

**Academia Oamenilor de Știință din
România**



Raport științific nr. 1 privind proiectul:

**Platformă DIGItală pentru esTimarea nivelului de
dEgradaRe seismică a clădiRilor utilizând tehnici de
mAchine learning
DIGITERRA**

Domeniu științific: Științe Geomice

Cuvinte cheie: cutremur, degradare seismică, digitalizare, machine learning, reziliență, evaluarea rezistenței seismice a clădirilor

Director de proiect:

Conf. Dr. Ing. Vasile Calofir

Membrii echipei de cercetare:

Lt. Drd. Ing. Munteanu Ruben Iacob

As. Drd. Ing. Mircea Simoiu

Universitatea Politehnica din București
-Facultatea de Automatică și Calculatoare-



1. Introducere

Scopul proiectului **DIGITERRA** este dezvoltarea unei platforme digitale open-acces pentru estimarea indicelui de degradare al clădirilor supuse la acțiuni seismice folosind tehnici de învățare automată (*machine learning*). Acest instrument digital este adresat atât inginerilor/expertiilor din domeniul construcțiilor, cât și proprietarilor sau investitorilor care vor să evalueze gradul de vulnerabilitate seismică al unei clădiri. Totodată, prin integrarea unor metode de învățare automată se identifică principalii parametri cu impact semnificativ asupra indicilor de degradare, oferind astfel posibilitatea estimării acestor indicatori chiar și în situațiile în care datele referitoare caracteristicile clădirii sunt incomplete. În același timp, proiectul își propune dezvoltarea unei metodologii de estimare a degradării structurale folosind tehnici de machine learning care să poate fi aplicată într-un context dat, pentru diverse tipuri de clădiri.

Obiectivul general al proiectului este crearea unui cadru digital accesibil, cu adresare largă, atât pentru specialiști cât și pentru nespecialiști în domeniul construcțiilor, care să faciliteze o înțelegere realistă în ceea ce privește nivelul actual și nivelul așteptat de degradare structurală a clădirilor la incidența unui eveniment seismic. În acest sens, sunt utilizate procedee avansate de modelare numerică și tehnici de machine learning pentru a crea o aplicație web destinată estimării indicelui global de degradare structurală pentru diferite tipuri de construcții cu structura de rezistență în cadre.

Obiectivul general este atins prin parcurgerea a patru obiective specifice:

Obiective specifice

OS1: Realizarea unei rutine în Matlab care să genereze modele numerice pentru diferite tipuri de clădiri și să asocieze acestora accelerograme seismice.

OS2: Alegerea caracteristicilor (features) clădirilor și a accelerogramelor ce sunt considerate a avea un impact semnificativ în deteriorarea structurală a clădirilor și obținerea prin simulare numerică a indicelui global de degradare seismică.

OS3: Proiectarea cu ajutorul algoritmilor de machine learning a unui model de estimare a indicelui de degradare structurală pentru clădiri supuse la acțiuni seismice.

OS4: Dezvoltarea unui instrument digital de tip open-source, implementat în cadrul unei aplicații web, care să realizeze o interfață între utilizator și modelul de estimare a indicelui de degradare.

2. Obiectul raportului

Având în vedere diagrama Gantt a proiectului, prezentată în Anexa nr. 1 la prezentul raport, activitățile desfășurate până în momentul de față în cadrul proiectului au în vedere proiectarea structurii de simulare pentru generarea datelor de antrenare, validare și testare a algoritmilor de

machine learning. Acesta presupune realizarea unei rutine numerice care să simuleze comportarea clădirilor la incidența unui cutremur și se împarte în două subactivități:

1. *Stabilirea unei proceduri de generare a tipurilor de clădiri în cadre*
2. *Generarea modelelor matematice pentru fiecare clădire în parte și asocierea accelerogramelor corespunzătoare*

2.1 Stabilirea unei proceduri de generare a tipurilor de clădiri în cadre

Având în vedere obiectivul general al proiectului, de a crea o aplicație web destinată estimării indicelui global de degradare structurală pentru diferite tipuri de construcții cu structura de rezistență în cadre utilizând tehnici de machine learning, este necesară utilizarea unei rutine de simulare pentru a genera și a analiza comportarea seismică clădirilor folosind diferite modele numerice care să reprezinte structuri de rezistență cu diverse caracteristici din punct de vedere al geometriei și a materialului din acestea care sunt realizate. Este de la sine înțeles faptul că, simularea răspunsului structurilor nu se realizează pe o clădire adevărată, ci pe modele structurale judicios întocmite care au rolul de a încorpora proprietățile esențiale ale acestora. Principalul obiectiv este stabilirea unor modele de analiză care să conducă la obținerea unor rezultate credibile și folositoare. Astfel în cadrul proiectului modelele numerice se vor realiza utilizând Metoda Elementului Finit (MEF).

