**UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI”
DIN IAŞI, FACULTATEA DE MECANICĂ**

Bld. Prof. Dr. Doc. Dimitrie Mangeron, 67, Iași, România

CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MASEI ȘI VITEZEI VEHICULELOR ASUPRA DEPLASĂRILOR PODURILOR

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Autor,
Ing. Adi - Mihăiță VELNICIUC

Conducător de doctorat,
Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Carmen BUJOREANU

IAȘI, 2025

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAŞI

R E C T O R A T U L

Către

_____

_____

Vă facem cunoscut că, în ziua de **06.06.2025** la ora **11,30** în **Sala de conferințe Cezar Oprișan (M3) A Facultății de Mecanică**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

"CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MASEI ȘI VITEZEI VEHICULELOR ASUPRA DEPLASĂRILOR PODURILOR"

elaborată de domnul **ING. ADI - MIHĂIȚĂ VELNICIUC** în vederea conferirii titlului ştiinţific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. **Prof. Univ. Dr. Ing. Corneliu MUNTEANU** — preşedinte
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași
2. **Prof. Univ. Dr. Ing. BUJOREANU Carmen** — conducător de doctorat
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași
3. **Prof. Univ. Dr. Ing. Anton HADĂR** — referent oficial
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
4. **Prof. Univ. Dr. Ing. Ilie MUSCĂ** — referent oficial
Universitatea „Ștefan cel Mare" din Suceava
5. **Prof. Univ. Dr. Ing. Paul Doru BÂRSĂNESCU** — referent oficial
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași

Cu această ocazie vă invităm să participaţi la susţinerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof.univ.dr.ing. Dan Caşcaval

Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagîț

Cuvânt înainte

Tema abordată în lucrarea de doctorat este de importanță și actualitate în contextul infrastructurii moderne, unde siguranța și durabilitatea construcțiilor sunt esențiale pentru funcționarea eficientă a rețelelor de transport.

Motivația alegerii acestui subiect provine din nevoia de a înțelege efectul pe care îl produce masa și viteza vehiculelor asupra deplasărilor podurilor. Studiul acestor parametri este cu atât mai relevant într-un context în care vehiculele moderne au tendința de a fi mai grele și mai rapide, ceea ce poate genera efecte semnificative asupra structurilor de rezistență.

Teza urmărește dezvoltarea și aplicarea unor metode analitice și experimentale pentru evaluarea deplasărilor resimțite de poduri sub influența vehiculelor cu diverse caracteristici de masă și viteză. Printr-o abordare interdisciplinară, lucrarea aduce contribuții semnificative atât în domeniul ingineriei mecanice, cât și al ingineriei structurale în România.

Pe parcursul acestei cercetări, sunt prezentate rezultatele unor investigații complexe, realizate atât în laborator, cât și pe teren. Analizele includ utilizarea de metode numerice avansate, precum și interpretarea datelor obținute din monitorizarea structurală pe teren pe teren.

Această teză își propune nu doar să contribuie la înțelegerea teoretică a problemelor abordate, ci și să ofere soluții aplicabile în practică. Rezultatele obținute pot servi drept bază pentru elaborarea unor standarde și reglementări tehnice care să sprijine dezvoltarea durabilă a infrastructurii.

Rezultatele prezentate în această teză au fost posibile datorită îndrumării și sprijinului constant pe parcursul întregului proces de cercetare. În acest sens, îmi exprim profunda recunoștință față de doamna Prof. Hab. Dr. Ing. Carmen BUJOREANU, a cărei coordonare remarcabilă și expertiză deosebită au contribuit semnificativ la desfășurarea acestui demers științific.

De asemenea, sunt recunoscător domnului Șef lucrări Gheorghiță BOACĂ pentru sprijinul constant și pentru încrederea acordată în abordarea interdisciplinară a tezei, ce a integrat aspecte ale ingineriei mecanice și civile. Apreciez, totodată, sprijinul științific și contribuțiile tehnice valoroase ale doamnei Conf. Dr. Ing. Ana TUFESCU și doamnei Șef lucrări Maria SCUTARU, care au avut un rol important în dezvoltarea acestei lucrări.

Mulțumiri speciale le adresez membrilor comisiei de îndrumare și profesorilor referenți oficiali, pentru analiza riguroasă, sugestiile constructive și sprijinul oferit în procesul de evaluare a tezei.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc mamei mele, soției și prietenilor pentru răbdarea, încurajarea și susținerea necondiționată, care au fost fundamentale în depășirea provocărilor acestui parcurs academic.

Această lucrare este dedicată tuturor celor care împreună contribuie la progresul științei și tehnologiei.

Cuprins

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind sistemul vehicul pod 1
1.1 Scurt istoric 1
1.2 Elemente constructive 1
1.3 Clasificare poduri 2
1.4 Tipuri de solicitări care apar pe poduri 2
1.5 Vehicule (introducere, clasificare) 3
1.6 Interacțiunea vehicul-pod 4
1.6.1 Cercetări relevante în domeniul studiat 4
1.6.2 Concluzii si obiective 6
Capitolul 2. Dinamica podurilor 8
2.1 Metode de încărcare a podurilor în regim dinamic 8
2.1.1 Încărcarea dinamică a podurilor cu ajutorul convoaielor de probă 8
2.1.2 Încărcarea dinamică a podurilor cu ajutorul instalațiilor de produs vibrații 9
2.2 Echipamente de măsură folosite în regim dinamic 9
2.2.1 Echipamente pentru măsurarea deplasărilor 9
2.2.2 Echipamente pentru măsurarea deformațiilor specifice 9
2.2.3 Echipamente pentru măsurarea accelerațiilor 10
Capitolul 3. Influența masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor podurilor. Modelare teoretică 11
3.1 Materiale și metode 11
3.2 Introducere în dezvoltarea modelului teoretic 12
3.3 Modelul cinematic al subsistemului vehiculului 12
3.4 Reprezentarea dinamică a subsistemului podului. 14
3.4.1 Stabilirea condițiilor de compatibilitate pentru deplasare între vehicul și pod 15
3.4.2 Construirea modelului complet vehicul-pod 16
3.5 Rezultate și discuții 18
3.6 Concluzii 23
Capitolul 4. Elaborarea machetei metalice a podului peste Siret la Mircești pentru teste experimentale 24
4.1 Proiectarea machetei 24
4.2 Debitarea pieselor metalice 24
4.3 Asamblarea machetei 25
Capitolul 5. Rezultate experimentale proprii obținute pe macheta realizată 27
5.1 Metodologia pentru evaluarea variațiilor accelerațiilor în funcție de masa și vitezei vehiculelor 27
5.2 Scenarii de analiză 30

5.3 Rezultate experimentale obținute 32
5.4 Concluzii 35
5.5 Metodologia pentru evaluarea variațiilor deplasărilor în funcție de masa și vitezei vehiculelor 35
5.6 Scenarii de analiză 37
5.7 Rezultate experimentale obținute 38
5.8 Concluzii 43
Capitolul 6. Analiză cu elemente finite pe modelul machetei realizate 44
6.1 Prezentarea modelului și a metodologiei utilizate 44
6.2 Scenarii de analiză 47
6.3 Rezultate obținute 47
6.4 Concluzii 49
Capitolul 7. Analiză în situ pe podul de peste Siret de la Mircești 50
7.1 Prezentarea podului 50
7.2 Echipamentele pentru măsurarea accelerațiilor si deplasărilor podului în situ 51
7.3 Amplasarea instalației experimentale 55
7.4 Scenarii de analiză 59
7.5 Determinarea accelerațiilor podului în situ 60
7.6 Concluzii 63
7.7 Determinarea deplasărilor podului în situ 64
7.8 Concluzii 65
Capitolul 8. Validarea modelului teoretic 68
8.1. Comparații între rezultatele obținute pentru deplasări prin modelarea teoretică dezvoltată în Matlab și încercările experimentale realizate pe podul de la Mircești 68
8.2 Concluzii 69
8.3. Comparații între rezultatele obținute pentru deplasări prin metoda elementelor finite și încercările experimentale pe macheta metalică a podului de la Mircești 70
8.4 Concluzii 71
Capitolul 9. Concluzii finale, contribuții personale și direcții de viitoare cercetare 72
9.1 Concluzii finale 72
9.2 Contribuții personale 73
9.3 Direcții viitoare de cercetare 74
Bibliografie selectivă 76
Listă de lucrări 79

Structura și conținutul tezei

În primul capitol este oferită o sinteză amplă a stadiului actual al cercetărilor privind interacțiunea vehicul–pod. Este analizată evoluția istorică a construcțiilor de poduri, cu accent pe materialele utilizate și pe transformările tehnologice relevante. Se evidențiază elementele constructive esențiale ale podurilor, clasificarea acestora după diverse criterii, precum și tipurile de solicitări mecanice la care sunt supuse. Capitolul introduce o clasificare a vehiculelor în funcție de masă și viteză, reliefând importanța acestor parametri în interacțiunea dinamică vehicul–pod. Sunt prezentate direcțiile de cercetare relevante din literatura de specialitate, iar la final sunt formulate concluziile și obiectivele tezei.

Capitolul 2 detaliază metodele de încărcare dinamică ale podurilor (cu convoaie de probă sau instalații de vibrații), precum și echipamentele de măsurare a răspunsurilor structurale (deplasări, deformații specifice, accelerații). Se subliniază importanța unei evaluări dinamice corecte în contextul interacțiunii vehicul–pod, pentru a surprinde efectele reale ale traficului asupra comportamentului structural.

Capitolul 3 dezvoltă un model teoretic al sistemului vehicul–pod, integrând reprezentările cinematice și dinamice ale ambelor subsisteme. Sunt stabilite condițiile de compatibilitate dintre vehicul și pod, iar modelul rezultat este analizat prin simulări numerice realizate în programul Matlab. Rezultatele simulărilor evidențiază o corelație directă între creșterea masei și vitezei vehiculului și deplasările podului. Discuțiile se concentrează pe validitatea modelului și pe utilitatea sa în evaluarea comportamentului dinamic al podurilor.

Capitolul 4 prezintă procesul de realizare a unei machete metalice a podului de la Mircești, utilizată pentru teste experimentale. Sunt detaliate etapele de proiectare, debitare și asamblare a componentelor metalice. Scopul este de a crea un model experimental fidel pentru testarea influenței masei și vitezei vehiculelor în condiții controlate.

Capitolul 5 prezintă metodologia și rezultatele testelor experimentale realizate pe macheta podului. Sunt propuse mai multe scenarii de analiză, în cadrul cărora sunt investigate variațiile accelerațiilor și deplasărilor în funcție de masa și viteza vehiculelor. Rezultatele obținute confirmă ipotezele teoretice și evidențiază influența semnificativă a acestor factori asupra răspunsului dinamic al podului. Analizele sunt însoțite de concluzii relevante pentru validarea modelului teoretic.

Capitolul 6 descrie aplicarea metodei cu elemente finite pentru analiza comportamentului structural al machetei în condiții de încărcare statică. Modelarea numerică este realizată cu ajutorul programului CATIA V5R19, iar simulările sunt efectuate pe baza unor scenarii de încărcare similare celor din testele experimentale. Rezultatele evidențiază influența masei vehiculului asupra deplasărilor podului și confirmă comportamentul observat în testele experimentale.

Capitolul 7 documentează o serie de măsurători realizate direct pe podul real. Sunt descrise echipamentele utilizate, configurația instalației experimentale și scenariile de analiză pe teren. Sunt prezentate rezultate privind accelerațiile și deplasările înregistrate în timpul trecerii vehiculelor, fiind identificate corespondențe semnificative cu datele teoretice și experimentale anterioare. Acest demers confirmă aplicabilitatea modelului teoretic și a machetei în evaluarea comportamentului structural al podurilor reale.

Capitolul 8 compară rezultatele obținute prin modelarea teoretică (realizată în Matlab) și prin metoda elementelor finite cu datele experimentale din laborator și de pe teren. Validările demonstrează o bună corespondență între model și realitate, confirmând capacitatea modelului de a anticipa comportamentul dinamic al podurilor sub influența vehiculelor. Se subliniază importanța combinării abordărilor teoretice și experimentale pentru o evaluare riguroasă.

Capitolul 9 sintetizează concluziile generale ale cercetării, evidențiind principalele contribuții originale: realizarea machetei experimentale, dezvoltarea modelului teoretic, aplicarea metodelor numerice și efectuarea testelor in situ. Sunt propuse direcții viitoare de cercetare, printre care extinderea studiului asupra altor tipuri de poduri, utilizarea unor metode avansate de monitorizare structurală și dezvoltarea unor modele predictive adaptate la trafic mixt sau la poduri cu geometrii complexe.

În cadrul acestei cercetări, instrumentarea și analizele au fost susținute de utilizarea unor aplicații software specializate, esențiale pentru desfășurarea etapelor teoretice și experimentale. Astfel, procesarea datelor, modelarea matematică, proiectarea asistată de calculator și simularea numerică s-au realizat cu ajutorul unor programe consacrate, fiecare având un rol distinct în obținerea rezultatelor. Aceste aplicații sunt următoarele: SolidWorks 2023, AutoCAD 2021, Catia V5R19, Microsoft Excel 2019, Matlab R2018b, SensorTool și SensorConnect .

Introducere

Siguranța podurilor reprezintă un aspect critic al infrastructurii moderne, esențial pentru menținerea conectivității și mobilității între diferite regiuni. Podurile nu sunt doar creații inginerești, ci și componente vitale ale rețelelor de transport care facilitează tranzitul zilnic al vehiculelor, mărfurilor și persoanelor. În acest context, influența masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor podurilor devine un factor esențial în evaluarea durabilității și siguranței acestora. Neglijarea acestor aspecte poate conduce la consecințe grave, inclusiv pierderi de vieți omenești și dezastre majore pentru infrastructură.

Masa vehiculelor este un parametru critic care influențează semnificativ integritatea structurală a podurilor. Vehiculele de mare tonaj, cum ar fi camioanele de transport și vehiculele industriale, exercită o presiune considerabilă asupra suprafeței podului. Această presiune, distribuită neuniform, poate duce la deformații ale materialelor de construcție, cum ar fi betonul armat și oțelul. De-a lungul timpului, aceste deformații pot evolua în fisuri și defecte structurale majore. În cazul podurilor mai vechi sau a celor construite cu tehnologii depășite, capacitatea de a suporta mase mari poate fi limitată, ceea ce sporește riscul de avarie structurală.

Viteza vehiculelor reprezintă un alt factor important care afectează siguranța podurilor. Vehiculele care traversează un pod la viteze mari induc vibrații și forțe dinamice asupra structurii. Aceste forțe dinamice pot amplifica efectele încărcăturii statice și pot accelera procesul de oboseală a materialelor. În plus, frânarea bruscă sau accelerarea vehiculelor pe suprafața podului pot genera tensiuni suplimentare, care contribuie la degradarea structurală. În mod special, în condiții de trafic intens, unde vitezele vehiculelor variază constant, efectele cumulate ale acestor forțe dinamice pot deveni semnificative.

Deplasările structurale provocate de masa și viteza vehiculelor pot avea multiple manifestări, de la fisuri minore în beton până la deformații severe ale elementelor de susținere. Aceste deplasări, dacă nu sunt monitorizate și remediate în timp util, pot duce la scăderea capacității portante a podului. În cazul unor deplasări critice, riscul de prăbușire devine iminent.

Pe lângă pierderile umane și economice, deteriorarea podurilor implică și costuri ridicate de reparație și reconstrucție. Procesul de reparare a unui pod avariat necesită resurse financiare considerabile și poate dura luni sau chiar ani, în funcție de severitatea avariei. În plus, este necesară mobilizarea echipelor de ingineri, muncitori și echipamente specializate, ceea ce pune presiune suplimentară pe autoritățile locale și pe bugetele acestora.

În contextul creșterii constante a traficului și a evoluției tehnologiei vehiculelor, modernizarea și întărirea podurilor existente devine o necesitate. În multe cazuri, podurile construite cu zeci de ani în urmă nu au fost proiectate pentru a suporta masele și vitezele vehiculelor moderne. Prin urmare, este esențială actualizarea acestor structuri pentru a le aduce la standardele contemporane de siguranță sau măcar intensificarea inspecțiilor periodice.

De asemenea, implementarea unor soluții pentru trafic, cum ar fi limitarea vitezei și restricționarea accesului vehiculelor de mare tonaj pe anumite poduri, poate contribui la reducerea riscului de deformare și avarie structurală.

Dată fiind importanța siguranței în exploatarea podurilor și influența directă a vitezei și masei vehiculelor asupra duratei de viață a acestor structuri, am considerat că studierea acestui subiect este de mare interes.

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind sistemul vehicul pod

1.1 Scurt istoric

Primele poduri erau structuri rudimentare construite din materiale naturale precum lemnul și piatra. Acestea erau adesea utilizate pentru a traversa râuri mici sau ravene și nu erau foarte durabile.

Secolul XX a fost martorul unor inovații continue în construcția de poduri. Introducerea betonului precomprimat și a betonului armat a permis construirea de structuri mai rezistente și mai durabile. Podurile de oțel au continuat să evolueze, iar noile tehnici de construcție, cum ar fi utilizarea prefabricatelor, au simplificat și accelerat procesul de construcție.

În prezent, construcția de poduri este marcată de utilizarea materialelor avansate și de tehnici de proiectare inovatoare, permițând realizarea unor structuri mai durabile, eficiente și estetice. Materialele compozite și betonul ultra-performant oferă durabilitate și flexibilitate, îmbunătățind performanțele podurilor (Kim et al., 2013), iar oțelul de înaltă rezistență reduce costurile și îmbunătățește rezistența la oboseală (Kuhlmann et al., 2020).

Concluzie

Evoluția podurilor reflectă progresul tehnologic și ingineresc al civilizațiilor umane. De la primele structuri simple din lemn și piatră, până la podurile complexe și elegante ale zilelor noastre, fiecare etapă a adus inovații semnificative care au permis construirea de poduri mai mari, mai rezistente și mai eficiente. Aceste inovații au fost posibile datorită dezvoltării materialelor, avansurilor în teoria structurală și metodelor de construcție, precum și necesității de a depăși provocările geografice și economice.

1.2 Elemente constructive

Componentele principale ale podurilor se împart în mod general în două mari categorii, suprastructura și infrastructura.

Suprastructura este partea podului care suportă sarcina generată de trafic și o transferă către structura de susținere.

Infrastructura este partea podului reprezentată de culei și pile care susțin suprastructura și transferă sarcina către fundație.

Pe lângă elementele principale, există componente suplimentare esențiale pentru funcționalitatea și durabilitatea podului:

- *componente de mobilitate structurală*
- *elemente de monitorizare și izolare seismică*
- *sisteme de îmbinare*
- *materiale de construcție*

Concluzie

Componentele unui pod sunt interconectate și fiecare joacă un rol esențial în asigurarea funcționării sigure și eficiente a structurii. Integrarea și întreținerea adecvată a acestor componente sunt critice pentru longevitatea și performanța podurilor.

1.3 Clasificare poduri

O clasificare a podurilor este prezentată în Tab. 1.1 după criterii precum: scopul constructiv, mărimea acestora, materiale constructive, structura de rezistență, tipul de deschidere și durata de utilizare.

Tab. 1.1 - Clasificarea podurilor (Răcănel, 2007; Aziz, 2019)

Metoda de clasificare	Exemple
Scopul constructiv	Rutiere
	Feroviare
	Pietonal
	Conducte
	Combinate
Mărime	Mici - deschidere cuprinsă maximă de 20 m
	Medii - deschidere cuprinsă între 20 și 50 m
	Mari - deschiderea cea mai mare are între 50 și 100 m
	Foarte mari - o deschidere de peste 100m cel puțin
Materiale constructive	Lemn
	Cărămidă
	Piatră
	Oțel
	Beton armat
	Mixte
Structura de rezistență	Grinzi
	Grinzi cu zăbrele
	Grinzi casetate
	Arce și bolți
	Dale
	Cadre
	Cabluri
Tipul de deschidere	Fixă
	Mobilă
Durata de utilizare	Temporară
	Permanentă

Concluzie

Clasificarea podurilor după criteriile prezentate în tabelul de mai sus oferă o viziune cuprinzătoare asupra diversității și complexității acestora. Fiecare categorie reflectă adaptări specifice pentru a răspunde diferitelor cerințe tehnice și funcționale ale infrastructurii moderne.

1.4 Tipuri de solicitări care apar pe poduri

Podurile sunt întotdeauna supuse la diferite tipuri de solicitări, care pot fi împărțite în trei mari categorii: solicitări pe direcție verticală, solicitări pe direcție transversală și solicitări pe direcție longitudinală prezentate în Tab. 1.2 (Aziz, 2019; Velniciuc, 2023).

Pentru prima categorie, reprezentative sunt sarcinile statice și dinamice. A doua categorie este descrisă prin sarcini precum, vânt, cutremure, forțe centrifugale și șocurile laterale.

Tab. 1.2 - Solicitări pe poduri (Aziz, 2019; Velniciuc, 2023)

Metoda de clasificare	Exemple
Solicitări pe direcție verticală	Sarcini statice
	Sarcini dinamice
Solicitări pe direcție transversală	Vântul
	Cutremure
	Șoc lateral
	Forțe centrifugale
Solicitări pe direcție longitudinală	Vântul
	Cutremure
	Frânarea/accelerarea
	Variații de temperatură

Solicitările pe direcție longitudinală sunt adesea descrise prin sarcini precum, cutremure, vânt, frânarea-accelerarea și variațiile de temperatură (Aziz, 2019; Velniciuc 2023).

Concluzie

Toate sarcinile și factorii prezentați mai sus joacă un rol critic în gradul de fiabilitate al podului. Cunoașterea acestor sarcini joacă un rol semnificativ în dimensionarea podurilor. Luând în considerare toți acești factori, constructorul poate efectua diverse simulări pentru a identifica și contracara secțiunile periculoase ale structurii. Prin aceste acțiuni, se asigură siguranța în exploatare a podurilor.

1.5 Vehicule (introducere, clasificare)

Vehiculele reprezintă unul dintre cele mai importante mijloace de transport, influențând în mod direct dezvoltarea economică și socială a societății. Diversitatea tipurilor de vehicule este impresionantă, de la vehicule mici și rapide, cum ar fi autoturismele, până la vehicule grele și lente, precum camioanele și vehiculele agricole. Clasificarea vehiculelor se face după diferite criterii.

După ***masă*** vehiculele se clasifică în:

- *vehicule ușoare - această categorie include vehicule precum autoturismele și motocicletele. Acestea au o masă redusă, de obicei sub 3,5 tone, și exercită o sarcină mică asupra structurilor podurilor.*
- *vehicule medii* - acestea includ vehiculele utilitare ușoare și vehiculele de pasageri de dimensiuni medii, cum ar fi microbuzele și camionetele. Masa lor variază între 3,5 și 12 tone.
- *vehicule grele* - acestea sunt camioane, autobuze și alte vehicule grele care depășesc 12 tone.

După ***viteză*** vehiculele se clasifică în:

- *vehicule lente - acestea includ vehiculele agricole, mopede și unele vehicule utilitare, care exercită o sarcină redusă asupra podurilor datorită vitezei limitate.*
- *vehicule de viteză medie - această categorie include majoritatea autoturismelor și vehiculele comerciale.*

- *vehicule rapide* - sunt vehicule de înaltă performanță.

Interacțiunea vehiculelor cu podurile este o problemă complexă care implică atât aspecte tehnice, cât și de siguranță. Masa și viteza vehiculelor influențează direct designul podurilor, în special în ceea ce privește materialele folosite, metodele de construcție și strategiile de întreținere.

Concluzie

Clasificarea vehiculelor după masă și viteză este esențială pentru înțelegerea și gestionarea interacțiunii acestora cu podurile.

1.6 Interacțiunea vehicul-pod

Interacțiunea dintre vehicul și pod reprezintă o problemă complexă, care implică fenomene dinamice rezultate din mișcarea vehiculelor pe structurile podurilor. Această relație este determinată de factori precum masa, viteza, accelerația și suspensia vehiculelor, alături de proprietățile structurale ale podurilor, inclusiv rigiditatea, capacitatea de amortizare și frecvențele proprii. Literatura de specialitate evidențiază o gamă largă de studii care analizează această problematică prin diverse metode precum: ***metode numerice*** (Duan & Yang, 2013; Chen et al., 2016; Jiguo & Guihua, 2018; Lingbo et al., 2015; Cao et al., 2024; Esmailzadeh & Jalili, 2003; Gonzalez & Mohammed, 2018; Qingfei et al., 2014; Chul et al., 2003; Liao et al., 2017; Jingsheng et al., 2021; Daihai et al., 2021; Kwatani & Kim, 2001; Yin, 2015; Wu & Dai, Henchi & Fafard, 1997; Haoyu et al., 2009; Michaltsos et al., 1996; Liu & Li, 2013; Eshkevari et al., 2020; Brady & O'Brien, 2006; Akin & Mofid, 1989; Zhang & Xia, 2013), ***combinații între metode experimentale și cele numerice*** (Sun et al., 2021; Wang & Nagayama, 2022; Scutaru, 2019; Oskar, 2012; Deshan et al., 2013; Green et al., 1994; Hwang & Nowak, 1991) **și *metode experimentale in situ*** (Ghindea et al., 2013; Scutaru et al., 2019; Ashebo, 2006; Gara et al., 2020).

Aceste cercetări explorează în detaliu dinamica vehicul-pod și contribuie la dezvoltarea modelelor predictive și a strategiilor de monitorizare a stării structurale. În cele ce urmează, vom analiza o serie de lucrări științifice relevante, evidențiind avantajele și limitările metodologiilor utilizate de diverși autori. Scopul acestei analize este de a identifica lacunele existente în literatura de specialitate, de a sublinia necesitatea unor cercetări suplimentare și de a propune direcții de cercetare care să contribuie la o mai bună înțelegere a fenomenului de interacțiune dintre vehicule și poduri cu focus pe influența masei și vitezei vehiculelor. Această abordare va facilita o perspectivă asupra problematicii și va fundamenta necesitatea dezvoltării unor noi abordări în domeniu.

1.6.1 Cercetări relevante în domeniul studiat

Duan și Yang (2013), prezintă modelarea și simularea unui sistem pod-vehicul în interacțiune, concentrându-se pe vibrațiile cuplate dintre aceste două subsisteme.Lucrarea oferă o perspectivă valoroasă asupra fenomenului de vibrații cuplate pod-vehicul, contribuind la înțelegerea interacțiunii complexe dintre cele două subsisteme. Deși metodologia este bine fundamentată, ar fi benefică o validare experimentală suplimentară a modelului, precum și o discuție mai amplă asupra aplicabilității acestuia în condiții reale.

Chen et al. (2016), au realizat o analiză a trei tipuri de modele de vibrație cuplată vehicul-pod, folosind o abordare comparativă între diferite modele matematice pentru a evalua comportamentul dinamic al sistemului vehicul-pod. Lucrarea prezintă informații valoroase privind influența vitezei asupra podurilor dar ar necesita teste experimentale pentru a valida concluziile formulate de către autori.

În ceea ce privește abordările cu elemente finite, **Jiguo & Guihua** (2018) explorează analiza vibrațiilor cuplate în sistemul vehicul-pod. Lucrarea concluzionează că sistemul vehicul-pod este puternic influențat de variabilele analizate, inclusiv numărul și masa vehiculelor, precum și distanța și viteza acestora. Modelul numeric propus, bazat pe dinamica cu vehicule multiple și metoda elementului finit, oferă o înțelegere profundă a interacțiunii dintre vehicule și poduri.

Tot cu ajutorul metodelor de analiză cu element finit, **Lingbo et al.** (2015) explorează analiza vibrațiilor unei structuri de pod continuu pe mai multe deschideri, supusă încărcărilor complexe de trafic și interacțiunii dinamice vehicul-pod. Studiul concluzionează că răspunsul dinamic al podurilor pe mai multe deschideri este sensibil la modificările de încărcare dinamică și la rigiditatea grinzilor, mai ales în condiții de trafic complexe.

O altă contribuție notabilă vine din partea lui **Cao et al.** (2024), care analizează cuplajul între vehicule și poduri în special pentru podurile curbe. În acest articol, un pod curb continuu din grinzi casetate cu trei deschideri a fost luat ca obiect de cercetare. Lucrarea concluzionează că răspunsul dinamic al podurilor curbe este semnificativ influențat de parametri precum raza de curbură, modul de constrângere și caracteristicile vehiculului.

Esmailzadeh & Jalili (2003), investighează comportamentul dinamic al unui pod traversat de vehicule în mișcare, incluzând dinamica ocupanților vehiculului. Articolul oferă o abordare riguroasă pentru analiza interacțiunii vehicul-pasager-pod, evidențiind importanța identificării vitezei critice pentru siguranța structurală a podurilor.

Încărcările dinamice generate de vehicule și influența pe care acestea o au sunt studiate de **Gonzalez & Mohammed** (2018), care investighează factorii dinamici de amplificare (DAF) și factorii dinamici de amplificare de frecvență (FDAF) pentru podurilor cu deschidere simplă în comparație cu podurile continue cu mai multe deschideri atunci când acestea sunt supuse încărcărilor de vehicule în mișcare. Lucrarea subliniază că factorii de amplificare dinamică nu depind doar de configurația podului, ci și de caracteristicile vehiculului și de rugozitatea drumului. În plus, s-a demonstrat că momentele negative pot necesita evaluări suplimentare, mai ales în structurile continue.

Folosind metode matematice **Qingfei et al.** (2014), abordează răspunsurile dinamice ale podurilor cu grinzi simple supuse încărcărilor dinamice generate de vehicule în mișcare. Studiul subliniază importanța utilizării unor metode de modelare detaliate și riguroase pentru analiza dinamică a podurilor rutiere, în special în contextul încărcărilor cu vehicule în mișcare. Metodologia propusă de autorii articolului, VBCVA, oferă o abordare eficientă pentru evaluarea performanțelor dinamice ale podurilor, contribuind astfel la elaborarea unor coduri de proiectare mai precise și mai adecvate cerințelor moderne.

O lucrare notabilă care explorează influența masei vehiculelor asupra frecvențelor naturale ale podurilor, măsurate în urma vibrațiilor induse de trafic este realizată de **Chul et al.** (2003). Lucrarea concluzionează că efectul masei vehiculului asupra frecvențelor naturale ale podurilor este dependent de tipul de structură și de masa vehiculului în raport cu masa podului.

O metodă inovatoare și eficientă pentru evaluarea capacității portante a podurilor cu grinzi, utilizând vehicule în mișcare este propusă de **Sun et al.** (2021). Lucrarea subliniază eficiența metodei propuse pentru evaluarea capacității portante a podurilor, fiind o alternativă practică și economică la testele statice tradiționale. Metoda propusă este deosebit de relevantă pentru podurile din mediul rural și pentru podurile supuse unor solicitări dinamice frecvente.

Vibrațiilor cuplate vehicul-pod sunt studiate de **Liao et al. (2017)** folosind o analiză numerică axându-se pe influența parametrilor care variază asupra răspunsului dinamic. Autorii subliniază importanța limitării vitezei vehiculului pe poduri, mai ales în cazul celor cu o configurație neregulată a drumului, pentru a preveni vibrațiile excesive și a asigura siguranța infrastructurii.

Similar, **Jingsheng et al. (2021)**, analizează impactul diferiților factori comuni asupra vibrațiilor cuplate între vehicule și poduri, axându-se pe efectele vitezei vehiculului și ale masei acestuia asupra răspunsului dinamic al podurilor. Lucrarea concluzionează că viteza și masa vehiculului sunt factori determinanți în răspunsul dinamic al podurilor, influențând atât deplasarea cât și accelerația structurilor. Considerarea neliniarităților geometrice este esențială pentru modelarea corectă a interacțiunii vehicul-pod, mai ales în cazul podurilor de deschidere mare și rigiditate redusă.

Un model inovator pentru estimarea nivelului de vibrație al podurilor indus de trecerea vehiculelor este elaborat de **Wang & Nagayama** (2022). Studiul concluzionează că modelul spectrului de răspuns oferă o metodă rapidă și practică pentru estimarea vibrațiilor podurilor, fiind util în special în proiectarea timpurie a podurilor expuse la sarcini dinamice frecvente.

