

**VULNERABILITATE & ROBUSTEȚE**  
**STUDIU DE CAZ - STRUCTURĂ METALICĂ, GRINDĂ CU ZĂBRELE**  
**SPAȚIALĂ, TIP TURN**

**VULNERABILITY & ROBUSTNESS**  
**CASE STUDY - A STEEL STRUCTURE, SPATIAL LATTICE GIRDER, TOWER**  
**TYPE**

**Carmen BUCUR**

Universitatea Tehnică de Construcții București  
Bulevardul Lacul Tei nr. 24, sector 2, București, Romania  
E-mail: bucurmecanica@yahoo.com

**Rezumat.** Vulnerabilitatea și robustețea sunt noțiuni cu semnificație opusă. Cu toate acestea, verificarea la robustețe a unei structuri trece prin studii de vulnerabilitate. Scenariile propuse pentru distrugerile inițiale caută să găsească punctele vulnerabile ale structurii, care nu sunt altceva decât elementele cheie care pot conduce la o cedare disproporționată.

În articol sunt prezentate unele aspecte teoretice din literatura de specialitate privind studii de vulnerabilitate și robustețe precum și exemplificarea acestora printr-un studiu de caz. Obiectul studiului de caz este o structură reală tip grindă cu zăbrele, metalică, dezvoltată spațial pe direcție verticală (un turn).

**Cuvinte cheie:** vulnerabilitate, robustețe, scenarii, structuri metalice, grinzi cu zăbrele

**Abstract** Vulnerability and robustness are notions of opposite significance. In spite of that, checking the robustness of a structure passes through vulnerability studies. The scenarios proposed for the initial degradations try to find the vulnerable points of the structure, which are nothing else but the key elements leading to a disproportionate collapse.

In the article there are presented some theoretical aspects in the domain literature regarding the vulnerability and robustness as well as some examples in case study. The object of the case study is a real structure of steel lattice girder type, spatially developed on vertical direction (a tower).

**Keywords:** vulnerability, robustness, scenarios, steel structures, lattice girders

## 1. INTRODUCERE

Vulnerabilitatea și robustețea sunt noțiuni cu semnificație opusă. În Micul Dicționar Enciclopedic -1986 [1] definițiile sunt simple:

1. Vulnerabil – adjectiv – care poate fi rănit. Punct vulnerabil = punct sensibil, slab (al cuiva sau a ceva).
2. Robustețe – substantiv feminin – faptul de a fi robust: forță, vigoare fizică.

Nu așa de simplu stă însă problema definirii acestor noțiuni atunci când vine vorba de folosirea lor în legătură cu studiul structurilor ingineresti. Verificarea la robustețe a unei structuri trece prin studii de vulnerabilitate. Scenariile imaginate pentru degradările inițiale caută să găsească punctele vulnerabile ale structurii, care nu sunt altceva decât elementele cheie care pot conduce la o cedare disproporționată.

În articol sunt prezentate unele aspecte teoretice din literatura de specialitate privind studii de vulnerabilitate / robustețe precum și exemplificarea acestora printr-un studiu de caz. Obiectul studiului de caz este o structură reală tip grindă cu zăbrele, metalică, dezvoltată spațial pe direcție verticală (un turn).

## 2. VULNERABILITATE & ROBUSTEȚE – SCURTĂ PREZENTARE TEORETICĂ

Vulnerabilitatea ca și robustețea sunt proprietăți ale sistemului structural.

În lucrarea Building Design of Homeland Security, Unit IV – Vulnerability Assessment [2] este enunțată următoarea definiție a **noțiunii de vulnerabilitate**: Orice punct slab ce poate fi exploatat (folosit) de către un agresor sau, într-un mediu non-terorist, orice punct slab care face ca un bun să fie sensibil la hazardul avarierii.

Literatura de specialitate din domeniul ingineriei civile pune la dispoziție o serie de articole dintre care notăm: Agarwal et al (2006) [3], Agarwal - prezentare [4], Lu et al (1999) [5].