Totodată, pentru realizarea și simularea modelelor numerice în vederea calculării indicelui de degrade este necesar să se ia în considerare faptul că, **comportarea reală a structurilor la incidența cutremurelor este puternic inelastică**, dar și faptul că, pentru realizarea unui număr foarte mare de analize numerice se impune folosirea unor **tehnici de simulare foarte eficiente din punct de vedere numeric**. În carul proiectului structura de simulare a fost realizată după cum descriu [1] și [2].

Luarea în considerare a comportării inelastice în analiza seismică răspunsului structurilor este vitală având în vedere faptul că, acesta oferă posibilitatea de estima degradările elementelor structurale post cutremur. Deși clădirile amplasate în regiuni seismice sunt de obicei proiectate folosind analiza elastică, majoritatea au o comportare inelastică semnificativă la incidența unor evenimente seismice majore. Neliniaritatea comportării materialului este în general cea mai importantă sursă de inelasticitate luată în considerare în analiză dinamică efectuată în mod obișnuit în proiectarea clădirilor. Abordarea comună în ingineria structurală este folosirea de metode simplificate. De exemplu, pentru structurile multietajate în cadre, plasticitatea este concentrată în articulații punctuale care modelează comportarea neliniară utilizând relații forță – replasare. Deși în literatura specifică au fost propuse numeroase modele sofisticate care utilizează plasticitate distribuită pentru a surprinde comportarea materialului, modelele simplificate s-au dovedit mai practice datorită formulării lor relativ condensate și eficienței numerice. Acestea au demonstrat că, în general, pot surprinde într-un mod mai eficient caracteristicile relevante cu un nivel de precizie

identic sau nesemnificativ mai scăzut. Astfel simulările realizate în cadrul proiectului folosesc articulații plastice punctuale pentru a modela comportarea inelastică a structurii.

Totodată, pentru simularea comportării seismice cu eficiență numerică ridicată, proiectul DIGITERRA folosește o tehnică nouă de analiză dinamică a structurilor spațiale în cadre, utilizând Metoda Analogiei Forței și formularea legilor de mișcare în spațiul stărilor. În ultimii ani, Metoda analogiei forței (FAM) a devenit un instrument eficient pentru calculul răspunsului structurilor de rezistență [3], [4]. Spre deosebire de metodele clasice de analiză, în care rigiditatea este principalul parametru care variază în timp, Metoda analogiei forței (FAM) se concentrează pe o schimbare a deplasării pentru a genera același nivel de forță. În consecință, pe parcursul întregii analize, se utilizează matricea de rigiditate inițială a structurii. Acesta face ca FAM să fie o metodă eficientă, potrivită pentru realizarea unui număr mare de analize dinamice într-un timp redus.

În concluzie, pentru generarea tipurilor de clădiri ce vor fi supuse analizelor dinamic neliniare, se folosește Metoda Elementului Finit, comportarea inelastică fiind luată în considerare prin intermediul Metodei Analogiei Forței.

2.2 Generarea modelelor matematice pentru fiecare clădire în parte și asocierea accelerogramelor corespunzătoare

Pentru generarea modelelor matematice/numerice se pleacă de la ecuația de mișcare care descrie comportarea dinamică a sistemelor:

$$\{\ddot{u}(t)\} + [M]^{-1} \cdot [C] \cdot \{\dot{u}(t)\} + [M]^{-1} \cdot [K] \cdot \{u(t)\} = -h \cdot \ddot{a}_g(t) \quad \text{Rel. 1}$$

Componentele relației (1) pot fi împărțite în două categorii:

- Componente care descriu și determină răspunsul sistemului structural:
 - $u(t)$ - vectorul deplasărilor instantanee de răspuns pe direcția GLD;
 - $\dot{u}(t)$ - vectorul vitezelor instantanee de răspuns pe direcția GLD;
 - $\ddot{u}(t)$ - vectorul accelerațiilor instantanee de răspuns pe direcția GLD;
 - $\ddot{a}_g(t)$ - accelerația trenului la incidența cutremurului;
 - h – este un vector ce are rolul de a scala accelerația terenului pe direcția GLD.
- Componente care descriu proprietățile sistemului structural:
 - $[K]$ – este matricea de rigiditate a structurii;
 - $[M]$ – este matricea de inerție a structurii
 - $[C]$ – este matricea de amortizare a structurii.

