

Analiza modală operațională a unui pod oblic

Operational modal analysis of a skew bridge

Iulia Raluca Boldor¹, Gavril Kollo², Marius Nedelcu²

¹ Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții
Str. Constantin Daicoviciu nr. 15, Cod 400020, Cluj-Napoca, România
E-mail: luca_boldor@yahoo.com

² Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții
Str. Constantin Daicoviciu nr. 15, Cod 400020, Cluj-Napoca, România
E-mail: Gavril.Kollo@cfdp.utcluj.ro

Rezumat. *Un pod compozit oțel-beton, cu o singură deschidere de 24 m în localitatea Târlișua, județul Bistrița-Năsăud a fost dinamic testat pentru a-i determina proprietățile modale. Excitațiile au fost rezultate în urma trecerii unui număr de vehicule (analiza modală operațională). În cazul analizei modale operaționale, un accelerometru a fost așezat pe suprafața podului în două puncte de-a lungul grinzilor, accelerometrul a fost fixat cu ceară. Accelerațiile au fost măsurate în două locații din trecerea vehiculelor. Un model cu element finit al podului a fost realizat într-un program, luând în considerare oblicitatea podului, și toate elementele geometrice ale podului, fiind folosit pentru compararea rezultatelor experimentale.*

Cuvinte cheie: testare dinamică; excitație; accelerație

Abstract. *A steel - concrete composite bridge with a single span of 24 m in the town of Târlișua, Bistrița - Năsăud was dynamically tested to determine modal properties. For this the instruments are positioned on the structure in discrete locations to capture its structural response caused by an excitation source. The results are then analyzed using time domain signal or frequency domain signal processing. From the results are determined the modal parameters such as natural frequencies, form, manner and damping values*

Keywords: dynamic testing, excitation

1. Introducere

Testarea dinamică este folosită în multe ramuri ale ingineriei, inclusiv industria spațială, mecanică și ingineria civilă. [1]

În această scop, instrumentele sunt poziționate pe structură în diferite locații pentru a surprinde răspunsul structural al acesteia provocat de o sursă de excitație. Rezultatele sunt apoi analizate folosind semnal de domeniu de timp (time domain signal) sau transformarea semnalului în domeniu de frecvență.

Testarea dinamică a podurilor implică două componente principale: excitarea și achiziția de date. Sursele de excitare sunt clasificate ca vibrații libere sau forțate. [2]

2.Descrierea podului analizat

Podul folosit în studiul de caz este localizat în localitatea Târlișua, județul Bistrița-Năsăud pe drumul județean E171.

Podul are o singură deschidere de 24 m și este realizat compozit cu grinzi de oțel și dală de beton. Podul are o oblicitate de 45 grade în sens antiorar privit de sus, așa cum se vede în Figura 1,

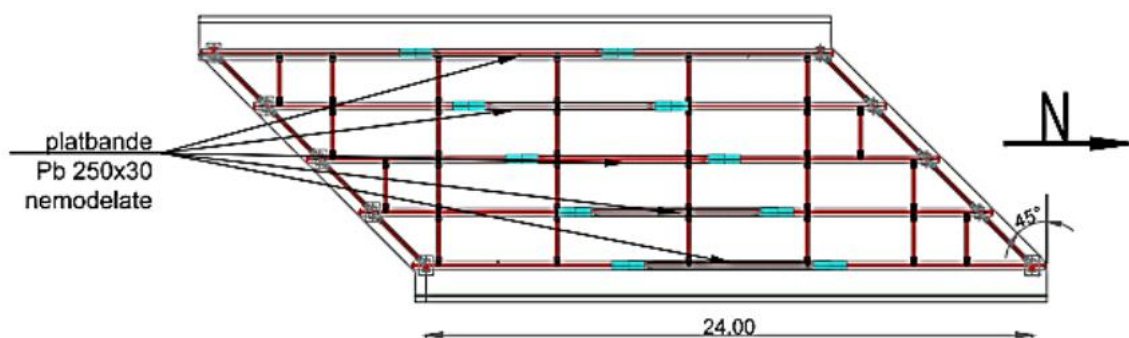


Figura 1. Vedere plană pod Târlișua
(Sursa: planșe furnizate de S.C. DRUMEX. S.R.L.)

Suprastructura podului este realizată din 5 grinzi metalice oțel S355 din gama de profile laminate HB1000B, care susțin o dală de beton, de clasă C30/37, cu o grosime de 18 – 36 cm, datorita pantei transversale a secțiunii drumului, care este de 2%.

Lățimea părții carosabile este de 7.80 m, cu două benzi de circulație de 3.50 m, spațiu de siguranță de 0.40 m și 2 trotuare de câte 1.50 m lățime separate de partea carosabilă prin borduri, având o lățime totală de 10,80 m, după cum se observă și din Figura 2.

Grinzile principale sunt distanțate la 2.1 m interax, iar în zona centrală pe o distanța de 6.50 m acestea au platbande Pb 250x30.

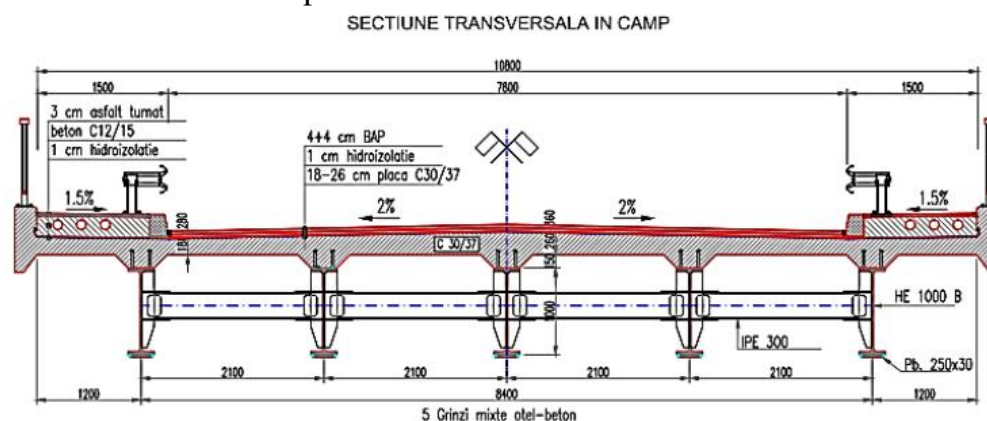


Figura 2. Secțiune transversală în câmp
(Sursa: planșe furnizate de S.C. DRUMEX. S.R.L.)

