

RĂSPUNSUL STRUCTURAL LA ACȚIUNEA DINAMICĂ A UNUI POD CU STRUCTURĂ MIXTĂ OȚEL-BETON

Maria-Cristina SCUTARU¹
Cristian-Claudiu COMISU²
Nicolae ȚĂRANU¹
Gheorghită BOACĂ²

În întreaga lume, cea mai mare parte a infrastructurii rutiere este deja construită, provocarea administratorilor fiind reprezentată de menținerea acestora în condiții optime de exploatare, utilizându-se resursele bugetare limitate avute la dispoziție. Din acest motiv, administratorii podurilor, împreună cu cercetătorii din domeniu, au dezvoltat diferite abordări privind monitorizarea permanentă a stării de degradare a structurilor din patrimoniu. Aceste abordări conduc la ușurarea procesului de luare a deciziilor privitoare la momentul oportun de realizare a lucrărilor de intervenție, încă din primele faze de dezvoltare a degradărilor, fiind necesare costuri și timpi de realizare sensibil reduși în comparație cu abordarea standard. La implementarea unui astfel de sistem se constată necesitatea existenței unui set de date privind caracteristicile dinamice ale podului nedegradat. Acest lucru este greu de realizat, deoarece majoritatea structurilor se află deja în exploatare, suferind o serie de defecte și degradări, unele cu impact asupra siguranței structurale. În scopul minimizării dezavantajelor menționate, au fost dezvoltate diferite metode de modelare a podurilor monitorizate, inclusiv a degradărilor acestora. Procesul de modelare este unul permanent, datele provenite de la structură fiind actualizate conform determinărilor in-situ. În această lucrare autorii prezintă un studiu de caz privind stabilirea răspunsului structural la acțiunea dinamică a podului cu structură mixtă oțel-beton, amplasat pe drumul național DN 28 la km 6+957, în dreptul localității Șcheia. Pentru determinarea caracteristicilor dinamice ale structurii, aceasta a fost modelată utilizându-se programul ANSYS. Datele rezultate din cadrul modelării sunt necesare în cadrul etapei de comparare a lor cu cele înregistrate de către sistemul de monitorizare permanentă dispus pe structură, de tipul Structural Health Monitoring (SHM).

CUVINTE CHEIE

PODURI / SUSTENABILITATE / MODELARE POD / CARACTERISTICI DINAMICE

ABSTRACT

Throughout the world, most of the road infrastructure is already built and the challenge for administrators is to keep it in optimal operating conditions, using the limited budget resources available. For this reason, bridge managers, together with researches in the field, have developed different approaches to the on-going monitoring of the state of degradation of patrimony structures. These approaches facilitate the decision-making process on the timely implementation of the intervention work from the early stages of

-
- 1) Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași, Facultatea de Construcții și Instalații, Departamentul de Construcții Civile și Industriale
 - 2) Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași, Facultatea de Construcții și Instalații, Departamentul de Căi de Comunicații și Fundații

degradation development, requiring reduced visual costs and timeframes as compared to the standard approach. When implementing such a system, there is a need for a data set on the dynamic characteristics of the undegraded bridge. This is difficult to achieve because most of the structures are already in operation, suffering a series of defects and degradations, some of which have an impact on structural safety. In order to minimize the disadvantages mentioned, various methods of modeling the monitored bridges, including their degradation, have been developed. The modeling process is permanent, the data from the structure being updated according to the in-situ determinations. In the present paper, the authors present a case study on the determination of the structural response to the dynamic action of the mixed steel-concrete bridge, placed on the national road DN 28 at km 6+957, near Șcheia. To determine the dynamic characteristics of the structure, it was modeled using the ANSYS program. Data from modeling is needed in the comparison phase with those of Structural Health Monitoring (SHM) structured monitoring system.

