



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie

POLITEHNICA București

Școala Doctorală Transporturi

TEZĂ DE DOCTORAT

**Cercetări privind siguranța activă și pasivă a
autocamioanelor**

- Rezumat -

Conducător științific:

Doctorand:

Prof.univ.em.dr.ing. Gheorghe FRĂȚILĂ

Ing. Alexandra (MOLEA) IONIȚĂ

BUCUREȘTI

2026

Prefață

Siguranța autovehiculelor este una dintre cerințele fundamentale impuse autovehiculelor. Evitarea producerii accidentelor precum și măsurile pentru diminuarea efectelor acestora sunt probleme complexe și deosebit de importante pentru cercetătorii din industria constructoare de autovehicule. Eforturile depuse pentru a crește gradul de siguranță a conducătorului autovehiculelor, a ocupanților acestora precum și a celorlalți participanți la trafic, au cunoscut o evoluție semnificativă în sensul creșterii siguranței rutiere.

Siguranța autovehiculelor cuprinde trei componente principale: siguranța activă (măsurile pentru evitarea producerii accidentelor), siguranța pasivă (măsurile pentru diminuarea efectelor accidentelor după producerea acestora) și respectul pre-crash (măsurile luate între momentul detectării iminentei și momentul producerii accidentului, pentru reducerii gravității consecințelor acestuia).

Principalele obiective urmărite în lucrarea de doctorat sunt:

- Realizarea unei sinteze privind evoluția în timp a creșterii siguranței autovehiculelor prin introducerea sistemelor de siguranță activă și pasivă.

- Realizarea unei sinteze privind stadiul actual al reglementărilor legislative referitoare la siguranța activă și pasivă a autovehiculelor.

- Întocmirea unei sinteze privind stadiul actual al cercetărilor privind construcția caroseriilor de autoturisme și de autocamioane pentru creșterea gradului de siguranță activă și pasivă a acestora.

- Folosirea unor medii de modelare și simulare pentru studiul coliziunilor autovehiculelor.

- Utilizarea unor modele matematice pentru studiul coliziunii dintre două corpuri, prin metode diverse.

- Determinarea accelerației, vitezei, deformației și a timpului de impact ale modelelor matematice simple și complexe.

- Modelarea și simularea unor modele geometrice tridimensionale pentru studiul comportamentului structurii de rezistență a autocamionului în timpul unui impact frontal.

- Modelarea și simularea unor modele geometrice tridimensionale pentru studiul comportamentului structurii de rezistență a autocamionului în timpul unui impact cupendul.

- Determinarea deformației totale a modelelor geometrice în urma simulării la impact la mai.

- Realizarea unei analize comparative între rezultatele obținute în urma rezolvării modelelor matematice prin metoda clasică, pornind de la ecuația generalizată a lui Lagrange, și rezultatele obținute în urma rezolvării modelelor matematice prin metoda elementelor finite.

- Realizarea unei analize comparative experimentale și numerice cu privire la impactul frontal al cabinei de autocamion cu un pendul.

Pentru îndeplinirea obiectivelor lucrarea de doctorat este structurată în 6 capitole:

Capitolul 1 prezintă conceptele fundamentale privind siguranța activă și siguranța pasivă a autovehiculelor, cu accent pe particularitățile autocamioanelor. Sunt analizate evoluția în timp a sistemelor de siguranță, principalele statistici privind accidentele rutiere la nivel global, european și național, precum și cercetări cu privire la sistemele inovatoare de asistență a conducătorului automobilului.

Capitolul 2 prezintă stadiul actual al reglementărilor legislative și standardelor tehnice referitoare la cerințele de siguranță activă și pasivă aplicabile proiectării și omologării caroseriilor de autocamioane.

Capitolul 3 prezintă stadiul actual al cercetărilor privind construcția caroseriilor de autocamioane pentru creșterea gradului de siguranță al ocupanților, prin realizarea unei structuri rigide în jurul habitaculului care este capabilă să asigure un spațiu minim de supraviețuire pentru ocupați în timpul unui impact. De asemenea, tot pentru a asigura integritatea compartimentului pasagerilor, structurile de rezistență ale automobilului care înconjoară habitacul trebuie să se construiască astfel încât în timpul unui impact să poată să se deformeze și să preia o mare parte din energia de impact.

