

Cutremurele vrâncene și estimarea hazardului seismic în codurile de proiectare structurală

Prof. dr. ing. Liviu CRAINIC
Prof. dr. ing. Dan CREȚU

Vrancea earthquakes and seismic hazard assessment within structural design codes

Vrancea seismogenic zone is responsible for occurrence of most destructive earthquakes in Romania ($M > 7$) which affect more than 40% of its national territory. Vrancea subcrustal earthquakes (frequent focus depth of 70...150 km) are characterized by their multi-feature peculiarities which define them as an *unusual, unique seismic phenomenon* as acknowledged by the great seismologists B. Gutenberg and Ch. Richter. Taking into account these specific peculiarities of Vrancea earthquakes as well as the very limited instrumental records of strong seismic events of this source, the use of analytical models for their assessment becomes very questionable. The present paper is an attempt to advocate the need of use an updated macroseismic approach for assessment of design parameters of seismic hazard. It seems to the authors that this is the only reasonable way to cope with uncertainties related with Vrancea earthquakes and with the shortage of available resources and information.

1. Introducere

Ultima revizuire a Codului de proiectare seismică – Prevederi de proiectare pentru clădiri P100-1/2013, a condus la modificări majore ale valorilor de proiectare ce cuantifică hazardul seismic (Capitolul 3 din Cod). Modificările operate în celelalte capitole sunt de detaliu și nu modifică semnificativ versiunea anterioară a Codului. Constatăm, astfel, în Codul P100-1/2013 o creștere fără precedent a forțelor seismice de proiectare *pe întreg teritoriul național*.

Aceasta măsură a fost motivată prin trecerea la o rata medie de recurență a cutremurului de proiectare (IMR) de 225 ani față de versiunea anterioară unde se accepta un IMR 100 de ani, în perspectiva ajungerii într-un viitor apropiat la un IMR de 475 de ani. S-a acceptat, astfel, implicit că și în țara noastră există toate premisele teoretice și practice pentru implementarea metodologiilor probabilistice de evaluare a hazardului seismic pe întreg teritoriului național chiar dacă zonele seismogene au naturi foarte diferite de la o regiune la alta, datele instrumentale sunt extrem de limitate, iar zona seismogenă Vrancea prezintă particularități de manifestare care o fac net diferită de alte zone cu cutremure subcrustale.

Referindu-ne la cutremurele vrâncene, care domină hazardul seismic a unei mari părți a teritoriului național, încercăm, în cele ce urmează, să formulăm o serie de întrebări la care să schițăm posibile răspunsuri din care să rezulte în ce măsură modul în care s-a abordat evaluarea hazardului seismic de proiectare în codul P100 corespunde realităților actuale ale cunoașterii, ale resurselor disponibile și ale necesităților proiectării structurale din țara noastră.

2. Particularitățile zonei seismogene Vrancea

Cu toate că s-a discutat și s-a scris mult despre particularitățile cutremurelor vrâncene considerăm necesar a prezenta sintetic cele mai importante aspecte din ceea ce se știe despre acestea, ca un necesar punct de plecare în analiza ce urmează. Din lunga listă de materiale bibliografice referitoare la acest subiect, am selectat, în cele ce urmează, doar câteva, extrem de concludente, reprezentând afirmațiile unor autorități indiscutabile ale domeniului.

În lucrarea lor fundamentală [5], clasicii seismologiei ingineresti B. Gutenberg și Ch. Richter afirmă: „*Pe Centura Alpida(...) exista doua remarcabile surse de cutremure intermediare: una sub (munții) Hindu Kush la aproximativ 36,5°N, 70,5°E cu cutremure la adâncime de aproximativ 230 km și cealaltă în România la 46°N, 26½°E la adâncimi de 100...150 km. Frecvența repetare a cutremurelor din aproape același hipocentru în aceste două cazuri, este un fenomen excepțional sugerând condiții mecanice care diferă în anumite privințe de cele care controlează apariția celor mai multe alte cutremure*”.