KEY WORDS

BRIDGES / SUSTAINABILITY / BRIDGE MODELING / DYNAMIC CHARACTERISTICS

1. INTRODUCERE

Pentru orice societate sau țară, posibilitățile de transport a cetățenilor, a bunurilor și a serviciilor sunt esențiale pentru o dezvoltare reală și eficientă. Anual, guvernele țărilor membre ale Uniunii Europene (UE) alocă până la 1.000 de miliarde de euro sau mai mult de 10% din Produsul Intern Brut (PIB) industriei transporturilor. În cadrul acestei industrii sunt angrenați până la 10 milioane de oameni, fără a ține cont de faptul că întreaga populație a UE și a globului utilizează într-un fel sau altul rețelele publice de transport. Cea mai mare parte a industriei este ocupată de rețeaua de drumuri. Datorită procentului ridicat de utilizare, rolul ei este esențial pentru viața socială și economică a tuturor țărilor, a Europei și a întregii lumi (Brady et al., 2015, Bevc et al., 2009, O'Reilly et al., 2009).

Scopul principal al conceperii podurilor este de a asigura continuitatea căii de comunicație pe care o deservește la întâlnirea cu un obstacol, lăsând în același timp și spațiul liber necesar continuității obstacolului traversat (Unguru, 1992). Acest lucru este realizat pentru stabilirea de noi relații economice și pentru a ușura posibilitatea de deplasare a persoanelor, bunurilor și serviciilor. Cu toate acestea, datorită constrângerilor bugetare, inginerii responsabili atât cu proiectarea, cât și cu construcția și administrarea structurilor, alături de cercetătorii în domeniu, lucrează la dezvoltarea de noi metode de construcție și de întreținere, îmbunătățindu-se durabilitatea și sustenabilitatea structurii. În țările dezvoltate, cea mai mare parte a infrastructurii rutiere este deja construită, provocarea principală fiind reprezentată de întreținerea acesteia și menținerea ei în condiții optime de exploatare, lucru ce este de cele mai multe ori mai scump decât înlocuirea totală a structurii.

În zilele noastre, toate administrațiile realizează procesul de urmărire a comportării în timp a podurilor prin intermediul inspecțiilor vizuale. Deoarece s-a constatat că această abordare nu oferă un grad înalt de siguranță și încredere în ceea ce privește evaluarea rezistenței structurii analizate, cercetătorii în domeniu, la îndemnul administratorilor, au cercetat și dezvoltat sisteme complexe de estimare și identificare, în cel mai scurt timp posibil, a apariției și evoluției degradărilor. Aceste sisteme permanente de monitorizare, performante, sunt reunite în cadrul literaturii de specialitate sub denumirea de Structural Health Monitoring (SHM) (Ároch et al., 2016, Sokol și Venglar, 2016).

SHM reprezintă procesul complex de implementare a diferitelor strategii de identificare a apariției și dezvoltării degradărilor care afectează structurile de poduri. La începutul dezvoltării acestor strategii, ele au fost utilizate doar în cazul industriei aerospațiale și a ingineriei mecanice (Worden et al., 2015, Yang și Soh, 2009, Farrar și Worden, 2007). Acest sistem complex poate integra informațiile provenite de la inspecțiile vizuale în cadrul datelor furnizate de diferiți senzori instalați pe structură (Comisu et al., 2017).

În prezent, sistemele SHM implică o varietate largă de instrumente ce sunt utilizate în observarea cât mai detaliată a comportamentului structural pe o perioadă relativ lungă de timp, utilizându-se diferite măsurători directe ale unor parametri. Variația acestora se consideră a ilustra și a cuantifica cât mai exact starea de degradare a structurii. Pe termen lung, procesul de monitorizare vizează actualizarea periodică a datelor provenite de la structură în ceea ce privește evoluția rezistenței structurii și capacitatea sa de a prelua sarcinile provenite din trafic și mediu. Degradările suferite de orice pod sunt cauzate în cea mai mare măsură de îmbătrânirea structurilor și a materialelor componente, dar și a acumulării deteriorărilor provenite din surse externe. În cazuri excepționale, cum ar fi producerea unui cutremur sau a unui accident, sistemele SHM sunt folosite de către administratori pentru a evalua cât mai rapid starea de degradare și performanțele structurii pentru a hotărî închiderea sau nu a circulației pe pod (Scutaru și al., 2017, Farrar și Worden, 2007). În această privință a fost utilizată analiza modală a structurii ca mijloc de identificare a performanțelor structurale de către cercetătorii Teșu (2015) și Comisu și Boacă (2010).

