

Universitatea POLITEHNICA din București

Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică

Departamentul de Rezistența Materialelor

Doctorand: Alexandru Ionuț PĂTRAȘCU

Rezumatul tezei de doctorat

*Studiu privind sporirea capacității de transport a unui vagon descoperit,
cu pereți înalți*

Study of increasing the load capacity of an open high-walls wagon

Conducător de doctorat:
Prof. dr. ing. Anton HADĂR

București – 2020

CUPRINS

-integral-

Lista Figurilor	7
Lista Tabelelor	13
Lista Relațiilor Matematice	15
Mulțumiri	16
Introducere	17
1.Actualitatea subiectului tezei	18
2.Importanța subiectului tezei	18
Cap. 1 Aspecte generale privind structura vagoanelor de marfă și măsuri pentru sporirea capacității portante a acestora	21
1.1 Transportul feroviar	21
1.2 Căile de rulare din lemn și căile de rulare metalice	22
1.3 Căile ferate moderne	22
1.4 Caracteristici ale sistemului feroviar convențional	24
1.5 Construcția vehiculelor feroviare	28
1.5.1 Vehicule de cale ferată	28
1.5.2 Vehiculele feroviare destinate transportului de marfă	31
1.6 Forțele care acționează asupra trenurilor și materialele utilizate în construcția vehiculelor feroviare	34
1.6.1 Forțe care acționează asupra vehiculelor feroviare	34
1.6.2 Materiale utilizate în construcția vehiculelor feroviare	35
1.7 Vagoanele de marfă descoperite, cu pereți înalți	37
1.8 Noi proiecte și cercetări în domeniul transportului de mărfuri pe calea ferată	41
1.8.1 Transportul feroviar de mărfuri	41
1.8.2 Interoperabilitatea în transportul de mărfuri	44
1.8.3 Studii și încercări de dezvoltare a vehiculelor de marfă descoperite, cu pereți înalți	46
1.9 Concluzii	51
Cap. 2 Obiectivele și organizarea tezei de doctorat	52
2.1 Obiectivele tezei	52
2.2 Organizarea tezei	53

Cap.3 Modelarea și studiul structurilor portante de cale ferată prin intermediul metodei elementelor finite	56
3.1 Generalități	56
3.2 Modelul de calcul	57
3.3 Metoda elementelor finite	58
3.4 Ansys	60
3.5 Realizarea unui model virtual al unui vagon descoperit, cu pereți înalți	61
3.5.1 Șasiul	62
3.5.2 Traversele frontale	62
3.5.3 Lonjeronul central	63
3.5.4 Traversele crapodinelor	64
3.5.5 Traversele intermediare	64
3.5.6 Longrinele	65
3.5.7 Lonjeroanele laterale	65
3.5.8 Cutia	65
3.5.9 Pereții și podeaua	66
3.5.10 Stâlpii și centura de susținere	67
3.6 Discretizarea modelului	67
3.7 Cazuri de solicitare	69
3.7.1 Încercarea la compresiune în axa tamponelor (CT)	70
3.7.2 Încercarea la compresiune în axa cuplei (CA)	73
3.7.3 Încercarea la compresiune, la 50 mm sub axa tamponelor (CT50)	76
3.7.4 Încercarea la compresiune în diagonal (CD)	80
3.7.5 Încercarea la tracțiune în axa cuplei (TA)	82
3.7.6 Încercarea cu sarcina verticală (SV)	85
3.7.7 Încercarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale (CTSV)	87
3.7.8 Încercarea la compresiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale (CASV)	89
3.7.9 Încercarea la tracțiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale (TASV)	91
3.8 Concluzii	92
Cap. 4 Rezultate experimentale obținute pe standul de încercări, pentru un vagon descoperit, cu pereți înalți și validarea modelului virtual al acestuia	94
4.1 Generalități privind încercarea structurii de rezistență a vehiculelor feroviare	94
4.2 Metoda tensometriei electrice rezistive	95
4.3 Descrierea încercărilor și a echipamentelor utilizate	97
4.4 Descrierea vehiculului încercat și pregătirea acestuia pentru încercări	101
4.5 Încercări efectuate	113
4.5.1 Încercarea la compresiune în axa tamponelor (CT)	113

4.5.2 Încercarea la compresiune în axa cuplei (CA)	116
4.5.3 Încercarea la compresiune la 50 mm sub axa tamponelor (CT50)	119
4.5.4 Încercarea la compresiune în diagonală (CD)	121
4.5.5 Încercarea la tracțiune în axa cuplei (TA)	123
4.5.6 Încercarea cu sarcina verticală (SV)	126
4.5.7 Încercarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale (CTSV)	128
4.5.8 Încercarea la compresiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale (CASV)	130
4.5.9 Încercarea la tracțiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale (TASV)	132
4.5.10 Încercarea la ridicare (RID)	134
4.6 Validarea modelului virtual pe baza rezultatelor obținute pe cale experimentală	136
4.7 Concluzii	143

Cap. 5 Analize experimentale și numerice ale structurii unui vagon descoperit, cu pereți înalți, solicitat la șoc

5.1 Încercări la șoc a vehiculelor feroviare destinate transportului de marfă	145
5.1.1 Descrierea încercării la tamponare	147
5.1.2 Aparatură și mijloace de măsurare utilizate	148
5.2 Încercarea la șoc cu vagonul gol	154
5.3 Încercarea la șoc cu vagonul încărcat	158
5.4 Simulări numerice ale încercării la șoc, prin metoda elementelor finite	163
5.4.1 Simulări ale încercării la șoc, cu vagonul gol	163
5.4.2 Simulări ale încercării la șoc, cu vagonul încărcat	169
5.5 Concluzii	175

Cap. 6 Contribuții privind mărirea capacității de transport a unui vagon de marfă descoperit, cu pereți înalți și concluzii

6.1 Generalități	176
6.2 Studiu privind creșterea masei transportate	177
6.2.1 Varianta structurii modificate prin mărirea lungimii utile a cutiei	177
6.2.1.1 Solicitarea la compresiune în axa tamponelor	180
6.2.1.2 Solicitarea la compresiune în axa cuplei	181
6.2.1.3 Solicitarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale	183
6.2.1.4 Solicitarea la tracțiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale	185
6.2.2 Varianta structurii modificate prin mărirea înălțimii utile a cutiei	187
6.2.2.1 Solicitarea la compresiune în axa tamponelor	190
6.2.2.2 Solicitarea la compresiune în axa cuplei	191
6.2.2.3 Solicitarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale	193
6.2.2.4 Solicitarea la tracțiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale	195

6.2.3 Varianta structurii modificate prin articulare - vehicul alcătuit din două unități, cu boghiu comun în zona mediană	197
6.2.3.1 Solicitarea la compresiune în axa tamponelor	200
6.2.3.2 Solicitarea la compresiune în axa cuplei	202
6.2.3.3 Solicitarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale	204
6.2.3.4 Solicitarea la tracțiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale	206
6.2.4 Varianta structurii cu pereți din material compozit	208
6.2.4.1 Analiza numerică a structurii fără tabla pereților	209
6.2.4.2 Analiza structurii vagonului cu pereți din compozit	210
6.3 Concluzii	214
Cap. 7 Concluzii generale, contribuții personale și viitoare direcții de cercetare	220
7.1 Concluzii generale	220
7.2 Contribuții personale	223
7.3 Viitoare direcții de cercetare	224

INTRODUCERE

Lucrarea “Studiu privind sporirea capacității de transport a unui vagon descoperit, cu pereți înalți” prezintă analiza structurii de rezistență a unui vagon descoperit, cu pereți înalți, seria Eaos, având ca scop sporirea capacității de transport a vehiculului. În acest sens, au fost parcurși următorii pași:

- au fost efectuate cercetări în domeniu, cu scopul stabilirii tendințelor de dezvoltare a acestui tip de vehicul;
- s-a realizat modelul geometric al vehiculului care a stat la baza studiului, prin intermediul software-ului de analiză numerică ANSYS;
- a fost realizată analiza numerică a modelului realizat, urmărindu-se starea de tensiune și de deformație din structura vehiculului, ca urmare a aplicării unor sarcini standardizate. Au fost stabilite principalele zone de interes de pe întreaga structură a vagonului;
- utilizând rezultatele obținute în cadrul etapei anterioare, au fost efectuate analize experimentale prin metoda tensometriei electrice rezistive, utilizând un stand special de încercări;
- a fost validat modelul pornind de la rezultatele experimentale obținute;
- au fost efectuate analize experimentale și numerice ale solicitării prin șoc a structurii vehiculului, urmărindu-se evoluția deformațiilor specifice liniare apărute în structura vehiculului;
- au fost stabilite noi soluții constructive de sporire a capacității de transport a vehiculului și au fost efectuate analize numerice în cadrul cărora s-a urmărit evoluția stării de tensiune și evoluția deplasărilor, ca rezultat al aplicării unor sarcini standardizate.

1. ACTUALITATEA SUBIECTULUI TEZEI

Pornind de la tendința de dezvoltare a sistemului de transport feroviar de marfă la nivel european și implicit la nivelul țării noastre, găsirea unor soluții de sporire a capacității de transport este absolut necesară pentru eficientizarea transportului de marfă pe calea ferată.

În prezent există o serie limitată (din punct de vedere constructiv) a acestui tip de vagon, capacitatea de transport fiind una redusă, sub limita maximă de 22,5 tone pe osie.

Având în vedere costurile ridicate necesare dezvoltării unui nou proiect, îmbunătățirea vehiculelor feroviare existente în prezent reprezintă o soluție optimă de eficientizare a transportului feroviar de mărfuri.

Urmărind parcurile vagoanelor destinate transportului de mărfuri din România, se poate observa cu ușurință faptul că, vehiculele prezintă un grad ridicat de uzură și de îmbătrânire (din cauza eroziunii, îmbătrânirii materialului, deformații plastice etc.) [2], acestea fiind în uz de foarte mulți ani.

Activitatea de proiectare de noi vehicule feroviare este aproape inexistentă în România, aceasta fiind aproape înlocuită cu activitatea reparatoare și de modernizare a vehiculelor a căror structură este deja îmbătrânită.

Actualitatea subiectului tezei este dată de prezentarea unor noi variante viabile, de vehicule feroviare descoperite, cu pereți înalți, care ar putea reprezenta o soluție de reînnoire a parcului de vagoane de marfă. De asemenea, urmărind tendința generală în domeniul transportului feroviar de marfă, noile soluții structurale prezentate în cadrul lucrării oferă avantajul creșterii maselor transportate.

1. IMPORTANȚA SUBIECTULUI TEZEI

Transportul feroviar de marfă ocupă un loc important în societate, oferind o multitudine de avantaje, cum ar fi: volum mare de transport, consumuri reduse de energie, viteză de transport, siguranță, emisii zero de CO₂ în mare parte dintre cazuri etc.

În scopul îmbunătățirii calității transportului de marfă pe calea ferată este necesară utilizarea unor noi vehicule, care să îndeplinească o serie de condiții, după cum urmează:

a. Siguranță în transport;

Vehiculele feroviare trebuie să asigure siguranță deplină în activitatea de transport, prin îndeplinirea tuturor condițiilor referitoare la rezistența structurii, frânare, comportament dinamic la rulare, zgomot etc. Utilizarea unor vehicule care nu respectă aceste condiții minimale de siguranță în transport, sau utilizarea unor vehicule îmbătrânite, care nu mai prezintă siguranță în transport, poate conduce la apariția unor evenimente nedorite, precum pierderi materiale sau la pierderi de vieți omenești.

În domeniul feroviar, vehiculele feroviare destinate transportului de marfă prezintă o particularitate în comparație cu restul vehiculelor feroviare, prin faptul că, sunt concepute să transporte încărcături a căror masă poate fi chiar și de trei ori mai mari decât masa vehiculului, ceea ce conduce la o solicitare semnificativă a structurii de rezistență și la o îmbătrânire rapidă a oțelului din care acesta este confecționat, lucru care poate conduce la urmări nedorite.

b. Transportul unor încărcături mari;

Mare parte dintre vehiculele feroviare de marfă descoperite, cu pereți înalți, care circulă pe căile ferate din România, sunt echipate cu osii a căror sarcină este echivalentă cu 20 tone, ceea ce înseamnă o sarcină totală echivalentă unei mase de 80 tone când vagonul este încărcat și are patru osii. În Europa este utilizată, la scară largă, sarcina echivalentă cu 22,5 tone pe osie, ceea ce reprezintă o creștere semnificativă a sarcinii totale cu echivalentul a 10 tone. Este evident că, un vehicul (pe patru osii) echipat cu osii de 22,5 tone, sarcină echivalentă, poate transporta cu aproximativ 10 tone în plus față de unul clasic cu osii de 20 tone sarcină echivalentă.

Așa cum a fost menționat, pentru eficientizarea sistemului de transport de marfă pe calea ferată este necesară înlocuirea vechilor vehicule feroviare care prezintă limitare din punct de vedere tehnic, cu unele noi, capabile să transporte încărcături mult mai mari.

c. Comportament bun la rulare;

În timpul circulației, vehiculele feroviare rulează pe diferite porțiuni de cale, cum ar fi: porțiuni de linie dreaptă fără declivitate, porțiuni de linie dreaptă cu declivitate, curbe cu raze mari și mici, porțiuni de linie torsionată etc. În toate aceste situații, vehiculele trebuie să prezinte un comportament bun la rulare, atât gol, cât și încărcat.

