

Contractor: INCD URBAN-INCERC (anexa la procesul verbal de avizare internă nr. 36/01.07.2025) **Anexa 10 la Contract nr. 41N/18.01.2023**

Cod fiscal: RO26752660

De acord,
DIRECTOR GENERAL
CS I, Conf. univ. dr. ing. habil. **Claudiu-Sorin DRAGOMIR**

Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
CS III, Dr. ing., ec. **Alexandra-Marina BARBU**



RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 41N/18.01.2023

Proiectul: *Concept integrativ de analiză digitală a datelor din monitorizarea seismică la scară largă a teritoriului național și a fondului construit, destinat identificării rapide a potențialului distructiv al evenimentelor seismice produse în România și în regiunile adiacente*

Faza 5: Cercetări privind identificarea și stabilirea algoritmilor de detecție a avarierilor, cu diferite grade de complexitate. Identificarea software-ului și echipamentelor adecvate pentru sistemul integral digitalizat de monitorizare

Termen de încheiere a fazei: 1.07.2025

1. Obiectivele specifice ale proiectului:

1. Dezvoltarea unui concept digital integrativ de înregistrare, transmisie, prelucrare și analiză a datelor rezultate din monitorizarea seismică a teritoriului și clădirilor;
2. Crearea unei baze de date cu acces liber, conținând înregistrări rezultate din monitorizarea clădirilor instrumentate seismic.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivelor:

- Îndeplinirea obiectivului specific nr. 1 al proiectului, respectiv **un concept digital integrativ**, va pune la punct un sistem integral digitalizat de monitorizare seismică a clădirilor și a teritoriului României, bazat pe utilizarea unor instrumente software și hardware ultra-moderne. Caracterul de originalitate și noutate a demersului de cercetare constă în **integrarea elementelor valoroase ale unei infrastructuri speciale, distribuite pe întreg teritoriul țării, Rețeaua seismică a RNMPSPC (URBAN-INCERC), aprobată ca I.O.S.I.N. prin HG nr. 629 din 27.07.2023** și datele și informațiile existente la nivelul acesteia. Astfel, se va realiza un ansamblu funcțional destinat prelucrării rapide și eficiente a datelor seismice, detecției precoce a potențialului de avariere al mișcărilor seismice și fundamentării strategiilor de reducere a riscului seismic.

- Prin îndeplinirea obiectivului specific nr. 2 al proiectului, se va crea, pentru prima dată în România, o **bază de date Open Access cu date înregistrate, după caz, atât în mediul construit în câmp liber cât și pe clădiri monitorizate seismic în cadrul RNMPSPC – URBAN-INCERC.**

3. Obiectivul fazei:

Faza 5/2025 a proiectului a urmărit îndeplinirea obiectivelor generale și specifice, prin efectuarea de cercetări privind identificarea și stabilirea algoritmilor de detecție a avarierilor, cu diferite grade de complexitate, asociate cu identificarea software-ului și echipamentelor adecvate pentru sistemul integral digitalizat de monitorizare

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

În lucrarea de față, aferentă fazei nr. 5 a proiectului PN 23 35 01 01 din cadrul Programului Nucleu ECODIGICONS desfășurat în INCED URBAN-INCERC, s-au efectuat următoarele activități:

- **Documentare, analiză și sinteză privind algoritmii de detecție a avarierilor utilizați în cazul structurilor monitorizate seismic și la vibrații.**
- **Selectarea software-ului și echipamentelor necesare pentru sistemul integral digitalizat de monitorizare seismică**

Rezultatele privind diseminarea se încadrează în cele propuse pe întreg anul 2025, și s-au referit la articole indexate în WOS sau participare cu comunicare la manifestări științifice internaționale indexate WOS, articole publicate în revistă BDI sau participare la conferință națională / internațională în domeniu, participări la târg de invenții și inovare, prezentări la manifestări științifice naționale și vor fi prezentate separat.

5. Rezumatul fazei:

Capitolul 1- INTRODUCERE

1.1 Obiectivul general și obiectivele specifice

Ca infrastructură de cercetare pe care se bazează acest proiect, Rețeaua Națională de Monitorizare și Protecție Seismică a Patrimoniului Construit (RNMPSPC) din cadrul INCED „URBAN-INCERC” a fost inclusă în anul 2021 în *Foaia de Parcurș Națională a Infrastructurilor de Cercetare din România* și membră a secțiunii române, EPOS-RO, a *consorțiului european EPOS¹ (ERIC)*. Începând cu anul 2022, rețeaua seismică a RNMPSPC a obținut înregistrarea în *Federația Internațională a Rețelelor de Seismografe Digitale (FDSN²)*, sub indicativul unic „RQ”.

Prin **Hotărârea nr. 629/2023 adoptată de Guvernul României la 27 iulie 2023** (publicată în Monitorul Oficial, Partea I nr. 700 din 31 iulie 2023) pentru modificarea Hotărârii Guvernului nr. 786/2014 privind aprobarea Listei instalațiilor și obiectivelor speciale de interes național, finanțate din fondurile Ministerului Educației și Cercetării, **RNMPSPC are statutul de Instalație/Obiectiv Special de Interes Național (I.O.S.I.N.)**, prevăzută la **poziția 19 în LISTA instalațiilor și obiectivelor speciale de interes național, finanțate din fondurile Ministerului Cercetării, Inovării și Digitalizării, de la bugetul de stat, "Capitolul «Cercetare fundamentală și cercetare-dezvoltare»"**, în conformitate cu **Anexa nr. 1 la această hotărâre, la nr crt 6. Rețea națională de CD și monitorizare a geohazardelor naturale.**

¹ EPOS = *European Plate ObservingSystem*, consorțiu european de 17 țări - între care și România – și care a primit în anul 2018 statutul de Infrastructură Europeană de Cercetare (ERIC), <https://www.epos-eu.org/>

² <http://www.fdsn.org/>

În contextul general al obiectivului sistemului CDI, respectiv **obținerea și transferul de cunoaștere la nivel societal, obiectivul general** al proiectului **PN 23 35 01 01** este corelat cu cele stabilite în întregul Program Nucleu derulat în INCD URBAN-INCERC, contribuind la îndeplinirea lor. În primul rând este corelat cu **obiectivul nr. 1:** „Cercetarea și dezvoltarea de sisteme, elemente, materiale și tehnologii inovatoare, menite să asigure securitatea, confortul și calitatea vieții cetățenilor, într-un ecosistem social sustenabil și rezilient la hazarduri naturale și antropice; integrarea într-un concept digital coerent a ansamblului activităților de monitorizare seismică a teritoriului și clădirilor”, precum și cu **obiectivele din Strategia Națională de Cercetare, Inovare și Specializare Inteligentă 2022-2027**, respectiv:

- **obiectivul general OG1:** Dezvoltarea sistemului de cercetare, dezvoltare și inovare, cu obiectivele specifice: OS.1.2: Asigurarea tranziției către știința deschisă și facilitarea progresului în cercetarea științifică de excelență; OS.1.4. Modernizarea și utilizarea eficientă a infrastructurii CDI prin facilitarea accesului deschis și Asigurarea sustenabilității acesteia; OS.1.5. Conectarea activităților de cercetare și inovare cu provocările societale - Agenda Strategică de Cercetare (Domeniul „Securitate civilă pentru societate”, având ca impact „Reducerea impactului seismelor puternice, prin decizii corect informate, pe baze științifice”, „Diminuarea pierderilor cauzate de calamități naturale, accidentale și de cele provocate de om” și „Creșterea rezilienței comunitare prin informare, educare și implicare”);
- **obiectivul general OG2:** Susținerea ecosistemelor de inovare asociate specializărilor inteligente, cu accent pe domeniile și subdomeniile de specializare inteligentă; „2. Economie digitală și tehnologii spațiale”, subdomeniile „2.2 Rețelele viitorului, comunicații, internetul lucrurilor” („prevenția și reacția rapidă la dezastre naturale”) și „2.3 Tehnologii pentru economia spațială” („managementul dezastrelor”).

Obiectivele specifice ale proiectului sunt:

1. **Dezvoltarea unui concept digital integrativ de înregistrare, transmisie, prelucrare și analiză a datelor rezultate din monitorizarea seismică a teritoriului și clădirilor**, bazat pe implementarea unor instrumente hardware și software de ultimă generație, în scopul identificării eficiente și operative a potențialului distructiv al cutremurelor produse în România și în regiunile adiacente.
2. **Crearea unei baze de date cu acces liber, conținând înregistrări rezultate din monitorizarea clădirilor instrumentate seismic**, constituită în acord cu principiile Open Access, Open Data și FAIR și urmând modelele de bune practici ale infrastructurilor europene similare.

Capitolul 2. DOCUMENTARE, ANALIZĂ ȘI SINTEZĂ PRIVIND ALGORITMIILE DE DETECȚIE A AVARIERILOR UTILIZAȚI ÎN CAZUL STRUCTURILOR MONITORIZATE SEISMIC ȘI LA VIBRAȚII.

2.1 Semnificația și conținutul semantic al algoritmilor, în contextul monitorizării stării / sănătății structurilor (SHM) și detecției avarierilor

În sensul științific de bază, un **algoritm** este un ansamblu de simboluri și de operatori, folosiți în matematică și în logică, permițând găsirea în mod mecanic (prin calcul) a unor rezultate. În sensul general din informatică, un **algoritm** cuprinde un ansamblu complet și finit de operații cunoscute, instrucțiuni precise, care au o succesiune bine stabilită și au scopul de a transforma un set finit de valori de intrare într-un set finit de valori de ieșire într-un timp finit și conduc la rezolvarea unei probleme (de ordin matematic / informatic sau tehnic - ingineresc). Cele mai importante **caracteristici**

ale unui algoritm, îndeplinite de diverșii algoritmi într-o măsură mai mare sau mai mică, sunt următoarele: Corectitudinea, Caracterul univoc sau determinist, Universalitatea / Generalitatea, Claritatea, Verificabilitatea, Finitudinea, Optimalitatea / Eficiența, Existența unei intrări (datele de prelucrat), Existența unei ieșiri (rezultatele) și Fezabilitatea.