Pentru a asigura eficiența utilizării sistemelor de tipul SHM, primul pas ce trebuie făcut este reprezentat de modelarea numerică a structurii prin intermediul Metodei Elementului Finit (MEF). În urma rezultatelor provenite de la această modelare sunt determinate zonele cele mai indicate pentru montarea unităților de captare a datelor.

În același timp, modelarea structurii vizate este utilizată și în faza efectivă de monitorizare, mai ales în cazurile în care nu există date privind comportamentul dinamic al podului din momentul dării lui în exploatare. Cercetătorii în domeniu resimt acut această lipsă de informații, în principal datorită imposibilității de existență a unei comparații între datele colectate in-situ și cele de la structura nedegradată. În urma acestei comparații sunt determinate degradările apărute pe structură.

Scopul principal al acestei lucrări este de a descrie primii pași realizați de către echipa de cercetare în cadrul unui program experimental de modelare și instrumentare a podului situat pe drumul național DN 28 la km 6+957 în dreptul localității Șcheia. Astfel, lucrarea face o trecere în revistă a primelor etape de modelare a structurii mixte oțel-beton folosindu-se MEF prin intermediul programului de cercetare ANSYS, alături de caracteristicile structurii metalice nedegradare care rezultă din cadrul acestei modelări.

2. PREZENTAREA STRUCTURII PODULUI ȘCHEIA

Podul este amplasat pe drumul național DN 28 la km 6+957 în dreptul localității Șcheia, județul Iași. Principalul obiectiv al respectivei lucrări de artă este de a asigura continuitatea și buna desfășurare a traficului de pe DN 28 peste râul Siret.

Structura a fost construită în anul 1958, ultimele lucrări de întreținere periodică fiind realizate în 2002. Datorită specificului drumului național a cărei continuitate trebuie să o asigure, podul prezintă 2 benzi de circulație (Figura 1a). Lățimea părții carosabile a structurii este de 7,44 m, având dispuse și 2 trotuare cu lățimea de 0,85 m, iar lățimea totală, măsurată între fețele interioare ale mâinii curente este de 9,52 m.



a. Vedere asupra părții carosabile a podului Șcheia



b. Vedere asupra a 3 deschideri ale podului Șcheia

Figura 1 - Vederi pod Șcheia

În secțiune longitudinală, structura prezintă 4 deschideri (50,35 m + 60,00 m + 60,00 m + 50,35 m), rezultând o lungime totală a suprastructurii de 220,70 m și o lungime totală a podului de 236,90 m (Figura 1b). Tablierul este construit din 2 grinzi metalice tip I și o placă de beton, neexistând dispuse niciun fel de element de conlucrare între cele două tipuri de elemente. Schema statică a podului este de grinză continuă, fiind prevăzute 2 rosturi de dilatație la capetele structurii și 21 de rosturi intermediare ale plăcii de beton din cadrul structurii mixte.

Suprastructura podului este realizată din 2 grinzi metalice tip I, cu o placă de beton armat fără conlucrare și 4 lonjeroni. Grinzile principale au înălțimea constantă de 2,40 m, distanța între ele fiind de 7,00 m, solidarizate cu anretoaze scurte cu înălțimea de 1,00 m, iar la partea inferioară sunt dispuse contravântuiri orizontale (Figura 2a).



a. Structura de rezistență a podului Șcheia



b. Aparate de reazem fixe și mobile

Figura 2 – Imagini ale structurii de rezistență și a aparatelor de reazem ale structurii

Fundațiile sunt directe, de adâncime, realizate din chesoane cu aer comprimat. Rezemarea grinzilor se face prin intermediul aparatelor de reazem mobile pe culei și pilele P1 și P3 și fixe pe pila P2 (Figura 2b).

Din punct de vedere al stării tehnice, în momentul actual, în evidența Direcției Regionale de Drumuri și Poduri Iași, indicele I_{ST} al structurii este 73, fiind încadrată în clasa tehnică

II. În ceea ce privește clasa de încărcare, datorită specificului drumului național, aceasta este E.

3. PREZENTAREA MODELĂRII SUPRASTRUCTURII METALICE A PODULUI ȘCHEIA PRIN INTERMEDIUL METODEI ELEMENTULUI FINIT UTILIZÂND PROGRAMUL ANSYS

În prima fază a programului experimental, autorii au decis să determine caracteristicile dinamice ale primei deschideri a structurii metalice a podului (deschidere ce urmează a fi monitorizată) aflat în faza ideală, nedegradată, considerată din momentul dării structurii în exploatare. În această privință, datorită preciziei datelor necesare, s-a decis utilizarea programului de calcul ANSYS R15.0.