În aceste materiale este trecută în revistă teoria vulnerabilității structurale și modul în care poate fi utilizată în practică pentru îmbunătățirea robusteții sistemului și reducerea riscului unei cedări inacceptabile. Pentru a realiza un studiu de vulnerabilitate / robustețe trebuie parcurse două faze:

- *Faza 1* urmărește determinarea punctelor slabe ale structurii (elemente, îmbinări, etc.);
- *Faza a 2-a* urmărește determinarea acelor acțiuni care pot contribui la amplificarea vulnerabilității acestor puncte slabe.

Una din teoriile vulnerabilității structurale se bazează pe analiza formei structurii. Scopul este de a identifica și ierarhiza punctele slabe dintr-o structură. O cauză care amenință oricare dintre aceste puncte slabe va conduce la situații de risc. Riscul poate fi minimizat prin luarea de măsuri de înlăturare a cauzelor ce amenință punctele slabe.

Punctele slabe ale unei structuri sunt identificate prin examinarea modului în care elementele structurale sunt legate între ele. În acest scop, în articolele amintite, este construit un model al formei structurii folosind conceptele de inel (structură plană) și de sferă (structură în spațiu). Autorii afirmă că inelul structural (în modelul bidimensional) sau sfera structurală (în modelul tridimensional) este calea minimă de transfer a încărcărilor prin care structura poate rezista unei ipoteze de încărcare. Este evident pentru inginerii constructori că structura despre care autorii discută este grindă cu zăbrele.

La grinda cu zăbrele plană „inelul inițial” are minimum trei elemente, iar pentru structura spațială „sfera inițială” are minimum șase elemente, figura 1.

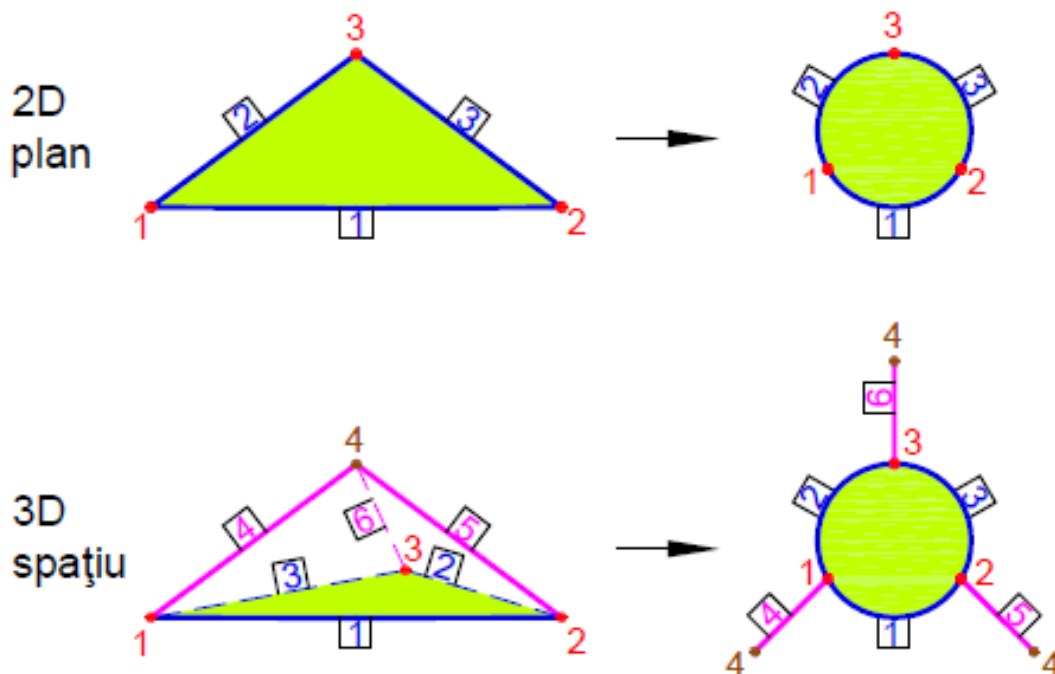


Fig. 1 Inelul inițial și sfera inițială – Agarwal [4]

Pierderea oricărui element duce la pierderea unei căi de încărcare. Calitatea unui inel sau sferă depinde de proprietățile elementelor, de orientarea și conexiunile lor. Utilizând aceste proprietăți a fost propusă o metodă de măsurare a bunei-alcătuii (Q):