Antretoazele sunt din gama de profile laminate IPE 300 și sunt așezate perpendicular pe axa centrală fiind dispuse uniform, cele marginale sunt așezate la 0.50 m

față de antretoazele de la capătul podului, următorul rând de antretoaze fiind la 2.10 față de cele marginale și următoarele la 4.20 m, așezarea lor se poate vedea în Figura 3.

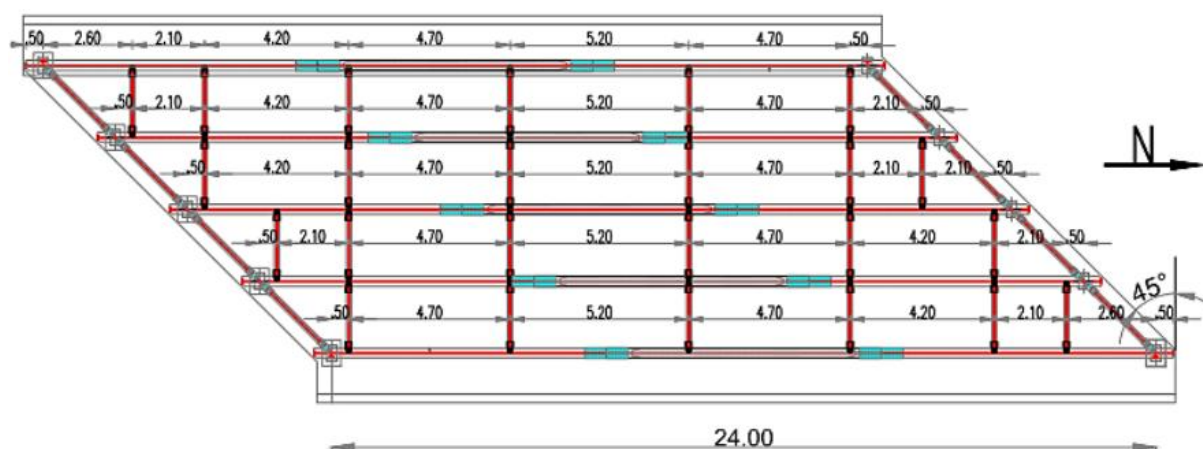


Figura 3. Vedere plană cu poziționarea antretoazelor
(Sursa: planșe furnizate de S.C. DRUMEX. S.R.L.)

3. Descrierea modelului realizat cu element finit

Un model detaliat cu element finit a fost realizat folosind un program specializat în analiza cu element finit a pentru calcule

În program, podul modelat este definit parametric. Procesul de modelare începe prin specificarea structurii de bază a podului (lungime, aliniere, număr de deschideri, număr de benzi, lățimea benzi și panta).

Programul are template-uri editabile, implicate bazate pe coduri corespunzătoare proiectării podurilor, pentru a accelera construirea modelului și analiza acestuia. Un model detaliat de obiecte geometrice fundamentale este generat automat bazat pe “obiectul pod”.

Elementele “shell”(Figura 4) sunt plasate în centrul de greutate al dalei, iar elementele de grinda au fost poziționate în centrele de greutate ale grinzilor

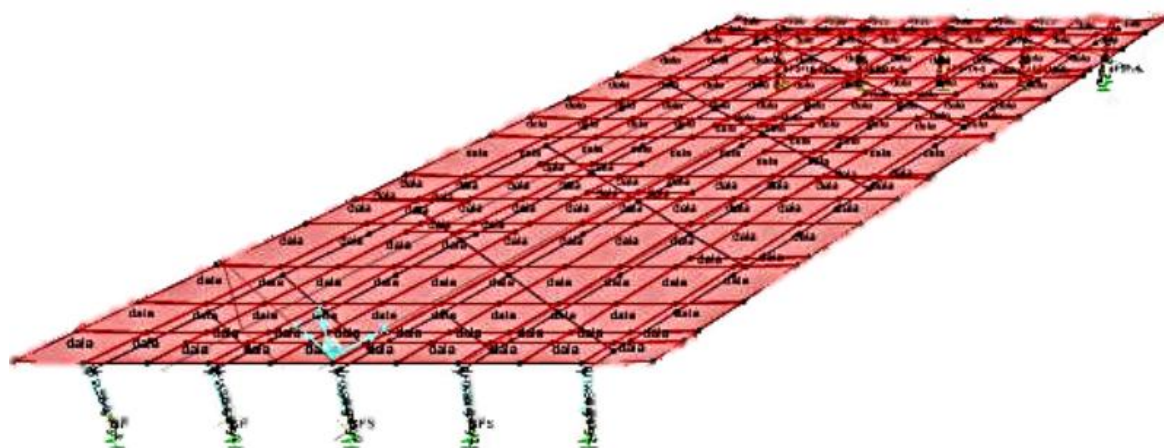


Figura 4. Vedere 3D a podului modelat cu etichete pe secțiuni

Sunt definite componentele podului: secțiunea transversală (Figura 5), culeele, antretoazele, modul de rezemare și așa mai departe.