În contextul monitorizării stării / sănătății structurilor (SHM) și detecției avarierilor, stadiul actual al dezvoltării științifice și informatice constă în existența unor **echipamente – hardware și software asociate "de casă" (ale unor firme recunoscute) care încorporează algoritmi dedicați de achiziție și prelucrare a datelor, pe domenii specializate.** Cunoșcând capacitățile hardware și software respective, misiunea cercetătorului utilizator este de a **identifica dezvoltările IT relevante și de a asambla aceste produse tehnice și informatice în "macro-algoritme"** care să preia succesiv rezultatele considerate semnificative ale unei etape, ca date de intrare pentru următoarea, în vederea obținerii rezultatului tehnic dorit (de cunoaștere sau validare a stării de avariere a structurii monitorizate). Dat fiind că pentru fiecare software în parte caracteristicile algoritmilor sunt verificate de autorii programelor respective, **verificarea caracteristicilor acestor "macro-algoritme" se poate rezuma la asigurarea semnificației și compatibilității generale și a datelor pe etape cu scopul științific și tehnic urmărit iar ca finalitate a celorlalte caracteristici ce țin de fezabilitate.**

2.2 Date din literatura de specialitate recentă privind SHM – Starea de Sănătate / Structurală și algoritmi de detecție a avarierilor

Din documentarea care a privit cercetări relevante din ultimii 5 ani (bibliografia consultată este redată la finalul documentului) se constată că există dezvoltări teoretice consolidate, relativ unitare, inclusiv software avansat și abordări bazate pe Inteligență Artificială, cu grade diferite de complexitate. Există însă limitări și constrângeri iar aplicațiile concrete privesc, deocamdată structuri de importanță strategică (de ex. poduri sau clădiri unicate înalte) și mai puțin clădiri din fondul construit existent, domeniu în care nu s-a atins încă un caracter de masă.

Ca urmare a analizei, s-au identificat următoarele situații și tendințe în dezvoltarea și utilizarea algoritmilor de detecție a avarierilor necesari în monitorizarea stării / sănătății structurilor (SHM):

Un cercetător de referință din Turcia (Şafak, 2021) a sintetizat conceptul SHM consolidat în ultimul deceniu, care urmărește obiective multiple, cum ar fi:

- Determinarea caracteristicilor dinamice in situ ale structurilor pentru verificarea metodelor de proiectare și analiză și îmbunătățirea codurilor de proiectare structurală.
- Prezicerea comportării la încărcări extreme viitoare, inclusiv detectarea și localizarea avariilor după un eveniment extrem și dezvoltarea de hărți instantanee de distribuție a avariilor și pierderi, cu dezvoltarea de noi tehnici de modernizare și consolidare a structurilor.

Numărul și complexitatea datelor impun tehnici de prelucrare stochastice, ceea ce conduce la anumite limitări în aplicații. Cu toate acestea, multe țări din lume au început să includă cerințe de monitorizare în codurile lor seismice. Este de mare interes că în Turcia, AFAD a emis în 2020 o directivă care impune cerințe de monitorizare pentru clădirile înalte cu înălțimea de 100 m și peste.

Cercetătorii din Mexic (Allegría et alii, 2024) au remarcat că eficacitatea metodelor din SHM este adesea limitată de mai multe constrângeri practice, cum ar fi costurile ridicate asociate cu instrumentarea, rezultate din cerința unor date de intrare substanțiale, cum ar fi istoricul vibrațiilor din diverse puncte de măsurare și un număr mare de forme modale. O provocare critică pentru metodele

existente de detectare a avariilor constă în discrepanțele dintre modelele experimentale și cele numerice. Algoritmii genetici (GA), joacă un rol semnificativ în metodologiile de identificare a avariilor dar calibrarea lor necesită și experimente la scară mare pe structuri specifice.

Cercetătorii din India (Malche et alii, 2023) au testat detectarea automată a avariilor la structurile de beton folosind viziunea computerizată și imaginile obținute cu drona, cu dezvoltarea unei arhitecturi de sistem bazată pe IoT – Internetul lucrurilor care permite captarea automată a datelor și efectuarea de analize și raportări, ca și a unei arhitecturi de rețea neuronală convoluțională (CNN).

Un studiu din Eleveția (Reuland et alii, 2023) evaluează caracteristicile sensibile la avarii (DSF) bazate pe date în ceea ce privește potențialul lor de a identifica avariile induse de cutremure și neliniaritatea manifestată în răspunsul clădirilor rezidențiale de înălțime mică sau medie. Pe baza unei analize simulate amănunțite pe un sistem histerezic neliniar arc-masă exemplar și o mostră de clădire la jumătate de scară testat experimental pe o masă vibrantă, se trag următoarele concluzii:

- Caracteristicile sensibile la deteriorare derivate în domeniul frecvenței, utilizând fie transmisibilitatea, fie descompunerea wavelet, sunt promițătoare pentru detectarea neliniarității bazată pe date. Cu toate acestea, sunt necesare date liniare de referință pentru a detecta debutul neliniarității.
- Caracteristicile sensibile la deteriorare nu indică doar prezența deteriorării și evoluția neliniarității, ci au și potențialul de a localiza deteriorarea și de a cuantifica amploarea acesteia.
- Caracteristicile sensibile la avarii permit identificarea evoluției stării structurale și acumularea avariilor pe parcursul mai multor incidente de cutremur, pe lângă identificarea severității avariilor introduse incremental de un cutremur specific într-o secvență.
- Funcțiile de factorizare a avariilor (DSF) calculate pentru ferestre scurte de timp sunt necesare pentru a urmări neliniaritatea în timp, ceea ce permite diferențierea între scăderile de rigiditate reversibile și ireversibile.

Cercetătorii din Norvegia (Svendsen et alii, 2022) au prezentat o abordare SHM bazată pe date din detectarea avariilor la podurile de oțel, cu un studiu experimental extins pe un pod real folosit în laborator ca model experimental în diferite condiții structurale, unde avariile sunt introduse pe baza unei investigații cuprinzătoare a tipurilor comune de avarii la poduri. Acestor date li se aplică un algoritm de învățare automată nesupervizată și se compară cu patru algoritmi de învățare automată supervizată. Autorii susțin că pot fi găsite avarii structurale relevante la podurile de oțel și că învățarea automată nesupervizată poate funcționa aproape la fel de bine ca învățarea automată supervizată.

Un grup de autori din Columbia și Spania (Tibaduiza et alii, 2020) au analizat procesul de identificare a avariilor și dezvoltările SHM care pot fi abordate din două puncte de vedere diferite. Abordările bazate pe modele utilizează frecvent analiza cu elemente finite (FEA) iar a doua abordare pentru identificarea avariilor se bazează pe analiza datelor dobândite direct de la structură. Algoritmii bazați pe date sunt preferați în majoritatea cazurilor, dar aceste abordări implică procesoare de înaltă performanță și cost ridicat.

În etapa de reducerea datelor și extragerea caracteristicilor, unele dintre tehnicile utilizate permit transformarea datelor prin tehnici relativ sofisticate, cum sunt: Analiza componentelor principale (PCA); Analiza componentelor independente (ICA); Transferul de domenii rare latente (LSDT); Analiza

discriminantă liniară (LDA); Proiecția locală de conservare a discriminanțelor (LDPP) dar și tehnici mai cunoscute cum sunt Transformata Fourier rapidă (FFT) și Transformata wavelet discretă (DWT).

Un studiu din Arabia Saudită (Sonbul & Rashid, 2023) are în vedere că tehnicile de procesare a semnalelor în etapa de extragere a caracteristicilor și algoritmi de învățare automată în etapa de recunoaștere a modelelor joacă un rol eficient în analiza stării de sănătate a podurilor. Autorii afirmă că metoda ANN (Rețele Neuronale Artificiale) și CNN (Rețele Convoluționale Neuronale) sunt cele mai utilizate tehnici și algoritmi în modelele pentru SHM la poduri. Cele mai utilizate tehnici de procesare a semnalelor în procesul de extragere a caracteristicilor pentru SHM sunt metodele FRF (Funcția de Răspuns în Frecvență), PCA și FFT. În plus, tehnicile de diagnosticare și abordarea bazată pe date sunt cele mai utilizate funcționalități operaționale și tehnici de implementare. Algoritmi de învățare și tehnici de procesare a semnalelor prezintă limitări, inclusiv complexitatea computațională, necesarul de memorie și consumul de timp în procesele de recunoaștere a modelelor și, respectiv, de extragere a caracteristicilor.

O analiză din Australia (Liu et alii, 2024) introduce un cadru de învățare automată nesupervizată pentru detectarea și localizarea avariilor în SHM, utilizând rețele neuronale convoluționale grafice dinamice și rețele Transformer. Abordarea propusă de autori permite analize precise și sinteza caracteristicilor din datele derivate din senzori pentru identificarea precisă a avariilor. Autorii au redat validări extinse pe diverse structuri, inclusiv o structură metalică de referință și un pod hobanat din lumea reală, pentru a sublinia eficacitatea cadrului în detectarea anomaliilor și localizarea avariilor. Propunerea unui nou „scor de localizare” sporește precizia cadrului în identificarea avariilor structurale prin integrarea informațiilor bazate pe date cu o înțelegere bazată pe fizică a dinamicii structurale.

Un grup de autori din Marea Britanie și Italia (Morse et alii, 2024) propun o metodologie nouă pentru optimizarea automată multi-obiectiv a traseelor senzorilor în rețelele de senzori de monitorizare a stării / sănătății structurale (SHM). Procedura a fost testată pe un panou compozit rigidizat de dimensiuni mari, cu multe caracteristici geometrice sub formă de cadre și rigidizări. Comparativ cu utilizarea tuturor perechilor de senzori disponibili, rețeaua optimizată prezintă performanțe superioare în ceea ce privește precizia de detectare și zgomotul general.

Un studiu comprehensiv din India (Harle et alii, 2024) privește evoluțiile recente în Inteligența Artificială (IA) și analiza datelor pentru monitorizarea sănătății structurale. Se subliniază că monitorizarea stării structurale (SHM) a cunoscut o evoluție transformatoare odată cu integrarea Inteligenței Artificiale și a analizei datelor. În ultimii ani s-a înregistrat o creștere a popularității învățării profunde / Deep Learning datorită capacității sale de a modela relații complexe în date. și a extrage automat caracteristici ierarhice din date. Rețelele neuronale convoluționale (CNN) sunt utile în aplicațiile SHM bazate pe imagini. Integrarea algoritmilor de învățare automată a arătat rezultate promițătoare în identificarea modelelor subtile care indică deteriorarea structurală, contribuind la o abordare mai proactivă și predictivă a mentenanței.