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \det(q_{ii})}{N} \quad (1)$$

în care  $q_{ii}$  este sub-matricea de rigiditate asociată nodului  $i$  (aceasta este acea parte a matricei de rigiditate corespunzătoare gradelor de libertate ale nodului  $i$ ) într-un inel structural cu  $N$  noduri

Un element aparținând unui inel poate aparține în același timp și altor inele. Adăugarea unor alte elemente ce urmează aceleași criterii conduce la apariția unor noi inele, proces cunoscut sub numele de „clustering” (grupare). În cazul unui proces de adăugare corect se formează grupări (cluster) unice, care alcătuiesc întreaga structură. Creșterea inelelor și a grupărilor poate fi reprezentată ca o structură ierarhică arborescentă. Modelul ierarhic arată cum interacționează elementele și grupările - Agarwal et al, 2006, [3].

În lucrarea Building Design of Homeland Security, Unit IV – Vulnerability Assessment [2], se atrage atenția că identificarea vulnerabilităților unei structuri este o

activitate care necesită o echipă multidisciplinară și anume: ingineri, arhitecți, specialiști în securitate. O astfel de analiză are mai multe obiective de atins și anume:

- (1) Explicarea a ce constituie o vulnerabilitate,
- (2) Identificarea vulnerabilităților.
- (3) Înțelegerea faptului că o vulnerabilitate identificată poate pune în evidență că un bun: (i) este vulnerabil la mai mult decât o amenințare sau hazard (întâmplare); și (ii) că măsurile de atenuare pot reduce vulnerabilitatea la una sau mai multe amenințări sau hazarduri.
- (4) Determinarea unei clasificări prin valori numerice pentru vulnerabilitate și justificarea bazelor acestei clasificări.

În majoritatea normativelor se propune o clasificare a „gradului de vulnerabilitate”. În lucrarea amintită anterior această clasificare cuprinde 7 trepte după cum urmează:

|                      |                                                                                                                                     |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Foarte mare</i>   | Au fost identificate una sau mai multe puncte slabe majore ceea ce face bunul extrem de expus la un agresor sau hazard              |
| <i>Mare</i>          | Au fost identificate una sau mai multe puncte slabe semnificative ceea ce face bunul cât se poate de expus la un agresor sau hazard |
| <i>Mediu mare</i>    | A fost identificat un punct slab important ceea ce face bunul foarte expus la un agresor sau hazard                                 |
| <i>Mediu</i>         | A fost identificat un punct slab ceea ce face bunul destul de expus la un agresor sau hazard                                        |
| <i>Mediu scăzut</i>  | A fost identificat un punct slab ceea ce face bunul expus într-o oarecare măsură la un agresor sau hazard                           |
| <i>Scăzut</i>        | A fost identificat un punct slab minor ceea ce face bunul expus într-o măsură ușor crescută la un agresor sau hazard                |
| <i>Foarte scăzut</i> | Nu există puncte slabe.                                                                                                             |

Când spui despre un lucru sau o ființă că sunt robuste îți imaginezi o entitate completă din punct de vedere al elementelor ce se presupune că o compun și care emană forță și siguranță. **Noțiunea de robustețe** este asociată multor domenii de activitate. Ca atare există multe definiții care individualizează noțiunea de robustețe în funcție de domeniul de studiu.

În ultimii 10-15 ani literatura de specialitate din domeniul construcțiilor este tot mai bogată în lucrări al căror subiect este robustețea structurală.

Cauzele cedărilor sunt multiple: fenomene naturale, greșeli de proiectare, greșeli de execuție, utilizarea necorespunzătoare, etc. În ultimul timp a apărut terorismul.

În lucrările prof. Uwe Starossek (2008) [6] – Robustețea este definită ca fiind o proprietate de dorit a sistemelor structurale care micșorează susceptibilitatea acestora la prăbușire progresivă. Este o proprietate a structurii însăși și este independentă de cauzele posibile și de probabilitățile cedării locale inițiale.