Cu toate acestea, ținând cont de complexitatea ridicată a geometriei și a gradului sporit de acuratețe în comparație cu structura reală vizată, s-a decis modelarea, în primă etapă, a primei deschideri a platelajului metalic în 3D prin intermediul programului AUTOCAD 2015 (Figura 3). Acest program a fost ales, în principal, datorită mediului mult mai prietenos oferit pentru desenarea și modelarea structurii.

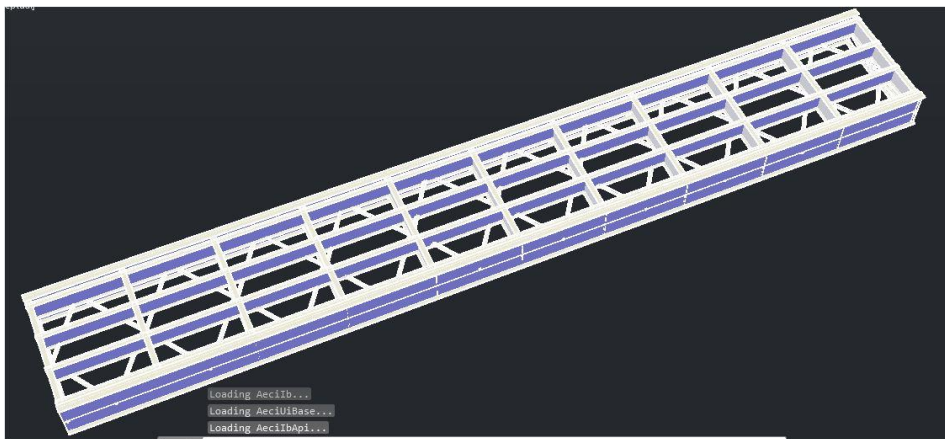


Figura 3 - Modelarea deschiderii monitorizate a podului în AutoCAD 2015

La finalul modelării, structura a fost importată în programul ANSYS R15 pentru modelare. Elementele structurii au fost definite ca fiind elemente de tipul beam (Figura 4).

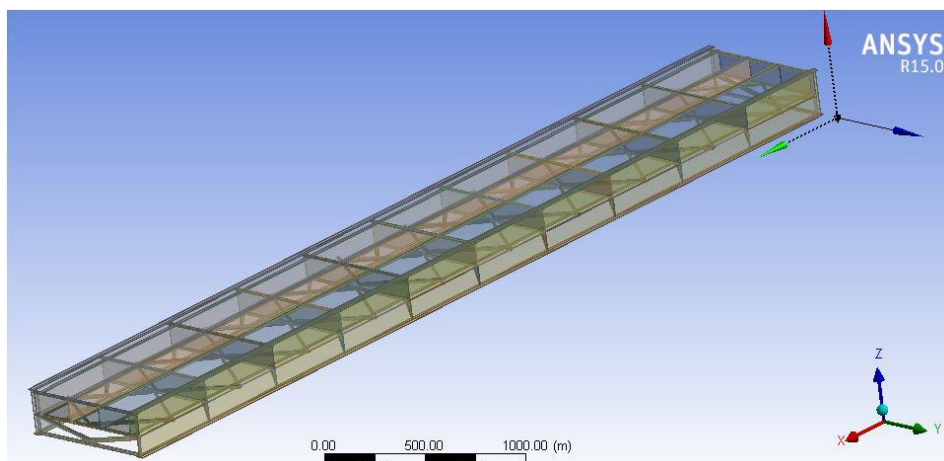


Figura 4 - Structura importată în programul ANSYS R15.0

După importare, au fost definite rezemările structurii. Astfel, impunerea condițiilor de rezemare reale a implicat împiedicarea deplasărilor normale la suprafața de contact în cazul reazemelor mobile, modelându-se astfel schema statică a primei deschideri a structurii podului Șcheia.

