

METODE DE EVALUARE A RISCULUI SEISMIC ÎN ZONA AMENAJĂRILOR HIDROENERGETICE

“Riscul “ se poate exprima ca un **produs între hazard și vulnerabilitate** <relația (1) >. În particular, **Riscul seismic** în cazul amenajărilor hidroenergetice se calculează ca produs între **HAZARDUL SEISMIC** corespunzător amplasamentului amenajării hidroenergetice respective și **VULNERABILITATEA SEISMICA** a amenajării respective.

HAZARDUL SEISMIC este o funcție $P_{L,T}(Y>y)$ care descrie probabilitatea ca într-un loc dat L și într-un interval de timp dat T , valoarea Y a unui **parametru al mișcării solului (PGA, PGV, PGD)** sau **Intensitatea macroseismică (I)** să depășească o valoare data y ca efect al producerii unui cutremur.

Din această definiție se desprind următoarele proprietăți matematice ale Hazardului:

- pentru o descriere mai bună avem nevoie de o “familie de funcții” ce se obțin parametrizând cei doi termeni ce intervin în definiție: L și T .
- domeniul de definiție al funcțiilor este o mulțime de valori discrete, deci și codomeniile lor vor fi mulțimi discrete.

De aici rezultă faptul că Hazardul poate fi exprimat sub formă matricială, elementele de matrice fiind chiar valorile probabilităților de realizare a câte unuia din evenimentele posibile ce intră în definiția Hazardului:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix} = (h_{ij})_{mn} \quad (2)$$

Hazardul seismic se poate evalua conform metodologiei specifice și el nu depinde decât de factorii naturali și nu de cei antropogeni.

În schimb, **VULNERABILITATEA SEISMICĂ**, reprezentând procentajul distrugerilor suferite de o construcție (fiind egală cu 0 dacă nu au avut loc avarii și egală cu 1 când distrugerea a fost totală) depinde în mod fundamental de activitatea umană în urma căreia a fost obținută construcția : tipul de materiale folosite, vechimea construcției, reparații și consolidări făcute în decursul existenței etc.

Gradul de distrugere trebuie considerat ca o variabilă aleatoare fiind reprezentabilă de regulă prin histograme sau densități de probabilitate puse în corespondență cu valorile parametrilor ce măsoară elemente ale mișcării solului ce ar trebui puse în legătură cu intervalele frecvențelor de oscilație și cu direcțiile determinate de poziția sursei seismice și a obiectivului analizat (obținute de dorit cu ajutorul înregistrărilor instrumentale).

Valorile vulnerabilității pot fi exprimate (ca **funcție** de parametrii statistici ai mișcării solului și de caracteristicile proprii construcției obiectivului respectiv) în formă discretă cu ajutorul

calculului matricial (unele coloane ale unei matrici pot corespunde diferitelor valori ale intensității macroseismice, iar altele pot corespunde unor histograme pentru diferite grade de distrugere suferite de obiective) :

$$V = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1q} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{p1} & V_{p2} & \dots & V_{pq} \end{pmatrix} = (V_{kl})_{pq} \quad (3)$$

Vulnerabilitatea este de două tipuri după modul în care sunt obținute valorile sale:

- *Vulnerabilitatea observată* (V_O) reprezentând **Vulnerabilitatea obținută din cercetările post-cutremur și analiza statistică efectuată asupra unor tipuri definite de clădiri sau structuri;**

- *Vulnerabilitatea prezisă* (V_P) reprezentând **Vulnerabilitatea obținută prin analiza inginerească și ale cărei rezultate sunt exprimate în termeni probabilistici.**

Dacă analiza inginerească este prea dificilă și uneori chiar imposibil de efectuat, se recurge la un compromis, adoptându-se o metodă empirică de evaluare a vulnerabilității. Astfel, în cazul specific **amenajărilor hidroenergetice**, *Vulnerabilitatea prezisă* (V_P) este evaluată pe baza *Vulnerabilității observate* (V_O) pentru baraje similare (adică aparținând aceleiași categorii și tip de baraj).