Un studiu din SUA (Salles et alii, 2024) este de interes deoarece prezintă aplicații din Rețeaua Seismologică din Texas (TexNet), cu peste 200 de stații, cu implementarea unei rutine de detectare a cutremurelor bazată pe EQCCT - Earthquake Compact Convolutional Transformer - Transformator Convoluțional Compact pentru Cutremure, care se remarcă prin eficiența și fiabilitatea sa în rețele

seismografice mari. O provocare cheie în toate abordările de învățare automată este permiterea utilizării lor în timp real, mai degrabă decât să se bazeze exclusiv pe analiza post-eveniment. Pentru a încorpora abordarea deep-learning pentru detectarea sosirii undelor cu celelalte procese efectuate de SeisComP, s-a dezvoltat un modul care permite utilizarea algoritmului EQCCT în timp real. Algoritmul a fost optimizat pentru eficiență computațională și integrat cu întregul flux de lucru SeisComP – software utilizat și de Rețeaua Națională de Monitorizare și Protecție Seismică a Patrimoniului Construit (RNMPSPC/ IOSIN) a INCD URBAN-INCERC.

Cercetările din Italia (Faraco et alii, 2024) privesc monitorizarea stării structurale prin date accelerometrice ale unei structuri monitorizate continuu cu avarii induse. Autorii consideră că Analiza Modală Operațională (OMA) abordează provocarea identificării parametrilor modali ai structurilor; o sarcină care poate fi dificilă, costisitoare sau restricționată în cazul Analizei Modale Experimentale tradiționale (EMA), în special pentru structuri mari. În consecință, analiza modală, în special OMA, a fost utilizată pe scară largă în evaluarea integrității structurale prin urmărirea modificărilor parametrilor modali în timp pentru detectarea avariilor turbinelor eoliene sau ale podurilor. Principalul avantaj al OMA pentru SHM constă în capacitatea sa de a detecta integritatea structurii în condiții operative in situ și în moduri nedistructive. Parametrii modali pot fi determinați folosind diverși algoritmi; cu toate acestea, amploarea modificărilor acestora variază în funcție de factori precum locația, severitatea și natura avariilor, precum și de sensibilitatea instrumentației utilizate pentru colectarea datelor.

În abordarea OMA, autorii articolului analizat se referă la un software comercial de la ARTEMIS / ARTEMIS Modal, care a fost dezvoltat pentru a aborda primul nivel de identificare - existența avariilor. Din punct de vedere teoretic, instrumentul SHM din software-ul ARTEMIS utilizează Identificarea Subspațială Stochastică (SSI) pentru a construi un model de stare de referință, servind drept bază pentru evaluarea dinamicii și a stării structurii.

Software-ul modal ARTEMIS utilizat și de Rețeaua Națională de Monitorizare și Protecție Seismică a Patrimoniului Construit (RNMPSPC/ IOSIN) a INCD URBAN-INCERC a fost deja pe scară largă recomandat pentru utilizarea în identificarea parametrilor modali ai sistemului specific examinat dar poate asigura și identificarea situațiilor potențial periculoase pe structura monitorizată, pornind doar de la înregistrările accelerometrelor, fără a fi necesară evaluarea parametrilor modali, și într-un mod neinvaziv. Autorii prezintă rezultatele obținute din prelucrarea datelor experimentale ale unei structuri reale, o structură reticulară cu o înălțime de aproximativ 9 m, monitorizată cu 18 accelerometre.

2.3. Scurtă clasificare a algoritmilor de detecție a avarierilor structurale

Monitorizarea sănătății (stării) structurale (*Structural Health Monitoring*, SHM), inclusiv detecția avarierilor produse de seisme, se realizează prin instalarea de senzori (de regulă senzori de vibrații) în diferite puncte ale clădirii. În privința clasificării algoritmilor de detecție a avarierilor structurale, au fost identificați:

- Algoritmi / metode cu grad redus de complexitate, respectiv cu grad intermediar de complexitate, care includ algoritmi bazați pe analiza frecvențelor proprii, algoritmi bazați pe transformate wavelet și algoritmi bazați pe tehnici de Machine Learning (învățare automată) ;
- Algoritmi cu nivel ridicat de complexitate

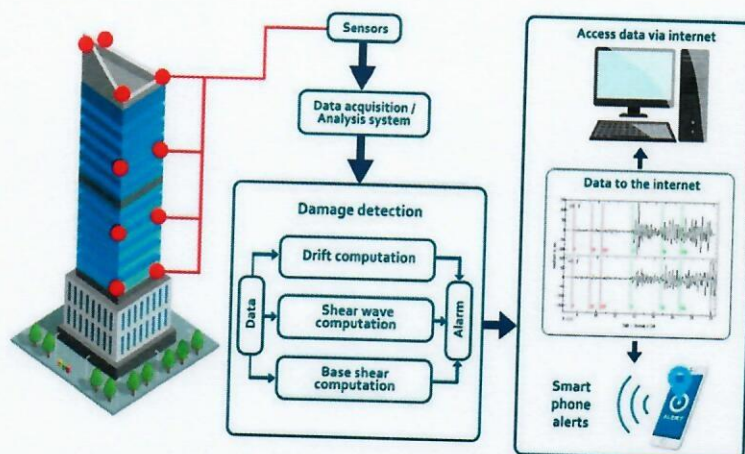


Fig. 2.3.1 Principiul de bază al unui sistem de monitorizare a sănătății structurale pentru o clădire multietaajată (Sivasuriyan ș.a., 2021)

2.4. Programul ARTeMIS

Una dintre cele mai complexe platforme pentru analiza modală bazată pe vibrațiile măsurate experimental este ARTeMIS Modal (Structural Vibration Solutions, Danemarca), utilizat, la ora actuală în peste 50 de țări în aplicații destinate analizei modale a vibrațiilor mașinilor și componentelor acestora, precum și în ingineria civilă, pentru analiza vibrațiilor construcțiilor mari, precum clădiri și poduri. ARTeMIS posedă capabilități de analiză modală operațională (OMA), de analiză modală experimentală (EMA), analiză a formelor deformate în regim de exploatare (Operating Deflection Shapes, ODS) și monitorizare a sănătății structurale (SHM). Programul include metode și instrumente avansate destinate detecției avarierilor structurale.

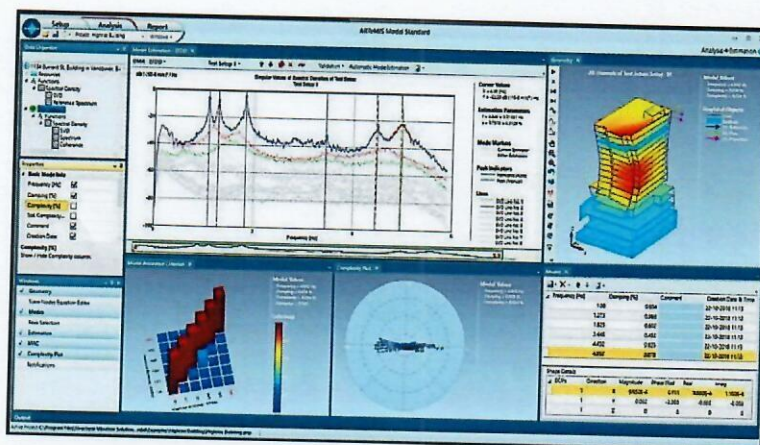


Fig. 2.4.1 Programul ARTeMIS Modal: interfața-utilizator

Programul ARTeMIS Modal este distribuit în trei versiuni principale: Basic, Standard și Pro. INCD URBAN-INCERC posedă o licență ARTeMIS Pro, actualizată anual. ARTeMIS Modal implementează metode complexe de analiză a vibrațiilor, unele dintre acestea patentate, precum descompunerea în domeniul frecvență (*Frequency Domain Decomposition*, FDD) și descompunerea îmbunătățită în domeniul frecvență (*Enhanced Frequency Domain Decomposition*, EFDD). Versiunea ARTeMIS Modal

Pro poate utiliza 8 metode diferite de analiză modală operațională (OMA) în domeniul timp. Metodele sunt bazate pe identificarea în subspațiul stohastic (*Crystal Clear Stochastic Subspace Identification*), asigurând o precizie superioară, ca și posibilități de evaluare a incertitudinilor. Capacitățile menționate vor fi descrise sintetic în cele ce urmează, evidențiind elementele cu aplicabilitate practică în identificarea avarierilor structurale.

Software-ul ARTeMIS este utilizat și de Rețeaua Națională de Monitorizare și Protecție Seismică a Patrimoniului Construit (RNMPSPC/ IOSIN) a INCĐ URBAN-INCERC. Ca facilități specifice pentru monitorizarea sănătății structurale în programul ARTeMIS sunt identificate:

- Modulul de monitorizare în timp a parametrilor modali (MPH)
- Modulul de detecție a avarierilor (DDM)
- Modulul de analiză a deplasărilor relative de nivel (IDAM)

În programul ARTeMIS există algoritmi avansați de identificare a caracteristicilor dinamice. În cazul mișcărilor seismice puternice, principala metodă de detecție a avarierilor este analiza deplasărilor relative de nivel (*interstory drift*). Suplimentar, pe baza măsurătorilor de vibrații se calculează o serie de valori caracteristice, precum: accelerațiile, vitezele și deplasările maxime ale mișcării terenului (PGA, PGV, respectiv PGD); spectrele de răspuns ale accelerațiilor, vitezelor și deplasărilor (SA, SV, SD); intensitatea Mercalli; intensitatea Arias; intensitatea Arias normalizată; durata semnificativă a mișcării seismice; perioada medie. Este important de menționat că Analiza Modală Operațională nu se realizează pentru mișcări seismice puternice, atât din cauza duratei reduse a acestora, cât și a comportării histeretice, neliniare, a elementelor structurale supuse la solicitări mari în cursul acestor mișcări. În mod esențial, OMA presupune comportarea liniară a structurii. Din aceste motive, OMA se realizează înainte și după mișcarea Având în vedere importanța caracteristicilor modale pentru identificarea evoluției în timp a stării structurii monitorizate, programul ARTeMIS include un modul specializat pe urmărirea modificării parametrilor modali (*Modal Parameter History Module*, MPH). Acesta oferă de asemenea posibilitatea configurării urmăririi modurilor pe care diferite sesiuni de lucru le au în comun, pentru un anumit estimator modal.