În lucrările elaborate de specialiștii ce au participat la activitățile grupului COST-TU0601-Raport 2009 [7], se stipulează că „O structură va încorpora robustețe prin luarea în considerare la proiectare a efectelor tuturor hazardurilor și probabilitatea lor de apariție, pentru a se asigura că daunele care rezultă nu vor fi disproporționate față de cauză. Daunele cauzate de un eveniment cu o probabilitate rezonabilă de apariție nu trebuie să ducă la o pierdere completă a integrității structurii. În astfel de cazuri integritatea structurală în starea avariată trebuie să fie suficientă pentru a permite închiderea unui proces de sistem și/sau o evacuare în siguranță.”

În lucrarea JCSS Probabilistic Model Code - Raport (2008), [8] sunt formulate următoarele cerințe pentru robustețe: „O structură nu trebuie să fie avariata de evenimente cum ar fi focul, exploziile sau consecințele erorilor umane, efectele deteriorărilor, etc., printr-o extindere disproporționată față de gravitatea evenimentului declanșator”.

În Euro-cod SR EN 1991-1-7:2007 (1.5.14) [9], definiția noțiunii de Robustețe este: capacitatea unei structuri de a rezista unor evenimente ca incendii, explozii, șocuri sau consecințelor unor erori umane, fără a fi afectate într-o măsură disproporționată față de cauza inițială.

### 3. STUDIUL DE CAZ - STRUCTURA TURN METALIC

Structura este o construcție reală, grindă cu zăbrele spațială dezvoltată pe verticală. Construcția este proiectată și executată în anii 1980 și acum s-a propus o verificare la noile reglementări tehnice.

Încărcările sunt: (1) Greutatea proprie (G), (2) Forțe concentrate orizontale (H). Pentru studiul dinamic s-a considerat masa provenind din greutatea proprie și 0,4 din încărcarea orizontală.

Pentru deplasări și eforturi s-a propus combinația  $2 \times [1,35G + 1,5xH]$ . Aceasta înseamnă combinația pentru Starea Limită Ultimă multiplicată cu 2 pentru a ține cont de efectul dinamic.

Au fost propuse **trei** situații de conexiuni ale barelor la nodurile structurii și anume, fig. 2:

1. Bare încastrate – structură static nedeterminată; notația folosită în grafice este (BI)
2. Barele de tip diagonale articulate la noduri – structură static nedeterminată; notația folosită este (DA)
3. Bare articulate - structură static determinat