Validările experimentale prezintă un factor important în confirmarea aplicabilității modelelor teoretice. De exemplu, **Ghindea et al.** (2013), prezintă analiza unei încercări dinamice realizate asupra unui pod rutier situat pe autostrada A2, traversând Canalul Dunăre-Marea Neagră, în contextul unei necesități de testare experimentală a structurilor pentru validarea comportamentului real al acestora. Articolul reprezintă o contribuție semnificativă demonstrând aplicabilitatea testelor experimentale pentru validarea comportamentului structural al podurilor.

1.6.2 Concluzii si obiective

Studiile existente oferă avantaje importante, incluzând metode inovatoare care permit o mai bună înțelegere a interacțiunii complexe dintre vehicule și poduri. Aceste contribuții reprezintă o bază esențială pentru extinderea cercetărilor și pentru abordarea unor aspecte insuficient explorate. Literatura de specialitate evidențiază progrese notabile în domeniul interacțiunii dintre vehicule și poduri, dar subliniază și existența unor lacune semnificative care limitează înțelegerea și aplicabilitatea cercetărilor actuale.

Un prim aspect problematic este reprezentat de validarea insuficientă a modelelor teoretice și numerice prin teste experimentale, ceea ce împiedică utilizarea acestora în condiții reale. Majoritatea studiilor se axează pe structuri standardizate, omogenizate, ignorând particularitățile podurilor vechi sau aflate în zone supuse unor condiții de trafic intens.

În contextul specific al României, analiza cuplajului vehicul-pod este insuficient dezvoltată comparativ cu alte țări. Nu există modele teoretice sau simulări numerice care să investigheze această interacțiune în regim dinamic, având în vedere limitele de viteză reglementate local și caracteristicile vehiculelor din punct de vedere al masei și vitezei. Astfel,

continuarea cercetărilor în acest domeniu este necesară pentru reducerea acestor lipsuri și pentru dezvoltarea unor soluții adaptate contextului național, contribuind la avansarea cunoașterii și la creșterea siguranței infrastructurii.

În acest sens, teza de doctorat are ca scop investigarea influenței masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor produse în structura podurilor.

Obiectivele principale ale cercetării includ:

- dezvoltarea unui model teoretic destinat analizei influenței masei și vitezei vehiculelor asupra comportamentului podurilor.
- proiectarea unei machete metalice la scară, reprezentând podul de la Mircești peste râul Siret, în conformitate cu proporțiile structurii reale.
- realizarea machetei metalice utilizând tehnologia de debitare cu laser, pentru a asigura o precizie ridicată și respectarea fidelă a cotelor dimensionale ale podului original.
- efectuarea de teste experimentale pe macheta construită pentru a analiza impactul masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor și accelerațiilor podului.
- realizarea unor analize de tip static prin metoda elementelor finite pe macheta metalică proiectată și executată la scara 1:25.
- organizarea unei serii de încercări pe teren în regim dinamic, direct pe podul de la Mircești, folosind vehicule având mase și viteze diferite, cu scopul de a măsura deplasările și accelerațiile generate în condiții reale pentru a identifica influența acestor parametri ai vehiculelor.
- validarea modelului teoretic.

Capitolul 2. Dinamica podurilor

În mod obișnuit, procesul de proiectare al structurilor destinate construcțiilor civile, industriale sau infrastructurii de transport, precum drumurile și podurile, utilizează numeroase ipoteze simplificatoare. Aceste ipoteze se referă la legile materialelor, tipologia și modul de aplicare al încărcărilor, precum și complexitatea modelelor de calcul.

În România, reglementările naționale privind testarea podurilor înainte de punerea în exploatare sunt relativ limitate. Necesitatea și importanța testelor dinamice și statice sunt diminuate de diverși factori, inclusiv cei de natură economică. Standardul STAS 12504 (STAS 12504, 1986) din reglementează testarea podurilor rutiere, de cale ferată și pietonale în România.

Comparativ cu standardele internaționale, cum ar fi ISO 18649 (ISO 18649, 2004), standardul românesc necesită actualizare pentru a se alinia cu cerințele contemporane ale pieței. Conform STAS 12504, încercările dinamice cu acțiuni de probă sunt recomandate pentru podurile care folosesc materiale noi, metode de calcul inovatoare, deschideri mari sau tehnologii de construcție avansate, sau pentru cele cu deschideri mai mari de 33 m.

În cazul podurilor rutiere, pentru amplificarea impactului, se recomandă utilizarea unor praguri artificiale, cum ar fi o scândură standard cu secțiunea de 4×30 cm și lungimea de 300 cm. Aceste praguri au rolul de a genera un șoc asupra podului, inducând oscilații libere și simulând defecte ale carosabilului pentru a evalua răspunsul structurii la încărcările de trafic (Ghindea et al., 2014).

2.1 Metode de încărcare a podurilor în regim dinamic

2.1.1 Încărcarea dinamică a podurilor cu ajutorul convoaielor de probă

O metodă eficientă pentru generarea unei acțiuni dinamice asupra podurilor implică utilizarea convoaielor de vehicule care traversează structura la diverse viteze.

Indiferent de tipologia podului, vehiculele de probă trebuie să traverseze structura la viteze variate, de la 10 km/h până la viteza maximă admisă pe pod. Aceste vehicule trebuie să mențină o viteză constantă pe toată lungimea podului sau între rosturile tronsonului monitorizat (Ghindea et al., 2014).

Pentru podurile rutiere, convoaiele de probă sunt formate din camioane încărcate cu balast. Fig. 2.1 arată un camion de probă trecând peste un prag artificial, utilizat pentru a induce o acțiune de tip șoc, iar Fig. 2.2 ilustrează un convoi de probă compus din două camioane care rulează în paralel (Ghindea et al., 2014).

Fig. 2.1 - Detaliu la trecerea camionului peste pragul de lemn (Ghindea et al., 2014)

Fig. 2.2 - Convoi de probă realizat din două camioane de 40 t în timpul încercării dinamice (Ghindea et al., 2014)

2.1.2 Încărcarea dinamică a podurilor cu ajutorul instalațiilor de produs vibrații

Instalațiile destinate generării vibrațiilor se clasifică în funcție de tipul de acțiune indusă. Astfel, există instalații pentru inducerea vibrațiilor forțate în regim staționar și instalații pentru generarea de acțiuni dinamice de tip șoc (Ghindea et al., 2014).

Dispozitivele pentru inducerea vibrațiilor forțate se diferențiază prin tehnologia utilizată. Acestea includ dispozitive servo-hidraulice, mecanice și electro-dinamice.

Echipamentele specializate pentru inducerea șocurilor includ atât dispozitive artizanale, cât și dispozitive profesionale.

2.2 Echipamente de măsură folosite în regim dinamic

Echipamentele de măsurare utilizate în încercările dinamice ale podurilor sunt clasificate în funcție de parametrul urmărit. În cadrul testărilor dinamice, se pot măsura deplasări, deformații specifice sau accelerații (Ghindea et al., 2014).

Oricare dintre aceste mărimi trebuie monitorizate în timp real pe toată durata testării. De exemplu, în testarea podurilor rutiere cu camioane de probă, se înregistrează răspunsul suprastructurii podului pe toată durata traversării de către convoiul de probă, inclusiv înainte, în timpul și după producerea șocului, până la atenuarea completă a oscilațiilor.

2.2.1 Echipamente pentru măsurarea deplasărilor

În general, la încercările de recepție finală a podurilor cu încărcări de probă, se monitorizează atât deplasările verticale ale tablierului, cât și alte tipuri de deplasări. Pentru aceste măsurători se folosesc traductori de deplasare electrici, cum ar fi traductori de deplasare inductivi sau ceasuri comparatoare cu înregistrare digitală a datelor.

2.2.2 Echipamente pentru măsurarea deformațiilor specifice

Deformațiile specifice sunt monitorizate în puncte strategice ale secțiunilor elementelor structurale ale podurilor, conform proiectului de încercare și instrucțiunilor proiectantului, vizând secțiunile cele mai solicitate și zonele cu concentrații de efort. Aceste

măsurători se realizează prin tensometrie electro-rezistivă, dar și cu ajutorul tehnologiilor de ultimă generație bazate pe traductori cu fibră optică.

Un dezavantaj semnificativ al traductorilor tensometrici este complexitatea procesului de montare pe elementele monitorizate. Traductorii sunt lipiți pe suprafața elementelor structurale, o operațiune care necesită o îndemânare remarcabilă din partea operatorului și respectarea strictă a etapelor de curățare și pregătire a suprafeței, dificil de realizat în condiții de șantier.

2.2.3 Echipamente pentru măsurarea accelerațiilor

Accelerațiile sunt parametri fizici cruciali, măsurați exclusiv în cadrul încercărilor dinamice. Pentru determinarea acestora se folosesc diverse tipuri de accelerometre, selectate în funcție de proprietățile electrice pe care le monitorizează. Astfel, se utilizează accelerometre inductive și capacitive.

Montajul accelerometrelor este, de obicei, simplu și adecvat pentru încercările in situ. Totuși, montarea lor trebuie realizată cu o precizie excepțională, asigurând o conexiune rigidă între accelerometru și elementul structural monitorizat.

Concluzie

Încercările dinamice joacă un rol esențial în evaluarea și asigurarea siguranței și performanței structurilor de poduri. Aceste încercări permit identificarea comportamentului real al structurilor sub diverse tipuri de încărcări dinamice, cum ar fi traficul, vântul și seismele, asigurând astfel că proiectarea și construcția respectă cerințele de rezistență și durabilitate. Prin utilizarea tehnologiilor avansate de măsurare, cum ar fi accelerometrele și traductoarele de deplasare, se obțin date precise și fiabile care sunt esențiale pentru a detecta eventualele defecte sau vulnerabilități structurale. De asemenea, încercările dinamice oferă posibilitatea de a monitoriza comportamentul pe termen lung al podurilor, contribuind astfel la întreținerea preventivă și la extinderea duratei de viață a acestora. În concluzie, încercările dinamice sunt cruciale pentru garantarea integrității și securității infrastructurilor de poduri, protejând atât investițiile economice, cât și siguranța publică.

Capitolul 3. Influența masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor podurilor. Modelare teoretică

Interacțiunea dintre vehiculele care traversează podurile și integritatea structurală a acestor poduri reprezintă o problemă complexă care necesită o considerație atentă din partea inginerilor. Podurile trebuie să reziste forțelor dinamice exercitate de vehiculele în mișcare, persoane, condiții meteorologice și alți factori externi (Fig. 3.1).

Fig. 3.1 - Încărcare cu vehicule pe Podul Tudor Vladimirescu din Iași, România

Având la bază studiul teoretic care a analizat sistemul cuplat vehicul-pod (Duan &Yang, 2013), am decis să realizez o analiză cu accent pe modificarea masei și vitezei vehiculelor care traversează podul, luând în considerare și lungimea podului. Scopul este de a evidenția modul în care acești parametri influențează structura podului conform reglementărilor din România pentru a stabili cât de important este să se adopte limite de masă și viteză. Simulările se vor efectua cu ajutorul software-ului Matlab R2018b.

3.1 Materiale și metode

Pentru crearea modelului simplificat al cuplării vehicul-pod, am stabilit următoarele ipoteze (Duan & Yang, 2013).

- podul este reprezentat ca o simplă grindă susținută folosind teoria lui Euler-Bernoulli.
- modelarea vehiculului implică reprezentarea acestuia ca un sistem cu parametri concentrați, având patru grade de libertate.
- în modelul creat se consideră doar un singur vehicul care traversează podul.

Procesul de dezvoltare a modelului simplificat pentru analiză în cadrul software-ului Matlab a implicat mai mulți pași-cheie. Aceștia au inclus: introducerea dezvoltării modelului teoretic, definirea modelului cinematic pentru subsistemul vehiculului, formularea modelului dinamic pentru subsistemul podului, stabilirea condițiilor de compatibilitate pentru deplasare între vehicul și pod, și, în final, crearea modelului interconectat al subsistemului vehicul-pod pentru a analiza trei scenarii distincte de mișcare.

Următoarele subcapitole vor descrie pașii menționați anterior. După finalizarea acestor etape, noile analize efectuate folosind programul Matlab cu metoda Newmark-β (Wang, et al., 2008) vor fi detaliate. Aceste analize își propun să stabilească importanța limitării vitezei și masei vehiculelor care circulă pe poduri în România.

3.2 Introducere în dezvoltarea modelului teoretic

În prima etapă, este analizată o grindă simplu susținută ca obiect de studiu. Modelul cinematic pentru subsistemul podului va fi stabilit folosind atât teoria grinzii Euler-Bernoulli (Li, et al., 2013; Cai, et al., 1994; Esmailzadeh & Ghorashi, 1993; Chan, 2006), cât și metoda de suprapunere a modurilor (Tsai, 1998). În cea de-a doua etapă, este creat un model cinematic bidimensional al subsistemului vehiculului cu două axe, din care funcția dinamică este dedusă prin principiul lui D'Alembert (Xiao & Shen, 2004). Cele două sisteme care interacționează și se influențează reciproc au fost tratate ca un singur sistem. Bazându-ne pe relația geometrică la punctul de contact și pe condițiile de echilibru static, a fost construită o relație între ecuația de vibrație a vehiculului și ecuația de vibrație a podului (Bauchau & Craig, 2009; Duan & Yang, 2013; Greiner, 2010).

Un vehicul poate fi privit ca un sistem complex compus din "masă, rigiditate și amortizare". Modelul vehiculului bidimensional cu două axe este ales ca exemplu pentru a efectua analiza.

În ceea ce privește podul, acesta este modelat ca o grindă simplu rezemată. S-a optat pentru metoda superpoziției, care reduce numărul de grade de libertate în structura podului. Această abordare, combinată cu teoria grinzii Euler-Bernoulli, este utilizată pentru a deduce ecuația cinematică a sistemului vehicul-pod (Bauchau & Craig, 2009; Duan & Yang, 2013; Qingfei, et al., 2014).

3.3 Modelul cinematic al subsistemului vehiculului

Legea lui Newton este aplicată pentru a dezvolta modelul bidimensional al vehiculului cu două axe. Înainte de construirea ecuațiilor diferențiale, au fost stabilite câteva ipoteze de bază:

- vehiculul își menține o viteză constantă și călătorește în linie dreaptă.
- roțile și corpul sunt considerate corpuri rigide cu masă, fără nicio deformare elastică internă. Acestea sunt legate de structura principală prin arcuri și amortizoare.
- anvelopele vehiculului sunt întotdeauna în contact strâns cu podul, iar săriturile nu au loc.
- roțile și corpul vehiculului vibrează cu deplasări minore.

Modelul are patru grade de libertate (Fig. 3.2). Corpul vehiculului include două grade de libertate, reprezentând mișcarea verticală și grade separate de libertate pentru înclinare θ. În plus, seturile de roți din față și din spate au fiecare grade de libertate pentru deplasarea verticală, denumite y_{t1} și y_{t2}, respectiv (Duan & Yang, 2013).

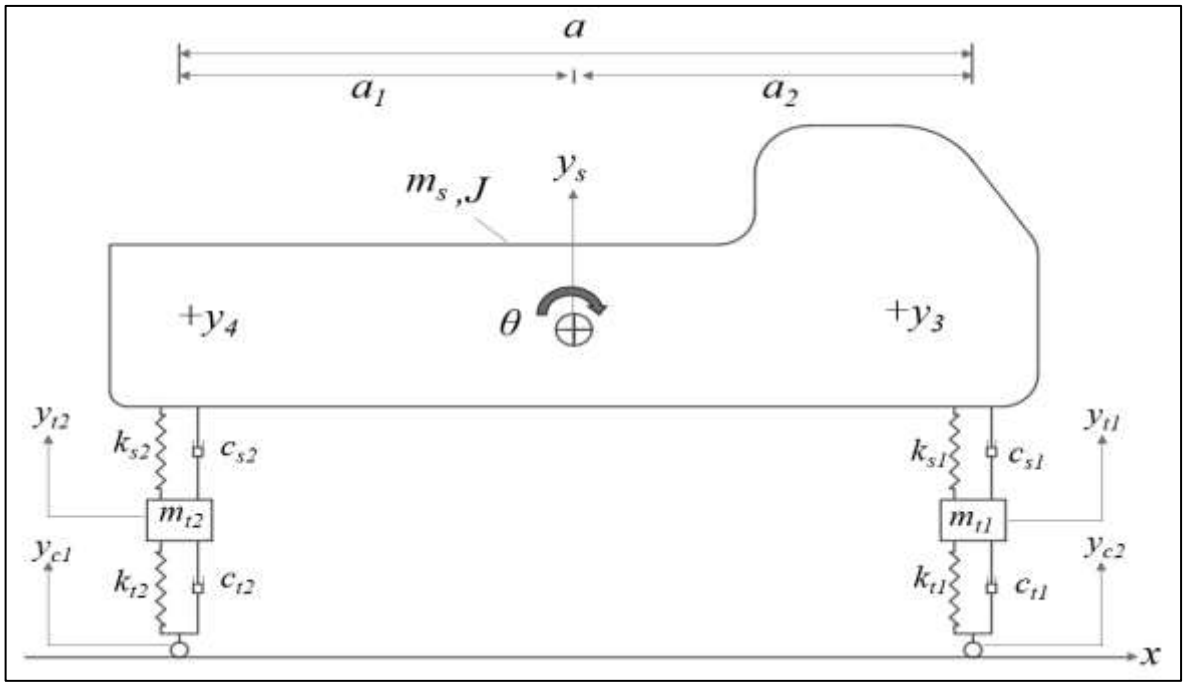


Fig. 3.2 - Modelul vehiculului cu două axe și patru grade de libertate

Funcțiile de echilibru cinematic ale vehiculului pentru fiecare grad de libertate conform legii lui Newton sunt scrise ca (Ec. 3.1 - 3.4) (Barakat, 2023; Chen et al., 2016; Duan &Yang, 2013):

- Corpul vehiculului vibrează în sus și în jos. (Ec. 3.1):

$$m_s\ddot{y}_s + c_{s1}(\dot{y}_s - \dot{y}_{t1} + \dot{\theta}a_1) + c_{s2}(\dot{y}_s - \dot{y}_{t2} - \dot{\theta}a_2) + k_{s1}(y_s - y_{t1} + \theta a_1) + k_{s1}(y_s - y_{t2} - \theta a_2) = 0 \quad (3.1)$$

- Nodurile corpului vehiculului vibrează (Ec. 3.2):

$$J\ddot{\theta} + k_{s1}a_1(y_s - y_{t1} + \theta a_1) - k_{s2}a_2(y_s - y_{t2} - \theta a_2) + c_{s1}a_1(\dot{y}_s - \dot{y}_{t1} - \dot{\theta}a_1) - c_{s2}a_2(\dot{y}_s - \dot{y}_{t2} - \dot{\theta}a_2) = 0 \quad (3.2)$$

- Osia frontală a vehiculului vibrează pe verticală (Ec. 3.3):

$$m_{t1}\ddot{y}_{t1} - k_{s1}(y_s - y_{t1} + \theta a_1) - c_{s1}(\dot{y}_s - \dot{y}_{t1} - \dot{\theta}a_1) + k_{t1}(y_{t1} - y_{c1}) + c_{t1}(\dot{y}_{t1} - \dot{y}_{c1}) \quad (3.3)$$

- Osia din spate a vehiculului vibrează pe verticală (Ec. 3.4):

$$m_{t2}\ddot{y}_{t2} - k_{s2}(y_s - y_{t1} + \theta a_2) - c_{s2}(\dot{y}_s - \dot{y}_{t2} - \dot{\theta}a_2) + k_{t2}(y_{t2} - y_{c2}) + c_{t2}(\dot{y}_{t2} - \dot{y}_{c2}) = 0 \quad (3.4)$$

Prin transformarea ecuațiilor în matrici, se obține ecuația (Ec. 3.5):

$$[M_V]\{\ddot{y}_V\} + [C_V]\{\dot{y}_V\} + [K_V]\{y_V\} = \{F_V\} \quad (3.5)$$

Aceste matrici sunt de la (Ec. 3.6) la (Ec. 3.10) (Duan &Yang, 2013):

$$[M_V]=\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{t1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{t2} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$\{y_V\}=\begin{Bmatrix} y_s \\ \theta \\ y_{t1} \\ y_{t2} \end{Bmatrix} \tag{3.7}$$

$$\{F_V\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{t1}y_{c1}+c_{t1}\dot{y}_{c1} \\ k_{t2}y_{c2}+c_{t2}\dot{y}_{c2} \end{Bmatrix} \tag{3.8}$$

$$[K_V]=\begin{bmatrix} k_{s1}+k_{s2} & k_{s1}a_1-k_{s2}a_2 & -k_{s1} & -k_{s2} \\ k_{s1}a_1-k_{s2}a_2 & k_{s1}a_1^2+k_{s2}a_2^2 & -k_{s1}a_1 & k_{s2}a_2 \\ -k_{s1} & -k_{s1}a_1 & k_{s1}+k_{t1} & 0 \\ -ks_2 & k_{s2}a_2 & 0 & k_{s2}+k_{t2} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$$[C_V]=\begin{bmatrix} c_{s1}+c_{s2} & c_{s1}a_1-c_{s2}a_2 & -c_{s1} & -c_{s2} \\ c_{s1}a_1-c_{s2}a_2 & c_{s1}a_1^2+c_{s2}a_2^2 & -c_{s1}a_1 & c_{s2}a_2 \\ -c_{s1} & -c_{s1}a_1 & c_{s1}+c_{t1} & 0 \\ -c_{s2} & c_{s2}a_2 & 0 & c_{s2}+c_{t2} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

3.4 Reprezentarea dinamică a subsistemului podului.

Pentru a obține modelul dinamic al podului, conform literaturii (Chen et al, 2016; Duan & Yang, 2013; Qingfei et al, 2014), am construit jumătate din modelul vehiculului care se deplasează pe pod (Fig. 3.3). Modelul de grindă cu sprijin simplu cu funcția vehiculului în mișcare este prezentat în (Fig. 3.4).

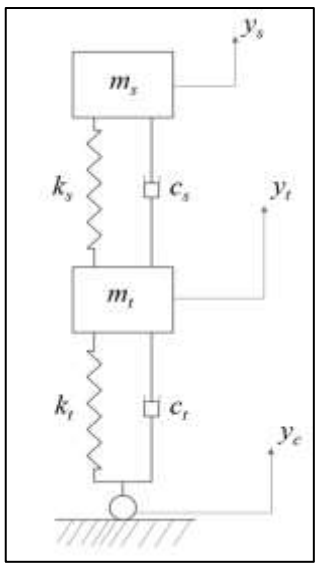


Fig. 3.3 - Jumătate din modelul vehiculului din Figura 3.2

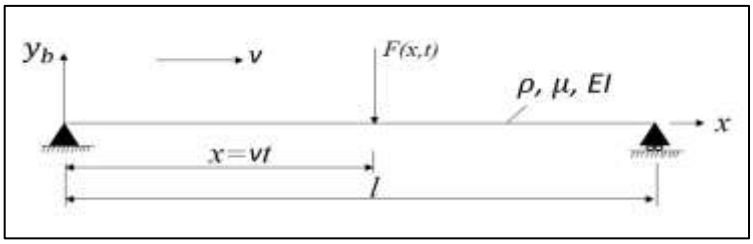


Fig. 3.4 - Modelul de grindă cu sprijin simplu cu funcția vehiculului în mișcare.

Ecuația de bază pentru vibrațiile de încovoiere, conform teoriei grinzilor Euler-Bernoulli, este scrisă ca (Ec. 3.11):

$$EI\frac{\partial^4 y_b(x,t)}{\partial x^4}+\rho\frac{\partial^2 y_b(x,t)}{\partial t^2}+\mu\frac{\partial y_b(x,t)}{\partial t}=-F(x,t)\delta(x-\mathrm{v}t) \tag{3.11}$$

Urmând derivări matematice, s-a stabilit ecuația modului de vibrație pentru pod ca (Ec. 3.12):

$$\ddot{\eta}_{n+}2\zeta_n\omega_n\dot{\eta}_n+\omega_n^2\eta_n=-F(\mathrm{v}t,t)\,\varphi_n(\mathrm{v}t) \tag{3.12}$$

În ceea ce privește modelul ilustrat în (Fig. 3.2), forța va varia ca rezultat al numărului variabil de puncte de contact. Pentru acest model, există două forțe la punctele de contact (F_1 și F_2) . Astfel, ecuația de vibrație a podului este scrisă ca (Ec. 13):

$$EI\frac{\partial^4 y_b(x,t)}{\partial x^4}+\rho\frac{\partial^2 y_b(x,t)}{\partial t^2}+\mu\frac{\partial y_b(x,t)}{\partial t}=-\sum_{i=1}^{2}F_i(x_i,t)\delta_i(x_i-\mathrm{v}t) \tag{3.13}$$

La final, pe baza metodei de superpoziție a modurilor, ecuația modului de vibrație pentru pod este dedusă ca (Ec. 3.14):

$$\ddot{\eta}_{n+}2\zeta_n\omega_n\dot{\eta}_n+\omega_n^2\eta_n=-F_1(t)\varphi_{1n}\delta_1-F_2(t)\varphi_{2n}\delta_2 \tag{3.14}$$

3.4.1 Stabilirea condițiilor de compatibilitate pentru deplasare între vehicul și pod

Condiția de compatibilitate pentru deplasare între pod și vehicul este exprimată în (Ec. 3.15):

$$y_{ci}=y_b(x_i,t)+r(x_i,t) \tag{3.15}$$

Cu existența celor două puncte de contact, ecuația (Ec. 3.15) este scrisă ca (Ec. 3.16) și (Ec. 3.17):

$$y_{c1}\Big|_{x_1=\mathrm{v}t}^{1}=y_b(x_1,t)\Big|_{x_1=\mathrm{v}t}^{1}+r(x_1)\Big|_{x_1=\mathrm{v}t}^{1}=y_b(vt,t)+r(vt)=\sum_{i=1}^{N}\varphi_i(\mathrm{v}t)\,\eta_i(t)+r_1 \tag{3.16}$$

$$y_{c2}\Big|_{x_2=\mathrm{v}t-a}^{1}=y_b(x_2,t)\Big|_{x_2=\mathrm{v}t-a}^{1}+r(x_2)\Big|_{x_2=\mathrm{v}t-a}^{1}=\sum_{i=1}^{N}\varphi_i(\mathrm{v}t-a)\,\eta_i(t)+r_2 \tag{3.17}$$

În timp ce vehiculul traversează podul, forța exercitată de roata indexată ca i asupra podului cuprinde două componente. O componentă este încărcarea statică exercitată de roată, care include masa caroseriei vehiculului pe care o susține roata. Cealaltă componentă provine din elasticitatea deformării roții și forța de amortizare generată de amortizarea vâscoasă. Funcția forței este dată ca (Ec. 3.18):

$$F_i(x,t) = W_i - k_{ti}(y_{ti} - y_{ci}) - c_{ti}(\dot{y}_{ti} - \dot{y}_{ci}) \quad (3.18)$$

Funcția forței (Ec. 3.18) a fost rescrisă ca (Ec. 3.19) și (Ec. 3.20):

$$F_1(x_1,t) = W_1 - k_{t1}(y_{t1} - y_{c1}) - c_{t1}(\dot{y}_{t1} - \dot{y}_{c1}) \quad (3.19)$$

$$F_2(x_2,t) = W_2 - k_{t2}(y_{t2} - y_{c2}) - c_{t2}(\dot{y}_{t2} - \dot{y}_{c2}) \quad (3.20)$$

unde, W_1 și W_2 sunt date de (Ec. 3.21) și (Ec. 3.22):

$$W_1 = \left(m_s \frac{a_2}{a} + m_{t1}\right) g \quad (3.21)$$

$$W_2 = \left(m_s \frac{a_1}{a} + m_{t2}\right) g \quad (3.22)$$

3.4.2 Construirea modelului complet vehicul-pod

Literatura (Duan & Yang, 2013) a studiat trecerea vehiculului pe pod în trei intervale de timp distincte: vehiculul intră pe pod (două roți pe pod), intervalul de timp este $\left[0, \frac{a}{v}\right]$; vehiculul rulează pe pod (toate roțile pe pod), intervalul de timp este $\left[\frac{a}{v}, \frac{l}{v}\right]$ și vehiculul iese de pe pod (două roți pe pod), iar intervalul de timp este $\left[\frac{l}{v}, \frac{l+a}{v}\right]$.

În același mod, folosind un algoritm similar, se obține modelul sistemului vehicul-pod ca (Ec. 3.23):

$$M(t)\ddot{Y} + C(t)\dot{Y} + K(t)Y = Q(t) \quad (3.23)$$

unde: $[M(t)], [C(t)], [K(t)]$ - reprezintă matricea masei, matricea de amortizare și matricea de rigiditate de ordin (n + 4); $Q(t)$ – descrie matricea vectorială de ordin (n+4) și Y - exprimă un vector liber de ordin (n+4).

În final, vectorul de deplasare al sistemului Y este obținut ca (Ec. 3.24):

$$Y = \{y_s \quad \theta \quad y_{t1} \quad y_{t2} \quad \eta_1 \quad \eta_2 \cdots \eta_n\}^T \quad (3.24)$$

Modelul complet al sistemului vehicul-pod cuplat este ilustrat în (Fig. 3.5).

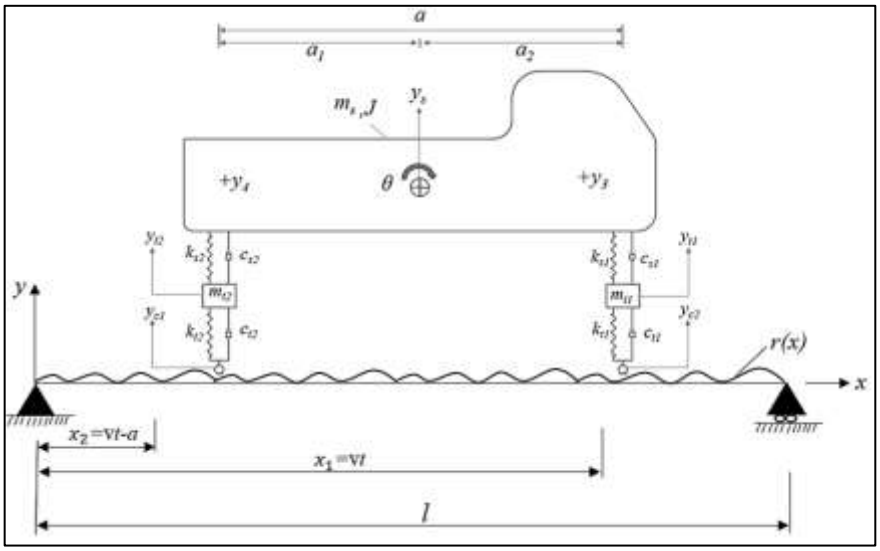


Fig. 3.5 - Sistemul complet vehicul-pod cuplat

În continuare are loc rescrierea funcțiilor $M(t), C(t), K(t)$ și $Q(t)$ în special pentru scenariul în care vehiculul traversează podul cu toate cele patru roți, acesta fiind cazul pe care am insistat.

Doar acest interval este ales pentru că este cel mai comun în viața de zi cu zi și joacă un rol important în siguranța operațiunilor podului și a siguranței umane.

În cazul în care vehiculul traversează podul (toate roțile sunt pe pod), $\frac{a}{\mathrm{v}} \leq t \leq \frac{1}{\mathrm{v}}$, iar funcțiile Dirac δ_1 și δ_2 sunt egale cu 1.