În acest sens, pentru asigurarea cerințelor referitoare la siguranța circulației pe calea ferată, vehiculele feroviare de marfă trebuie să preia cu ușurință toate distorsionările căii de rulare și să prezinte flexibilitate și jocuri care să îi asigure o bună rulare, fără riscuri de deraiere sau de răsturnare. Structurile vehiculelor feroviare, aflate în uz de foarte mulți ani, pot prezenta defecte care pot periclita siguranța rulării și a integrității mărfurilor transportate, prin producerea unor evenimente nedorite, cum ar fi deraierea sau răsturnarea la circulația cu viteză redusă în curbe cu supraînălțare mare.

Cap. 1 ASPECTE GENERALE PRIVIND STRUCTURA VAGOANELOR DE MĂRFĂ ȘI MĂSURI PENTRU SPORIREA CAPACITĂȚII PORTANTE A ACESTORA

Acest capitol prezintă noțiuni generale privind istoria sistemului de transport feroviar, a sistemului convențional care caracterizează această ramură a transportului, informații referitoare la caracteristicile vehiculelor feroviare destinate transportului de marfă și la tendințele de dezvoltare a acestora.

Vehiculele feroviare sunt caracterizate de modul specific de deplasare a acestora pe calea de rulare, prin intermediul roților și al celor două șine. Roțile vehiculelor feroviare îndeplinesc rolul de susținere a vehiculului, de rulare și, spre deosebire de celelalte mijloace de transport, de autoghidare. Datorită sistemului de rulare roată - șină, care este confecționat din metal, vehiculele feroviare pot susține mase semnificativ mai mari, în comparație cu celelalte sisteme de transport terestre [5].

De asemenea, capitolul prezintă principalele caracteristici ale vagonului studiat și părțile componente din structura acestuia.

Cercetările în domeniu urmăresc, cât de mult posibil, scăderea maselor vehiculelor și creșterea volumului de mărfuri transportate, respectiv creșterea sarcinilor maxime pe osie. Urmărind această tendință, proiectanții și constructorii de vehicule feroviare analizează noi soluții, prin care să contribuie la creșterea calității transportului [37].

Având în vedere costurile foarte ridicate în cazul proiectării și construirii unui nou vehicul capabil să îndeplinească aceste cerințe, se procedează și la modificarea vagoanelor existente, prin aducerea de îmbunătățiri.

Tendența actuală este de sporire a masei transportate, prin mărirea sarcinii pe osie, utilizarea unor materiale și structuri noi și simplificarea, pe cât posibil, a structurii constructive, în limitele de siguranță ale circulației. În ceea ce privește vehiculele feroviare descoperite, cu pereți înalți (vagoane gondolă), s-au aplicat diferite soluții de sporire a capacității de transport, prin dezvoltarea unor noi proiecte.

În țara noastră există o serie limitată de tipuri de vagoane descoperite, cu pereți înalți (vagoane din seria E), a căror sarcină pe osie este sub limita maximă de 22,5 t, ceea ce înseamnă o capacitate de transport inferioară.

Pornind de la principalul scop urmărit în dezvoltarea vehiculelor feroviare de marfă descoperite, cu pereți înalți, ultima parte a capitolului prezintă o serie de noi soluții constructive dezvoltate în Europa, Rusia și China.

Cap. 2 OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI DE DOCTORAT

2.1 OBIECTIVELE TEZEI

Studiul privind sporirea capacității de transport a unui vagon descoperit, cu pereți înalți, are la bază, în principal, situația actuală, în care se află parcul de vagoane de marfă din România și tendința de dezvoltare care domină sistemul de transport de marfă pe calea ferată în Europa și în lume.

Lucrarea are ca principal obiectiv oferirea unor noi soluții constructive, pornind de la structura vagonului seria Eaos, care să asigure transportul unor sarcini suplimentare, față de cele suportate de structura inițială.

Pentru îndeplinirea obiectivului urmărit a fost parcursă o serie de etape, după cum urmează:

- Efectuarea unui studiu privind stadiul actual în domeniul transportului feroviar de marfă, cu precădere asupra tipului de vehicul studiat și a tendinței caracteristice dezvoltării acestor vehicule;
- Documentarea în ceea ce privește structura vagonului descoperit, cu pereți înalți, realizarea modelului geometric al structurii vehiculului și analiza acestuia prin metoda elementelor finite, utilizând software-un Ansys Mechanical;
- Au fost efectuate analize numerice în cadrul cărora au fost aplicate sarcini în conformitate cu standardele de referință în vigoare, sarcini identice cu cele aplicate în cadrul încercărilor structurilor vehiculelor feroviare pe standul de încercări. În cadrul simulării s-a urmărit starea de tensiune și starea de deformare apărute în structură, aceste fiind utilizate în scopul stabilirii condițiilor pentru etapa următoare din cadrul studiului;
- Pe baza rezultatelor obținute în cadrul simulărilor și analizelor numerice realizate cu elemente finite, au fost stabilite punctele de interes de pe întreaga structură a vagonului, puncte în care au fost aplicate traductoare electrice rezistive, în scopul verificării stării de tensiune și de deformare a structurii, pe standul de încercări special al Autorității Feroviare Române (AFER).
- Rezultatele obținute pe standul de încercări au fost comparate cu cele obținute în cadrul analizelor numerice cu elemente finite și au fost utilizate ulterior pentru calibrarea modelului numeric;
- Au fost efectuate verificări experimentale și numerice ale structurii vagonului în regim dinamic (șoc), respectiv verificarea la tamponare. În cadrul acestor verificări s-a urmărit compararea rezultatelor obținute în cadrul analizelor numerice, pentru modelul calibrat, cu cele obținute în cadrul verificării experimentale;
- Pe baza rezultatelor obținute în etapele anterioare s-a procedat la modificarea structurală a vagonului, în scopul livrării unor noi variante, îmbunătățite, care să asigure transportul unei cantități superioare de încărcătură. În urma acestor noi modelări și analize numerice au fost oferite

patru variante constructive, pentru care au fost obținute rezultate bune în unele cazuri și satisfăcătoare în altele.

2.2 ORGANIZAREA TEZEI

Principalele obiective ale tezei sunt prezentate pe parcursul a șapte capitole, la care a fost adăugată o parte introductivă, lucrarea fiind redactată în conformitate cu Regulamentul impus de către Universitatea POLITEHNICA din București.

Cele șapte capitole ale lucrării au fost structurate după cum urmează:

Capitolul 1, denumit **“Aspecte generale privind structura vagoanelor de marfă și măsuri pentru sporirea capacității portante a acestora”**, prezintă noțiuni generale privind istoria sistemului de transport feroviar, noțiuni referitoare la elementele caracteristice sistemului de transport feroviar și tendințele noi în acest domeniu de transport. Pornind de la scopul principal al lucrării sunt prezentate caracteristicile vehiculului feroviar analizat și o serie de studii și de informații actuale privind tendințele de dezvoltare a vehiculelor feroviare de acest tip.

Capitolul 2, cu titlul **“Obiectivele și organizarea tezei de doctorat”**, prezintă obiectivele tezei și modul de organizare a acestei lucrări.

Capitolul 3, intitulat **“Modelarea și studiul structurilor portante de cale ferată prin intermediul metodei elementelor finite”**, prezintă generalități referitoare la metoda elementelor finite, unele aspecte legate de modelarea numerică și de modelul de calcul și rezultatele obținute în urma efectuării analizei numerice prin metoda elementelor finite asupra structurii vehiculului.

Capitolul 4, cu titlul **“Rezultate experimentale obținute pe standul de încercări, pentru un vagon descoperit, cu pereți înalți și validarea modelului virtual al acestuia”**, prezintă rezultatele experimentale obținute pe un stand special pentru testarea structurii de rezistență a vehiculelor feroviare, din dotarea laboratoarelor Autorității Feroviare Române și tratează etapa de calibrare a modelului numeric, pe baza rezultatelor obținute pe cale experimentală și în urma unor analize comparative.

Capitolul 5, având titlul **“Analize experimentale și numerice ale structurii unui vagon descoperit, cu pereți înalți, solicitat la șoc”**, prezintă rezultatele obținute pe cale experimentală și pe cale numerică, privind comportamentul la șoc al structurii vehiculului feroviar studiat. Structura vehiculului studiat a fost încercată dinamic la șoc, în conformitate cu cerințele standardului.

Capitolul 6, denumit **“Noi variante structurale propuse și analiza numerică a acestora”**, prezintă contribuțiile personale referitoare la sporirea capacității de transport a unui vagon descoperit, cu pereți înalți. Pe parcursul acestui capitol sunt prezentate o serie de noi soluții constructive, care asigură un volum mai mare de transport decât varianta inițială a vehiculului.

Analiza structurală a vehiculului a fost efectuată prin intermediul metodei elementelor finite, utilizând software-ul Ansys Mechanical și având la bază modelul virtual calibrat cu ajutorul rezultatelor obținute pe cale experimentală.

Capitolul 7, cu titlul **“Concluzii generale, contribuții personale și noi direcții de cercetare”**, conține trei subcapitole și prezintă concluziile generale ale tezei de doctorat, informații referitoare la contribuțiile personale și la viitoarele direcții de cercetare în domeniul studiat.

Cap. 3 MODELAREA ȘI STUDIUL STRUCTURILOR PORTANTE DE CALE FERATĂ PRIN INTERMEDIUL METODEI ELEMENTELOR FINITE

În domeniul feroviar, structura de rezistență a vehiculelor trebuie să respecte standarde internaționale, în scopul de a asigura transportul de mărfuri cu mase semnificative, fără a pune în pericol siguranța circulației. Structura de rezistență a vehiculelor feroviare este compusă din profile metalice standardizate, care alcătuiesc un ansamblu numit șasiu. Acesta preia întreaga sarcină transportată și toate forțele care survin în procesele de transport și de manevrare a vehiculelor.

Proiectarea structurilor vehiculelor feroviare are ca principal obiectiv reducerea, pe cât posibil, a maselor vehiculelor, în vederea optimizării procesului de transport și a reducerii consumurilor de combustibil și de energie.

Acest capitol prezintă analiza numerică prin metoda elementelor finite a structurii de rezistență pentru un vagon de marfă descoperit, cu pereți înalți, solicitat static, în conformitate cu documentele de referință europene.

Vehiculul ales (fig. 1) ca model de studiu are următoarele caracteristici:

Tabelul 1. Principalele caracteristici ale vagonului analizat [21]

Caracteristică	Mărime
Ecartament	1435 mm
Lungimea utilă a cutiei	12792 mm
Lățimea utilă a cutiei	2772 mm
Înălțimea utilă a cutiei	1890 mm
Suprafața utilă a podelei	36 m ²
Volumul util al cutiei	68,4 m ³
Tara vagonului	22 tone
Sarcina maximă pe osie	20 tone
Vagonul este apt pentru trecerea peste cocoșele de triere	da

Din punct de vedere constructiv, structura vehiculului este alcătuită din: șasiu, pereți frontali și pereți laterali. Acest tip de vehicul este utilizat pentru transportul de mărfuri vrac (minereu, cărbune, cherestea, fier vechi etc.) sau mărfuri paletizate, care rezistă la intemperii.

Construcția geometrică a vagonului prezintă simetrie, atât față de axa longitudinală, cât și față de axa transversală a vehiculului.



Fig.1 Vagon seria Eaos

De aceea, s-a modelat doar un sfert din vehicul, iar cu ajutorul comenzii “reflect” s-a realizat întregul model. Pentru realizarea modelului virtual al vehiculului s-a utilizat programul Ansys 14.5. În cadrul analizei efectuate asupra vehiculului, boghiurile și ușile de încărcare/descărcare nu au fost modelate, acestea nefăcând parte din ansamblul elementelor de rezistență ale structurii.

A fost realizat modelul geometric al vagonului și au fost prezentate principalele elemente structurale ale acestuia, așa cum se poate vedea în figura 2.



a. Șasiu

b. Stâlpi și centura

Fig. 2 Elemente structurale ale vehiculului studiat

Prin cazurile de solicitare s-a încercat simularea condițiilor de încercare ale structurii de rezistență, pentru acest tip de vagon de marfă, conform standardului SR EN 12663-2:2010 [49].

În cadrul încercărilor la structura de rezistență a vehiculelor feroviare destinate transportului de marfă se efectuează:

- Încercarea la compresiune în axa tamponelor (CT);
- Încercarea la compresiune în axa cuplei (CA);
- Încercarea la compresiune, la 50 mm sub axa tamponelor (CT50);
- Încercarea la compresiune în diagonală (CD);
- Încercarea de tracțiune în axa cuplei (TA);
- Încercarea cu sarcina verticală (SV);
- Încercarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale (CTSV);
- Încercarea la compresiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale (CASV);
- Încercarea la tracțiune în axa cuplei, sub acțiunea sarcinii verticale (CASV) [61].

Toate aceste încercări urmăresc simularea comportamentului structurii vehiculelor în conformitate cu cazurile reale de exploatare.

Pornind de la datele inițiale, prin care, din punct de vedere dimensional, modelul a fost exprimat în [mm], după aplicarea forțelor în [N] au rezultat deplasări în [mm] și tensiuni în [MPa].

Vehiculul este confecționat din oțel S355. Pentru oțelul S355, conform tabelelor 18 și 19 din SR EN 12663-2:2010, rezistența (tensiunea) admisibilă pentru încercările cu forțe horizontale și cu solicitări combinate are următoarele valori [61]:

- pentru zone fără sudură:

$$\sigma_{aH} = R_{p0,2} = 355 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

- pentru zone cu sudură:

$$\sigma_{aH} = \frac{R_{p0,2}}{1,1} = 323 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

În continuare este prezentat, ca exemplu, unul dintre cele mai importante cazuri de solicitare analizate, respectiv cazul solicitării la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale (CTSV).