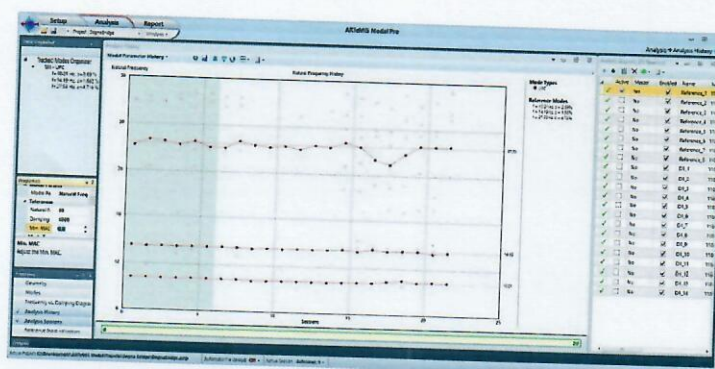


Fig. 2.4.4 Monitorizarea frecvențelor proprii de vibrație pentru diverse moduri, în programul ARTeMIS, utilizând modulul MPH

Pentru structurile clădirilor multietajate, un parametru deosebit de important pentru estimarea avarierii este deplasarea relativă de nivel, numită și *drift* (*Interstorey Drift Ratio*). Spre deosebire de indicatorii calculați cu modulul DDM, driftul poate oferi indicații privind avarierile locale la seism sau alte acțiuni puternice, de exemplu la nivelul stâlpilor unei structuri.



Fig. 2.4.6 Modulul de analiză a deplasării relative de nivel, IDAM, din programul ARTEMIS

2.5 Programul SHARD

PROGRAMUL SHARD reprezintă o altă soluție informatică de nivel internațional, destinată monitorizării stării (sănătății) structurilor de construcții pe baza înregistrării vibrațiilor acestora, produs de gempa GmbH (Germania)³. SHARD este conceput ca o suită de aplicații web și funcționează sub sistemul SeisComp⁴, produs de același dezvoltator de soluții informatice pentru seismologie. La baza principiului său de funcționare stă calculul în timp real al pseudospectrelor accelerațiilor (PSA) și compararea lor cu spectrele de proiectare din codurile seismice (Eurocode 8, NEHRP/ IBC2000 (SUA) sau DIN (Germania)). Dacă valorile acestora din urmă sunt depășite, SHARD emite o avertizare.

Suplimentar, pentru o fiabilitate sporită, este investigată, tot în timp real, calitatea datelor seismice recepționate, în termeni de întârziere (*delay*) și varianță (*variance*) fiind emise avertizări dacă parametrii respectivi nu sunt corespunzători. Incidentele de calitate, ca și evenimentele seismice, sunt memorate, fiind disponibile utilizatorului.

SeisComPro include, de asemenea, module pentru vizualizarea formelor de undă înregistrate, inclusiv în timp real, aplicarea de corecții de linie de zero, filtrare, cartografierea pe hărți de înaltă rezoluție a parametrilor evenimentelor seismice, calculul unui număr mare de parametri semnificativi ai mișcărilor seismice, calculul și reprezentarea grafică a spectrelor de răspuns, a valorilor STA/LTA, a intensităților Arias (cu identificarea duratei semnificative a mișcării), a spectrelor Fourier etc. SeisComPro posedă și capacități de analiză și reprezentare în timp real a calității furnizării datelor de către stațiile seismice conectate online la sistem, permițând astfel identificarea rapidă a problemelor de transmisie.

³ <https://www.gempa.de/products/shard/>

⁴ <https://www.gempa.de/products/seiscomp/>

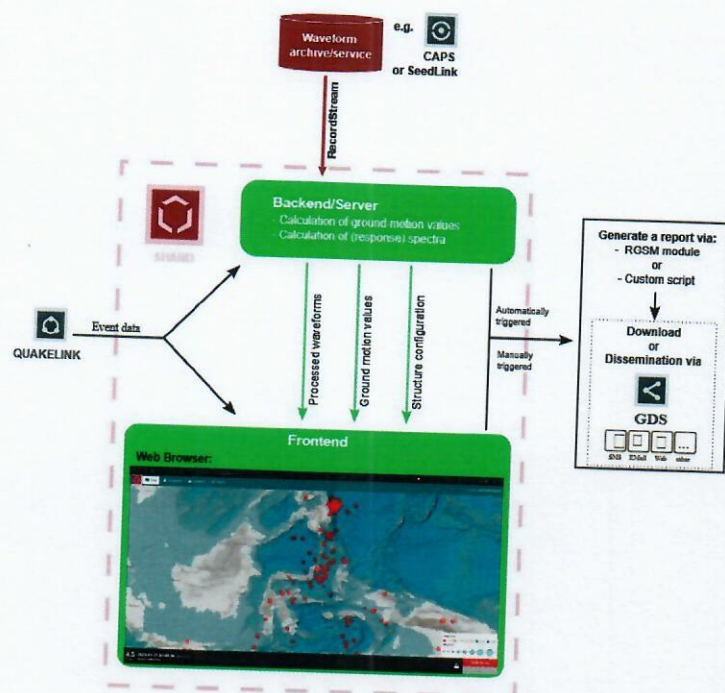


Fig. 2.5.1 Arhitectura sistemului SHARD și integrarea acestuia în sistemul SeisComPro

În România, sistemul SeisComPro este implementat la INCĐ URBAN-INCERC, în cadrul Rețelei Naționale pentru Monitorizarea și Protecția Seismică a Patrimoniului Construit (Instalație / Obiectiv Special de Interes Național, R.N.M.P.S.P.C. I.O.S.I.N.) și la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului. Prin implementarea sa la INCĐ URBAN-INCERC s-a realizat compatibilizarea formatului de date între rețelele seismice ale celor două institute, asigurând astfel baza materială pentru conectarea RNMPSPC la infrastructura europeană EPOS-ERIC, prin nodul EIDA al INCDFP, cu o calitate superioară a datelor seismice furnizate de RNMPSPC, într-un format unic, standardizat, de largă utilizare pe plan internațional.

2.6. Evaluarea performanței seismice a clădirilor instrumentate sau monitorizate în perioada 2016-2025 în INCĐ URBAN-INCERC

S-a pornit de la premise că o măsură a deformării laterale a unei structuri este raportul de drift (inter-etaje, unghiular). Un raport de drift mai mare indică o deformare mai mare, care poate duce la diverse niveluri de avariere, de la fisuri minore la avarieri structurale, inclusiv cedarea elementelor structurale, fisurarea pereților etc. S-au redat prevederi normative și criterii comparative pentru drift la nivel EU, SUA și în România.

Relația Identificare avarii - monitorizare sănătate structurală (SHM), așa cum este definită în literatura de specialitate (Kong et al., 2017; Lydakis, 2024), dar și în softurile dedicate SHM, identificarea avariilor poate fi clasificată astfel:

- indicarea calitativă a apariției avariilor (în domeniul timp și frecvență, prin metode output-only/bazate pe răspuns)
- identificarea locației avariilor
- cuantificarea severității avariilor

- prezicerea duratei de viață rămasă a structurii

În general, metodele de detectare a avariilor bazate pe vibrații evaluează modificările caracteristicilor dinamice ale structurilor, de ex. modificările frecvențelor proprii, pe lângă estimarea coeficienților de amortizare și a formelor proprii. S-au analizat relația rețelelor neuronale artificiale (ANN), sau convoluționale (CNN) – monitorizarea sănătății structurale (SHM) și aplicarea unei rețele neuronale artificiale și a unui model de regresie multivariabilă în predicția gradului de avariere (Pritam et al., 2021) și evaluarea rigidității structurale post-seism prin intermediul unui indice de avariere.

Ca studiu de caz s-a prezentat o clădire instrumentată seismic / vibrații ambientale pentru care s-a estimat gradul de avariere.

Tipologie / Vulnerabilitate seismică - sistem structural din cadre din beton armat, S + P + 6E, an de construcție 1972-1973, H=34.4 m, suprafață construită la sol: 479 m², număr de angajați: aprox. 200

- versiunea normativului (codului) folosit pentru proiectare- Cod de nivel inferior (1963-1977); expertiza din 1998, $T_1 = 1.04-1.14$ s, Proiect consolidare, 2023; Studiu modelare spațială, $T_1=1.503$ s, Clasa de risc Rsl (avarii existente de la cutremurele din 1977, 1986 și 1990)
- zonare seismică P100-1/2013: $a_g=0.30g$ m/s²; $T_c=1.6$ s
- zonare seismică P100-1/2025: $S_{ap,h,SLS}=3.7$ m/s², $S_{ap,h,SLU}=9.09$ m/s², $T_{c,SLS}=1.3$ s, $T_{c,SLU}=1.8$ s

Evaluare suport pentru evaluarea de nivel 2/evaluare vizuală rapidă: instrumentare seismică în 2023

- amplificările spectrale în domeniile $f_x= 1.04...1.07$ Hz, $f_y= 1.22...1.77$ Hz
- accelerația maximă < 85 mm/s², viteza maximă < 0.35 mm/s

S-au prezentat o serie de estimări, prin aplicarea unor metode echivalente, și/sau empirice (pentru clădire modelată cu un model dinamic simplificat), estimări care se referă la perioada proprie de vibrație, fracțiunea din amortizarea critica, factorul de amplificare dinamică maximă a accelerației orizontale, accelerația spectrală (accelerația maximă a structurii în timpul unui cutremur), deplasare maximă etc., răspuns seismic spectral linear și bi-liniar (cu o reducere a rigidității), Tabelul 2 ... 6 și figurile 2.6. 6...10.