Matricele pentru funcția sistemului cuplat sunt în (Ec. 3.25), (Ec. 3.26), (Ec. 3.27) și (Ec. 3.28):

$$M(t) = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & J & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & m_{t1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{t2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{a_2\varphi_{11}+a_1\varphi_{21}}{a} m_s & \frac{\varphi_{11}-\varphi_{21}}{a} J & \varphi_{11}m_{t1} & \varphi_{21}m_{t2} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{a_2\varphi_{12}+a_1\varphi_{22}}{a} m_s & \frac{\varphi_{12}-\varphi_{22}}{a} J & \varphi_{12}m_{t1} & \varphi_{22}m_{t2} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{a_2\varphi_{1n}+a_1\varphi_{2n}}{a} m_s & \frac{\varphi_{1n}-\varphi_{2n}}{a} J & \varphi_{1n}m_{t1} & \varphi_{2n}m_{t2} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} c_{s1}+c_{s2} & c_{s1}a_1 - c_{s2}a_2 & -c_{s1} & -c_{s2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{s1}a_1 - c_{s2}a_2 & c_{s1}a_1^2 - c_{s2}a_2^2 & -c_{s1}a_1 & c_{s2}a_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_{s1} & -c_{s1}a_1 & c_{s1}+c_{t1} & 0 & -c_{t1}\varphi_{11} & -c_{t1}\varphi_{12} & \cdots & -c_{t1}\varphi_{1n} \\ -c_{s2} & c_{s2}a_2 & 0 & c_{s2}+c_{t2} & -c_{t2}\varphi_{21} & -c_{t2}\varphi_{22} & \cdots & -c_{t2}\varphi_{2n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\zeta_1\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\zeta_2\omega_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\zeta_n\omega_n \end{bmatrix}$$

(3.26)

$$K(t) = \begin{bmatrix} k_{s1}+k_{s2} & k_{s1}a_1 - k_{s2}a_2 & -k_{s1} & -k_{s2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ k_{s1}a_1 - k_{s2}a_2 & k_{s1}a_1^2 + k_{s2}a_2^2 & -k_{s1}a_1 & k_{s2}a_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_{s1} & -k_{s1}a_1 & k_{s1}+k_{s2} & 0 & -c_{t1}\dot{\varphi}_{11} - k_{t1}\varphi_{11} & -c_{t1}\dot{\varphi}_{12} - k_{t1}\varphi_{12} & \cdots & -c_{t1}\dot{\varphi}_{1n} - k_{t1}\varphi_{1n} \\ -ks_2 & k_{s2}a_2 & 0 & k_{s2}+k_{t2} & -c_{t2}\dot{\varphi}_{21} - k_{t2}\varphi_{21} & -c_{t2}\dot{\varphi}_{22} - k_{t2}\varphi_{22} & \cdots & -c_{t2}\dot{\varphi}_{2n} - k_{t2}\varphi_{2n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

(3.27)

$$Q(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{t1}\dot{r}_1 + k_{t1}r_1 \\ c_{t2}\dot{r}_2 + k_{t2}r_2 \\ -[\varphi_{11}W_1 + \varphi_{21}W_2] \\ -[\varphi_{12}W_1 + \varphi_{22}W_2] \\ \vdots \\ -[\varphi_{1n}W_1 + \varphi_{2n}W_2] \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

3.5 Rezultate și discuții

Spre deosebire de literatură (Duan & Yang, 2013, Gonzales & Mohammed, 2018), când mișcarea vehiculului este simulată, vehiculul intră pe pod (doar roțile din față sunt pe pod), vehiculul rulează pe pod (toate roțile se află pe pod) și iese de pe pod (doar roțile din spate sunt pe pod), am creat un nou program pentru a simula cazul în care vehiculul traversează podul (toate roțile sunt pe pod) conform cu limitele de viteză reglementate în România.

Pentru a analiza acest scenariu, am parcurs următorii pași folosind software-ul Matlab (MathWorks, 2024):
- determinarea parametrilor de intrare pentru diverse tipuri de vehicule și lungimi ale podurilor.
- rescrierea programului principal.
- crearea unui program nou pentru a simula mișcarea vehiculului la mijlocul podului, luând în considerare limitele de viteză reglementate în România (GED, 2012).
- rularea noului program în Matlab pentru a simula diferite scenarii prin varierea maselor vehiculului și a lungimilor podurilor.
- centralizarea rezultatelor obținute pentru cazurile studiate.

Pe baza literaturii, parametrii pentru vehicule sunt adoptați pentru a obține două variante cu mase diferite (Barakat, 2023; Chen et al., 2016; Duan & Yang, 2013; Gonzales & Mohammed, 2018). În plus, parametrii pentru poduri sunt selectați, de asemenea, pe baza unei combinații mixte oțel-beton (CNAIR, 2019).

Tipul podului este notat cu „B", iar vehiculul cu „V". Parametrii lor sunt descriși în Tab. 3.1 și Tab. 3.2:

Tab. 3.1 - Parametrii podului

Tipul podului	Lungimea deschiderii l (m)	Masa podului pe unitatea de lungime ρ (kg/m)	Flexibilitatea la încovoiere a podului, notată cu EI (N·m^2)	Coeficientul de amortizare pe unitate de lungime μ
B1	20	10530	$4{,}76\text{x}10^{10}$	0,025
B2	40	12365	$1{,}07\text{x}10^{11}$	0,026
B3	60	14159	$1{,}60\text{x}10^{11}$	0,029

Tab. 3.2 - Parametrii vehiculului

Tipul vehiculului	Parametru	Valoare	Parametru	Valoare
V1	m_s / (kg)	14600	c_{s1}/ (N·m^{-1})	$1{,}25\text{x}10^4$
	J/ (kg·m^2)	53805	c_{s2}/ (N·m^{-1})	$3{,}2\text{x}10^4$
	m_{t1}/ (kg)	200	c_{t1}/ (N·m^{-1})	630
	m_{t2}/ (kg)	200	c_{t2}/ (N·m^{-1})	630
	k_{s1}/ (N·m^{-1})	$3{,}6\text{x}10^5$	a_1/ (m)	2,9
	k_{s2}/ (N·m^{-1})	$2{,}05\text{x}10^6$	a_2/ (m)	1,1
	k_{t1}/ (N·m^{-1})	$5{,}31\text{x}10^4$	v / (km/h)	30, 50, 70, 110
	k_{t2}/ (N·m^{-1})	$7{,}4\text{x}10^4$		
V2	m_s/ (kg)	32400	c_{s1}/ (N·m^{-1})	$1{,}95\text{x}10^5$
	J/ (kg·m^2)	$2.352\text{x}10^6$	c_{s2}/ (N·m^{-1})	$1{,}95\text{x}10^5$
	m_{t1}/ (kg)	3800	c_{t1}/ (N·m^{-1})	$9{,}6\text{x}10^4$
	m_{t2}/ (kg)	3800	c_{t2}/ (N·m^{-1})	$9{,}6\text{x}10^4$
	k_{s1}/ (N·m^{-1})	$2{,}510\text{x}10^6$	a_1/ (m)	4,2
	k_{s2}/ (N·m^{-1})	$2{,}510\text{x}10^6$	a_2/ (m)	4,2
	k_{t1}/ (N·m^{-1})	$4.2\text{x}10^6$	v / (km/h)	30, 50, 70, 110
	k_{t2}/ (N·m^{-1})	$4{,}2\text{x}10^6$		

Pentru simularea diferitelor analize, au fost realizate o serie de combinații între vehicule și poduri, așa cum sunt descrise în Tab. 3.3:

Tab. 3.3 - Combinații diferite de analize

Tipul podului	Tipul vehiculului	Combinație	Descriere
B1	V1	B1 - V1	20 m lungimea deschiderii podului - masa vehiculului de 15 tone
B1	V2	B1 - V2	20 m lungimea deschiderii podului - masa vehiculului de 40 tone
B2	V1	B2 - V1	40 m lungimea deschiderii podului - masa vehiculului de 15 tone
B2	V2	B2 - V2	40 m lungimea deschiderii podului - masa vehiculului de 40 tone
B3	V1	B3 - V1	60 m lungimea deschiderii podului - masa vehiculului de 15 tone
B3	V2	B3 - V2	60 m lungimea deschiderii podului - masa vehiculului de 40 tone

Analiza este efectuată prin executarea programului "main" în Matlab pentru a genera matricele $[M(t)], [C(t)], [K(t)]$ și $Q(t)$. Am calculat aceste matrici combinând datele podurilor și datele vehiculelor. Matricile au fost calculate pentru vitezele vehiculului de 30, 50, 70 și 110 km/h. Pe baza rezultatelor generate de programul "main" pentru matrici, am încărcat aceste date în programul "mid-span" și am generat deplasarea podului în funcție de viteza vehiculului, deschiderea podului și masa vehiculului. Am efectuat această analiză pentru șase cazuri diferite descrise în Tab. 3.3. După efectuarea simulărilor, rezultatele următoare sunt obținute în (Fig. 3.6-3.11). Deplasarea maximă a podului la mijloc pentru fiecare caz de simulare este centralizată în Tab. 3.4. Mai multe detalii despre programele folosite în Matlab pentru generarea deplasărilor podului pot fi consultate în Anexa 1.

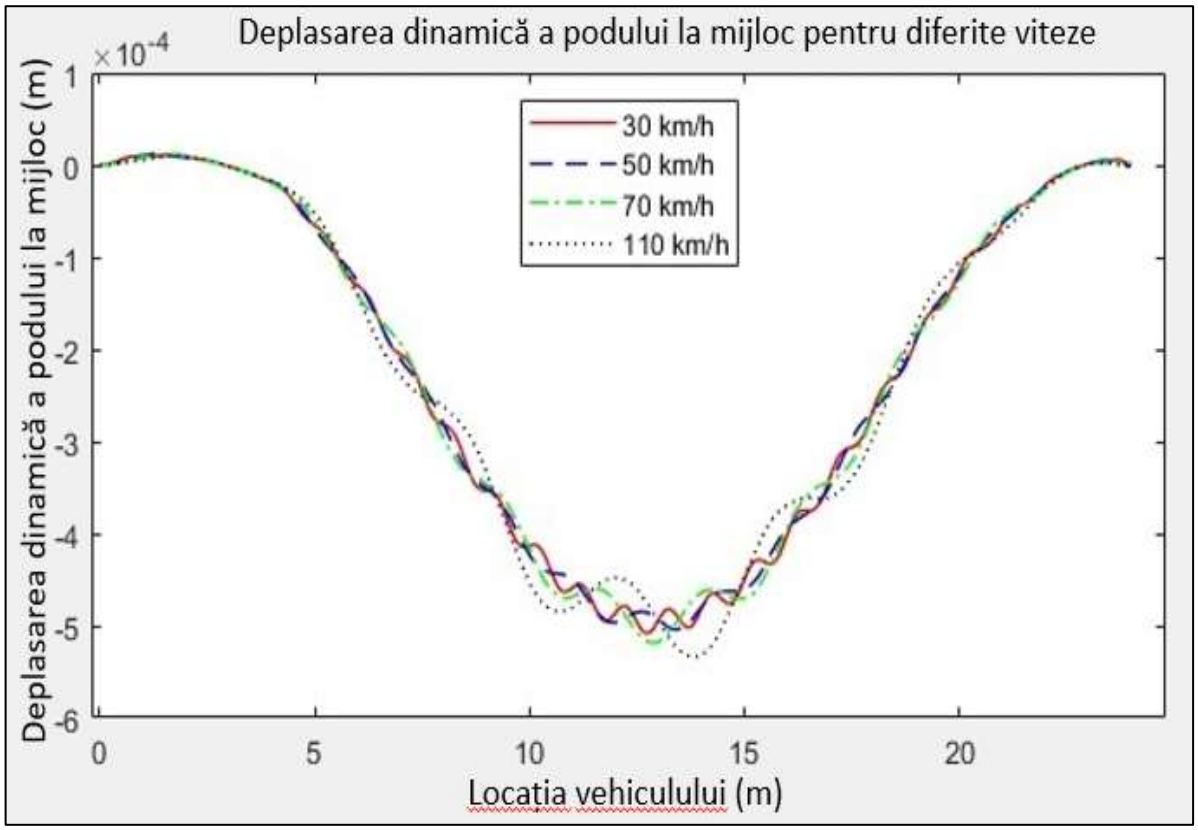


Fig. 3.6 - Deplasarea dinamică a podului la mijloc - B1-V1

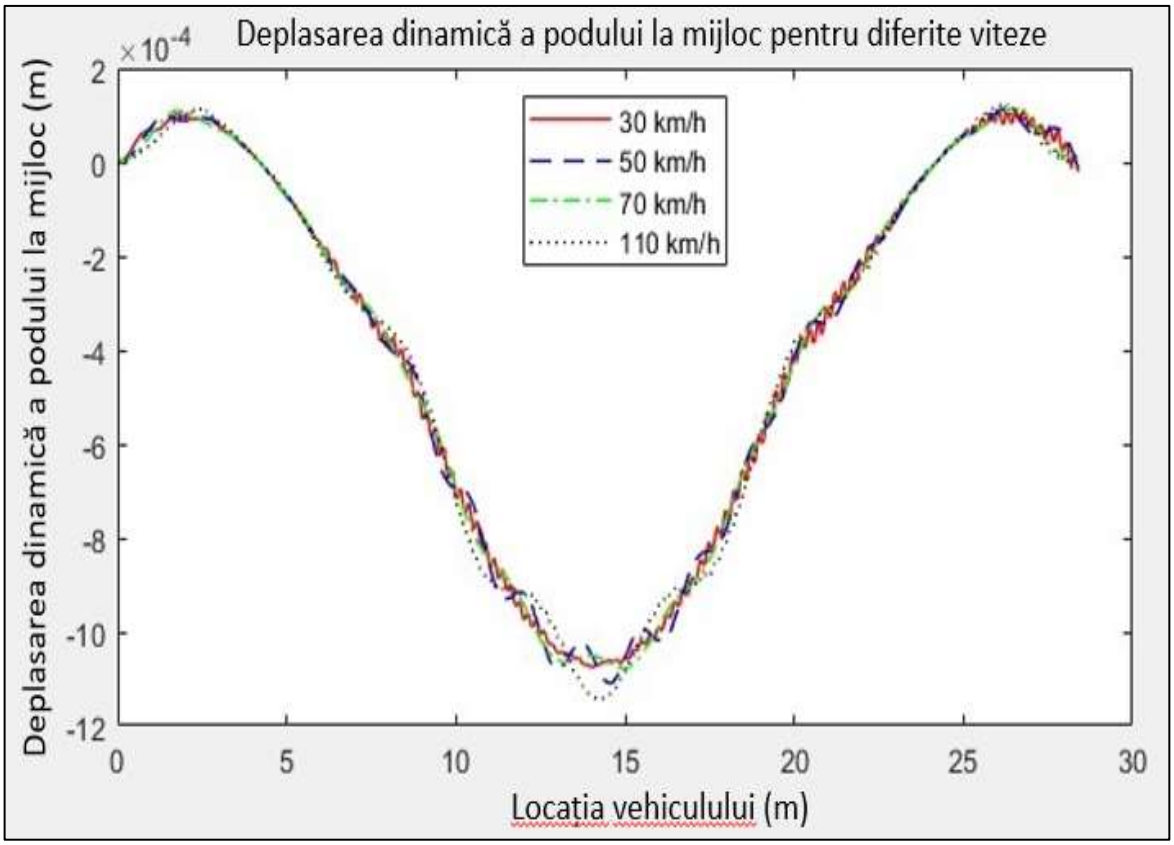


Fig. 3.7 - Deplasarea dinamică a podului la mijloc - B1-V2

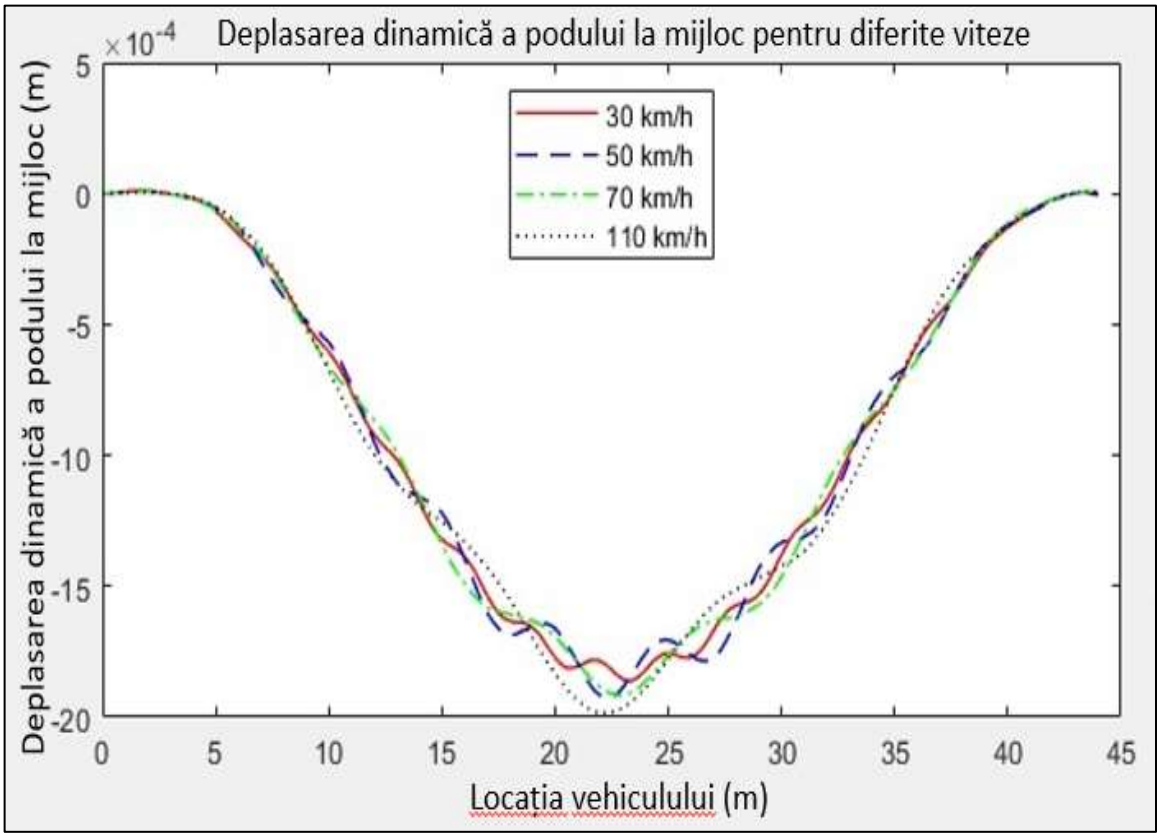


Fig. 3.8 - Deplasarea dinamică a podului la mijloc - B2-V1

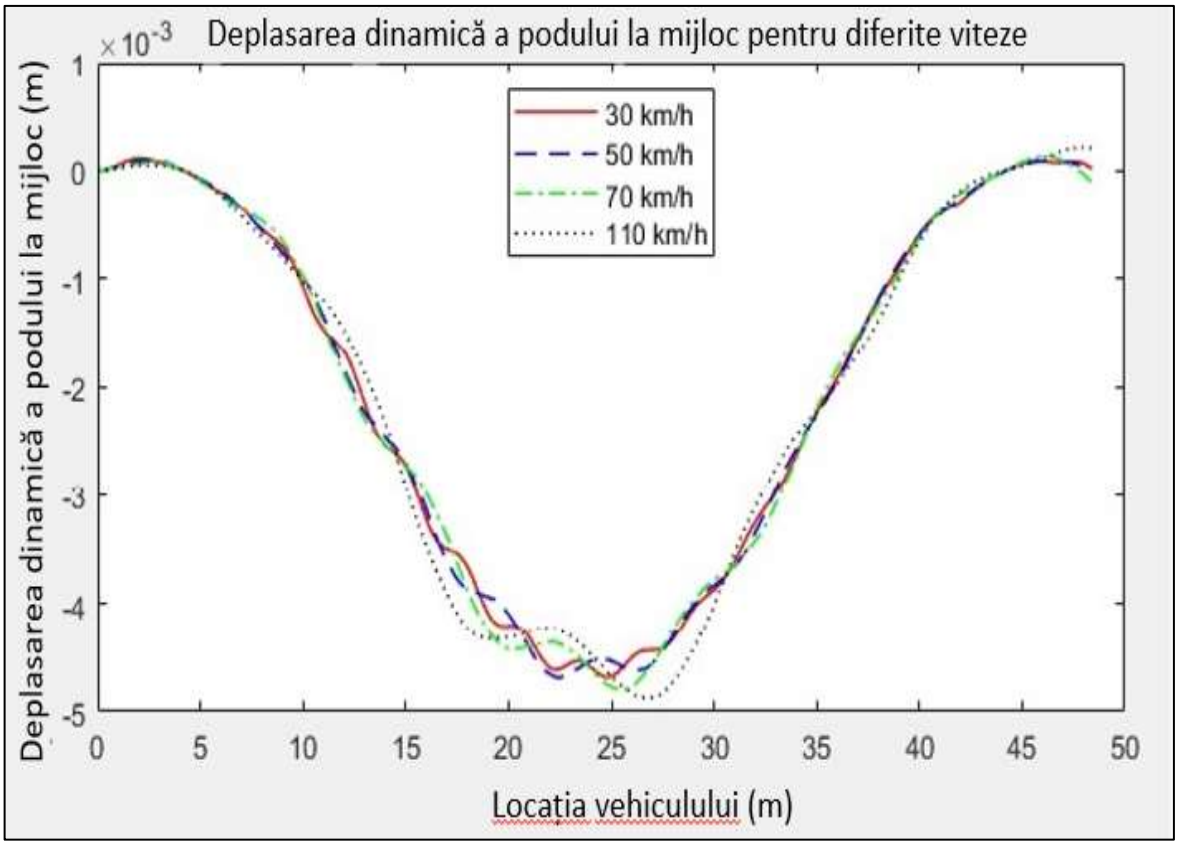


Fig. 3.9 - Deplasarea dinamică a podului la mijloc - B2-V2

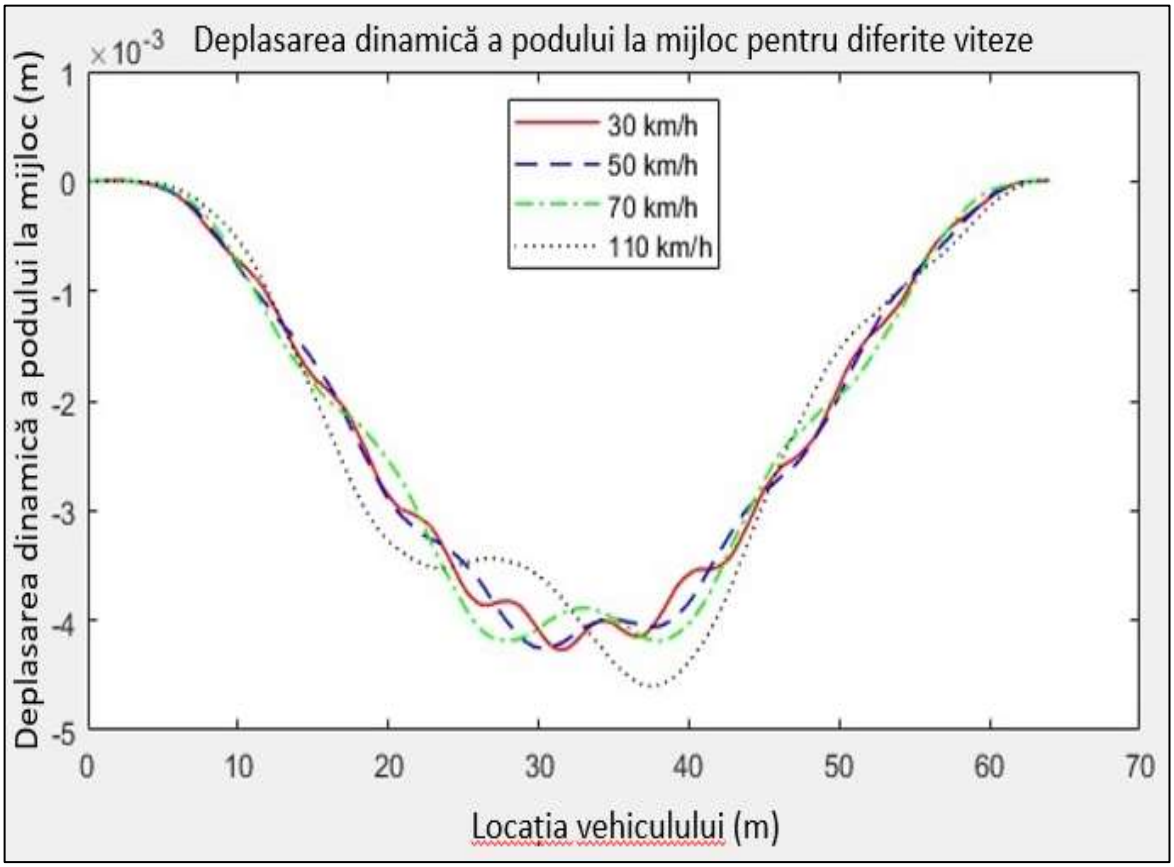


Fig. 3.10 - Deplasarea dinamică a podului la mijloc - B3-V1

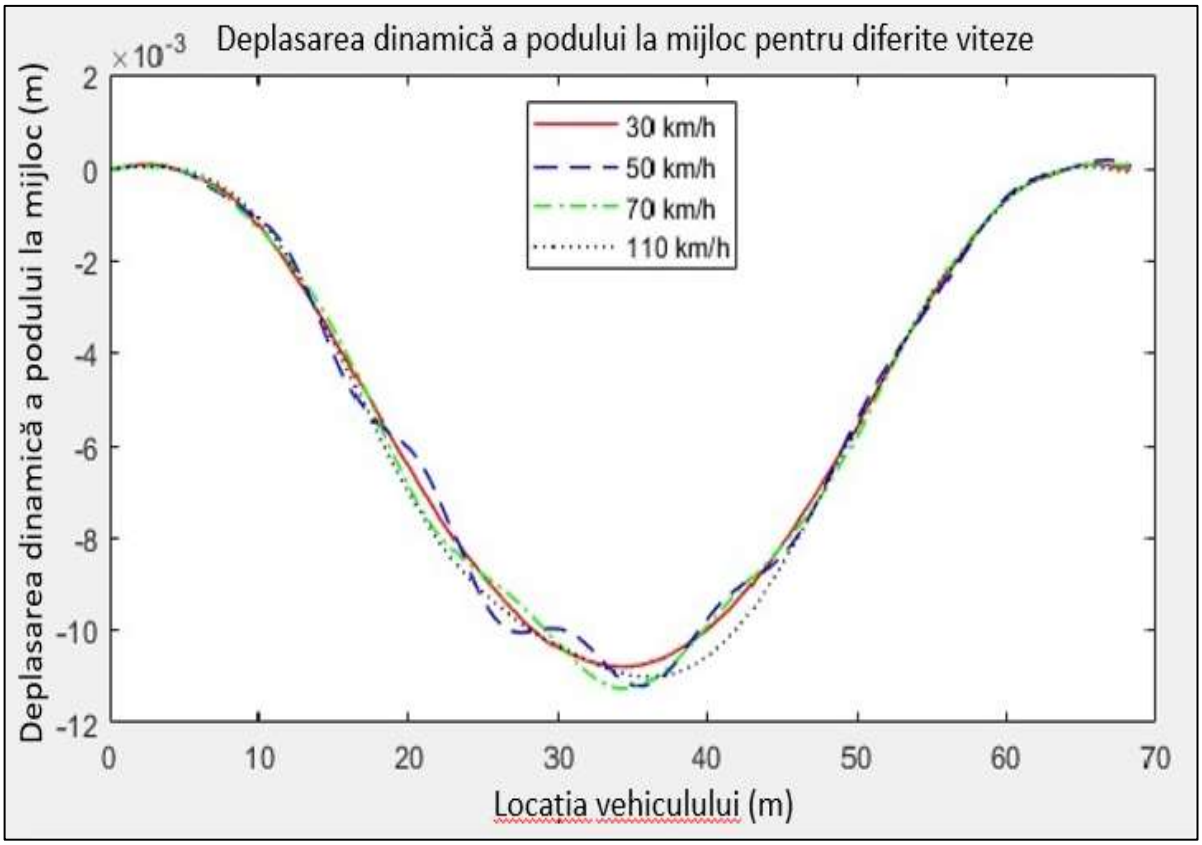


Fig. 3.11 - Deplasarea dinamică a podului la mijloc - B3-V2

Tab. 3.4 - Centralizarea deplasărilor maxime pentru cazurile studiate

Nr. crt.	Cazurile analizate	Valoarea deplasării podului [mm]
1	B1 - V1	-0,53
2	B1 - V2	-1,14
3	B2 - V1	-1,98
4	B2 - V2	-4,87
5	B3 - V1	-4,59
6	B3 - V2	-11,3

Observând rezultatele obținute din Tab. 3.4, am constatat următoarele:

- viteza, masa vehiculului și deschiderea podului sunt trei factori care joacă un rol important în deplasarea podului.
- cazurile simulate arată că, de la 20 la 60 m, deplasarea maximă, în majoritatea cazurilor, este obținută atunci când vehiculul rulează la 110 km/h.
- comparând cazul B1-V1 cu cazul B1-V2, putem observa că atunci când masa vehiculului crește de la 15 la 40 de tone și deschiderea podului este constantă, deplasarea podului crește de la -0,53 mm la -1,14 mm, ceea ce arată influența masei vehiculului.
- testând toate cazurile cu aceleași variații ale vitezei și masei, putem observa că, prin creșterea deschiderii podului de la 20 m la 60 m, deplasarea podului se modifică de la -0,53 mm B1-V1 la -4,59 mm B3-V1. Acest lucru reflectă influența deschiderii.
- limitele de viteză și masă ale vehiculului pot fi adoptate de constructor pentru a reduce valorile deplasărilor. Acest lucru va asigura fiabilitatea podului pe o perioadă lungă.

3.6 Concluzii

Având în vedere cazul în care vehiculul are toate roțile pe pod, cel mai comun scenariu în viața reală, am studiat parametrii cuplați ai sistemului vehicul-pod. Efectuând acest studiu, putem concluziona că masa, viteza vehiculului și lungimea podului sunt strâns legate atunci când este studiată deplasarea podului. Pe măsură ce viteza vehiculului și lungimea podului cresc, valorile deplasărilor podului capătă valori mai mari. Valoarea maximă a deplasării este obținută în cea mai mare parte atunci când vehiculul rulează pe pod la o viteză de 110 km/h. Masa vehiculului a influențat și ea valorile deplasării, o masă mai mare duce la o deplasare mai mare. Siguranța podurilor are o importanță crucială pentru bunăstarea atât a oamenilor, cât și a mediului înconjurător. Defecțiunile podurilor pot avea consecințe grave, precum pierderea de vieți umane, distrugerea proprietății, instabilitate economică și probleme semnificative pentru ecosistemele învecinate. Pentru a garanta siguranța pe termen lung a podului, constructorii, bazându-se pe aceste simulări, pot lua decizii prin limitarea masei vehiculului și a vitezei vehiculului care va trece pe pod, punând accentul pe importanța siguranței podului.

Capitolul 4. Elaborarea machetei metalice a podului peste Siret la Mircești pentru teste experimentale

Metodologia de elaborare a machetei metalice a podului de la Mircești pentru teste experimentale reprezintă un proces complex în vederea obținerii acestui element infrastructural. Procesul execuției unei machete precise, la scară redusă, permite simularea și analizarea diferitelor condiții care ar putea influența stabilitatea și durabilitatea podului real. Astfel, metodologia detaliază pașii necesari pentru proiectarea, debitarea pieselor componente și obținerea machetei dorite.

4.1 Proiectarea machetei

Având la bază planurile dimensionale a podului de la Mircești am decis să realizez o machetă metalică pentru una din deschiderile podului. Din cele patru deschideri, două de 50,35 metri și două de 60 metri am ales o deschidere de 60 metri lungime. Pentru a transpune în realitate deschiderea de 60 m a podului am decis să folosesc scara 1:25. Proiectarea machetei s-a realizat cu ajutorul programului de proiectare SolidWorks 2023. Macheta finală constă dintr-un total de 320 de piese metalice, cu grosimi variind între 0,8 mm, 1,2 mm și 2,5 mm. Mai multe detalii pașii proiectării machetei se regăsesc în Anexa 2.