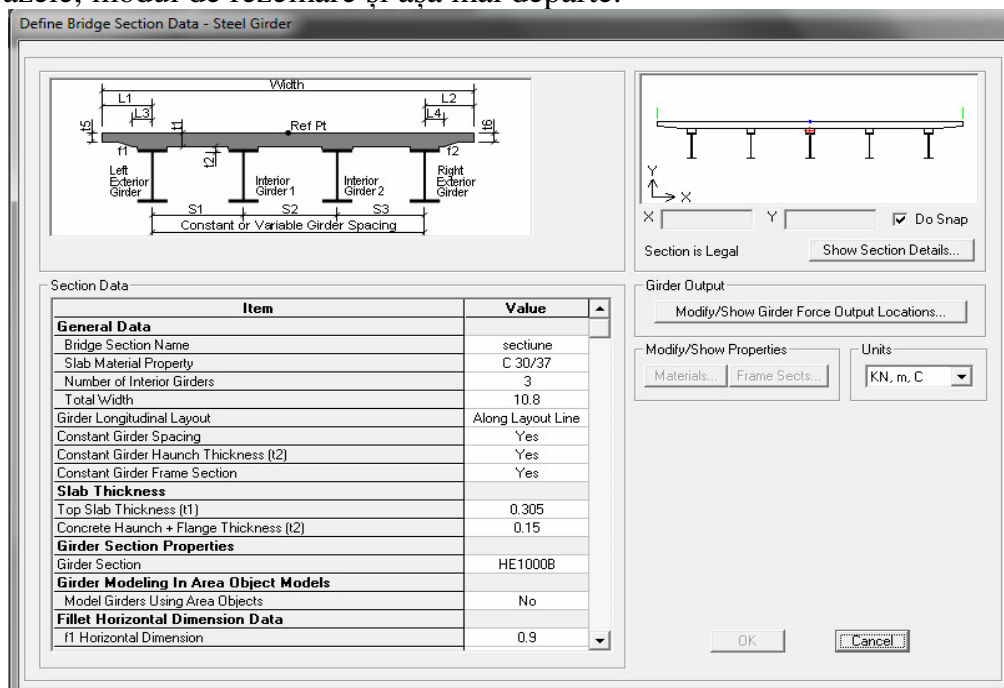


Figura 5. Secțiunea transversală a podului modelat

Grinzile principale au fost alese ca și cele din construcție, profile laminate HE1000B, însă spre deosebire de construcție platbanda de rigidizare de pe talpa inferioară a grinzilor nu a mai fost modelată.

Parapeții direcționali și pietonali precum și platbanda de rigidizare de pe talpa inferioară a grinzilor principale nu au fost explicit modelate. Greutatea platbandelor a fost adăugată ca și greutate pe suprafața podului pe linia de axa a fiecărei grinzi, la fel ca și parapeții direcționali și pietonali care au fost reprezentați ca și forțe gravitaționale. (Figura 6)

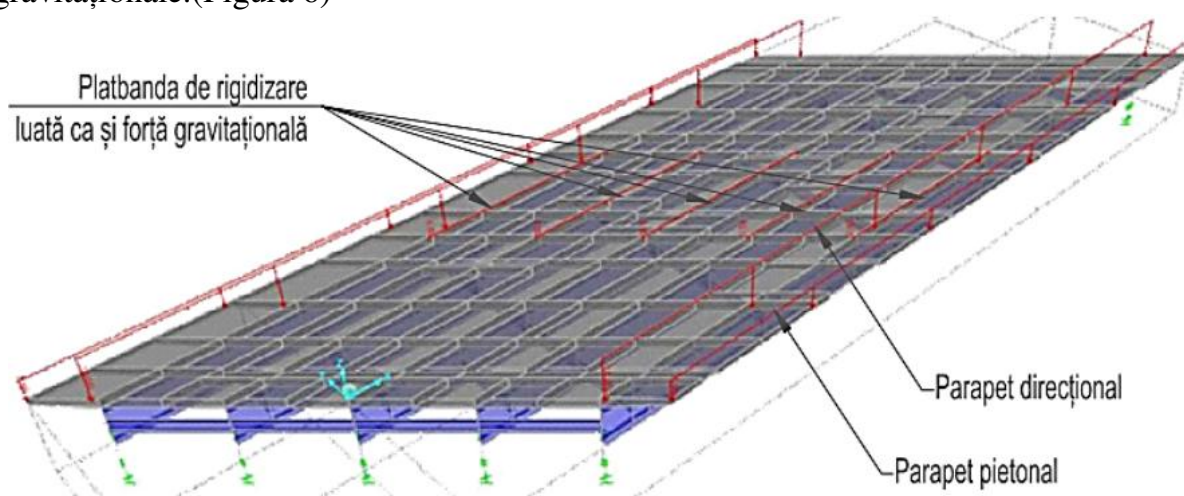


Figura 6. Poziționarea parapetelor și a platbandelor ca și forțe gravitaționale pe suprafața podului

4. Analiza modală experimentală

Podul studiat este amplasat într-o zonă cu trafic redus, astfel că instrumentele au fost plasate pe suprafața podului.

Testarea podului a avut loc vineri în data de 7 septembrie 2012 și a început aproximativ la ora 11.00 și a continuat până la aproximativ ora 14.00 în după-amiaza acelei zile.

Instrumentele, cablurile și sursele de excitație alese pentru acest studiu au fost cele disponibile, prin facultatea de Construcții din Cluj-Napoca, Departamentul de Mecanică.

Deoarece comportamentul global al podului a fost de interes, instrumentele au fost plasate de-a lungul grinzilor, acest lucru a minimizat efectele locale ale încovoierii dalei între grinzi.

Accelerometru(Figura 7) au fost plasat direct pe suprafața podului. Pe accelerometru a fost pusă ceara(chit) pentru ca senzorul să adere mai bine la suprafața podului (care a fost curățată în prealabil în acel loc). Ceara acționează ca o interfață între accelerometru și suprafața podului, reducând zgomotul datorită mișcării senzorului.



Figura 7 Accelerometru pe suprafața podului

Monitorizarea vibrațiilor a fost utilizată pentru evaluare structurală. Mai multe tehnici de excitație pot fi explorate și utilizate în evaluarea podurilor pe bază de vibrații, cum ar fi vibrații ambientale, vibrații forțate, vibrații induse de trafic și vibrații induse seismice.