**Scenarii ale degradărilor inițiale**, fig. 3, în număr de douăsprezece sunt următoarele:

**C0** – structura inițială - întreagă

**C1**    **C1a** – înlăturarea unei bare verticale din piramida „inițială”

**C1b** – înlăturarea unei bare verticale din a doua piramidă

**C1c** – înlăturarea barei verticale între piramide

**C2** – înlăturarea unei diagonale

**C3** – înlăturarea unei bare orizontale

**C4** – înlăturarea a 2 diagonale din piramida 2

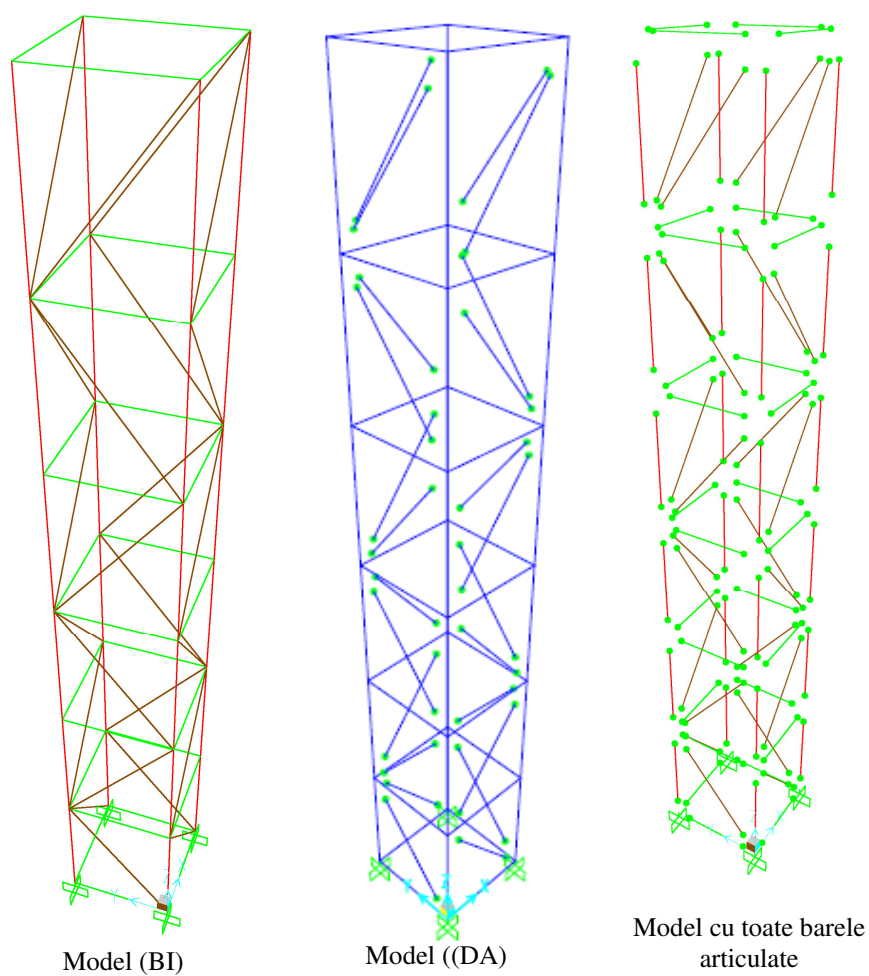
**C5** – înlăturarea a 2 diagonale din piramida 1

**C6** – înlăturarea a 2 bare orizontale

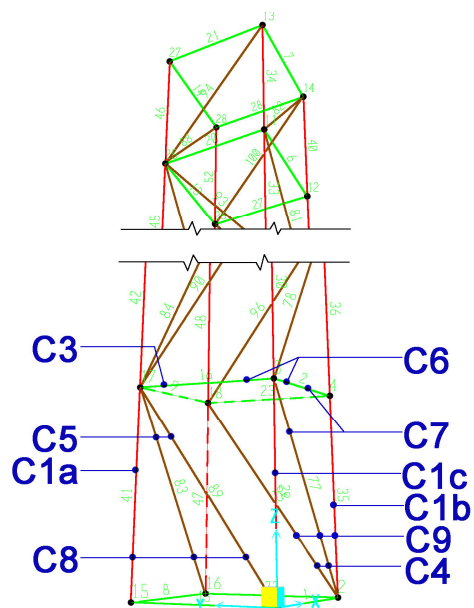
**C7** – înlăturarea unei bare orizontale și a unei diagonale

**C8** – înlăturarea a 3 bare din piramida „inițială”

**C9** – înlăturarea a 3 bare din a doua piramidă



**Fig. 2 Modelele de calcul**



**Fig. 3 Cazurile studiate**

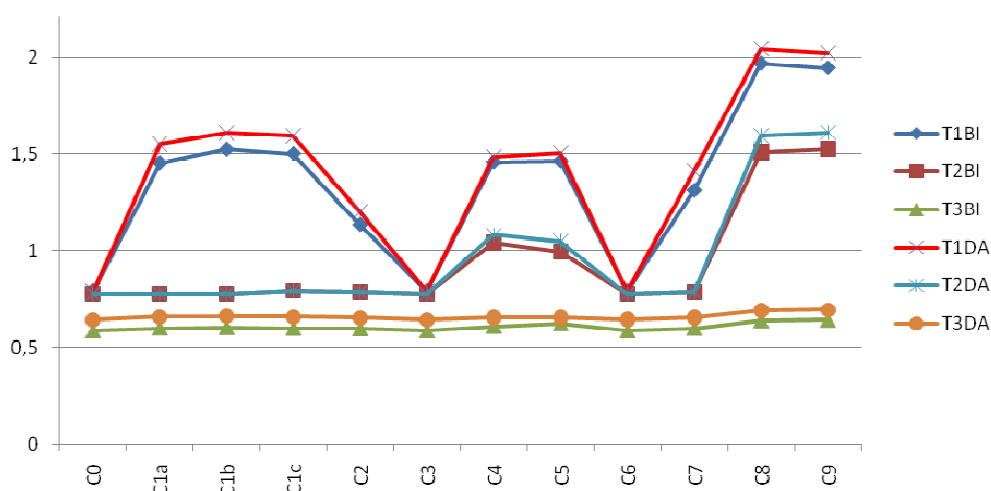
Cele 3 modelări ale îmbinărilor și cele 12 scenarii de înlăturare a elementelor structurale conduc la un număr de 36 de cazuri studiate.