Concluzie

Proiectarea podului cu ajutorul programului SolidWorks în vederea obținerii unei machete metalice la scara 1:25 a fost un proces complex care a necesitat atenție deosebită la detalii și la fidelitatea față de structura originală. Modelarea podului în SolidWorks a permis o reprezentare precisă a fiecărui element, cu accent pe redarea caracteristicilor esențiale ale designului real. S-au utilizat funcționalități avansate ale software-ului pentru a simula componentele podului și pentru a asigura proporțiile corecte.

Un aspect important al proiectului a fost facilitarea procesului de asamblare a machetei. Designul a fost gândit astfel încât toate componentele să fie ușor de fabricat și montat, minimizând erorile posibile și optimizând timpul de execuție. Toate îmbinările și punctele de fixare au fost proiectate cu precizie, luând în considerare atât dimensiunile reduse ale machetei, cât și necesitatea menținerii rigidității structurale.

În concluzie, proiectul a reprezentat o combinație echilibrată între tehnologie, precizie și funcționalitate, asigurând o reproducere cât mai realistă a podului și un proces eficient de asamblare a machetei metalice.

4.2 Debitarea pieselor metalice

După finalizarea proiectării machetei podului în SolidWorks, următorul pas a fost debitarea pieselor metalice utilizând tehnologia de tăiere cu laser. Componentele au fost debitate din oțel de calitate DC01, iar această metodă a fost aleasă datorită preciziei ridicate pe care o oferă, cu o toleranță de +/- 0,2 mm. Debitarea a fost realizată cu ajutorul unui echipament TRUMPF – TRULASER 3040 L32 (Fig. 4.1), având o putere de 4 kW, masa de lucru fiind de 4000X2000mm.

Fig. 4.1 - Trumpf TRULASER 3040 L32 (LaserProcessing, 2024)

Concluzie

Tăierea cu laser, utilizată pentru debitarea pieselor metalice din oțel DC01 în vederea construcției machetei metalice a demonstrat că este o tehnologie avansată, oferind precizie ridicată și eficiență. Alegerea echipamentului TRUMPF – TRULASER 3040 L32 a fost justificată de capacitatea sa de a asigura o tăiere cu o toleranță de +/- 0,2 mm, esențială pentru realizarea componentelor de înaltă calitate și asigurarea asamblării machetei. Folosirea oxigenului ca gaz de proces a contribuit la obținerea unor tăieturi precise. În concluzie, tehnologia de tăiere cu laser s-a dovedit a fi ideală pentru a obține componentele machetei, îndeplinind cerințele de precizie și standardele ridicate ale procesului de producție.

4.3 Asamblarea machetei

Procesul de realizare a machetei metalice a podului a început cu o etapă importantă de pregătire: degresarea pieselor metalice. Aceasta a fost esențială pentru a asigura o suprafață curată, favorabilă aderenței adezivilor și vopselelor ce urmau să fie aplicate. După degresare, piesele au fost atent sortate, astfel încât să fie ușor de utilizat în procesul de asamblare.

Ulterior, piesele metalice au fost asamblate treptat în subansamble, folosindu-se adezivi de înaltă calitate, precum LOCTITE 480, MOTRICA ADEZIV RAPID V 100 și BISON SUPER GLUE LIQUID CONTROL. Asamblarea structurii metalice a fost un proces migălos și a necesitat o mare atenție la detalii din cauza dimensiunilor mici ale componentelor. În plus, pentru a obține o asamblare corectă și durabilă, a fost necesar să se facă pauze între etape, astfel încât adezivii să se întărească corespunzător.

În final, pentru finalizarea machetei a avut loc realizarea marcajelor rutiere folosind spray de culoare albă iar parapetele rutiere și cele pietonale au fost lipite cu adezivul Bison rezultând astfel varianta completă a machetei (Fig. 4.2-4.3).

Aceasta a fost concepută pentru a facilita simulările privind influența masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor podului, un pas esențial în evaluarea comportamentului acestuia sub sarcină. Mai multe detalii despre asamblarea machetei se regăsesc în Anexa 4.

Fig. 4.2 - Machetă metalică pod completă

Fig. 4.3 - Machetă metalică pod completă

Concluzie

Realizarea machetei metalice a podului a fost un proces complex, care a implicat o serie de etape meticuloase și tehnologii variate, de la pregătirea inițială a pieselor metalice până la asamblarea finală și finisarea detaliilor. Fiecare pas a fost esențial pentru obținerea unei machete funcționale, capabile să simuleze comportamentul structural al podului în condiții de sarcină. Alegerea atentă a materialelor, utilizarea unor adezivi potriviți, precum și intervențiile pentru corectarea neregularităților au contribuit decisiv la calitatea finală a machetei. Această structură nu este doar o replică fizică, ci și un instrument important pentru studiul deplasărilor podurilor sub influența vehiculelor, reflectând un echilibru între acuratețea inginerească și simplitatea execuției la scară redusă.

Capitolul 5. Rezultate experimentale proprii obținute pe macheta realizată

După finalizarea confecționării machetei metalice, următorul pas a constat în efectuarea unei serii de simulări utilizând un vehicul la scară redusă, similar celor care traversează podurile în condiții reale. Având la dispoziție o instalație experimentală bazată pe accelerometre și una pe lasere cu care se pot măsura valorile accelerațiilor și a deplasărilor în mod dinamic pentru machetă, am decis să studiez dacă odată cu variația vitezei și masei vehiculelor valorile accelerațiilor și a deplasărilor podului respectă tendința dată de modelul teoretic.

Prin analiza variației accelerațiilor și a deplasărilor podului în raport cu acești parametri (masă și viteză), se poate observa în ce măsură rezultatele experimentale confirmă sau infirmă tendințele anticipate de modelul teoretic.

Acest demers experimental are o importanță esențială pentru a valida sau ajusta ipotezele teoretice, oferind astfel o mai bună înțelegere a modului în care caracteristicile dinamice ale vehiculelor influențează comportamentul structural al podurilor. Prin urmare, analiza accelerațiilor și deplasărilor reprezintă indicatori esențiali pentru evaluarea validității trendului teoretic și, dacă este cazul, pentru ajustarea acestuia pe baza datelor empirice obținute.

În subcapitolele următoare se vor detalia metodologiile folosite pentru a determina valorile accelerațiilor și a deplasărilor podului.

5.1 Metodologia pentru evaluarea variațiilor accelerațiilor în funcție de masa și vitezei vehiculelor

Metoda folosită pentru a studia variațiile accelerațiilor este una empirică și este formată din:

- un camion Mercedes Benz E590-003, la scara 1.20, controlat din telecomandă.
- o instalație wireless formată din accelerometre controlată cu ajutorul unui laptop.
- o serie de mase folosite pentru încărcarea camionului.

Camionul folosit pentru realizarea simulărilor este prezentat în Fig. 5.1.

Fig. 5.1 - Camionul folosit pentru realizarea simulărilor (Decadastore, 2024)

Instalația de măsurare a accelerațiilor este compusă din următoarele componente:

- un laptop Asus Rog Strix G cu sistem de operare Windows 10 (Fig. 5.2) pe care s-a instalat software-ul SensorConnect (Fig. 5.3) folosit pentru colectarea datelor.

Fig. 5.2 - Laptop Asus folosit pentru achiziția datelor

Fig. 5.3 - Software-ul SensorConnect folosit pentru achiziția datelor

- o stație LORD WSDA-200-USB (Fig 5.4) care este un gateway USB pentru achiziționarea datelor de la senzorii wireless Lord. Acest gateway oferă o comunicare fără întreruperi între senzorii wireless și calculatorul gazdă folosind software-ul SensorConnect.

Fig. 5.4 - Stația de achiziție a datelor LORD – model WSDA-200-USB

- 2 accelerometre wireless Parker LORD G-Link-200 (Fig 5.5) cu codurile 57218 și 57219 care permit achiziționarea simultană și rapidă de date din rețele de senzori scalabile. Sunt accelerometre triaxiale integrate care permit achiziționarea de date la rezoluție înaltă, cu zgomot și abateri extrem de reduse. Acest sistem de senzori wireless este ideal pentru testare, măsurare și monitorizare la distanță.

Fig. 5.5 - Accelerometre wireless Parker LORD G-Link-200

Pentru o înțelegere mai ușoară, instalația de măsurare a variațiilor accelerațiilor este reprezentată în (Fig. 5.6).

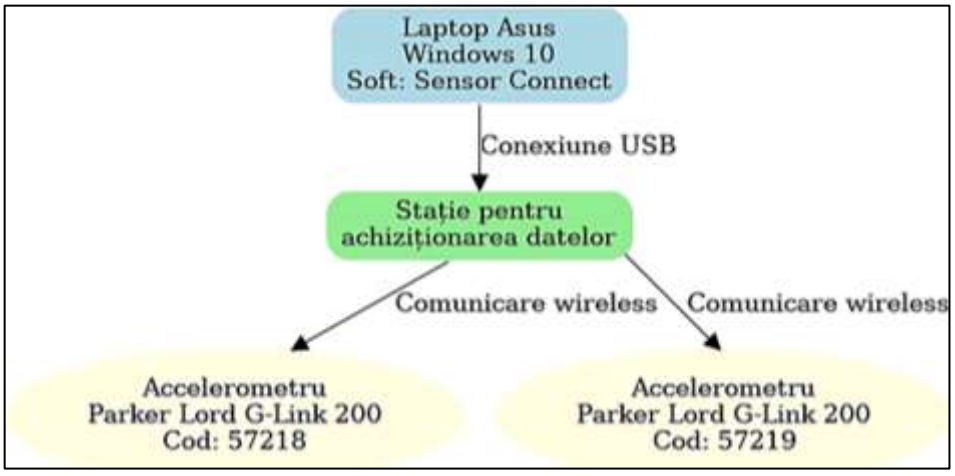


Fig. 5.6 - Instalația de măsurare a accelerațiilor pe machetă

Masele folosite pentru încărcarea camionului sunt reprezentate în Fig. 5.7, una cântărind 4 kilograme iar cealaltă 10 kilograme.

Fig. 5.7 - Masele folosite pentru încărcarea camionului

Camionul folosit pentru a transporta greutățile cântărește gol 2 kilograme. La masa proprie se vor adăuga greutățile menționate mai sus modificând astfel încărcarea podului. În Fig. 5.8 este reprezentat camionul care are adăugată masa de 4 kilograme.

Metoda prin care s-au înregistrat valorile accelerațiilor a constat în parcurgerea părții carosabile a machetei podului cu diverse viteze și mase ale vehiculului, astfel realizând o serie de teste empirice din care putem trage concluzii.

Fig. 5.8 - Camion încărcat cu 4 kilograme

5.2 Scenarii de analiză

În vederea realizării simulărilor pentru a determina variațiile accelerațiilor în funcție de viteza și masa vehiculului au fost stabilite următoarele ipoteze:

- pentru înregistrarea accelerațiilor au fost folosite două accelerometre de la producătorul Parker Lord, ambele captând valori pe axa Z (direcția perpendiculară pe carosabil).
- macheta a fost așezată pe două mese de susținere pentru a simula reazemele, în ambele direcții având aceeași distanță de rezemare iar pentru a simula intrarea pe pod am creat un suport de intrare (Fig. 5.9).
- pentru a se asigura o direcție de deplasare rectilinie a camionului am folosit un ghidaj din plastic lipit pe suprafața machetei (Fig. 5.10).
- un accelerometru este amplasat la 605mm față de intrarea pe pod iar celălalt este plasat pe mijlocul podului, 1210 mm (Fig. 5.11).

- viteza vehiculului a fost stabilită ca fiind maximă (MA) sau redusă (RE) datorită faptului că telecomanda cu ajutorul căreia se controlează viteza nu oferă posibilitatea setării unei anumite valori bine definite.

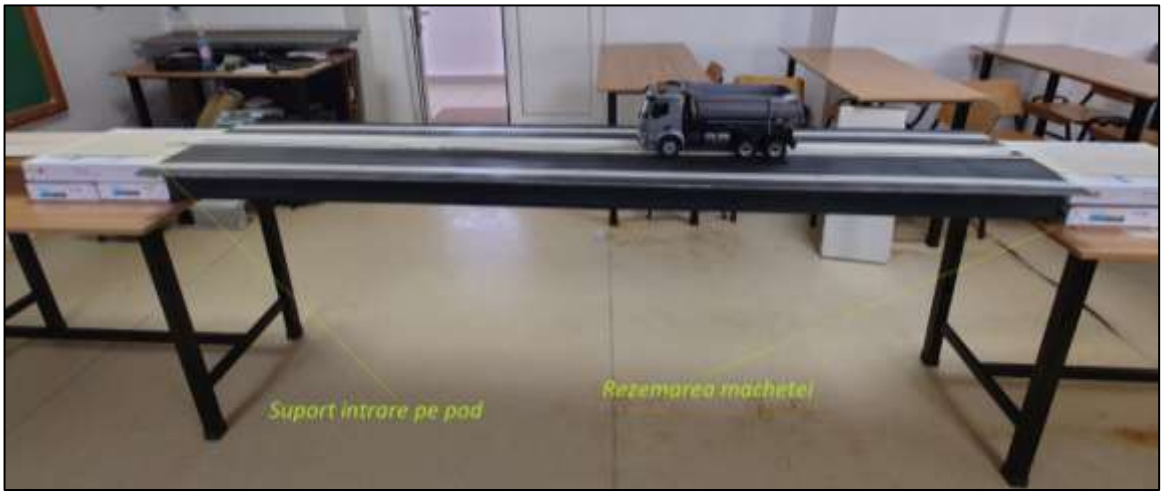


Fig. 5.9 - Rezemarea machetei și suporți de intrare

Fig. 5.10 - Ghidajul de menținere a direcției de deplasare

Fig. 5.11 - Poziționarea celor două accelerometre pe machetă

În urma stabilirii acestor ipoteze am decis că voi studia 6 cazuri distincte prin modificări ale vitezei (redusă-maximă) și masei vehiculului (2, 6, 12 kilograme) după cum se prezintă în Tab. 5.1:

Tab. 5.1 - Cazurile simulărilor efectuate

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă vehicul [kg]	Masă adăugată [kg]	Masă totală [kg]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	0	2
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	0	2
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	4	6
C4	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	4	6
C5	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	10	12
C6	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	10	12

Viteză vehicul	MA	Maximă
	RE	Redusă

Pentru obținerea unor date cu o rată de eroare cât mai mică am stabilit să repet de două ori simulările pentru fiecare caz în parte (Tab. 5.2). Astfel după obținerea valorilor accelerometrelor în urma simulărilor efectuate să realizez o calibrare a datelor prin calcularea valorilor medii între cele două seturi de date studiate pentru fiecare caz în parte.

Tab. 5.2 - Dublarea cazurilor simulate pentru sporirea preciziei datelor obținute

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă vehicul [kg]	Masă adăugată [kg]	Masă totală [kg]
C1.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	0	2
C1.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	0	2
C2.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	0	2
C2.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	0	2
C3.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	4	6
C3.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	4	6
C4.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	4	6
C4.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	4	6
C5.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	10	12
C5.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	10	12
C6.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	10	12
C6.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	10	12

Viteză vehicul	MA	Maximă
	RE	Redusă

5.3 Rezultate experimentale obținute

Simulările au constat în execuția cazurilor prezentate mai sus variind viteza vehiculului de la maximă la redusă și treptat crescând masa de la 2 kilograme până la 12 kilograme.

În urma efectuării testelor, rezultate de tip grafic, au fost obținute prin intermediul soft-ului SensorConnect pentru fiecare caz în parte precum este exemplificat în (Fig. 5.12).

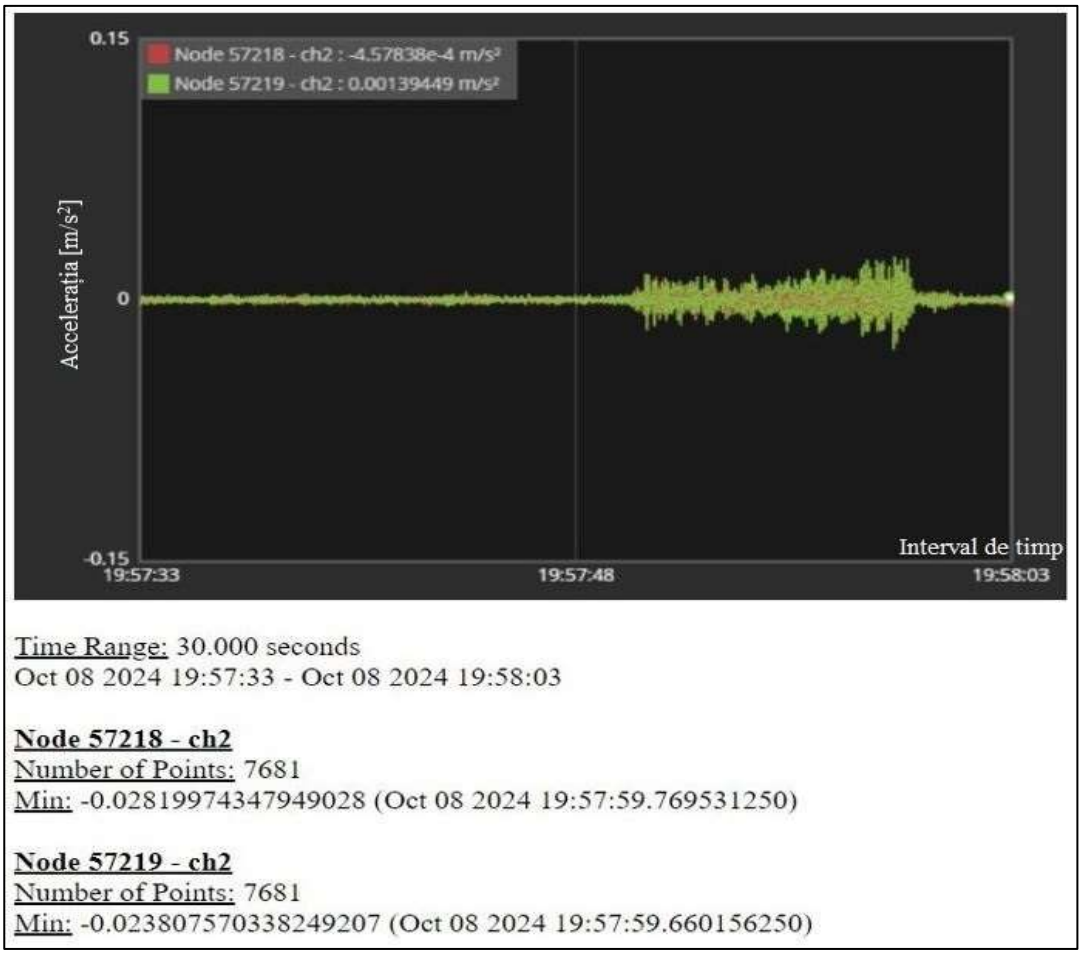


Fig. 5.12 - Valori ale accelerațiilor pentru cazul C1.1

Următorul pas a fost de a centraliza datele obținute în urma graficelor generate cu ajutorul programului SensorConnect pentru a prelucra valorile respective (Tab. 5.3).

Tab. 5.3 - Centralizarea accelerațiilor obținute pentru fiecare caz simulat

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă totală [kg]	Număr acceler ometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]	Număr accelero metru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]
C1.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	**57218**	-0,03	**57219**	-0,02
C1.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	**57218**	-0,03	**57219**	-0,02
C2.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	**57218**	-0,04	**57219**	-0,04
C2.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	**57218**	-0,04	**57219**	-0,04
C3.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	6	**57218**	-0,04	**57219**	-0,03
C3.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	6	**57218**	-0,04	**57219**	-0,03
C4.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	6	**57218**	-0,07	**57219**	-0,07
C4.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	6	**57218**	-0,07	**57219**	-0,07
C5.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	12	**57218**	-0,09	**57219**	-0,09
C5.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	12	**57218**	-0,09	**57219**	-0,09
C6.1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	12	**57218**	-0,15	**57219**	-0,13
C6.2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	12	**57218**	-0,15	**57219**	-0,13

Viteză vehicul	MA	Maximă
	RE	Redusă

După centralizarea datelor obținute a avut loc calibrarea datelor prin realizarea valorilor medii ale celor două seturi de date obținute pentru fiecare caz în parte. În urma calibrării efectuate au rezultat valorile pentru fiecare caz analizat (Tab. 5.4):

Tab. 5.4 - Calibrarea rezultatelor obținute

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă totală [kg]	Număr acceler ometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]	Număr accelero metru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	**57218**	-0,025	**57219**	-0,022
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	**57218**	-0,052	**57219**	-0,049
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	6	**57218**	-0,038	**57219**	-0,037
C4	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	6	**57218**	-0,064	**57219**	-0,061
C5	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	12	**57218**	-0,093	**57219**	-0,092
C6	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	12	**57218**	-0,124	**57219**	-0,106

Viteză vehicul	MA	Maximă
	RE	Redusă

Pentru a evidenția variațiile accelerațiilor am realizat o sortare a rezultatelor obținute prin menținerea vitezei constante și creșterea masei vehiculului (Tab. 5.5):

Tab. 5.5 - Sortarea rezultatelor obținute

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă totală [kg]	Număr acceler ometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]	Număr accelero metru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	2	**57218**	-0,025	**57219**	-0,022
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	6	**57218**	-0,038	**57219**	-0,037
C5	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	RE	12	**57218**	-0,093	**57219**	-0,092
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	2	**57218**	-0,052	**57219**	-0,049
C4	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	6	**57218**	-0,064	**57219**	-0,061
C6	Mijlocul podului - 1210 mm	La 605mm față de intrare	MA	12	**57218**	-0,124	**57219**	-0,106

Viteză vehicul	MA	Maximă
	RE	Redusă

Având la bază setul de date experimentale din Tab. 5.5 am concluzionat următoarele afirmații:

- din punct de vedere al **masei vehiculelor**, se observă o creștere clară a valorilor accelerațiilor (în sens negativ) pe măsură ce masa vehiculului crește, atât pentru viteza redusă (RE), cât și pentru viteza maximă (MA). De exemplu, pentru accelerometrul 57218, valoarea minimă în cazul vehiculului de 2 kg este -0,025 m/s² (RE) și -0,052 m/s² (MA), comparativ cu -0,093 m/s² (RE) și -0,124 m/s² (MA) pentru vehiculul de 12 kg.

- analizând **viteza vehiculelor**, valorile accelerațiilor minime sunt mai mari (în sens negativ) la viteza maximă (MA) decât la viteza redusă (RE), indiferent de masa vehiculului. Acest lucru indică o amplificare a efectelor dinamice odată cu creșterea vitezei vehiculului. Spre exemplu, pentru vehiculul de 6 kg, valoarea minimă la accelerometrul 57218 este -0,038 m/s² (RE) și -0,064 m/s² (MA).

- din punct de vedere al **secțiunii în care apar valorile maxime**, accelerometrul 57218, amplasat la mijlocul podului, înregistrează valori mai mari decât accelerometrul 57219, amplasat la 605 mm de intrarea pe pod. Acest rezultat sugerează că mijlocul podului este supus unor efecte dinamice mai intense datorate încărcării vehiculelor. De exemplu, pentru vehiculul de 12 kg la viteza redusă (MA), accelerometrul 57218 înregistrează -0,124 m/s², comparativ cu -0,106 m/s² pentru 57219.

5.4 Concluzii

Comportamentul dinamic al machetei podului metalic este influențat semnificativ de creșterea masei vehiculului, ceea ce determină o amplificare a valorilor accelerațiilor negative. Acest aspect evidențiază creșterea sarcinilor transmise către structura podului odată cu creșterea masei vehiculului.

Viteza vehiculului are un impact major asupra comportamentului dinamic al podului, valorile accelerațiilor minime crescând odată cu viteza. Această constatare subliniază importanța controlului vitezei vehiculelor pentru reducerea efectelor dinamice asupra podurilor.

Poziția accelerometrelor influențează valorile înregistrate, iar mijlocul podului (accelerometrul 57218) reprezintă zona cu cele mai mari valori ale accelerațiilor. Aceasta indică o distribuție neuniformă a solicitărilor pe structura podului, concentrându-se în zonele centrale.

Rezultatele sunt relevante pentru proiectarea și evaluarea siguranței podurilor metalice la sarcini dinamice. Macheta podului prezintă un răspuns previzibil la creșterea sarcinii, evidențiind un comportament elastic în limitele maselor și condițiilor de testare analizate.

5.5 Metodologia pentru evaluarea variațiilor deplasărilor în funcție de masa și vitezei vehiculelor

Pentru a studia variațiile deplasărilor podului am realizat o instalație experimentală compusă din:

- camionul Mercedes Benz E590-003, la scara 1:20, controlat din telecomandă, folosit și la testele pentru evaluarea accelerațiilor.
- aceleași mase folosite pentru încărcarea camionului folosite și la evaluarea accelerațiilor.
- o instalație de măsurare a deplasărilor pe bază de laser, controlată cu ajutorul aceluiași laptop folosit la măsurarea accelerațiilor.

Instalația de măsurare a deplasărilor este compusă din următoarele componente:

- un laptop Asus cu sistem de operare Windows 10 (Fig. 5.2) pe care s-a instalat software-ul SensorTOOL (Fig. 5.24) folosit pentru colectarea datelor.

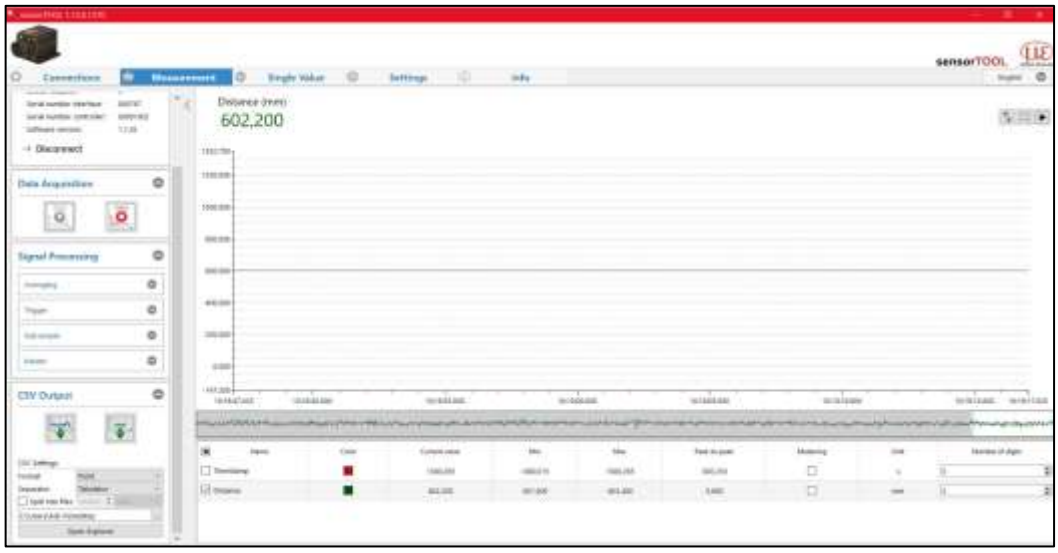


Fig. 5.24 - Software-ul SensorTOOL folosit pentru achiziția datelor

- o stație de achiziție a datelor Micro-Epsilon IF2004/USB cu ajutorul căreia se transmit datele către laptop prin conexiune USB (Fig. 5.25).

Fig. 5.25 - Stația de achiziție a datelor Microepsilon IF2004/USB (Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, 2024)

- o sursă de alimentare PULS CS3.241 care furnizează curentul necesar pentru stația de achiziție a datelor (Fig. 5.26). Aceasta fiind alimentată la o priză de curent 220V.

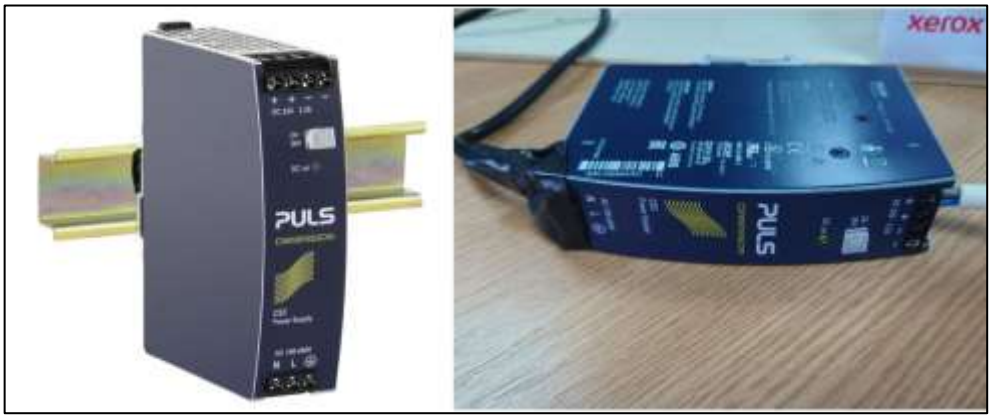


Fig. 5.26 - Sursa de alimentare PULS CS3.241 pentru stația de achiziție a datelor (Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, 2024)

- un senzor optic de măsurare a distanței cu laser fără contact, Micro-Epsilon optoNCDT ILR2250-100 (Fig. 5.27) care se conectează la stația de achiziție a datelor prin intermediul unui cablu de alimentare și transmite distanța măsurată în exprimată în mm.

Fig. 5.27 - Senzor optic Micro-Epsilon optoNCDT ILR2250-100

Pentru o înțelegere mai ușoară, instalația de măsurare a variațiilor deplasărilor este reprezentată în (Fig. 5.28).

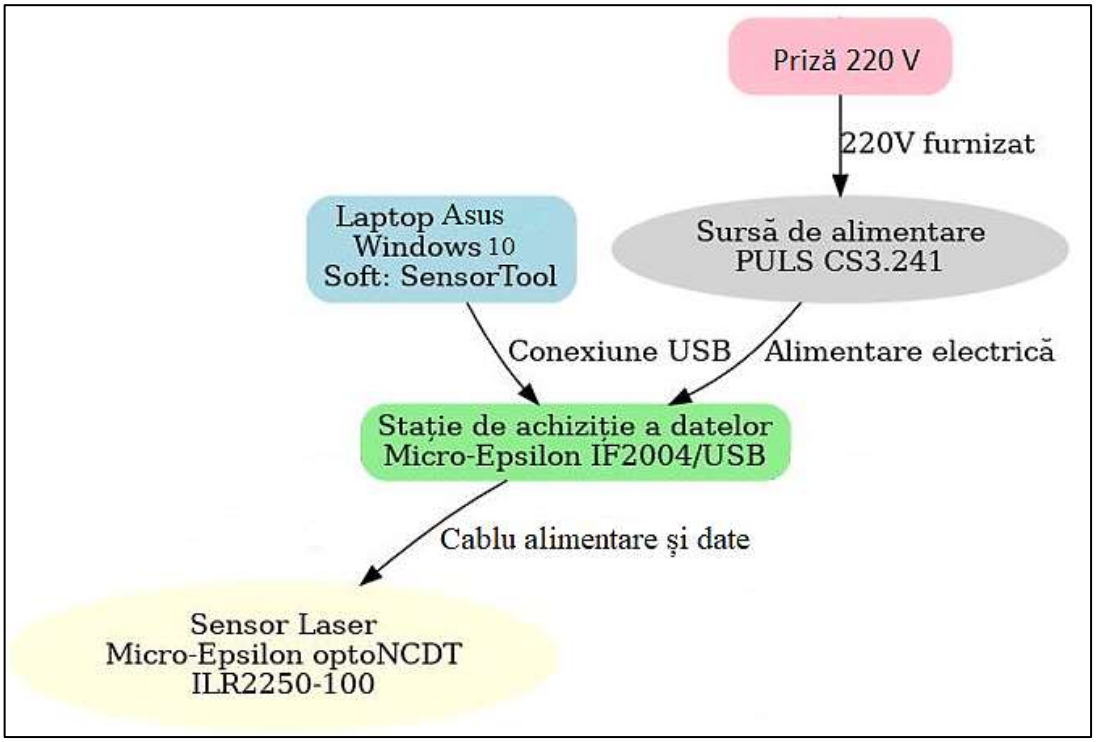


Fig. 5.28 - Instalația de măsurare a deplasărilor

Metoda prin care s-au înregistrat valorile deplasărilor a constat în parcurgerea părții carosabile a machetei podului cu diverse viteze și mase ale vehiculului, astfel realizând o serie de teste empirice din care putem trage concluzii.