Vulnerabilitatea observată (V_O) este în mod evident o mărime ce depinde atât de *caracteristicile structurilor* supuse acțiunii seismice (cum ar fi rezistența la cutremure, uzura proporțională cu timpul de când a intrat în funcțiune, avarieri anterioare etc) cât și de magnitudinea M a cutremurului și bineînțeles de atenuarea produsă datorită împrăștierii geometrice și absorbției produsă de mediul de propagare pe distanța sursă-amplasament, ceea ce intervine în valoarea accelerației maxime (PGA) a solului în amplasament.

Deoarece fiecare eveniment descris de una din valorile V_{kl} nu se poate realiza singur ci împreună cu unul din evenimentele descrise de elementele h_{ij} ale Hazardului seismic, rezultă că **RISCU**, probabilitatea condiționată trebuie calculată ca sumă a produselor probabilităților evenimentelor individuale ce condiționează producerea evenimentului considerat (“Formula probabilității totale”; Vezi Onicescu et al., 1956) :

$$R_{st} = \sum_{\alpha=1}^n h_{s\alpha} \cdot V_{\alpha t} = h_{s1} \cdot V_{1t} + h_{s2} \cdot V_{2t} + \dots + h_{sn} \cdot V_{nt}$$

Relația de mai sus este tocmai formula ce definește produsul celor două matrici cu condiția ca numărul coloanei matricii H să fie egal cu cel al liniilor matricii M : $n = p$.

Cu această condiție îndeplinită se poate scrie:

$$R = H \otimes V = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1q} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{p1} & V_{p2} & \dots & V_{pq} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ceea ce nu este altceva decât forma matricială a relației (1) care sub forma compactă se poate scrie:

$$R = (R_{st})_{mq} = (h_{ij})_{mn} \otimes (V_{kl})_{pq} \quad (5)$$

2. PREZENTAREA PE SCURT A FACTORILOR DE RISC CE AFECTEAZA UN BARAJ

Datorita faptului ca barajele si rezervoarele localizate in zone urbanizate reprezinta un risc potential pentru populatia si proprietatile din avalul amenajarilor sn cazul unei eliberari necontrolate a apei din rezervor in urma unui cutremur, am considerat necesar sa aprofundam studiul riscului seismic total pentru barajele si rezervoarele aferente lor din nordul Romaniei, folosind relatii amanuntite care sa tina cont de majoritatea factorilor de risc implicati.

Factorul de risc total (TRF = total risk factor) pentru orice tip de baraj poate fi obtinut cu o foarte buna aproximatie folosind diferitii factori de risc si ponderea asociata lor.

TRF-ul depinde de **tipul** barajului, de **vechimea (ARF=age rating factor)**, **capacitatea (CRF = Capacity Risk Factor)** si **inaltimea (HRF=Hight Risk Factor)**, de riscul potential din **aval (DHF = Downstream Hazard Factor)** si de **factorul prezis al pierderilor**, asa numita "rata vulnerabilitatii barajului" (**PDF=Predicted Damage Factor**) care in aceasta definitie este functie de hazardul seismic local in amplasament si de performantele observate ale altor baraje similare.

Relatia dintre TRF si toti acesti factori este data de:

$$TRF = [(CRF + HRF + ARF) + DHF] * PDF \quad (6)$$

unde suma primilor trei factori reprezinta contributia structurii barajului si al patrulea factor, **DHF** depinde de populatia si de proprietatile din aval supuse riscului.

2.1. Influenta structurii

Riscul la care este supus un baraj si rezervorul aferent acestuia este cuantificat de cei trei factori definiti mai sus:

-CRF – factorul de risc al capacitatii rezervorului;

-HRF – factorul de risc al inaltimei barajului;

care indica faptul ca barajele inalte si cu rezervoare mari pot produce pagube mai mari decat cele mai mici)

-ARF – factorul de risc al vechimii, care exprima faptul ca barajele mai vechi sunt deseori mai vulnerabile decat cele moderne datorita posibilelor deteriorari existente, a lipsei de intretinere sau a materialelor de constructie inechitate.