Dacă, în cadrul simulării, prima clasă de componente este formată din elementele de intrare și de ieșire, cea de-a doua, conține elementele care fac obiectul modelării proprietăților sistemului structural. În consecință pentru generarea modelelor matematice este necesară descrierea din punct de vedere numeric a componentelor care descriu proprietățile clădirii, și anume matricele $[K]$, $[M]$ și $[C]$.

Având în vedere faptul că în cadrul proiectului elementele structurale ale clădirilor și proprietățile acestora sunt modelate utilizând metoda elementului finit, fiecare stâlp și grindă din

sistemul structural sunt descrise folosind elemente de tip bară (Figura 1), având 2 noduri, cu câte 6 grade de libertate: 3 translații și 3 rotații. Acestea pot fi descrise din punct de vedere al caracteristicilor de rigiditate și de inerție prin intermediul unor matrice locale de dimensiune 12 x 12 [5], [6].

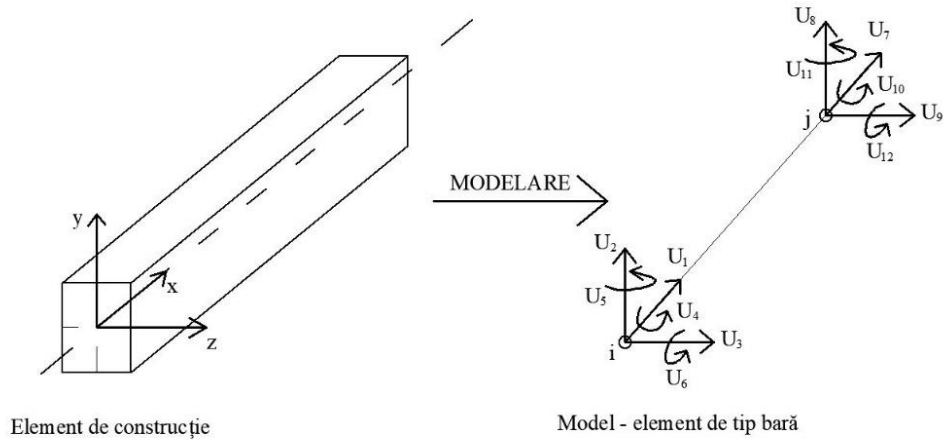


Figura 1 – Modelarea elementului de construcție

$$[K_{local}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & -\frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{2EI_{yy}}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l} & 0 & -\frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_{zz}}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & \frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_{zz}}{l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{2EI_{yy}}{l} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_{zz}}{l} & 0 & -\frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l} \end{bmatrix}$$

Rel. 2

$$[M_{local}] = \rho \cdot A \cdot l \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & \frac{11l}{120} & 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13l}{420} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & -\frac{11l}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & \frac{13l}{420} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{11l}{210} & 0 & \frac{l^2}{105} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13l}{420} & 0 & -\frac{l^2}{140} & 0 \\ 0 & \frac{11l}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105} & 0 & \frac{13l}{420} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l^2}{140} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & \frac{13l}{420} & 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & -\frac{11l}{210} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & -\frac{13l}{420} & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & \frac{11l}{210} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13l}{420} & 0 & -\frac{l^2}{140} & 0 & 0 & 0 & \frac{11l}{210} & 0 & \frac{l^2}{105} & 0 \\ 0 & -\frac{13l}{420} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l^2}{140} & 0 & -\frac{11l}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105} \end{bmatrix} \quad \text{Rel. 3}$$

Unde:

I_{zz} I_{yy} – sunt momentele de inerție pe direcțiile principale

J – este momentul de inerție polar

E – este modulul de elasticitate longitudinal al materialului

G – este modulul de elasticitate transversal al materialului

l – este lungimea elementului

A – este aria secțiunii elementului

ρ – este densitatea materialului

Pentru determinarea matricelor globale, care descriu întreaga structură de rezistență a clădirii, se folosesc procedee numerice consacrate în MEF, pentru rotirea și asamblarea a matricelor locale de rigiditate și inerție.

În ceea ce privește matricea globală de amortizare, aceasta se stabilește după modelul propus de Reyleigh, ca o combinație liniară între matricea globală a maselor și matricea globală de rigiditate. Acest model de amortizare este dezvoltat pe baza analizei modale, prin intermediul căreia se determină coeficienții de proporționalitate α și β .