După cum subliniază prof. Al. Cișmigiu, reluând și dezvoltând informațiile macroseismice descrise și analizate în lucrările clasice ale prof. I. Atanasiu [1], G. Demetrescu, s.a., „*Mecanismul cutremurelor vrâncene este foarte complex și poate diferi de la manifestare la alta(...). I. Atanasiu a încercat să definească trei tipuri de cutremure: a. cutremure simetrice, la care zonele de culminație seismice se dispun “simetric” atât în Moldova cât și în Muntenia (...) b. cutremure nesimetrice cu centrul de greutate al culminațiilor în Moldova (mai dese) și c. cutremure nesimetrice cu centrul de greutate al culminațiilor în Muntenia (mai rare)*”

La nivel macroseismic sunt cunoscute, de asemenea, fenomenele de *directivitate* și *asimetrie* ale cutremurelor vrâncene, fenomene a căror explicație constituie obiectul mai multor studii de specialitate.

Nu intră în obiectul prezentului articol (și nici în competența autorilor) analizarea cauzelor geologice/geofizice extrem de complexe care generează aceste fenomene.

Reținem însă, ca particularități indiscutabile, natura subcrustală a cutremurelor vrâncene (adâncimi de focar frecvente de 70...150 km) și unicitatea absolută a formelor lor de manifestare.

3. Modele macroseismice și modele analitice de estimare a hazardului seismic de proiectare

În mod tradițional hazardul seismic de proiectare era precizat în coduri prin *harti de zonare seismică*. Aceste harti erau trasate pe baza observațiilor macroseismice realizate după cutremure puternice prin chestionare prin care se evaluau efectele cutremurului cuantificate prin *intensități nominale*. Această abordare o regăsim și astăzi chiar și în țări avansate, având însă o activitate seismică redusă.

Dezvoltarea explozivă, în ultimele decenii, a instrumentelor de înregistrare a mișcărilor seismice, a procedurilor de scanare a formațiunilor geologice profunde precum și a tehnicii de calcul care permite prelucrarea cantităților uriașe de date obținute a impulsat formularea de procedee analitice din ce în ce mai avansate pentru evaluarea parametrilor care cuantifică hazardul seismic. Aceasta s-a făcut în paralel cu înțelegerea din ce în ce mai profundă a mecanismelor de producere și propagare a evenimentelor seismice.

Fiind bazate pe date culese în zonele seismogene după producerea unor evenimente seismice, metodele analitice de estimare a hazardului au un pronunțat caracter empiric.

Există două tipuri de abordări analitice ale problemei estimării *hazardului seismic*: analiza *deterministică* („DSHA” – „Deterministic Seismic Hazard Analysis”) și cea *probabilistă* („PSHA” – „Probabilistic Seismic Hazard Analysis”). În principiu, ambele tipuri de analiză implica parcurgerea a două etape: (1) alegerea unui *cutremur de referință* presupus că se manifestă într-un punct considerat a fi epicentrul acestuia și stabilirea caracteristicilor sale specifice și (2) cuantificarea efectelor cutremurului de referință în puncte situate la diferite distanțe de epicentrul acestuia prin funcții analitice denumite *legi de atenuare sau relații predictive*.

În abordarea deterministă, cutremurul de referință considerat a fi, după caz, „cutremurul de control” sau „cutremurul de proiectare” sau „cutremurul maxim de siguranță” sau „cutremurul maxim credibil” etc **se alege** funcție de informațiile oferite de bazele de date existente. Este evident caracterul subiectiv al acestei alegeri. Stabilirea legii de atenuare (etapa a 2-a) a cunoscut o evoluție în timp, pe măsura înțelegerii din ce în ce mai aprofundate a fenomenului seismic, a factorilor de care depind formele de manifestare a acestuia pe un amplasament situat la o anumită distanță de epicentrul considerat. Dacă, la începuturile ingineriei seismice, legea de atenuare era o funcție de formă (Kövesligety, 1907):