5.6 Scenarii de analiză

În vederea realizării simulărilor pentru a determina variațiile deplasărilor în funcție de viteza și masa vehiculului au fost stabilite următoarele ipoteze:

- pentru captarea valorilor a fost folosit un senzor optic Micro-Epsilon înregistrând valori pe axa Z (direcția perpendiculară pe carosabil);.
- acest senzor este amplasat pe mijlocul podului, 1210 mm (Fig. 5.29). Prin această amplasare am determinat deplasările podului în punctul de mijloc al acestuia similar cu modelul teoretic.
- macheta a fost așezată pe două mese de susținere pentru a simula reazemele, în ambele direcții având aceeași distanță de rezemare iar pentru a simula intrarea pe pod am creat un suport de intrare (Fig. 5.9).
- pentru a se asigura o direcție de deplasare rectilinie a camionului am folosit un ghidaj din plastic lipit pe suprafața machetei (Fig. 5.10).
- viteza vehiculului a fost stabilită ca fiind maximă (MA) sau redusă (RE) datorită faptului că telecomanda cu ajutorul căreia se controlează viteza nu oferă posibilitatea setării unei anumite valori bine definite.

Fig. 5.29 - Poziționarea senzorului optic de măsurare a deplasărilor la jumătatea deschiderii podului

În urma formulării acestor ipoteze, am ales să analizez 6 cazuri distincte, variind viteza (de la minim la maxim) și masa vehiculului (2, 6, 12 kilograme), așa cum este detaliat în Tab. 5.6:

Tab. 5.6 - Cazurile simulărilor efectuate

Nr. caz	Poziție Senzor Optic	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă vehicul [kg]	Masă adăugată [kg]	Masă totală [kg]	Valoare minimă deplasare - axa Z [mm]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	0	2	
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	0	2	
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	4	6	
C4	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	4	6	
C5	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	10	12	
C6	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	10	12	
Viteză vehicul	MA	Maximă				
	RE	Redusă				

5.7 Rezultate experimentale obținute

Simulările au constat în execuția cazurilor prezentate în Tab. 5.6 variind viteza vehiculului de la maximă la redusă și treptat crescând masa de la 2 kilograme până la 12 kilograme.

În urma efectuării testelor, cu ajutorul soft-ului SensorTool am obținut un fișier de tip tabelar (Excel) ce conține un set de date pentru fiecare caz studiat. După prelucrarea datelor

obținute am transpus valorile minime ale deplasărilor podului sub formă de grafic pentru fiecare caz în (Fig. 5.30-5.35):

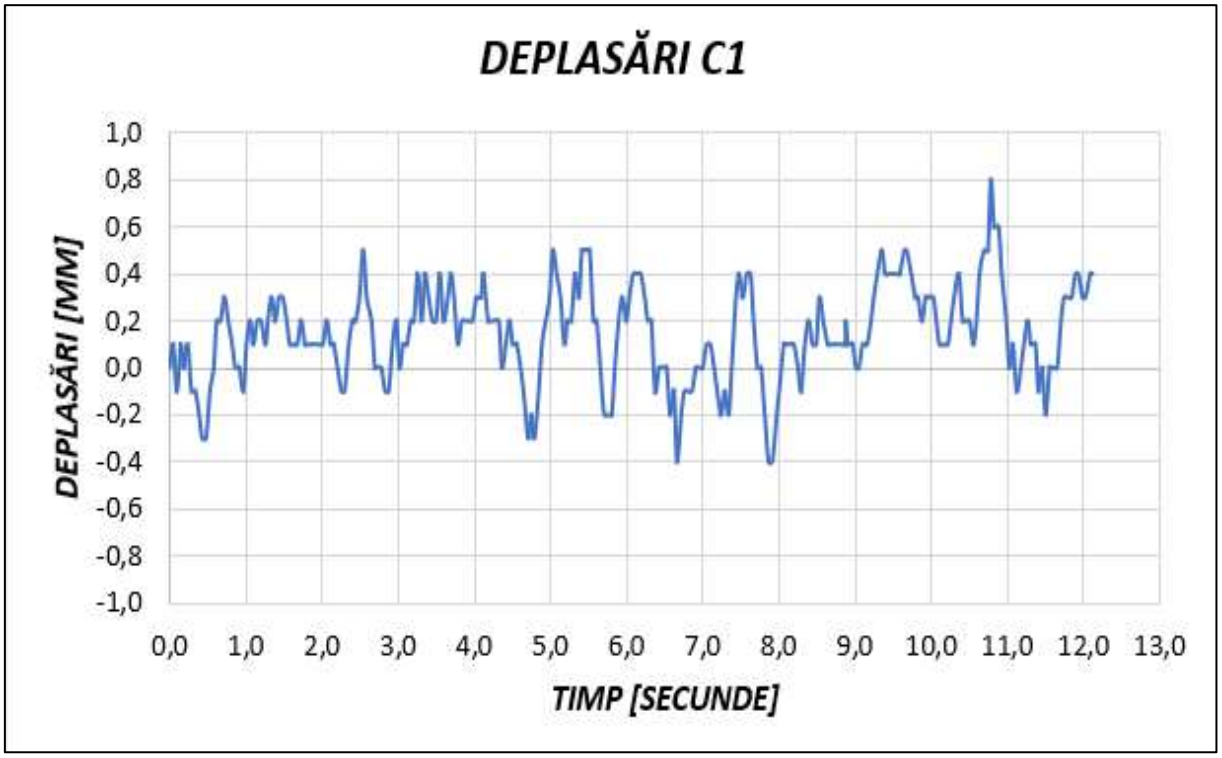


Fig. 5.30 - Deplasări obținute pentru cazul C1

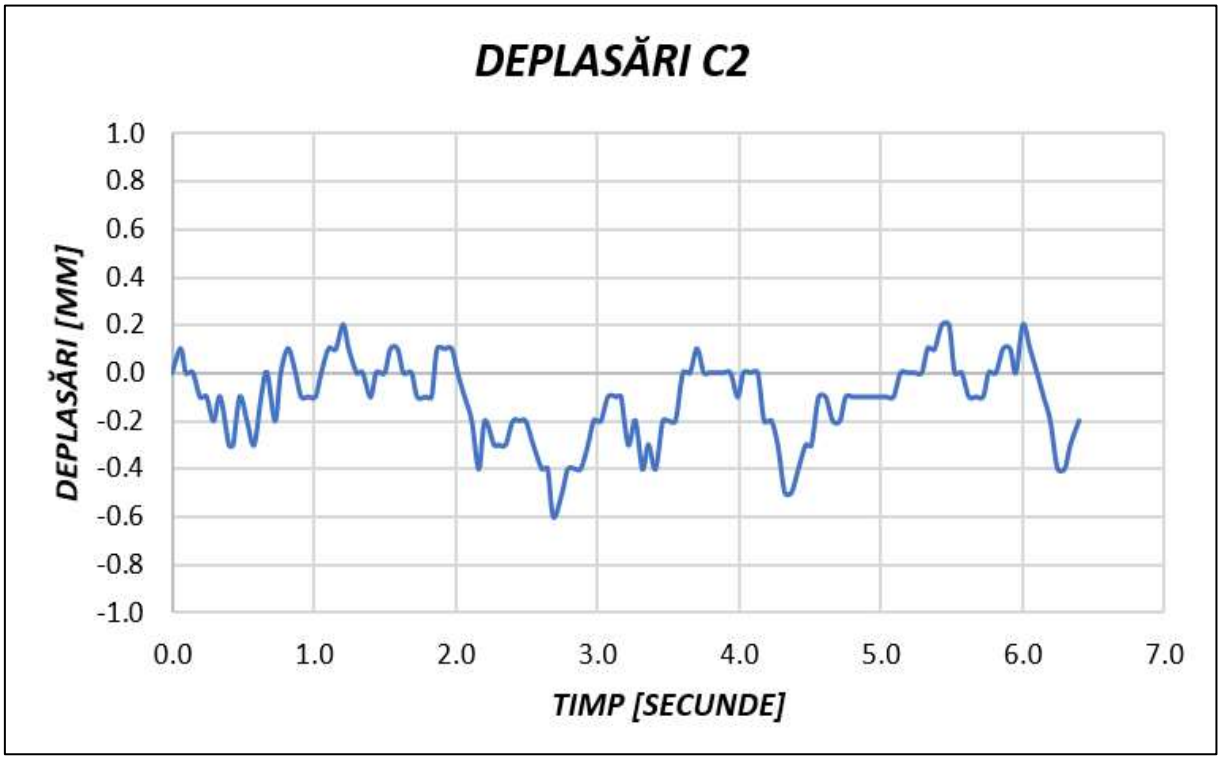


Fig. 5.31 - Deplasări obținute pentru cazul C2

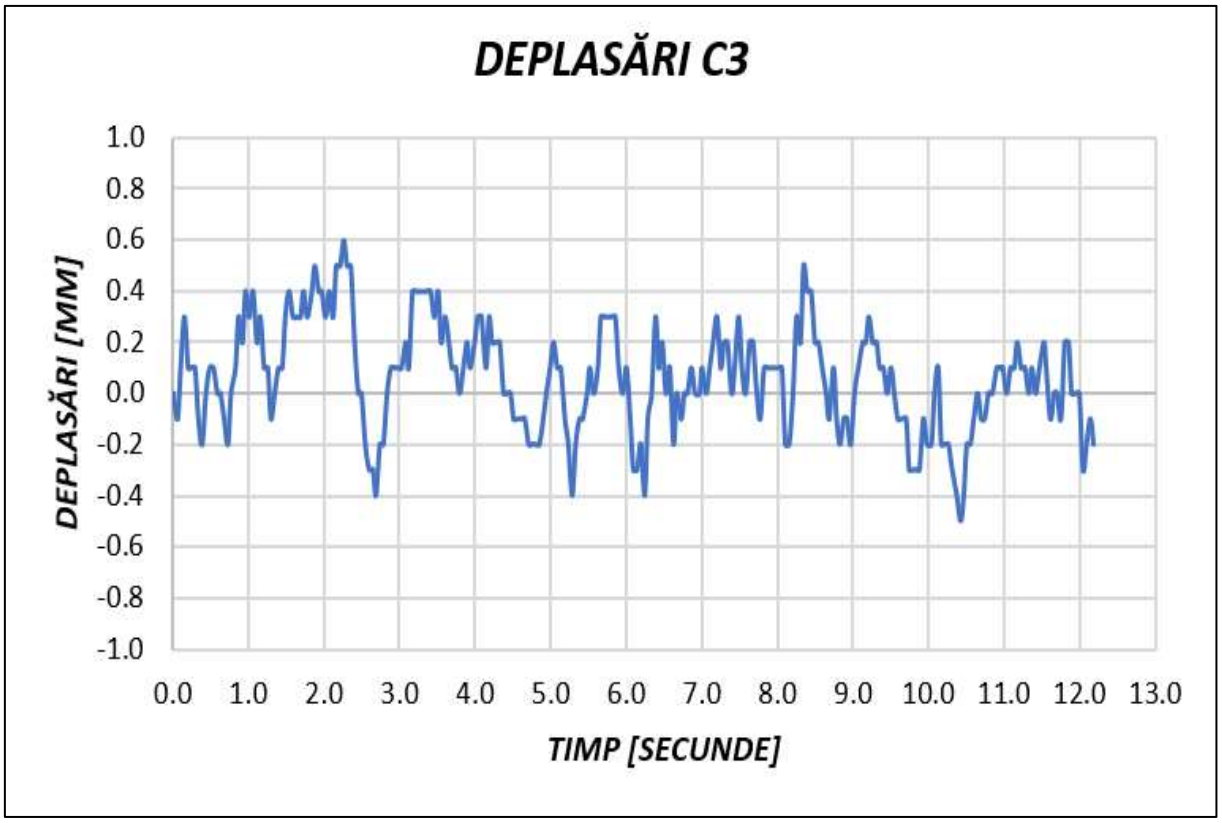


Fig. 5.32 - Deplasări obținute pentru cazul C3

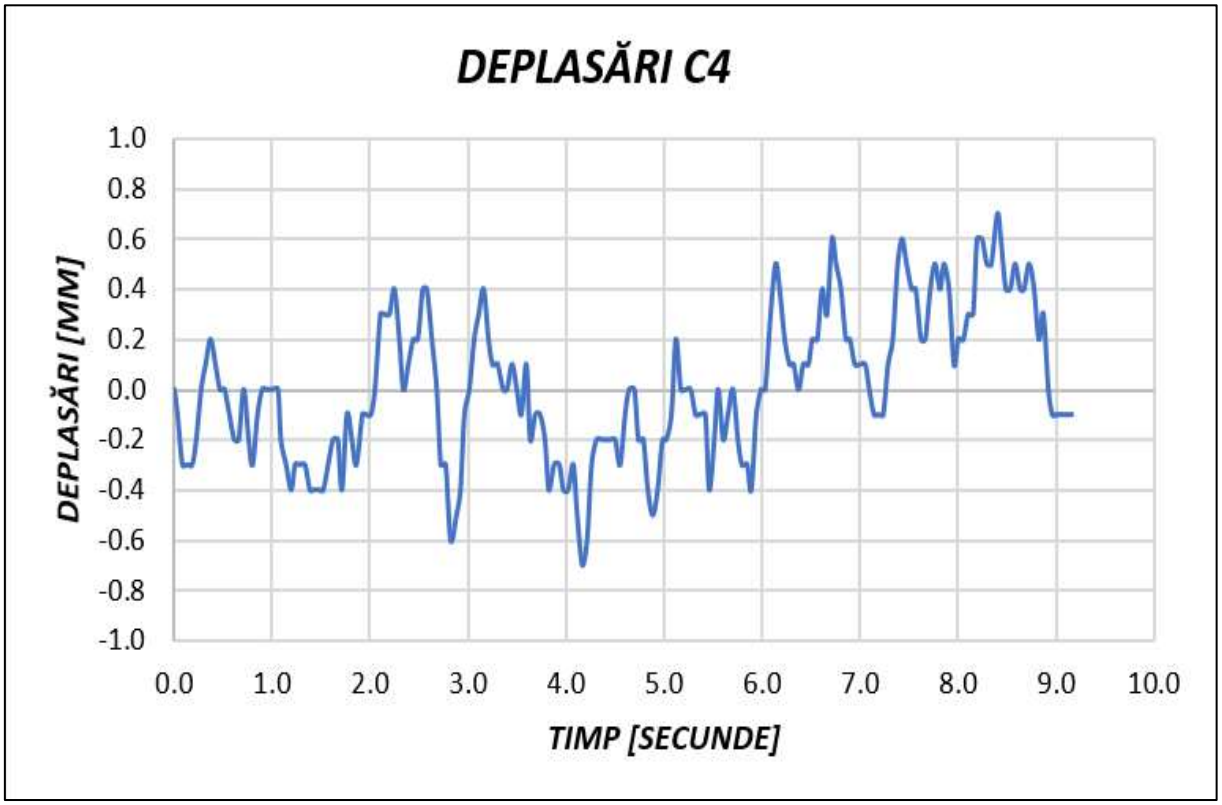


Fig. 5.33 - Deplasări obținute pentru cazul C4

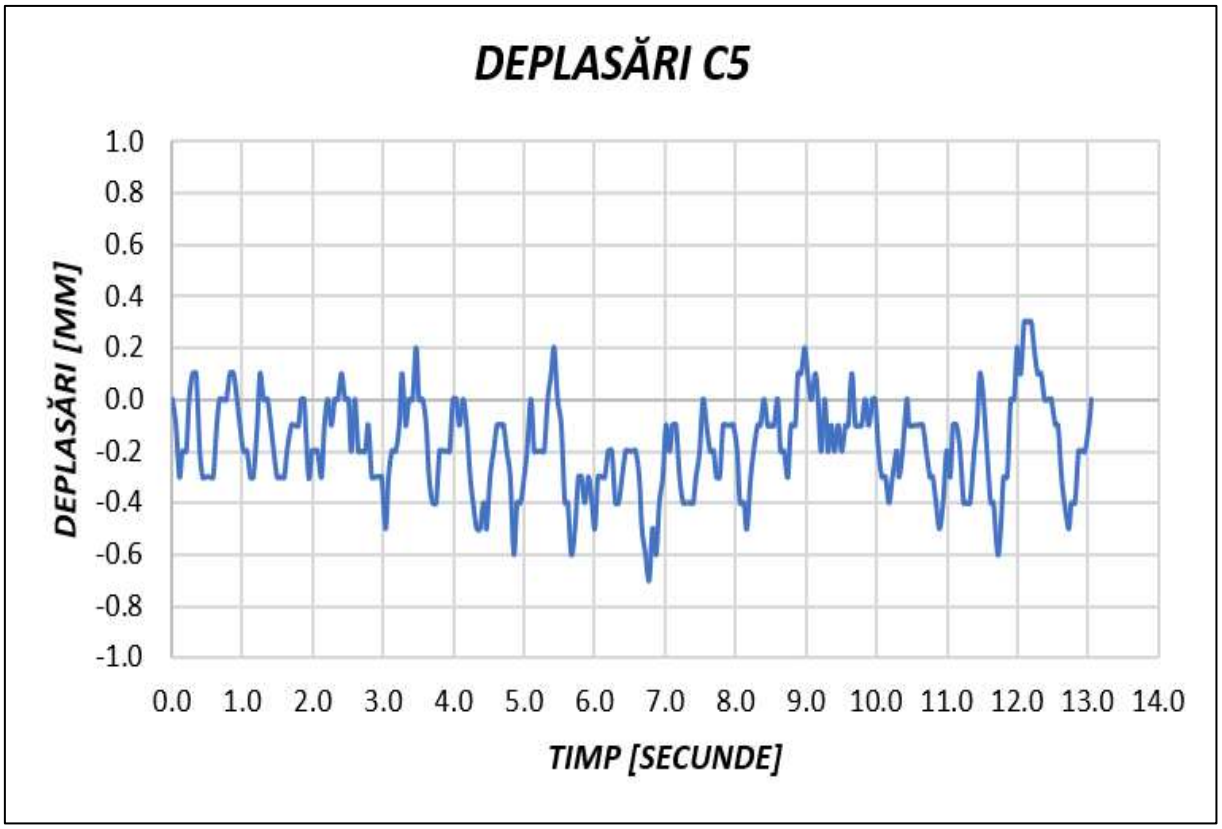


Fig. 5.34 - Deplasări obținute pentru cazul C5

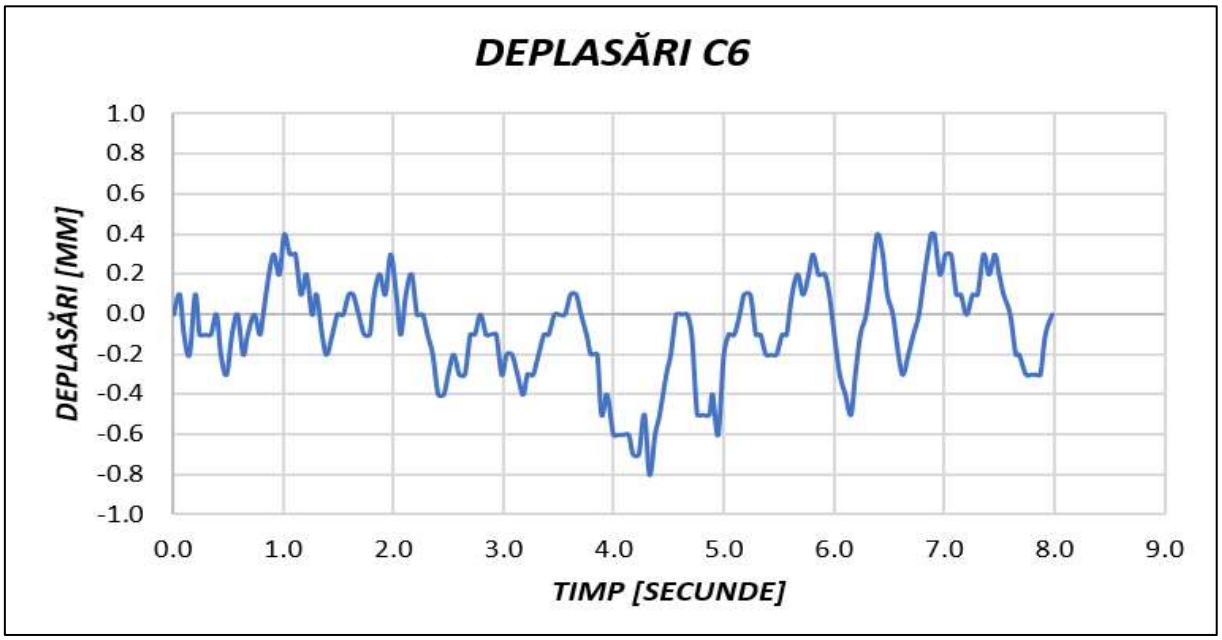


Fig. 5.35 - Deplasări obținute pentru cazul C6

Următorul pas a fost de a centraliza datele obținute sub formă tabelară în urma graficelor generate (Tab. 5.7).

Tab. 5.7 - Centralizarea deplasărilor obținute pentru fiecare caz simulat

Nr. caz	Poziție Senzor Optic	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă vehicul [kg]	Masă adăugată [kg]	Masă totală [kg]	Valoare minimă deplasare - axa Z [mm]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	**0**	2	-0,4
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	**0**	2	-0,6
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	**4**	6	-0,5
C4	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	**4**	6	-0,7
C5	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	**10**	12	-0,7
C6	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	**10**	12	-0,8
Viteză vehicul	MA	Maximă				
	RE	Redusă				

Pentru a evidenția variațiile deplasărilor am realizat o sortare a rezultatelor obținute după viteză prin menținerea vitezei constante și creșterea masei vehiculului (Tab. 5.8):

Tab. 5.8 - Sortarea rezultatelor obținute

Nr. caz	Poziție Senzor Optic	Viteză vehicul [MA/RE]	Masă vehicul [kg]	Masă adăugată [kg]	Masă totală [kg]	Valoare minimă deplasare - axa Z [mm]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	**0**	2	-0,4
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	**4**	6	-0,5
C5	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	**10**	12	-0,7
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	**0**	2	-0,6
C4	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	**4**	6	-0,7
C6	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	**10**	12	-0,8
Viteză vehicul	MA	Maximă				
	RE	Redusă				

Pe baza valorile obținute ale deplasărilor am constatat următoarele lucruri:

- valorile înregistrate arată că viteza vehiculului influențează deplasarea minimă a podului. Deplasările sunt mai mari în cazul vitezei maxime (MA) comparativ cu viteza redusă (RE), ceea ce indică o creștere a solicitării structurale datorită inerției crescute.

- creșterea masei totale a vehiculului duce la o amplificare a deplasărilor minime pe axa Z, indiferent de viteza vehiculului. De exemplu, pentru viteza redusă, deplasarea minimă a crescut de la -0,4 mm (2 kg) la -0,7 mm (12 kg), indicând o corelație directă între încărcare și deformația structurală.

- diferențele între deplasările minime la viteza redusă și viteza maximă sunt mai pronunțate pe măsură ce masa vehiculului crește. Acest lucru sugerează o sensibilitate sporită a structurii la sarcinile dinamice asociate vitezei.

- structura machetei podului răspunde în mod predictibil la creșterea sarcinii, demonstrând un comportament elastic în limitele maselor și condițiilor testate.

5.8 Concluzii

Siguranța comportamentului static al machetei podului metalic este influențată în mod semnificativ de creșterea sarcinii vehiculului, ceea ce conduce la amplificarea deplasărilor. Acest fenomen evidențiază o relație directă între mărirea masei vehiculului și intensificarea solicitărilor structurale.

Viteza vehiculului exercită, de asemenea, un impact considerabil asupra comportamentului structural al podului, înregistrându-se deplasări mai pronunțate la viteza maximă comparativ cu viteza redusă. Aceste rezultate subliniază importanța inerției în creșterea efectelor dinamice asupra structurii și, implicit, relevanța reglementării vitezei pentru diminuarea solicitărilor dinamice.

Creșterea masei vehiculului accentuează diferențele dintre deplasările asociate vitezelor analizate, indicând o sensibilitate structurală crescută la încărcările dinamice în condiții de sarcină ridicată.

Analiza rezultatelor confirmă un comportament elastic previzibil al machetei podului în limitele parametrilor examinați, ceea ce oferă un cadru util pentru evaluarea și proiectarea podurilor metalice în raport cu cerințele de exploatare din condiții reale.

Capitolul 6. Analiză cu elemente finite pe modelul machetei realizate

Metodele de analiză cu elemente finite (FEM) constituie un instrument fundamental în ingineria structurală, permițând modelarea și evaluarea comportamentului sistemelor complexe în diverse condiții de lucru.

În acest capitol are loc o analiză cu elemente finite asupra machetei metalice a podului, construită la o scară de 1:25. Analiza va fi efectuată utilizând software-ul CATIA V5R19, care permite simularea și evaluarea comportamentului structural în condiții de încărcare statică. Modelul podului fiind proiectat deja în programul SolidWorks într-un capitol precedent. Scopul principal al acestei analize este determinarea deplasărilor machetei sub acțiunea diferitelor încărcări generate de masele vehiculelor.

Rezultatele obținute vor contribui la o înțelegere mai profundă a comportamentului structural al machetei studiate. Această abordare reprezintă o metodologie riguroasă, care combină avantajele simulării numerice cu observațiile experimentale, asigurând validitatea și relevanța concluziilor formulate.

6.1 Prezentarea modelului și a metodologiei utilizate

Modelul 3D al machetei metalice a podului de la Mircești a fost proiectat deja cu ajutorul programului SolidWorks în capitolul 4 (Fig. 6.1). Scara pentru modelul realizat este de 1:25.

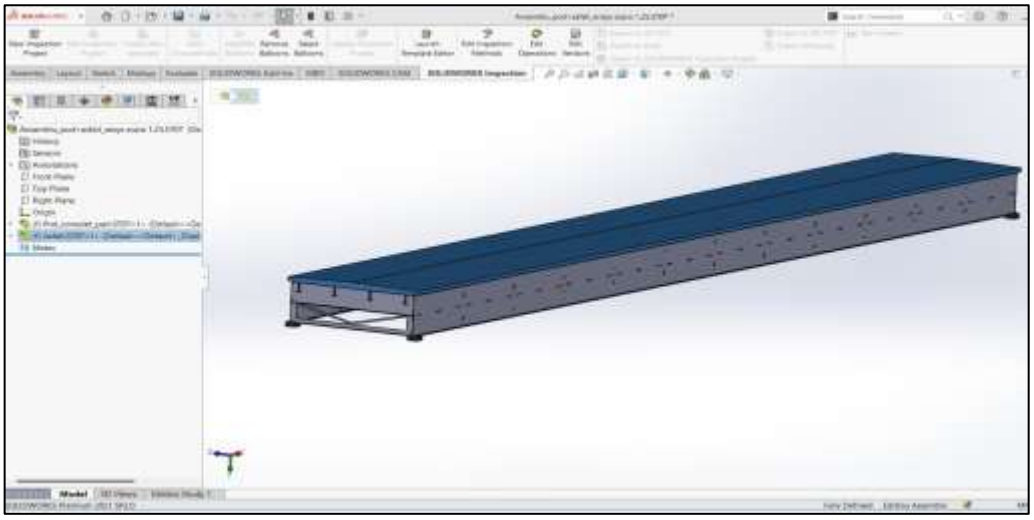


Fig. 6.1 - Modelul 3D al machetei podului de la Mircești proiectat în SolidWorks

Modelarea necesară pentru realizarea analizei cu element finit (FEM) a fost efectuată utilizând programul Catia (Nader, 2008; Ottosen & Petersson, 1992; González, 2010). Pentru simularea încărcărilor aplicate pe pod, generate de masele vehiculelor, au fost definite următoarele proprietăți esențiale ale modelului:

- materialul utilizat pentru structura metalică a podului.
- materialul utilizat pentru carosabilul podului.
- tipul de element finit utilizat pentru discretizarea rețelei.
- stabilirea condițiilor de reazem.
- localizarea încărcărilor aplicate pe pod și direcția axei de acțiune.

Aceste specificații au fost integrate în model pentru a asigura o analiză precisă și relevantă.

Rețeaua discretizată (MESH) utilizată în analizele de tip FEM constă în divizarea geometriei modelului într-un ansamblu de elemente finite mai mici, facilitând astfel calculul distribuit al proprietăților fizice (Fig. 6.2).

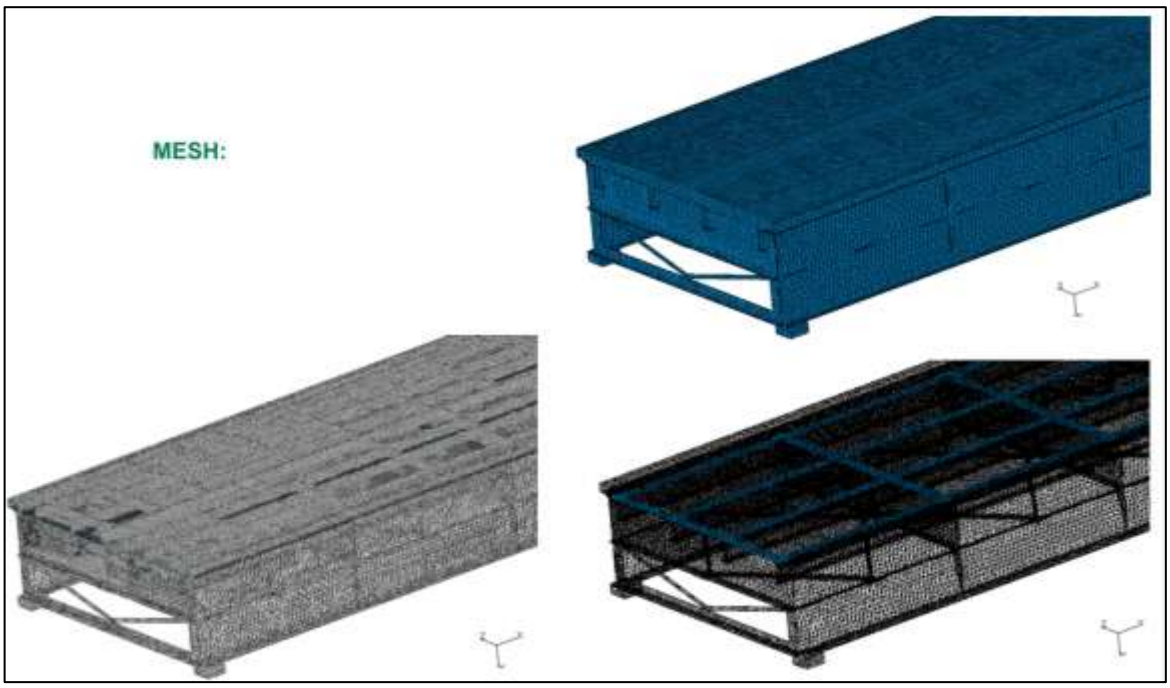


Fig. 6.2 - Rețeaua discretizată a modelului folosit pentru analiză

Discretizarea a fost realizată utilizând în principal elemente tetraedrice parabolice TE10, un element solid izoparametric cu zece noduri, recunoscut pentru precizia superioară în reprezentarea geometriilor complexe, deși necesită un consum mai ridicat de resurse computaționale. Rețeaua de discretizare este compusă din 1,980493 x 10^6 noduri și 1,106026 x 10^6 elemente. Acest tip de elemente a fost utilizat în proporție de 96,32%, completat de elemente SPIDER, care au reprezentat 3,68% din rețea. Ambele tipuri de elemente sunt ilustrate în Fig. 6.3.