Încercarea la compresiune în axa tamponelor, sub acțiunea sarcinii verticale, simulează cazul real în care vehiculul este încărcat la capacitate maximă (58 t) și asupra sa acționează o forță de compresiune (2000 kN), în zona elementelor de ciocnire [61].

Schematizarea forțelor este prezentată în figura 3, iar rezultatele obținute sunt prezentate în figurile 4 - 6.

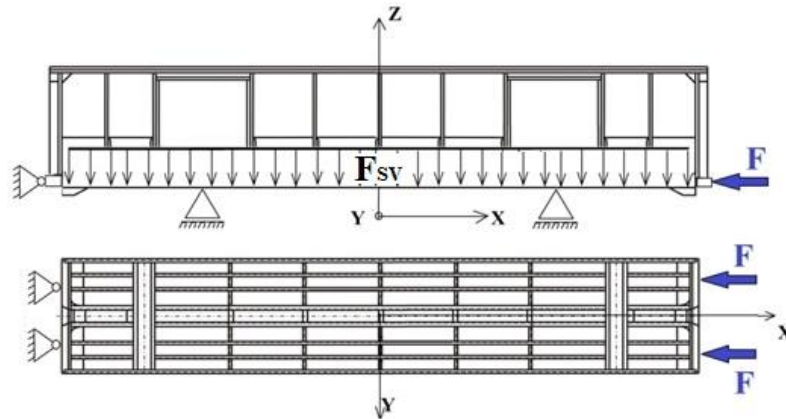


Fig. 3 Modul de aplicare al forțelor de compresiune pe tamponare, sub acțiunea sarcinii verticale

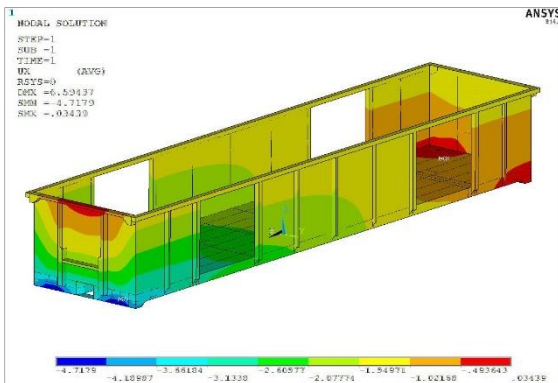


Fig. 4 Deplasări longitudinale



Fig. 5 Deplasări verticale

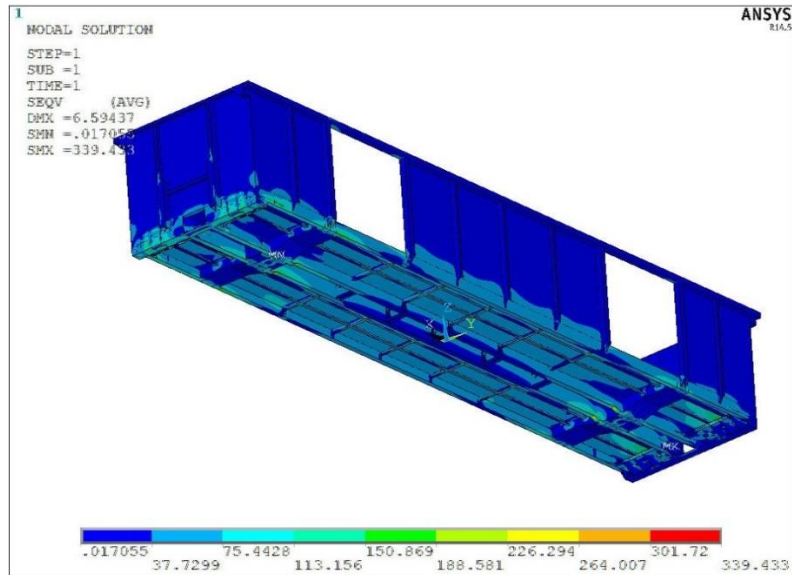


Fig. 6 Tensiune echivalentă von Mises

Exceptând singularitățile apărute în zona de aplicare a forței, în acest caz de solicitare tensiunile au înregistrat valori maxime de aproximativ 220-240 MPa, așa cum se poate observa în figura 6. Deplasările maxime apărute în urma aplicării sarcinilor au înregistrat valori de aproximativ 6,5 mm pe direcție verticală.

Principalul obiectiv al simulărilor efectuate prin metoda elementelor finite, prezentate în acest capitol al tezei, a fost determinarea stării de tensiune și de deformație din structura vehiculului.

Simulările au avut ca scop reproducerea cazurilor reale de solicitare definite în standardul de referință pentru vehiculele feroviare destinate transportului de marfă, cazuri care reflectă fenomenele care se produc în circulația și de manevrarea vehiculelor de cale ferată.

Având în vedere rezultatele obținute și urmărind obiectivul lucrării, acela de a mări sarcina transportată, se poate lua în considerare varianta încercării de modificare a structurii de rezistență a vehiculului studiat, prin înlocuirea anumitor profile metalice sau prin micșorarea grosimii elementelor structurale, unde acest lucru este posibil, fără afectarea condițiilor de siguranță a circulației și a mărfurilor transportate.

În vederea validării rezultatelor obținute în urma simulărilor, acestea vor fi comparate cu rezultatele obținute la încercările realizate cu ajutorul tensometriei electrice rezistive, pe standul de încercări, la un vagon tip Eaos.

În tabelul 2 sunt prezentate valorile maxime ale tensiunilor echivalente și valorile maxime ale deplasărilor (pe direcția axei longitudinale Ox sau pe direcția axei verticale Oz), urmărite în timpul analizei numerice ale structurii vehiculului prin metoda elementelor finite.

Se observă că tensiunea echivalentă prezintă valoarea cea mai ridicată în cazul compresiunii pe tampoane, însoțită de acțiunea sarcinii verticale, în timp ce, deplasările extreme se produc în cazul tracțiunii axiale.

Tabelul 2 Rezultate centralizate simulări numerice

Încercarea	Forța/Sarcina aplicată	Tensiuni echivalente maxime [MPa]	Deplasări maxime (pe direcție Ox sau pe direcție Oz) [mm]
Compresiune pe tampoane	2000 kN 1000 kN/tampon	200	4,4
Compresiune axială	2000 kN	120	3
Tracțiune axială	1500 kN	150	10
Sarcina verticală	569 kN	100	4,5
Compresiune pe tampoane, sub acțiunea SV	2000 kN + 569 kN	240	6,5
Compresiune axială, sub acțiunea SV	2000 kN + 569 kN	220	6,4
Tracțiune axială, sub acțiunea sarcinii verticale	1500 kN + 569 kN	200	9,8

Principalele tensiuni au apărut în zona traverselor frontale, în zonele aplicării forțelor, fiind transmise mai departe către lonjeronul central și către lonjeroanele laterale. La nivelul cutiei, tensiunile apărute prezintă valori mici în toate cazurile de solicitare prezentate anterior. Acest lucru demonstrează faptul că, mare parte dintre sarcinile care acționează asupra structurii sunt preluate de către șasiu.

Cap. 4 REZULTATE EXPERIMENTALE OBTINUTE PE STANDUL DE ÎNCERCĂRI, PENTRU UN VAGON DESCOPERIT, CU PEREȚI ÎNALȚI ȘI VALIDAREA MODELULUI VIRTUAL AL ACESTUIA

Activitatea de transport feroviar este una foarte complexă și de o importanță deosebită în toată lumea. Buna desfășurare a activității de transport feroviar impune respectarea unor cerințe, care au devenit tot mai stricte și complexe, odată cu trecerea anilor și ca urmare a dezvoltării tehnologice.

Vehiculele feroviare trebuie să răspundă unor serii de cerințe, legate de siguranța activităților de transport. Astfel, vehiculele noi proiectate trec printr-o serie de teste, pentru confirmarea îndeplinirii cerințelor impuse. Încercarea structurii de rezistență a vehiculelor feroviare este una dintre cele mai importante, fără de care, un vehicul feroviar, nu poate fi considerat apt de circulație.

Încercările la structura de rezistență a vehiculelor feroviare se fac în laboratoare specializate, echipate corespunzător pentru îndeplinirea tuturor cerințelor standardelor de referință. În țara noastră, Autoritatea Feroviară Română (AFER) deține un stand de încercări de acest tip, care, prin metoda tensometriei electrice rezistive, determină dacă structura de rezistență a unui vehicul feroviar îndeplinește condițiile necesare exploatării [59], [60].

Conform standardului SR EN 12663-2:2010, vehiculele feroviare destinate transportului de marfă sunt supuse încercărilor cu forțe orizontale, încercărilor cu sarcini verticale și încercărilor cu sarcini combinate.

În cadrul verificărilor experimentale pe standul de încercări, a fost utilizată metoda tensometriei electrice rezistive, metodă de determinare a tensiunilor mecanice din structuri, prin măsurarea deformațiilor specifice liniare de la suprafața corpurilor supuse unor solicitări.

Dacă starea de solicitare studiată este una de întindere sau de compresiune simplă și este caracterizată de o deformație elastică a materialului, supunându-se astfel legii lui Hooke, tensiunea normală corespunzătoare se poate determina cu relația [64]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

unde:

- σ [MPa] este tensiunea normală;
- ε este deformația specifică liniară;
- E [MPa] este modulul de elasticitate longitudinal al materialului [64].

Încercările de rezistență efectuate prin tensometrie electrică rezistivă asupra structurii vagonului analizat s-au desfășurat pe standul de tensometrie din incinta Autorității Feroviare Române - AFER, București [70].

Pentru realizarea măsurătorilor au fost utilizate materiale tensometrice (traductoare, adezivi, acceleratoare etc.) fabricate de firma Hottinger din Germania:

➤ traductoare electrice rezistive 1-LY11-6/120, cu rezistența electrică $R = 120 \Omega \pm 0,35 \%$ și constanta $k = 2,07 \pm 1\%$;

➤ traductoare electrice rezistive 10/120 RY 41, cu rezistența electrică $R = 120 \Omega \pm 0,2 \%$ și constanta $k = 2,0 \pm 1\%$;

➤ adeziv rapid Z70;

➤ accelerator tip BCY01 pentru adeziv Z70 [73], [74].

Aparatele și mijloacele de măsurare utilizate la încercări sunt prezentate în tabelul nr. 3 și în figura 8 [75], [76].

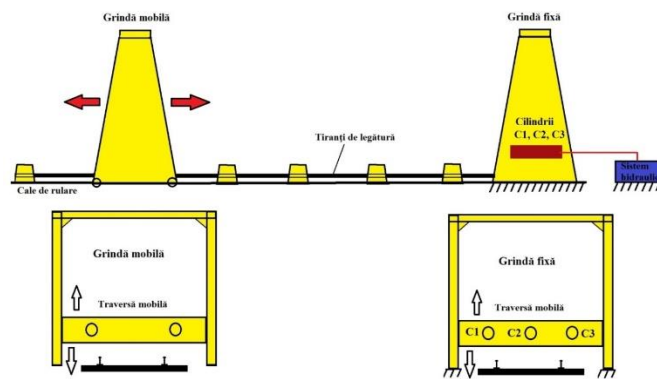


Fig. 7 Stand pentru încercări la structura de rezistență a vehiculelor feroviare

Tabelul 3 Lanț de măsură utilizat la încercări - precizia de măsurare

Nr. crt.	Dispozitiv de măsurare	Precizia de măsurare
1	Sistem tensometric Hottinger, Centipede cu 100 de canale	$\pm 1 \mu\text{m/m}$
2	Calibrator tensometric Hottinger, tip K 3608	$\pm 1 \mu\text{m/m}$
3	Software Catman 4.5	-
4	Traductoare de deplasare	Clasa 1
5	Celule de forță de 2 MN (compresiune)	Clasa 1
6	Celulă de forță de 2 MN (compresiune - tracțiune)	Clasa 1
7	Celule de forță de 200 kN (compresiune)	Clasa 1



a. Sistem de achiziție de date HBM Centipede cu 100 de canale



b. Elemente de legătură între traductoare și HBM Centipede



c. Celulă de forță de 2 MN



d. Celulă de forță de 200 kN



e. Celulă de forță de 2 MN



f. Traductor de deplasare

Fig.8 Echipamente utilizate la încercări

Pregătirea vehiculelor feroviare pentru încercările realizate la structura de rezistență a acestora este o operație laborioasă și de lungă durată. În cadrul acestei pregătiri se parcurg următorii pași:

- Se poziționează vehiculul pe standul de încercări și se demontează aparatele de ciocnire, de tracțiune și legare;
- Se stabilesc principalele puncte pentru lipirea traductoarelor electrice rezistive;
- Se efectuează operațiile de pregătire a suprafețelor și se lipesc traductoarele în punctele stabilite. Se conectează cablurile la traductoarele electrorezistive și la aparatura de măsură utilizată la efectuarea încercărilor;
- Se configurează standul de încercări pentru fiecare caz de încercare în parte.

În urma analizei numerice realizate prin metoda elementelor finite s-au stabilit 55 de puncte de măsurare (fig. 9), majoritatea acestora regăsindu-se la nivelul șasiului [59], [61].