În vederea pregătirii podului Șcheia pentru analiza modală realizată cu programul ANSYS, structura a fost discretizată așa cum se poate observa în Figura 5. În urma acestei operațiuni, a rezultat un număr de 384.825 noduri și 52.855 elemente, discretizare considerată de autori ca oferind o încredere suficientă în datele furnizate de către analiză.

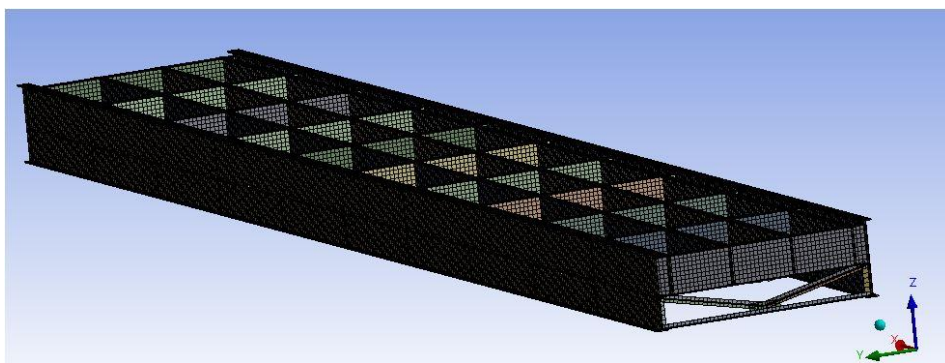


Figura 5 - Discretizarea primei deschideri a structurii podului Șcheia

După rularea programului indicat (Figura 6), au fost determinate primele 6 moduri de vibrație ale structurii metalice a podului. În același timp, au fost stabilite și valorile frecvențelor caracteristice pentru fiecare mod, alături de deplasările totale echivalente. Pentru realizarea acestei analize a fost considerată doar încărcarea din greutate proprie, singura care poate acționa în cazul neexistenței plăcii din beton armat. Trebuie precizat faptul că, informațiile diseminate reprezintă doar primul pas din cadrul programului experimental propus, urmând ca într-o etapă viitoare să fie analizată și structura completă (grinzi metalice și placă din beton armat, fără concluzare).

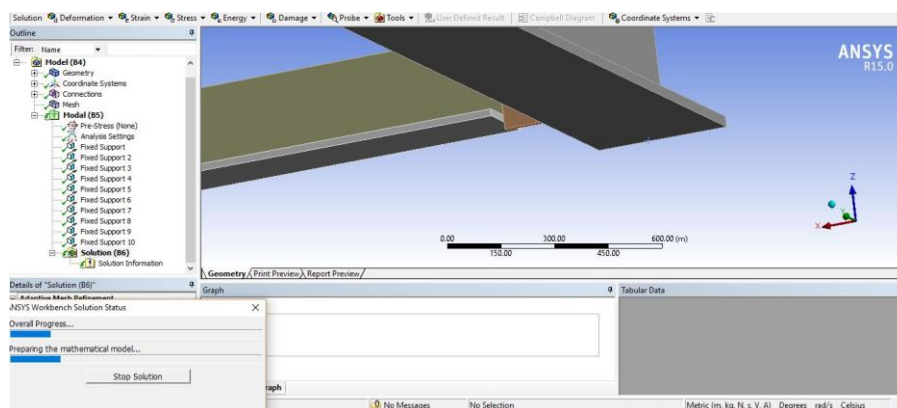


Figura 6 - Rularea programului Ansys

4. RĂSPUNSUL DINAMIC AL STRUCTURII DE REZISTENȚĂ METALICE A PODULUI ȘCHEIA

Așa cum s-a menționat în cadrul capitolului anterior, în urma analizei modale realizate prin intermediul programului ANSYS, au fost determinate valorile frecvențelor caracteristice ale structurii, modurile de vibrație și deplasările maxime corespunzătoare fiecărui mod. Valorile frecvențelor caracteristice în cazul primelor 6 moduri sunt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul nr. 1. Valorile frecvenței structurii în funcție de modul de vibrație

	Modul de vibrație	Frecvența [Hz]
1	1.	1.4835
2	2.	3.1442
3	3.	3.2007
4	4.	4.0631
5	5.	5.0618
6	6.	7.1264

Se poate observa că intervalul de variație a frecvențelor este între 1 și 8 Hz în cazul modurilor de vibrație analizate. Cunoașterea acestui interval reprezintă un avantaj considerabil datorită ușurării procedurii de achiziție a celor mai potrivite tipuri de accelerometre și sisteme de monitorizare a stării de degradare a podului. Aceste sisteme complexe și foarte costisitoare vor fi responsabile, în cadrul următoarelor etape ale monitorizării, cu urmărirea comportării în timp a podului analiat și captarea și transmiterea automată a datelor către un server central. Datele stabilite vor fi ulterior procesate, determinându-se astfel apariția și dezvoltarea degradărilor care ar putea afecta siguranța structurală și a participanților la trafic.