Capitolul 4 prezintă modele matematice pentru studiul teoretic al coliziunilor dintre autocamioane. În cadrul acestui capitol s-au analizat mai multe medii de modelare și simulare pentru studiul coliziunilor autocamioanelor. S-au realizat și s-au rezolvat modele matematice simple, cu un singur grad de libertate, până la modele matematice mai complexe, cu două grade de libertate. Aceste modele matematice studiază impactul frontal dintre un autovehicul cu o barieră rigidă nedeformabilă, dintre două autovehicule și impactul cu un pendul. Pentru rezolvarea acestor modele matematice s-au realizat scheme simplificate, care au fost rezolvate cu ajutorul mediului de modelare și simulare oferit de către programul Matlab Simulink, plecând de la ecuația generalizată a lui Lagrange. În partea a doua a capitolului se prezintă modelarea și simularea unor modele geometrice tridimensionale pentru studiul comportamentului structurii cabinei de autocamion în timpul unui impact, conform Regulamentului UNECE R29. Rezolvarea acestor modele matematice s-a efectuat cu ajutorul metodei elementelor finite.

Capitolul 5 prezintă metode de investigare experimentală privind încercarea structurii de rezistență a cabinei unui autocamion, conform Testului VFFS2003:29.

Capitolul 6 prezintă concluziile tezei de doctorat, contribuțiile originale și diseminarea rezultatelor cercetării.

Mulțumiri

Elaborarea și finalizarea acestei teze de doctorat nu ar fi fost posibile fără ajutorul și sprijinul conducătorului științific, al colegilor din Departamentul Autovehicule Rutiere și al familiei mele.

În primul rând, doresc să îmi exprim gratitudinea, respectul și sincerele mulțumiri conducătorului meu științific de doctorat, domnului prof. em. dr. ing. Gheorghe Frățiță, din cadrul Departamentului Autovehicule Rutiere, Facultatea de Transporturi, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, pentru sprijinul profesional, îndrumarea științifică și suportul moral acordate pe parcursul anilor de studii doctorale.

În al doilea rând, doresc să îmi exprim gratitudinea și respectul față de domnul conf. dr. ing. Daniel Iozsa, directorul Departamentului Autovehicule Rutiere din cadrul Facultății de Transporturi, pentru sprijinul științific acordat în perioada finalizării lucrării de doctorat și pe parcursul anilor de studiu în cadrul Școlii Doctorale.

Totodată, doresc să adresez mulțumiri Școlii Doctorale Transporturi pentru sprijinul și suportul științific oferite pe întreaga perioadă de elaborare a tezei de doctorat.

De asemenea, adresez mulțumiri tuturor cadrelor didactice din cadrul Departamentului Autovehicule Rutiere pentru contribuția lor la formarea mea profesională.

În final, doresc să mulțumesc familiei mele pentru susținerea permanentă, în mod special tatălui meu, pentru sprijinul, încurajarea și încrederea acordate de-a lungul întregului parcurs academic.

Cuprins

CAPITOLUL 1 SIGURANȚA ACTIVĂ ȘI SIGURANȚA PASIVĂ A AUTOCAMIOANELOR.....	6
CAPITOLUL 2 REGLEMENTĂRI PRINCIPALE CARE DEFINESC CERINȚELE DE SECURITATE PASIVĂ ȘI ACTIVĂ A CAROSERIEI DE AUTOCAMION	8
CAPITOLUL 3 STADIUL ACTUAL AL CONSTRUCȚIILOR STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A CABINEI DE AUTOCAMION.....	12
CAPITOLUL 4 MODELE MATEMATICE PENTRU STUDIUL TEORETIC AL COLIZIUNII AUTOCAMIOANELOR.....	21
CAPITOLUL 5 VALIDAREA EXPERIMENTALĂ ȘI NUMERICĂ A IMPACTULUI FRONTAL AL CABINEI DE AUTOCAMION.....	23
CAPITOLUL 6 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR	29
Bibliografie	33

CAPITOLUL 1

SIGURANȚA ACTIVĂ ȘI SIGURANȚA PASIVĂ A AUTOCAMIOANELOR

Capitolul analizează în mod integrat siguranța autovehiculelor, cu accent pe autocamioane (categoriile N2 și N3), abordând atât dimensiunea preventivă (siguranța activă), cât și cea de protecție în cazul impactului (siguranța pasivă), în corelație cu dinamica accidentelor rutiere și cu particularitățile constructive ale vehiculelor comerciale grele.

Siguranța rutieră este tratată ca un sistem complex „vehicul–șofer–mediu”, în care performanța globală depinde de interacțiunea dintre caracteristicile tehnice ale vehiculului, comportamentul conducătorului auto, infrastructura rutieră și ceilalți participanți la trafic. În cazul autocamioanelor, acest sistem prezintă particularități semnificative generate de masa ridicată, inerția mare, distribuția variabilă a sarcinii și configurațiile articulate, ceea ce implică cerințe distincte de proiectare față de vehiculele din categoria M1 [7].