Deoarece autoarea consideră că răspunsul dinamic propriu poate sugera vulnerabilitatea structurală sunt prezentate comentarii și concluzii pentru variația valorilor și vectorilor proprii. Autoarea propune ca numai acele scenarii ce perturbă semnificativ comportamentul dinamic propriu inițial - și anume schimbarea semnificativă a formei vectorului propriu – merită a fi în continuare verificate la robustețe și prăbușire progresivă.

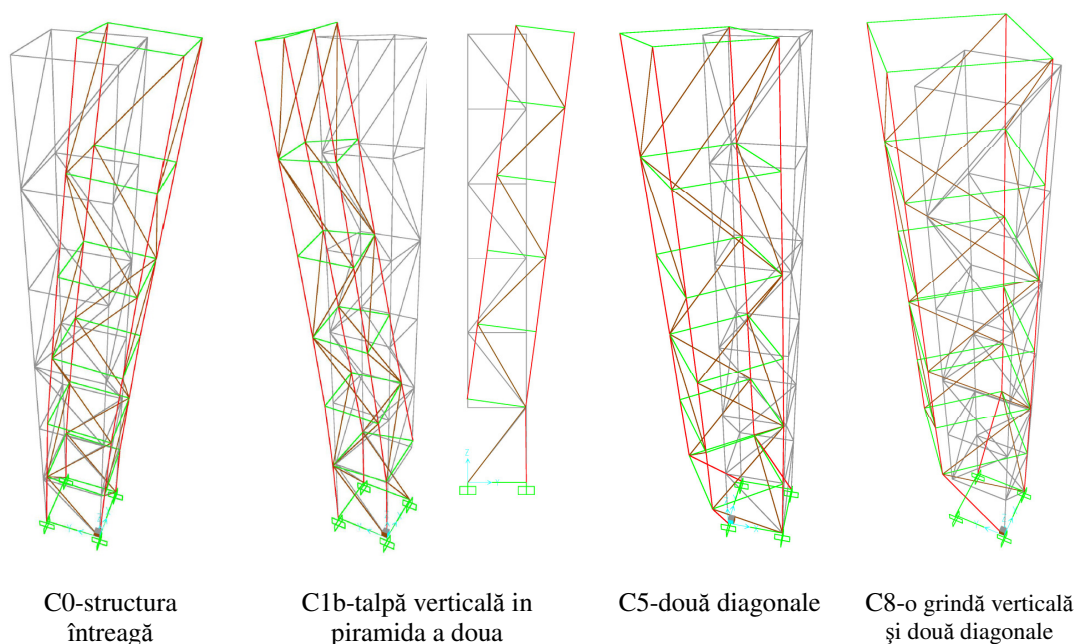
### ***Comentarii privind modelul cu barele încastrate la noduri(BI)***

În figura 4 sunt prezentate perioadele proprii pentru cele 12 scenarii și pentru primele două modele: (BI) - toate barele încastrate și (DA) - barele de tip diagonale articulate la noduri. În figura 5 sunt prezentate exemple de forme proprii de vibrație pentru structura (BI).