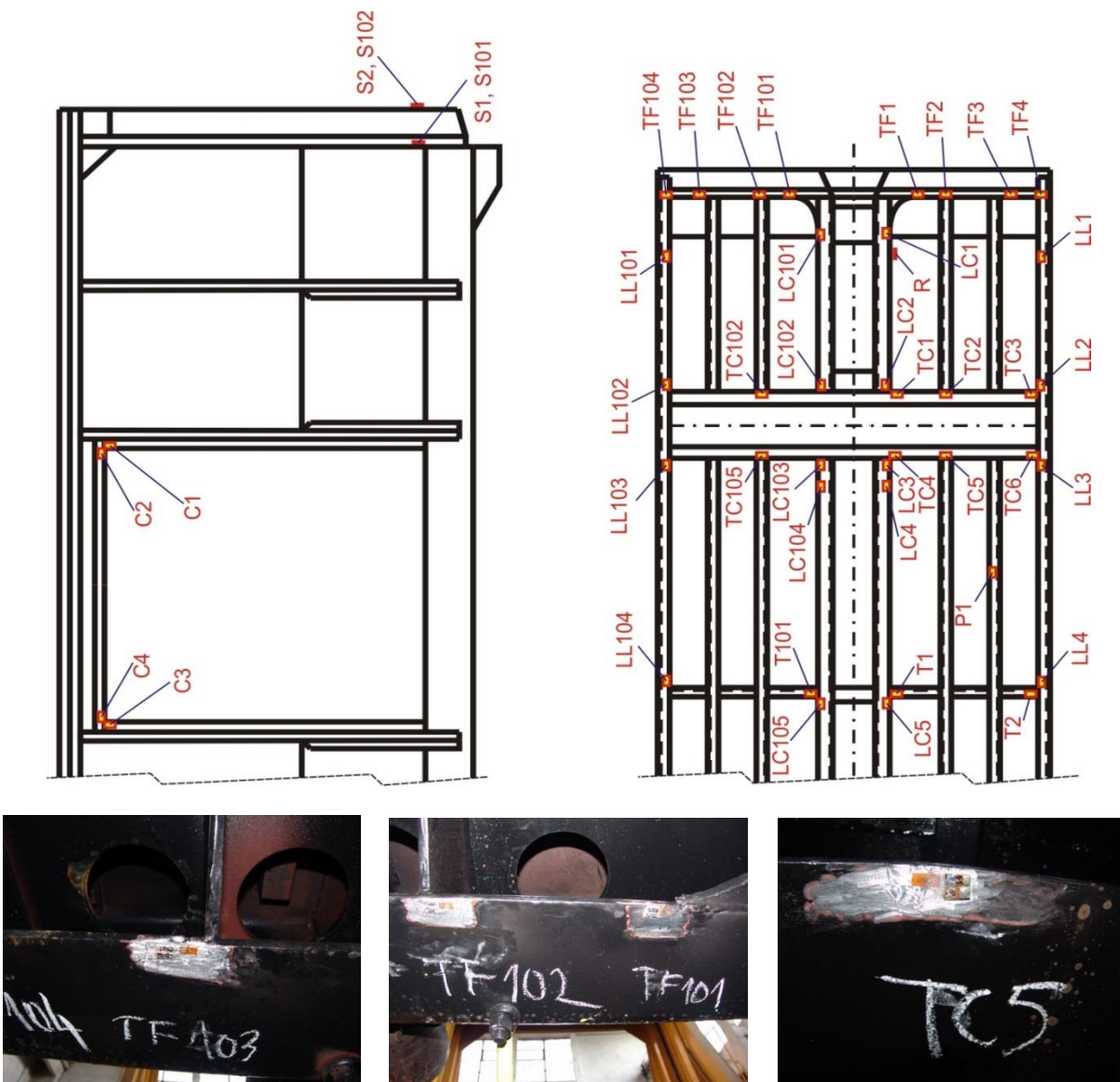


Fig. 9 Amplasare traductoare pe structura vehiculului

Traductoarele electrice rezistive au fost aplicate în axa longitudinală a elementelor structurale ale vehiculului, unde deformațiile specifice prezintă cele mai ridicate valori, iar tensiunile mecanice înregistrate s-au determinat pe baza deformațiilor specifice liniare măsurate, utilizând relația (3).

În tabelul următor sunt prezentate principalele rezultatele obținute pentru cazurile solicitărilor în cadrul cărora au fost obținute cele mai mari valori ale tensiunilor.

Tabelul 4 *Principalele rezultate experimentale*

Nr. crt.	Punct de măsurare	Solicitarea	Rezultat
			[MPa]
1	LC3	CA	51
2	LC4	CA	128
3	LC5	CA	66
4	LL4	CA	64
5	LL5	CA	49
6	C2	CA	44
7	TF1	CT	48
8	TF2	CT	51
9	TF4	CT	157
10	LC1	CT	-218
11	LC4	CT	-92
12	S2	CT	68
13	R	CT	102
14	LC2	SV	-64
15	LC3	SV	-40
16	LC4	SV	-90
17	LL104	SV	-85
18	T1	SV	-141
19	C2	SV	-77
20	C3	SV	85
21	TF102	CT+SV	107
22	TF4	CT+SV	149
23	LC1	CT+SV	-230
24	LC102	CT+SV	-138
25	LC4	CT+SV	-182
26	LL103	CT+SV	-101
27	T1	CT+SV	-123
26	R	CT+SV	129

După finalizarea verificărilor experimentale, rezultatele obținute au fost centralizate și analizate, în scopul modificării modelului numeric, astfel încât, rezultatele simulărilor numerice să fie foarte apropiate de rezultatele obținute pe cale experimentală [60].

Pentru determinarea stării de tensiune pe modelul virtual, în zonele în care au fost lipite traductoarele electrice rezistive pe structura vehiculului, s-au parcurs următorii pași [60]:

➤ au fost identificate zonele în care au fost lipite traductoarele electrice rezistive pe structura vehiculului în cadrul încercărilor pe stand;

➤ utilizând modelul numeric, a fost identificată poziționarea elementelor finite aferente locațiilor în care au fost aplicate punctele de măsurare pe structura modelului real și au fost extrase rezultatele tensiunilor în conformitate cu direcția de măsurare a traductorului.

➤ s-au analizat rezultatele pe fiecare element în parte, pentru determinarea corectă a stării de tensiune din zona respectivă, așa cum se poate vedea în figura 10 și în figura 11.

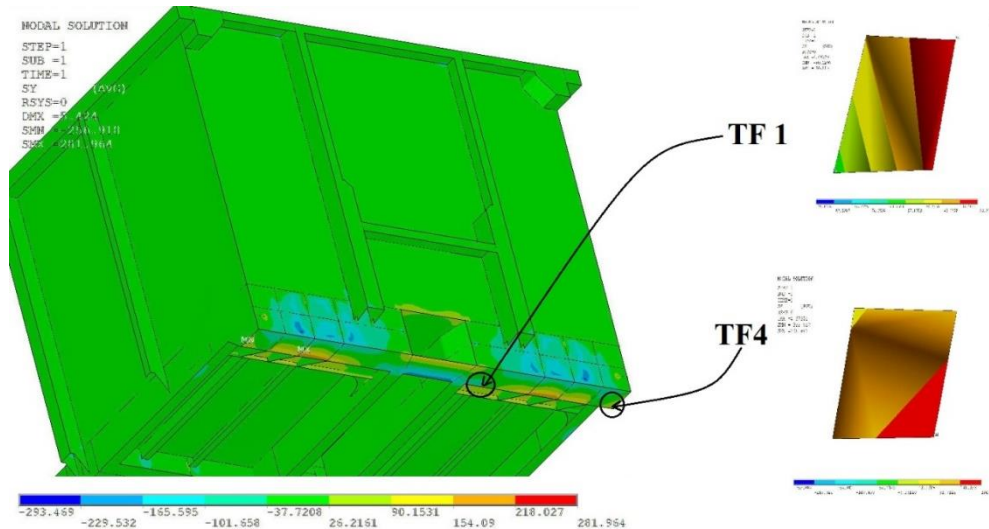


Fig. 10 Mod selectare și plotare elemente (încercarea CT)

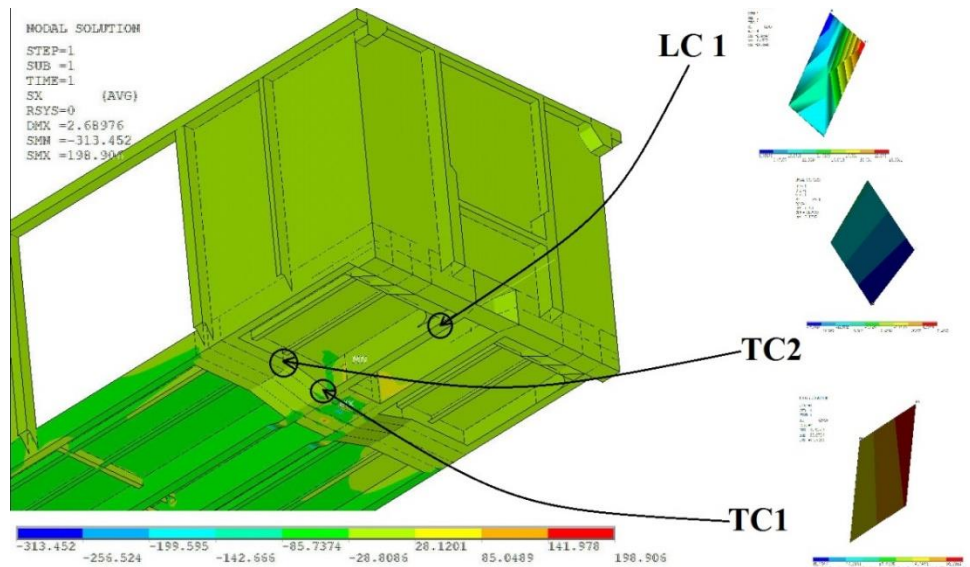


Fig. 11 Mod selectare și plotare elemente (încercarea CA)

În tabelul 5 sunt prezentate rezultatele obținute prin cele două metode.

Tabelul 5 Principalele rezultate MEF-Experimental

Nr. crt.	Punct de măsurare	Valori obținute			
		Încercarea	Experimental [MPa]	MEF [MPa]	Eroarea [%]
1	LC3	CA	51	50	2
2	LC4	CA	128	130	2
3	LC5	CA	66	61	8
4	LL4	CA	64	61	5
5	LL5	CA	49	40	18
6	C2	CA	44	37	16
7	TF1	CT	48	54	11
8	TF2	CT	51	60	15
9	TF4	CT	157	168	7
10	LC1	CT	-218	-194	11
11	LC4	CT	-92	-105	14
12	S2	CT	68	59	13
13	R	CT	102	93	9
14	LC2	SV	-64	-60	6
15	LC3	SV	-40	-37	8
16	LC4	SV	-90	-75	17
17	LL104	SV	-85	-78	8
18	T1	SV	-141	-137	3
19	C2	SV	-77	-69	10
20	C3	SV	85	78	8
21	TF102	CT+SV	107	110	3
22	TF4	CT+SV	149	139	7
23	LC1	CT+SV	-230	-226	2
24	LC102	CT+SV	-138	-139	1
25	LC4	CT+SV	-182	-174	4
26	LL103	CT+SV	-101	-121	10
27	T1	CT+SV	-123	-124	1
26	R	CT+SV	129	136	5

În urma analizei comparative a rezultatelor numerice și a celor experimentale se poate considera că modelul de calcul al vagonului studiat este unul corect, având în vedere diferențele mici dintre rezultatele obținute pe cele două căi, cu excepția câtorva puncte de măsurare, unde erorile sunt ceva mai mari.

Cap. 5 ANALIZE EXPERIMENTALE ȘI NUMERICE ALE STRUCTURII UNUI VAGON DESCOPERIT, CU PEREȚI ÎNALȚI, SOLICITAT LA ȘOC

5.1 ÎNCERCAREA LA ȘOC CU VAGONUL GOL ȘI ÎNCĂRCAT

Manevrarea vehiculelor feroviare destinate transportului de marfă se efectuează în scopul alcătuirii garniturilor, pe tipuri de vagoane, în funcție de tipul mărfurilor transportate, respectiv pentru transportul acestora între punctele de încărcare și punctele de descărcare a mărfurilor.

În cele mai multe dintre cazuri, manevrarea vagoanelor de marfă se face cu viteză redusă, în scopul evitării apariției unor șocuri, care ar putea pune în pericol integritatea acestora și a mărfurilor transportate [81], [82].

În anumite cazuri, atunci când vehiculele feroviare sunt manevrate peste cocoșa de triere, vehiculele se ciocnesc unele de celelalte, generând șocuri care se transmit mai departe către structura acestora.

Testele la tamponare a vehiculelor feroviare destinate transportului de marfă se efectuează în scopul determinării comportamentului structurii de rezistență și analizei influenței încărcăturii transportate asupra acesteia, ca urmare a aplicării unor forțe instantanee, similare cu cele care iau naștere în procesul de manevrare a vagoanelor peste cocoșa de triere [81], [82].

Încercarea la tamponare constă în lansarea cu viteză stabilită a unui vagon berbec (utilizându-se un vehicul feroviar motor), care tamponează vehiculul testat, aflat în staționare, cu toate echipamentele de măsurare montate pe structura acestuia [81], [82].

Încercarea la tamponare se efectuează pe planul înclinat al Centrului de Testări Feroviare al AFER, sau în orice triaj feroviar dotat cu cocoșă de triere, de către personal specializat în acest sens, utilizând aparatură de măsură care să îndeplinească cerințele standardelor europene în vigoare. În figura 12 este prezentat modul de poziționare a vehiculelor utilizate în cadrul încercării la tamponare [81], [82].

