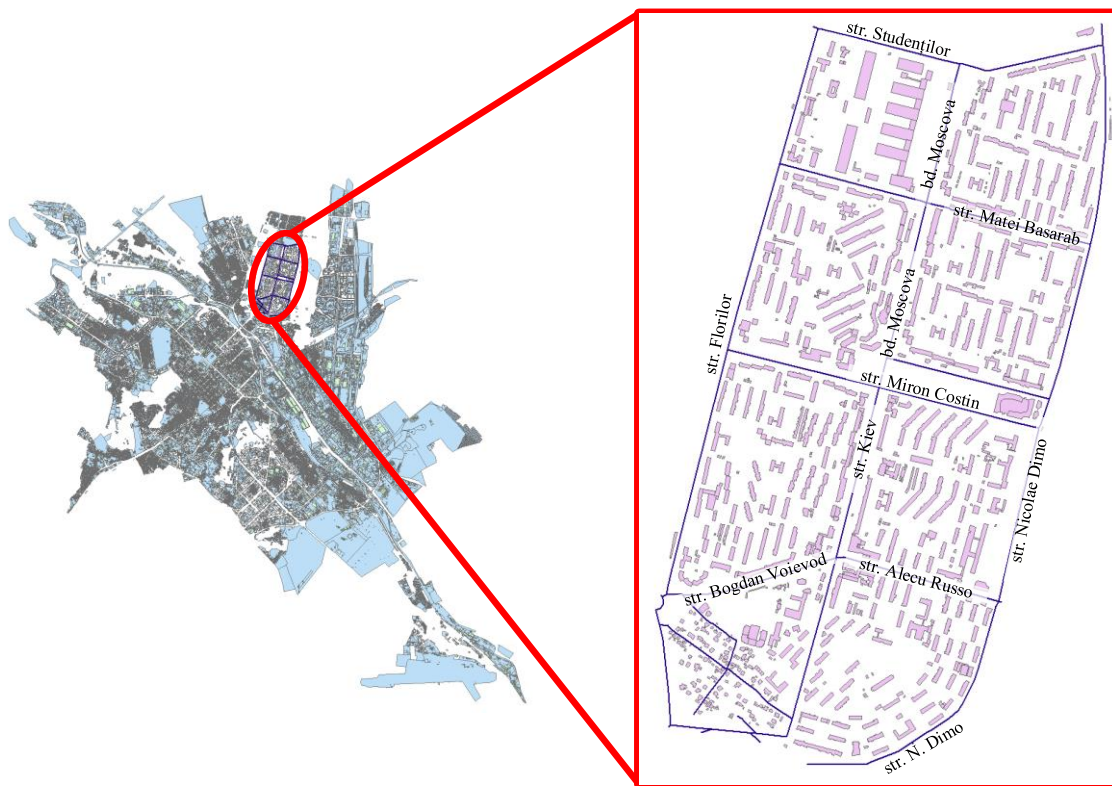


Figura 3.2 Zona cercetată a municipiului Chișinău (sursa: autor)

Zona cercetată poate fi împărțită în 8 cartiere delimitate de la sud la nord cu străzile Kiev și bulevardul Moscova și de la est spre vest cu străzile Bogdan Voievod și str. Aleco Russo, str. Miron Costin și str. Matei Basarab (fig. 3.12).

Pentru evaluarea vulnerabilității seismice a fondului construit în zona municipiului Chișinău se va folosi metoda empirică a indicelui de vulnerabilitate ce cuprinde 6 etape principale:

1. Catalogarea structurilor din zona cercetată în baza unui chestionar. Acest punct are ca obiectiv colectarea informațiilor de bază

2. Determinarea indicelui de vulnerabilitate.
3. Elaborarea funcțiilor de vulnerabilitate.
4. Elaborarea funcțiilor de fragilitate.
5. Introducerea datelor în sistemul GIS.



Figura 3.3 Vederea 3D a zonei cercetate; cu roșu delimitat aria zonei studiate (sursa: autor)

În urma evaluării vizuale a clădirilor și catalogării structurilor din zona cercetată, fiecărei structuri i s-a atribuit un tip de clasificare descrise în tabelul 3.6 (fig. 3.14). Materialul din care este executată structura (beton armat, zidărie armată/nearmată, ș.a.) reprezintă un factor important în această clasificare. În figura 3.13 este ilustrată repartizarea clădirilor conform clasificării indicate în subcapitolul anterior. Se poate observa că structurile dominante reprezintă clădirile din zidărie și cuprinde aproximativ 52,9% din totalul fondului locativ analizat, dintre care 35,7% sunt structurile de tip **M3.4** – ”Structuri cu pereți portanți din zidărie de piatră cu planșee din beton armat” și 13,6% - structuri de tip **M1.1** – ”Structuri cu pereți portanți din zidărie de piatră spartă, piatră naturală”, restul structurilor din zidărie având o pondere mai mică de 4%.

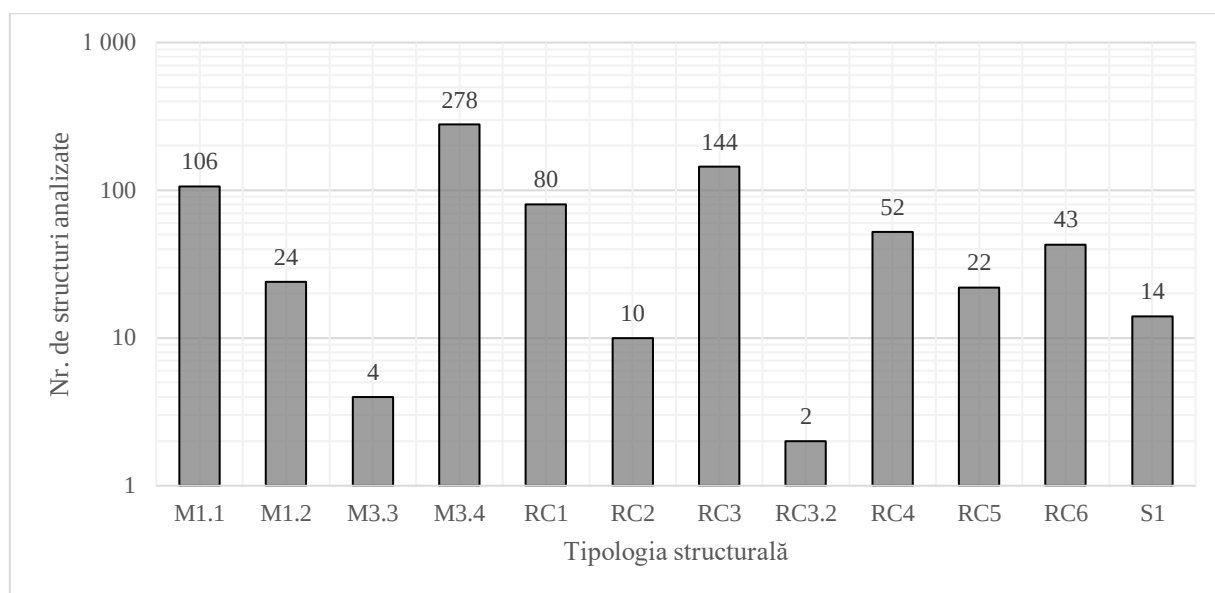


Figura 3.4 Repartizarea tipologiei structurilor în zona de cercetare (sursa: autor)

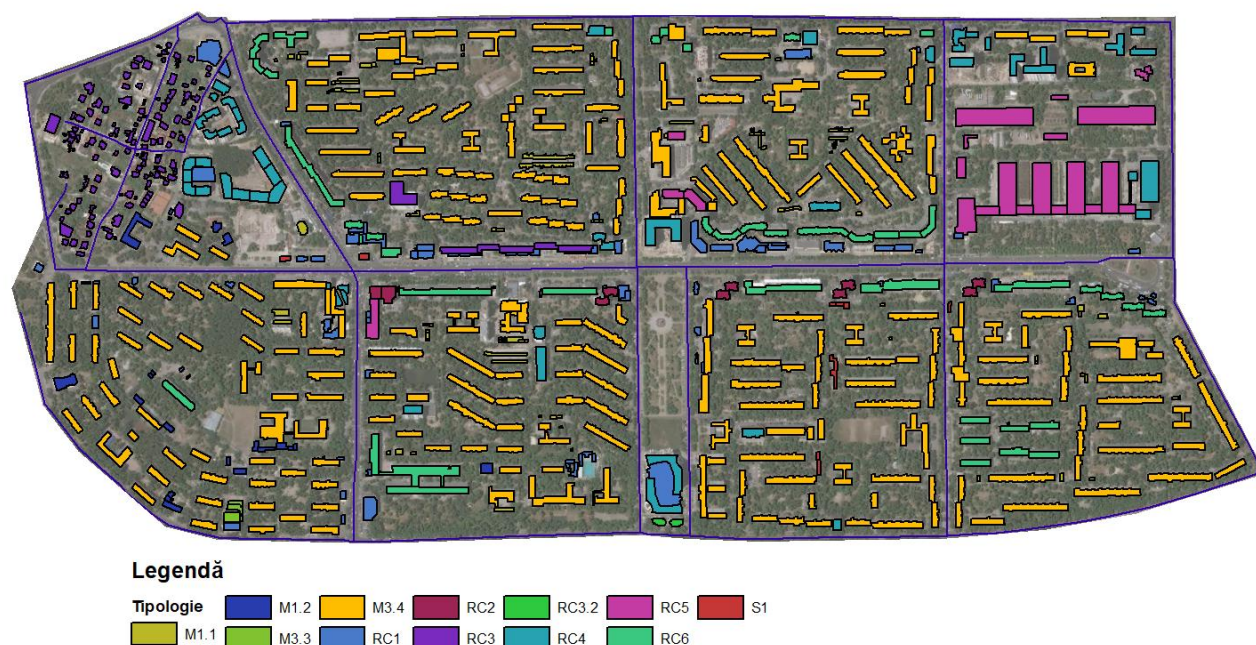


Figura 3.5 Distribuția geografică a tipologiei structurilor în zona cercetată (sursa: autor)

Pe al doilea loc după distribuție sunt structurile din beton armat cu o pondere de 45,3% dintre care mai mult de 18% sunt structurile de tip **RC3** – ”Cadre din beton armat cu umplutură din zidărie nearmată” și structuri de tip **RC1** – ”Cadre din beton armat monolit” cu o pondere de peste 10%. Structurile de tip **RC3** sunt preponderent locuințe individuale de 1, 2 sau 3 niveluri și sunt amplasate în partea sud-est a zonei cercetate. Structurile de tip **RC4** – ”Structuri duale din beton armat” și de tip **RC6** – ”Structuri cu pereți structurali și pereți prefabricați din beton armat”, cu un număr de niveluri mai mare de P+6E, au cu o pondere de aproximativ 12% din totalul fondului locativ și reprezintă un interes sporit din motivul capacității mari de adăpostire a populației



Figura 3.6 Distribuția geografică a clădirilor funcție de destinația lor (sursa: autor)

3.3. Vulnerabilitatea fondului construit în zona cercetată

În urma inspectării și catalogării fiecărei structuri în parte, conform chestionarului prezentat în Anexa 2, s-a putut determina indicele de vulnerabilitate conform metodologiei propuse în lucrările Lagomarsino & Giovinazzi, 2004, Milutinovic & Pierre, 2003, Lagomarsino & Giovinazzi, 2006, Arup, 2013. Valoarea medie a indicelui de vulnerabilitate ce corespunde tipologiei structurii analizate este prezentată în histograma de mai jos.