Acesti factori de risc sunt definiti impreuna cu ponderea lor in tabelele 1 si 2:

Tabelul 1. Definirea factorilor de risc ai dimensiunilor barajului si rezervorului

Factor de risc	Contributia (ponderea) la riscul total			
	Extreme	Inalt	Moderat	Scazut
Capacitatea(m ³)/CRF	>61.673.500/6	61.673.500-1.233.470/4	1.233.470-123.347/2	<123.347/0
{naltimea (m)/HRF	>24,38/6	24,38-12,192/4	12,192-6,1/2	<6,1/0

Tabelul 2. Definirea Factorilor de risc ai vechimii

Vechimea barajului	<1900	1900-1925	1925-1950	1950-1975	1975-2000	>2000
ARF	6	5	4	3	2	1

2.2. Riscul in aval

Factorul **DHF** (Tab. 3) se definește ca fiind suma dintre factorul numărului de oameni ce trebuie evacuați din aval (**ERF=downstream evacuation factor**), care depinde de populația supusă riscului și factorul de risc al pagubelor în aval (**DRI=damage risk index**) care este bazat pe valoarea proprietăților private, comerciale, industriale sau guvernamentale aflate în calea eventualei inundații.

$$DHF = ERF + DRI \quad (7)$$

DHF trebuie reactualizat permanent ținându-se cont de toate informațiile noi care apar legate de hartile de inundații sau legate de numărul populației sau valoarea proprietăților.

Tabelul 3. Definirea DHF

Factorul de risc	Contribuția la TRF (ponderea)			
	extrem	înalt	moderat	jos
Nr. persoane/ ERF	>1000/12	1000-100/8	100-1/4	0/1
DRI	înalt/12	moderat/8	scazut/4	nici unul/1

2.4. Factorul prezis al pierderilor (PDF)

Pentru definirea acestui factor este necesară introducerea altor mărimi:

“**Indicele distrugerilor prezise**” **PDI** (inițialele termenului englezesc “*Predicted Damage Index*”) care este o mărime ce se evaluează empiric pe baza observațiilor efectuate asupra diferitelor tipuri de baraje. **PDI** depinde de tipul de baraj și de **hazardul seismic** în amplasament și de tectonica locului (în special amplasarea faliilor active relativ la amplasamentul de studiat).

Datorită mării complexități a fenomenului, s-a recurs la înglobarea mai multor factori de care depinde acest indice **PDI** într-o singură variabilă notată **ESI** (de la denumirea originală “**Earthquake Severity Index**”),

$$PDI = f_{ip}(ESI) \quad (8)$$

Dependența distrugerilor de **Tipul barajului** a fost marcată prin indicele “tip” atașat simbolului funcției ce realizează corespondența de la factorii seismici înglobați în **ESI** la indicele ce descrie distrugerile observate la anumite tipuri de baraje.

Indicele de severitate seismică (ESI), de fapt, la rândul său, este o funcție de accelerația maximă a particulelor solului în amplasament (**PGA**) și de magnitudinea **M**. El se poate evalua

adoptând diverse modele. Unul dintre cele mai utilizate este cel bazat pe formula propusă de Bureau (2003) :

$$ESI = PGA \times (M_w - 4,5)^3 \quad (9)$$

unde : ESI = indicele de severitate seismică

PGA = f(Mw; Δ; AZ) accelerația maximă a particulelor solului imprimată de undele seismice și exprimată în fracțiuni din accelerația gravitațională normală (g=9.81 m/s²)

Mw = magnitudinea cutremurului

Δ = distanța epicentrală

AZ = azimutul amplasamentului față de epicentru

Rezultă că PDI (Indicele distrugerilor) este o funcție compusă (funcție de funcție):

$$\{PDI = f_{tip}(ESI)\} \wedge \{ESI = j(PGA; M)\} \wedge \{PGA = h(M; \Delta; AZ)\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow PDI = f_{tip}(j(h(M; \Delta; AZ))) = \varphi_{tip}(M; \Delta; AZ)$$

$$\Rightarrow \varphi_{tip} = (h \circ j) \circ f_{tip} \quad (10)$$

Valorile parametrului ESI pot fi puse sub forma unei matrici ale cărei elemente sunt date în Tabelul 4 (și care au fost calculate cu formula 9).