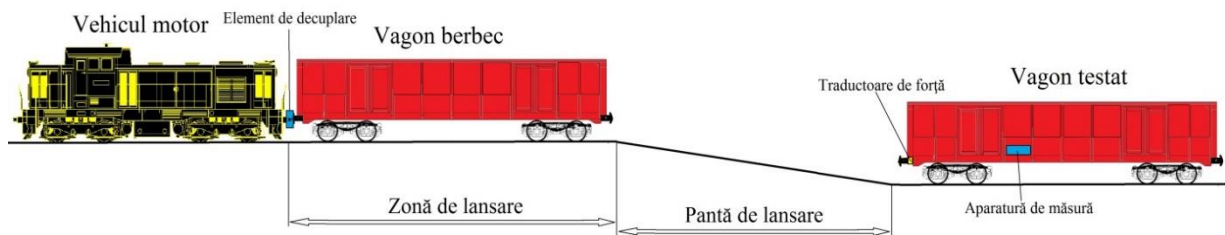


Fig. 12 Schematizarea încercării la tamponare

Pentru încercarea la tamponare a vagonului s-au utilizat următoarele echipamente:

- sistem de achiziție pentru măsurarea deformațiilor specifice și a forțelor în spatele tamponanelor;
- celule de forță pentru măsurarea forțelor de tamponare;
- dispozitiv de măsurare a vitezei de tamponare;
- traductoare pentru determinarea tensiunilor mecanice care iau naștere în structurile testate;
- traductoare de deplasare pentru măsurarea cursei elementelor de ciocnire.

Pentru efectuarea încercărilor prin șoc la structura de rezistență a vehiculului s-au stabilit 16 puncte de măsurare.

În figura 13 este prezentată poziționarea traductoarelor electrice rezistive, prescurtate TER, pe structura vehiculului. Încercările la tamponare cu vagonul gol au avut ca scop determinarea comportamentului structurii vehiculului și verificarea interacțiunii dintre vehicul și boghiuri.

Conform standardului de referință, forța care acționează la nivelul tamponelor vehiculelor trebuie să nu depășească valoarea de 1500 kN/tampon sau viteza maximă de 12 km/h [61], [81].

Rezultatele obținute pentru tamponările cu vagonul gol (valori maxime) sunt prezentate în tabelul 6.

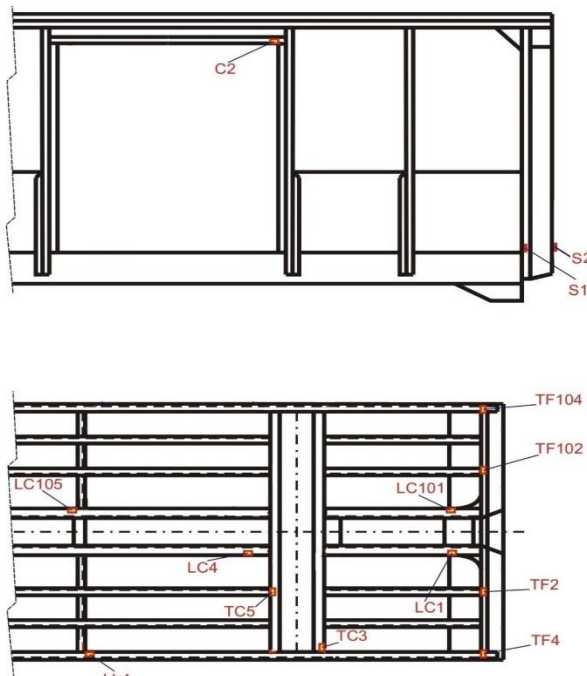


Fig. 13 Poziționarea traductoarelor electrice rezistive pe structura vehiculului încercat

Tabelul 6 Rezultate experimentale obținute la încercarea la tamponare cu vagonul gol

Nr. tamp.		1	2	3	4	5	6	7
v [km/h]		5,65	7,2	8,82	9,52	10,26	10,47	12,97
Punct de măsură	TF2	-62	-90	-114	-129	-148	-171	-195
	TF102	-190	-229	-295	-338	-381	-386	-552
	TF4	262	300	390	438	486	495	667
	TF104	224	262	348	395	448	467	629
	LC1	281	352	519	610	710	743	1010
	LC101	286	324	410	457	510	533	700
	LC4	-171	-205	-271	-310	-348	-362	-519
	LC105	-129	-152	-205	-238	-267	-271	-357
	TC3	-19	-33	-38	-48	-52	-52	-71
	TC5	-76	-95	-133	-157	-167	-171	-181
	LL4	-148	-176	-233	-271	-305	-310	-395
	LL105	-195	-205	-276	-295	-324	-333	-486
	S1	-62	-71	-90	-105	-110	-114	-186
	S2	-129	-157	-233	-271	-295	-295	-424
	R1	-229	-267	-362	-414	-471	-490	-652
	C2	-52	-76	-81	-95	-100	-105	-176

În timpul încercărilor cu vagonul gol nu s-au produs deteriorări ale subansamblelor vagonului, acestea rămânând în stare de funcționare și nu au apărut deformări vizibile ale structurii.

Pentru cazul încercării cu vagonul încărcat, vehiculul încercat a fost încărcat cu piatră spartă, care se utilizează la prisma căii ferate, pentru a simula masa transportată. Fiind vorba despre un vagon descoperit, cu pereți înalți, utilizarea pietrei sparte pentru a simula masa încărcăturii este cea mai bună soluție, deoarece, întreaga încărcătură a fost repartizată uniform și nu a existat riscul deplasării acesteia pe perioada desfășurării încercărilor. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 7.

Tabelul 7 Rezultate obținute la încercarea la tamponare cu vagonul încărcat

Tamponări/ Tamp. nr.	Prelim.	5		15		25		35		40	
1 Viteza ^[1]) [km/h]		12.24		12.37		12.2		12		11.43	
Viteza medie ^[2]) [km/h]		12.05									
Pct. de măsură	$\epsilon_p^{[3]}$	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ
TF2	-117	-115	-548	-77	-367	-84	-400	-76	-362	-89	-424
TF102	-185	-175	-833	-186	-886	-166	-790	-180	-857	-170	-810
TF4	-194	-174	-829	-188	-895	-168	-800	-182	-867	-177	-843
TF104	-177	-157	-748	-171	-814	-149	-710	-160	-762	-147	-700
LC1	287	267	1271	297	1414	268	1276	284	1352	267	1271
LC101	185	176	838	194	924	181	862	188	895	178	848
LC4	-165	-149	-710	-157	-748	-140	-667	-154	-733	-140	-667
LC105	-123	-111	-529	-120	-571	-102	-486	-117	-557	-107	-510
TC3	76	58	276	55	262	41	195	59	281	49	233
TC5	-83	-61	-290	-68	-324	-63	-300	-66	-314	-68	-324
LL4	-167	-120	-571	-131	-624	-112	-533	-127	-605	-117	-557
LL105	-178	-160	-762	-166	-790	-164	-781	-165	-786	-165	-786
S1	-253	-221	-1052	-235	-1119	-262	-1248	-230	-1095	-255	-1214
S2	-205	-198	-943	-217	-1033	-235	-1119	-207	-986	-246	-1171
R1	-118	-176	-838	-144	-686	-142	-676	-156	-743	-152	-724
C2	-103	-161	-767	-176	-838	-175	-833	-179	-852	-185	-881

În timpul și după terminarea încercărilor la șoc cu vagonul încărcat, nu s-au produs deteriorări ale subansamblelor vagonului, acestea rămânând în stare de funcționare și nu au apărut deformări vizibile ale structurii vehiculului [81], [82].

¹⁾ Valorile din această linie sunt valorile vitezei pentru tamponarea nr. 5, 10, ..., 40

²⁾ Valoarea de pe această linie reprezintă viteza medie pentru cele 40 tamponări

³⁾ ϵ_p reprezintă valoarea deformațiilor specifice remanente cumulate pentru tamponările preliminare

5.2 SIMULĂRI NUMERILE ALE ÎNCERCĂRII LA ȘOC, PRIN MEF

Simulările încercării la șoc, cu vagonul gol s-au efectuat în regim static neliniar, pe întreaga structură a vehiculului, utilizând elemente finite cu mărimea de 35 mm, prin intermediul software-ului Ansys. Prin analiza în regim static neliniar s-a urmărit reproducerea statică a încercării la șoc a structurii vagonului, studiindu-se evoluția tensiunilor mecanice și a deplasărilor apărute după aplicarea unor suprasarcini în zona tamponelor, valoarea acestora fiind stabilită pornind de la mărimea forțelor maxime înregistrate în cadrul încercărilor experimentale la șoc (de circa 745 KN/tampon, măsurate cu traductoare de forță) și considerând valoarea multiplicatorului de impact 2,017, obținut pentru $v = 12,97$ km/h și $\delta_{st} = 10$ mm.

Astfel, a fost ales cazul cel mai defavorabil, fiind aplicată o forță în valoare de 3000 kN (1500 kN/tampon) în cele două zone în care sunt montate aparatele de ciocnire, la unul dintre capetele vagonului, iar la capătul opus au fost aplicate constrângeri [86]. De asemenea, au fost aplicate constrângeri în zonele de rezemare pe boghiuri.

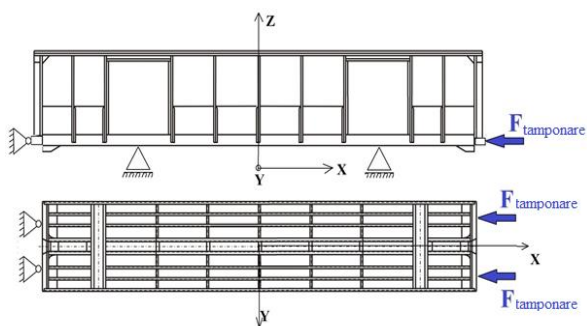


Fig. 14 Tamponare cu vagonul gol - schematizare forțe și constrângeri

În figura 15 este prezentată harta tensiunilor echivalente von Mises, înregistrate pentru simularea încercării la șoc cu vagonul gol. Pe baza tensiunilor obținute în cadrul simulărilor numerice au fost calculate deformațiile specifice liniare, utilizând relația (3) și au fost comparate cu cele obținute pe cale experimentală.

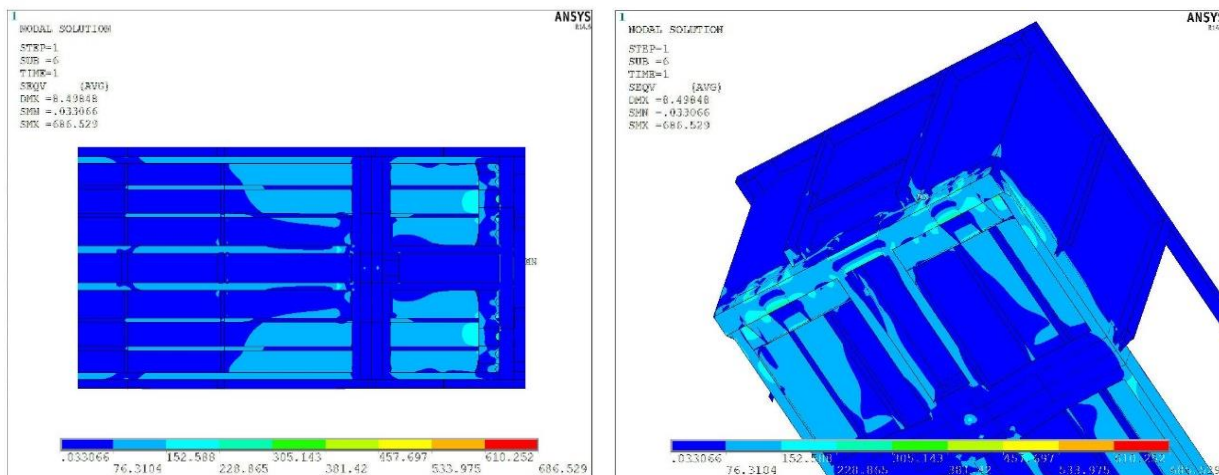


Fig. 15 Tensiuni echivalente von Mises - încercarea la șoc cu vagonul gol

Pentru determinarea stării de tensiune pe modelul virtual, în zonele în care au fost lipite traductoarele electrice rezistive pe structura vehiculului, s-au parcurs următorii pași:

➤ au fost identificate zonele în care au fost lipite traductoarele electrice rezistive pe structura vehiculului în cadrul încercărilor experimentale;

➤ au fost selectate punctele de pe structura modelului virtual și au fost tipărite rezultatele tensiunii pe direcția

corespunzătoare aplicării forței la șoc pe structură, pentru fiecare element corespunzător zonei în care a fost lipit un traductor electric rezistiv pe structura reală a vehiculului. Rezultatele experimental/MEF sunt prezentate în tabelul 8.

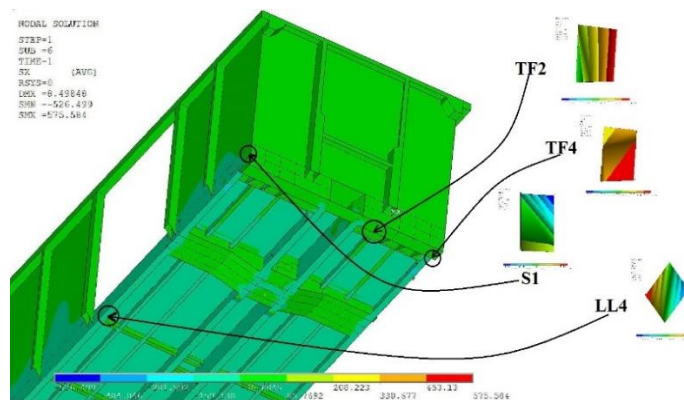


Fig. 16 Modul de selectare a elementelor corespunzătoare pozițiilor traductoarelor (tamponare cu vagonul gol)

Tabelul 8 Rezultate experimental/MEF încercare la șoc cu vagonul gol

	TER	Valori obținute experimental ϵ [$\mu\text{m/m}$]	Valori obținute prin metoda MEF ϵ [$\mu\text{m/m}$]
Punct de măsură	TF2	-195	-243
	TF102	-552	-667
	TF4	667	629
	TF104	629	667
	LC1	1010	876
	LC101	700	676
	LC4	-519	-524
	LC105	-357	-405
	TC3	-71	-43
	TC5	-181	-219
	LL4	-395	-395
	LL105	-486	-438
	S1	-186	-195
	S2	-424	-362
	R1	-652	-562
C2	-176	-119	

Diferențele dintre rezultatele obținute pe cale experimentală și cele obținute prin metoda elementelor finite se datorează incertitudinilor de măsurare, unor eventuale erori de lipire a traductoarelor electrice rezistive pe structura vehiculului, dar și altor cauze specifice procedeeului experimental folosit.