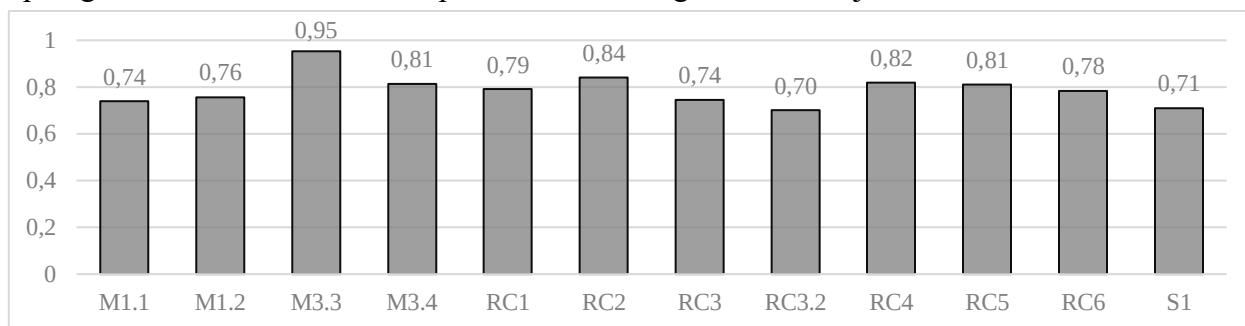


Figura 3.7 Indicele mediu de vulnerabilitate funcție de tipologia structurii (sursa: autor)

Din figura 3.18 se poate observa că cele mai vulnerabile sunt structurile de tip **M3.3** – ”Structuri cu pereți portanți din zidărie nearmată cu planșee compozite” și reprezintă niște structuri cu destinație tehnică. Blocurile locative, cu tipologia structurală de tip **M3.4** au un indice mediu de vulnerabilitate de $V_i = 0,81$. Distribuția indicelui de vulnerabilitate I_v pe amplasamentul studiat este prezentată în figura 3.19. Aplicând formula (3.1), se poate construi funcțiile de vulnerabilitate pentru tipologiile structurale M1.1, M1.2, M3.3, M3.4 (fig. 3.20).



Legendă

Indice de vulnerabilitate (I_v)

0.6-0.7	0.7-0.75	0.75-0.8	0.8-0.85	0.85-0.9	0.9-0.95	0.95-1
---------	----------	----------	----------	----------	----------	--------

Figura 3.8 Distribuția geografică indicelui de vulnerabilitate I_v (sursa: autor)

Tabel 3.4 Stări de degradare a structurii

μ_D	Gradul de avariere	Starea de avariere	Descrierea
0	D_0	Fără degradări	Nu sunt atestate avarii sau fisuri.
0-1	D_1	Degradări minore	Degradări minore la structura de rezistență și moderate la elemente nestructurale.
1-2	D_2	Degradări moderate	Începe o ușoară reducere a rigidității. Structura intră într-o stare de deformare elastică.
2-3	D_3	Degradări avansate	Rezistența crește, rigiditatea începe să se reducă considerabil. Toate componentele structurale au atins o stare de deteriorare ușoară.
3-4	D_4	Degradări majore	Rezistența maximă este atinsă. Structura intră într-o stare de deformare plastică.
4-5	D_5	Colaps	Unele componente structurale încep să cedeze. Deformarea laterală suplimentară va duce la colapsul întregii structuri.

Evaluarea probabilistă în termeni de degradări și curbe de fragilitate pentru gradul mediu de avariere μ_D ce se evaluează cu expresia (3.6), prezentată în subcapitolul 3.1.1, se obține prin distribuția binomială. Așadar, probabilitatea p_k de a avea gradul de avariere D_k pentru gradul mediu de avariere μ_D se evaluează cu ajutorul funcției de probabilitate:

$$p_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} \quad (3.7)$$

substituind în ecuația (3.7) numărul de stări de degradări posibile $D_k (k = \overline{0..5})$ $n = 5$ și probabilitatea $p = \frac{\mu_D}{5}$, obținem următoarea formulă:

$$p_k = \frac{120}{k! (5 - k)!} \cdot \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k} \quad (3.8)$$

Figura 3.21 prezintă curbele de fragilitate pentru tipologia structurală M3.4, care indică probabilitatea de avariere a structurii în funcție de intensitatea cutremurului, scara EMS98. În figura 3.22 este prezentată distribuția probabilității de a obține un nivel de avariere pentru o intensitate dată pentru tipologia structurală M3.4. În ecuația (3.6) din capitolul 3.1.1, intensitatea seismică I conform scării EMS-98 s-a calculat conform relației (Guateni & Petrini, 1989):

$$I = \frac{\ln(PGA) + 7,073}{0,602} \quad (3.9)$$

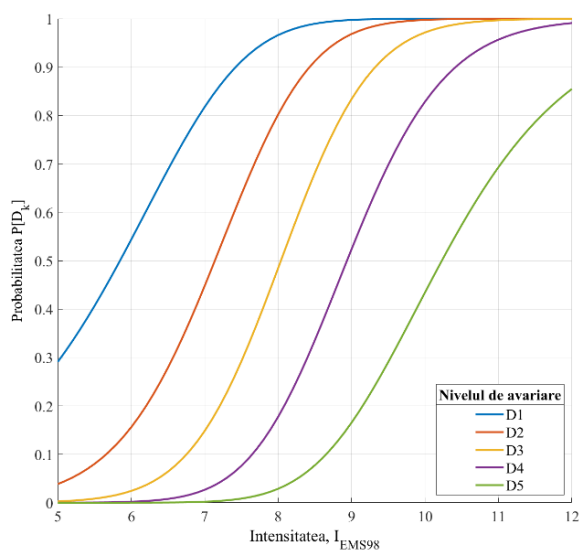


Figura 3.9 Curba de fragilitate pentru tipologia structurală M3.4 (sursa: autor)

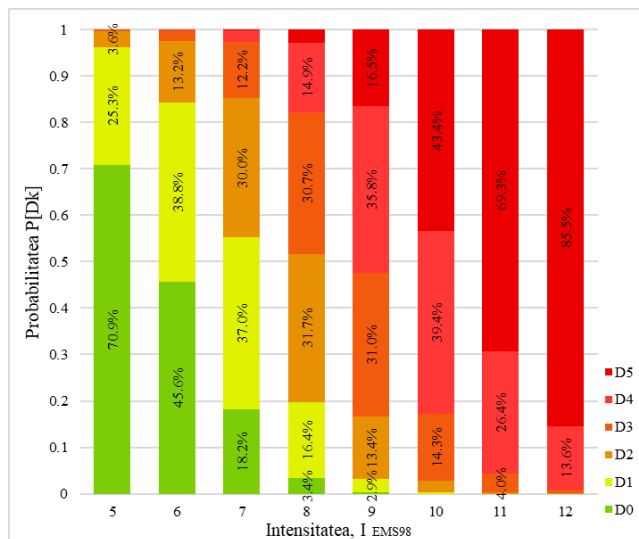


Figura 3.10 Distribuția probabilității de a obține un nivel de avariere pentru o intensitate dată pentru tipologia structurală M3.4 (sursa: autor)

Valorile medii a accelerației terenului pentru diferite stări de avariere la diferite tipuri de structuri sunt prezentate în tabelul 3.9.

Tabel 3.5 Valorile medii a accelerației de vârf a terenului pentru o tipologie dată ca să atingă o stare de avariere dată (sursa: autor)

	M1.1	M1.2	M3.3	M3.4	RC1	RC2	RC3	RC3.2	RC4	RC5	RC6	S1
	PGA (g)											
D_1	0,037	0,035	0,017	0,029	0,308	0,026	0,037	0,043	0,028	0,029	0,032	0,042
D_2	0,081	0,078	0,037	0,062	0,067	0,056	0,081	0,095	0,061	0,062	0,067	0,091
D_3	0,139	0,134	0,631	0,107	0,115	0,096	0,139	0,162	0,103	0,107	0,120	0,156
D_4	0,238	0,230	0,109	0,184	0,198	0,164	0,239	0,278	0,177	0,184	0,205	0,268
D_5	0,522	0,500	0,236	0,400	0,431	0,357	0,522	0,607	0,387	0,400	0,449	0,582

3.4. Incertitudinile în funcțiile de vulnerabilitate și fragilitate

Există o serie de incertitudini ce pot apărea la dezvoltarea funcțiilor de vulnerabilitate și fragilitate folosind metode empirice, ca de exemplu:

1. Există o discrepanță în performanța seismică a unei clădiri încadrată într-o tipologie structurală care este supusă aceluiași nivel de mișcare a solului.
2. Mișcările de teren asociate cu stările de avariere probabile pot avea o variație. Chiar dacă ele sunt grupate, ele pot varia în intervalele de grupare indicate având ca rezultat predicții eronate.
3. Unele clădiri grupate în tipologiile structurale nu sunt reprezentative pentru tipologia dată, astfel poate varia și starea de avariere probabilă.
4. Pot exista incertitudini la colectarea datelor (ce nu depind de evaluator).
5. Durata cutremurului poate afecta semnificativ starea de avariere a structurii, chiar dacă accelerația de vârf a terenului are o intensitate slabă.

Incertitudinile descrise în punctul 1 și 2 sunt luate în considerare prin faptul că funcțiile de fragilitate sunt probabilistice, adică au o deviere ce include variabilitatea avariilor în setul de date colectat. Dacă această variabilitate nu ar exista, atunci funcțiile de fragilitate ar fi linii verticale drepte, ce vor indica 100% probabilitatea de colaps la o anumită valoare a accelerației a_g .

Punctul 3 a fost luat în calcul prin alegerea și folosirea atentă a datelor culese, care reflectă în mod adecvat variația degradărilor probabile a unei clădiri în tipologia structurală încadrată. Aceasta nu exclude total incertitudinea, dar tinde să omogenizeze clădirea în tipologia structurală dată.

Capitolul 4. Calculul riscului seismic

După cum s-a menționat în capitolele precedente, analiza riscului seismic este un proces complex și combină o multitudine de factori ce pot influența rezultatul final. Termenul de risc seismic se referă la pierderile așteptate unor elemente expuse riscului. Elemente expuse riscului pot fi clădiri, drumuri, populația, sau activitățile economice. Așadar analiza riscului seismic nu include doar determinarea pierderilor posibile cauzate fondului locativ în urma unui cutremur, dar și aspecte sociale, economice și culturale. Totodată, determinarea riscului seismic nu reprezintă pasul final în analiză, dar este urmat de un șir de recomandări de a reduce riscul seismic. Riscul poate fi determinat cu o precizie înaltă folosind aspectele cheie în factorii ce îl determină (fig. 4.1).

