

SIMULAREA NUMERICĂ A PRĂBUȘIRII PROGRESIVE

NUMERICAL MODELLING OF THE PROGRESSIVE COLLAPSE

Prof. dr. ing. Carmen BUCUR¹
Dr. Victor Mircea BUCUR²
Mr. Conf. dr. ing. Marin LUPOAE³

¹Universitatea Tehnică de Construcții București, Romania

E-mail: bucurmecanica@yahoo.com

²Bancpost, colaborator extern UTCB, Romania

³Academia Tehnică Militară

Rezumat: În cadrul Contractului de cercetare PN-II intitulat "Prăbușire progresivă" autorii au realizat o serie de studii de caz în care sunt imaginate scenarii privind avaria inițială. Din documentarea asupra acestui subiect rezultă că există încă discuții asupra metodelor matematice cu care să fie abordată problema, metodologiei de lucru și mai ales asupra programelor de calcul care să rezolve problema prăbușirii progresive. În prezentul articol autorii își propun următoarele obiective: (i) să prezinte unele dintre cele mai importante recomandări legate de prăbușirea progresivă existente în reglementările tehnice în vigoare; (ii) să prezinte în ordine cronologică unele din studiile de caz pe structuri teoretice sau reale, realizate de cercetători de renume; (iii) să prezinte unele dintre studiile de caz proprii ale colectivului.

Cuvinte cheie: simulare numerică, prăbușire progresivă, metoda elementului aplicat

Abstract: In PN-II "Progressive Collapse" research project authors have performed a series of studies where they have analyzed different scenarios about the initial damage. As a result of the documentation in this domain, it can be asserted there are disputations about mathematical methods, methodology and especially about the software that can be used to solve the problem of progressive collapse. This paper has the following goals: (i) to present some of the most important recommendations about the progressive collapse that exist in technical regulations; (ii) to present, in chronologically order, some of the case studies performed on virtual or existent structures by renowned researchers; (iii) to present some of the case studies performed by authors.

Keywords: Modelling, Design codes, Softwares, Progressive collapse

1. COMENTARIU PRIVIND REGLEMENTĂRILE TEHNICE ÎN VIGOARE

Explozia de la blocul Ronan Point – 1968, Londra – a declanșat preocuparea pentru fenomenul numit „prăbușire progresivă”. Ca urmare specialiștii englezi au fost primii care s-au ocupat de studii în acest domeniu. Rezultatul acestor studii a fost introducerea în edițiile reglementărilor tehnice din acea perioadă a unor criterii și recomandări privind acest fenomen. În standardul britanic BS 5950 – 1:2000, Structural Use of Steelwork in Building, Section 2.4.5.3, nu se utilizează expresia de „prăbușire progresivă” ci „prăbușire structurală disproporționată” față de cauza inițială.

De atunci mulți specialiști în domeniul calculului structural s-au preocupat de descrierea, definirea, realizarea unui nomenclator de termeni, dar mai ales au încercat să prindă în calcul acest fenomen cu cât mai multe din caracteristicile lui.

Proiectarea făcută în vederea reducerii riscului prăbușirii progresive necesită o altă gândire decât cea din abordările tradiționale ale proiectării structurilor de rezistență, legate de norme și standarde prescriptive. Această nouă gândire trebuie să se concentreze pe ceea ce ar putea să meargă rău/neprevăzut/ne mai întâmplat și apoi să realizeze procesul de proiectare corespunzător situațiilor respective. Obiectivul principal al proiectării, care urmărește reducerea efectului sarcinilor anormale și diminuarea prăbușirii progresive, este să obțină o probabilitate îndeajuns de mică a evenimentelor care implică pierderi de vieți, pierderi

economice sau sociale inacceptabile, precum și daune aduse mediului. Pentru atingerea acestor obiective de performanță, poate fi asumată și tolerată deteriorarea structurii clădirii într-o anumită măsură.

În unele țări, reglementările tehnice cuprind recomandări care au ca scop obținerea atât a unei robusteți a construcției cât și a prevenirii fenomenului de prăbușire progresivă. Se propun diverse valori limită ale unei deteriorări care, pornind de la un singur element distrus, să rămână o avarie locală. Comparând mai multe reglementări se poate spune – cu unele variații - că avaria se consideră locală dacă:

- 1) acolo unde progresia ar putea fi verticală, extinderea ei este de la etajul unde a apărut evenimentul anormal la etajul imediat superior și inferior;
- 2) acolo unde progresia ar putea fi orizontală: (a) pentru zonele exterioare, circa 15-20% din suprafața planșeului pe cel mult două travee; (b) pentru zonele interioare, circa 30% din aria totală a planșeului, cel mult pe traveele adiacente elementului distrus, fig 1.