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \text{Rel. 4}$$

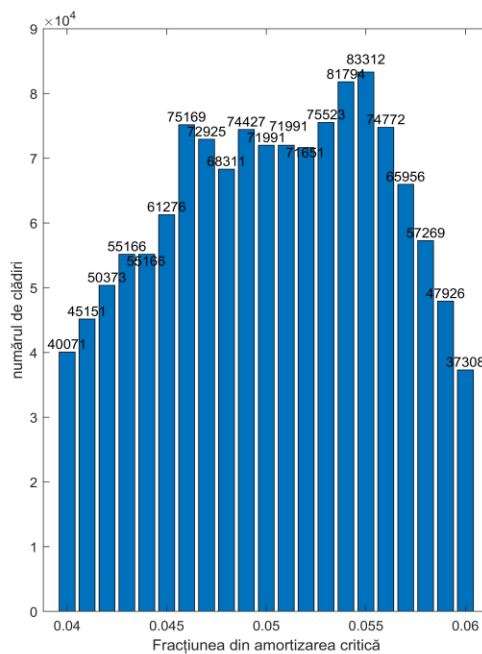
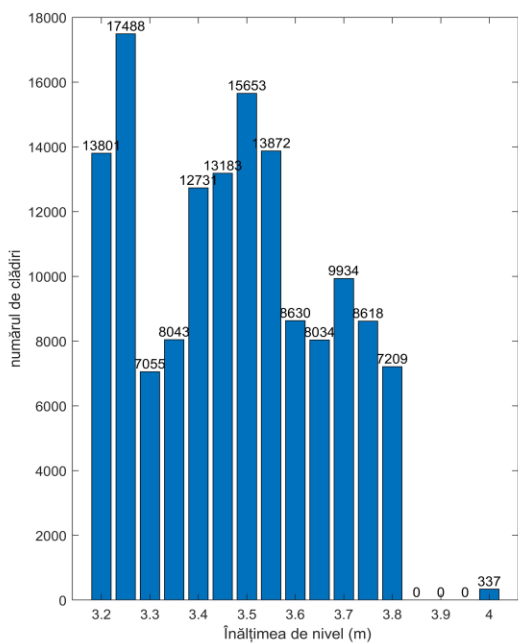
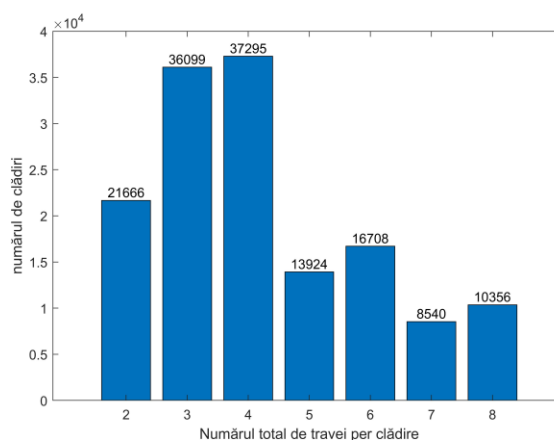
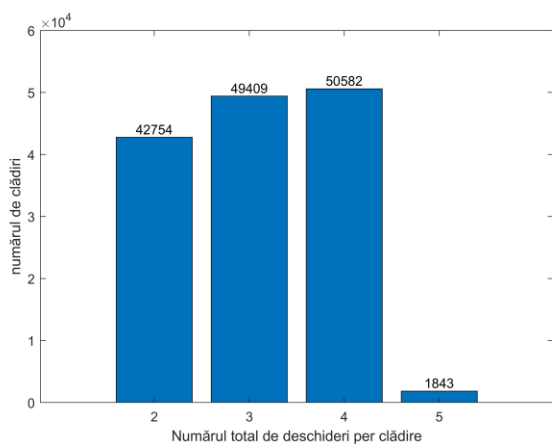
3. Rezultate