$$I_{site} = I_{epic.} - 3\log(r/h) - 1.3\alpha \times (r - h)$$

în prezent se găsește în literatura de specialitate un considerabil număr de legi de atenuare din ce în ce mai complexe cum ar fi:

$$\log PGA = b_0 + b_1M + b_2r + b_3 \log r + b_4h + c$$

(Molas Yamazuki) (M este magnitudinea moment a evenimentului considerat, r , h sunt distanțe iar coeficienții sunt determinați din bazele de date referitoare la cutremurele din zona considerată, prin regresie).

Abordarea probabilistă se aseamănă cu cea deterministă cu deosebirea că mărimile ce intervin (intensitatea cutremurului de referință, adâncimea focarului, distanțele ce precizează poziția în plan a epicentrului, etc) sunt considerate a fi variabile aleatorii independente, de distribuție Poisson, în loc de a determina valori fixe ale parametrilor ce cuantifică hazardul (ca în DSHA) se determină valori ce pot apare cu o anumită probabilitate de depășire. La rândul sau, cutremurul de referință în loc de a se produce într-un moment nedeterminat (DSHA) cu o magnitudine fixă, poate apare la un anumit număr de ani („Interval Mediu de Referință” IMR) cu o magnitudine M , situată între o valoare minima semnificativă M_{min} și una maximă M_{max} având o anumită probabilitate (acceptată) de depășire.

Sintetic se poate afirma că metodele analitice de analiză a hazardului prezintă următoarele particularități:

1. Coeficienții și însăși metodologia de calcul se stabilesc, de la caz la caz, pe baza informațiilor furnizate de bazele de date existente pentru zona seismogenă. Prin urmare relațiile de calcul (funcțiile de atenuare) și rezultatele sunt valabile *numai pentru situațiile avute în vedere la stabilirea acestora*.
2. Imensa majoritate a analizelor DSHA și PSHA sunt stabilite pentru *cutremure crustale*. Extrapolarea lor pentru alte tipuri de cutremure este fundamental greșită chiar dacă, prin regresie lineară, se recalculează coeficienții din relațiile de atenuare;
3. Pentru cutremurele subcrustale vrâncene, care au particularități de manifestare atât de diferite de cele din alte părți ale lumii, așa cum s-a arătat mai sus, autorii nu cunosc să existe metodologii specifice de tip DSHA sau PSHA care să

modeleze realist fenomenele constatate la acestea și care să fie utilizate apoi la determinarea hazardului seismic de proiectare

În lipsa unor modele analitice credibile pentru aceste cutremure, harta de zonare seismică adoptată în codul P100-1-2013 s-a dedus din cea a codului P100-1-2006 prin simpla multiplicare a accelerațiilor de vârf ale terenului cu un coeficient **constant de 1,25 pentru întregul teritoriul național**. Este evident că atribuirea unei perioade medii de revenire $IMR = 225$ de ani valorilor PGA (mărimea a_g) din harta de zonare seismică nu are nici o justificare. Prin această măsură forțele seismice de calcul din România devin cele mai mari din Europa. Este de observat faptul că pe lângă creșterea a_g cu 25% se generează, indirect, creșteri ale forței seismice de calcul: cu 40% (!) la construcțiile cu $H > 45$ m și cu 20% la construcțiile din București (!) cu $T = 1,4...1,6$ secunde. Efectele acestei măsuri arbitrare sunt însă considerabile:

- creșterea substanțială și absolut nejustificată a forțelor seismice de proiectare chiar dacă, după cutremurul din 4 martie 1977, forțele seismice de proiectare au căpătat valori continue și consistent mărite în raport cu cele din normativul care le-a precedat;
- amplificarea cu un unic factor a valorilor a_g inițiale din codul P 100 – 1/2006, adoptate pentru întreg teritoriul național independent de tipul sursei (intermediară sau crustală) a făcut ca zone întinse ale țării (Bazinul Transilvaniei, Banatul) cunoscute ca având o seismicitate redusă și cu caracteristici foarte particulare devin pentru proiectare zone de înaltă seismicitate cu tot ce implică acest lucru) din punct de vedere economic și tehnic (Arad, Timisoara, Mediaș, Sibiu, etc $a_g = 0,20g$);
- păstrarea, pentru construcțiile existente, a hărții de zonare seismică din codul P100-1-2006 este principal absurdă și de natură a crea confuzii atât tehnice cât și juridice.

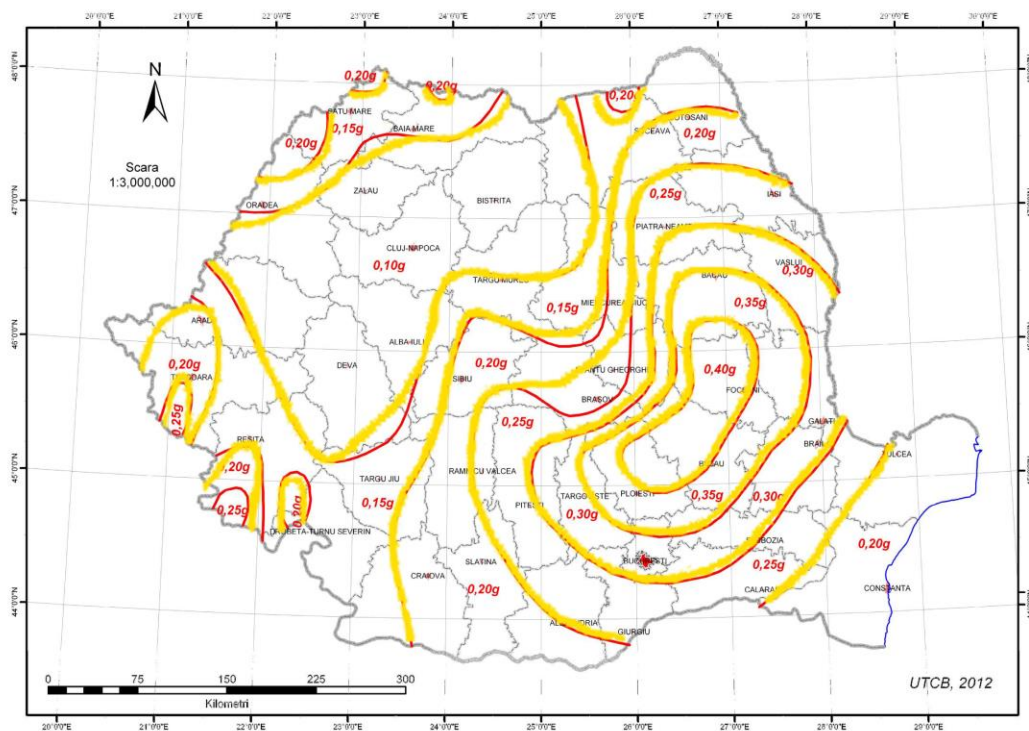


Fig. 1 Suprapunerea hartilor de zonare seismică din codurile P100-1-2006 și P100-1-2013

4. Este evaluarea probabilistă a hazardului seismic („PSHA”) aplicabilă fără rezerve cutremurelor vrâncene?

Există doi factori fundamentali de care trebuie ținut seama atunci când se optează pentru adoptarea în codul de proiectare seismică a unei metodologii de cuantificare a hazardului seismic de proiectare:

1. Caracterul de unicitate (la nivel mondial) a particularităților sursei seismogene Vrancea
2. Însuficiența înregistrărilor pe durata suficient de lungă a cutremurelor semnificative din punct de vedere al proiectării structurale.