Analiza statistică a accidentelor rutiere la nivel global, european și național evidențiază o tendință generală de scădere a mortalității rutiere în ultimele decenii, de la aproximativ 1,25 milioane de decese în 2010 la 1,19 milioane în 2021 [22]. La nivelul Uniunii Europene, în anul 2023 au fost înregistrate aproximativ 20.384 de decese, cu diferențe semnificative între state, România menținând cea mai ridicată rată a mortalității rutiere (81 decese/milion locuitori) [72][73][74]. Conform celor mai recente date europene, în anul 2023, aproximativ 13% din totalul deceselor rutiere din UE au avut loc în accidente care au implicat autocamioane, confirmând impactul disproporționat al acestora asupra severității accidentelor. [77].

Distribuția victimelor indică faptul că majoritatea deceselor în accidente cu autocamioane apar în rândul ocupanților altor vehicule sau al utilizatorilor vulnerabili (pietoni, bicicliști), în timp ce ocupanții autocamioanelor reprezintă o pondere relativ redusă, dar relevantă [73][77]. Analiza tipologiilor de accidente, conform studiului ETAC, arată că aproximativ 85,2% dintre accidente sunt cauzate de eroarea umană, iar configurațiile dominante includ intersecțiile, coliziunile în trafic dens și părăsirea benzii de circulație [38][42].

Conceptul de siguranță a autovehiculelor este structurat în două componente principale: siguranța activă, care vizează prevenirea accidentelor, și siguranța pasivă, care are rolul de a reduce severitatea consecințelor acestora [12]. Evoluția tehnologică evidențiază o tranziție de la abordarea reactivă (siguranță pasivă) către una preventivă (siguranță activă), susținută de dezvoltarea sistemelor electronice și a tehnologiilor inteligente [45].

Siguranța activă a autocamioanelor include sisteme precum ABS, EBD, ESC, AEBS, ACC, LDW sau sisteme avansate de percepție și automatizare, care intervin în faza pre-coliziune și în faza de urgență pentru menținerea controlului și evitarea impactului. Datorită masei mari și distanțelor de frânare extinse, aceste sisteme au un rol esențial în reducerea riscului de accident. Sistemele moderne, precum AEBS, sunt reglementate prin standarde UNECE (ex. UN-R131) și pot reduce semnificativ viteza de impact, însă prezintă limitări legate de percepția mediului, interpretarea traiectoriilor și timpul redus de reacție (TTC) [54][55].

În scenariile care implică utilizatori vulnerabili ai drumului (VRU), performanța sistemelor AEBS este limitată, evitarea completă a coliziunii fiind posibilă doar la viteze reduse (≈ 20 km/h), ceea ce evidențiază necesitatea integrării cu tehnologii suplimentare (fuziune multisenzorială, C-ITS, V2X) [54]. Sistemele cooperative inteligente de transport (C-ITS) extind capacitatea de percepție dincolo de linia vizuală directă, permițând schimbul de informații între vehicule și infrastructură și contribuind la creșterea siguranței active [14][40].

Un rol esențial în siguranța activă îl are și ergonomia cabinei, care influențează capacitatea conducătorului auto de a percepe informațiile și de a reacționa în timp util. Factori precum poziția de conducere, vizibilitatea, accesibilitatea comenzilor și confortul (vibrațional, acustic, termic) contribuie direct la reducerea oboselii și la creșterea performanței cognitive [60][65].

Siguranța pasivă a autocamioanelor este orientată în principal către menținerea integrității cabinei și a spațiului de supraviețuire, datorită limitărilor structurale privind deformarea controlată. Spre deosebire de autoturisme, protecția ocupanților se bazează pe rezistența structurală a cabinei, sistemele de reținere și compatibilitatea cu ceilalți participanți la trafic [1][3]. Reglementările UNECE R29 definesc cerințele privind rezistența cabinei la impact frontal, lateral și la răsturnare.

Sistemele de reținere, precum centurile de siguranță cu pretensionare și airbagurile, contribuie la reducerea solicitărilor biomecanice asupra ocupanților, fiind integrate într-un sistem coordonat de protecție [4][19]. Coloana de direcție deformabilă reprezintă un element important pentru absorbția energiei și limitarea forțelor transmise conducătorului auto [43].

Pentru protecția participanților externi, sunt implementate soluții precum dispozitivele de protecție la pătrundere sub vehicul (FUPD – UNECE R93), protecțiile laterale (UNECE R73) și cerințele privind geometria suprafețelor exterioare (Directiva 92/114/CEE), menite să reducă severitatea leziunilor în cazul impactului cu pietoni sau vehicule mai ușoare [27][47].

În completare, sistemele de siguranță pre-coliziune integrează funcții active și pasive, precum frânarea automată, pretensionarea centurilor și ajustarea poziției ocupanților, contribuind la reducerea energiei impactului și la pregătirea ocupanților pentru coliziune. Conceptul de integrare activ-pasiv (APIA) reprezintă direcția actuală de dezvoltare, bazată pe corelarea sistemelor de prevenire și protecție pentru o reacție optimă în toate fazele accidentului [84][30].