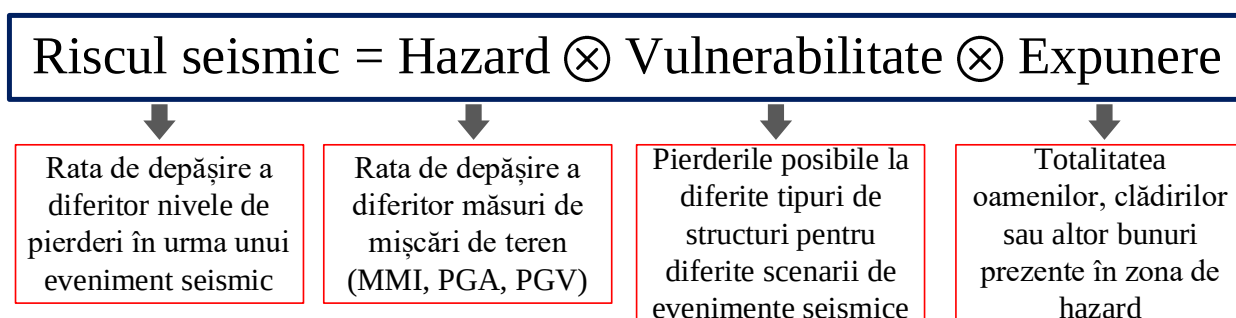


Figura 4.1 Reprezentarea generică a calculului riscului seismic (sursa autor)

4.1. Estimarea daunelor structurii și pierderilor economice

Există un număr mare de metode de estimare a daunelor posibile unor structuri sau unor tipologii de structuri supuse unui cutremur. În linii generale, pierderile așteptate într-o zonă specifică se pot determina cu relația (Seda, 2004):

$$P = \sum_{T_k} \left[\left\{ \sum_{I_i} P(I_i|T_k) \times \left(\sum_{D_j} P(D_j|I_i, T_k) \times (D_j|T_k) \right) \right\} \times V_{T_k} \right] \quad (4.1)$$

în această ecuație T_k reprezintă structurile de tip k , I_i intensitatea evenimentului seismic i , D_j reprezintă avarierea așteptată j și V_{T_k} reprezintă valoarea totală a structurilor de tip k . Formula 4.1 nu ia în considerare capacitatea de ocupare a clădirii sau expunerea economică a regiunii și determină doar pagubele totale a structurilor T_k la un eveniment seismic dat.

Probabilitatea ca o structură să se afle într-o stare de avariere D pentru o accelerație de vârf a terenului a_g poate fi estimată direct din funcțiile de fragilitate prezentate în capitolul anterior. Deci numărul total de structuri aflate într-o stare de avariere D poate fi determinat în baza numărului total de structuri supuse unei accelerației și probabilității ca acest tip de structură se va afla într-o stare de avariere pentru accelerația dată.

$$P(D = D_j | PGA = a_j)_{T_k} = P(D \geq D_j | PGA = a_j)_{T_k} - P(D \geq D_{j+1} | PGA = a_j) \quad (4.2)$$

Numărul de structuri de tipologia T_k ce vor avea o stare de avariere D_j se poate de determinat după expresia:

$$N_s(D_j; T_k) = P(D = D_j | PGA = a_j)_{T_k} \times N_s(a_j, T_k) \quad (4.3)$$

unde $N_s(a_j, T_k)$ reprezintă numărul de structuri de tipologia T_k solicitate de accelerația a_j .

Pentru estimarea pierderilor economice directe, probabilitățile de avariere trebuie convertită în valută. Pentru o stare de avariere D_i costurile de reparație sau de reconstrucție sunt determinate ca produsul dintre suprafața totală a unei structuri sau a unui grup de tipologie structurală, probabilitatea ca structura sau grupul de tipologie structurală să obțină gradul de avariere D_i și costurile de reparații pe metru pătrat pentru un anumit grad de avariere D_i .

Pentru Republica Moldova, valoarea construcției noi (valoarea de reconstrucție sau de înlocuire – tabelul 4.1) se poate de determinat ca produsul dintre prețul curent și volumul sau suprafața totală a construcției (Albu & Albu, 2009):

$$VC = V \times V_{ICVR} \times K_L \times K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (4.4)$$

, unde VC – valoarea construcției noi, V – volumul construcției, V_{ICVR} – valoarea de reconstrucție determinată din culegerea indicilor comasați ai valorii de reconstrucție $\left(\frac{lei}{m^3}\right)$, K_L – coeficientul pentru materiale locale egal numeric cu 1.04, K_1 – coeficientul inflației pentru anii 1969-1984 egal numeric cu 1,2, K_2 – coeficientul inflației pentru anii 1984-1991 egal numeric cu 1,67, K_3 – coeficientul inflației la anul 2022 trimestrul 2 egal numeric cu 53,252.

Așadar, având valoarea totală a construcției și costul construcției pe metru pătrat se pot determina costurile de reparație. Pentru a estima pierderile economice directe – stările de avariere probabile, trebuie convertite în echivalentul lor în lei. Pierderile sunt determinate ca degradări structurale și nestrustructurale. Degradările structurale se referă la degradările fizice a structurii de rezistență a clădirii, iar degradările nestrustructurale iau în considerare degradările ce apar în elementele de finisare a clădirii (ferestre, uși, tencuieli ș.a.).

Așadar, pentru o clădire cu o destinație și starea de avariere dată, costurile de reparație sunt determinate ca produsul dintre suprafața totală a clădirilor cu aceeași destinație, probabilitatea ca aceasta să se afle într-o stare de avariere dată și costul de reparație a construcției convertit la $1 m^2$. Această metodologie este propusă în cadrul ghidului HAZUS (FEMA, 2003).

Costurile de reparație totale se pot calcula cu ajutorul expresiei:

$$CT_i = CS_i + CNS_i \quad (4.5)$$

Costurile de reparație a elementelor structurale se determină cu formula:

$$CS_{ds,i} = VC_{mp,i} \times \sum_i P_{ds,i} \times RCS_{ds,i} \quad (4.6)$$

$$CS_i = \sum_i CS_{ds,i} \quad (4.7)$$

Costurile de reparație a elementelor nestrustructurale se determină cu relația:

$$CNS_{ds,i} = VC_{mp,i} \times \sum_i P_{ds,i} \times RCNS_{ds,i} \quad (4.8)$$

$$CNS_i = \sum_i CS_{ds,i} \quad (4.9)$$

, unde $CS_{ds,i}$ – reprezintă costurile de reparație sau reconstrucție a elementelor structurale de starea de avariere ds și destinația i , $VC_{mp,i}$ – costul de reconstrucție pentru destinația tipul de clădire de destinația i , $P_{ds,i}$ – probabilitatea ca clădirea de destinație i să se afle într-o stare de avariere ds , $RCNS_{ds,i}$ – rata costului de reparație la reconstrucție a elementelor structurale, $RCNS_{ds,i}$ – rata costului de reparație la reconstrucție a elementelor nestructurale.

4.2. Estimarea numărului de victime posibile

4.2.1. Metodologia HAZUS

Metodologia HAZUS (FEMA, 2013) oferă o estimare a victimelor posibile în baza unei ipotezei că există o corelare strânsă dintre starea de avariere a structurii și nivelul de gravitate a leziunilor și pagubelor. Tabelul 4.4 reprezintă descrierea nivelelor de gravitate ce pot fi prezentate într-o structură avariata.

Tabel 4.1 Nivele de gravitate în structurile avariate conform (FEMA, 2013)

Nivelul de gravitate	Descrierea
Nivel 1	Leziuni care necesită asistență medicală de bază și necesită bandaje sau observarea manifestării leziunii în timp (ex: hematoame, tăieturi care necesită cusătură, arsuri de gradul I și II ș.a.)
Nivel 2	Leziuni care necesită un grad mai avansat al intervenției medicale (ex. radiografie, intervenții chirurgicale), dar care nu pun în pericol viața (ex. arsuri de gradul III, os fracturat, deshidratare ș.a.)
Nivel 3	Leziuni care pun în pericol viața dacă nu sunt tratate rapid și adecvat (ex. hemoragii, organe interne înțepate, leziuni ale coloanei vertebrale ș.a.)
Nivel 4	Ucis instantaneu sau rănit mortal

Există și alte gradări a nivelului de gravitate ce sunt bazate pe parametri medicali cuantificabili. Scara prezentată în metodologia HAZUS reprezintă un compromis dintre comunitatea medicală ce planifică răspunsul și soluțiile în cazul unui seism, și comunitatea inginerească ce furnizează datele.

Așadar, numărul de victime cu nivelul de gravitate $n = \overline{1..4}$ se poate calcula cu formula:

$$\begin{aligned} N_{oameni,IN}(NG_n, SA_i, TS_k) \\ = N_s(SA_i, TS_k) \times \bar{N}_{oameni}(TS_k) \times \Pr(NG = NG_n | SA_i) \times IN \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$N_{oameni,OUT}(NG_n, SA_i, TS_k) = N_s(SA_i, TS_k) \times \bar{N}_{oameni}(TS_k) \times \Pr(NG = NG_n | SA_i) \times OUT \quad (4.11)$$

În formula 4.10 și 4.11 s-au folosit următoarele notații:

$N_s(SA_i, TS_k)$ – numărul de structuri în starea de avariere SA_i pentru tipologia structurală TS_k ;

$\bar{N}_{oameni}(TS_k)$ – numărul mediu de oameni pentru tipologia structurală TS_k ;

$\Pr(NG = NG_n | SA_i)$ – rata victimelor din clădire (*IN*) și din afara clădirilor (*OUT*) conform tabelelor 4.6 și 4.7.

4.2.2. Metodologia propusă de (Cobrun & Spence, 2002)

În lucrarea Cobrun & Spence, 2002 estimarea victimelor se efectuează prin determinarea ”ratei de letalitate” pentru fiecare tipologie structurală. Rata de letalitate se determină ca raportul dintre persoanele decedate și numărul total de persoane dintr-o tipologie structurală.

Rata de letalitate poate fi estimată pentru fiecare tipologie structurală folosind un set de parametri, numite parametri M . În total sunt 5 parametri M , de la $M1$ la $M5$. Fiecare tip de structură are un parametru M specific care ia în considerare diferite aspecte și factori ce influențează rata de letalitate.

Parametrul $M1$ (fig. 4.3) estimează numărul total de populație ce este repartizată într-o anumită tipologie structurală. Acest parametru este o importanță majoră, deoarece direct influențează modelul de calcul și rezultatele analizei. Pentru zona cercetată a municipiului Chișinău s-a analizat și determinat numărul de locatari funcție de tipologia structurală (vezi figura 4.4).

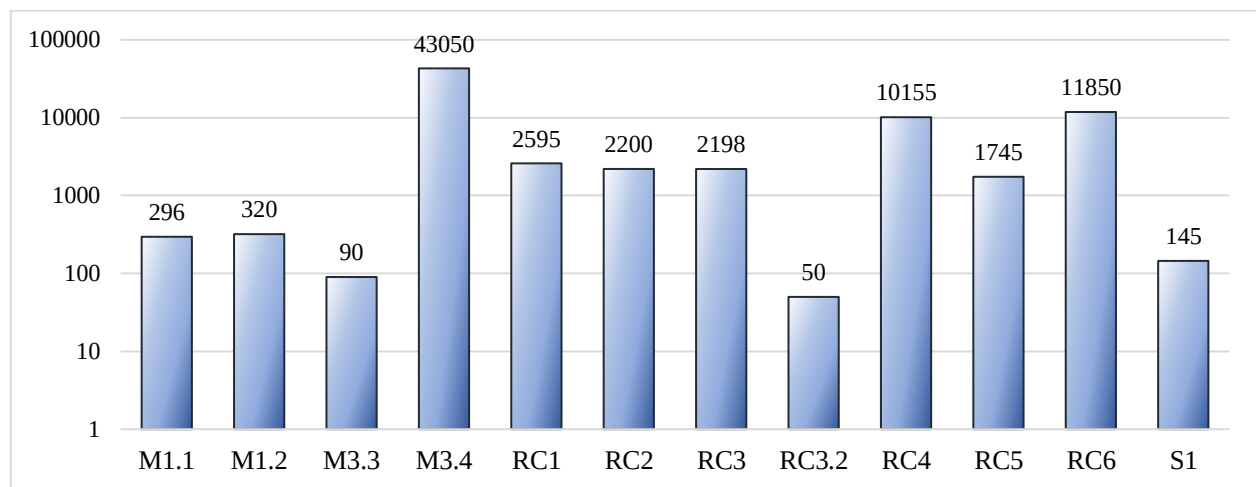


Figura 4.2 Repartizarea populației în zona cercetată funcție de tipologia structurală (sursa: autor)

Din figura 4.4 se poate de observat că peste 43 mii de persoane locuiesc în clădiri rezidențiale de tip **M3.4** – ”Structuri cu pereți portanți din zidărie de piatră cu planșee din beton armat” cu înălțimea până la 5 nivele și peste 21 mii persoane locuiesc în clădiri rezidențiale de tip RC4 și RC6 – structuri din BA cu înălțimea până la 9-14 nivele.