Trebuie avut în vedere, de asemenea, faptul că Ingineria seismică a cunoscut, în ultimele decenii, progrese considerabile care au condus la cunoașterea, cu înalt grad de încredere, a particularităților răspunsului seismic al diferitelor tipuri de construcții și la posibilitatea de a-l dirija avantajos. Câștigul, din punct de vedere al siguranței structurale, este considerabil.

Stabilirea forțelor seismice *de proiectare* trebuie să țină cont de aceste realități. Atunci când se elaborează coduri de proiectare seismică trebuie acceptată diferența conceptuală și cantitativă dintre parametrii hazardului seismic determinați prin metodele seismologiei inginerești și cei **nominali** care, împreună cu întreaga metodologie de analiză structurală, conduc la un grad de asigurare care să reflecte compromisul rațional – economic și tehnic – între resursele disponibile și riscul seismic asumat. Rezultă obligația absolută a autorilor de coduri de proiectare seismică de a calibra rezultatele abordărilor analitice prin **judecați inginerești** [9]. Această cerință este în mod deosebit necesar a fi observată pentru situația specifică a cutremurelor vrâncene în cazul cărora se multiplică incertitudinile prin dificultățile de cunoaștere a sursei seismice, prin insuficiența datelor instrumentale pe o durată de timp rezonabilă și pe o arie concludentă și prin lipsa unui model analitic care să oglindească credibil particularitățile de manifestare a acestor cutremure.

5. Cum s-ar putea aborda realist evaluarea hazardului generat de cutremurele vrâncene?

Nivelul forțelor seismice de proiectare are un efect hotărâtor asupra rezultatului procesului de proiectare structurală și, în consecință, trebuie stabilit cât se poate de corect la nivelul actual de cunoaștere. Cu toate că, în ultimele decenii, s-au făcut progrese remarcabile în cunoașterea structurii geologice a zonelor afectate de cutremurele vrâncene, în explicarea mecanismelor de focar ale acestor cutremure și în modelarea lor matematică trebuie recunoscut faptul că suntem încă departe de a cuprinde extrema lor diversitate de manifestare și de a cuantifica credibil hazardul generat de acestea.

Din punct de vedere al nivelului de proiectare al hazardului seismic corespunzător cutremurelor vrâncene, succinta examinare efectuată în cadrul prezentei comunicări evidențiază:

1. nivelul deosebit de înalt al accelerațiilor de proiectare prevăzute în codul de proiectare seismică P 100-1/2013, depășindu-l pe cel existent în normele unor țări avansate ca Italia

2. lipsa unei metodologii PSHA specifică cutremurelor vrâncene. În lipsa acesteia, harta de zonare seismică din codul P100-1-2013 a păstrat, practic (cu foarte mici corecții/adaptări), distribuția zonelor seismice din precedentul cod multiplicând însă valorile accelerațiilor seismice de vârf a_g cu un coeficient de 1.25, constant pe întregul teritoriu național (vezi fig. 1)
3. datorită dificultăților obiective în formularea unei metodologii PSHA specifice strict cutremurelor vrâncene (insuficiența datelor instrumentale pe o perioadă semnificativă și pe o arie necesară, dificultatea modelării formelor de manifestare extrem de variabile și de neobișnuite ale acestor cutremure), folosirea rezultatelor oricăror modele analitice de estimare a hazardului acestor cutremure în practica de proiectare trebuie privită cu multă prudență și supusă unor judecăți ingineresti

Trebuie să recunoaștem faptul că hărțile de zonare seismică existente în toate codurile de proiectare din țara noastră au la bază constatările macroseismice făcute cu ocazia cutremurelor majore din ultimele decenii. Afirmările referitoare la perioadele de revenire ale valorilor parametrilor seismici de proiectare din aceste documente sunt, de fapt, estimări empirice mai degrabă decât valori deduse din aplicarea unei metodologii PSHA consecvente.