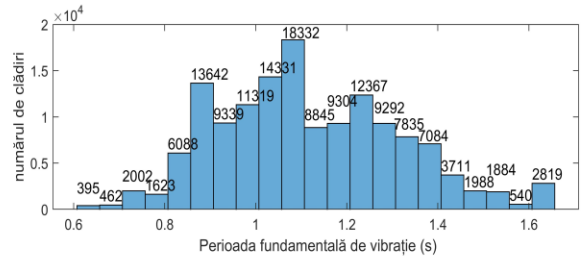
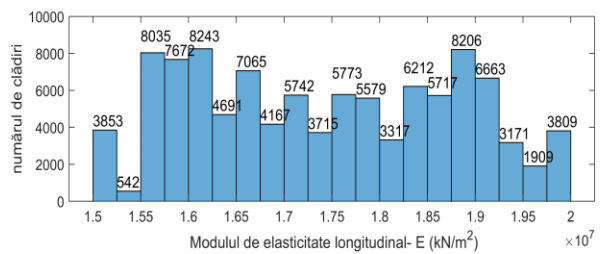
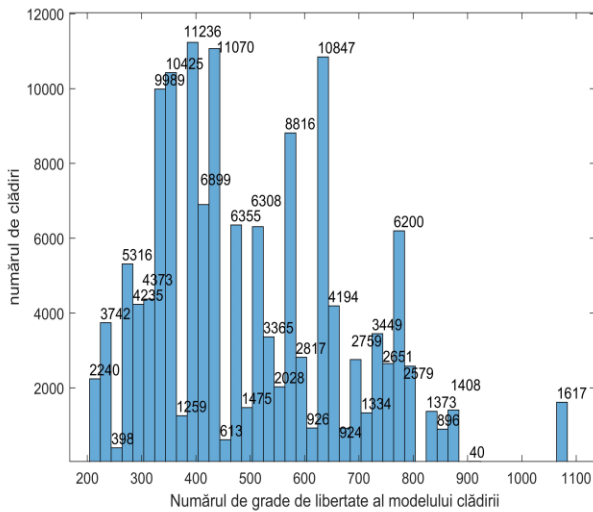
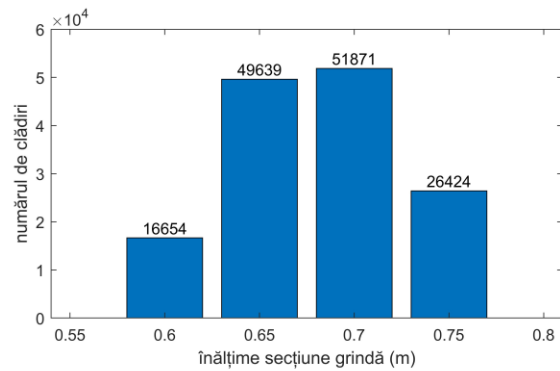
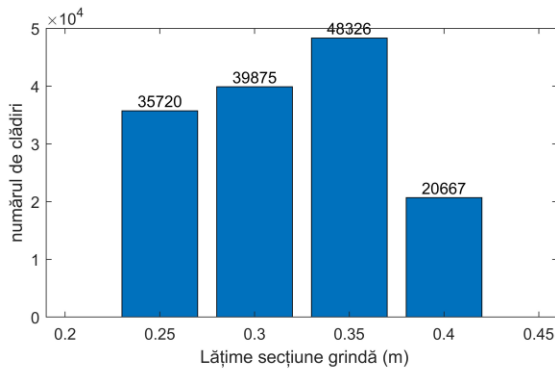
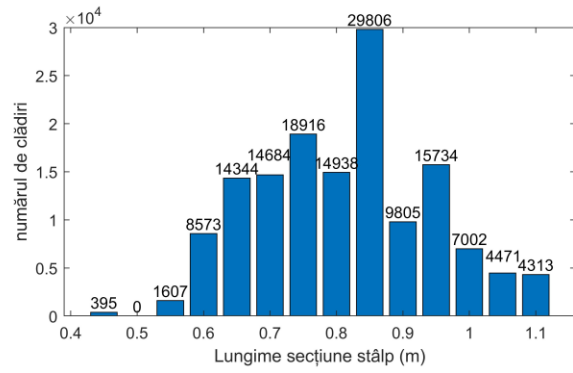
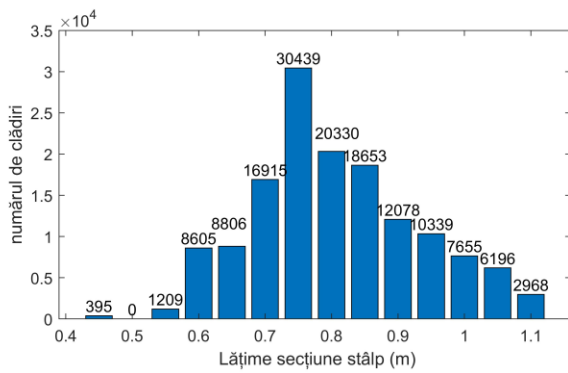
Având în vedere faptul că în cadrul proiectului se urmărește estimarea indicelui de degradare structurală al clădirilor prin intermediul unei aplicații web dezvoltate utilizând tehnici de machine learning, este necesară generarea unui număr mare de clădiri care să fie folosite ca baza de învățare pentru acest algoritm. Astfel a fost dezvoltată o rutină care generează în mod aleatoriu, utilizând elementele prezentate anterior, clădiri de diferite tipologii în ceea ce privește caracteristicile structurale legate de: înălțimea de nivel, numărul de etaje, dimensiunile elementelor structurale, numărul de deschideri, numărul de travee, perioada fundamentală de vibrație, numărul de grade de libertate, modul de elasticitate longitudinal al materialului, fracțiunea din amortizarea critică a materialului, capacitățile la încovoiere a grinzilor și stâlpilor, numărul de articulații plastice potențiale, forțele statice aplicate asupra clădirii, etc. Trebuie menționat faptul că, în ceea ce