Modurile de vibrație studiate ale structurii metalice sunt prezentate în Figurile 7 a - f. După cum se poate observa, elementele cele mai solicitate corespund secțiunii centrale. Acest lucru se datorează în principal schemei statice a podului și a încărcării din greutate proprie.

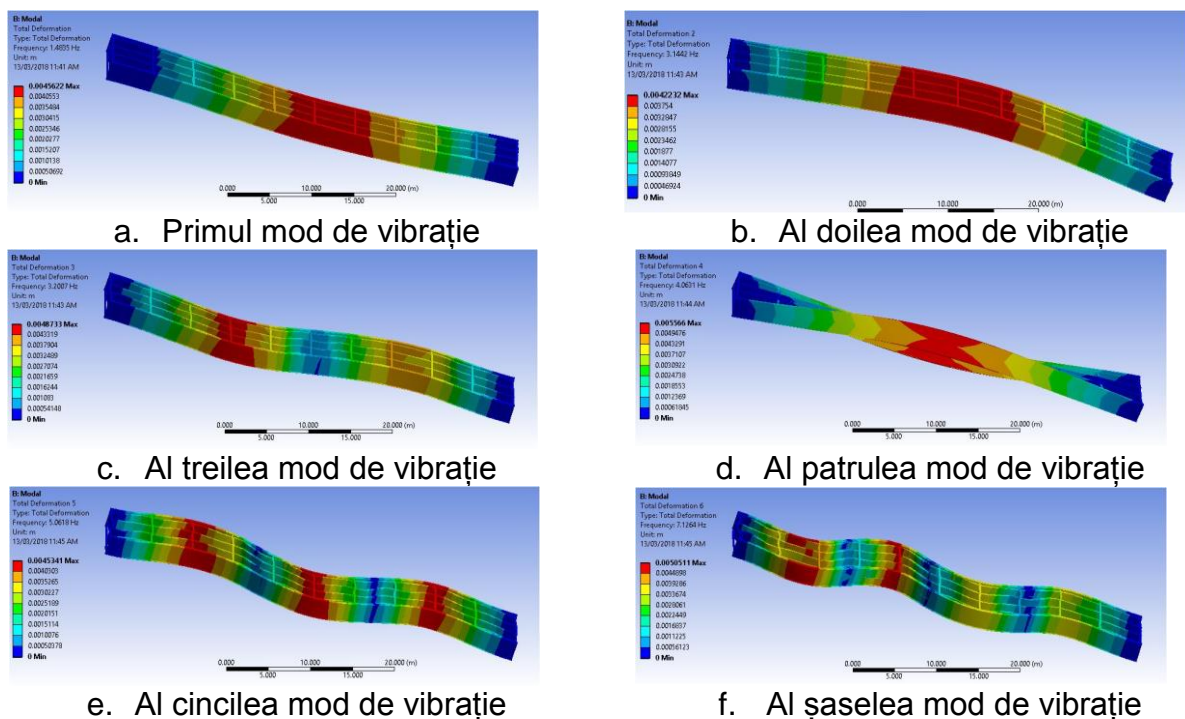


Figura 7 – Primele 6 moduri de vibrație ale structurii

În același timp, alte secțiuni caracteristice asupra cărora ne vom concentra atenția sunt și secțiunile corespunzătoare 1/3 din deschidere, de o parte și de alta a secțiunii centrale. Acestea au înregistrat valori considerabile în modurile 3 și 5 de vibrație, așa după cum rezultă din Figura 7 c și e și din tabelul 2.

Se poate observa ca în cazul modului de vibrație 3, deplasarea maximă se înregistrează în secțiunea corespunzătoare primei treimi a deschiderii, cu valori minime ale deplasării în secțiunea contrală (Figura 7 c și Tabelul 2).