Pentru zona cercetată a municipiului Chișinău, distribuția geografică a clădirilor funcție de destinația lor este prezentată în figura 3.1 a capitolului 3, iar în figura 4.6 este prezentat numărul maxim de oameni adăpostiți funcție de destinația construcției.

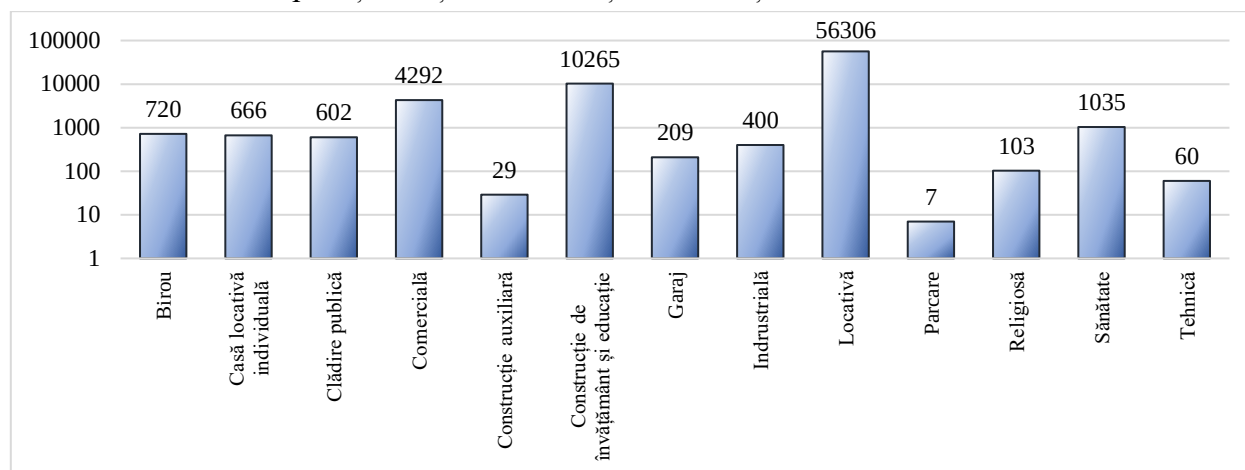


Figura 4.3 Numărul maxim de oameni adăpostiți funcție de destinația construcției (sursa: autor)

Din figura 4.6 se observă că cel mai mare număr al populației (peste 56 mii de oameni) se află în clădiri rezidențiale, pe al doilea loc fiind clădirile de învățământ și educație (peste 10 mii de oameni). Așadar, adoptând parametrul $M2$ din figura 4.5 se poate concluda că în timpul zilei cel mai mare număr de oameni se vor afla în centrele comerciale și industriale, clădirile publice și centre de învățământ, depășind numărul de populație din clădirile rezidențiale.

Este evident faptul că numărul de persoane blocate într-o structură prăbușită este mai mare în clădiri multietajate, pe când din clădirile cu 1-2 nivele oamenii reușesc să se evacueze (tabel 4.8). Exercițiile de evacuare au demonstrat că oamenii nu pot ieși dintr-o clădire de oriunde deasupra primului etaj în mai puțin de 30 de secunde, chiar dacă sunt capabili să meargă în timpul vibrațiilor puternice. O presupunere logică ar fi că doar aproximativ 50% din totalul persoanelor ce locuiesc la parter, ar putea să se evacueze la timp, pe când restul locatarilor, cel mai probabil, vor fi blocați în interiorul clădirii (UTCB, 2006).

4.3. Scenarii de simulări

Pentru a evalua riscul seismic pe teritoriul municipiului Chișinău în limitele zonei cercetate, vor fi luate în considerare două scenarii probabile cu diferite magnitudini. Aceste scenarii sunt definite astfel:

1. Primul scenariu implică un cutremur cu un moment magnitudine de $M_w = 7,7$ grade, cu epicentrul în regiunea seismică subcrustală Vrancea.
2. Al doilea scenariu se bazează pe cea mai mare accelerație de vârf a terenului care poate apărea pe teritoriul municipiului Chișinău.

4.3.1. Scenariu 1. Moment magnitudine $M_w=7,7$

În cadrul acestei analize, vom lua în considerare un eveniment seismic de referință ce reprezintă un cutremur cu cea mai mare magnitudine înregistrată în ultimii 100 de ani în zona seismică subcrustală Vrancea. Acest eveniment de referință a avut loc în anul 1940 și a fost caracterizat printr-un moment magnitudine de $M_w = 7,7$ grade.

Prin utilizarea acestui eveniment de referință, cercetarea se concentrează pe analiza impactului unui cutremur cu magnitudine semnificativă asupra clădirilor și infrastructurii din această regiune seismică. Un astfel de cutremur de mare magnitudine poate genera forțe și solicitări considerabile asupra construcțiilor existente, punând în evidență importanța consolidării structurilor pentru a rezista cu succes unor astfel de dezastre naturale.

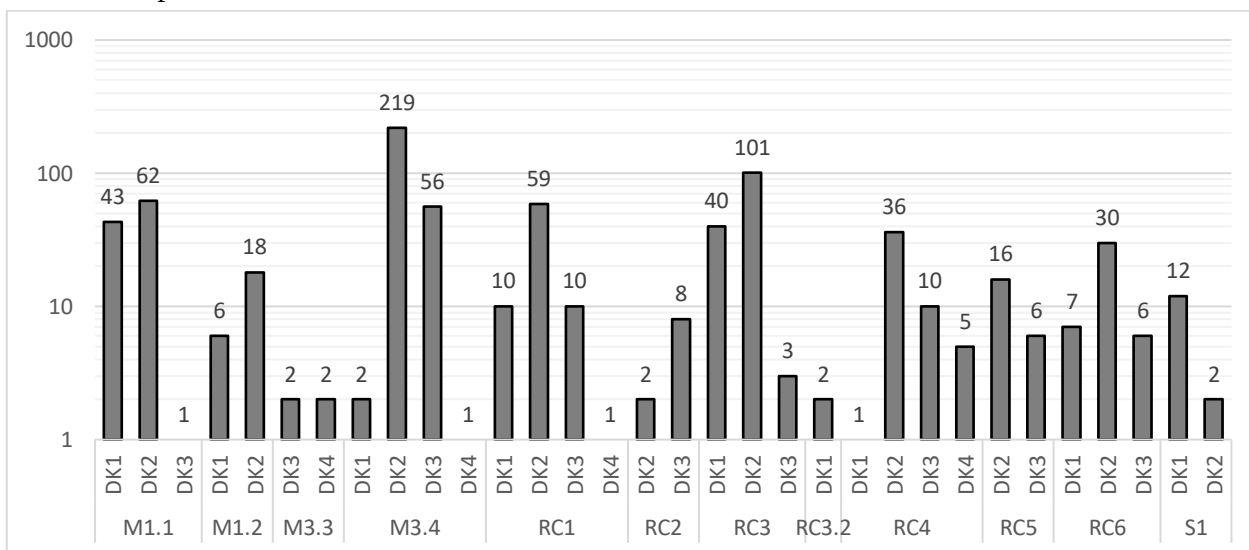


Figura 4.4 Numărul de structuri funcție de starea de avariere grupate după tipologia structurală pentru scenariu I (sursa: autor)

Din graficul 4.12 se observă că cele mai mari pierderi economice sunt la clădiri locative și constituie aproximativ 7,958 milioane lei moldovenești, urmată de construcțiile comerciale cu pierderi de peste 990 milioane lei.

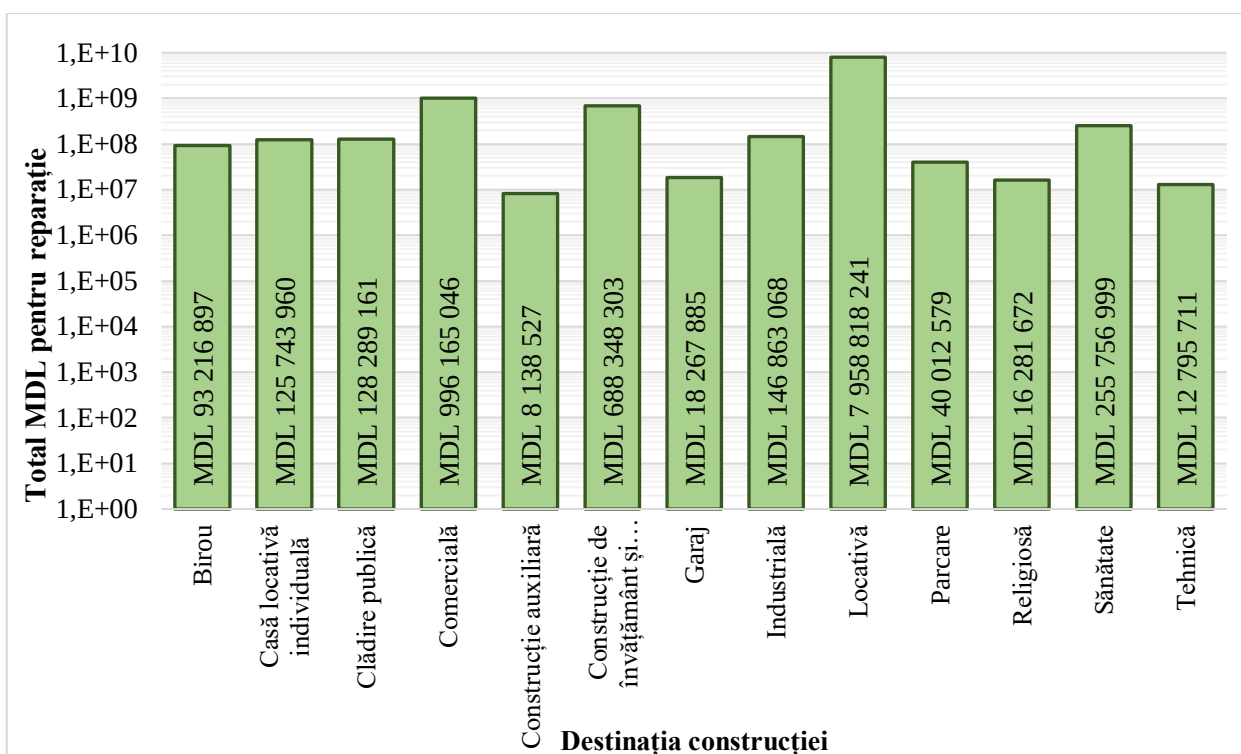


Figura 4.5 Distribuția pagubelor economice funcție de destinația construcției pentru scenariu I (sursa: autor)

Din punct de vedere al pierderilor economice funcție de tipologie structurală (fig. 4.13) se poate observa că cea mai mare pondere o au structurile de tip M3.4 cu pagube economice de aproximativ 5,421 milioane și RC4 cu pagube economice de aproximativ 1,681 milioane, ele fiind cele mai răspândite pe zona cercetată, primordial având destinația de structuri rezidențiale/locative.