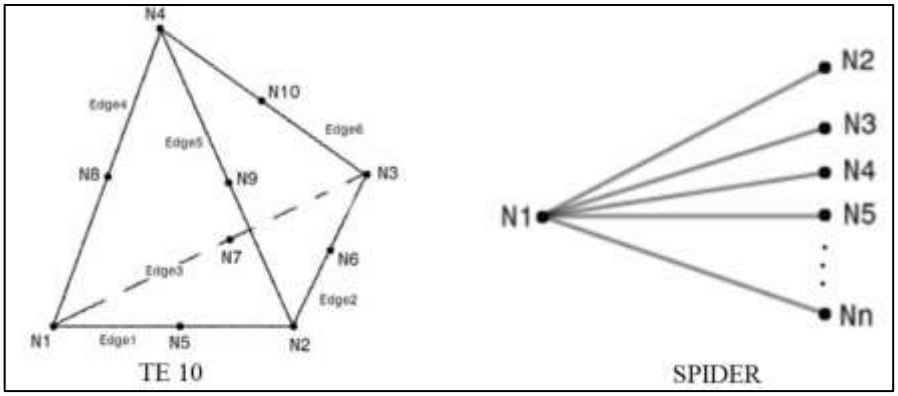


Fig. 6.3 - Tipul elementelor folosite în rețeaua de discretizare (Catiadoc.free, 2024)

Condițiile de reazem reprezintă un aspect esențial în modelarea FEM a podului, influențând direct distribuția tensiunilor și deformațiilor în structură. În acest model,

constrângerile au fost aplicate la ambele capete ale podului, conform configurației prezentate în Fig. 6.4. Ambele reazeme au fost definite de tip fix.

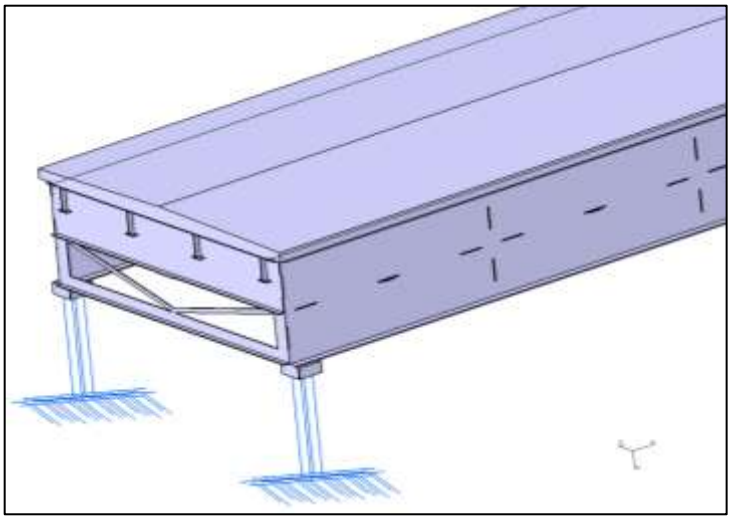


Fig. 6.4 - Aplicarea condițiilor de reazem pentru modelarea cu elemente finite

Această abordare reflectă o situație în care structura este ferm ancorată în infrastructură la ambele capete, oferind o rigiditate suplimentară pentru a face față încărcărilor aplicate. Constrângerile au fost aplicate la nivelul nodurilor din modelul discretizat, asigurând o distribuție realistă a tensiunilor și o stabilitate structurală corespunzătoare. Alegerea acestor reazeme fixe permite simularea precisă a comportamentului structural sub încărcări statice, oferind rezultate relevante pentru evaluarea siguranței și performanței podului.

Amplasarea încărcărilor este definitorie în analiza comportamentului structural al podului, deoarece permite simularea scenariilor reale de exploatare. În acest model FEM, încărcările au fost aplicate pe mijlocul podului, zonă identificată ca fiind critică pentru evaluarea tensiunilor și deformațiilor maxime generate de forțele exterioare. Această alegere este justificată prin faptul că, în structurile de tip grindă, încărcările aplicate central generează cele mai mari deplasări ale podului. Pentru simulare, încărcările au fost definite ca forțe concentrate, reprezentând masele vehiculelor, aplicate în puncte specifice ale rețelei discretizate. Direcția acestor încărcări a fost stabilită pe axa verticală (Z), perpendiculară pe suprafața carosabilului podului (Fig. 6.5).

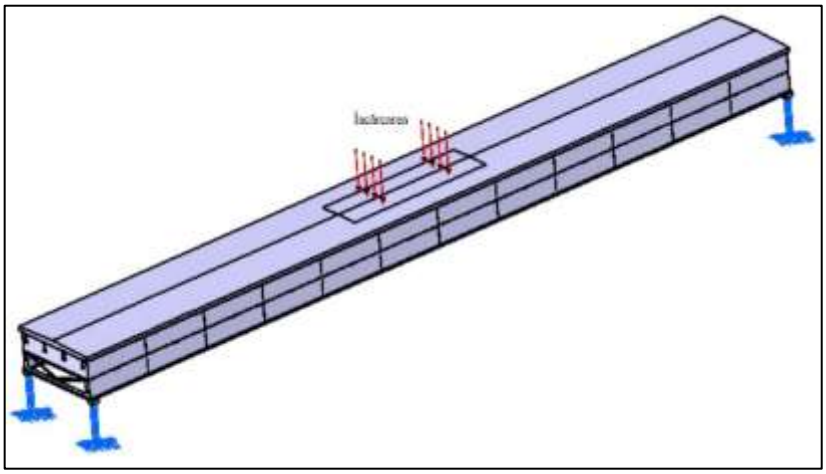


Fig. 6.5 - Amplasarea încărcărilor pe modelul folosit pentru analiza cu elemente finite

Această amplasare centrală a încărcărilor permite o evaluare detaliată a comportamentului structural al podului în condiții de încărcare maximă, fiind esențială pentru determinarea secțiunilor critice. În plus, aceasta oferă o bază solidă pentru validarea stabilității structurale și pentru identificarea zonelor vulnerabile care pot necesita măsuri suplimentare de consolidare.

6.2 Scenarii de analiză

După definirea proprietăților relevante pentru modelarea cu elemente finite, s-au stabilit o serie de cazuri de analiză. În toate aceste scenarii, încărcarea a fost aplicată în centrul podului. Fiecare caz propus este caracterizat prin încărcarea exercitată asupra podului, generată de trei vehicule cu mase diferite, variind între 2 kg și 12 kg. Aceste valori au fost selectate pentru a corespunde cu cele utilizate în testele experimentale efectuate fizic pe macheta podului.

Pentru simularea celor trei cazuri, masele vehiculelor au fost transformate în forțe, facilitând astfel realizarea analizelor utilizând metoda elementelor finite. Tab. 6.1 prezintă detaliile cazurilor analizate, realizate printr-o abordare statică asupra machetei metalice a podului.

Tab. 6.1 - Cazurile propuse pentru analiza cu elemente finite pe modelul 3D al machetei podului

Nr. caz	Amplasarea încărcării	Masă încărcare [kg]	Forță încărcare [N]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	2	19,61
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	6	58,84
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	12	117,68

6.3 Rezultate obținute

După stabilirea celor trei cazuri și a condițiilor de simulare utilizând metoda elementelor finite, s-au efectuat analizele corespunzătoare conform scenariilor descrise în Tab. 6.1. Prin intermediul programului Catia, au fost generate pentru fiecare caz reprezentări grafice ale valorilor maxime ale deplasărilor înregistrate pentru macheta podului de la Mircești (Fig. 6.6–6.8).

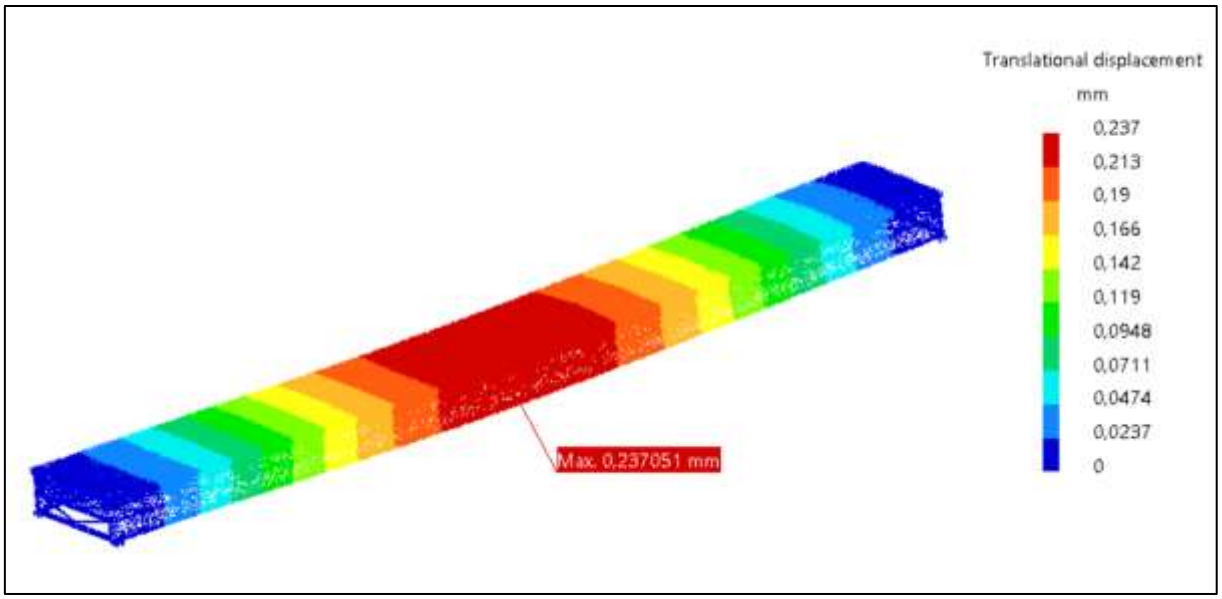


Fig. 6.6 - Deplasări obținute pentru cazul C1

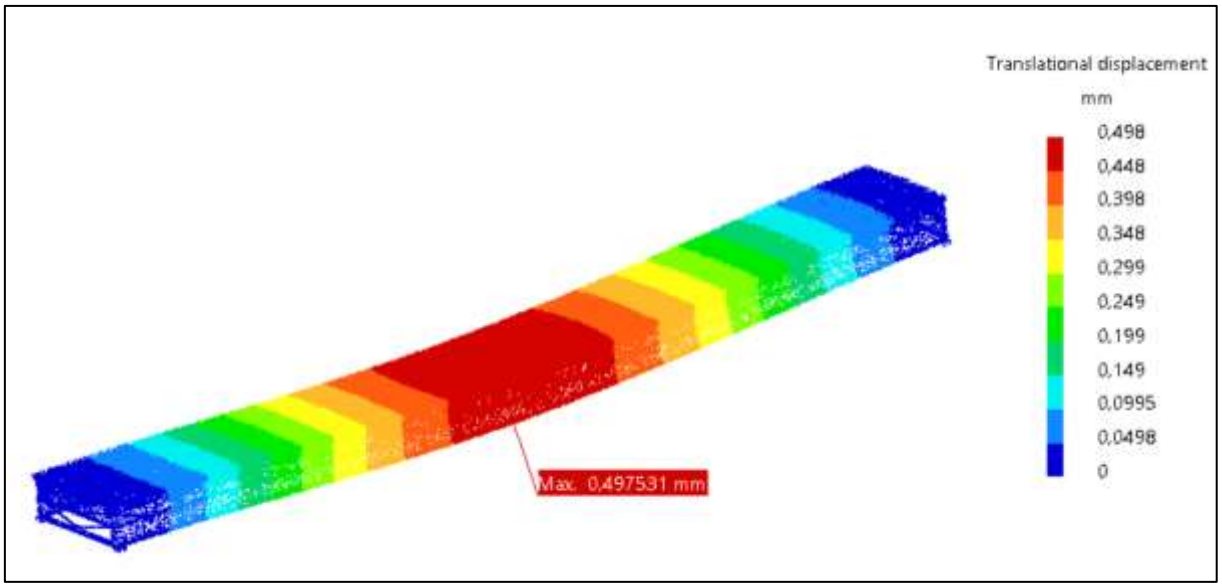


Fig. 6.7 - Deplasări obținute pentru cazul C2

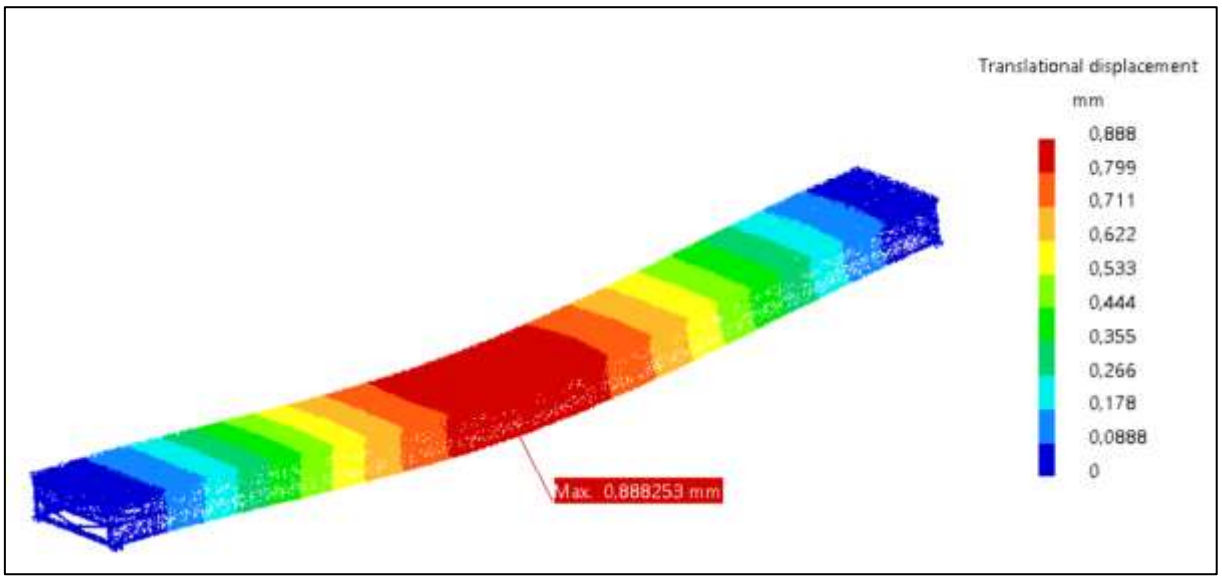


Fig. 6.8 - Deplasări obținute pentru cazul C3

Pentru o evidențiere mai clară a rezultatelor obținute sub formă grafică, a fost realizat un centralizator al acestora (Tab. 6.2). Având în vedere direcția de acționare a încărcărilor și natura deformațiilor podului, valorile deplasărilor au fost considerate negative.

Tab. 6.2 - Centralizarea deplasărilor obținute pe podul de la Mircești în urma analizei cu elemente finite pentru cele 3 cazuri

Nr. caz	Amplasarea încărcării	Masă încărcare [kg]	Forță încărcare [N]	Valoare minimă deplasare pe axa Z [mm]
C1	Mijlocul podului - 1210 mm	2	19,61	-0,2
C2	Mijlocul podului - 1210 mm	6	58,84	-0,5
C3	Mijlocul podului - 1210 mm	12	117,68	-0,9

În urma centralizării rezultatelor obținute după execuția celor 3 cazuri prin metoda elementelor finite am constatat următoarele lucruri:

- în primul caz (C1), o masă de 2 kg (echivalentul unei forțe de 19,61 N) a fost aplicată. Rezultatul simulării indică o valoare minimă a deplasării de -0,2 mm pe axa Z. Aceasta sugerează o deplasare redusă, corespunzătoare unei sarcini relativ mici.

- în al doilea caz (C2), masa aplicată a fost crescută la 6 kg (echivalentul unei forțe de 58,84 N). Deplasarea minimă rezultată a fost de -0,5 mm. Comparativ cu primul caz, se observă o creștere de 150% a valorii deplasării, ceea ce indică o sensibilitate semnificativă a podului la variația încărcărilor.

- în cel de-al treilea scenariu, încărcarea maximă de 12 kg (echivalentul unei forțe de 117,68 N) a generat o deplasare minimă de -0,9 mm. Comparativ cu C1, valoarea deplasării a crescut de 4,5 ori, iar față de C2, creșterea este de 80%.

6.4 Concluzii

Analiza evidențiază o relație direct proporțională între masa aplicată și deplasarea minimă a podului pe axa Z. Acest comportament este în concordanță cu natura liniară a deformării materialului în limitele elasticității.

Deplasarea minimă a podului crește semnificativ odată cu amplificarea încărcării, reflectând un comportament structural previzibil în condiții de solicitare crescută. Deși deformările sunt evidente în termeni relativi, valorile lor absolute rămân reduse.

Deplasările înregistrate sunt mici comparativ cu lungimea totală a podului, ceea ce indică o rigiditate structurală ridicată. Acest aspect sugerează că podul are capacitatea de a rezista încărcărilor simulate fără apariția unor probleme structurale majore.

Rezultatele obținute prin metoda analizei cu elemente finite (FEM) vor fi utilizate pentru a compara deplasările experimentale determinate pe macheta metalică a podului. Această abordare permite validarea testelor experimentale și confirmarea comportamentului structural anticipat.

Din perspectiva eficienței, utilizarea analizei FEM în cadrul programului Catia se dovedește avantajoasă atât din punct de vedere financiar, cât și al timpului necesar pentru determinarea deplasărilor structurale. Această metodă oferă o soluție rapidă și economică pentru evaluarea comportamentului podului în condiții de încărcare simulate.

Aceste concluzii subliniază relevanța metodei FEM în analiza structurală și contribuția acesteia la optimizarea procesului de proiectare și testare.

Capitolul 7. Analiză în situ pe podul de peste Siret de la Mircești

Analiza comportamentului structural al podurilor este esențială pentru evaluarea siguranței și durabilității acestora, în special în condițiile solicitărilor generate de traficul rutier. Studiul experimental asupra podului de peste Siret de la Mircești urmărește să ofere o înțelegere detaliată a modului în care vehiculele și viteza de deplasare a acestora influențează comportamentul structural al podului prin identificarea variațiilor deplasărilor și accelerațiilor.

Subcapitolele următoare vor include o descriere detaliată a podului, evidențiind caracteristicile sale constructive și funcționale. De asemenea, vor fi prezentate echipamentele de măsurare selectate, optimizate pentru a asigura captarea precisă a datelor necesare unei analize complexe. Totodată, metodologia de desfășurare a testelor experimentale va fi prezentată în mod detaliat, pentru a asigura reproductibilitatea studiului și validitatea rezultatelor obținute.

Rezultatele obținute din aceste teste vor fi analizate și interpretate, oferind informații valoroase despre modul în care solicitările dinamice influențează comportamentul structural al podului. În final, pe baza acestor analize, vor fi formulate concluzii care vor contribui atât la înțelegerea testelor realizate, cât și la evaluarea influenței masei și vitezei vehiculelor asupra structurii podului. Această abordare oferă o perspectivă completă asupra comportamentului structural al podului în condiții reale de exploatare.

7.1 Prezentarea podului

Podul de la Mircești, care traversează râul Siret, a fost finalizat în anul 1958 și este operațional de peste șase decenii. Această structură joacă un rol esențial în asigurarea legăturii rutiere între Iași, principalul pol de dezvoltare al regiunii Moldova, și capitala țării, București, precum și cu alte regiuni ale României (Fig.7.1).

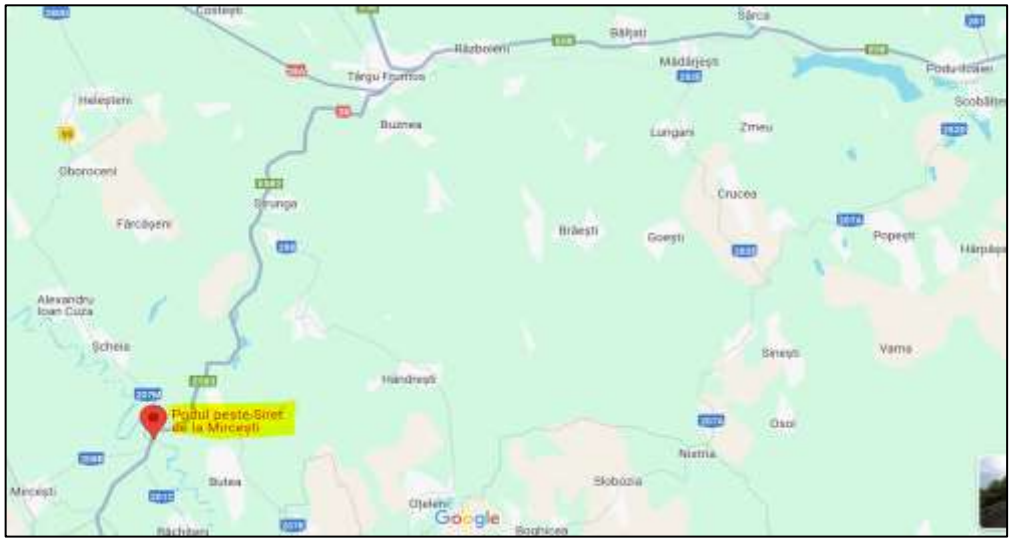


Fig. 7.1 - Amplasarea podului de peste Siret de la Mircești

În fiecare zi, podul suportă traficul intens generat de vehicule de mari dimensiuni și tonaj. Accesul pe podul de la Mircești, din direcția Roman spre Iași, este ilustrat în Fig. 7.2.

Fig. 7.2 - Intrare pod Mircești dinspre Roman spre Iași (GoogleMaps, 2024)

7.2 Echipamentele pentru măsurarea accelerațiilor si deplasărilor podului în situ

În vederea determinării influenței masei și vitezei vehiculelor asupra accelerațiilor și deplasărilor podurilor în situ, am folosit o instalație experimentală bazată pe accelerometre wireless cu ajutorul căreia am determinat valorile accelerațiilor iar pentru determinarea deplasărilor o instalație bazată pe senzori optici.

Pentru măsurarea accelerațiilor în situ, instalația experimentală este compusă din:

- un laptop Acer cu sistem de operare Windows 11 (Fig. 7.3) pe care s-a instalat software-ul SensorConnect (Fig. 7.4) folosit pentru înregistrarea datelor.

Fig. 7.3 - Laptop Acer folosit pentru achiziția datelor

Fig. 7.4 - Software-ul SensorConnect folosit pentru achiziția datelor

- aceeași stație LORD WSDA-200-USB (Fig 7.5) folosită și pentru testele realizate pe machetă care este un gateway USB pentru achiziționarea datelor de la senzorii wireless Lord.

Fig. 7.5 - Stația de achiziție a datelor LORD – model WSDA-200-USB

- aceleași 2 accelerometre wireless folosite și pentru testele realizate pe machetă, Parker LORD G-Link-200 cu codurile 57219 și 57218 (Fig 7.6).

Fig. 7.6 - Accelerometre wireless Parker LORD G-Link-200

Instalația utilizată pentru măsurarea variațiilor accelerațiilor in situ este reprezentată grafic, facilitând astfel o înțelegere mai clară a principiilor și funcționării acesteia (Fig. 7.7).

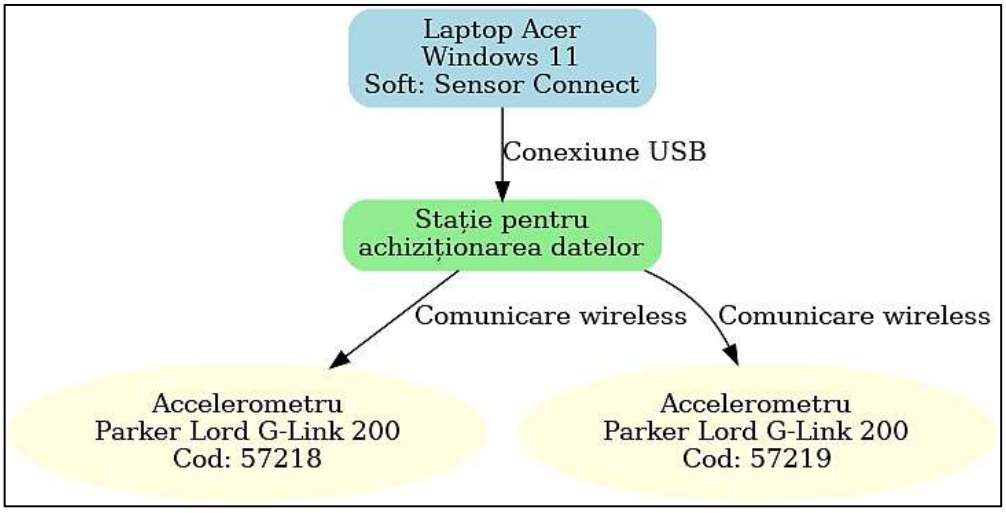


Fig. 7.7 - Instalația de măsurare a accelerațiilor în situ

Pentru măsurarea deplasărilor în situ, instalația experimentală este compusă din:

- o mașină cu ajutorul căreia s-a generat curent electric necesar alimentării instalației de măsurare prin intermediul unui invertor auto (Fig. 7.8).

Fig. 7.8 - Mașina folosită sub formă de generator pentru curentul electric necesar instalației de măsurare

- un laptop Lenovo cu sistem de operare Windows 11 și programul SensorTool folosit la colectarea deplasărilor (Fig. 7.9).

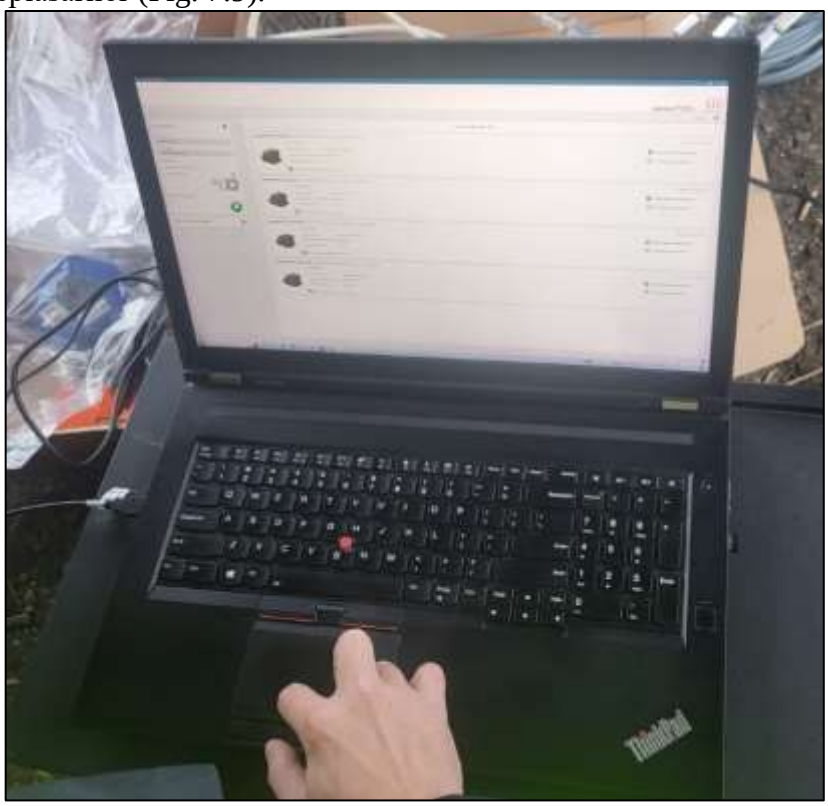


Fig. 7.9 - Laptop Lenovo cu sistem de operare Windows 11 și programul SensorTool

- aceeași sursă de alimentare PULS CS3.241 (Fig. 7.10) folosită și la testele pe machetă, care este alimentată la invertorul auto cu rol de a furniza curent pentru stația de achiziție a datelor.

Fig. 7.10 - Sursa de alimentare PULS CS3.241 necesară funcționării stației de achiziție a datelor (Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, 2024)

- aceeași stație de achiziție a datelor Micro-Epsilon IF2004/USB folosită și la testele pe machetă prin intermediul căreia are loc transmiterea datelor înregistrate către laptop-ul Lenvo prin conexiunea USB (Fig. 7.11).

Fig. 7.11 - Microepsilon IF2004/USB - Stația de achiziție a datelor (Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, 2024)

- patru senzori optici Micro-Epsilon optoNCDT ILR2250-100 (Fig. 7.12) care se conectează la stația de achiziție a datelor prin intermediul cablurilor de alimentare și transmit distanța măsurată în mm. Pentru fiecare senzor a fost creat un suport metalic cu talpă pentru a asigura un contact stabil cu solul și a nu influența eronat măsurătorile.

Fig. 7.12 - Senzori optici Micro-Epsilon optoNCDT ILR2250-100

Instalația utilizată pentru măsurarea deplasărilor in situ este reprezentată grafic, facilitând astfel o înțelegere mai clară a funcționării acesteia în (Fig. 7.13).

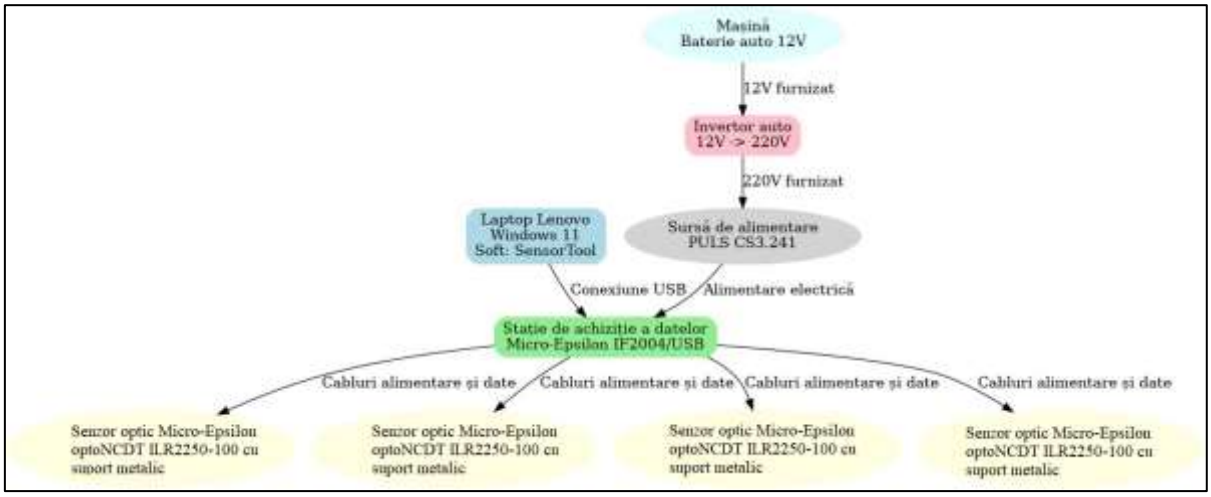


Fig. 7.13 - Instalația de măsurare a deplasărilor în situ

7.3 Amplasarea instalației experimentale

Având în vedere capacitățile tehnice ale instalației utilizate pentru măsurarea accelerațiilor și deplasărilor, precum și caracteristicile mediului înconjurător în care este situat podul de la Mircești, s-a decis analiza deschiderii podului cu o lungime de 50,35 m, corespunzătoare direcției de mers Roman-Iași (Fig. 7.14).

Fig. 7.14 - Deschiderea Podului de la Mircești selectată pentru analiză

Procesul de măsurare a accelerațiilor podului de la Mircești a implicat determinarea precisă a pozițiilor de instalare a accelerometrelor. Acestea au fost montate pe pod, după pregătirea adecvată a suprafeței de instalare prin îndepărtarea impurităților și uniformizarea suprafețelor neregulate ale platformei pietonale cu ajutorul unei perii. Aceste măsuri au fost necesare pentru a asigura un contact optim între accelerometru și suprafața de montaj (Fig. 7.15).

Fig. 7.15 - Amplasarea accelerometrelor pe suprafața podului

Cele două accelerometre, identificate prin codurile 57218 și 57219, au fost conectate wireless la un laptop, fiind activate simultan. Pe durata colectării datelor, laptopul a fost amplasat între cele două accelerometre pentru a asigura o conexiune optimă (Fig. 7.17).