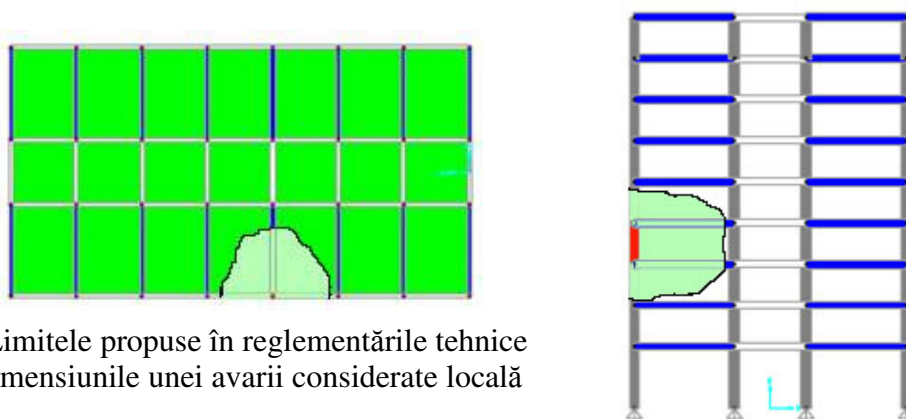


Fig. 1 Limitele propuse în reglementările tehnice pentru dimensiunile unei avarii considerate locală

În unele reglementări tehnice sunt fixate și acele structuri ce trebuie să fie verificate la prăbușire progresivă. În tabelul 1 sunt indicate astfel de situații:

Țara/Reglementarea	Recomandarea
Marea Britanie	Orice construcție de metal și beton Clădirile cu ≥ 5 etaje pentru cărămidă și lemn
Statele Unite/ Departamentul de Securitate	Clădirile ≥ 3 etaje
EUROCOD (2002)	Sunt stabilite 4 „clase” <ol style="list-style-type: none"> 1. Nivel „Scăzut” - Clădiri ≤ 3 etaje : Nu este necesar să se ia în considerație pentru accidente. 2. Nivel „Mediu” - Clădiri între 3 ÷ 6 etaje și Birouri cu < 4 etaje : Se iau în considerație numai de regulile de robustețe și stabilitate din Eurocod 1-9. 3. Nivel „Mare” - Clădiri cu 7 ÷ 10 etaje sau mai puțin, clădiri publice cu mai puțin de 200 m² : Calcul simplificat prin acțiunile statice echivalente sau reguli prescriptive de proiectare/construcție aplicabile. 4. Nivel „Sever” - Clădiri de peste 10 etaje sau mai mult de 200 m² : Pot fi aplicabile analiza dinamică, ne-liniară, interacțiunea sarcină-structură.

Observație importantă: În Europa de Vest și Statele Unite, parterul este considerat ca fiind etajul 1.

Și în reglementările românești sunt prevăzute unele condiții. Astfel în conformitate cu „Codul de proiectare seismică P100-1/2006 - Prevederi de proiectare pentru clădiri” trebuie realizate: (1) *Simplitatea structurală* care „presupune existența unui sistem structural continuu și suficient de puternic care să asigure un traseu clar, cât mai direct, și neîntrerupt al forțelor seismice, indiferent de direcția acestora, până la terenul de fundare.”;

(2) *Redundanța structurală adecvată* prin care se asigură că „ruperea unui singur element sau a unei singure legături structurale nu expune structura la pierderea stabilității”.

2. EVOLUȚIA SIMULĂRILOR MATEMATICE ALE FENOMENULUI DE PRĂBUȘIRE PROGRESIVĂ

Deoarece sunt multe feluri în care o avarie locală se poate propaga în interiorul unei anumite structuri - de la amploarea avariei inițiale și până la starea finală - nu există o abordare universală pentru evaluarea potențialului colapsului progresiv.

2.1. Unul din primele studii a fost realizat de Gross J.L. și McGuire W. în 1983. Structura studiată a fost un cadru metalic, plan, P+3E, cu trei deschideri inegale. Autorii au realizat un program de calcul și pentru verificarea rezultatelor obținute prin folosirea lui au făcut o comparație cu cele obținute pe cale experimentală pe un model la scară naturală. Sunt comentate și propuse mai multe combinații ale acțiunilor cum ar fi $[1,0 G_{proprie} + 0,4 \text{ Utilă} + 1,3 (\text{Vânt} + \text{Alte încărcări})]$. O primă concluzie a acestui studiu a fost că pierderea unui stâlp marginal poate conduce la prăbușirea structurii pe când pierderea unui stâlp interior nu are această urmare, fig. 1a,b.