Într-o evaluare pe bază de vibrații, caracteristici cum ar fi nivelul de vibrații și parametri modali sunt folosiți ca și indicatori, deoarece oferă informații cu privire la condițiile comportării reale ale structurii.

Valorile estimative ale indicatorilor sunt date de răspunsurile obținute de la senzorul plasat pe suprafața podului. Acest tip de estimare este cunoscut sub numele de tehnica de estimare directă.

O vedere cu reprezentarea poziționării accelerometrului și a stației de achiziționare de date sunt date în Figura 8.

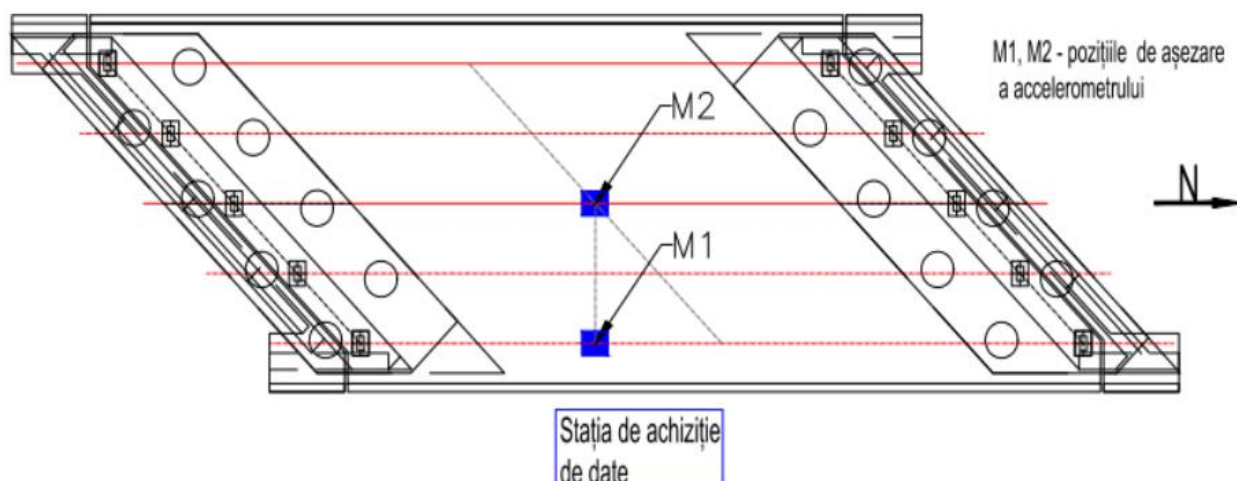


Figura 8. Vedere plană cu cele două poziții ale accelerometrului

Viteza de circulație, frecvențele naturale ale vehiculelor și ale podului sunt principali factori care determină vibrația unui vehicul când trece pe pod.

Testul a avut loc în data de 06.09.2012, iar vehiculele care au trecut pe pod când accelerometrul a fost amplasat în poziția M1 au fost un buldo-excavator New Holland B95 și un camion Roman de 16 tone încărcat, iar în situația când accelerometrul a fost poziționat în punctul M2 pe pod a trecut un autocamion Man TGL 26.403(26 tone) și un camion Roman de 16 tone gol.

Măsurătorile au fost făcute în condiții ambientale, excitații din vibrații ale mediului, și sub trafic nerestricționat, incluzând trecerea de vehicule grele, datorită unor lucrări locale.

Echipamente utilizate: (Brüel & Kjær): sistem achiziție date Pulse 3560-C, 5 accelerometre piezoelectrice tip 4507B002 (Figura 9). Analiza s-a realizat prin măsurarea continuă a accelerațiilor de răspuns ale podului pe o rețea de puncte longitudinală, în timpul trecerii unor vehicule. Accelerometrele din dotare sunt capabile să măsoare valori de până la 100 m/s².



Figura 9. DAQ Pulse 3560-C și accelerometru piezoelectric

M1 (Figura 8) a fost primul loc în care a fost poziționat accelerometrul, la jumătate de pod plasat de-a lungul grinzilor și apoi a început testul în jurul orei 11.00.

La ora 11.38 a trecut primul vehicul, un buldo-excavator New Holland 95B și la ora 12.01 a trecut un camion Roman de 16 tone încărcat, ambele au trecut în aceeași direcție.(Figura 10. a), b))

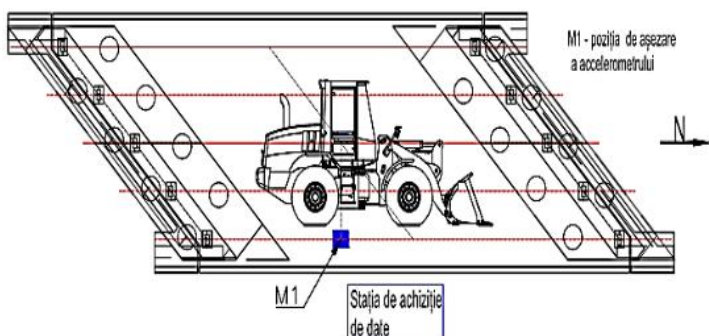
Accelerometrul a fost mutat în poziția M2, poziție aflată în dreptul poziției M1 și la jumătatea podului pe axa de delimitare a sensurilor de mers.

La ora 12.07 un autocamion Man TGL 26.403 a trecut pe pod, pe banda a doua în direcție inversă sensului de mers , iar apoi la 12.09 a trecut un camion Roman de 16 tone gol, în direcția sensului de mers.(Figura 10. c), d))

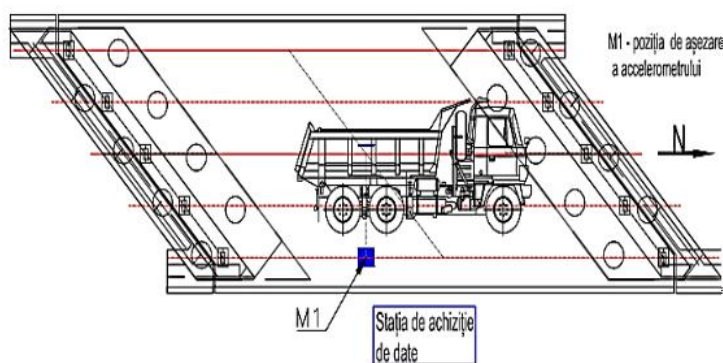
În Figura 10, sunt prezentate vehiculele care au trecut pe pod menționate mai sus precum și schema de trecere față de cele două poziții ale accelerometrului.