Tabelul 4 : Valorile Indicelui de severitate seismică (ESI)

Magnit. M = →	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	...
PGA = ↓									
0,1 g	0	0,0125	0,1	0,3375	0,8	1,5625	2,70	4,2875	
0,2 g	0	0,0250	0,2	0,6750	1,6	3,1250	5,40	8,5750	
0,3 g	0	0,0375	0,3	1,0125	2,4	4,6875	8,10	12,8625	
0,4 g	0	0,0500	0,4	1,3500	3,2	6,2500	10,8	17,1500	
0,5 g	0	0,0625	0,5	1,6875	4,0	7,8125	13,5	21,4375	
0,6 g	0	0,0750	0,6	2,0250	4,8	9,3750	16,2	25,7250	

Se observa din relațiile de mai sus ca este necesară cunoașterea valorii **PGA** în amplasamentele barajelor ce vor fi studiate. Valoarea lui PDI depinde de ESI pentru fiecare amplasament în parte și pentru fiecare scenariu seismic prezis (postulat) și este obținută pe cale grafică (vezi Fig. 1).

Funcția f_{tip} din relația (8) a fost obținută empiric de către Bureau (2003) prelucrând observațiile făcute asupra unui număr de peste 4500 de baraje din Carolina de Sud și din statele învecinate. Mulțimea tuturor acestor baraje a fost partiționată în 5 submulțimi corespunzătoare tipurilor principale de baraje, pentru fiecare tip obținându-se relația grafică: **PDI = $f_{tip}(ESI)$** reprezentată în Figura 1.

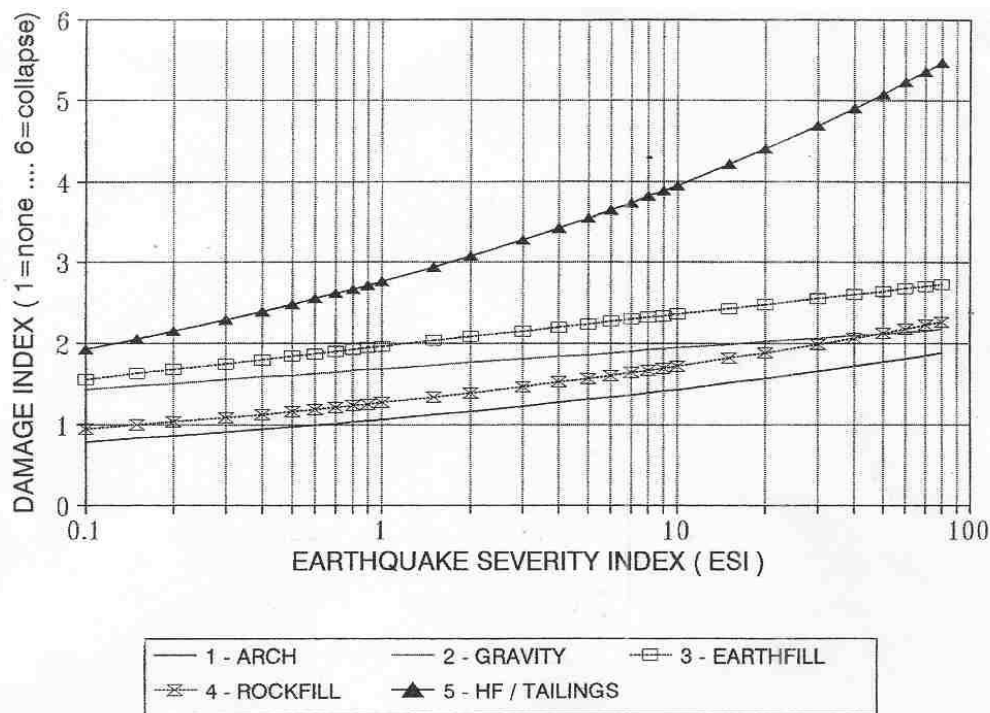


Fig.1 : Relatia grafică exprimând dependența $PDI = f_{tip}(ESI)$ pentru mai multe tipuri de baraje (după Bureau, 2003)