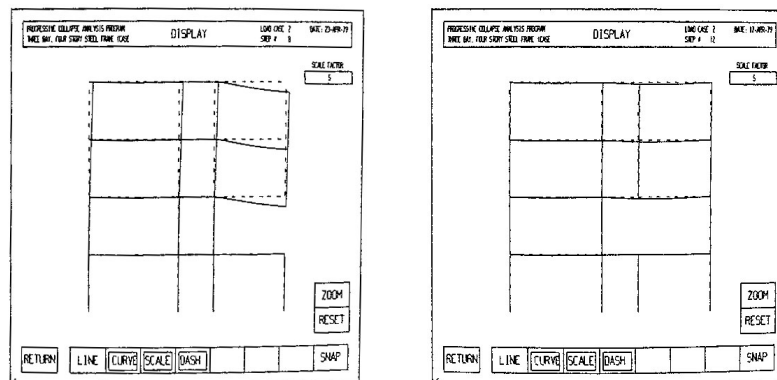


Fig. 1 Studiu realizat de Gross și McGuire – preluare din [Gross, McGuire, 1983]

2.2. In anul 1998 [Gilmour, Viridi, 1998] prezintă realizările și stadiul cercetărilor unui colectiv de la City University, London. A fost realizat un program de calcul – PROC SI - pentru structuri de tip cadru, în plan, din beton armat. Abordarea este cu elemente finite, cvasi-statică neliniară și realizează analiza distrugerii locale, determinarea căii de încărcare alternative și luarea în considerare a molozului care cade pe celelalte elemente structurale. Încărcarea cu moloz este înmulțită cu 1,25 pentru a ține seama de efectul impactului. Interesantă era propunerea ce o făceau pentru un viitor calcul care să rezolve structuri modelate spațial. Aceasta consta în împărțirea structurii în două zone de comportare, una dinamică și una cvasi-statică. Zona cu comportare dinamică este alcătuită din acele bare

supuse acțiunii excepționale și barele imediat legate de acestea. Restul structurii se consideră în regim cvasi-static.

2.3. Cercetările unui colectiv de specialiști din Australia – Melbourne din 2006 au constat în realizarea a șase cazuri de studiu folosind cinci metode de calcul și trei tipuri de încărcări (Elvila, Mendis, Lam, Ngo, 2006). Structura studiată este spațială P+3E, beton armat, cu câte 5 travei de dimensiuni egale pe ambele laturi. Cele șase cazuri studiate sunt: (1) analiză statică liniară; (2) analiză statică neliniară - pushover; (3) analiză dinamică neliniară folosind un sistem simplificat cu 1GLD; (4) analiză cu element finit dinamică liniară; (5) analiză cu element finit dinamică neliniară – fără explozie; (6) analiză dinamică cu element finit neliniar – cu explozie.

Pentru încărcări au fost folosite:

- (1) $2,0[(0,9 \text{ sau } 1,2)G_{\text{proprie}} + (0,5U_{\text{tile}} \text{ sau } 0,2Z_{\text{ăpadă}})] + 0,2V_{\text{vânt}}$, unde 2,0 este un coeficient dinamic ce presupune introducerea efectului dinamic al pierderii unui element din structură în studiile statice;
- (2) aceeași formulă dar fără coeficientul dinamic folosită în studiile dinamice;
- (3) încărcarea cu explozie a fost adăugată la ultimul caz de studiu;
- (4) masa considerată la studiile dinamice corespunde celei de a 2-a combinație.

Programul folosit este unul comercial - DIANA-2003.

În figura 2 a,b sunt prezentate structura și rezultatele pentru cazul 6.