Tabelul 2. Estimări în domeniul liniar de comportare structurală

Clădire	T_1 (s) din măsurători vibrații ambient.	T_{1-} (s) cf. P100- 1/2013	ξ_1 (%)	$\beta(T_1)$	Răspuns seismic spectral			Deplasare la ultimul nivel cf. P100-1/2013 (cm)
					$S_a(T_1)$ (m/s ²)	$S_v(T_1)$ (m/s)	$S_d(T_1)$ (cm)	
INCD	0.96	1.07	3.17-	2.5	7.36	1.12	17	23
			3.99			1.25	21	29

Tabelul 3. Răspuns seismic spectral linear și bi-liniar, analiză time-history (sistem structural echivalat cu un sistem cu un grad de libertate dinamică)

Caracteristică dinamică	La nivel teren (accelerograma Vn77 și scalată cu 1.5, 2 și 2.5)		Răspuns seismic spectral liniar		Răspuns seismic spectral bi-liniar	
	PGA (m/s ²)	PGD (cm)	Sa (m/s ²)	Sd (cm)	Sa (m/s ²)	Sd (cm)
T1=0.96s	1.92	10.16	3.84	8.75	2.18	6.80
T1=1.07s			3.75	10.61	2.22	8.20
T1=0.96s	2.88	15.24	5.76	13.18	2.28	12.58
T1=1.07s			5.62	15.97	2.29	14.87
T1=0.96s	3.84	20.32	7.68	17.49	2.45	21.14
T1=1.07s			7.50	21.21	2.44	24.57
T1=0.96s	4.80	25.4	9.60	21.86	2.64	31.68
T1=1.07s			9.37	26.51	2.61	36.05

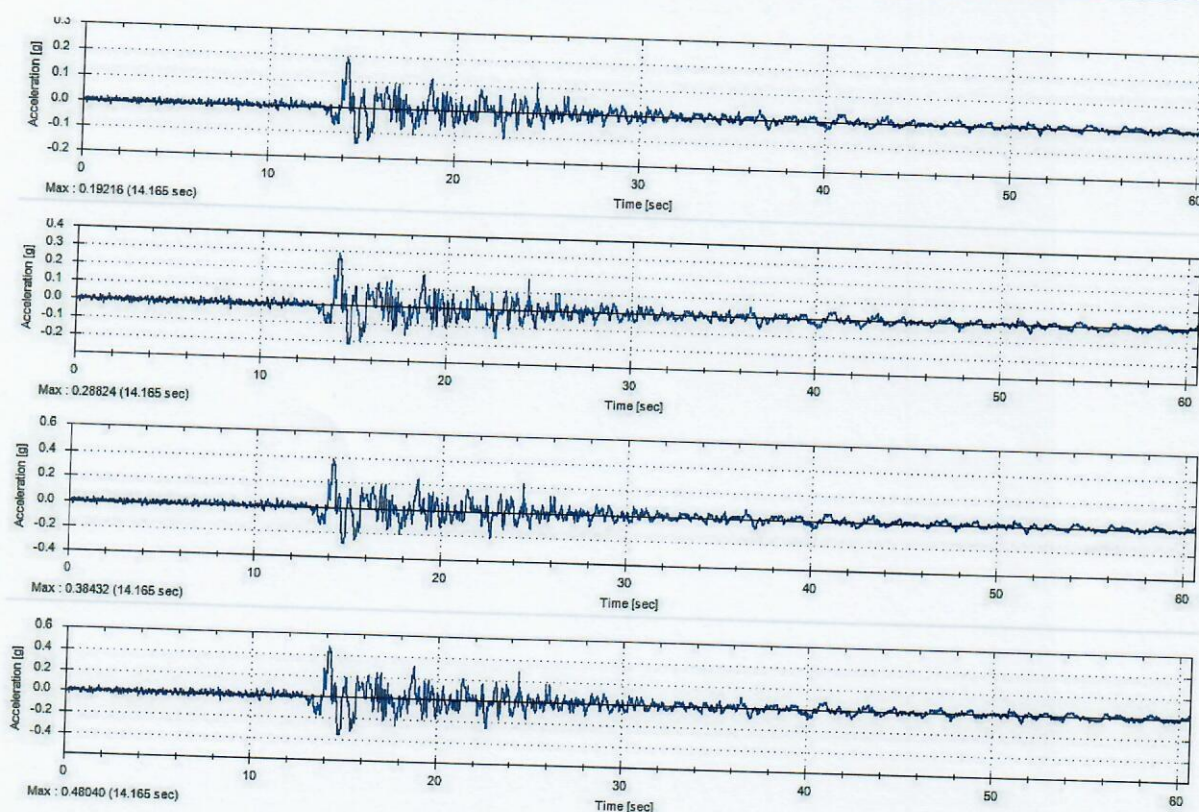


Fig. 2.6. 6. Accelerograme pentru analiza time-history

Tabelul 4a. Deplasări relative în SLS și SLU, pentru $T_1=1.07s$, $PGA=1.92 \text{ m/s}^2$, factor de comportare $q=4$

Nivel	Deplasări absolute de nivel (cm)	d_{re} (cm)	$d_{r,SLS}$ (cm)	$d_{re,a,SLS}$ (cm)	$d_{r,SLU}$ (cm)	$d_{re,a,SLU}$ (cm)	Verificare
Etaj 6	10.61	1.684	3.368	2.1	13.003	10.5	nu
Etaj 5	8.925	1.966	3.933		15.183		nu
Etaj 4	6.958	2.027	4.054		15.648		nu
Etaj 3	4.931	1.874	3.749		14.473		nu
Etaj 2	3.056	1.535	3.070		11.851		nu
Etaj 1	1.521	1.046	2.093		8.080		da
Etaj 0	0.475	0.475	0.96		3.705		da

Relația răspuns structural - tip/nivel de avariere structurală poate fi modelată cu unul dintre indicatorii de avariere cunoscuți, printre care și indice de avariere global, SDF, care depinde de drifturile inter-etaje, calculate pentru diferite PGA. Potențialul de avariere este identificat conform Tabelul 4b, 5b și Tabelul 6.

Tabelul 4b. Identificare potențial de avariere

Drift inter-etaje, (ISD) (cm)	Indice de avariere, SDF	Potențial avariere
0.401	0.15	avariere ușoară ...moderată
0.468		
0.482		
0.446		
0.365		
0.249		
0.114		

Studiul de caz evidențiază o cale de a estima comportarea structurală în cazul clădirilor instrumentate seismic, care nu pot fi modelate cu metoda elementelor finite din lipsa de date și nici utilizând aplicațiile software utilizate pentru cazul clădirilor monitorizate din cauza incompatibilității formatelor fișierelor cu înregistrări. Calculul estimativ urmărește prevederile normativului de proiectare seismic și ia în considerare rezultatele obținute în unele studii de referință în domeniu. În funcție de drifturile inter-etaje (unghiulare) s-a asociat un grad de avariere care variază în funcție de PGA.

Capitolul 3. SELECTAREA SOFTWARE-ULUI ȘI ECHIPAMENTELOR NECESARE PENTRU SISTEMUL INTEGRAL DIGITALIZAT DE MONITORIZARE SEISMICĂ

În urma analizei și comparației, s-a relevat că versiunea recentă a programului ARTeMIS, aflată în dotarea RNMPSPC și actualizabilă anual, oferă capacități superioare de identificare a parametrilor dinamici structurali, cu aplicație directă în analiza modală operațională și în detecția avarierilor survenite în urma seismelor. Punerea la punct a unui sistem de monitorizare seismică bazat pe acest program necesită un efort ridicat de modelare, conectare și analiză și îl desemnează ca adecvat unor proiecte majore de cercetare experimentală, desfășurate pe termen lung și urmărind caracterizarea dinamică multiparametrică a structurii/structurilor monitorizate și evoluția în timp a stării acestora.

O soluție alternativă, de mai mici dimensiuni, cu bune performanțe și implementare relativ mai facilă s-a profilat a fi SHARD, o aplicație web specializată pe monitorizarea structurilor, cu capacități de avertizare și raportare, bazate pe compararea directă a parametrilor mișcării seismice și a spectrelor de răspuns aferente cu praguri și spectre de referință. SHARD lucrează integrat cu sistemul de achiziție, prelucrare și analiză seismică SeisComPro (gempa GmbH, Germania), implementat la INCĐ URBAN-INCERC, ceea ce îi conferă avantajele compatibilității și instalării rapide, ca și al unei investiții de timp și financiare de nivel relativ scăzut.

SHARD poate reprezenta o soluție flexibilă pentru monitorizări temporare sau permanente, fiind astfel adecvat unor campanii de instrumentare mai extinse, în care primează aplicarea unor criterii simple și directe de evaluare. Aceste caracteristici îl recomandă pentru o achiziție în etapa următoare a proiectului.

Având în vedere, în același timp, necesitatea unui sistem de achiziție a datelor performant, cu senzori compatibili cu nivelul tehnologic al aplicațiilor software analizate mai sus, etapa următoare a proiectului va prevedea și achiziția unor accelerometre performante, cu capacități de transmisie la distanță, integrabile în rețeaua seismică actuală a RNMPSPC.

Capitolul 4. CONCLUZII GENERALE PRIVIND ASPECTELE ȘI DOMENIILE ANALIZATE ȘI ELEMENTE DE FUNDAMENTARE A FAZEI URMĂTOARE A PROIECTULUI

Cu privire la *algoritmii de detecție a avarierilor utilizați în cazul structurilor monitorizate seismic și la vibrații.*

Din documentarea care a privit cercetări relevante recente se constată că:

- există dezvoltări teoretice consolidate, relativ unitare, inclusiv software avansat și abordări bazate pe Inteligență Artificială, cu grade diferite de complexitate;
- conceptul SHM consolidat în ultimul deceniu urmărește obiective multiple, cum ar fi determinarea caracteristicilor dinamice in situ ale structurilor pentru verificarea metodelor de proiectare și analiză și îmbunătățirea codurilor de proiectare structurală, ca și prezicerea comportării la încărcări extreme viitoare, inclusiv detectarea și localizarea avariilor după un eveniment extrem, cu dezvoltarea de noi tehnici de modernizare și consolidare a structurilor;