Tabel 4.2 Victimele posibile conform metodologiei HAZUS pentru scenariu I (sursa: autor)

Destinația construcției	Ziua				Noaptea			
	NG ₁	NG ₂	NG ₃	NG ₄	NG ₁	NG ₂	NG ₃	NG ₄
Birou	25	8	1	2	0	0	0	0
Casă locativă individuală	7	2	0	0	8	2	0	0
Clădire publică	25	8	1	2	0	0	0	0
Comercială	144	49	10	12	121	42	8	10
Construcție auxiliară	1	0	0	0	1	0	0	0
Construcție de învățământ și educație	323	102	15	27	0	0	0	0
Garaj	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrială	8	2	0	0	7	2	0	0
Locativă	1447	468	83	122	1620	521	87	133
Parcare	0	0	0	0	0	0	0	0
Religioasă	2	1	0	0	0	0	0	0
Sănătate	22	7	1	1	13	4	1	1
Tehnică	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2003	646	113	167	1770	572	97	144

În tabelul 4.11 sunt prezentate estimările probabile referitoare la numărul victimelor în funcție de diferite niveluri de gravitate pentru scenariul prezentat, folosind metodologia HAZUS.

4.3.2. Scenariu 2. Accelerația de vârf a terenului $a_g=0.2g$

Al doilea scenariu de analiză se fundamentează pe cea mai mare accelerație de vârf a terenului înregistrată pe teritoriul municipiului Chișinău. Această valoare a accelerației, $a_g = 0.2g$, a fost determinată în capitolul II al prezentului studiu. Acest scenariu presupune un nivel extrem de ridicat al forțelor seismice care pot afecta zona cercetată.

Utilizarea unei valori ridicate a accelerației terenului, așa cum este prezentată în scenariul de analiză, impune cerințe mai exigente în ceea ce privește proiectarea structurilor rezistente la cutremur. Astfel, proiectații vor fi nevoiți să adopte tehnici de construcție și materiale cu o rezistență superioară pentru a face față forțelor seismice majore ce pot apărea în timpul unui cutremur.

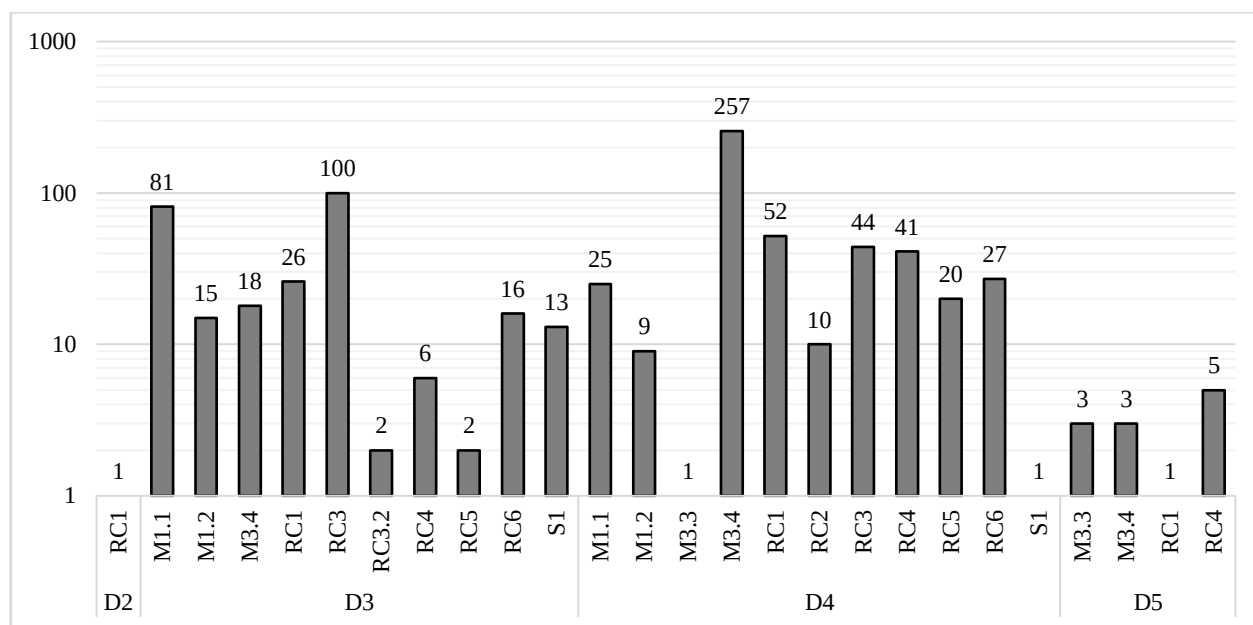


Figura 4.6 Numărul de structuri funcție de tipologia structurală grupate după starea de avariere pentru scenariu II (sursa: autor)

Din analiza prezentată în figura 4.14, se poate observa că în cazul unui scenariu cu o accelerație de vârf de $a_g = 0.2g$, mai mult de jumătate dintre structurile din fondul construit (adică 487 de clădiri) vor ajunge în starea de avariere D_4 , caracterizată prin degradări majore, incluzând prezența deformațiilor plastice. În plus, 297 de clădiri vor atinge gradul de avariere D_3 . Aceste constatări evidențiază că peste 90% din fondul locativ va suferi degradări în stările D_3 și D_4 .

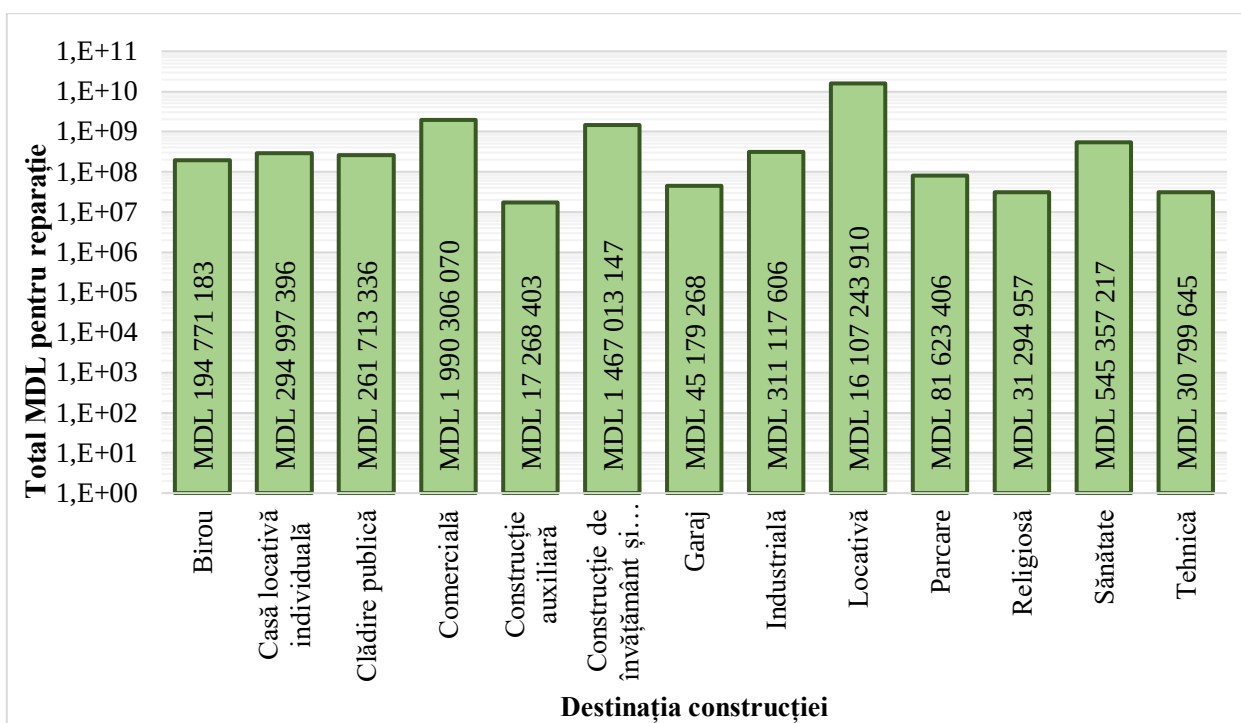


Figura 4.7 Distribuția pagubelor economice funcție de destinația construcției pentru scenariu II (sursa: autor)

În figura 4.18 se prezintă o analiză detaliată a distribuției pagubelor economice în funcție de destinația construcțiilor. Observăm că, asemenea scenariului I, cele mai mari pagube economice se înregistrează la construcțiile locative, cu valoarea estimată a daunelor depășind 16,107 milioane de lei moldovenești. Următoarea poziție cu cele mai mari pagube economice este reprezentată de clădirile comerciale, cu o valoare estimată a daunelor de 1,990 milioane lei.

Similar scenariului I, observăm că pagubele economice majore la clădirile locative și la structurile de tipologia M3.4 se explică prin faptul că în zona cercetată predomină construcțiile cu destinație locativă, care sunt executate din zidărie și au planșee prefabricate din beton armat cu goluri, așa cum se poate observa în capitolul III al prezentei lucrări (figurile 3.14 și 3.17).

În tabelul 4.14 sunt prezentate estimările probabile referitoare la numărul victimelor utilizând metodologia descrisă de Cobrun & Spence, 2002. Conform analizelor efectuate, rezultatele indică, ca și în metodologia HAZUS, că numărul maxim de victime va fi pe timpul nopții, numărul persoanelor afectate cu diferite niveluri de gravitate fiind de 35450 de oameni, dintre care aproximativ 10 mii de persoane nu vor supraviețui.

Tabel 4.3 Victimele posibile conform metodologiei (Cobrun & Spence, 2002) pentru scenariu II (sursa: autor)

Destinația construcției	Ziua				Noaptea			
	NG ₁	NG ₂	NG ₃	NG ₄	NG ₁	NG ₂	NG ₃	NG ₄
Birou	67	127	95	99	11	21	16	17
Casă locativă individuală	18	72	18	72	40	158	40	158
Clădire publică	65	98	98	65	11	16	16	11
Comercială	270	889	308	851	45	148	51	142
Construcție auxiliară	1	3	1	3	2	7	2	6

Construcție de învățământ și educație	1097	1674	1640	1131	183	279	273	189
Garaj	22	34	33	23	4	6	6	4
Industrială	22	86	22	86	4	14	4	14
Locativă	2368	5234	3215	4386	5209	11514	7073	9649
Parcare	0	2	0	2	0	0	0	0
Religioasă	11	17	17	11	2	3	3	2
Sănătate	62	217	68	211	10	36	11	35
Tehnică	6	10	10	6	1	2	2	1
Total	4010	8463	5525	6947	5521	12204	7497	10228

Capitolul 5. Măsuri și soluții la îmbunătățirea siguranței fondului construit în municipiul Chișinău

Capitolele precedente au demonstrat vulnerabilitatea teritoriului municipiului Chișinău și pagubele devastatoare ce se pot produce la un eveniment seismic puternic. În pofida faptului că este cunoscut pericolul posibil al mișcărilor de teren din Republica Moldova și zona cercetată, în ultimii ani nu s-a luat nici o măsură de prevenire sau micșorare a nivelului de risc seismic. Luând în considerare experiența altor state afectate de cutremure, se poate de concluzionat că măsurile de diminuare a riscului seismic sunt vitale nu doar pentru reducerea victimelor, dar și pentru economia țării. Viteza de reluare a activităților economice după un cataclism natural depinde de nivelul de pregătire a populației și a statului de acest cataclism.