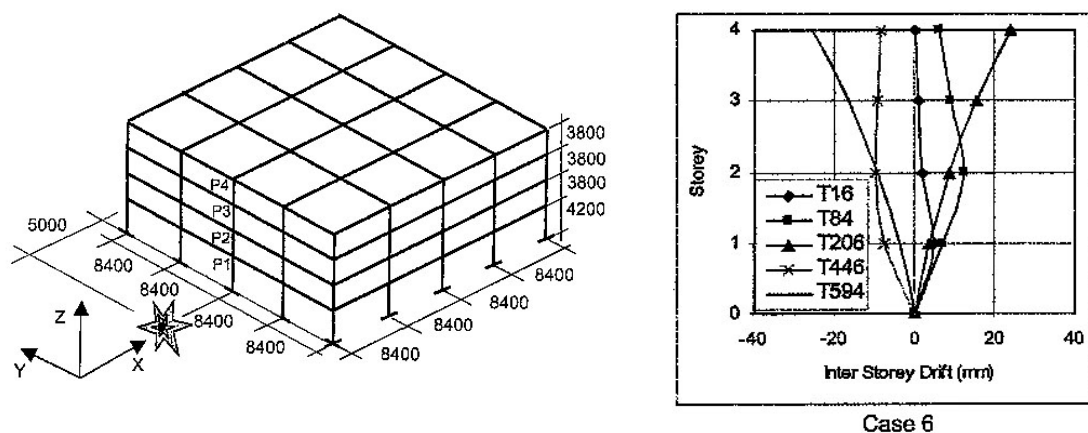


Fig. 2 Structura și rezultatele cazului 6 de studiu – preluare din [Elvila, Mendis, Lam, Ngo, 2006]

2.4. În perioada 2006-2008 un colectiv de specialiști de la Imperial College London [Izzudin și alții, 2008; Vlassis și alții, 2008] au realizat un amplu studiu privind fenomenul de prăbușire progresivă la clădiri înalte, propunând o metodă simplificată de calcul. Clădirile studiate sunt structuri teoretice P+10E / P+6E metal și metal-beton. Situațiile propuse pentru poziția stâlpului ce se distruge instantaneu sunt: undeva pe fațada construcției, fig 3a, și de la parter în trei situații - colț, periferic pe latura lungă și central, fig. 3b.

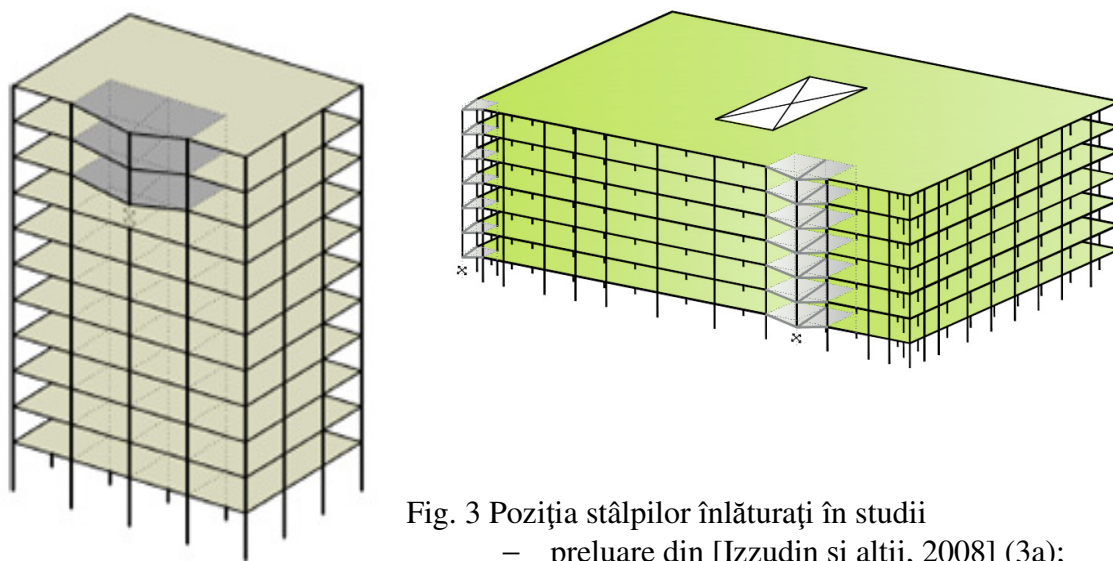
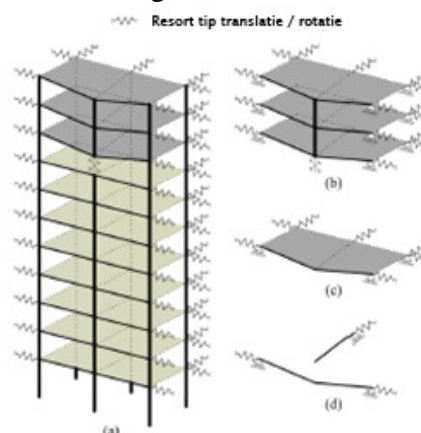


Fig. 3 Poziția stâlpilor înlăturați în studii
 – preluare din [Izzudin și alții, 2008] (3a);
 – [Vlassis și alții, 22008] (3b)

Studiul s-a desfășurat pe trei niveluri și anume: determinarea răspunsului static neliniar, evaluarea răspunsului dinamic pe un model simplificat, evaluarea ductilității nodurilor. Modelarea propusă pentru studiu este prezentată în figura 4.