Curba 1 corespunde barajelor tip “Arc”, curba 2 celor tip “Gravitațional” – de greutate, curba 3 celor tip “Umplură de pământ”, curba 4 corespunde barajelor de anrocamente iar curba 5 așa numitelor ‘baraje umplute hidraulic (hydraulic fill). Se constată că cele mai vulnerabile sunt cele de tip HF (hydraulic fill), în timp ce barajele tip “Arc” au avut cele mai bune performanțe, dar concluziile au fost trase pe baza unui număr limitat de date după cum vom arăta mai jos.

Barajele de beton, în arc sau dublu arc sunt mai puțin susceptibile la îmbătrânire, deteriorare sau proasta întreținere. Performanțele la cutremur ale acestor baraje au fost satisfăcătoare sau chiar bună și au fost catalogate ca fiind cele mai rezistente la cutremur. Limitările despre care am menționat nu sunt constructive ci vin din faptul că există foarte puține date referitoare la baraje de beton zguduite semnificativ de cutremure. Informațiile vin de la aproximativ 100 de baraje supuse acțiunii unor cutremure din care doar 15 au suportat accelerații mai mari de 0.2g. La aceste baraje în arc nu a fost semnalată nici o distrugere semnificativă. Barajele de beton sunt predispuse la distrugereri mari-majore doar în cazul în care sunt construite chiar pe o falie ce nu a fost cunoscută și suprafața faliei intersectează fundația barajului. Singurul caz de distrugere completă raportat a fost cazul barajului Shih-Kang care a fost intersectat de suprafața de rupere care a urmat cutremurului din 1999 din Taiwan ($M_w=7.6$).

O altă limitare a curbelor din Figura 1 este dată de faptul că acestea nu prezic distrugerea totală sau parțială a unui baraj. Pentru aceasta ar fi nevoie de informații detaliate asupra caracteristicilor locului de amplasare a barajului. Ar fi necesare studii geologice, geotehnice și seismice. Aceste curbe sunt doar curbe generale ce pot fi aplicate unei familii extinse de baraje și ajută la identificarea gradului de risc în studiile regionale. Riscul prezent și viitor al unui baraj este afectat de o multitudine de alți factori care nu au fost incluși în aceste curbe de distrugeri precise.

Deoarece **Indicele distrugerilor (PDI)** este normat la 6 (valoarea maximă PDI = 6 corespunzând colapsului, iar PDI = 1 cazului când nu s-au produs niciun fel de efecte) este necesară o conversie a acestui indice în valorile căutate ale *Vulnerabilității observate* (V_O), ceea ce se obține postulând o relație liniară între cei doi parametri:

$$V_O(PDI) = \alpha \cdot PDI + \beta; V_O \in [0;1]; PDI \in [1;6] \quad (11)$$

unde α și β sunt parametri ce se determină punând condițiile “la capete”

$$V_O(PDI_{\min}) = 0; V_O(PDI_{\max}) = 1 \quad (12)$$

ceea ce reprezintă un sistem liniar 2×2 având soluția : $\alpha = 0,2; \beta = - 0,2$ (13)

Înlocuind în relația (11) valorile (13) obținem :

$$V_O(PDI) = 0,2 \cdot (PDI - 1) \quad (14)$$

relație ce ne permite să aflăm *Vulnerabilitatea observată* (V_O) atunci când cunoaștem Indicele distrugerilor (PDI), iar pe acesta îl putem afla grafic pornind de la “datele problemei” (magnitudinea și PGA sau Intensitatea macroseismică în amplasament).