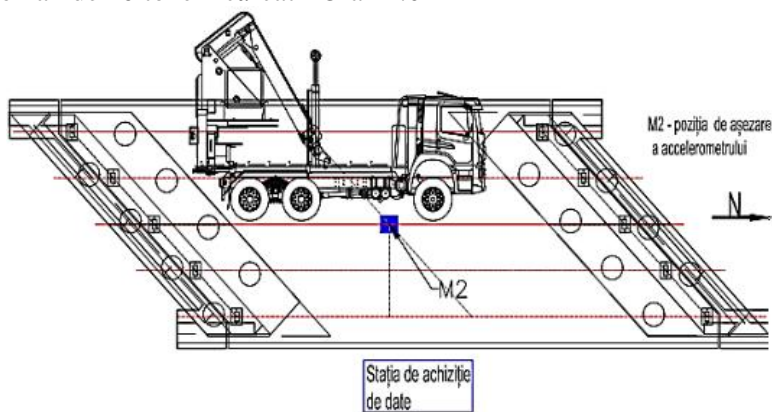
a) Buldo –excavator New Holland 95B - Ora 11.38

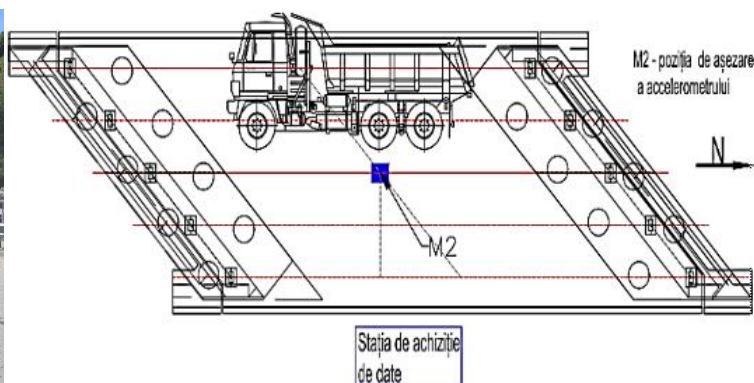


b) Autocamion Roman de 16 tone încărcat - Ora 12.01



c) Camion Roman TGL 26.403 - Ora 12.07





d) Camion Roman de 16 tone gol - Ora 12.09
Figura 10 Vehiculele și schema de trecere pe pod

5. Analiza pe modelul cu elemente finite

Un model cu element finit al podului a fost folosit în acest studiu (creat în programul CSI Bridge).

Modelul oferă o perspectivă asupra comportamentului dinamic al podului pentru a ajuta la localizarea zonelor de poziționare a senzorilor pentru un răspuns maxim. Modelul a furnizat, de asemenea o baza de comparație pentru rezultatele experimentale.

Programul se bazează pe cazuri de încărcare și combinații de încărcare și modele de proiectare.

Sunt necesare două combinații pentru fiecare încărcare permanentă, din cauza factorilor de încărcare minimi și maximi. Factorii de încărcare, pentru acțiuni temporare sunt aplicabili numai suprastructurilor cu dală care include grinzi I compozite. Încărcările mobile sunt aplicate cu factorul de încărcare 1 pentru toate grinzile.

La distribuirea încărcărilor, secțiunea este tratată ca o singură grindă, toate sarcinile (permanente și temporare) sunt distribuite în mod egal rețelei, pentru determinarea tensiunilor și momentelor, și proporțional dalei de beton pentru forfecare. Efectele de torsiune sunt luate în considerare și alocate grinzilor exterioare, în tălpii, în fibra superioară și superioară a acestora.

Tensiunile sunt evaluate în trei puncte în fibra superioară și inferioară, aceste trei puncte sunt stânga, dreapta și mijloc. Acest lucru presupune distribuția liniară și ia în considerare forțele axiale(P) și ambele momente încovoietoare ($M2$ și $M3$).

Clasa vehiculelor este setată să conțină mai multe vehicule și acestea pot fi determinate să acționeze ca și sarcini mobile asupra podului modelat.

Câte un singur vehicul acționează pe o bandă la un moment dat și cu o viteză specificată.(Figura 11)

Vehiculele au fost definite ca și vehicule generale considerând greutatea pe osie, acest lucru se poate vedea în Figura 11 a), b), c), d).

Analiza dinamică a unui pod oblic

General Vehicle Data

Vehicle name: 1.BE-95B Units: KN, m, C



Load Plan

Load Elevation

Length Effects

Axle: None Modify/Show...

Uniform: None Modify/Show...

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		30.	Two Points	1.8
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		30.	Two Points	1.8
Fixed Length	2.175		0.	Lane Width		45.	Two Points	1.93

a) Buldo –excavator New Holland 95B

General Vehicle Data

Vehicle name: 2.CR-P Units: KN, m, C



Load Plan

Load Elevation

Length Effects

Axle: None Modify/Show...

Uniform: None Modify/Show...

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		60.	Two Points	2.04
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		60.	Two Points	2.04
Fixed Length	3.2		0.	Lane Width		115.	Two Points	1.827
Variable Length	1.38	1.38	0.	Lane Width		115.	Two Points	1.827

b) Autocamion Roman de 16 tone încărcat

General Vehicle Data

Vehicle name: 3.AM-26.403 Units: KN, m, C



Load Plan

Load Elevation

Length Effects

Axle: None Modify/Show...

Uniform: None Modify/Show...