Fig.4 Etape ale modelării
 -preluare din [Izzudin și alții, 2008]



2.5. Studiul unei structuri reale – Hotelul San Diego - este realizat de Sasani și Sagioglu în 2008. Clădirea din beton armat P+5E a fost evaluată pentru situația în care doi stâlpi exteriori ar fi îndepărtați simultan și instantaneu, fig.5a. Modelarea structurii este realizată folosind două metode de calcul și anume metoda elementului finit (MEF) și metoda elementului aplicat (AEM), [Meguro, Tagel-Din, 1999; Lupoae, Bucur, 2009]. Totodată clădirea care urma a fi demolată prin implozie a făcut și obiectul unor măsurători in situ. În aceste condiții încărcare utilă nu exista și unii pereți de la etajele inferioare fuseseră demolați. Câteva din concluziile studiului sunt: (i) fibra întinsă de momentul încovoietor se schimbă pe grinzile adiacente stâlpului înlăturat; (ii) cea mai mare deplasare măsurată a fost de 6,4 mm deasupra stâlpilor înlăturați; (iii) rezultatele analitice arată că nodurile de deasupra coloanei înlăturate în doua etaje diferite se deplasează aproape identic, la etajul de deasupra având deplasări întrucâtva mai mici. Deplasarea mai mică se datorează ponderii forței axiale din stâlpii dintre

cele două etaje și elongațiilor corespunzătoare; (iv) Rezultatele arată că deși deplasarea maximă verticală a structurii crește de aproape 2,4 ori, sistemul rezistă încă la prăbușire progresivă.

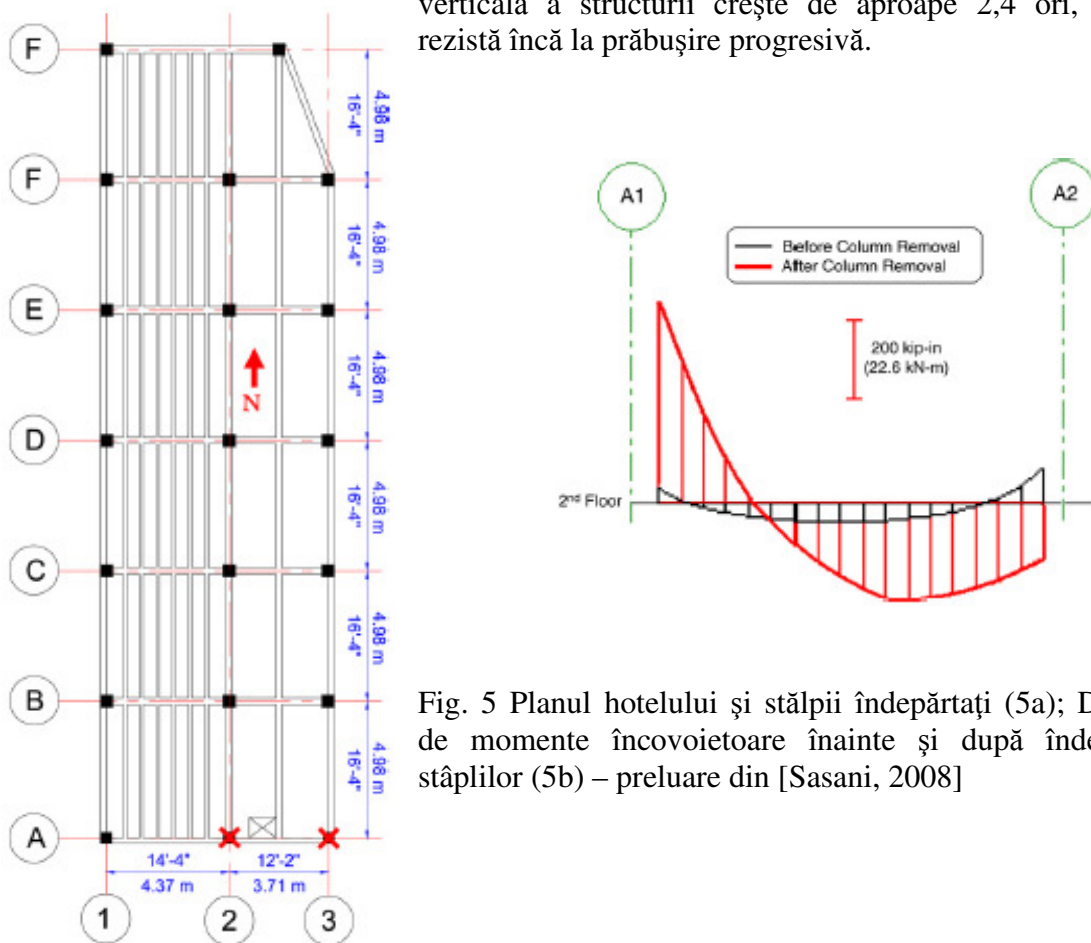


Fig. 5 Planul hotelului și stâlpii îndepărtați (5a); Diagrama de momente încovoietoare înainte și după îndepărtarea stâlpilor (5b) – preluare din [Sasani, 2008]