- există însă limitări și constrângeri iar aplicațiile concrete privesc, deocamdată structuri de importanță strategică (de ex. poduri sau clădiri unicat înalte) și mai puțin clădiri din fondul construit existent, domeniu în care nu s-a atins încă un caracter de masă.
- multe țări din lume au început să includă cerințe de monitorizare în codurile lor seismice. Este de mare interes că în Turcia, AFAD a emis în 2020 o directivă care impune cerințe de monitorizare pentru clădirile înalte cu înălțimea de 100 m și peste.
- o provocare critică pentru metodele existente de detectare a avariilor constă în discrepanțele dintre modelele experimentale și cele numerice.
- algoritmi genetici (GA), joacă un rol semnificativ în metodologiile de identificare a avariilor dar calibrarea lor necesită și experimente la scară mare pe structuri specifice.
- dezvoltarea unei arhitecturi de sistem bazată pe IoT – Internetul lucrurilor, ca și a unei arhitecturi de rețea neuronală convoluțională (CNN) ar permite captarea automată a datelor și efectuarea de analize și raportări;
- monitorizarea stării structurale (SHM) a cunoscut o evoluție transformatoare odată cu integrarea Inteligenței Artificiale și a analizei datelor. În ultimii ani s-a înregistrat o creștere a popularității învățării profunde / Deep Learning datorită capacității sale de a modela relații complexe în date, și a extrage automat caracteristici ierarhice din date. Rețelele neuronale convoluționale (CNN) sunt utile în aplicațiile SHM bazate pe imagini. Integrarea algoritmilor de învățare automată a arătat rezultate promițătoare
- s-au dezvoltat abordări de învățare automată nesupervizată pentru detectarea și localizarea avariilor în SHM, utilizând rețele neuronale, care poate funcționa aproape la fel de bine ca învățarea automată supervizată;
- algoritmi bazați pe date sunt preferați în majoritatea cazurilor, dar aceste abordări implică procesoare de înaltă performanță și cost ridicat, tehnicile utilizate permit transformarea datelor prin tehnici relativ sofisticate;
- caracteristicile sensibile la deteriorare derivate în domeniul frecvenței, utilizând fie transmisibilitatea, fie descompunerea wavelet, sunt promițătoare pentru detectarea neliniarității bazată pe date, și au potențialul de a localiza deteriorarea și de a-i cuantifica amploarea dar sunt necesare date liniare de referință pentru a detecta debutul neliniarității.
- funcțiile de factorizare a avariilor (DSF) calculate pentru ferestre scurte de timp sunt necesare pentru a urmări neliniaritatea în timp, ceea ce permite diferențierea între scăderile de rigiditate reversibile și ireversibile.
- algoritmi de învățare și tehnicile de procesare a semnalelor prezintă limitări, inclusiv complexitatea computațională, necesarul de memorie și consumul de timp în procesele de recunoaștere a modelelor și, respectiv, de extragere a caracteristicilor;
- PROGRAMUL ARTEMIS, utilizat și de Rețeaua Națională de Monitorizare și Protecție Seismică a Patrimoniului Construit (RNMPSPC/ IOSIN) a INCD URBAN-INCERC, permite efectuarea analizei modale operaționale (OMA) și a analizei modale experimentale (EMA). Ca facilități specifice pentru monitorizarea sănătății structurale în programul ARTEMIS sunt identificate:
 - Modulul de monitorizare în timp a parametrilor modali (MPH)
 - Modulul de detecție a avarierilor (DDM)
 - Modulul de analiză a deplasărilor relative de nivel (IDAM)
- o provocare cheie în toate abordările de învățare automată este permiterea utilizării lor în timp real, mai degrabă decât să se bazeze exclusiv pe analiza post-eveniment. Pentru a încorpora abordarea deep-learning pentru detectarea sosirii undelor cu celelalte procese

- efectuate de SeisComp, în SUA s-a dezvoltat un modul care permite utilizarea algoritmului EQCCT în timp real..
- SeisComPro include, de asemenea, module pentru vizualizarea formelor de undă înregistrate, inclusiv în timp real, aplicarea de corecții de linie de zero, filtrare, cartografierea pe hărți de înaltă rezoluție a parametrilor evenimentelor seismice, calculul unui număr mare de parametri semnificativi ai mișcărilor seismice, calculul și reprezentarea grafică a spectrelor de răspuns, a valorilor STA/LTA, a intensităților Arias (cu identificarea duratei semnificative a mișcării), a spectrelor Fourier etc. SeisComPro posedă și capacități de analiză și reprezentare în timp real a calității furnizării datelor de către stațiile seismice conectate online, permițând astfel identificarea rapidă a problemelor de transmisie.
 - PROGRAMUL SHARD reprezintă o altă soluție informatică de nivel internațional, destinată monitorizării stării (sănătății) structurilor de construcții pe baza înregistrării vibrațiilor acestora. SHARD este conceput ca o suită de aplicații web și funcționează sub sistemul SeisComp⁵, produs de același dezvoltator;
 - În România, sistemul SeisComPro este implementat la INCĐ URBAN-INCERC, în cadrul Rețelei Naționale pentru Monitorizarea și Protecția Seismică a Patrimoniului Construit (Instalație / Obiectiv Special de Interes Național, R.N.M.P.S.P.C. I.O.S.I.N.) și la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului. Prin implementarea sa la INCĐ URBAN-INCERC s-a realizat compatibilizarea formatului de date între rețelele seismice ale celor două institute, asigurând astfel conectarea RNMPSPC la infrastructura europeană EPOS-ERIC, prin nodul EIDA al INCDFP, cu o calitate superioară a datelor seismice furnizate de RNMPSPC, într-un format unic, standardizat internațional.
 - din acest punct de vedere, în cadrul Proiectului PN 23 35 01 01 există premisele și experiența utilizării în SHM de software compatibil cu bunele practici și tendințele internaționale pentru a utiliza algoritmi de detecție a avarierilor;
 - nivelul conceptual și științific al abordărilor din România corespunde cu nivelul european și internațional relevant privind raportul dintre cercetarea teoretică și aplicativă / experimentală, dat fiind că în cadrul Proiectului PN 23 35 01 01 sunt instrumentate și monitorizate permanent 7 clădiri multietajate, iar 9 clădiri au fost instrumentate temporar, cu determinări de caracteristici dinamice, existând în total un număr de 38 de clădiri instrumentate și monitorizate.

Cu privire la performanța seismică a clădirilor instrumentate sau monitorizate în perioada 2016-2025 în INCĐ URBAN-INCERC, s-a pornit de la premisa că o măsură a deformării laterale a unei structuri este raportul de drift (inter-etaje, unghiular) care la valori mari indică o deformare mai mare, care poate duce la diverse niveluri de avariere, de la fisuri minore la avarieri structurale, inclusiv cedarea elementelor structurale, fisurarea pereților etc. S-au redat prevederi normative pentru drift la nivel EU, SUA și România. S-au analizat relația rețelelor neuronale artificiale (ANN), sau convoluționale (CNN) – monitorizarea sănătății structurale (SHM) și aplicarea unei rețele neuronale artificiale și a unui model de regresie multivariabilă în predicția gradului de avariere (Pritam et al., 2021) și evaluarea rigidității structurale post-seism prin intermediul unui indice de avariere.

⁵ <https://www.gempa.de/products/seiscomp/>

Ca studiu de caz s-a prezentat o clădire instrumentată seismic / vibrații ambientale pentru care s-a estimat gradul de avariere, la care s-au efectuat o serie de estimări, prin aplicarea unor metode echivalente, și/sau empirice (pentru clădire modelată cu un model dinamic simplificat), estimări care se referă la perioada proprie de vibrație, fracțiunea din amortizarea critica, factorul de amplificare dinamică maximă a accelerației orizontale, accelerația spectrală (accelerația maximă a structurii în timpul unui cutremur), deplasare maximă etc., răspuns seismic spectral linear și bi-liniar (cu o reducere a rigidității) pentru accelerograma Vn77 și scalată cu 1.5, 2 și 2.5. Studiul de caz evidențiază o cale de a estima comportarea structurală în cazul clădirilor instrumentate seismic, care nu pot fi modelate cu metoda elementelor finite din lipsa de date și nici utilizând aplicațiile software utilizate pentru cazul clădirilor monitorizate din cauza incompatibilității formatelor fișierelor cu înregistrări. Calculul estimativ urmărește prevederile normativului de proiectare seismic și rezultatele obținute în unele studii de referință în domeniu. În funcție de drifturile inter-etaje (unghiulare) s-a asociat un grad de avariere care variază în funcție de PGA.

Cu privire la selectarea software-ului și echipamentelor necesare pentru sistemul integral digitalizat de monitorizare seismică

În urma analizei și comparației, s-a relevat că versiunea recentă a programului ARTeMIS, aflată în dotarea RNMPSPC și actualizabilă anual, oferă capacități superioare de identificare a parametrilor dinamici structurali. O soluție alternativă, de mai mici dimensiuni, cu bune performanțe și implementare relativ mai facilă s-a profilat a fi SHARD, care lucrează integrat cu sistemul de achiziție, prelucrare și analiză seismică SeisComPro, implementat la INCĐ URBAN-INCERC, ceea ce îi conferă avantajele compatibilității și instalării rapide, cu investiție de timp și financiară relativ redusă. SHARD poate reprezenta o soluție flexibilă pentru monitorizări în care primează aplicarea unor criterii simple și directe de evaluare și îl recomandă pentru o achiziție în etapa următoare a proiectului. Având în vedere, în același timp, necesitatea unui sistem de achiziție a datelor performant, cu senzori compatibili cu nivelul tehnologic al aplicațiilor software analizate mai sus, etapa următoare a proiectului va prevedea și achiziția unor accelerometre performante, cu capacități de transmisie la distanță, integrabile în rețeaua seismică actuală a RNMPSPC.

Cu privire la relația fazei 5/2025 cu faza 6/2025 Prelucrări ale datelor din înregistrări seismice recente și măsurători experimentale de caracteristici dinamice pe clădiri, realizate în cele două campanii de instrumentare seismică, în mod concret sunt prevăzute:

- Activități de prelucrare și analiză a datelor seismice înregistrate pe clădiri în fazele precedente și determinări de caracteristici dinamice
- Sistematizarea rezultatelor și pregătirea raportului preliminar cu rezultatele campaniei de instrumentare
- Achiziția software-ului și echipamentelor necesare pentru sistemul integral digitalizat de monitorizare seismică
- Amenajare spații pentru optimizarea dispoziției noilor echipamente
- Activități de diseminare la nivel național și internațional.

Pe baza activităților din fazele 1, 2, 3, 4 și 5, sunt create premisele adecvate pentru realizarea cercetărilor prevăzute, în corelație și cu bugetul efectiv alocat în 2026.