Fig. 7.17 - Amplasarea laptop-ului pe suprafața podului între cele două accelerometre

Accelerometrul cu codul 57218 a fost poziționat la o distanță de 12,58 m de la intrarea pe pod, în timp ce accelerometrul cu codul 57219 a fost amplasat la mijlocul deschiderii podului, la 25,17 m. **Ambii senzori au fost instalați pe partea stângă a direcției de deplasare pe pod, dinspre Roman spre Iași.**

O ilustrare grafică a amplasării instalației de înregistrare a accelerațiilor pe pod este prezentată în Fig. 7.18.

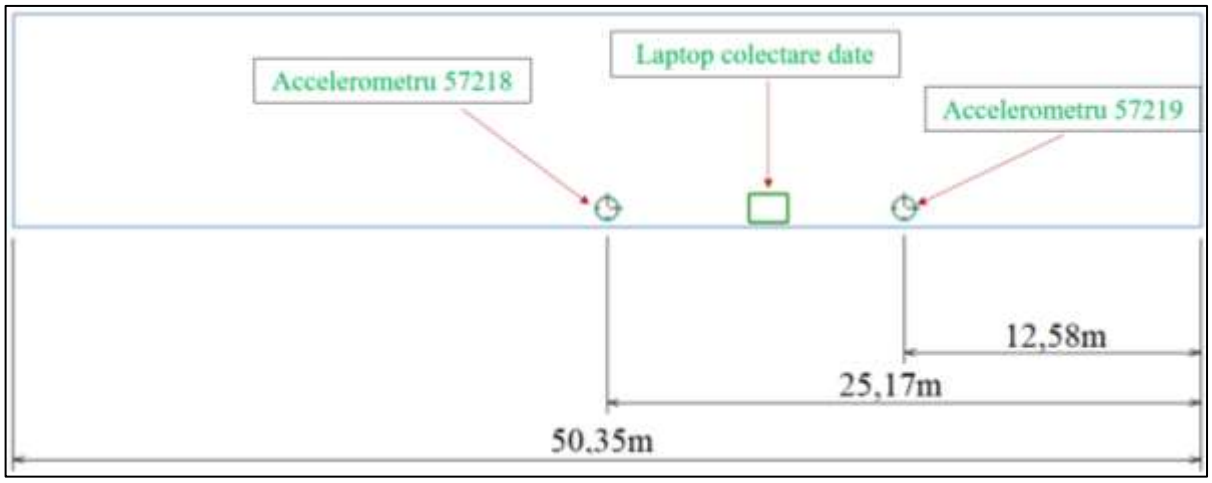


Fig. 7.18 - Reprezentare grafică a instalației de captare a accelerațiilor pe suprafața podului

Pentru înregistrarea deplasărilor podului, instalația de măsurare a fost montată sub structura acestuia. Cei patru senzori optici au fost fixați pe sol, utilizând suporți metalici special concepuți pentru a asigura stabilitatea acestora (Fig. 7.19).

Fig. 7.19 - Amplasarea celor patru senzori optici pe sol cu ajutorul suporților metalici

Locația amplasării senzorilor optici a fost determinată astfel: doi au fost amplasați la mijlocul deschiderii podului, la 25,17 m (S1 și S2), iar ceilalți doi senzori au fost poziționați la o distanță de 12,58 m de intrarea pe pod (S3 și S4). Senzorii au fost distribuiți simetric, câte doi pe partea stângă (S1 și S4) și pe partea dreaptă (S2 și S3). Distribuția senzorilor optici este prezentată în Fig. 7.20.

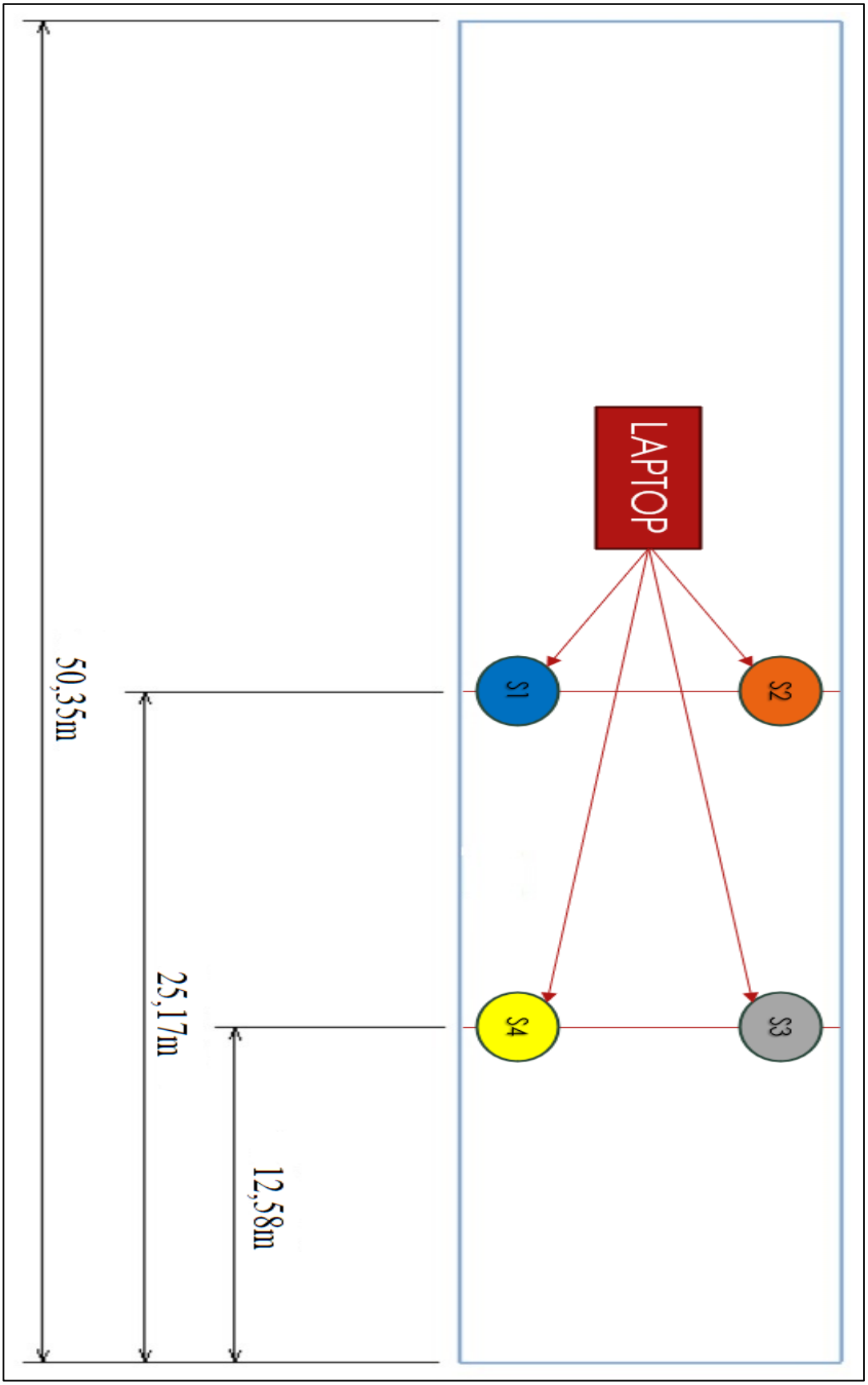


Fig. 7.20 - Reprezentare grafică a instalației de captare a deplasărilor sub structura podului

Fig. 7.21 - Amplasarea instalației de captare a deplasărilor sub structura podului

După finalizarea amplasării instalației pentru măsurarea accelerațiilor și deplasărilor podului, următorul pas a constat în definirea unor scenarii de testare și executarea acestora.

7.4 Scenarii de analiză

Încercările dinamice pe podul de la Mircești au fost realizate pe data de 5 decembrie 2024 în intervalul orar 13:00-14:30. Condițiile meteorologice au fost caracterizate de o temperatură cuprinsă între 1 și 5°C, precipitații sub formă de burniță, carosabil umed și vizibilitate redusă din cauza ceții. Cu ambele instalații de captare a datelor puse în funcțiune a avut loc stabilirea cazurilor de testare prin diferite combinații de vehicule cu mase și viteze diferite care tranzitează suprafața podului în următoare ordine prezentată în Tab. 7.1.

Tab. 7.1 - Cazurile pentru încercările dinamice în situ

Nr. caz	Masă camion [Tone]	Număr înmatriculare camion	Viteză [km/h]
C1	14	IS04EKM	20
C2	14	IS04EKM	50
C3	14	IS04EKM	80
C4	40	IS66EKY	20
C5	27,5	IS02EKM	20
C6	40	IS66EKY	50
C7	27,5	IS02EKM	50
C8	40	IS66EKY	80
C9	27,5	IS02EKM	80

Șocul necesar efectuării încercărilor a fost generat prin trecerea camioanelor, rulând la viteze variate, peste un prag realizat dintr-o scândură cu dimensiunile de 3000 x 200 x 24 mm.

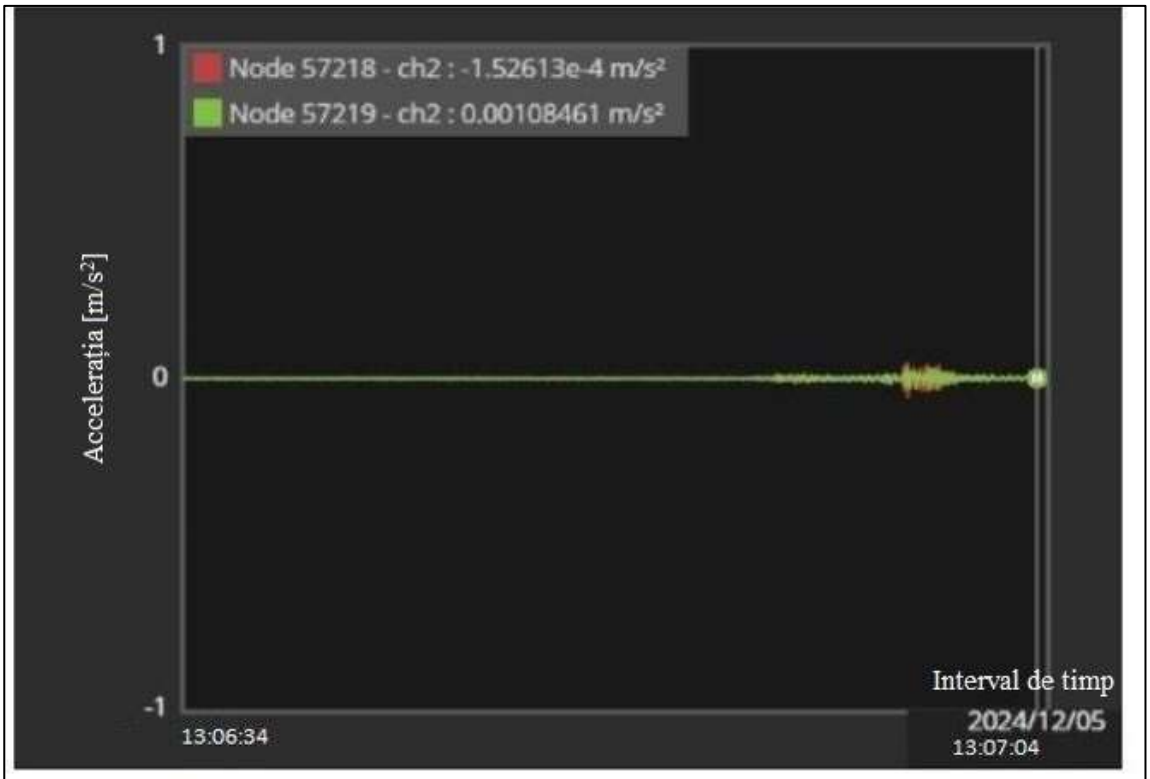
Scândura a avut ambele muchii teșite la un unghi de 45° și a fost amplasată **pe partea dreaptă** a direcției de mers dinspre Roman spre Iași (Fig. 7.22). **Toate încercările sunt realizate cu camioane circulând pe banda din partea dreaptă a sensului de mers.**

Fig. 7.22 - Camion traversând suprafața podului pe partea dreaptă a sensului de mers făcând contact cu scândura pentru inducerea șocului

Pentru fiecare caz propus în Tab. 7.1 a avut loc înregistrarea accelerațiilor și deplasărilor podului simultan.

7.5 Determinarea accelerațiilor podului în situ

În urma realizării cazurilor propuse pentru încercările dinamice, au fost obținute valorile accelerațiilor și analizele Fast Fourier Transform (FFT), prezentate sub formă de reprezentări grafice generate cu ajutorul programului **SensorConnect** pentru fiecare caz studiat cum sunt exemplificate pentru cazul C1 în Fig. 7.23 – 7.24.



Time Range: 30.000 seconds
Dec 05 2024 13:06:34 - Dec 05 2024 13:07:04

Node 57218 - ch2
Number of Points: 7681
Min: -0.0567718967795372

Node 57219 - ch2
Number of Points: 7681
Min: -0.031453561037778854

Fig. 7.23 - Valori ale accelerațiilor pentru cazul C1 la podul de la Mircești

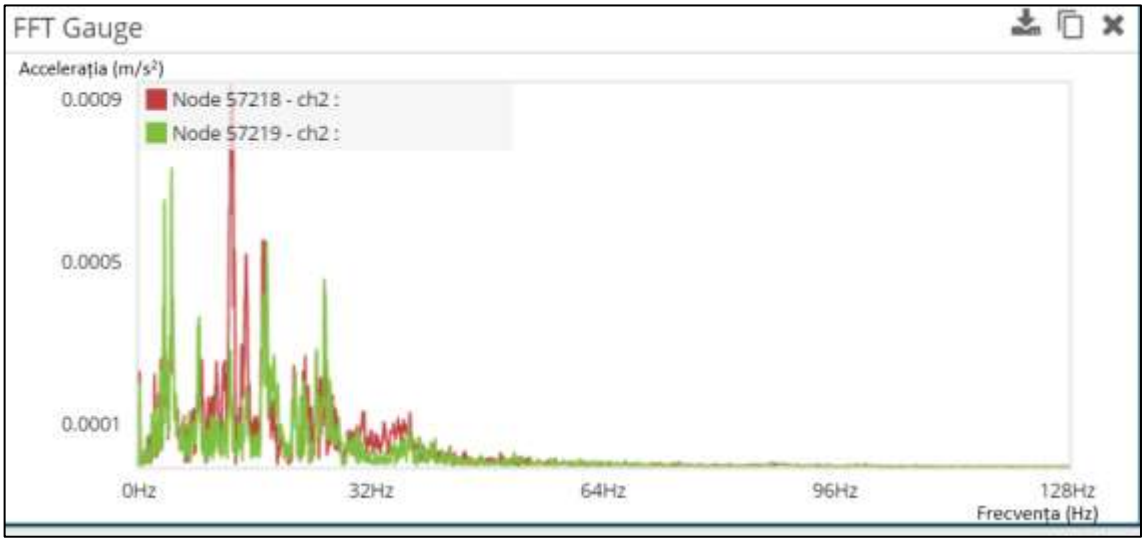


Fig. 7.24 - Analiza FFT a datelor înregistrate pentru cazul C1 la podul de la Mircești

Pentru a analiza variațiile accelerațiilor, rezultatele au fost centralizate în (Tab. 7.2).

Tab. 7.2 - Centralizarea accelerațiilor pe podul de la Mircești

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Masă camion [Tone]	Număr înmatriculare camion	Viteză [km/h]	Număr accelerometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]	Număr accelerometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]
C1	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	14	IS04EKM	20	57218	-0,06	57219	-0,03
C2	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	14	IS04EKM	50	57218	-0,10	57219	-0,08
C3	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	14	IS04EKM	80	57218	-0,19	57219	-0,06
C4	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	40	IS66EKY	20	57218	-0,07	57219	-0,06
C5	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	27,5	IS02EKM	20	57218	-0,06	57219	-0,03
C6	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	40	IS66EKY	50	57218	-0,20	57219	-0,13
C7	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	27,5	IS02EKM	50	57218	-0,11	57219	-0,08
C8	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	40	IS66EKY	80	57218	-0,23	57219	-0,14
C9	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	27,5	IS02EKM	80	57218	-0,21	57219	-0,12

Pentru a facilita interpretarea rezultatelor obținute, datele au fost sortate în funcție de masa camionului, oferind astfel o reprezentare mai clară (Tab. 7.3).

Tab. 7.3 - Sortarea accelerațiilor obținute pe podul de la Mircești

Nr. caz	Poziție accelerometru - 57218	Poziție accelerometru - 57219	Masă camion [Tone]	Număr înmatriculare camion	Viteză [km/h]	Număr accelerometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]	Număr accelerometru	Valoare minimă - axa Z [m/s^2]
C1	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	14	IS04EKM	20	57218	-0,06	57219	-0,03
C2	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	14	IS04EKM	50	57218	-0,10	57219	-0,08
C3	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	14	IS04EKM	80	57218	-0,19	57219	-0,06
C5	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	27,5	IS02EKM	20	57218	-0,06	57219	-0,03
C7	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	27,5	IS02EKM	50	57218	-0,11	57219	-0,08
C9	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	27,5	IS02EKM	80	57218	-0,21	57219	-0,12
C4	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	40	IS66EKY	20	57218	-0,07	57219	-0,06
C6	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	40	IS66EKY	50	57218	-0,20	57219	-0,13
C8	Mijlocul deschiderii podului - 25,17m	La 12,58m față de intrare	40	IS66EKY	80	57218	-0,23	57219	-0,14

Pentru baza rezultatelor obținute în Tab 7.3 am realizat 3 comparații ținând cont de influența masei vehiculelor, vitezei vehiculelor și poziția amplasării accelerometrelor privind variațiile accelerațiilor podului.

1. **Influenței masei vehiculelor asupra accelerațiilor:**

- pentru vehicule de 14 tone, la viteze mici (20 km/h), accelerațiile sunt relativ mici (ex. 0,06 m/s² pentru accelerometrul 57218 și 0,03 m/s² pentru 57219).

- comparativ cu vehiculele de 14 tone, accelerațiile cresc semnificativ. De exemplu, la 80 km/h, accelerația pentru 57218 este 0,23 m/s², aproape de patru ori mai mare decât cea a vehiculelor de 14 tone la aceeași viteză.
- valorile accelerațiilor sunt cele mai mari în cazul simulărilor cu vehicule de 40 tone. La 80 km/h, pentru 57218, accelerația este 0,29 m/s², confirmând o influență direct proporțională între masă și amplitudinea vibrațiilor.

2. **Influența vitezei vehiculelor asupra accelerațiilor:**

- în toate cazurile, o creștere a vitezei duce la o creștere semnificativă a accelerațiilor înregistrate.
- de exemplu, pentru vehiculul de 14 tone și accelerometrul 57218, accelerația crește de la 0,06 m/s² la 20 km/h până la 0,19 m/s² la 80 km/h.
- aceasta indică faptul că viteza amplifică impactul dinamic asupra podului, independent de masa vehiculului.

3. **Poziția amplasării accelerometrelor:**

- pentru accelerometrul 57218 situat la mijlocul deschiderii podului (25,17 m) valorile sunt în general mai mari decât cele înregistrate de accelerometrul 57219. Acest lucru sugerează că mijlocul podului este punctul cel mai solicitat al structurii.
- la accelerometrul 57219 care este situat la 12,58 m față de intrarea pod, valorile accelerațiilor sunt mai mici. Acest lucru reflectând o rigiditate structurală mai mare față de poziția de mijloc a podului.

Totodată pe baza analizelor Fast Fourier Transform (FFT) putem afirma că rezultatele maxime pentru accelerații au fost înregistrate în intervalul de frecvență 0-35 Hz.

7.6 Concluzii

Influența masei vehiculelor este evidentă prin creșterea semnificativă a accelerațiilor odată cu sporirea masei vehiculelor. Vehiculele mai grele generează sarcini dinamice mai pronunțate, ceea ce indică sensibilitatea structurală a podului la astfel de solicitări. Pe termen lung, aceste efecte pot contribui la degradarea structurală, subliniind importanța limitării masei vehiculelor care traversează podul.

Modificarea viteza vehiculelor arată o creștere constantă a accelerațiilor pe măsură ce viteza vehiculelor este mai mare. Acest fenomen amplifică impactul dinamic asupra structurii podului și poate accelera uzura materialelor. Introducerea unor măsuri de control al vitezei este necesară pentru a reduce efectele negative asupra durabilității și siguranței structurii.

Compararea comportamentului structural în funcție de poziția accelerometrelor evidențiază că mijlocul podului este expus mai expus, fiind punctul cel mai solicitat. În schimb, zona de intrare pe pod prezintă o stabilitate mai mare, cu valori mai mici ale accelerațiilor. Aceste observații sugerează că întreținerea și monitorizarea structurală ar trebui să acorde prioritate zonelor centrale ale podului, unde riscurile de uzură și deformare sunt mai ridicate.

Conform valorilor obținute în urma măsurătorilor, comparativ cu literatura (Ghindea et al., 2013; Ghindea et al., 2013; Scutaru et al., 2019), accelerațiile înregistrate se încadrează în nivelul de confort maxim (Moga, 2016), pentru un pod destinat traficului cu vehicule grele, însă rezultatele indică anumite aspecte care necesită o analiză detaliată. Accelerațiile cresc odată cu masa și viteza vehiculelor, iar valorile maxime observate (0,29 m/s² la 40 tone și 80 km/h) nu depășesc pragurile critice asociate oboselii materialului în cazul podurilor bine întreținute.

Deși valorile actuale ale accelerațiilor nu semnalează riscuri imediate pentru siguranța structurală a podului, este recomandată implementarea unor măsuri preventive, cum ar fi limitarea vitezelor și monitorizarea constantă a vibrațiilor podului. Aceste măsuri vor asigura menținerea siguranței și durabilității podului pe termen lung, prevenind apariția deteriorărilor critice cauzate de efectele cumulative ale solicitărilor dinamice.

7.7 Determinarea deplasărilor podului în situ

Pentru monitorizarea în timp real a deplasărilor podului, măsurătorile au fost realizate concomitent cu înregistrarea valorilor accelerațiilor, pe parcursul celor 9 cazuri definite în Tab. 7.1. Spre deosebire de colectarea accelerațiilor, datele privind deplasările au fost înregistrate continuu, fără întreruperea instalației experimentale în perioadele în care podul nu era supus încărcării.

În urma simulării celor 9 cazuri, au fost obținute valori numerice generate cu ajutorul programului SensorTool. Aceste date au fost ulterior prelucrate utilizând programul Excel, prin intermediul căruia s-a realizat o reprezentare grafică a rezultatelor aferente cazurilor simulate (Fig. 7.25).

Pentru o interpretare detaliată a datelor am centralizat valorile maxime negative ale deplasărilor înregistrate pentru fiecare caz și poziție a senzorilor optici (Tab. 7.4).

Tab. 7.4 - Centralizarea deplasărilor obținute pe podul de la Mircești

Nr. caz	Masă Camion [Tone]	Viteză [km/h]	S1 [mm]	Poziție senzor	S2 [mm]	Poziție senzor	S3 [mm]	Poziție senzor	S4 [mm]	Poziție senzor
C1	14	20	-2	25,17 m-stânga	-2,5	25,17 m-dreapta	-2,1	12,58 m -dreapta	-2	12,58 m-stânga
C2	14	50	-1,9	25,17 m-stânga	-2,8	25,17 m-dreapta	-2,1	12,58 m -dreapta	-2,1	12,58 m-stânga
C3	14	80	-2,1	25,17 m-stânga	-2,9	25,17 m-dreapta	-1,9	12,58 m -dreapta	-1,9	12,58 m-stânga
C4	40	20	-7,2	25,17 m-stânga	-8,6	25,17 m-dreapta	-5,4	12,58 m -dreapta	-5,2	12,58 m-stânga
C5	27,5	20	-4,3	25,17 m-stânga	-5,6	25,17 m-dreapta	-3,8	12,58 m -dreapta	-3,3	12,58 m-stânga
C6	40	50	-7	25,17 m-stânga	-8,5	25,17 m-dreapta	-5,3	12,58 m -dreapta	-5,2	12,58 m-stânga
C7	27,5	50	-4,4	25,17 m-stânga	-5,9	25,17 m-dreapta	-3,6	12,58 m -dreapta	-3,3	12,58 m-stânga
C8	40	80	-7,2	25,17 m-stânga	-8,9	25,17 m-dreapta	-5,4	12,58 m -dreapta	-5	12,58 m-stânga
C9	27,5	80	-4,5	25,17 m-stânga	-6	25,17 m-dreapta	-3,9	12,58 m -dreapta	-3,3	12,58 m-stânga

Pentru a facilita interpretarea rezultatelor obținute, datele au fost sortate în funcție de masa camionului, oferind astfel o reprezentare mai clară (Tab. 7.5).

Tab. 7.5 - Sortarea deplasărilor obținute pe podul de la Mircești

Nr. caz	Masă Camion [Tone]	Viteză [km/h]	S1 [mm]	Poziție senzor	S2 [mm]	Poziție senzor	S3 [mm]	Poziție senzor	S4 [mm]	Poziție senzor
C1	14	20	-2	25,17 m-stânga	-2,5	25,17 m-dreapta	-2,1	12,58 m -dreapta	-2	12,58 m-stânga
C2	14	50	-1,9	25,17 m-stânga	-2,8	25,17 m-dreapta	-2,1	12,58 m -dreapta	-2,1	12,58 m-stânga
C3	14	80	-2,1	25,17 m-stânga	-2,9	25,17 m-dreapta	-1,9	12,58 m -dreapta	-1,9	12,58 m-stânga
C5	27,5	20	-4,3	25,17 m-stânga	-5,6	25,17 m-dreapta	-3,8	12,58 m -dreapta	-3,3	12,58 m-stânga
C7	27,5	50	-4,4	25,17 m-stânga	-5,9	25,17 m-dreapta	-3,6	12,58 m -dreapta	-3,3	12,58 m-stânga
C9	27,5	80	-4,5	25,17 m-stânga	-6	25,17 m-dreapta	-3,9	12,58 m -dreapta	-3,3	12,58 m-stânga
C4	40	20	-7,2	25,17 m-stânga	-8,6	25,17 m-dreapta	-5,4	12,58 m -dreapta	-5,2	12,58 m-stânga
C6	40	50	-7	25,17 m-stânga	-8,5	25,17 m-dreapta	-5,3	12,58 m -dreapta	-5,2	12,58 m-stânga
C8	40	80	-7,2	25,17 m-stânga	-8,9	25,17 m-dreapta	-5,4	12,58 m -dreapta	-5	12,58 m-stânga

Similar cu interpretarea rezultatelor pentru accelerații, am realizat 3 comparații ținând cont de influența masei vehiculelor, vitezei vehiculelor și poziția amplasării senzorilor optici privind deplasările podului având la bază rezultatele experimentale din Tab. 7.5.

1. **Influența masei vehiculelor asupra deplasărilor:**

Creșterea masei vehiculelor a dus la o amplificare clară a deplasărilor înregistrate de toți senzorii:

- pentru vehiculele de 14 tone, valorile deplasărilor sunt relativ mici, de exemplu: Senzorul S2 (mijloc, dreapta) înregistrează -2,5 mm la 20 km/h.
- la vehiculele de 27,5 tone, deplasările cresc semnificativ: Senzorul S2 măsoară -5,6 mm la aceeași viteză (20 km/h), aproape dublu față de valorile pentru 14 tone.
- vehiculele de 40 tone generează cele mai mari valori, cu deplasări de până la -8,9 mm (S2, 80 km/h).

Această tendință confirmă faptul că masa vehiculelor este un factor major în inducerea deformărilor structurale. O creștere a masei duce la creșterea sarcinilor statice și dinamice asupra podului, determinând deplasări mai mari în punctele măsurate.

2. **Influența vitezei vehiculelor asupra deplasărilor:**

Pe măsură ce viteza vehiculelor crește, deplasările măsurate de senzori se amplifică:

- la 14 tone și 20 km/h, S2 înregistrează -2,5 mm, iar la 80 km/h deplasarea crește la -2,9 mm.
- o creștere similară este observată pentru vehiculele de 27,5 tone: de la -5,6 mm la 20 km/h la -6,2 mm la 80 km/h (S2).
- pentru vehiculele de 40 tone, la 80 km/h, deplasările maxime înregistrate ating -8,9 mm (S2).

Aceste date indică faptul că viteza influențează semnificativ comportamentul dinamic al podului, prin amplificarea efectelor inerțiale și dinamice asupra structurii. Vehiculele care traversează podul cu viteze mai mari generează deplasări mai mari, amplificând stresul structural.

3. **Compararea rezultatelor în funcție de amplasarea senzorilor:**

Senzorii de la mijlocul podului (S1 și S2) comparativ cu senzorii de la intrare (S3 și S4):

- valorile înregistrate de senzorii de la mijlocul podului (S1 și S2) sunt constant mai mari decât cele măsurate de senzorii de la intrare (S3 și S4).
- exemplu: la 40 tone și 80 km/h, S2 înregistrează -8,9 mm, comparativ cu -5,4 mm pentru S3. Acest lucru confirmă faptul că mijlocul podului este supus celor mai mari solicitări structurale, fiind punctul cel mai vulnerabil la deformări.

Senzorii de pe partea dreaptă (S2 și S3) comparați cu cei de pe partea stângă (S1 și S4):

- deoarece vehiculele au circulat pe partea dreaptă a sensului de mers, senzorii S2 și S3 au înregistrat deplasări mai mari decât S1 și S4.
- exemplu: pentru vehiculele de 40 tone la 80 km/h, S2 înregistrează -8,9 mm, iar S1 măsoară doar -7,2 mm. Această diferență arată că sarcina este distribuită inegal, partea dreaptă fiind mai solicitată din cauza poziției vehiculelor.

7.8 Concluzii

Valorile înregistrate demonstrează o relație direct proporțională între masa vehiculelor și amplitudinea deplasărilor. Vehiculele mai grele produc deformări structurale mai mari, ceea ce poate conduce la uzura accelerată a podului în timp, mai ales dacă sarcinile dinamice depășesc frecvent limitele de proiectare.

Creșterea vitezei amplifică deplasările înregistrate, subliniind importanța reglementării vitezei vehiculelor care traversează podul. Vitezele mari intensifică efectele dinamice, crescând riscul de oboseală structurală pe termen lung.

Datele indică solicitări mai mari în mijlocul podului decât la intrare, confirmând că această zonă este cea mai vulnerabilă la deformări. În plus, partea dreaptă a podului, pe care au circulat vehiculele, prezintă valori mai mari ale deplasărilor față de partea stângă, ceea ce arată o distribuție inegală a sarcinilor.

În comparație cu literatura (Scutaru et al., 2019; AASHTO, 2017; Guțiu, 2012), valorile deplasărilor înregistrate rămân în limitele acceptabile pentru structurile de acest tip, ceea ce confirmă faptul ca podul a fost proiectat si executat corespunzător. Cu toate acestea, utilizarea frecventă a podului de către vehicule grele, în special la viteze mari, poate accelera degradarea structurii. Se recomandă monitorizarea constantă a deplasărilor, limitarea vitezelor și a frecvenței vehiculelor grele, precum și inspecții periodice mai riguroase pentru zonele cele mai solicitate.