3. STUDII DE CAZ REALIZATE DE AUTORI

Autorii au realizat un set de studii de caz – construcții de tip clădiri din beton armat – cu diferite regimuri de înălțime și modelate în diferite niveluri de complexitate.

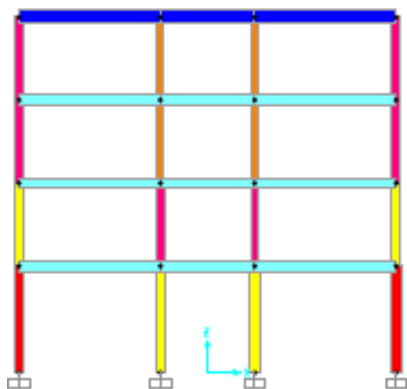
Menționăm că pentru unele dintre studii au fost realizate modele diferite folosind două metode de abordare și anume:

1. Metoda elementului finit;
2. Metoda elementului aplicat [Meguro, Tagel-Din, 1999; Lupoae, Bucur, 2009].

Pentru aceasta modelele de calcul au fost realizate în două moduri, în conformitate cu cerințele programelor de calcul folosite – Programul SAP2000 și Programul ESL.

În acest articol vom prezenta structura plană de beton armat cu regim de înălțime P+3, încastrată la teren. Au fost realizate următoarele studii:

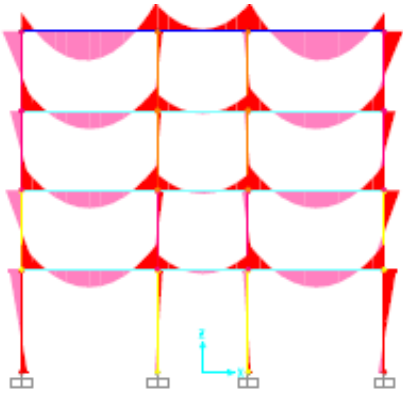
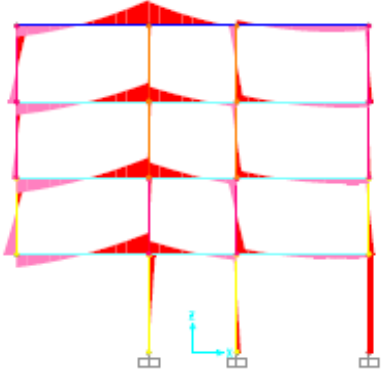
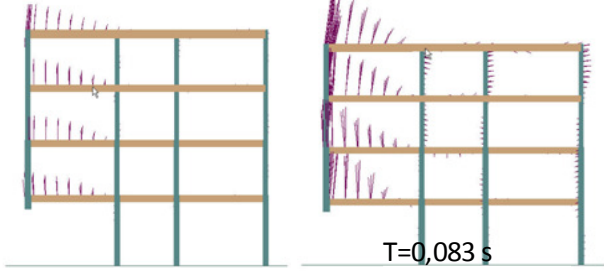
1. studiu cu metoda elementului finit:
 - (1,a) studiu static liniar,
 - (1,b) studiul caracteristicilor proprii de vibrație,
 - (1,c) studiu static neliniar – pushover.
2. studiu cu metoda elementului aplicat:
 - (2,a) studiu static liniar;
 - (2,b) studiu dinamic neliniar.