1. Valoarea perioadei proprii fundamentale de control – cea a scenariului C0 (structura întreagă) –  $T_1=0,793s$  încadrează structura între cele cu comportare semirigidă. Forma vectorului propriu este de încovoiere în planul diagonal care conține nodurile (câte unul la fiecare nivel) la care nu sunt atașate diagonale.
2. Valoare perioadei proprii fundamentale este afectată în majoritatea scenariilor propuse.
3. Înlăturarea unei singure bare de tip grindă verticală – scenariile C1a, C1b și C1c - influențează numai modul fundamental. Influența maximă este atunci când bara aparține celei de a doua piramide de bază – C1b – aducând un supliment de 92,2% (practic dublează perioada proprie fundamentală). Forma vectorului propriu de vibrație rămâne asemănătoare celei a scenariului C0 dar mișcarea se mută începând cu panoul al doilea, fig. 5.
4. Scenariile care propun înlăturarea a două diagonale - C4 și C5 - cresc perioada fundamentală. Astfel în cazul C5 – înlăturarea diagonalelor din piramida de baza 1 - creșterea este cu circa 84%. De asemenea se mai observă că efectul înlăturării a două diagonale este apropiat de cel al înlăturării unei bare verticale. Forma vectorului propriu pentru scenariul C5 se modifică față de scenariul C0 și anume apare o rotație în jurul tălpii verticale a piramidei 2, fig. 5.
5. Scenariile care propun înlăturarea unei diagonale – C2 - sau a unei diagonale cuplată cu o bară orizontală – C7 – aduc o creștere a perioadei fundamentale cu circa 43% pentru C2 și cu circa 65% pentru C7.
6. Cea mai mare influență asupra perioadelor 1 și 2 o au scenariile C8 și C9 care propun îndepărtarea a câte 3 bare așezate în piramidele de bază. Aceste scenarii sunt de presupus că au cel mai negativ efect. Astfel creșterea este de 148% pentru  $T_1$  și de 96% pentru  $T_2$ . Forma vectorului propriu este o rotație de corp rigid în jurul uneia din tălpile verticale și anume acea talpă ce aparține piramidei de bază din care nu s-au înlăturat barele.



**Fig. 4 Graficul perioadelor proprii de vibrație – modelul cu bare încastrate (BI) și modelul cu diagonalele articulate la noduri (DA) – comparativ**



**Fig. 5 Exemple de forme ale vectorilor proprii pentru modelul cu toate barele încastrate (BI)**

7. Înlăturarea barelor orizontale – scenariile C3 și C6 - nu schimbă perioadele 1 și 2 față de cele ale structurii întregi.
8. Perioada modului 2 este și ea influențată de înlăturarea a două diagonale – C4 și C5 - creșterea fiind de 34% pentru diagonalele din piramida de bază 2 (C4);
9. Perioada modului 3 rămâne practic constantă; chiar și scenariile C8 și C9 aduc o creștere doar de circa 10%.



***Comentarii privind modelul cu diagonalele articulate la noduri (DA), fig.4***

Scenariile C8 și C9 – eliminarea a 3 elemente aparținând piramidelor de bază – reprezintă situațiile așteptate a fi foarte perturbatorii.

Eliminând aceste două scenarii se observă următoarele:

1. Perioada fundamentală este influențată de înlăturarea unei bare verticale (C1b - 102% la bara din a doua piramidă de bază) urmată de înlăturarea a două diagonale (C5 – 90% diagonalele din prima piramidă de bază).
2. Perioada modului 2 este influențată de scenariile prin care se înlătură două diagonale (C4 – 39% diagonalele din piramida a doua de bază).
3. Perioada proprie a modului 3 practic nu este influențat de nici un scenariu propus.
4. În ceea ce privește formele vectorilor proprii de vibrație acestea seamănă cu cele de la modelul (BI) - toate barele încastrate.
5. Nu sunt diferențe notabile între structura cu toate bare încastrate și cea în care diagonalele sunt articulate.

***Comentarii privind modelul cu barele articulate la noduri***

Structura este static determinată geometric strict invariabilă. Înlăturarea unei bare transformă structura într-un mecanism. Ca urmare nu se poate studia nici un scenariu. În același timp este evident că valorile perioadelor proprii vor fi mai mari Astfel (pentru structura întreagă) perioadele proprii sunt mai mari cu 33% pentru T1, 2% pentru T2, 33% pentru T3. Și formele proprii de vibrație sunt altele. Deși această modelare nu este interesantă pentru studiu, din formele proprii de vibrație al structurii integrale rezultă că ar fi necesară introducerea unei bare suplimentare de tip diagonală în planele orizontale ale montanților orizontali.