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		77.45	Two Points	2.04
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		77.45	Two Points	2.04
Fixed Length	3.9		0.	Lane Width		77.45	Two Points	1.827
Variable Length	1.38	1.38	0.	Lane Width		0.	Two Points	2.04

c) Camion Roman TGL 26.403

General Vehicle Data

Vehicle name: 4.CR-G Units: KN, m, C



Load Plan

Load Elevation

Length Effects

Axle: None Modify/Show...

Uniform: None Modify/Show...

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		50.	Two Points	2.04
Leading Load	Infinite		0.	Lane Width		50.	Two Points	2.04
Fixed Length	3.2		0.	Lane Width		40.	Two Points	1.827
Variable Length	1.38	1.38	0.	Lane Width		40.	Two Points	1.827

d) Camion Roman de 16 tone gol

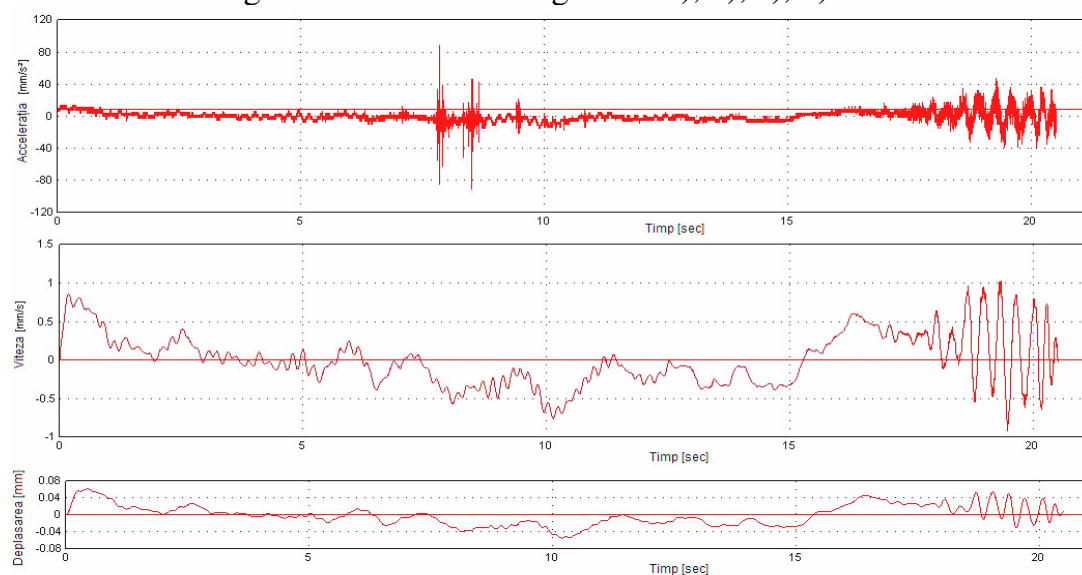
Figura 11.a),b),c),d) Prezentarea vehiculelor și modul de definire în program ca și vehicule generale

6.Rezultate

Podul considerat a fost modelat cu acuratețe pentru analiză dinamică, pentru a ajuta la compararea rezultatelor experimentale.

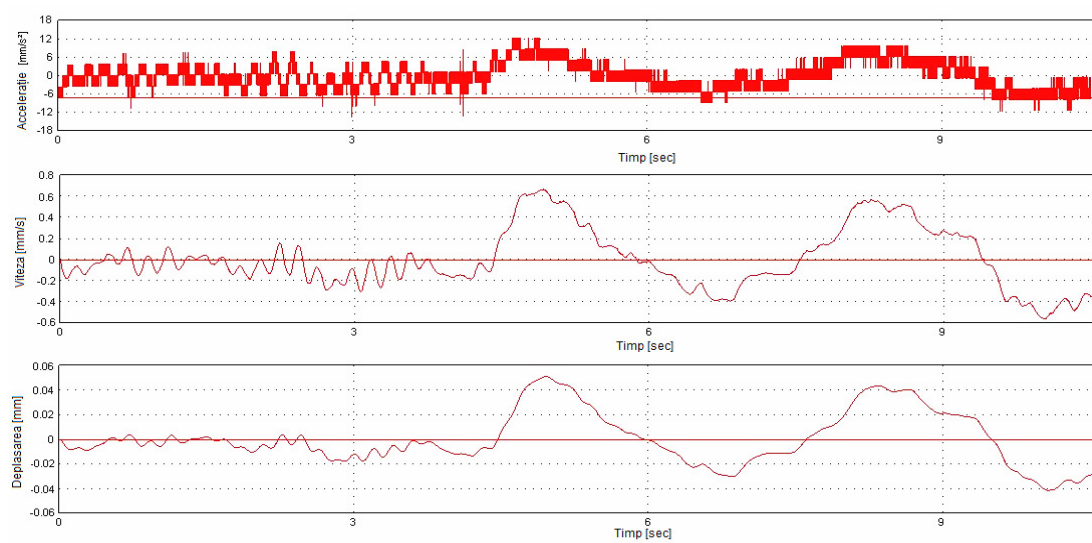
După efectuarea testelor dinamice, datele au fost prelucrate pentru a extrage frecvențele, și formele modale. [3]

În urma analizei modale operaționale, pornind de la accelerațiile înregistrate, s-au determinat vitezele și deplasările punctelor. Accelerațiile, vitezele și deplasările maxime/minime înregistrate sunt date în Figura 12 a), b), c), d).