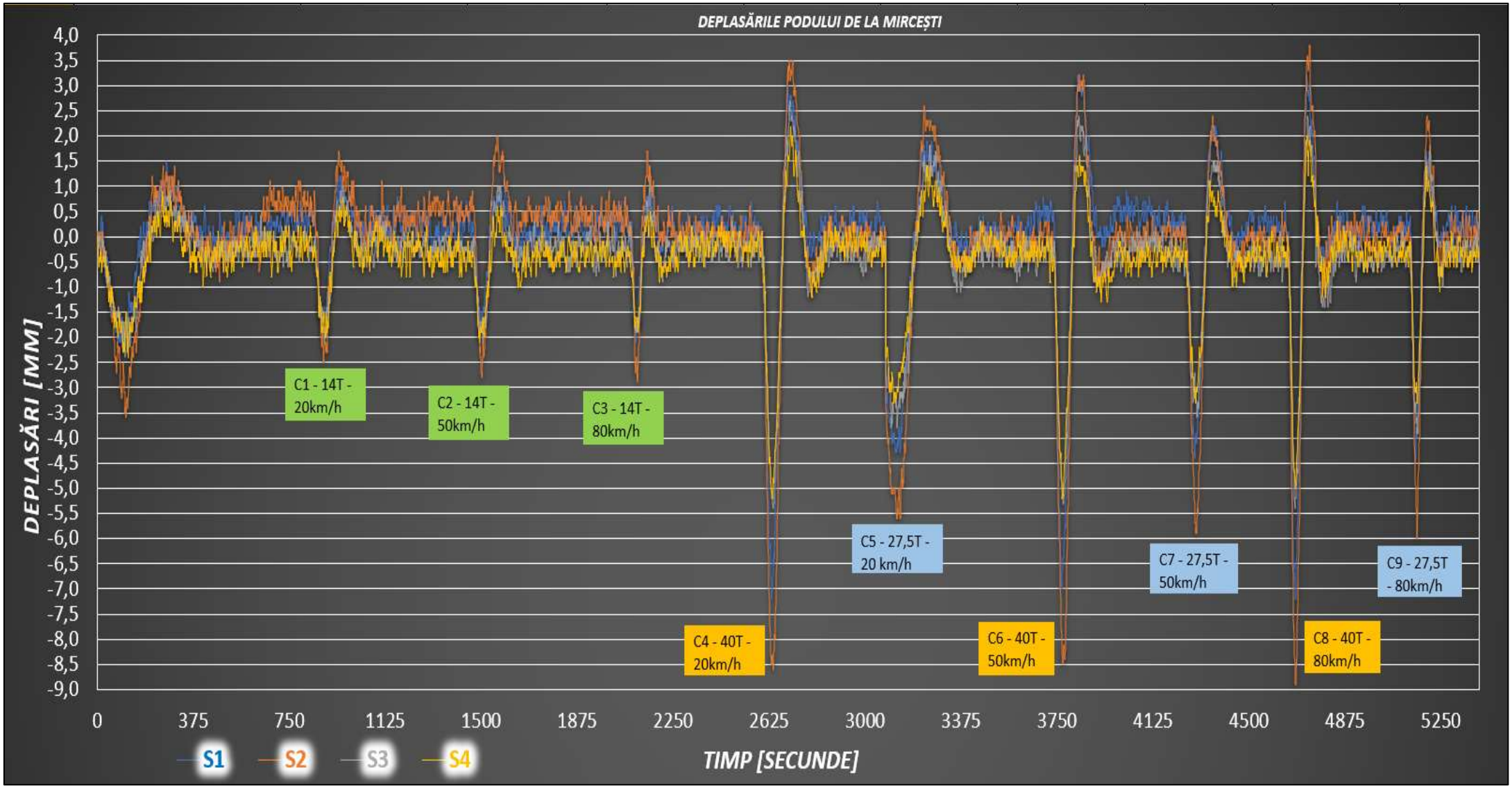


Fig. 7.25 – Reprezentarea grafică a deplasărilor obținute corespunzătoare cazurilor simulate pe podul de la Mircești

Capitolul 8. Validarea modelului teoretic

8.1. Comparații între rezultatele obținute pentru deplasări prin modelarea teoretică dezvoltată în Matlab și încercările experimentale realizate pe podul de la Mircești

Pentru a valida tendințele generate de modelele teoretice și cele experimentale, au fost centralizate valorile deplasărilor corespunzătoare acestora, cu accent pe poziția de mijloc a deschiderii podului. În cazul încercărilor experimentale, analiza s-a concentrat exclusiv pe rezultatele înregistrate de senzorul optic S2, amplasat la mijlocul podului. Alegerea acestui senzor s-a bazat pe faptul că a furnizat cele mai mari valori în cadrul testelor experimentale.

Având la bază rezultatele teoretice și cele experimentale ilustrate în Tab. 8.1 am realizat un set de corelații pentru validarea tendințelor oferite de acestea. Valorile deplasărilor pentru cazurile teoretice au fost extrase din graficele generate în urma modelării teoretice realizate cu ajutorul programului Matlab (Fig. 3.6-3.11), în timp ce valorile corespunzătoare încercărilor experimentale au fost preluate din Tab. 7.5.

Tab. 8.1 - Deplasările obținute prin metode teoretice și metode experimentale

Nr. crt	Caz	Masă camion [Tone]	Viteză vehicul [km/h]	Lungime deschidere pod [m]	Valoare deplasare [mm]
1	Caz teoretic 1	15	30	20	- 0,51
2	Caz teoretic 2	15	50	20	- 0,50
3	Caz teoretic 3	15	70	20	- 0,52
4	Caz teoretic 4	15	110	20	- 0,53
5	Caz teoretic 5	40	30	20	- 1,08
6	Caz teoretic 6	40	50	20	- 1,11
7	Caz teoretic 7	40	70	20	- 1,08
8	Caz teoretic 8	40	110	20	- 1,14
9	Caz teoretic 9	15	30	40	- 1,86
10	Caz teoretic 10	15	50	40	- 1,93
11	Caz teoretic 11	15	70	40	- 1,91
12	Caz teoretic 12	15	110	40	- 1,98
13	Caz teoretic 13	40	30	40	- 4,69
14	Caz teoretic 14	40	50	40	- 4,69
15	Caz teoretic 15	40	70	40	- 4,80
16	Caz teoretic 16	40	110	40	- 4,87
17	Caz teoretic 17	15	30	60	- 4,27
18	Caz teoretic 18	15	50	60	- 4,25
19	Caz teoretic 19	15	70	60	- 4,19
20	Caz teoretic 20	15	110	60	- 4,60
21	Caz teoretic 21	40	30	60	- 10,83
22	Caz teoretic 22	40	50	60	- 11,22
23	Caz teoretic 23	40	70	60	- 11,30
24	Caz teoretic 24	40	110	60	- 11,02
25	Caz experimental 1	14	20	50,35	- 2,50
26	Caz experimental 2	14	50	50,35	- 2,80
27	Caz experimental 3	14	80	50,35	- 2,90
28	Caz experimental 4	27,5	20	50,35	- 5,60
29	Caz experimental 5	27,5	50	50,35	- 5,90
30	Caz experimental 6	27,5	80	50,35	- 6,00
31	Caz experimental 7	40	20	50,35	- 8,60
32	Caz experimental 8	40	50	50,35	- 8,50
33	Caz experimental 9	40	80	50,35	- 8,90

Dat fiind faptul ca nu se poate face o corelare complet exactă a valorilor folosite în testele teoretice și cele experimentale am decis sa fac un set de corelații pentru a studia trend-urile generate de modelele teoretice și cele experimentale după cum urmează:

- corelația dintre masa camionului și deplasarea podului.
- corelația dintre viteza camionului și deplasarea podului.
- comparare teorie - experiment.
- cazurile comune comparate.

Analiza detaliată a datelor și validarea tendințelor:

1. Corelația dintre masa camionului și deplasarea podului:

Relația dintre masa camionului și valoarea deplasării podului indică o corelație bună. Datele confirmă că, pe măsură ce masa camionului crește (de exemplu, de la 15 tone la 40 tone), deplasările măsurate sunt mai mari.

Corelația între aceste două variabile indică faptul că masa influențează semnificativ deplasarea podului.

2. Corelația dintre viteza camionului și deplasarea podului:

De asemenea, viteza camionului influențează deplasarea podului. Pe baza datelor, o creștere a vitezei (de la 30 km/h la 110 km/h în cazul teoretic și de la 20 km/h la 80 km/h în cazul experimental) este asociată cu o creștere a deplasărilor măsurate.

Această tendință evidențiază o influență semnificativă a vitezei asupra comportamentului podului.

3. Comparare teorie - experiment:

Datele arată că modelele teoretice și cele experimentale prezintă tendințe similare. Deplasările cresc în funcție de masa și viteza camionului în ambele modele.

De exemplu, pentru un camion de 40 tone care se rulează cu 50 km/h, deplasarea măsurată teoretic este de aproximativ -11,22 mm, în timp ce deplasarea experimental măsurată este de aproximativ -8,50 mm. Diferența este relativ mică, indicând o validare rezonabilă a modelării teoretice.

Diferențele dintre cele două abordări sunt explicabile prin factorii de incertitudine (ex. condiții reale de testare) și nu depășesc un prag care ar sugera discrepanțe majore.

4. Cazurile comune comparate:

În cazul camionului de 40 tone care circulă cu 50 km/h, s-au comparat două scenarii:
-model teoretic: pod cu deschiderea de 60 m, deplasare medie măsurată de -11,22 mm
-model experimental: pod cu deschiderea de 50,35 m, deplasare medie măsurată de -8,50 mm

Diferențele între deplasări sunt acceptabile, având în vedere diferențele fizice între lungimile podurilor și variațiile inerente măsurătorilor.

8.2 Concluzii

Modelele teoretice și experimentale confirmă tendințele așteptate: o creștere a masei și vitezei camionului duce la o creștere a deplasărilor podului.

Diferențele dintre valorile teoretice și cele experimentale sunt mici și susțin validitatea abordării teoretice.

Valorile obținute nu prezintă diferențe majore și sunt în concordanță cu așteptările privind comportamentul structural al podurilor analizate.

Comparativ cu studiile din literatură (Duan & Yang, 2013) modelarea teoretică creată prezintă rezultate similare, dovedind validitatea noului model elaborat.

8.3. Comparații între rezultatele obținute pentru deplasări prin metoda elementelor finite și încercările experimentale pe macheta metalică a podului de la Mircești

Pentru a valida tendințele rezultate din analiza prin metoda elementelor finite (FEM) și din încercările experimentale realizate pe macheta metalică, au fost extrase valorile deplasărilor corespunzătoare. Datele obținute prin metoda elementelor finite au fost preluate din Tab. 6.2, iar cele experimentale din Tab. 5.8. Aceste informații au fost centralizate în Tab. 8.2.

Analizele FEM au fost realizate în condiții statice (viteză vehicul = 0, notată ca "NA") pentru trei mase distincte: 2 kg, 6 kg și 12 kg. În schimb, încercările experimentale au fost efectuate cu vehiculul în mișcare, utilizând două regimuri de viteză: redusă (RE) și maximă (MA), păstrând aceleași mase: 2 kg, 6 kg și 12 kg. În toate cazurile, încărcările au fost amplasate la mijlocul podului (1210 mm).

Având în vedere că analizele FEM sunt de tip static, am realizat comparații pe baza rezultatelor din Tab. 8.2, luând în considerare cazul experimental cu viteză redusă a vehiculului (aproape de 0 – RE), pentru a analiza tendințele identificate prin metoda cu elemente finite în raport cu cele obținute experimental astfel:

- corelația dintre masa vehiculului și deplasarea podului.
- validarea concordanței între FEM și testele experimentale.

Tab. 8.2 - Deplasările obținute prin metode cu elemente finite și metode experimentale pe macheta metalică

Nr. crt	Caz	Amplasarea încărcării	Viteză vehicul [MA/RE/NA]	Masă camion [kg]	Valoare deplasare [mm]
1	Caz FEM 1	Mijlocul podului - 1210 mm	NA	2	-0,2
2	Caz FEM 2	Mijlocul podului - 1210 mm	NA	6	-0,5
3	Caz FEM 3	Mijlocul podului - 1210 mm	NA	12	-0,9
4	Caz experimental 1	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	2	-0,4
5	Caz experimental 2	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	2	-0,6
6	Caz experimental 3	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	6	-0,5
7	Caz experimental 4	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	6	-0,7
8	Caz experimental 5	Mijlocul podului - 1210 mm	RE	12	-0,7
9	Caz experimental 6	Mijlocul podului - 1210 mm	MA	12	-0,8

Viteză vehicul		
	MA	Maximă
	RE	Redusă
	NA	0

Analiza detaliată a datelor și validarea tendințelor:

1. Corelația dintre masa vehiculului și deplasarea podului

Analiza datelor arată o legătură directă între **masă** vehiculului și deplasarea podului:

În cazurile FEM:

- pentru 2 kg, deplasarea este de **-0,2 mm**.
- pentru 6 kg, deplasarea crește la **-0,5 mm**.
- pentru 12 kg, deplasarea ajunge la **-0,9 mm**.

În cazurile experimental cu viteză redusă (RE):

- pentru 2 kg, deplasarea este de **-0,4 mm**.
- pentru 6 kg, deplasarea este de **-0,5 mm**.
- pentru 12 kg, deplasarea este de **-0,7 mm**.

Această tendință indică faptul că mase mai mari duc la creșterea deplasării podului, atât în analiza FEM, cât și în testele experimentale.

Deși există diferențe mici între valori, acestea sunt explicabile prin variațiile condițiilor experimentale (dinamice) față de cele statice.

2. Validarea concordanței între FEM și testele experimentale

Rezultatele FEM și cele experimentale confirmă aceleași tendințe:

- deplasările cresc odată cu creșterea masei vehiculului.
- la viteze mici (sau egale cu 0), valorile sunt foarte apropiate între cele două metode.
- toate valorile obținute sunt plauzibile și nu indică anomalii. Diferențele dintre metode sunt minime, ceea ce susține validitatea analizei FEM ca instrument de modelare pentru aceste situații.

8.4 Concluzii

Masa vehiculului are un impact direct asupra deplasării podului. Mase mai mari generează deplasări mai mari, indiferent de metodă.

Rezultatele analizei FEM și ale testelor experimentale la viteză redusă sunt foarte apropiate, ceea ce validează concordanța dintre cele două abordări.

Analiza FEM și testele experimentale pe macheta metalică respectă aceleași tendințe și oferă rezultate compatibile în condiții similare (viteză mică sau cazul în care aceasta are valoarea 0).

Valorile obținute sunt conforme cu așteptările teoretice.

Capitolul 9. Concluzii finale, contribuții personale și direcții de viitoare cercetare

9.1 Concluzii finale

Teza de doctorat a oferit o perspectivă complexă asupra influenței masei și vitezei vehiculelor asupra comportamentului structural al podurilor, încadrându-se în domeniul ingineriei mecanice datorită implicațiilor sale asupra proiectării, evaluării și siguranței structurilor supuse încărcărilor dinamice.

Principalele concluzii rezultate sunt următoarele:

- **Influența masei vehiculelor**:

- creșterea masei vehiculelor generează o amplificare direct proporțională a deplasărilor și accelerațiilor podurilor, rezultatele experimentale (pe machetă și in situ) și simulările FEM confirmând impactul semnificativ al masei vehiculului asupra acestor deplasări.

- zona centrală a podului prezintă solicitări mai ridicate decât cea de la intrare, ceea ce confirmă o susceptibilitate mai mare la deformări, iar deplasările mai mari observate pe partea dreaptă, utilizată de vehicule, în comparație cu partea stângă evidențiază o distribuție neuniformă a sarcinilor.

- stabilirea și respectarea limitelor de masă pentru vehicule sunt indispensabile pentru siguranța și durabilitatea podurilor, prevenind deteriorări și riscuri structurale, reducând costurile de întreținere, prelungind durata de viață a infrastructurii și asigurând sustenabilitatea economică și siguranța rețelelor rutiere.

- **Influența vitezei vehiculelor**:

- creșterea vitezei intensifică efectele dinamice asupra podurilor, fiind observate deplasări și accelerații mai mari la viteze ridicate.

- valorile maxime ale deplasărilor subliniază relevanța limitării vitezei vehiculelor pentru protecția structurală a podurilor.

- stabilirea și respectarea limitelor de viteză pentru vehicule sunt esențiale pentru siguranța structurală a podurilor, deoarece vitezele ridicate cresc solicitările dinamice, uzura materialelor și riscul de fenomene instabile, cum ar fi rezonanța.

- zonele centrale ale podurilor, cele mai vulnerabile la deformări, sunt afectate disproporționat de viteze mari, subliniind importanța reglementării acestui parametru. Aceste limite contribuie la prevenirea degradării accelerate, menținerea integrității structurale pe termen lung și reducerea costurilor asociate reparațiilor, fiind indispensabile pentru un management sustenabil al infrastructurii rutiere.

- **Testele experimentale și modelele teoretice**:

- comparativ cu literatura, modelarea teoretică este în concordanță.

- testele experimentale și modelele teoretice dezvoltate au evidențiat o concordanță semnificativă în ceea ce privește tendințele identificate.

- în majoritatea cazurilor, comparațiile dintre modelele teoretice și cele experimentale sunt afectate de imposibilitatea menținerii unor condiții identice, din cauza variabilității multitudinii factorilor externi.

- modelele teoretice se bazează pe un set de condiții idealizate, precum temperaturi constante, suprafețe perfect uscate și comportamente materiale complet previzibile, care nu pot fi replicate integral în condițiile practice.

- în cadrul testelor experimentale desfășurate pe pod în luna decembrie, au fost identificați factori externi semnificativi ce au influențat rezultatele măsurătorilor. Condițiile meteorologice nefavorabile, incluzând o temperatură între 1 și 5°C, burniță, carosabil umed și vizibilitate redusă cauzată de ceață, au avut un impact semnificativ asupra desfășurării încercărilor experimentale. Aceste circumstanțe au diminuat aderența vehiculelor pe suprafața podului și au impus ajustarea vitezelor pentru a garanta siguranța încercărilor.

- un factor esențial în desfășurarea testelor experimentale îl constituie obținerea aprobărilor necesare pentru întreruperea traficului pe durata testelor. Având în vedere importanța economică regională semnificativă a podului, procesul de aprobare poate deveni dificil, iar în unele cazuri, aceste aprobări pot fi refuzate, ceea ce complică semnificativ execuția testelor planificate.

Concluzie generală: Masa și viteza vehiculelor exercită influențe semnificative asupra deplasărilor podurilor, fiind observat că punctul central al acestora înregistrează cele mai mari deplasări. Dintre cei doi factori, prevalează influența masei. Acest studiu reprezintă o contribuție inovatoare în contextul românesc, prin integrarea unor analize teoretice și experimentale, care țin cont de limitele de viteză reglementate la nivel național și combină diferite scenarii ce reflectă variațiile de masă și viteză ale vehiculelor.

9.2 Contribuții personale

Această cercetare aduce o serie de contribuții semnificative în domeniul evaluării modului în care masa și viteza vehiculelor influențează deplasările podurilor supuse sarcinilor dinamice, concretizate prin:

- **Documentare bibliografică:**

- analiza unor lucrări științifice relevante în domeniu, evidențiind avantajele și limitările metodologiilor utilizate de diverși autori privind interacțiunea dintre vehicule și poduri. În urma acestei analize s-au identificat lacunele existente și am stabilit obiectivele cercetării focalizată pe influența masei și vitezei vehiculelor asupra deplasărilor podurilor.

- **Dezvoltarea unui model teoretic avansat:**

- elaborarea unui model complet de interacțiune vehicul-pod, fundamentat pe analiza literaturii de specialitate, capabil să simuleze comportamentul dinamic al sistemului vehicul-pod folosind programul Matlab.

- validarea tendințelor generate de modelul teoretic prin teste experimentale.

- **Crearea unei machete metalice a podului de la Mircești:**

- proiectarea și realizarea unei machete metalice la scară 1:25, care reproduce podul peste râul Siret de la Mircești, utilizată pentru desfășurarea unor teste experimentale complexe.

- analiza variațiilor accelerațiilor și deplasărilor structurale ale machetei în condiții de sarcini dinamice variate.

- **Analize numerice avansate:**

- integrarea modelului teoretic cu ajutorul programului Matlab utilizat pentru analize numerice avansate privind comportamentul structural al podurilor supuse unor condiții de încărcare variabile, determinate de masele și vitezele diferite ale vehiculelor.

- aplicarea metodei elementelor finite (FEM) prin intermediul programului Catia pentru a analiza structura machetei în diverse scenarii de încărcări.

- validarea metodei FEM prin compararea rezultatelor obținute cu datele experimentale, confirmând atât precizia, cât și fiabilitatea abordării utilizate.

- **Realizarea de teste experimentale pe teren:**

- efectuarea unor teste experimentale utilizând scenarii de analiză (vehicule cu mase și viteze diferite), cercetând modul în care acestea influențează deplasarile și accelerațiile podului de peste râul Siret de la Mircești.

- analiza rezultatelor obținute în funcție de localizarea valorilor maxime, cu accent pe vulnerabilitatea zonei centrale a podurilor.

- **Validarea teoriei cu experimentele:**

- comparații între rezultatele obținute pentru deplasări prin metoda elementelor finite și încercările experimentale pe macheta metalică a podului de la Mircești

- comparații între rezultatele obținute pentru deplasări prin modelarea teoretică dezvoltată în Matlab și încercările experimentale realizate pe podul de la Mircești

9.3 Direcții viitoare de cercetare

Pe baza aspectelor și rezultatele obținute am decis extinderea cunoștințelor în domeniu, prin următoarele direcții viitoare de cercetare:

- **Extinderea modelului teoretic**:

- îmbunătățirea modelului teoretic prin capabilitatea de a simula cazul în care mai multe vehicule rulează în același timp pe pod.

- **Analiza modurilor proprii de vibrație a machetei podului**:

- identificarea modurilor de vibrație prin utilizarea analizei FEM, pentru a caracteriza detaliat comportamentul dinamic al machetei.

- **Dezvoltarea unui model FEM dinamic pentru poduri la scară reală**:

- crearea unui model avansat în regim dinamic pentru a studia influența masei și vitezei vehiculelor asupra podurilor reale, sub diverse condiții de exploatare.

- **Calibrarea modelului FEM**:

- ajustarea parametrilor modelului FEM prin utilizarea unui set de specificații bine definite, pentru a obține rezultate cât mai apropiate de datele experimentale în vederea aplicării acestei metodologii când testele experimentale nu oferă posibilitate din considerente precum oprirea traficului.

- **Extinderea testărilor experimentale**:

- realizarea de teste suplimentare, utilizând un număr mai mare de puncte de măsurare pe suprafața podurilor, pentru o caracterizare mai detaliată a variațiilor structurale.

Bibliografie selectivă

AASHTO (2017), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 8th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

Akin J.E, Mofid M., (1989), Numerical solution for response of beams with moving mass, *Journal of Structural Engineering*, **115**, 120–131, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:1(120).

Altunisik A., Kanbur B., Genc A., (2015), The effect of arch geometry on the structural behavior of masonry bridges, *Smart Structures and Systems*, **16**, 1069-1089, https://doi.org/10.12989/SSS.2015.16.6.1069.

Ashebo D., (2006), *Evaluation of dynamic loads for highway bridges*, Ph.D. thesis, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 2006.

Aziz H., (2019), *Bridge Engineering*, Al-Mustensiryah University College of Engineering-Civil Engineering Department MSc. Course –Structures.

Barakat M., (2023), *Dynamic axle load estimation - for an electrified vehicle,* Master's Degree Thesis, Institute of Technology, Linköping University, Sweden.

Bathe K.J., (1996), *Finite Element Procedures,* Prentice Hall, 50-65.

Bauchau O., Craig J., (2009), *Euler-Bernoulli beam theory*, In: *Structural Analysis*, Bauchau O., Craig J., Edition 1, Part of the book series: Solid Mechanics and Its Applications, vol. 163, (Eds.), Springer , Dordrecht, 5-221.

Brady S.P., O'Brien, E.J., (2006), Effect of vehicle velocity on the dynamic amplification of two vehicles crossing a simply supported bridge, *Journal of Bridge Engineering*,**11**, 250–256, https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:2(250).

Brownjohn, J., Xia P., & Hao H. Xia, Y., (2001), Civil Structure Condition Assessment by FE Model Updating: Methodology and Case Studies, *Finite Elements in Analysis and Design*, **37**,-775, http://dx.doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00071-8.

CNAIR, (2019), Regional Directorate of Roads and Bridges Iasi, Technical execution documentation 118/2019 - "Periodic maintenance of the bridge located on DN 28 at km 6+957, over the Siret River, in Scheia".

Cai Y,Chen S. S, Rote D., Coffey H.T., (1994), Vehicle/guidway interraction for high speed vehicles on a flexible guidway, *Journal of Sound and Vibration*, **175**, 625-646, https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1350/

Cao H., Yao L., Daihai C., (2024), Analysis of Vehicle-Bridge Coupling Vibration Characteristics of Curved Girder Bridges, *Applied Sciences*, **14**, 1-17, DOI:10.3390/app14052021.

Cebon D., (1999), *Handbook of vehicle-road interaction*. Swets & Zeitlinger, ISBN 9789026515545.

Chan T., Ashebo D., (2006), Theoretical study of moving force identification on continuous bridges, *Journal of Sound and Vibration*, **295**, 870-883, DOI:10.1016/j.jsv.2006.01.059.

Chen X., Song T., Luo L., (2016), *3 types of vehicle-bridge coupling vibration analysis of model comparison*, Proc. of the 2016 5th Int. Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016), Zhuhai, 716-721.

Chul Y., Jung D., Kim N., Kwon S., Feng M., (2003), Effect of vehicle weight on natural frequencies of bridges measured from traffic-induced vibration, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **2**, 109-115, DOI:10.1007/BF02857543.

Clough R.W., Penzien, J., (1993), *Dynamics of Structures (2nd Edition)*, McGraw-Hill College, ISBN-13: 978-0070113947.

Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J, (2001), *Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th Edition* , Wiley, 20-70.

Deshan S., Shengai C., Zhen H., (2013), Coupled Vibration Analysis of Vehicle-Bridge System Based on Multi-Boby Dynamics, *Journal of Transportation Technologies*, **3**, 1-6, DOI:10.4236/jtts.2013.32A001.

Ding L., Hao H., Xia Y., Deeks A.J, (2012), Evaluation of Bridge Load-carrying capacity Using Updated Finite Element Model and Nonlinear Analysis, *Advances in Structural Engineering*, **15**, 1739–1750, http://dx.doi.org/10.1260/1369-4332.15.10.1739.

Doronina A., Valiev S., (2022), The use of balanced lowering method technology for bridge construction in cramped urban environments, *Russian journal of transport engineering*, **9**, 1-24, https://doi.org/10.15862/12sats122.

Duan R., Yang J., (2013), *Modelling and Simulation of a Bridge interacting with a moving Vehicle System*, Master's Degree Thesis, Institute of Technology, Karlskrona, Sweden.

GED, (2012), Government Emergency Ordinance, Law No. 203 Of 9 November 2012 Amending and Supplementing Government Emergency Ordinance No. 195/2002 On Public Roads, *Romanian Official Monitor*, no. 760 from 12 November, 2012.

Ghindea C., Cretu D., Cruciat R., Giumanca A., (2014), *O analiza asupra incercarii dinamice a podurilor*, A XX-a Conferință Națională cu participare internațională comportarea "in situ" a construcțiilor, Brașov, 8 August.

Ghindea C., Cruciat R., Cretu D., (2013), *Încercarea dinamică a unui pod rutier peste Canalul Dunăre-Marea Neagră*, International Scientific Conference Road Research And Administration, Bucharest, 4-5 July, vol.1, 1-12.

Gil H., Kang S., (2013), Characteristics of Heavy Vehicles Using Expressway Networks Based on Weigh-in-motion Data, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **33**, 1731-1740, https://doi.org/10.12652/KSCE.2013.33.5.1731.

Gonzales A., Schorr M., Valdez B., Mungaray A., (2020), *Bridges: Structures and Materials, Ancient and Modern*, In: *Infrastructure Management and Construction*, Sepasgozar S., Tahmasebinia F., Shirowzhan S., (Eds.), Intechopen, London, 70-121.

Gonzalez A., Mohammed O., (2018), Dynamic Amplification Factor of Continuous versus Simply Supported Bridges Due to the Action of a Moving Vehicle, *Infrastructures*, **3**, 1-15, DOI:10.3390/infrastructures3020012.

González A. (2010), *Vehicle-bridge dynamic interaction using finite element modelling*, In Finite Element Analysis; Moratal, D., Ed.; Sciyo: Rijeka, Croatia, 2010; pp. 637–662.

Green M. F., Cebon, D,. (1994), Dynamic response of highway bridges to heavy vehicle loads: Theory and experimental validation, *Journal of Sound and Vibration*, **170**, 51-78, DOI: 10.1006/jsvi.1994.1046.

Guojing Z., Yongjian L., Jiang L., Shiyong L., Jian Y., (2022), Causes and statistical characterisitcs of bridge failures: A review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, **9**,388-406, DOI:10.1016/j.jtte.2021.12.003.

Guțiu S.I., (2012), *Poduri: Suprastructuri compuse otel-beton*, (Eds.), UT Press, Cluj-Napoca, 44-80.

Li X. Z., (2008), State-of-the-art review and trend of studies on coupling vibration for vehicle and highway bridge system, *Engineering Mechanics*, **25**, 230-240.

Lingbo W., Kang X., Jiang P., (2015), Vibration analysis of a multi-span continuous bridge subject to complex traffic loading and vehicle dynamic interaction, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**, 323-332, DOI:10.1007/s12205-015-0358-4.

Michaltsos G., Sophianopoulos D., Kounadis A., (1996), The effect of a moving mass and other parameters on the dynamic response of a simply supported beam, *Journal of Sound and Vibration*, **191**, 357-362, http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1996.0127.

Ming-zhi L., (2009), Coupled Vibration of Vehicles and Bridge When Training Passing Bridges , *High Speed Journal of Xi'an Aerotechnical College*, **1**,1-10.

Moga P., (2016), *Structuri metalice uşoare: grinzi conformate structural & pasarele pietonale: lucrare de sinteză*, (Eds.), UT Press, Cluj-Napoca, 231-235.

Răcănel I.R. (2007), *Căi de comunicaţii: poduri : elemente generale*, Editura "Conspress" București.

STAS 12504-86, (1986), Poduri de cale ferată, de şosea şi pasarele. Încercarea suprastructurilor cu acţiuni de probă, IRS, Bucureşti.

Scutaru M., (2019), *Contributions to the development of bridge monitoring methodology*, PhD Thesis, Institute of Civil Engineering and Installations, Iasi, Romania.

Scutaru M., Taranu N., Comisu C., Boaca G., Ungureanu D., Hudisteanu I., (2019), *Numerical study of the dynamic characteristics of a hybrid steel-concrete bridge,* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Iași, vol. 591, 1-12.

Velniciuc, A. M., Bujoreanu, C., (2023), Loads on Bridges - Overview, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iaşi, Machine constructions Section*, **69**, 9-22, doi:10.2478/bipcm-2023-0011.

Listă de lucrări

a. Lucrări publicate în reviste de specialitate cotate WOS:

Velniciuc, A. M., Bujoreanu C. and Boacă G., (2024), Numerical Analysis Of Vehicle Loads Using Matlab, *Environmental Engineering and Management Journal* (EEMJ), vol.23, numărul 11, 2379-2388, IF = 0.9/2024

b. Lucrări publicate în volume ale conferințelor indexate BDI:

Alaci, S., Ciornei, FC., Romanu, IC., **Velniciuc, A. M**., Bujoreanu, C. (2023), Study of Vibrations of a Cantilever Beam with Uniformly Distributed Mass. In: Doroftei, I., Nitulescu, M., Pisla, D., Lovasz, EC. (eds) Proceedings of SYROM 2022 & ROBOTICS 2022. IISSMM 2022. *Mechanisms and Machine Science*, vol 127. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25655-4_11 (SCOPUS)

Velniciuc, A. M and Bujoreanu, C., (2022), Some analyzes on box girders bridges - literature review , *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 1262, The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022), doi:10.1088/1757-899X/1262/1/012039 (Google Scholar, Index Copernicus)

c. Lucrări publicate în reviste indexate BDI

Velniciuc, A. M., & Bujoreanu, C., (2023), Loads on Bridges - Overview, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Machine constructions Section*, 69 (73), pp. 9-22. doi:10.2478/bipcm-2023-0011 (Google Scholar, Index Copernicus)

Velniciuc, A. M., & Bujoreanu, C., (2022), Vehicles Loads Influence on Box Girder Bridges, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Machine constructions Section*, 68 (72), pp. 41-50. doi:10.2478/bipcm-2022-0013 (Google Scholar, Index Copernicus)