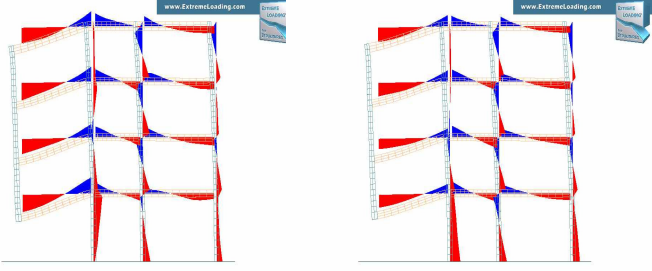
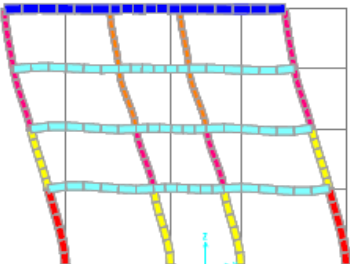
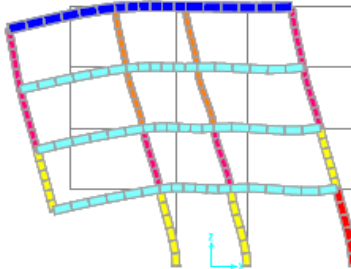
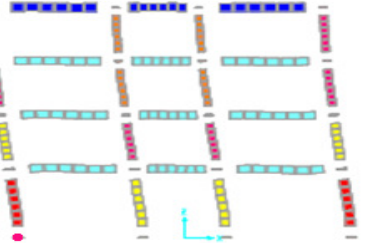
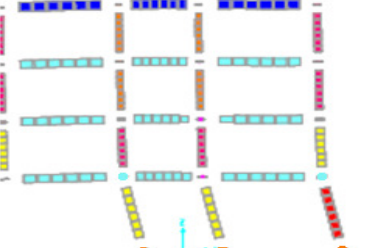


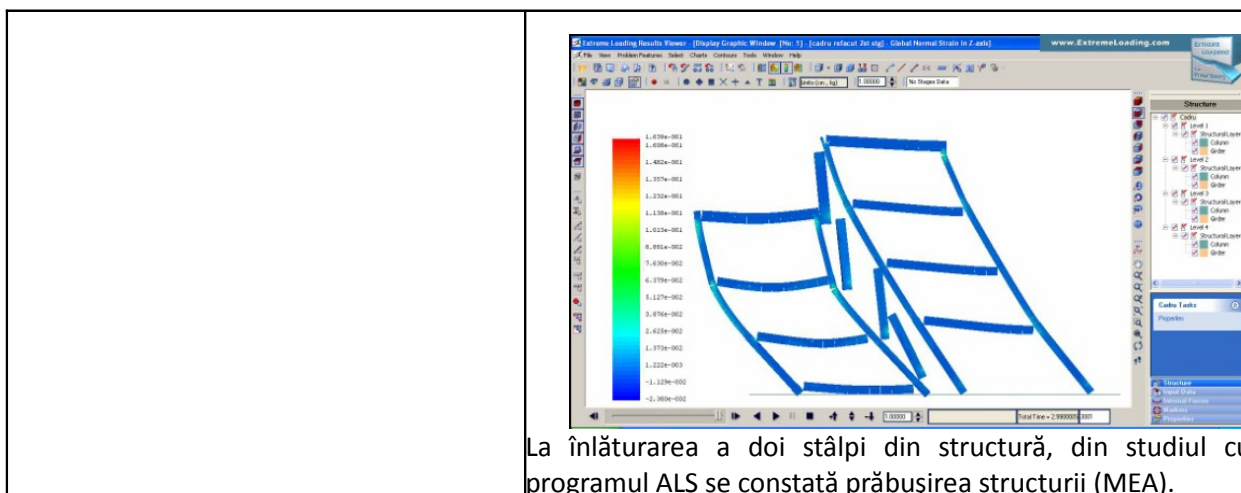
Modelare folosind MEF



Modelare folosind MEA

Structura inițială	Structura cu elemente înlăturate
 <p>Diagrama de momente încovoietoare pe structura inițială (MEF).</p>	 <p>Diagrama de momente încovoietoare pe structura cu stâlpul de colț înlăturat. Se constată că în cea mai mare parte, atât pe grinzi cât și pe stâlpi, fibra întinsă este inversată. Momentele de pe stâlpii și capetele grinzilor din al doilea ax sunt cele mai puțin schimbate din punct de vedere al poziției diagramei de momente (MEF).</p>
	 <p>Structura are o inerție de aproximativ 25 ms după care stâlpii din axul 1 aflați deasupra stâlpului care a fost îndepărtat încep să se deplaseze pe verticală. O imagine foarte sugestivă a acestei deplasări se poate obține prin vizualizarea vectorilor vitezelor de deplasare ale elementelor structurii (MEA).</p>