La baza planurilor de prevenire și anticipare a pierderilor și daunelor cauzate de cutremur stau o serie de principii de cercetare și management (fig. 5.1). Scopul principal care se atinge în urma conlucrării interdisciplinare este micșorarea și atenuarea pagubelor posibile prin implementarea măsurilor care reduc punctele vulnerabile depistate într-o zonă cercetată.

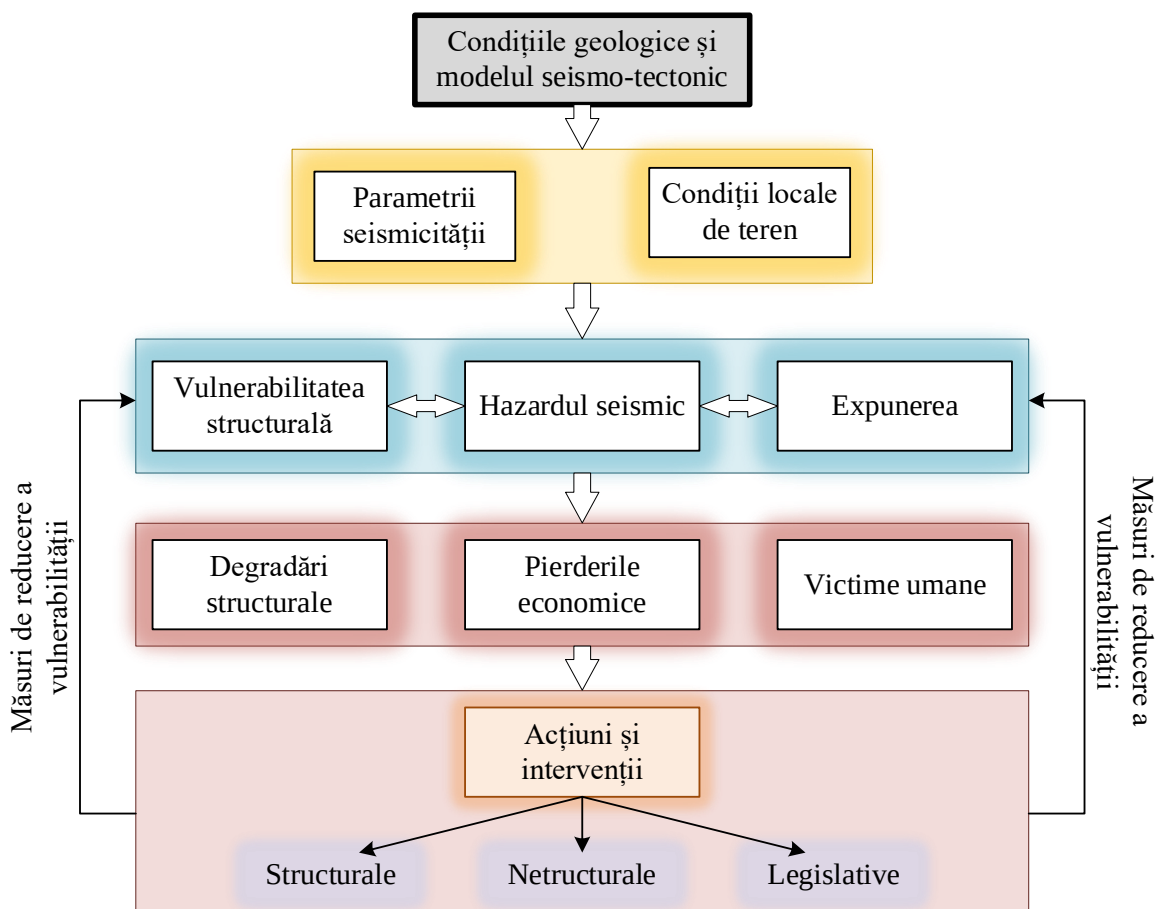


Figura 5.1 Lanțul de la principiile de cercetare de bază până la acțiuni de prevenire

Reducerea riscului seismic se face prin micșorarea vulnerabilității, atât a clădirilor cât și a societății în întregime. Scenariile de simulare din capitolul precedent au evidențiat necesitatea elaborării unor seturi de politici de natură structurală, nestructurală și legislativă, care ar ameliora efectele dezaastroase ale mișcărilor de teren.

5.1. Recomandări tehnice

Recomandările de natură structurală sunt menite să crească performanța clădirilor existente și a celor în proces de construcție și elaborare. Acest set de recomandări trebuie să fie aplicat împreună cu actele legislative în vigoare.

5.1.1. Recomandări pentru clădiri noi

5.1.1.1. Concepția structurilor rezistente seismic

Una dintre cele mai efective măsuri în reducerea riscului seismic este concepția structurilor pentru a fi mai rezistente la mișcări de teren puternice. O astfel de abordare poate reduce semnificativ pierderile economice cauzate de degradările medii și majore ale clădirilor afectate seismic. Cu regret, se constată că această abordare nu este aplicată în Republica Moldova, atât din motivul că normele de proiectare a ”construcțiilor în regiuni seismice active” sunt învechite și au peste 40 de ani, cât și din perspectiva legislației în vigoare, care nu ia în considerare seriozitatea problemei.

5.1.1.2. Folosirea amortizoarelor hidraulice

O altă metodă structurală ce poate fi folosită în construcția clădirilor rezistente ar fi folosirea echipamentelor și utilajelor destinate să reducă oscilațiile seismice a structurilor cum ar fi amortizoarele hidraulice (Constantinou et al., 1993), (Hansen & Sorensen, 2002).

Această metodă implică instalarea amortizoarelor la fiecare nivel al clădirii între stâlpi și grinzi. Fiecare amortizator este format din capete de piston amplasat în interiorul unui cilindru umplut cu ulei. În timpul unui seism, structura transferă energia în pistoane, acestea disipând forțele seismice.

5.1.1.3. Izolarea bazei fundației

Crearea unei fundației ”izolate” și ”flexibile” poate spori performanța seismică a clădirii în timpul cutremurului. Continuitatea clădirii este întreruptă la nivelul inferior al suprastructurii prin folosirea de soluții adecvate (elastomeri, rulmenți de frecare, rulmenților cu bile, sisteme de suspensie pe arc ș.a.).

Principiu de lucru unuia astfel de izolator este prezentat în figura 5.2. În primul caz (figura 5.2a), în timpul cutremurului fundației i se impune o accelerație care este transmisă integral suprastructurii. Această accelerație este transformată în forța de inerție care dezvoltă deformații structurale. În al doilea caz (figura 5.2b), când terenul de fundare este supus accelerației, sistemele

de amortizare încep să se deformeze, iar clădirea rămâne deasupra fără deplasări considerabile. Prin urmare, suprastructura este izolată parțial de infrastructură.

Așadar, promovarea izolării bazei ar ajuta considerabil la reducerea degradărilor într-o clădire. Acest tip de protecție structurală este recomandabil de aplicat la clădirile publice, în special acelea care vor juca un rol crucial în dirijarea activităților de răspuns la cutremur (stații de pompieri, spitale etc.).

5.1.1.4. Fixarea elementelor nestructurare

Problema asigurării fixării componentelor nestructurale a construcției este comună pentru țările afectate seismic, deși elementele critice sunt diferite în țările slab, înalt și în curs de dezvoltate. Dintre exemple ce au fost observate în urma examinării în situ a construcțiilor după cutremur sunt: pereți nestructurali prăbușiți parțial sau total, elementele de acoperiș, ornament, balustrade și balcoane dărâmate. Această problemă persistă din motivul folosirii materialelor și tehnologiilor necorespunzătoare și neimplicarea inginerilor în procesul de proiectare a elementelor arhitecturale. Pentru a rezolva acest lucru, pe lângă alegerea materialelor și tehnologiilor conforme și implicarea inginerilor structurali, mai este nevoie și de antrenarea muncitorilor în domeniul construcției pentru a educa cum trebuie să fie instalate obiectele nestructurale și arhitecturale în cel mai sigur mod.

5.1.2. Recomandări pentru clădiri la clădiri existente

5.1.2.1. Consolidarea infrastructurii critice

Termenul "infrastructură critică" definește orice tip de structură sau rețea de care depinde stabilitatea și siguranța funcționării unui sistem sau a unui proces (Alexandrescu & Văduvă, 2006). Vorbind în cazul specific al municipiului Chișinău, putem afirma că podurile, magistralele de furnizare a energiei termice și electrice, apeductele sunt infrastructuri critice urbane. Toate aceste structuri, proiectate și construite între anii 1980-1990 au suferit o uzură fizică și morală vizibilă. Consolidarea și modernizarea acestora reprezintă un pas important în siguranța și securitatea orașului în cazul unui dezastru natural. Actualmente, cu majorarea populației urbane în Chișinău și lipsa măsurilor de urbanizare bine definită de autoritățile publice locale, crește nu doar numărul de potențiali locuitori ce se pot afla în zone cu vulnerabilitate și risc ridicat, dar și intensitatea consecințelor unui dezastru.

5.1.2.2. Consolidarea construcțiilor de uz curent

În Republica Moldova, toate intervențiile în structurile existente se fac în baza unui raport de expertiză tehnică elaborat de către un expert tehnic atestat în construcției specializat în domeniul *B – "Rezistență și Stabilitate"*. În baza raportului de expertiză tehnică, împreună cu concluziile și recomandările raportului, proiectantul elaborează soluții specifice pentru fiecare structură de rezistență în parte.

Din septembrie 2020, în baza ordinului 161 din 01.09.2020 a intrat în vigoare codul practic CP E.01.04:2019 ” Evaluarea nivelului de protecție antiseismică a construcțiilor existente”. Acest document stabilește modul de evaluare a nivelului de protecție antiseismică a construcțiilor existente. Deși documentul explică conceptul de evaluare seismică și metodele de investigații posibile, sunt omise o serie de informații cum ar fi: cerințe de performanță, folosirea accelerogramelor înregistrate și/sau artificiale, metode de calcul dinamic neliniar ș.a. astfel existând lacune în ceea ce privește evaluarea seismică a clădirii și a metodelor de investigație aplicabile. Aceste omisiuni generează deficiențe semnificative în cadrul procesului de evaluare seismică a structurilor.

5.2. Recomandări legislative pentru îmbunătățirea siguranței seismice a fondului locativ

5.2.1.1. Inspecția periodică a clădirilor

Inspecția periodică a construcțiilor ajută la menținerea nivelului satisfăcător al stării tehnice a structurii.,Cu părere de rău trebuie menționat că în Republica Moldova nu există nici o lege sau document normativ care să oblige la efectuarea inspecției periodice.

5.2.1.2. Informarea și antrenarea populației

Populația și comunitatea unui oraș, sector sau cartier sunt primii martori și primele victime ce apar în urma unui cutremur. În același timp, tot ei, sunt acei care pot oferi primul ajutor medical, să înceapă primele lucrări de descarcerare și să ajute organele competente în procesul de reabilitare a infrastructurii și căilor de comunicații. Prin urmare, comunitățile locale și regionale joacă un rol deosebit de important în acțiunile imediate post-dezastru. Recunoașterea rolului comunităților și acordarea de sprijin din partea administrațiilor publice centrale și locale este esențială pentru menținerea și consolidarea vitezei și capacității de răspuns a comunității.