În aceste condițiuni, considerăm că singura cale rațională de stabilire a valorilor de proiectare a hazardului, compatibilă cu nivelul actual real de cunoaștere al particularităților cutremurelor vrâncene, o constituie analiza atentă a informațiilor macroseismice existente. Acestea ar trebui corelate cu prevederile similare din alte țări cu nivel de hazard seismic comparabil cu cel de la noi.

Adoptarea valorilor de proiectare pentru accelerațiile seismice ale solului, specifice fiecărei zone seismogene ale țării, ar fi trebuit să fie rezultatul unui proces de apropiere a punctelor de vedere ale specialiștilor, cunoscuți și recunoscuți (profesioniști și nu cadre cu răspunderi administrative) în domeniul seismologiei ingineresti și al proiectării structurale. Numai printr-un *consens* între specialiștii domeniului s-ar putea asigura compensarea numeroaselor incertitudini care grevează acuratețea așteptată pentru un act cu caracter tehnic și juridic de importanța codului de proiectare seismică P100, cu implicații majore asupra siguranței construcțiilor de pe întreg teritoriul național.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Atanasiu, I. *Cutremurele de pământ din România*. București: Editura Academiei R.P.R. (1961).
- [2] Bălan Ștefan, Cristescu Valeriu, Cornea Ion, „*Cutremurul de pământ din România de la 4 martie 1977*”, Editura Academiei R.S.R. 1982, București
- [3] Cișmigiu, A.: „*După 4 martie*” Revista Arhitectura nr.4/1877.
- [5] Constantinescu L, Enescu D., „*Cutremurul din Vrancea în cadru științific și tehnologic*”, editura Academiei R.S.R., București 1985
- [6] Douglas John, „*Ground-motion prediction equations 1964-2010*”, PEER Report 2011 / 102, BRGM
- [7] Enescu, D., Marmureanu, Gh. & Enescu, B.D. (2001). A procedure for estimating the seismic hazard generated by the Vrancea earthquakes and its application. I: The reference

earthquake. In 2nd National Conference on Earthquake Engineering, Bucharest, Romania (in Romanian).

- [8] Gutenberg, B.; Richter, Ch.: “*Seismicity of the earth and associated phenomena*” Princeton University Press, Princeton, N.J., 1954
- [9] Kramer L. Steven, „*Geotechnical Earthquake Engineering*”, Prentice Hall, 1996,
- [10] Kövesligethy von, R. (1907). *Seismischer Stärkegrad und Intensität der Beben*, Gerlands Beiträge zur Geophysik, Band VIII, Leipzig.
- [11] Molas Gilbert L., Yamazaki Fumio, „*Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events*”, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 85, no. 5, pp. 1343-1358, October 1995
- [12] Postelnicu, T.; Petrovici, R.; Crețu, D.; Crainic, L.: *Probleme ale evaluării acțiunii seismice de proiectare*. Revista AICPS REVIEW nr. 3/2014
- [13] Radulian, M., Popa, M., Grecu, B., Popescu, E. & Panza, G. F. (2004). *Seismic Hazard of Romania due to Vrancea Earthquakes – How asymmetric is the Strong Ground Motion Distribution*. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 39(2-3), 309-318.
- [14] Radulian, M., Vaccari, F., Mandrescu, N., Panza, G.F. & Moldoveanu, C.L. (2000). *Seismic hazard of Romania: Deterministic Approach*. In: G. Panza, M. Radulian, C.-I. Trifu (Eds.), *Seismic Hazard of the Circum-Pannonian Region* (pp. 221-247). Basel: Birkhäuser Verlag.
- [15] Rogozea, M., Radulian, M., Marmureanu, Gh., Mandrescu, N. & Paulescu, D. (2013). *Large and moderate historical earthquakes of 15th and 16th centuries in Romania reconsidered*. *Romanian Reports in Physics* 65(2): 545–562.