În același mod s-a procedat și în cazul încercării la șoc cu vagonul încărcat, rezultatele obținute fiind prezentate în tabelul 9.

Tabelul 9 Rezultate experimental/MEF încercare la șoc cu vagonul încărcat

	TER	Deformație specifică ϵ experimental [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Deformație specifică ϵ metoda MEF [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Punct de măsură	TF2	-400	-414
	TF102	-790	-862
	TF4	-800	-781
	TF104	-710	-733
	LC1	1276	1181
	LC101	862	890
	LC4	-667	-676
	LC105	-486	-429
	TC3	195	295
	TC5	-300	-305
	LL4	-533	-500
	LL105	-781	-767
	S1	-1248	-1248
	S2	-1119	-1214
	R1	-724	-790
	C2	-881	-757

Așa cum a fost menționat și în cazurile anterioare, o parte dintre rezultate au prezentat valori ușor diferite, din cauza metodei de măsurare utilizată în cadrul încercărilor, a modului diferit de lucru a celor două elemente de ciocnire ale vagonului etc.

Principalele obiective urmărite în cadrul încercărilor la șoc la structura de rezistență a vehiculului au fost determinarea deformațiilor specifice ϵ , ca urmare a aplicării unor sarcini prin șoc. Sarcinile aplicate asupra structurii s-au stabilit în conformitate cu standardele de referință și reproduc cazurile de solicitare din exploatarea și din manevrarea prin șoc a vehiculelor feroviare.

Pentru determinarea deformațiilor specifice apărute în structură au fost stabilite 16 puncte de măsurare, majoritatea acestora regăsindu-se la nivelul șasiului, component structural care preia cea mai mare parte din solicitările care apar asupra vehiculului, când acesta este manevrat peste cocoașa de triere. Rezultatele obținute în ambele cazuri au valori apropiate în majoritatea punctelor de măsurare, cu câteva excepții, unde, diferențele mai mari se explică prin comportamentul diferit al structurii vagonului (din cauza nesimetriilor structurale), în cazul încercărilor.

Cap. 6 NOI VARIANTE STRUCTURALE PROPUSE ȘI ANALIZA NUMERICĂ STRUCTURALĂ A ACESTORA

Vehiculele feroviare prezintă un mare avantaj prin care se diferențiază de restul mijloacelor de transport terestre, respectiv rezistența foarte mică la înaintare, dată de contactul redus dintre roată și șină [5]. Din acest motiv, în prezent, sistemul de transport feroviar este considerat cel mai eficient sistem de transport în masă. Vehiculele feroviare de marfă trebuie să asigure o serie de cerințe, dintre care reamintim: siguranța în transport, viteze mari de circulație, costuri reduse de transport și de întreținere etc.

Pornind de la actualele tendințe din transportul feroviar de marfă, principalul obiectiv al lucrării a fost concentrat pe studiul structurii de rezistență a unui vagon de marfă descoperit, cu pereți înalți, pentru sporirea capacității de transport a acestuia, cu respectarea tuturor cerințelor de siguranță a circulației.

În acest scop, au fost efectuate studii numerice și experimentale, utilizând metode utilizate în prezent la proiectarea și la verificarea vehiculelor feroviare, anterior fabricării și punerii în circulație a acestora.

Pornind de la modelul numeric realizat prin intermediul software-ului Ansys și validat pe baza rezultatelor experimentale obținute în urma testelor statice și dinamice efectuate, au fost aduse modificări dimensionale asupra structurii vehiculului studiat, în scopul îndeplinirii obiectivului urmărit de lucrare, respectiv, sporirea capacității de transport.

Studiul s-a concentrat pe determinarea stării de tensiune și de deformare din noile structuri, în scopul verificării îndeplinirii cerințelor minimale de siguranță a circulației pe calea ferată. Analiza structurilor s-a concentrat asupra solicitărilor care au avut ca rezultat cele mai mari valori ale tensiunii mecanice în cazul modelului inițial [59], respectiv:

- compresiune în axa tampoanelor;
- compresiune în axa cuplei;
- compresiune în axa tampoanelor, combinată cu sarcina verticală;
- tracțiune în axa cuplei, combinată cu sarcina verticală.

Au fost analizate pentru patru noi soluții constructive, acestea fiind prezentate în continuare.

6.1 VARIANTA STRUCTURII MODIFICATE PRIN MĂRIREA LUNGIMII UTILE A CUTIEI

În urma studiilor efectuate asupra structurii vehiculului, utilizând metoda elementelor finite [59], au fost înregistrate valori mici ale tensiunii mecanice în zona mediană a vehiculului, principalele tensiuni mecanice regăsindu-se în zonele de capăt ale vagonului, unde forțele acționează în mod direct asupra structurii.

Acest lucru conduce la concluzia că, modificarea lungimii utile a cutiei vagonului poate reprezenta o soluție viabilă de sporire a capacității de transport, fără depășiri ale tensiunilor mecanice și ale deplasărilor, cu îndeplinirea cerințelor de siguranță ale circulației feroviare.

În figura 17 este prezentată schematizat varianta cutiei modificate prin prelungirea structurii cu 1271 mm (lungimea dintre doi stâlpi ai pereților laterali, în zona mediană a vehiculului), iar în tabelul 10 sunt prezentate principalele caracteristici ale noii structuri.

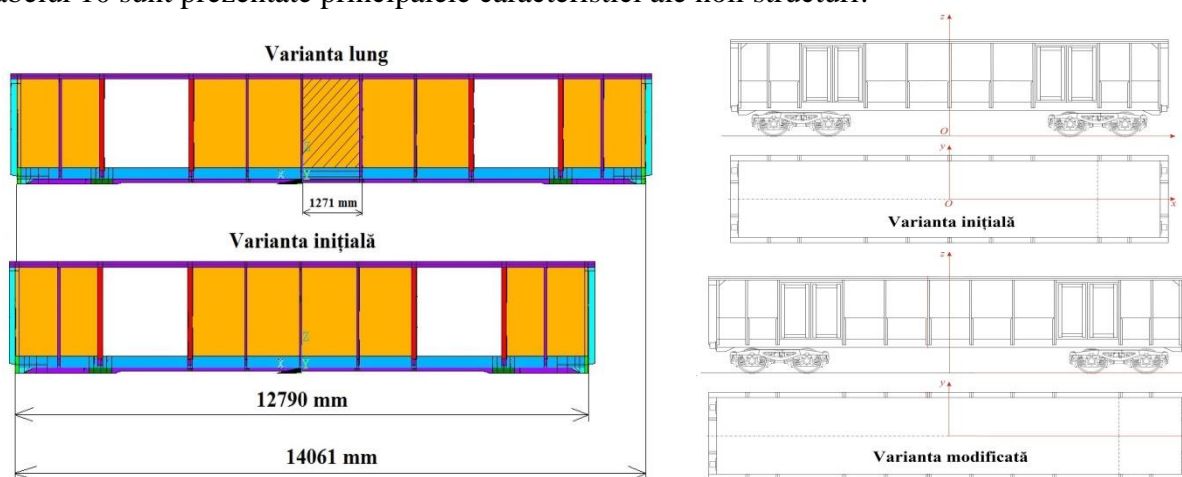


Fig. 17 Modelul geometric al noii structuri prin modificarea lungimii - prezentare comparativă cu modelul inițial

Tabelul 10 Principalele caracteristici ale vagonului - varianta inițială/varianta cutie prelungită

Nr. Crt.	Caracteristica	Varianta inițială cu osii de 20 t	Varianta cutiei prelungite cu osii de 22,5 t
1	Masă cutie (fără uși) [t]	9,3	10,02
2	Tară [t]	22	22,72
3	Volum cutie [m ³]	68,4	74
4	Capacitate transport [t]	58	67,28

6.2 VARIANTA STRUCTURII MODIFICATE PRIN MĂRIREA ÎNĂLȚIMII UTILE A CUTIEI

Plecând de la aceleași rezultate care au stat la baza analizei structurii prezentate anterior (punctul 6.1), modificarea volumului util al cutiei vehiculului, în vederea sporirii capacității de transport, se poate realiza și prin prelungirea pereților laterali și a celor frontali, pe direcția axei Oz , respectiv pe înălțimea vehiculului.

Modificarea înălțimii utile a cutiei vagonului (fig. 18) poate reprezenta o altă soluție viabilă de sporire a capacității de transport, fără depășiri ale tensiunilor mecanice, cu îndeplinirea cerințelor de siguranță ale circulației feroviare.

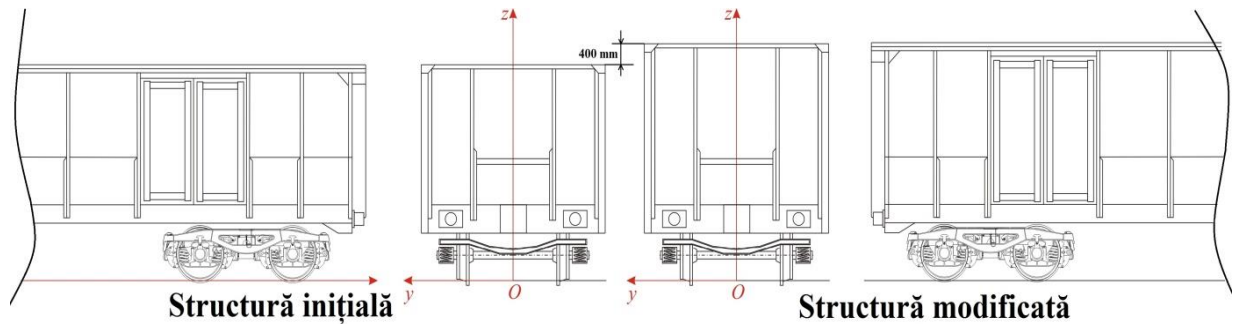


Fig. 18 Modelul geometric al noii structuri prin modificarea înălțimii - prezentare comparativă cu modelul inițial și prezentare de ansamblu

Principalul avantaj al modificării înălțimii cutiei, prin prelungirea pereților laterali și a pereților frontali cu 400 mm (valoare determinată în urma efectuării unor calcule de determinare a volumului util al cutiei), îl reprezintă creșterea volumului util al cutiei de la 68,4 m³, la 82,4 m³. Dezavantajul adăugării segmentului structural îl constituie mărirea masei cutiei cu aproximativ 0,5 t, respectiv modificarea tarei vehiculului de la 22 tone, la 22,51 tone. Caracteristicile vehiculului sunt prezentate în tabelul 11.

Tabelul 11 Principalele caracteristici ale vagonului - varianta inițială/varianta înălțată

Nr. Crt.	Caracteristici	Varianta inițială osii 20 t	Varianta cutie înălțată și osii de 22,5 t
1	Masă cutie (fără uși) [t]	9,3	9,8
2	Tară [t]	22	22,51
3	Volum cutie [m ³]	68,4	82,4
4	Capacitate transport [t]	58	67,5

În acest caz, capacitatea de transport a vehiculului crește semnificativ în comparație cu varianta inițială. Creșterea masei vehiculului este una nesemnificativă în comparație cu creșterea volumului util al cutiei, care asigură creșterea maselor transportate cu aproximativ 10 tone.

6.3 VARIANTA STRUCTURII MODIFICATE PRIN ARTICULARE - VEHICUL ALCĂTUIT DIN DOUĂ UNITĂȚI, CU BOGHIU COMUN ÎN ZONA MEDIANĂ

Analizând variantele prezentate anterior, se poate observa faptul că, noile structuri asigură o creștere semnificativă a caracteristicilor de transport ale vehiculului. Având în vedere tendința actuală de creștere a maselor transportate, specifice transportului de marfă pe calea ferată, satisfacerea cerințelor acestui secol presupune crearea și implementarea unor noi soluții. O astfel de soluție poate fi și varianta care va fi prezentată în continuare (fig. 19 și tabelul 12).