În modul de vibrație 5 (Figura 7 e), pentru frecvența caracteristică de 5,0618 Hz, structura prezintă, în același timp, 3 secțiuni caracteristice cu deplasarea maximă în valoare de 4,5341 mm (Tabelul 2). Aceste secțiuni sunt amplasate în centrul grinzii și la 1/3 din deschidere, de o parte și de alta a secțiunii centrale. Din acest punct de vedere, modul de vibrație nr 5 poate fi considerat a fi cel mai complex mod de vibrație din cele 6 analizate.

Ultimul mod de vibrație analizat, modul 6, prezintă o deformată specială (figura 7 f), Deplasarea maximă este înregistrată în secțiunea corespunzătoare celei de-a 5 antretoaze, și în porțiunile de grinzi și lonjeroni corespunzători, în partea stângă a deschiderii analizate. Valori apropiate de 0 sunt înregistrate în centrul structurii.

Tabelul nr. 2. Valorile ale deplasării structurii în funcție de modul de vibrație

	Modul de vibrație	Deplasare [mm]
1	1.	4.56
2	2.	4.22
3	3.	4.87
4	4.	5.57
5	5.	4.53
6	6.	5.05

5. CONCLUZII

Lucrarea prezintă analiza modală a structurii metalice a podului cu structură mixtă oțel-beton amplasat pe drumul național DN 28 la km 6+957, în dreptul localității Șcheia. În prima etapă a studiului experimental, a fost modelată deschiderea ce urmează a fi monitorizată corespunzătoare structurii metalice a podului cu scopul principal de a determina caracteristicile modale. Într-o etapă viitoare se va modela și placa din beton armat, așezată deasupra grinzilor principale. Caracteristica cea mai importantă a podului Șcheia este reprezentată de lipsa elementelor de conlucrare amplasate la fața superioară a grinzilor metalice, între acestea și placa de beton.

Cunoscând cele mai importante 6 moduri de vibrație ale structurii, în primele etape ale implementării sistemelor de monitorizare a podului și, implicit, a studiului experimental, accelerometrele vor fi montate în punctele în care a rezultat și se așteaptă apariția de valori maxime ale deplasărilor în majoritatea modurilor de vibrație. Aceste secțiuni caracteristice sunt secțiunea centrală a deschiderii și cea de la o treime a acesteia, de o parte și de alta a secțiunii centrale.

Următorul pas în cadrul utilizării datelor privenite din studiul prin Metoda Elementului Finit este reprezentat de validarea și verificarea datelor rezultate. Această etapă se realizează prin compararea frecvențelor structurii obținute pe cale analitică cu cele înregistrate de senzori. În funcție de diferențele constate, în cazul structurilor noi se validează geometria structurii modelare, iar în cazul structurilor aflate deja în exploatare se determină posibilele locații ale apariției degradărilor.

Această lucrare face parte dintr-un complex program de cercetare dezvoltat de către Facultatea de Construcții și Instalații din cadrul Universității Tehnice "Gheorghe Asachi"

din Iași. Această cercetare se canalizează pe studiul modurilor de întreținere a podurilor din întreaga lume și a dezvoltării sistemelor SHM concepute pentru monitorizarea acestora.