## **4. CONCLUZII**

Cele două noțiuni – vulnerabilitatea și robustețea – deși par a fi diametral opuse, în calculele ingineresti abordarea este comună și scenariile ce se propun a fi studiate relevă punctele slabe (vulnerabilități) precum și cele tari ale structurii (robustețe).

Studiile teoretice prezentate în literatura de specialitate pun în evidență necesitatea unor calcule suplimentare celor cerute prin reglementările tehnice în vigoare în momentul de față. Se pune accent pe faptul că atât proiectanții cât și beneficiarii construcțiilor trebuie să aibă în vedere astfel de studii care însă cer timp și mijloace financiare suplimentare.

Din studiul de caz prezentat rezultă următoarele concluzii:

1. Pentru primele două modelări – model cu toate barele încastrate (BI) și model cu diagonalele articulate (DA) - nu sunt diferențe notabile.
2. Valoarea perioadei proprii fundamentale este afectată în majoritatea scenariilor propuse. Înlăturarea unei bare verticale aparținând celei de a doua piramide de bază – C1b, aduce un supliment de 92,2% (practic dublează perioada proprie fundamentală) dar nu modifică forma vectorului propriu. Înlăturarea celor două diagonale din prima piramidă de bază - C5, aduce o creștere cu 84% a valorii perioadei proprii și modifică forma vectorului propriu.

3. Cea mai mare influență asupra perioadelor 1 și 2 o au scenariile C8 și C9 care propun îndepărtarea a câte 3 bare așezate în piramidele de bază. Ele modifică și formele vectorilor proprii de vibrație.
4. Perioada modului de vibrație 3 rămâne practic constantă pentru oricare modelare.
5. Efectul înlăturării a două diagonale este apropiat de cel al înlăturării unei bare verticale.
6. În funcție de expunerea structurii la anumite riscuri privind pierderi structurale se poate alcătui o schemă de studiu care să cuprindă acele scenarii care au fost decelate ca perturbatoare.

Într-un material viitor vor fi prezentate rezultatele privind răspunsul structural în deplasări și eforturi pentru încărcările și scenariile de degradări inițiale propuse.

**Notă:** Autoarea anunță că o primă etapă de studiu privind structura prezentată în articol a fost efectuată în cadrul proiectului PN II - CDI cod CNC SIS – program IDEI, ID\_8/2007 – „Prăbușire progresivă” – derulat în perioada 2007-2010

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] \*\*\* Mic Dicționar Enciclopedic (1986) – Ed. Științifică și Enciclopedica, București – ediția a III-a
- [2] <http://www.fema.gov/what-mitigation/fema-e155-building-design-homeland-security-course>, (2014); [www.fema.gov/...plan/prevent/rms/155/e155\\_unit\\_iv.pdf](http://www.fema.gov/...plan/prevent/rms/155/e155_unit_iv.pdf) - *U.S. Department of Homeland Security FEMA –E155 Building Design of Homeland Security, Unit IV – Vulnerability Assessment – Training course*, 2014
- [3] Agarwal J., England J., Blockley D. (2006) - Vulnerability Analysis of Structures - Structural Engineering International 2/2006 pp. 124-128
- [4] Agarwal J. – Vulnerability Analysis of Structures – presentation at University of Bristol
- [5] Lu Z, Yu Y, Woodman NJ & Blockley DI (1999) A theory of structural vulnerability, The Structural Engineer, 77(18): 17-24.
- [6] Starossek U., Haberland M., (2008) – Approaches to measures of structural robustness – Bridge Maintenance, Safety, Health Monitoring and informatics – Koh & Frangopol (eds) Taylor & Francis Group, London, 2008, pp. 3562-3568
- [7] \*\*\* Rapoarte ale Grupului de lucru COST Action "Robustness of Structures"- Brussels (2007-2010)
- [8] \*\*\* Rapoarte ale Joint Committee on Structural Safety (JCSS), 2008
- [9] \*\*\* Euro-cod SR EN 1991-1-7:2007 Acțiunea asupra structurilor – Partea 1-7 Acțiuni generale – Acțiuni accidentale
- [10] \*\*\* SAP2000 V12 – Finite Element System, User Guide