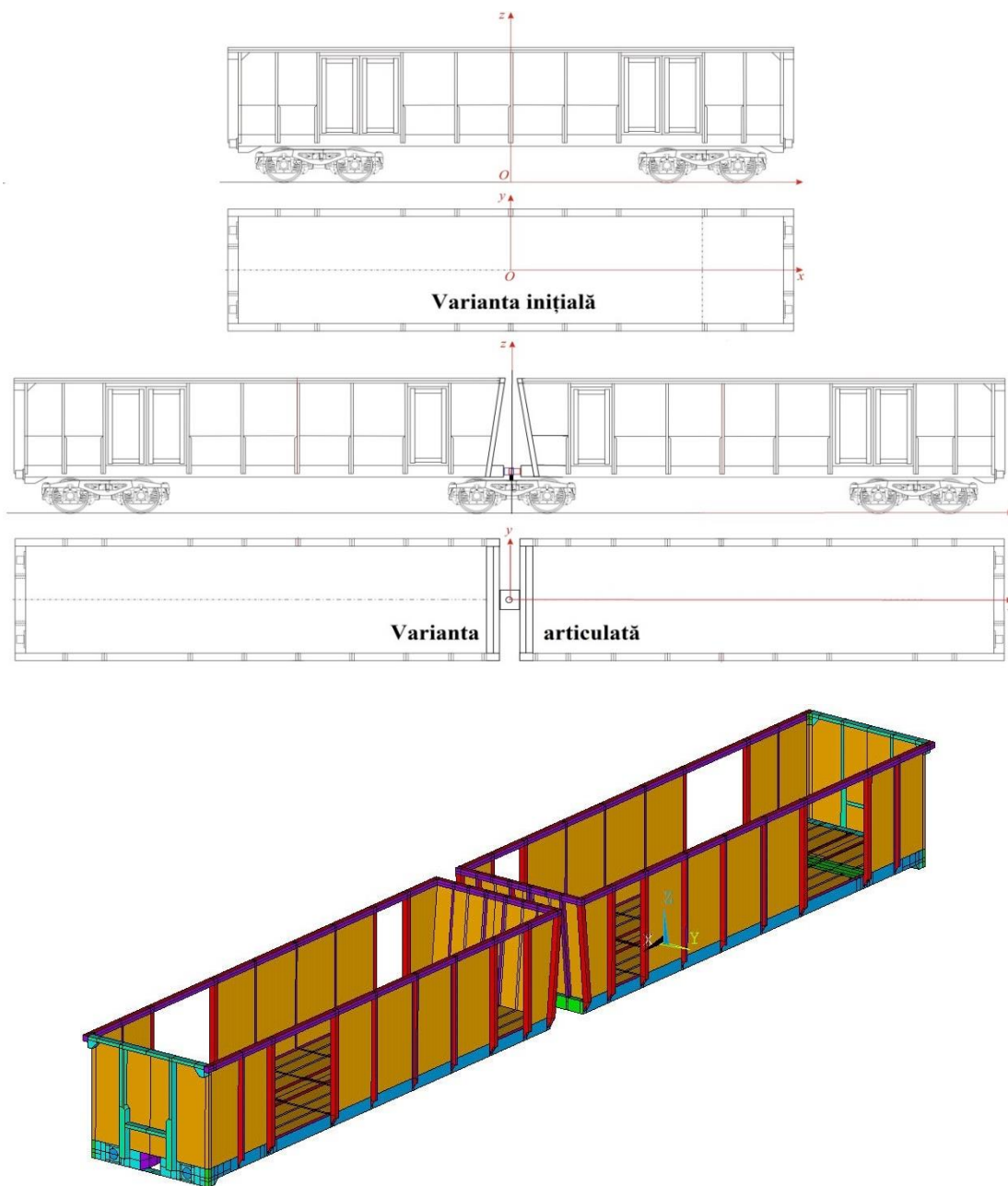


Fig. 19 Modelul geometric al noii structuri prin articularea a două unități

Tabelul 12 Principalele caracteristici ale vagonului - varianta inițială/varianta articulată

Nr. Crt.	Caracteristici	Varianta inițială osii 20 t	Varianta articulată osii 22,5 t
1	Masă cutie d (fără uși) [t]	9,3	15,94
2	Tară [t]	22	34,5
3	Volum cutie [m ³]	68,4	115,2
4	Capacitate transport [t]	58	100,5

Noul vehicul oferă avantajul creșterii volumului util de transport și implicit a masei transportate, capacitatea de transport cunoscând o creștere aproape dublă, în comparație cu varianta inițială. Lungimea unităților a fost redusă, în comparație cu structura inițială, cu scopul utilizării unui singur boghiu în zona mediană, lucru care asigură o serie de avantaje din punct de vedere al costurilor de execuție și întreținere.

Astfel, a fost obținut un vehicul compus din două unități identice, legate prin intermediul unei cuple, care face parte din structura de rezistență a acestora, lungimea totală a acestuia fiind echivalentă cu lungimea a două vagoane descoperite, cu pereți înalți, seria Eaos.

6.4 VARIANTA STRUCTURII CU PEREȚI DIN MATERIAL COMPOZIT

Analizând modul de propagare a tensiunilor mecanice (obținute în cadrul studiului structural prin metoda elementelor finite și în cadrul testelor pe stand) în structura vehiculului inițial, se poate observa cu ușurință faptul că, valorile tensiunilor obținute la nivelul cutiei sunt relativ mici [59], ceea ce poate conduce la ideea că, pentru micșorarea masei vehiculului se poate opta pentru varianta eliminării tablei din oțel care acoperă structura pereților și înlocuirea acesteia cu materiale mai ușoare, cum ar fi materialele compozite (fig. 20) [87], [88], [89], [90], [91], [92].

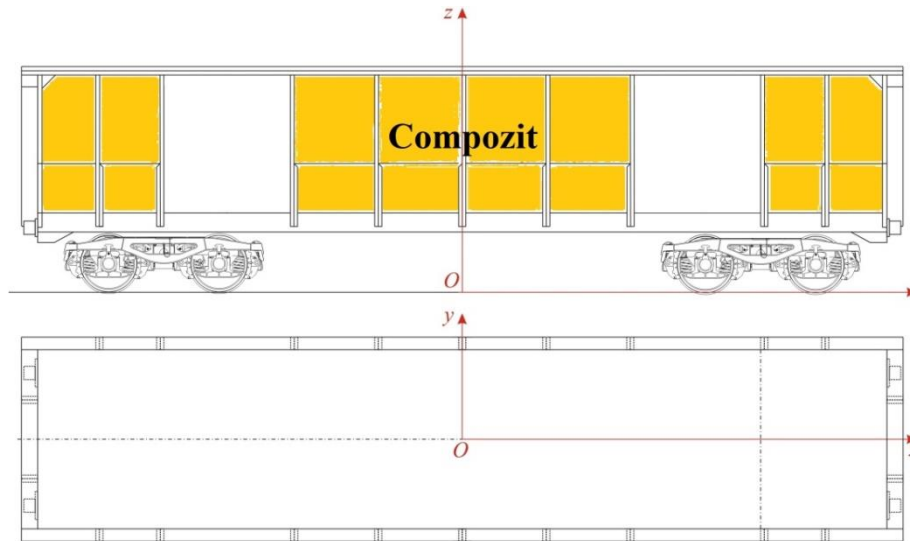


Fig. 20 Varianta structurală cu pereți din material compozit

În scopul verificării acestei teorii a fost efectuată o analiză structurală numerică asupra vehiculului, fără tabla care acoperă pereții. În cadrul analizei s-a urmărit evoluția tensiunilor mecanice pentru întreaga structură a vagonului.

În scopul reducerii masei vehiculului a fost eliminată tabla pereților și a fost efectuată o analiză numerică a structurii vehiculului, utilizând metoda elementelor finite. Pentru această analiză a fost ales cel mai defavorabil caz de încărcare a structurii vehiculului, respectiv compresiune în axa tampoanelor, combinată cu sarcina verticală, rezultatul fiind prezentat în figura 21.

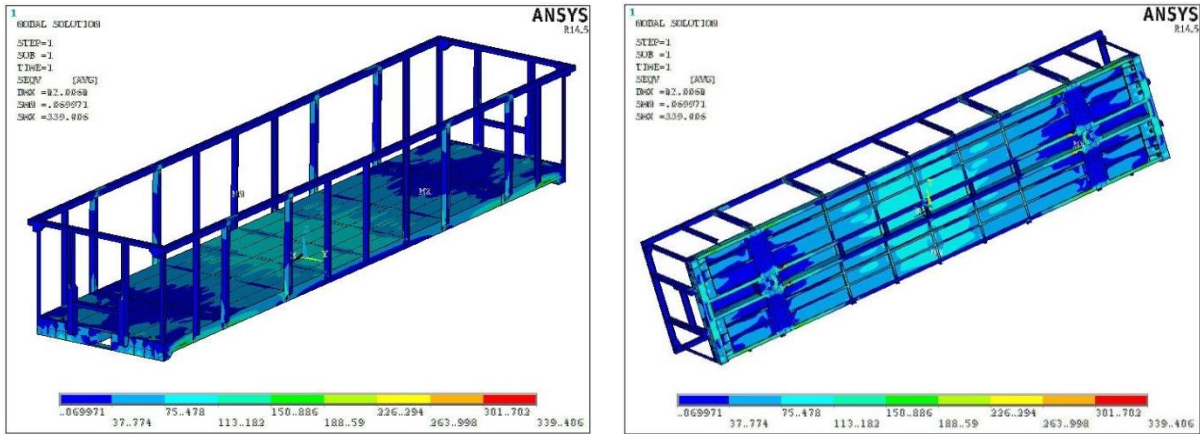


Fig. 21 Teniuni mecanice echivalente von Mises pentru structura fără tabla pereților

Tabelul 13 Evoluția masei pereților oțel 5 mm/compozit 5 mm, 10 mm, 15 mm

Nr. crt.	Grosimea plăcii [mm]		Masa plăcilor care acoperă pereții - oțel [Kg]		Masa plăcilor care acoperă pereții - compozit [Kg]	
	Oțel	Compozit	Cu uși	Fără uși	Cu uși	Fără uși
2	5	5	803.63	1345.92	157.01	262.97
3		10			314.04	525.94
4		15			471.05	788.92

Realizând un calcul simplu rezultă o suprafață totală a pereților vagonului de 20.606 m², fără uși, și o suprafață totală de 34.511 m² cu tot cu uși. În tabelul 13 este prezentată evoluția masei pereților în funcție de materialul utilizat și de grosimea acestuia.

În figura 22 este prezentată (spre exemplificare) harta tensiunilor pentru cazul pereților vagonului, confecționați din material compozit cu grosimea de 10 mm.

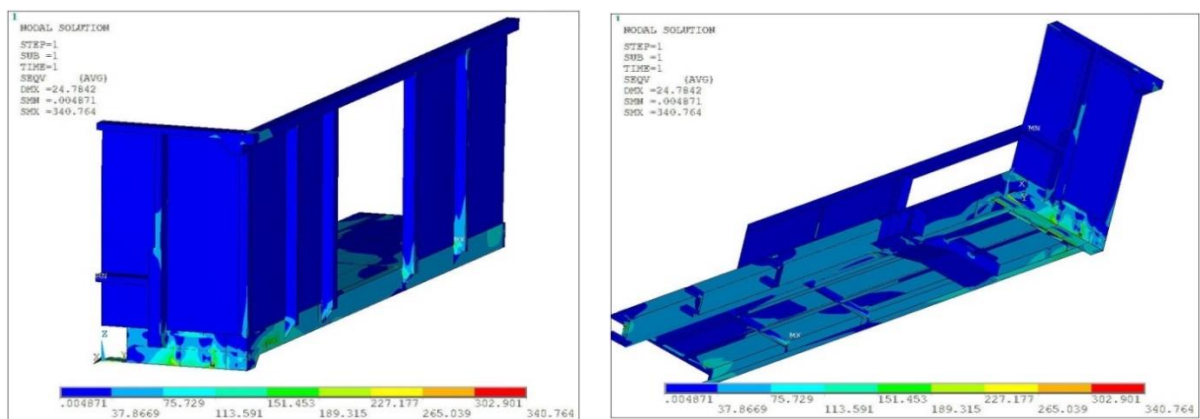


Fig. 22 Structură cu pereți din compozit de 10 mm grosime - tensiune von Mises

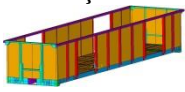
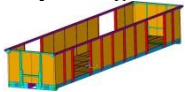
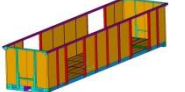

În cazul panourilor cu grosimea de 10 mm, masa totală a vehiculului scade cu 820 kg față de masa inițială a vehiculului.

În continuare sunt prezentate principalele rezultate obținute în cazul analizelor numerice a primelor trei variante structurale propuse (tabelul 14 și tabelul 15).

Tabelul 14 *Principalele caracteristici ale noilor variante structurale/varianta inițială*

Nr. Crt.	Caracteristică	Varianta inițială cu osii 20 t	Varianta articulată cu osii 22,5 t	Varianta lungă cu osii 22,5 t	Varianta înaltă cu osii 22,5 t
1	Masă cutie (fără uși) [t]	9,3	15,94	10,02	9,8
2	Tară [t]	22	34,5	22,72	22,51
3	Volum cutie [m ³]	68,4	115,2	74	82,4
4	Capacitate transport [t]	58	100,5	67,28	67,49

Tabelul 15 *Rezultate tensiuni/deplasări noile variante structurale și varianta inițială*

Solicitarea	Mărime înregistrată	Structura în varianta inițială 	Structura în varianta prelungită 	Structura în varianta înălțată 	Structura în varianta articulată 
Compresiune în axa cuplei	tensiunea mecanică σ_{\max} [MPa]	162	170	156	148
	deplasarea pe direcția axei Ox	2,5	2,92	2,62	2,97
	deplasarea pe direcția axei Oz	3,08	4,38	3,34	3,97
Compresiune pe tampoane + sarcina verticală	tensiunea mecanică σ_{\max} [MPa]	278	288	279	273
	deplasarea pe direcția axei Ox	4,71	5,22	5,07	4,83
	deplasarea pe direcția axei Oz	6,37	6,01	8	5,08
Tracțiune în axa cuplei + sarcina verticală	tensiunea mecanică σ_{\max} [MPa]	215	247	220	207
	deplasarea pe direcția axei Ox	3,04	3,42	2,9	3,03
	deplasarea pe direcția axei Oz	9,76	15,43	11,06	10,46

Rezultatele obținute în urma analizei prin metoda elementelor finite au demonstrat faptul că, toate cele patru noi variante sunt viabile, totodată respectând cerințele standardelor referitoare la structura de rezistență a vehiculelor feroviare.