Folosind graficele din figura 1 care ne dau valorile PDI pentru diferite valori ale ESI se poate calcula PDF-ul fiecărui baraj în parte cu ajutorul relației 15:

$$PDF = 2,5 \times PDI \quad (15)$$

unde coeficientul 2.5 a fost selectat empiric de Bureau & Ballentine (2002).

Pentru exemplificare prezentăm următorul “scenariu”:

Presupunem că într-o zonă seismică s-a produs un cutremur cu magnitudinea $M_w = 8$ ale cărui unde, ajungând la amplasamentul unui baraj de tip “Rockfill” situat la o distanță epicentrală Δ , determină o accelerație maximă a particulelor solului $PGA = 0,4 g$. Din Tabelul Nr.1 rezultă că indicele de severitate seismică a fost $\epsilon = ESI = 17,5$. Se determină poziția acestei valori pe axa absciselor graficului funcției $PDI = f_{tip}(ESI)$ și se duce o paralelă prin acel punct la axa ordonatelor (ale cărei puncte reprezintă valorile indicelui distrugerilor, **PDI**). (Vezi Figura 2.)

Ordonata punctului în care paralela taie graficul este egală chiar cu indicele căutat. În exemplul nostru se obține $PDI = f_{tip}(17,5) = 2$. Dacă scopul final este determinarea Vulnerabilității observate se aplică în final formula (14) și se obține $V_O = 0,2$ adică procentual 20 %, ceea ce înseamnă că s-au produs pagube reprezentând 20 % din valoarea barajului.

Folosind toți coeficienții prezentați anterior: CRF, HRF, ARF (ce caracterizează structura barajului), DHF (factorul din aval) și PDF (factorul prezis al distrugerilor) se calculează cu ajutorul ecuației 2, factorul de risc total, $TRF = [(CRF + HRF + ARF) + DHF] \cdot PDF$.

Ultimul pas al studiului este încadrarea barajelor în clase de risc (de la I – risc redus la IV – risc extrem) folosind valoarea TRF și Tabelul 5.

Aceasta clasificare este necesara pentru stabilirea necesitatii si prioritatilor evaluarilor detaliate de siguranta seismica in zona barajelor cu risc ridicat si extrem si atentionarea celor din zone de risc moderat.

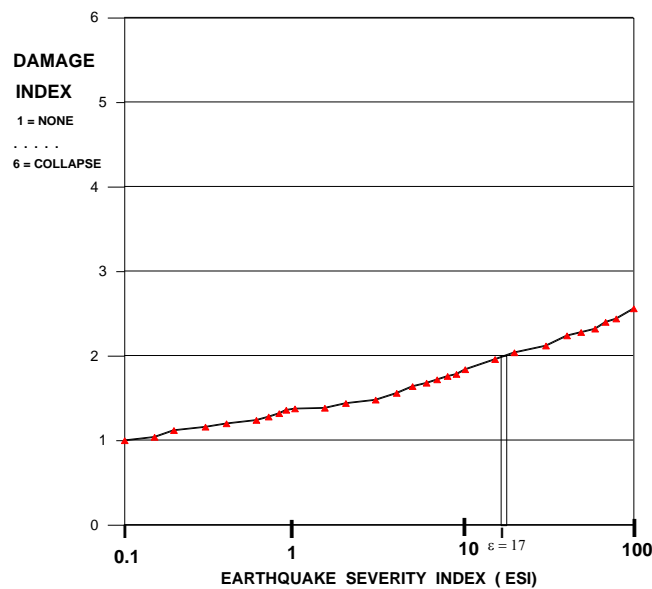


Fig. 2 : Exemplificare pentru baraje de tip Rockfill:

În “scenariu” valoarea indicelui severității seismice este $\varepsilon = 17$ si ordonata corespunzătoare (valoarea indicelui distrugerilor) va fi PDI = 2, deci $V_0 = 0,2$ (20 %)

Tabelul 5. Definirea claselor de risc a barajelor

TRF	Clasa de risc a barajului
2-25	I (scazut)
25-125	II (moderat)
125-250	III (ridicat)
>250	IV (extrem)