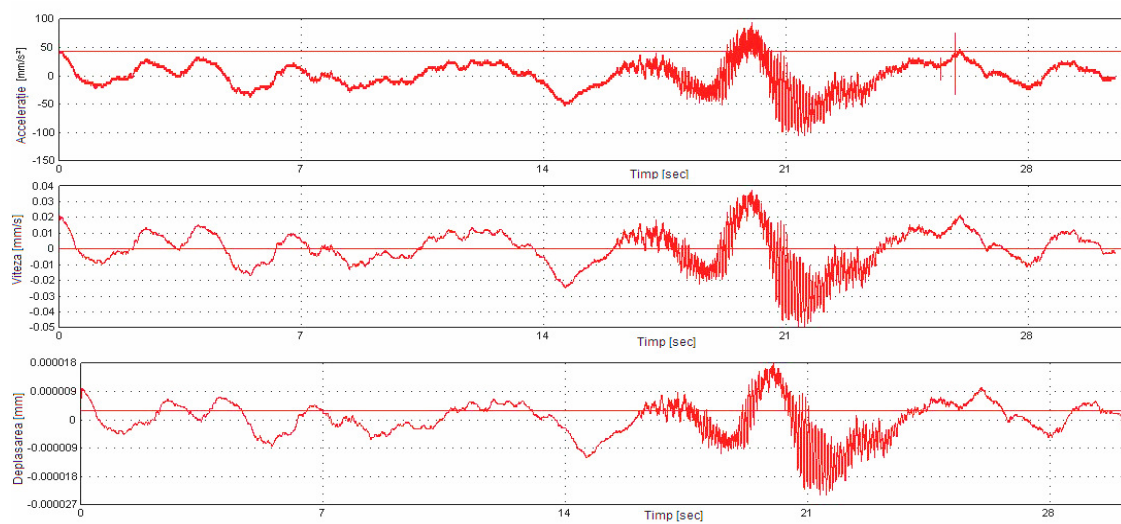


a) Accelerația, viteza, deplasarea - Buldo –excavator New Holland 95B

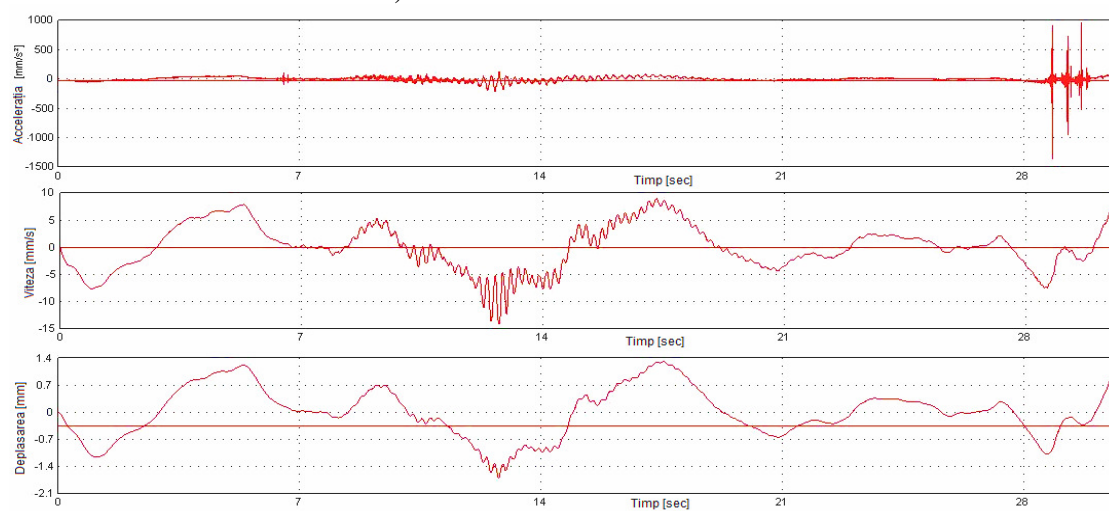
Analiza dinamică a unui pod oblic



b) Accelația, viteza, deplasarea - Autocamion Roman de 16 tone încărcat



c) Camion Roman TGL 26.403



d) Camion Roman de 16 tone gol
Figura 12. Accelația, viteza, deplasarea

În programul utilizat există mai multe opțiuni pentru analiza cu încărcări mobile din vehicule. Cazurile de încărcări mobile calculează liniile de influență pentru un număr diferit de vehicule și rezolvă toate permutațiile vehiculelor pe bandă pentru a obține răspunsul minim și maxim. [4]

Cazul de încărcare dinamică cu mai mulți pași (integrare directă în funcție de timp) a fost folosit pentru a analiza vehiculele care se mișcă pe pod cu o viteză specificată. Aceste cazuri de încărcare sunt definite folosind modele speciale de încărcări mobile care definesc direcția, timpul de început și viteza vehiculului ce traversează podul.

În Figura 13 sunt prezentate fiecare vehicul cum este reprezentat în program, în timp ce trec pe pod, pe forma deformată a acestuia.