Cap. 7 CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI VIITOARE DIRECȚII DE CERCETARE

7.1 CONCLUZII GENERALE

Transportul feroviar de marfă poate fi considerat cel mai eficient sistem de transport terestru în masă, datorită avantajelor induse de volumul mare de transport și urmare a costurilor reduse aferente consumului de energie sau carburant. Sistemul roată - șină asigură o rezistență specifică la înaintare de aproape zece ori mai mică decât în cazul vehiculelor rutiere destinate transportului de marfă, datorită contactului redus dintre roată și șină.

Pentru realizarea unui transport eficient și sigur, vehiculele feroviare trebuie să asigure o serie de cerințe, dintre care reamintim: siguranță deplină în transport, viteze mari de circulație, costuri reduse de transport și de întreținere, fiabilitate, satisfacerea cerințelor în domeniu etc.

Anterior punerii în circulație sau după reparații majore, vehiculele feroviare trebuie verificate din punct de vedere al siguranței, atât static, cât și dinamic.

Orice nou vehicul feroviar poate ajunge în faza de testare doar dacă este considerat apt din punct de vedere al rezistenței structurii.

Pentru îmbunătățirea calității transportului feroviar de marfă la nivelul țării noastre, dar și la nivel european, sunt necesare proiecte noi, în scopul înlocuirii vechilor vehicule și pentru a readuce sistemul de transport feroviar de marfă în fruntea sistemelor de transport terestru.

Pornind de la această idee, lucrarea a prezentat studiul efectuat asupra structurii de rezistență a unui vehicul feroviar de marfă descoperit, cu pereți înalți, asupra căruia s-au adus modificări, în scopul sporirii capacității de transport al acestuia.

Vehiculul care a stat la baza acestui studiu este un vagon descoperit, cu pereți înalți, cu uși de încărcare/descărcare laterale. Vehiculul de acest tip este unul dintre cele mai populare vagoane utilizate pentru transportul de mărfuri vrac sau paletizate, rezistente la intemperii, cum ar fi: minereu, cărbune, lemn (bușteni sau lemn prelucrat), fier vechi etc.

Vagoanele de marfă sunt cele mai solicitate vehicule feroviare, acestea transportând mărfuri a căror masă poate fi de până la trei sau chiar patru ori mai mare decât masa vehiculului în sine. Acest lucru conduce la apariția unor tensiuni foarte mari în structura de rezistență a vehiculului, în special când acesta este în compunerea unui tren, iar forțele care se transmit în corpul trenului amplifică forțele apărute din cauza încărcăturii transportate.

Vagonul prezentat la baza acestui studiu prezintă o construcție relativ simplă, fiind confecționat, în mare parte, din profile metalice standardizate, realizate din oțel de tip S355.

În urma analizei numerice a structurii vagonului (prezentată în capitolul trei), realizată prin metoda elementelor finite, cu ajutorul software-ului Ansys Mechanical, a fost determinată starea de tensiune și de deformație apărută ca urmare a aplicării unor sarcini longitudinale, verticale și combinate, în conformitate cu documentele de referință care definesc modul de verificare a structurii vehiculelor de marfă.

Etapa următoare a lucrării a constat în analiza structurii pe cale experimentală, prin metoda tensometriei electrice rezistive, utilizând un stand de încercări special.

Rezultatele obținute pe cale experimentală au fost comparate cu cele obținute pe cale numerică și au fost utilizate pentru validarea modelului virtual, utilizat mai departe în cadrul studiului.

Deoarece, vagonul este apt pentru manevrarea peste cocoșa de triere, a fost efectuat un set suplimentar de verificări, atât experimentale, cât și numerice, pentru verificarea comportamentului vehiculului la aplicarea unor sarcini prin șoc.

Rezultatele obținute pe cale numerică sunt apropiate de cele obținute pe cale experimentală, ceea ce demonstrează că metoda elementelor finite furnizează rezultate bune.

Așa cum a fost menționat pe parcursul lucrării, vagonul studiat este echipat cu osii care suportă o masă maximă de douăzeci de tone fiecare, ceea ce înseamnă o masă maximă de optzeci de tone, din care se scade tara vagonului, în valoare de douăzeci și două de tone, rezultând o masă maximă transportată de cincizeci și opt de tone.

Creșterea masei transportate se poate face prin două variante:

1. Reducerea masei vagonului;

În cazul acesta, reducerea masei vagonului implică reducerea grosimii materialului din care sunt confecționate elementele structurale, ceea ce ar putea conduce la apariția unor tensiunii mecanice foarte mari și, așa cum a fost menționat, la o îmbătrânire prematură a întregii structuri.

2. Creșterea volumului util al cutiei;

Creșterea volumului util de transport al cutiei vehiculului necesită modificări structurale care conduc la creșterea masei vehiculului și, în acest caz, apare necesitatea utilizării unor osii care suportă mase mai mari. În țara noastră și la nivel european, valoarea maximă a masei admise pe osie este de 22.5 tone.

În cadrul lucrării au fost propuse patru noi variante structurale, acestea înregistrând valori ale tensiunii mecanice sub limitele maxime admisibile, putând fi considerate variante viabile de creștere a capacității de transport.

7.2 CONTRIBUȚII PERSONALE

Activitatea de cercetare în domeniul vehiculelor feroviare destinate transportului de marfă este aproape inexistentă în țara noastră, iar acest lucru se poate vedea cu ușurință, urmărind garniturile de tren, care par cu totul depășite.

Atingerea obiectivelor propuse în cadrul acestui studiu a impus parcurgerea unor etape complexe de cercetare și prin aceasta, lucrarea aduce o serie de contribuții, dintre care menționez:

➤efectuarea unei analize numerice a structurii vehiculului studiat, prin metoda elementelor finite, care a avut ca urmare determinarea stării de tensiune și de deformație din structura studiată, în urma aplicării unor sarcini longitudinale și verticale standardizate;

➤realizarea analizei experimentale statice a structurii vehiculului, prin metoda tensometriei electrice rezistive, utilizând un stand special de încercări, în scopul determinării stării de tensiune și de deformație apărute în urma aplicării unor sarcini standardizate;

➤validarea modelului numeric, utilizând rezultatele obținute prin metoda tensometriei electrice rezistive, obținute pe standul de încercări;

➤efectuarea unor analize experimentale dinamice asupra structurii vehiculului, în urma aplicării unor sarcini longitudinale prin șoc, utilizând metoda tensometriei electrice rezistive, în scopul măsurării deformațiilor specifice apărute la nivelul structurii de rezistență a vagonului;

➤realizarea analizei numerice dinamice a solicitării prin șoc a structurii vehiculului și compararea rezultatelor cu cele obținute pe cale experimentală;

➤furnizarea a patru noi soluții constructive, care asigură sporirea capacității de transport a vagonului analizat;

7.3 VIITOARE DIRECȚII DE CERCETARE

Pornind de la ideea de bază a acestui studiu, care s-a concentrat pe oferirea unor noi soluții constructive, cu scopul sporirii capacității de transport a unui vehicul feroviar de marfă, tematica lucrării poate fi direcționată cu ușurință către analiza altor soluții constructive sau către analiza altor tipuri de vehicule feroviare destinate transportului de marfă.

Totodată, utilizând metoda elementelor finite [109], care s-a dovedit a fi o soluție eficientă de analiză a structurilor feroviare, se pot studia, pe scară largă, structurile vehiculelor feroviare aflate în uz, pentru identificarea unor eventuale zone cu probleme, zone în care poate fi necesară analiza unor fenomene de rupere și de oboseală.

În cazul noilor soluții structurale prezentate, se pot efectua analize și simulări pentru determinarea comportamentului dinamic la rulare și pentru realizarea calculelor de frână, necesare furnizării unui proiect complet.

De asemenea, este necesară analiza mai amănunțită a posibilității de utilizare a unor materiale compozite în structura vagoanelor de cale ferată [110], [111], [112].

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [2] Bordeășu I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, România, 2006
- [5] Sebeșan, I., Dinamica vehiculelor de cale ferată, publicat de MatrixRom, București, România, octombrie 2011, ISSN 2066-8201
- [21] Berceanu, F., Compediu de vagoane de marfă. Marcaje, caracteristici, reglementări, echipamente, Editura ASAB, București, România, 2002
- [37] **Pătrașcu, A.I.**, Tendințe de dezvoltare a vehiculelor feroviare destinate transporturilor de mărfuri, Știință și Inginerie, Volumul 30 - Sebeș, Editura Agir, București, 2016
- [49] Hadăr, A., Constantinescu, I.,N., Gheroghiu, H., Coteț, C., E., Modelare și modele pentru calcule în ingineria mecanică, Editura Printech, București, 2007
- [59] **Pătrașcu, A.I.**, Zaharia, N.L., Hadăr, A., Analiza cu elemente finite a structurilor portante a unui vehicul feroviar destinat transportului de marfă, Simpozionul Național de material rulant, București, România, 2017, pp. 240-252, Editura MATRIX ROM, ISSN 1843-9888
- [60] **Pătrașcu, A.I.**, Zaharia, N.L., Zidaru, E.G., Hadăr, A., Jiga, G., Petre, C., Virtual model calibration of a railway vehicle body, The 8th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials, 28-31 August 2018, National Engineering School of Tarbes, France
- [61] SR EN 12663:2010 Aplicații feroviare - Cerințe de dimensionare a structurilor vehiculelor feroviare, 2010
- [64] Buga, M., Burlacu, C., Tensometrie Electrică Rezistivă - Lucrări de Laborator, Institutul Politehnic București, 1971
- [70] ***Autoritatea Feroviară Română - AFER, www.afer.ro, accesat la data de 26.09.2020, ora 13:45
- [73]]***Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH - HBM, strain gauges, <https://www.hbm.com/en/5501/sensors/>, accesat la data de 26.09.2020, ora 13:46
- [74] Sandu, M., Sandu, A., Captoare cu transductoare rezistive, proiectare, aplicații, Editura Printech, ISBN 973-9475-26-4, București 1999
- [75] Catman 4.5 User's Guide, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germania, 2004
- [76] Multipoint Measuring Unit Centipede 100 Operating manual, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germania
- [81] **Pătrașcu, A.I.**, Hadăr, A., Freight rail vehicle buffing impact testing, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 82, Iss. 2, 2020, pp. 107-118, ISSN 1454-2358

- [82] **Pătrașcu, A.I.**, Zidaru, E.G., Hadăr, A., Zaharia, N.L., Încercări prin șoc la structura unui vagon prototip, Simpozionul Național de material rulant, București, România, 2018, pp. 153-162, Editura MATRIX ROM, ISSN 1843-9888
- [86] **Pătrașcu, A.I.**, Hadăr, A., Simulări numerice ale încercării prin șoc pentru un vagon destinat transportului de marfă, Simpozionul Național de material rulant, București, România, 2017, pp. 163-168, Editura MATRIX ROM, ISSN 1843-9888
- [87] Płaczek, M., Wróbel, A., Buchacz, A., A Concept of Technology for Freight Wagons Modernization, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, **161**, 2016, DOI:10.1088/1757-899X/161/1/012107
- [88] **Pătrașcu, A.I.**, Hadăr, A., Pastramă, S. D., Structural analysis of a freight wagon with composite walls, Mat. Plast., **57** (2), 2020, pp. 140-151
- [89] Kosobudzki, M., Jamroziak, K., Bocian, M., Kotowski, P., Zając, P., The Analysis of structure of the Repaired Freight Wagon, AIP Conference Proceedings **2029**, 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5066492>
- [90] Płaczek, M., Wróbel, A., Baier, A., Computer-aided Strength Analysis of modernized freight wagon, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, **95**, 2015, DOI:10.1088/1757-899X/95/1/012042
- [91] Bühler, S., Methods and Results of Field Testing of a Retrofitted Freight Train with Composite Brake Blocks, J. Sound Vib., **293**, 2006, pp. 1041-1050
- [92] Kristensen, R.F., Nielsen, K.L., Mikkelsen, L.P., Numerical studies of shear damped composite beams using a constrained damping layer, Compos. Struct., **83**, 2008, pp. 304-311
- [109] Tabacu, Șt., Tabacu, I., Hadăr, A., Computational Modelling of Vehicle Interior Components for Impact Applications: Thickness Analysis, International Journal of Crashworthiness, **16** (4), August 2011, pp. 421-438
- [110] Picu C.R., Sorohan S., Soare M.A., Constantinescu D.M., Towards designing composites with stochastic composition: Effect of fluctuations in local material properties, Mechanics of Materials, vol. 97, pp. 59-66, 2016
- [111] Petrescu, H.-A., Hadăr, A., Pastramă, S.D., Experimental Program for Impact Tests on a Honeycomb Core Composite Material, Proceedings of The Romanian Academy, Series A - Mathematics Physics Technical Sciences Information Science, **18**, Number 2/2017, pp. 150-157
- [112] Picu R.C., Sorohan S., Soare M.A., Constantinescu D.M., Designing Particulate Composites: the Effect of Stochastic Filler Properties and Distribution, in Materials with Internal Structure; Multiscale and Multifield Modelling and Simulation, Ed. Patrizia Trovalusci, Springer Tracts in Mechanical Engineering, pp. 89-108, 2016