Cu privire la activitățile de diseminare, în perioada aferentă fazei 5/2025 s-au elaborat și publicat / prezentat (conform Anexei A):

- 4 articole/studii publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale cu potențial de indexare WOS
- 2 articole/studii publicate în jurnale științifice internaționale
- 3 postere prezentate la Saloane internaționale de invenții
- 3 diplome și medalii la Saloane internaționale de invenții
- 2 rezumate la manifestări științifice
- 9 prezentări la conferințe, workshopuri/webinarii, publicații și diferite forme de diseminare și colaborări

RESPONSABIL PROIECT,
CSI, Dr. ing. Emil-Sever GEORGESCU



ANEXA A

LISTA lucrărilor științifice publicate și prezentărilor în cadrul Proiectului PN 23 35 01 01 de cercetătorii colectivului "REȚEAUA NAȚIONALĂ DE MONITORIZARE ȘI PROTECȚIE SEISMICĂ A PATRIMONIULUI CONSTRUIT" – RNMPSPC – I.O.S.I.N. și colaboratorii din INCD „URBAN-INCERC” - PN 23 35 01 01 Faza 5/2025

Articole/studii publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale cu potențial de indexare WOS (articolele au fost publicate într-un volum care va fi supus evaluării Clarivate – Web of Science în vederea posibilei indexări WOS, de regulă după cca. 1 an)

- *Upgrading the traditional database through BIM-based SHM vision*, Autori: Daniela Dobre, Claudiu-Sorin Dragomir, Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Cornelia-Florentina Dobrescu, Emil-Sever Georgescu. Articol acceptat pentru publicare în urma finalizării etapei de Review, în "Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering". The Fourteenth Edition of the International Conference "Agriculture for Life, Life for Agriculture", organized by the University of Agronomic Sciences and Veterinary Medicine of Bucharest between 5th and 7th June 2025.
- *Ground motion data quality assurance: fundamental requirements and their practical implementation within the National Network for the Seismic Monitoring and Protection of Building Stock*, NIRD URBAN-INCERC, Romania, Autori: Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Claudiu-Sorin Dragomir, Daniela Dobre, Emil Sever Georgescu, Alexandra-Marina Barbu. Articol acceptat pentru publicare în urma finalizării etapei de Review, în "Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering". The Fourteenth Edition of the International Conference "Agriculture for Life, Life for Agriculture", organized by the University of Agronomic Sciences and Veterinary Medicine of Bucharest between 5th and 7th June 2025.
- *Studies and measurements for the identification of noise and vibration levels in a site in Bucharest - case study*. Autori Marta Cristina Zaharia, Daniela Dobre, Claudiu Sorin Dragomir. Articol acceptat pentru publicare în urma finalizării etapei de Review, în "Scientific Papers. Series E. Land

Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering". The Fourteenth Edition of the International Conference "Agriculture for Life, Life for Agriculture", organized by the University of Agronomic Sciences and Veterinary Medicine of Bucharest between 5th and 7th June 2025.

- *Behavior of asphalt mixtures manufactured with recycled materials and their in-situ performance level.* Autori: Nicoleta-Adaciza Ionescu, Daniela Dobre. Articol acceptat pentru publicare in urma finalizarii etapei de Review, in "Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering". The Fourteenth Edition of the International Conference "Agriculture for Life, Life for Agriculture", organized by the University of Agronomic Sciences and Veterinary Medicine of Bucharest between 5th and 7th June 2025.

Articole/studii publicate în jurnale științifice internaționale

- *An in-depth investigation of ground jerk characteristics for the four strongest Vrancea (Romania) earthquakes in the past half-century.* Autor Iolanda-Gabriela Craifaleanu. (2025). *Frontiers in Built Environment*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1569201>

Postere prezentate la Saloane internaționale de invenții și rezumate la manifestări științifice

- *"Implementation of Data Quality Assurance Criteria within a Large Distributed Seismic Infrastructure of National Interest in Romania",* autori Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Claudiu-Sorin Dragomir, Daniela Dobre, Emil-Sever Georgescu, Alexandra-Marina Barbu. Poster pentru EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation, 17-th Edition, Iasi 8-10 mai 2025:
- *The evaluation of damage in Structural Health Monitoring using measured time-series data from a system's output.* Autori: Daniela Dobre, Claudiu-Sorin Dragomir, Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Emil-Sever Georgescu, Cornelia-Florentina Dobrescu, Marta-Cristina Zaharia. Poster pentru EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation 17-th Edition, Iasi 8-10 mai 2025
- *Modelling the performance characteristics of natural soils and stabilized using binders with ecological benefits by developing parametric correlations.,* autori: Cornelia Florentina Dobrescu, Claudiu-Sorin Dragomir, Daniela Dobre. Poster pentru EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation 17-th Edition, Iasi 8-10 mai 2025:
- *Assessment of built environment performance through a BIM-based SHM approach,* Autori: Daniela Dobre, Claudiu-Sorin Dragomir, Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Emil-Sever Georgescu, Cornelia-Florentina Dobrescu, Marta-Cristina Zaharia. Rezumat acceptat pentru publicare in Volumul „Conferința de cercetare în construcții, economia construcțiilor, urbanism și amenajarea teritoriului. Rezumate ale lucrărilor”.
- *A comprehensive urban resilience strategy for earthquakes utilising structural health monitoring and digital knowledge.* Autori: Daniela Dobre, Claudiu-Sorin Dragomir, Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Emil-Sever Georgescu, Marta-Cristina Zaharia. Rezumat acceptat la 25th International Scientific Multidisciplinary Conference on Earth and Planetary Sciences SGEM 2025, Bulgaria, in urma finalizarii etapei de Review,

Premii și diplome la saloane internaționale de invenții și inovații

- DIPLOMA and BRONZE MEDAL – for the research: *"Implementation of Data Quality Assurance Criteria within a Large Distributed Seismic Infrastructure of National Interest in Romania"*, autori Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Claudiu-Sorin Dragomir, Daniela Dobre, Emil-Sever Georgescu, Alexandra-Marina Barbu. Poster pentru EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation, 17-th Edition, Iasi 8-10 mai 2025;
- DIPLOMA and BRONZE MEDAL – for the research: *The evaluation of damage in Structural Health Monitoring using measured time-series data from a system's output*. Autori: Daniela Dobre, Claudiu-Sorin Dragomir, Iolanda-Gabriela Craifaleanu, Emil-Sever Georgescu, Cornelia-Florentina Dobrescu, Marta-Cristina Zaharia. EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation 17-th Edition, Iasi 8-10 mai 2025
- DIPLOMA and BRONZE MEDAL – for the research: *Modelling the performance characteristics of natural soils and stabilized using binders with ecological benefits by developing parametric correlations.*, Autori: Cornelia Florentina Dobrescu, Claudiu-Sorin Dragomir, Daniela Dobre. EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation 17-th Edition, Iasi 8-10 mai 2025

Prezentări de diseminare a rezultatelor și/sau cunoștințelor la conferințe, workshopuri / webinarii

- *Ingineria și învățămintele dezastrelor seismice*, Autor Emil Sever Georgescu, Prezentare pentru studenții de la Universitatea de Științe Agronomice și Medicină Veterinară din București, Facultatea de Îmbunătățiri Funciare și Ingineria Mediului, 11.04.2025, la INCĐ URBAN-INCERC.
- *Curtea de Argeș și cutremurele*, Autor Emil Sever Georgescu, prezentare la Conferința cu tema "COMPORTAREA IN SITU A CONSTRUCȚIILOR" și Adunarea Generală de Primăvară a CNCisC, Ședința a 79-a, Curtea de Argeș, 25-26.04. 2025
- *Restaurările Curții de Argeș în context istoric și seismic*. Autor Emil-Sever Georgescu. Prezentare la Simpozionul Asociației Arhitectură. Restaurare. Arheologie, ARA, în parteneriat cu Institutul de Arheologie „Vasile Pârvan” și Muzeul Municipiului București. ediția a 25-a, si masa rotunda cu tema "Monument și interes public", 8 mai 2025.
- *INCĐ URBAN-INCERC, de la începuturi până azi*. Autor Emil-Sever Georgescu. Prezentare la conferința aniversară a INCĐ URBAN-INCERC și cea de-a XXVII-a ediție a conferinței de cercetare în construcții, economia construcțiilor, arhitectură, urbanism și dezvoltare teritorială având ca temă 75 DE ANI DE CERCETARE ÎN CONSTRUCȚII, ARHITECTURĂ ȘI URBANISM.DE LA INCERC LA INCĐ URBAN-INCERC, 1950-2025, 22 mai 2025.
- Prezentări la *Conferința și exercitiu de evacuare la seism* la USAMV, INCĐ URBAN-INCERC în colaborare cu ISU București-Ilfov, cu tema: CUM REACTIONAM VS. CUM SA REACTIONAM ÎN CAZ DE CUTREMUR SAU INCENDIU. 26 MAI 2025:
- *Tipuri de structuri, răspuns seismic și vulnerabilitate în mediul urban și în campusurile universitare*. Claudiu-Sorin Dragomir, Emil-Sever Georgescu
- *Impactul seismic în clădirile universitare. scenarii și situații de comportare*. CS I dr. ing. Emil-Sever GEORGESCU, Claudiu-Sorin Dragomir, Daniela Dobre, Iolanda-Gabriela Craifaleanu

Alte publicații și forme de diseminare

- *Activities OF ECBR – EUROPEAN CENTER FOR BUILDINGS REHABILITATION in view of earthquake disasters mitigation, public health and social preparedness in Romania*. Autor E. S. Georgescu – Director ECBR. Prezentare on-line pe 23 mai 2025 din partea INCĐ URBAN-INCERC / ECBR la

"EUROMED PROTECT-NET - Euro-Mediterranean Forum for Disaster Risk Governance, Health Preparedness, and Networking Advancement", Republic of San Marino, 22-24 May 2025.