Pe lângă procesul de educație, lansarea campaniilor de informare și creșterea gradului de conștientizare a populației poate îmbunătăți semnificativ rolul comunităților locale în gestionarea riscului de dezastru. Interconectarea și corelarea campaniilor de informare și a activităților de conștientizare a populației cu evenimentele educaționale, sociale și culturale locale este una dintre metodele eficiente în menținerea pregătirii comunităților pentru un dezastru probabil.

5.2.1.3. Includerea membrilor comunității în planificarea răspunsului

Activitățile post-dezastru oferă comunităților locale o regândire și o mai bună înțelegere a nevoilor în termeni de lungă durată ce țin de protecția și educația societății. Aceste activități sunt o perfectă oportunitate pentru autoritățile publice locale să deschidă un dialog constructiv pentru gestionarea și coordonarea planurilor de acțiuni optime de reconstrucție și consolidare. O dată ce comunitatea va fi implicată în procesul de planificare a răspunsului seismic, este cert că nivelul de conștientizare a comunității în întregime va atinge un nivel înalt pentru a face față unui viitor dezastru natural (fig. 5.4).

5.2.1.4. Dezvoltarea mijloacelor multiple de comunicare

Avertizările de dezastru trebuie să fie livrate tuturor celor aflați în pericol. Sistemele de avertizare timpurie sunt primele ce anunță populația de posibila producere a unui cutremur de pământ. Este dificil de comunicat eficient după un dezastru deja declanșat către un segment mare de populație privind starea actuală a evenimentelor. Ca rezultat a întreruperii sistemelor de alimentare cu energie electrică sau cablurilor de telecomunicații, se întâmpină dificultăți în informarea societății privind amplasarea celor mai apropiate puncte mobile de triaj și plasament.

5.2.1.5. Dezvoltarea planului urbanistic general.

În contextul măsurilor necesare de implementat în domeniul urbanismului și amenajării teritoriului, este recomandată definirea aspectelor ce țin de siguranța în exploatare și confortul urban. Astfel, în cazuri de mișcări seismice puternice sunt necesare acțiuni, ce urmează a fi incluse în Planul Urbanistic General al localităților din Republica Moldova. În acest sens, în cadrul Regulamentelor Locale Urbanistice, pentru fiecare tipuri de zone urmează a fi incluse recomandări specifice. Totodată, se recomandă ca aceste măsuri să fie incluse și în planul de amenajare a teritoriului național, care reprezintă sinteza programelor strategice sectoriale pe termen mediu și lung.

5.2.1.6. Revizuirea standardelor și normelor de proiectare naționale

Standardele și normele de proiectare la acțiunile seismice sunt prima linie de protecție a populației și infrastructurii în cazul unui cutremur de pământ. Revizuirea periodică și adaptarea lor la noile tehnologii și procese în construcții este o etapă vitală în menținerea la nivel înalt a procesului de cercetare, elaborare și execuție în domeniul construcțiilor.

După cum s-a menționat anterior, în Republica Moldova, pentru proiectarea construcțiilor rezistente la cutremur se folosește normativul SNiP II-7-81*, elaborat la începutul anilor '80 ai secolului XX și nu a suferit modificări până în prezent. Potrivit Hotărârii Guvernului nr. 933 din 21.11.2014 "cu privire la armonizarea reglementărilor tehnice și a standardelor naționale în domeniul construcțiilor cu legislația și standardele europene", Republica Moldova s-a angajat să adopte normele de proiectare europene – Eurocoduri, până în anul 2020. Cu toate acestea, Republica Moldova nu și-a onorat obligațiunile asumate, ceea ce duce etapa de implementare și modernizare a bazei normative în construcții într-o stagnare.

5.2.1.7. Programe naționale de reducere a riscului seismic al construcțiilor existente

Programele naționale sunt un set de documente ce determină acțiunile și măsurile ce trebuie luate pentru a atinge obiectivele puse de stat și guvern. Cele mai comune planuri naționale adoptate de țările afectate de dezastre naturale sunt programele de reducere a riscurilor la dezastre (Disaster Risk Reduction Programme). Aceste programe sunt dezvoltate cu scopul de a dezvolta și livra servicii de protecție a populației și infrastructurii de la pericolele naturale într-o manieră sistematică, economic eficientă și sustenabilă.

5.2.1.8. Dezvoltarea unui plan de apărare în caz de cutremur

Planul de apărare reprezintă documentul de bază în care se descriu măsurile și acțiunile tehnice, organizatorice și de coordonare pentru prevenirea și gestionarea a unei situații excepționale ce se produce ca urmare a unui eveniment natural sau antropic (Archip, 2008). Planul de apărare descrie obligațiunile și responsabilitățile, la nivel local, a organizațiilor și agențiilor guvernamentale ce sunt implicați în gestionarea crizei. În special, planul de apărare trebuie să se axeze pe trei principii fundamentale:

1. **Măsuri de pregătire și prevenire** – la această etapă autoritățile publice locale și centrale trebuie să asigure metode eficiente de avertizare a populației în caz de cutremur. La fel, instituțiile publice, sociale și private trebuie antrenate pentru scenariul cel mai probabil.
2. **Acțiunile de intervenție** – aceste acțiuni includ și nu se limitează la deplasarea personalului specializat (pompieri, salvatori, jandarmi ș.a) în zonele afectate, evacuarea persoanelor blocate, localizarea și lichidarea incendiilor și/sau scurgerilor de gaze, ș.a.
3. **Măsuri post-dezastru** – setul de măsuri post-dezastru trebuie să cuprindă totalitatea lucrărilor și intervențiilor ce se planifică a fi implementate după acțiunile de intervenție rapidă.

Capitolul 6. Concluzii generale, contribuții și valorificarea cercetărilor

6.1. Concluzii generale

Concluzii generale la Capitolul 1 – ” Introducere. Obiectivele cercetării, stadiul pe plan național și internațional”

Capitolul 1 al tezei abordează oportunitatea și necesitatea cercetărilor în domeniul ingineriei seismice în Republica Moldova. S-a subliniat importanța dezvoltării hărților de zonare seismică care reflectă valorile de vârf ale accelerației terenului, esențiale pentru planificarea și proiectarea structurală adecvată la riscurile seismice.

Concluzii generale la Capitolul 2 – ”Hazardul seismic”

Capitolul 2 este dedicat evaluării hazardului seismic în Republica Moldova, cu un accent particular pe determinarea accelerației de vârf a terenului. Analiza s-a bazat pe metodologia probabilistică, conform recomandărilor și standardelor internaționale pentru elaborarea hărților de zonare a hazardului seismic.

Harta finalizată reprezintă un instrument crucial pentru implementarea Eurocode 8: Partea 1 în contextul național, oferind o bază solidă pentru planificarea și proiectarea structurală.

Concluzii generale la Capitolul 3 – ”Vulnerabilitatea seismică”

Capitolul 3 al tezei este dedicat analizei vulnerabilității seismice, focusându-se pe metodologiile de evaluare a vulnerabilității structurilor individuale sau ale grupurilor de construcții. Datele colectate au fost sistematizate și analizate, rezultatele fiind ulterior prezentate sub forma unor hărți detaliate de vulnerabilitate seismică.

Concluzii generale la capitolul 4 – ” Calculul riscului seismic”

Capitolul 4 examinează riscul seismic într-o anumită zonă a municipiului Chișinău, concentrându-se pe evaluarea pierderilor economice și sociale printr-o metodologie bine definită. Au fost utilizate două metode principale pentru determinarea acestor pierderi: FEMA, 2010 și Cobrun & Spence, 2002, fiecare având descrieri detaliate ale proceselor de calcul. Analiza a inclus două scenarii de simulare.

Concluzii generale la Capitolul 5 – ” Măsuri și soluții la îmbunătățirea siguranței fondului construit în municipiul Chișinău”

Capitolul 5 este dedicat formulării de recomandări tehnice și legislative menite să îmbunătățească siguranța infrastructurii existente în municipiul Chișinău în contextul riscului seismic. Analiza a relevat că, în prezent, în Republica Moldova lipsesc mecanismele legislative adecvate care să contribuie eficient la reducerea riscului seismic. În acest sens, s-au propus modificări la cadrul legal existent pentru a asigura o mai bună gestionare a riscului și o implementare efectivă a măsurilor de prevenție și intervenție.

6.2. Contribuțiile autorului

În urma elaborării lucrării ”Evaluarea riscului seismic pe teritoriul municipiului Chișinău”, autorul a adus următoarele contribuții:

1. **Analiza și Sistematizarea Datelor Cutremurelor Istorice** – S-a examinat catalogul de cutremure ROMPLUS și am aplicat metodologia propusă de Reasenbergh în 1985 pentru a adapta acest catalog la nevoile specifice ale Republicii Moldova.
2. **Crearea hărții de zonare seismică** – Un punct esențial și critic al contribuției autorului la teza de doctorat este elaborarea hărții de zonare seismică pentru întreg teritoriul Republicii Moldova.
3. **Colectarea datelor pentru 700 de structuri de pe teritoriul mun. Chișinău** – În cadrul prezentei teze de doctorat, s-a abordat o problemă esențială și persistentă: analiza extensivă a fondului locativ al municipiului Chișinău, cu destinații diferite de utilizare.
4. **Evaluarea vulnerabilității seismice structurale și crearea curbelor de fragilitate** – Un aspect cheie al tezei de față a fost evaluarea vulnerabilității seismice a structurilor din zona cercetată a municipiului Chișinău, având la bază metodologia produsă în cadrul programului european RISK-EU.
5. **Evaluarea riscului seismic pe teritoriul mun. Chișinău** – O contribuție semnificativă a tezei date a fost evaluarea riscului seismic pentru municipiul Chișinău. S-au aplicat și analizat principalele metode de calcul pentru estimarea pierderilor economice și sociale în zona studiată.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

În cadrul tezei prezente privind riscul seismic pe teritoriul municipiului Chișinău, la fel și în baze cercetărilor deja efectuate de către autor, cu scopul aprofundării rezultatelor, sunt un șir de direcții viitoare de dezvoltare. Următoarele direcții viitoare de cercetare sunt considerate de autor:

1. **Extinderea studiilor și analizelor a fondului construit în alte zone ale Republicii Moldova**

Extinderea studiilor de vulnerabilitate seismică din Chișinău și în alte orașe din Republica Moldova este o direcție esențială de cercetare. Aceasta poate juca un rol crucial în îmbunătățirea înțelegerii și gestionării riscului seismic pe o scară largă. Abordarea începe cu colectarea detaliată a datelor ce ar include tipurile de structuri, materialele folosite și orice modificări structurale anterioare. Tehnologii moderne, cum ar fi sistemele GIS, sunt de mare ajutor în adunarea acestor informații.

2. **Dezvoltarea unei aplicații mobile/web de colectare a datelor pentru inventarierea fondului locativ**

Unul dintre aspectele relevante observate în timpul colectării datelor pentru cele peste 700 de clădiri în cadrul tezei a fost potențialul semnificativ al utilizării unei aplicații mobile sau web dedicată acestui scop.