REFERINȚE

- ÁROCH, Rudolf., SOKOL, Milan., VENGLÁR, Michal. (2016) Monitorizarea stării de degradare a principalelor poduri peste Dunăre din Bratislava (Structural Health Monitoring of Major Danube Bridges in Bratislava), Cea de-a 9-a Conferință "Poduri din Bazinul Dunării 2016", Procedia Engineering, 156, 24 – 31.
- BEVC, Lojze., KRIEGER, J., SIMON-TALERO, José., WIERZBICKI, Tomasz., DELATTRE, Luc., WOODWARD, Richard., CASAS, Joan Ramon., OLASZEK, Piotr., TURK, Mojca Ravnikar., VACEK, Jaroslav., VOGEL, Thomas., LASSEN, Bjørn. (2009) COST 345 – Proceduri Necesare pentru Evaluarea Structurilor de pe Autostrăzi – Raportul Grupurilor de lucru 2 și 3: Metode utilizate de Statele Europene pentru inspecția și evaluarea stării tehnice a structurilor (COST 345 – Procedures Required for Assessing Highway Structures – Joint report of Working Groups 2 and 3: Methods used in European States to inspect and assess the condition of highway structures), Comisia Europeană, Directoratul General de Transport și Energie, Bruxelles, Belgia.
- BRADY, Kenneth Charles., O'REILLY, Miles., BEVC, Lojze., ŽNIDARIČ, Aleš., O'BRIEN, Eugene., JORDAN, Richard. (2015) COST 345 – Proceduri Necesare pentru Evaluarea Structurilor de pe Autostrăzi – Raport final (COST 345 – Procedures Required for the Assessment of Highway Structures – Final Report), Comisia Europeană, Directoratul General de Transport și Energie. Bruxelles, Belgia.
- COMISU, Cristian – Claudiu, BOACĂ, Gheorghită (2010) Sistemele de monitorizare a stării de degradare a podurilor (Structural Health Monitoring System of Bridges), Procedia of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Niagara Falls, Canada, 1081 – 1090.
- COMISU, Cristian – Claudiu., ȚĂRANU, Nicolae., BOACĂ, Gheorghită., SCUTARU, Maria – Cristina. (2017) Sisteme de monitorizare a stării tehnice a podurilor (Structural health monitoring system of bridges), A X-a Conferință Internațională de Dinamica Structurilor, EURO DYN 2017, Procedia Engineering 199, 2054 – 2059.
- FARRAR., Charles R., WORDEN, Keith. (2007) Introducere în studiul monitorizării stării de degradare a podurilor (An introduction to structural health monitoring), Philosophical Transactions of the Royal Society A 356, 303 – 315.
- O'REILLY, Miles., ASTUDILLO, R., DURVILLE, J. L., HOLST J., GREENE, M. J. (2009) COST 345 – Proceduri Necesare pentru Evaluarea Structurilor de pe Autostrăzi – Raportul Grupului de lucru 1: Raport privind stocul curent al structurilor de pe Autostrăzi din țările Europene, costul de înlocuire și costurile anuale de întreținere, reparații și reînnoire a acestora (COST 345 – Procedures Required for the Assessment of Highway Structures – Working Group 1: Report on the current stock of highway structures in European countries, the cost of their replacement and the annual costs of maintaining, repairing and renewing them), Comisia Europeană, Directoratul General de Transport și Energie, Bruxelles, Belgia.
- SCUTARU, Maria-Cristina., ȚĂRANU, Nicolae., COMISU, Cristian-Claudiu., CHINGĂLATĂ, Costel (2017) Dezvoltarea sistemelor de monitorizare a stării tehnice a podurilor (Development of bridge structural health monitoring), Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Vol 63 (67), Nr. 2, 105 – 120.
- SOKOL, Milan., VENGLAR, Michal. (2016) Modelarea la scară a podurilor în scopul identificării sistemului (In Scale Model of the Bridge for System Identification),

- Simpozionul Mondial Multidisciplinar de Inginerie Civilă și Planificare Urbanistică WMCAUS 2016, Procedia Engineering 161, 674 – 676.
- TEȘU, Lăzărică (2015) Evaluarea performanțelor podurilor din zona seismică Iași (Performance evaluation of bridges in Iași seismic area), Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul LXI (LXV), Fasc 3, 17 – 27.
- UNGURU, Radu (1992) STAS 5626 – 1992 – Poduri. Terminologie, Institutul Român de Standardizare, București, România
- WORDEN, Keith., CROSS, Elizabeth J., DERVILIS, Nikolaos., PAPANICOLAOU, Evangelos., ANTONIADOU, Ifigeneia. (2015) Monitorizarea stării de degradare a podurilor: de la Structuri la Sisteme complexe (Structural Health Monitoring: from Structures to Systems-of-Systems), IFAC Conference, 48 – 21, 001 – 017.
- YANG, Y. W., SOH, C. K. (2009) Senzori cu impedanță piezoelectrică pentru monitorizarea stării tehnice a sistemelor de infrastructură civilă (Piezoelectric impedance transducers for structural health monitoring of civil infrastructure systems), în KARBHARI, V. M., ANSAFI, F., Structural health monitoring of civil infrastructure systems, p 43 – 71.