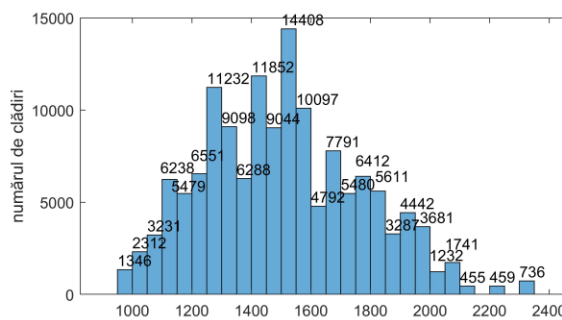
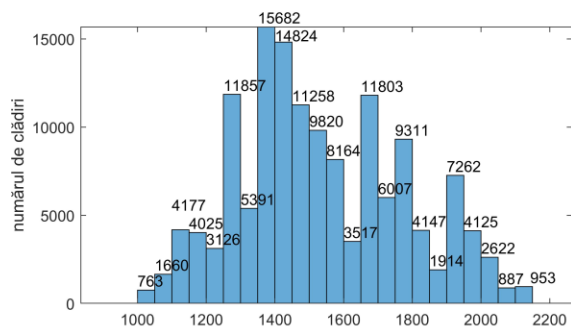
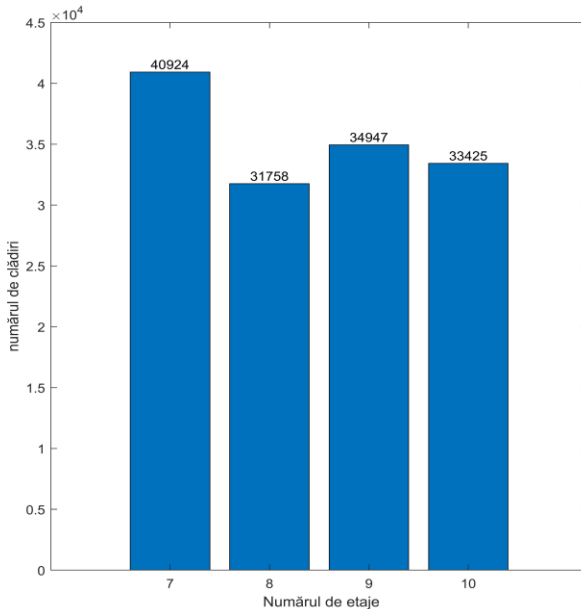
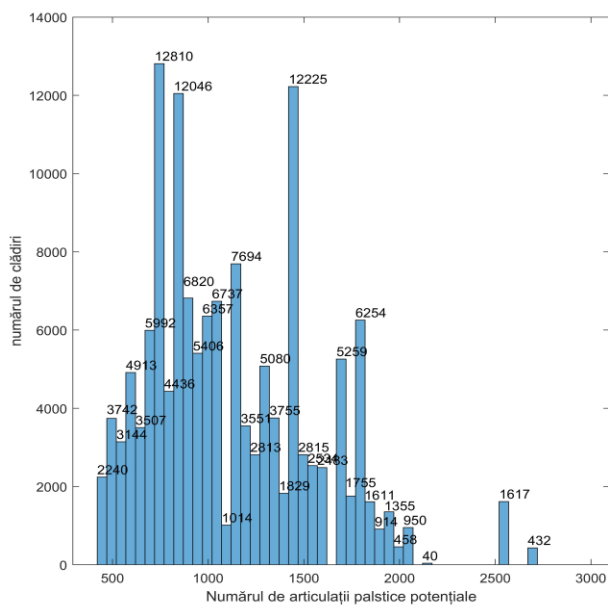
privește numărul de etaje, acesta este cuprins între 7 și 10, în ideea că majoritatea clădirilor realizate în România se află în acest interval. În funcție de acuratețea algoritmului de machine learning de a estima indicele de degradare și pentru clădiri cu un număr mai mare sau mai mic de etaje, această ipoteza va fi ajustată și vor fi adăugate noi date de antrenare.

Pentru a evita generarea de modele structurale cu caracteristici nerealiste, a fost realizată o rutină de filtrare care compară de perioada proprie de vibrație cu numărul de etaje ale clădirii. Astfel sunt acceptate doar acele modele pentru care raportul dintre perioada de vibrație și numărul de etaje este cuprind în intervalul 0.07 - 0.2.