	 <p>a) $t = 0,36s$ b) $t = 0,56s$</p> <p>Se constată o foarte bună corespondență a diagramelor de eforturi momente încovoietoare pentru cele două modelări – MEF și MEA (MEA).</p>
 <p>$T_1 = 0,3833 s$</p> <p>(MEA)</p>	 <p>$T_1 = 0,4545 s$</p> <p>Formele proprii fundamentale sunt relativ asemănătoare cu o modificare în zona primei deschideri care capătă o deplasare pe verticală. Creșterea perioadei fundamentale este de 18,5%.</p> <p>Autotii își propun să continue studiul urmărind legătura dintre procentul pe care îl reprezintă numărul de elemente înlăturate din structură și procentul cu care se modifică perioada fundamentală (MEA).</p>
 <p>La studiul static inelastic-pushover secțiunea care a ajuns la limita elastică este la stâlpul de colț – în cazul nostru stânga. Am avut astfel încă un criteriu pentru alegerea înlăturării acestui stâlp (MEA).</p>	 <p>Urmând același scenariu pe structura cu stâlpul de colț stânga – axul 1 - înlăturat, prima secțiune ce ajunge la limita elastică este la stâlpul din axul 4, la baza de rezemare. Când secțiunile de la baza celor trei stâlpi ajung în stadiul „deplasare ultimă”, secțiunile de la partea superioară a stâlpilor din axele 2 și 4 ajung la stadiul „siguranța de viață”, (figura).</p> <p>În aceste condiții studiul privind prăbușirea progresivă a urmat cu înlăturarea a încă unui stâlp și anume cel din axul 2.</p>



ACKNOWLEDGEMENT: The authors acknowledge the financial support of the PN II - CDI project code CNCISIS – program IDEI, ID_8/2007 - Progressive Collapse and the free use (Academic Licence) of the *Extreme Loading for Structures* software from Applied Science International LLC

BIBLIOGRAFIE

1. **Bucur C., Bucur V.M.** (2009) – *Ce este „Prăbușirea Progresivă” (What is „Progressive Collapse”)* - Buletinul Științific bilingv _UTCB – anul LII - no.4/2009, pp. 5-14, ISSN-1224-628X
2. **Elvila, Mendis P., Lam N., Ngo T.** (2006) – *Progressive collapse analysis of RC frame subjected to blast loading* – Australian Journal of Structural Engineering, Vol.7, No. 1 - 2006
3. **Gilmour J.R., Virdi K.S.** (1998) – *Numerical modeling of the Progressive Collapse of framed structures as a result of impact or explosion* - 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering , 1998, Budapesta.
4. **Gross J.L., McGuire W.** (1983) – *Progressive Collapse Resistent Design* – Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 1, ianuarie 1983
5. **Izzudin B.A., și alții** – *Progressive Collapse of Multi-Story Buildings duet o Sudden Column Loss – Part I: Simplified Assessment Framework* – Imperial College London, 2008
6. **Lupoae M., Bucur C.** (2009) – *Explzia - întâmplătoare, controlată sau cu rea intenție – cauză a prăbușirii progresive* - a VIII-a Sesiune de Comunicări Științifice a Catedrei de Mecanică Tehnică și Mecanisme – SIMEC-UTCB, martie 2009 - Publicat sub egida Academiei de Științe Tehnice din România, Ed. MATRIX-RON București, pag. 131-138, ISSN: 1842-8045
7. **Lupoae M., Bucur C.** (2009) – *Use of applied element method to simulate the collapse of a building* - ACADEMY OF TECHNICAL SCIENCES COMMISSION OF ACOUSTICS OF ROMANIAN ACADEMY ANNUAL SYMPOSIUM OF THE INSTITUTE OF SOLID MECHANICS SISOM 2009 - Session 1 System Dynamics and continuum mechanics – lucrarea pe CD - 4D și pe site-urile: <http://www.imsar.ro/html/sisom.html>; <http://www.extremeloading.com/Publications.aspx>
8. **Meguro, K., Tagel-Din, H.**, (1999) - *Applied Element Method, A new efficient tool for design of structure considering its failure behavior* - Proc. of 7th US-Japan Earthquake Resistant Structure Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, 15 pages
9. **Sasani M., Sagioglu S.** (2008) – *Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego* – Journal of Structural Engineering – march 2008
10. **Starossek W.** (2009) – *Progressive Colapsse* – Ed. Thomas Telford

11. **Vlassis A.G., și alții** – *Progressive Collapse of Multi-Story Buildings due to Sudden Column Loss – Part II:Application* – Imperial College London, 2008
12. *** Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings – National Institute of Standards and Tehnologi NIST 7396, 2007
13. *** Reglementări tehnice în vigoare – străine și românești
14. *** Manualul de utilizare SAP2000-V12
15. *** Manualul de utilizare *Extreme Loading for Structures* – features 3.0