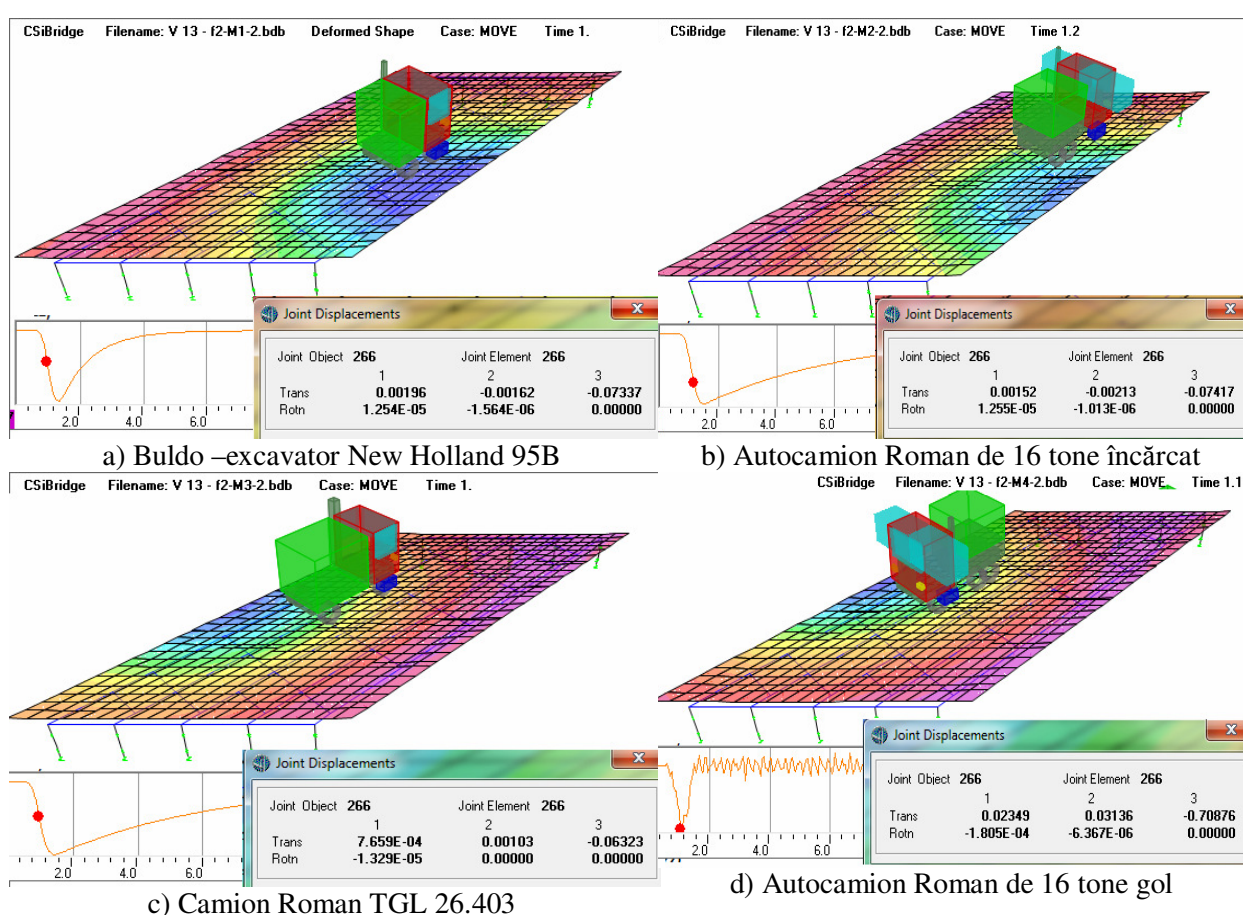


Figura 13 a), b), c), d) Forma deformată a podului în urma treceri vehiculelor

Deplasările maxime și minime determinate experimental (Figura 12) și cele determinate prin analiza modelului realizat în programul de calcul (Figura 13), pentru fiecare trecere a vehiculului, în direcțiile arătate în Figura 10, sunt date în Tabelul 1.

Deplasările minime și maxime determinate experimental și cele determinate în urma analizei modelului

Vehicul	Deplasarea minimă determinată experimental	Deplasarea maximă determinată experimental	Deplasarea determinată prin analiza modelului
Buldo –excavator New Holland 95B	-0,05422 mm	0,06167 mm	0,07347 mm
Autocamion Roman de 16 tone, încărcat	-0,04147 mm	0,05092 mm	0,07417 mm
Camion Roman TGL 26.403	-0,00002395 mm	0,00001797 mm	0,06323 mm
Autocamion Roman de 16 tone, gol	-1,689 mm	1,303 mm	0,70876 mm

Primele două vehicule(Buldo –excavator New Holland 95B și Autocamionul Roman de 16 tone încărcat) au trecut la o diferență de 23 de minute unul față de celălalt în momentul în care accelerometrul era amplasat în punctul M1(Figura 8).

După ce accelerometrul a fost mutat în punctul M2(Figura 8) a trecut cel de al treilea vehicul(Camion Roman TGL 26.403) foarte aproape de accelerometru, de aceea citirile înregistrate au valorile foarte mici.

Cel de al patrulea vehicul(Autocamion Roman de 16 tone gol) a trecut la o diferență de doar 5 minute față de vehiculul precedent astfel valoarea deplasări este mai mare.

7.Concluzii

Modelul realizat cu element finit oferă o bună corespondență pentru rezultatele experimentale.

Tabelul 1 compară rezultatele deplasărilor, determinate în urma treceri vehiculelor pe pod cu cele determinate

Tehnica de analiză modală folosită în această cercetare este simplă și ieftină, în comparație cu alte proceduri. De asemenea testarea dinamică nu necesită piese mari de echipament cum ar fi camioane pentru testare sau alte echipamente.

Efectul temperaturii ar trebui luat în considerare, testând același pod în momente diferite ale anului ar putea da rezultate diferite, în special pentru structuri static nedeterminate.

Senzori pot fi montați pe talpa inferioară a grinzilor, reducând impactul asupra traficului, prin închiderea temporară a traficului pe pod în timpul testării.

Pe termen lung evaluarea prin testare dinamică periodică poate oferi o perspectivă asupra relației dintre modificările parametrilor modali și starea podurilor. Fluctuațiile în parametri modali datorate modificărilor în structura sunt de așteptat să fie mici.

Acest experiment a incorporat un singur pod, însă pentru a evalua pe deplin procedura de testare, mai multe poduri de lungimi diferite, cu una sau mai multe deschideri și cu diferite oblicități ar trebui testate.

Referințe

- [1.]***http://www.academia.edu/1401822/Estimating_Bridge_Fundamental_Frequency_from_Vibration_Response_of_Instrumented_Passing_Vehicle_Analytical_and_Experimental_Study
- [2.]***<http://researchrepository.ucd.ie/bitstream/handle/10197/2552/Theoretical.pdf?sequence=1.pdf>
- [3.]***<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.6.3031&rep=rep1&type=pdf>.
- [4.]***http://www.ce.wsu.edu/TRAC/Publications_Reports/FHWA%20Tacoma_Narrows_FinalAnalysisReport.pdf.
- [5.]***<http://www.brimos.com/Brimos/HTML/downloads/Publications/MS7%20Wenzel%20FULL.pdf>.

NOTA: Aceasta lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul " Creșterea calității studiilor doctorale în științe inginerești pentru sprijinirea dezvoltării societății bazate pe cunoaștere", contract: POSDRU/107/1.5/S/78534, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.