În figurile de mai jos este prezentat numărul de modele structurale generate în funcție de diferite caracteristici ale clădirii. Aceste rezultate sunt stocate și vor fi utilizate pentru a simula, pentru fiecare model numeric în parte, comportarea dinamic neliniară și pentru a estima valoarea indicelui de degradare.

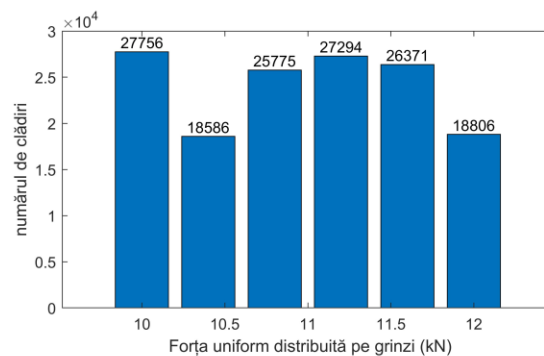
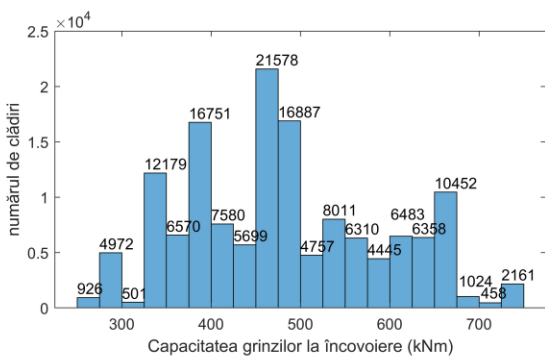




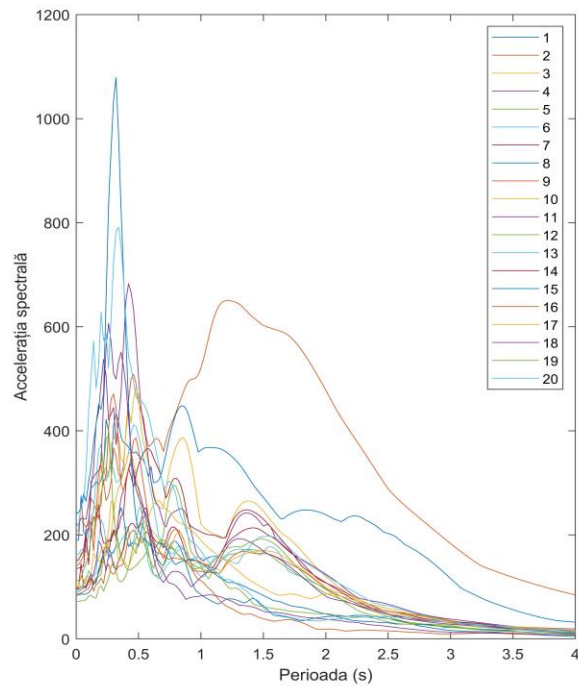
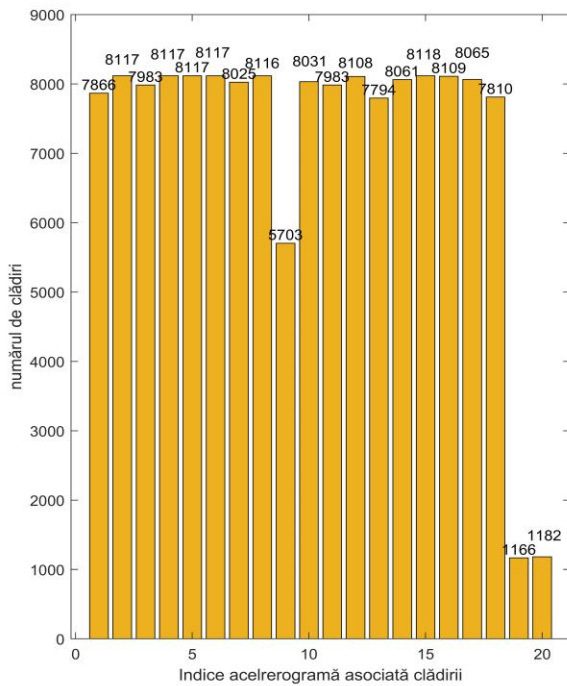


Capacitatea stâlpiilor la încovoiere pe direcția X pentru forță axială egală cu 0 (kNm)

Capacitatea stâlpiilor la încovoiere pe direcția Y pentru forță axială egală cu 0 (kNm)



Pentru realizarea simulărilor seismice, pentru fiecare model structural s-a asociat aleatoriu câte o accelerogramă care descrie mișcări ale terenului înregistrate în orașul București de-a lungul timpului. În figurile de mai jos este prezentat numărul de clădiri în funcție de mișcarea seismică atribuită. Totodată, pentru a ilustra caracteristicile mișcărilor, sunt prezentate și spectrele elastice de accelerații pentru fiecare cutremur luat în considerare.