BIBLIOGRAFIE

- <https://dexonline.ro/definitie/algorithm>
- Mic dicționar enciclopedic, Editura enciclopedică română, București, 1972.
- Machorro-Lopez, J. M., Hernandez-Figueroa, J. A., Carrion-Viramontes, F. J., Amezquita-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodriguez, M., Crespo-Sanchez, S. E., ... Martinez-Trujano, L. A. (2023). Analysis of Acoustic Emission Signals Processed with Wavelet Transform for Structural Damage Detection in Concrete Beams. *Mathematics*, 11(3), 719–719. <https://doi.org/10.3390/math11030719>
- Dong, S., Yuan, M., Wang, Q., & Liang, Z. (2018). A Modified Empirical Wavelet Transform for Acoustic Emission Signal Decomposition in Structural Health Monitoring. *Sensors*, 18(5), 1645–1645. <https://doi.org/10.3390/s18051645>
- Wang, Z., Ding, K., Ren, H., & Ning, J. (2021). Quantitative acoustic emission investigation on the crack evolution in concrete prisms by frequency analysis based on wavelet packet transform. *Structural Health Monitoring*, 21(3), 1046–1060. <https://doi.org/10.1177/14759217211018871>
- Xu, J., Wang, K., Ma, Q., Li, H., Wang, P., Chen, R., ... Zeng, D. (2023). Study on acoustic emission properties and crack growth rate identification of rail steels under different fatigue loading conditions. *International Journal of Fatigue*, 172, 107638–107638. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107638>
- Erdal Şafak (2021): Structural Health Monitoring (SHM) in Earthquake Engineering. Proc. 9-th Conference on Earthquake Engineering, 2-3 June 2021, https://eski.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/18583_45_03.pdf
- Fredi Alegría, Eladio Martínez, Claudia Cortés-García, Quirino Estrada, Andrés Blanco-Ortega and Mario Ponce-Silva (2024): Efficient Structural Damage Detection with Minimal Input Data: Leveraging Fewer Sensors and Addressing Model Uncertainties, *Mathematics* 2024, 12, 3362. <https://doi.org/10.3390/math12213362>
- Timothy Malche, Sumegh Tharewal and Rajesh Kumar Dhanaraj (2023): Automated Damage Detection on Concrete Structures Using Computer Vision and Drone Imagery, *Eng. Proc.* 2023, 58, 60. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16059>
- Yves Reuland, Panagiotis Martakis and Eleni Chatzi (2023), A Comparative Study of Damage-Sensitive Features for Rapid Data-Driven Seismic Structural Health Monitoring) *Switzerland. Appl. Sci.* 2023, 13, 2708. <https://doi.org/10.3390/app13042708> <https://www>
- Bjørn T. Svendsen, Gunnstein T. Frøseth, Ole Øiseth, Anders Rønnquist (2022): A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* (2022) 12:101–115 <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00530-8>
- Diego A. Tibaduiza Burgos, Ricardo C. Gomez Vargas, Cesar Pedraza, David Agis and Francesc Pozo (2020): Damage Identification in Structural Health Monitoring: A Brief Review from its implementation to the Use of Data-Driven Applications, *Sensors* 2020, 20, 733; doi:10.3390/s2003073

- Omar S. Sonbul and Muhammad Rashid (2023): Algorithms and Techniques for the Structural Health Monitoring of Bridges: Systematic Literature Review. *Sensors* 2023, 23, 4230. <https://doi.org/10.3390/s23094230>
- Jie Liu, Qilin Li, Ling Li, Senjian An (2024): Structural damage detection and localization via an unsupervised anomaly detection method. *Reliability Engineering & System Safety* Volume 252, December 2024, 110465, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110465>
- Llewellyn Morse, Ilias N Giannakeas, Vincenzo Mallardo, Zahra Sharif-Khodaei and MH Aliabadi (2024): Multi-objective SHM sensor path optimisation for damage detection in large composite stiffened panels. *Structural Health Monitoring* 1–21, sagepub.com/journals-permissions DOI: 10.1177/14759217241231701; journals.sagepub.com/home/shm
- Shrikant M. Harle · Amol Bhagat · Ruchita Ingole · Nilesh Zanjad (2024): Artificial Intelligence and Data Analytics for Structural Health Monitoring: A Review of Recent Developments, *Archives of Computational Methods in Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10276-x>
- Salles, Victor ; Munoz, Camilo ; Skevofilax, Constantinos ; Savvaidis, Alexandros (2024): *Real-Time Earthquake Detection Using Deep Learning: Integrating the EQCCT Algorithm with SeisComp*. AGU Fall Meeting 2024, held in Washington, D.C., 9-13 December 2024, Session: Seismology / Advances in Automated Network Processing to Improve Seismic Event Monitoring III Poster, Poster No. 3463, id. S13A-3463.
- Giada Faraco, Andrea Vincenzo De Nunzio, Nicola Ivan Giannoccaro and Arcangelo Messina (2024), Structural Health Monitoring by Accelerometric Data of a Continuously Monitored Structure with Induced Damages, *Structural Durability and Health monitoring - SDHM*, 2024, vol.18, no.6 DOI: 10.32604/sdhm.2024.052663
- Arvindan Sivasuriyan, Vijayan, D. S., Wojciech Górski, Łukasz Wodzyński, Vaverková, M. D., & Koda, E. (2021). Practical Implementation of Structural Health Monitoring in Multi-Story Buildings. *Buildings*, 11(6), 263–263. <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>
- DiPasquale, E., & Çakmak, A. S. (1989). On the relation between local and global damage indices (Technical Report NCEER-89-0034). National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, New York.
- DiPasquale, E., & Çakmak, A. S. (1990). Seismic damage assessment using linear models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 9(4), 194-215.
- DiPasquale, E., & Çakmak, A. S. (1990). Relation between global damage indices and local stiffness degradation. *Journal of Structural Engineering*, 116(5), 1440-1456.
- Chouinard, L., Vahid Shahsavari, & Bastien, J. (2019). Reliability of Wavelet Analysis of Mode Shapes for the Early Detection of Damage in Beams. *Frontiers in Built Environment*, 5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00091>
- Xu, Y., Li, Y., Zheng, X., Zheng, X., & Zhang, Q. (2023). Computer-Vision and Machine-Learning-Based Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures. *Buildings*, 13(5), 1258. <https://doi.org/10.3390/buildings13051258>
- Chen, H., & Ni, Y. (2018). Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures. <https://doi.org/10.1002/9781119166641>
- Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., & Girolami, M. (2022). Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights. *Structural Health Monitoring*, 21(4), 1906-1955.

- Abdeljaber, O., Avci, O., Kiranyaz, S., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2017). Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks. *Journal of Sound and Vibration*, 388, 154-170.
- Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- Flah, M., Nunez, I., Ben Chaabene, W., & Nehdi, M. L. (2021). Machine learning algorithms in civil structural health monitoring: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 2621-2643.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077.
- Ye, X. W., Jin, T., & Yun, C. B. (2019). A review on deep learning-based structural health monitoring of civil infrastructures. *Smart Structures and Systems*, 24(5), 567-585.
- Azimi, M., Eslamlou, A. D., & Pekcan, G. (2020). Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review. *Sensors*, 20(10), 2778.
- Goursat, M., & Mevel, L. (2009). Algorithms for covariance subspace identification: a choice of effective implementations. In: *Proceedings of the 27th International Modal Analysis Conference (IMAC-XXVII)*.
- M. Goursat, M. Döhler, L. Mevel, & Andersen, P. (2011). Crystal Clear SSI for Operational Modal Analysis of Aerospace Vehicles. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics*, 1421-1430. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9834-7_125
- Allemang, R.J., Brown, D.L. (2006). A Complete Review of the Complex Mode Indicator Function (CMIF) with Applications. In: *International Conference on Noise and Vibration Engineering; ISMA*; 3209-3246.
- Weber, B., Becker, J., Ellguth, E., Henneberger, R., Herrnkind, S., Roessler, D. (2016). SHARD – A SeisComp3 module for Structural Health Monitoring. 42th American Geophysical Union Fall Meeting.
- Mary E. Templeton (2017): IRIS Library of Nominal Response for Seismic Instruments. Incorporated Research Institutions for Seismology. Dataset. <https://doi.org/10.17611/S7159Q>
- Celebi, Mehmet. (2007). Response Health Monitoring of Buildings Using Threshold Drift Ratios - Now an Established Method. <https://www.researchgate.net/publication>.
- DiPasquale, E., Ju, J.W., Askar, A., Cakmak, A.S. (1989). Relation between global damage indices and local stiffness degradation. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol 116, no.5.
- DiPasquale, E., Cakmak, A.S. (1989). On the Relation Between Local and Global Damage Indices. *MCEER: Earthquake Engineering to Extreme Events*.
- FEMA 356 (ASCE 2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*.
- Ghobarah, A. (2004). On drift limits associated with different damage levels. *International workshop on Performance based design: concepts and implementations*.
- Guo F., Dong Y., Tian H., Zhang X., Su Q. (2023). Structural seismic response prediction based on convolutional neural networks. *Vibroengineering Procedia*, Vol. 51, pp. 56-62, <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23670>.

- Kong, X., Cai, C.-S., Hu, J. (2017). The State-of-the-Art on Framework of Vibration-Based Structural Damage Identification for Decision Making. *Appl. Sci.* 7, 497. <https://doi.org/10.3390/app7050497>.
- Lydakis, E. (2024). Autonomous structural health monitoring for vibration-based damage detection in civil structures. Technical University of Denmark. DCAMM Special Report No. S380 <https://doi.org/10.11581/acf20a6e-2ae0-4e20-a56f-802b1dba849e>.
- Moehle, J. (1996). Displacement-based seismic design criteria. Elsevier Science Ltd, Paper no. 2125, 11th World Conference on Earthquake Engineering.
- P. Bisch, E. Carvalho, H. Degee, P. Fajfar, M. Fardis, P. Franchin, M. Kreslin, A. Pecker, P. Pinto, A. Plumier, H. Somja, G. Tsionis (2011). Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples Worked examples presented at the Workshop "EC 8: Seismic Design of Buildings", Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. EUR 25204 EN - 2012.
- Pavel, F., Vacareanu, R. (2023). Review of Methodologies for Displacement Checks in Modern Seismic Design Codes. *Buildings* 13, 940. <https://doi.org/10.3390/buildings13040940>.
- Pavel, F., Vacareanu, R., Pitilakis, K. (2022). Preliminary Evaluation of the Impact of Eurocode 8 Draft Revision on the Seismic Zonation of Romania. *Appl. Sci.* 12, 649. <https://doi.org/10.3390/app12020649>.
- Pritam H., Arjun S., Satyabrata C. (2021). Prediction of global damage index of reinforced concrete building using artificial neural network, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, DOI: 10.1080/15502287.2021.1887405.
- Soós, M., Vigh, L.G. (2012). On the Eurocode 8 limited damage criteria for non-structural elements – Analysis and requirements, 15 WCEE 2012.
- Strategia Națională de Reducere a Riscului Seismic, Monitorul Oficial al României, Partea I, Nr. 1195 bis/13.XII.2022.
- <https://www.svibs.com/structural-health-monitoring>