- Viteza și Eficiența Colectării Datelor
- Reducerea Costurilor
- Crearea unei Baze de Date Dinamice și Actualizate
- Îmbunătățirea Planificării Urbane și a Răspunsurilor de Urgență
- Educație și Conștientizare

3. Modelarea scenariilor de cutremur folosind inteligența artificială

O direcție avansată de cercetare care promite să revoluționeze complet înțelegerea și gestionarea riscurilor seismice este modelarea detaliată a scenariilor de cutremur cu ajutorul inteligenței artificiale (IA). Inteligența artificială le permite cercetătorilor să se aprofundeze în seturi de date masive, permițând dezvoltarea de modele complexe care depășesc predicția impactului fizic structural. De asemenea, ei prognozează răspunsurile comportamentale ale populației și chiar evaluează eficiența intervenției guvernamentale în timpul cutremurelor. De exemplu, lucrarea lui Chiaruttini et al., 1989 prezintă modul în care tehnicile IA pot fi valorificate pentru interpretarea semnalelor seismice, conducând astfel la sisteme automate în analiza și interpretarea datelor seismice. Aceste scenarii de răspuns generate de model creează medii virtuale care facilitează testarea planurilor de evacuare plus strategiile de răspuns înainte de implementarea efectivă.

4. Dezvoltarea și implementarea tehnologiilor avansate de monitorizare

Necesitatea unei monitorizări seismice avansate în zonele urbane unde cutremurele reprezintă amenințări grave din cauza vulnerabilității cauzate de dezvoltare pe fondul urbanizării în creștere necesită implementarea unor tehnologii de avansate. Senzorii IoT sunt văzuți ca o ieșire din această situație, deoarece odată integrați în sistemele orașelor, ei asigură acest oraș că este bine pregătit și capabil să se recupereze rapid după un cutremur. Vorbind mai precis, aceste dispozitive inteligente (IoT) joacă roluri vitale în cadrul oricărui sistem, în principal datorită faptului că colectează informații cu privire la condițiile structurale fără întârzieri după orice eveniment.

Bibliografie

- Abrahamson, N. și alții, 2018. *Update of the BC Hydro Subduction Ground-Motion model using the NGA-Subduction Dataset*, Berkley: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Akkar, S. & Bommer, J. J., 2010. Empirical Equations for the prediction of PGA,PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), pp. 195-206.
- Albu, S. & Albu, I., 2009. *Evaluarea patrimoniului*. Chișinău: Universitatea Tehnică a Moldovei.
- Alcaz, V. G., 2007. *Bazele prognozării hazardului seismic și riscului seismic pe teritoriul Republicii Moldova (în rusă: Основы прогноза сейсмической опасности и сейсмического риска территории Республики Молдова)*. Chișinău: Academia de Științe RM.
- Alexandrescu, G. & Văduvă, G., 2006. *Infrastructuri critice. Pericole, amenințări la adresa acestora. Sisteme de protecție*. București: Editura Universității Naționale de Apărare „Carol I”.
- Andrzej, K., 2004. Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, Issue 161, pp. 1-27.
- Arup, 2013. *Seismic Risk Study - Earthquake Scenario-Based Risk Assessment*, Amsterdam, The Netherlands: Nederlandse Aardolie Maatschappij.
- Atanasiu, G. M. & Galea, D., 2009. *Managementul riscului seismic urban utilizând IIS*. Iași: Editura POLITEHNIUM.
- Atkinson, G. & Boore, D., 2003. Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), pp. 1703-1729.
- Bernardini, A., 1999. *Seismic Damage to Masonry Buildings*. Monselice, Padova, Italy:
- Calvi, G. M., 1999. A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 03(03), pp. 411-438.
- Calvi, G. M. și alții, 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(3), pp. 75-104.
- Cauzzi, C. & Faccioli, E., 2008. Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *J Seismol*, 12(4), pp. 453-475.
- Chiaruttini, C., Roberto, V. & Saitta, F., 1989. Artificial intelligence techniques in seismic signal interpretation. *Geophysical Journal International*, Issue 98, pp. 223-232.
- Coburn, A. & Spence, R., 2002. *Earthquake Protection*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Constantinescu, L. & Mârza, V. I., 1980. A computer-compiled and computer-oriented catalog of Romania's earthquakes during a millennium. *Revue Roumaine de Geologie, Geophysique et Geographie*, 2(24), pp. 193-206.

- Constantinou, M. C., Symans, M. D., Tsopelas, P. & Taylor, D. P., 1993. *Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation*. San Francisco, CA: Applied Technology Council., s.n., pp. 581-592.
- Cornell, A. C., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volumul 58, pp. 1583 - 1606.
- D'Ayala, D., Galasso, C., Minas, S. & Novelli, V., 2015. *Review of methods to assess the seismic vulnerability of buildings, with particular reference to hospitals and medical facilities*, s.l.: UK
- Drumea, A., 2000. *Evaluarea normelor tehnice (SNiP II-7-81) de determinare a intensității seismice a terenurilor de construcții în RM*, Chișinău: Academia de Științe a Republicii Moldova.
- Drumea, A. & Alcaz, V., 2005. *Studiul proceselor de producere a cutremurelor vrâncene și al factorilor ce determină riscul seismic pe teritoriul Republicii Moldova*, Chișinău: Academia de Științe a Moldovei.
- Drumea, A., 1983. *Experiență de microzonare seismică în Moldova (în rusă: Опыт сейсмического микрорайонирования в Молдавии)*. Chișinău: Stiința.
- Eremei, G., 2003. *Fața nevăzută a puterii*. Chișinău: Litera.
- FEMA, 2003. *HAZUS-MR4 Technical Manual*, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2005. *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2010. *HAZUS-MH MR5 Technical & User Manual*. Washington D.C., Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2013. *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Hazus®-MH 2.1. Technical Manual*, Washington, D.C. : Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency
- Freeman, S. A., Nicoletti, J. P. & Tyrell, J. V., 1975. *Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk-A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington..* Berkeley, Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering, pp. 113-122.
- Ginsari, V. N., Isicico, E. & Cueva, A. V., 2009. Характеристика существующей застройки г. Кишинева для последующей оценки сейсмического риска. *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al AȘM*, Issue 2, pp. 12-23.
- Grünthal, G., 1998. *European Macroseismic Scale 1998 - EMS-98*, Luxembourg: European Seismological Commission.
- Guatani, E. & Petrini, V., 1989. *The case of old buildings: towards a damage-intensity relationship*. Milan, Italy, s.n., pp. 145-153.
- Gutenberg, R. & Richter, C. F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volumul 34, pp. 185-188.
- Hamed, A.-B., Nuno, M., Paulo, L. & Neda, S., 2016. Empirical seismic vulnerability analysis for masonry buildings based on school buildings survey in Iran. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Hansen, M. C. & Sorensen, J. D., 2002. *Design of structures using fluid viscous dampers..* Porto, Portugal, s.n., pp. 215-223.

- Idriss, I. M., 2008. An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 24(1), pp. 217-242.
- IMC, I. M. C., 2020. *Situation report nr.1*, Zagreb: s.n.
- INFP, 2020. *Institutul național de cercetare - dezvoltare pentru fizica pământului*. [Interactiv] Available at: <http://www.infp.ro/index.php?i=hzd> [Accesat 5 Mai 2020].
- INFP-ROMPLUS, 2020. *Descărcarea catalogului ROMPLUS actualizat*. [Interactiv] Available at: <http://www.infp.ro/index.php?i=romplus> [Accesat 19 2020].
- INFP, UTCB & URBAN INCERC, 2016. *Analiza de hazard seismic*, s.l.: s.n.
- Insider, 2021. *Buisness Insider*. [Interactiv]
- Kadëna, E., 2020. Albania: Earthquake shock of the 26th november 2019. pp. 54-72.
- Lagomarsino, S. & Giovinazzi, S., 2004. *A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings*. Vancouver, Canada, s.n.
- Lagomarsino, S. & Giovinazzi, S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current building. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Volumul 4, pp. 415-443.
- Li, C. și alții, 2017. Earthquake Safety Training through Virtual Drills. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Volumul 23, pp. 1275-1284.
- Lungu, D., Cornea, T., Aldea, A. & Zaicenco, A., 1997. Design of structures in seismic zones: Eurocode 8 – worked examples. În: *Basic representation of seismic action*. s.l.:TEMPUS PHARE CM Project 01198, pp. 1-60.
- Martínez Solares, J. M. și alții, 2012. *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012*, s.l.: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).
- MATLAB, 2018. *Version 9.5.0.944444 (R2018b)*. Natick ed. Massachusetts: The MathWorks Inc.: s.n.
- McGuire, R., 2004. *Seismic hazard and risk analysis*. s.l.:Earthquake Engineering Research Institute.
- Mihailescu, C. & Boian, I., 2013. Fenomene naturale de risc în Republica Moldova. *Natural and Anthropogenic Hazards*, 5(23), pp. 3-10.
- Moldova, I. d. G. și S. a. R., 2014. *A Scientific Network for Earthquake, Landslide and Flood Hazard Prevention*. [Interactiv] Available at: http://scinetnathaz.net/wp-content/uploads/2015/06/5OlegBogdevic_Moldova.pdf [Accesat 12 Mai 2020].
- Ordaz, M. & Salgado-Galvez, M. A., 2019. *R-CRISIS Validation and Verification Document*. Mexico City: ERN Technical Report.
- Panza, G., Romanelli, F. & Vaccari, F., 2011. *Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media : Theory and applications to seismic zonation*. s.l.:Advanced Geophysics.

- Pavel, F. & Văcăreanu, R., 2017. *Elemente generale de hazard și risc seismic*. București : Matrix ROM.
- Porter, K. A., 2003. *An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology*. San Francisco, CA, s.n., pp. 973-980.
- Radu, C., 1970,1974,1980,1994. *Catalogues of earthquake on Romanian territory during periods 984-1990 and 1901-1994*. s.l.:s.n.
- R-CRISIS, 2017. *R-CRISIS*. [Interactiv]
Available at: <http://www.r-crisis.com/about/crisis/>
[Accesat 1 March 2021].
- Reasenber, P., 1985. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), pp. 5479-5495.
- Reyes, C. & Wiemer, S., 2019. ZMAP7: a refreshed software package to analyze seismicity. *Geophysical Research Abstracts*, Volumul 21.
- Shakya, M., 2015. GNDT II level approach for seismic vulnerability assessment of unreinforced masonry (URM) building stock. *JScE*, Volumul 3, pp. 21-27.
- SSHAC, 1997. *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*, Washington DC, USA: US Nuclear Regulatory Commission report CR-6372.
- UTCb, T. U. o. C. E. f. B., 2006. *Study on early earthquake damage evaluation of existing buildings in Bucharest, Romania*, București: UTCb.
- Văcăreanu, R. și alții, 2015. *Elemente de analiză a hazardului seismic*. București: Conspress București.
- Văcăreanu, R. și alții, 2015. Fore-Arc and Back-Arc Ground Motion Prediction Model for Vrancea Intermediate Depth Seismic Source. *Journal of Earthquake Engineering*, 19(3), pp. 535-562.
- Whitman, R. V., Reed, J. W. & Hong, S. T., 1973. Earthquake Damage Probability Matrices. *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Volumul 2, pp. 2531-2540.
- Wiemer, S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), pp. 373-382.
- Wiemer, S. & Wyss, M., 2000. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), pp. 859-869.
- Youngs, R. R., Chiou, S. J., Silva, W. J. & Humphrey, R. J., 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological research letters*, 68(1), pp. 58-73.
- Zaicenco, A. și alții, 2009. Harmonization of seismic hazard and risk reduction in the Vrancea zone: scientific results of a NATO research project. *Construcții Journal*, VIII(2), pp. 34-51.