4. Concluzii

Până în momentul de față, demersurile realizate în cadrul proiectului respectă digrama Gantt propusă de echipa de implementare, fiind realizate activitățile ce se referă la *Stabilirea unei proceduri de generare a tipurilor de clădiri în cadre* și cele referitoare la *Generarea modelelor matematice pentru fiecare clădire în parte și asocierea acelerogramelor corespunzătoare*. În acest sens, utilizând concepte din Metoda Elementului Finit și Metoda Analogiei Forței, au fost construite 144588 modele care descriu clădiri de diferite tipologii și care au fost generate aleatoriu în funcție de diferite caracteristici structurale precum: înălțimea de nivel, numărul de etaje, dimensiunile elementelor structurale, numărul de deschideri, numărul de travee, perioada fundamentală de vibrație, numărul de grade de libertate, modul de elasticitate longitudinal al materialului, fracțiunea din amortizarea critică a materialului, capacitățile la încovoiere a grinzilor și stâlpilor, numărul de articulații plastice potențiale, forțele statice aplicate asupra clădirii etc.

În perioada următoare, conform graficului de activități se are în vedere obținerea prin simulare numerică a indicelui de degradare seismică pentru clădirile generate. Totodată se vor studia care sunt principalele caracteristici ale clădirii și ale mișcării seismice cu grad ridicat de impactare a indicelui de degradare, în vedere folosirii pentru antrenarea algoritmilor de învățare.

Totodată, pe măsura realizării simulărilor și a dezvoltării algoritmilor de învățare se vor iniția demersurile pentru diseminarea rezultatele obținute conform celor asumate prin proiect.

Anexa 1 - Diagrama Gantt a proiectului DIGITERRA

Diagrama Gantt																					
An		2023										2024									
Proiect de cercetare AOSR		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Et.1	<i>Proiectarea structurii de simulare pentru generarea datelor de antrenare, validare și testare a algoritmilor de machine learning</i>																				
Act.1	Stabilirea unei proceduri de generare a tipurilor de clădiri în cadre	■	■																		
Act.2	Generarea modelelor matematice pentru fiecare clădire în parte și asocierea accelerogramelor corespunzătoare			■	■																
Et.2	<i>Obținerea prin simulare numerică a indicelui de degradare seismică pentru clădirile selectate</i>																				
Act.3	Selectarea principalelor caracteristici ale clădirii și ale seismului cu grad ridicat de impactare a indicelui de degradare					■															
Act.4	Crearea unui set de date compus din caracteristicile selectate și din indicele de degradare obținut în urma simulărilor						■	■													
Et.3	<i>Dezvoltarea unui model de machine learning pentru predicția indicelui de degradare seismică</i>																				
Act.5	Pregătirea și normalizarea datelor în vederea antrenării modelului									■											
Act.6	Alegerea și antrenarea modelului de învățare automată										■	■	■	■							
Act.7	Validarea, optimizarea și testarea modelului													■	■	■	■				
Et.4	<i>Proiectarea și implementarea unei aplicații web care să interfațeze cu utilizatorul modelul de estimare a indicelui de degradare</i>																				
Act.8	Implementarea interfeței web																	■	■		
Act.9	Crearea legăturii dintre interfața și modelul ML selectat																			■	
Act. 10	Testarea aplicației și realizarea documentației																				■
A	<i>Activități manageriale și diseminare</i>																				
1	Raport financiar				■						■										■
2	Raport științific																				■
3	Diseminarea rezultatelor cercetării în articole internaționale de jurnal și de conferință							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Anexa 2 - Bibliografie

- [1] Bogdan George Nica, Ruben Iacob Munteanu, Vasile Calofir, Mihail Iancovici; *Modelling nonlinear behavior of 3D frames using the Force Analogy Method*; Structures; Ianuarie 2022
George-Bogdan Nica, Florin Pavel, Gabriel Hojda,
- [2] A fast nonlinear dynamic analysis automated approach to produce fragility curves for 3D RC frames, *Engineering Structures*, Volume 281, 2023, 115695, ISSN 0141-0296,
- [3]G. Hart și K. Wong, *Structural dynamics for structural engineers*, John Wiley & Sons Inc., 1999
- [4]G. Li și K. Wong, *Theory of nonlinear structural analysis*, John Wiley and Sons Inc., 2014
- [5]Singiresu S. Rao. *Engineering optimization : Theory and practice*. 2010.
- [6]Przemieniecki J. S. *Theory of Matrix Structural Analysis*. 1985