În concluzie, capitolul evidențiază necesitatea unei abordări integrate a siguranței autocamioanelor, în care sistemele active, pasive și pre-coliziune sunt dezvoltate complementar. Datorită caracteristicilor specifice vehiculelor comerciale grele, progresul în siguranță depinde nu doar de performanța individuală a sistemelor, ci de integrarea acestora într-un sistem coerent, capabil să intervină eficient în toate etapele producerii accidentului.

CAPITOLUL 2

REGLEMENTĂRI PRINCIPALE CARE DEFINESC CERINȚELE DE SECURITATE PASIVĂ ȘI ACTIVĂ A CAROSERIEI DE AUTOCAMION

Capitolul analizează principalele reglementări care stabilesc cerințele de securitate activă și pasivă aplicabile autocamioanelor, cu accent pe normele referitoare la integritatea structurală a cabinei. În prima parte sunt prezentate reglementările generale utilizate în procesul de omologare al autocamioanelor, iar în partea a doua sunt analizate standardele și procedurile de încercare care definesc rezistența structurală a cabinei, în special Regulamentul ONU ECE R29, standardele SAE J2420 și SAE J2422, precum și Testul suedez VVFS 2003:29 [17][13].

Siguranța autocamioanelor este reglementată la nivel internațional printr-un sistem complex de norme tehnice și standarde care stabilesc cerințele minime privind performanța structurală, echipamentele obligatorii și comportarea vehiculului în exploatare normală și în situații de impact. Aceste reglementări vizează atât siguranța activă, prin sisteme de control, frânare, direcție, vizibilitate și semnalizare, cât și siguranța pasivă, prin măsuri destinate limitării consecințelor accidentelor și menținerii integrității structurale a cabinei [17]. La nivel european, cadrul general de omologare este definit în principal prin Regulamentul (UE) 2019/2144, în corelare cu Regulamentul (UE) 2018/858, care stabilesc cerințele tehnice și administrative aplicabile vehiculelor, sistemelor și componentelor introduse pe piața Uniunii Europene, în vederea asigurării unui nivel ridicat de siguranță rutieră și de protecție a mediului [17].

Reglementări pentru vehicule destinate transportului de mărfuri



3. Echipamente de iluminare

21. Catadioptri (dispozitive retroreflectorizante) ECE R3

22. Lămpi de poziție laterale, spate și stop ECE R7

23. Lămpi indicatoare de direcție ECE R6

24. Lampă pentru iluminarea plăcuței de înmatriculare spate ECE R4

25. Faruri ECE R31

26. Proiectoare de ceață față ECE R19

28. Proiectoare de ceață spate ECE R38

29. Lămpi de mers înapoi ECE R23

30. Lămpi de poziție (parcare) ECE R77

4. Reglementări de mediu

1. Nivel de zgomot – ECE R51, 70/157/EEC

2. Emisii poluante – EC 595/2009

1. Siguranță activă

5. Echipament de direcție ECE R79

7. Dispozitiv de avertizare sonoră ECE R28

8. Vizibilitate indirectă (oglinzi/sisteme de vizualizare) ECE R46

9. Sistem de frânare ECE R13

13. Dispozitive antifurt ECE R18

17A. Acces în vehicul și marșarier EU 130/2012

17B. Vitezometru ECE R39

20. Instalare echipamente de iluminare ECE R48

33. Identificarea comenzilor și marilor de bord ECE R121

46. Anvelope EU 458/2011

2. Siguranță pasivă

3. Rezervor de combustibil ECE R34

6A. Acces în vehicul EU 130/2012

6B. Încuietori și sisteme de blocare a ușilor ECE R11

15. Rezistența scaunelor ECE R17

19. Puncte de ancorare pentru centurile de siguranță ECE R14

31. Centuri de siguranță ECE R16

42. Protecție laterală ECE R73

43. Dispozitive de reducere a pulverizării apei EU 109/2011

45. Geamuri de siguranță ECE R43

47. Limitatoare de viteză ECE R39

57. Protecție frontală inferioară ECE R93

49. Protecție exterioră ECE R61

5. Alte reglementări

27. Dispozitive de tractare (cârlige de remorcă) EU 1005/2010

10. Compatibilitate electromagnetică ECE R10

4. Plăcuță de înmatriculare spate EU 1003/2010

18. Plăcuțe și marcare obligatorii EU 19/2011

36. Sisteme de încălzire ECE R122

48. Mase și dimensiuni EU 1230/2012

50. Dispozitive de cuplare ECE R55

56. ADR (transport mărfuri periculoase) ECE R105

Figura 2.1 Reglementări pentru vehicule destinate transportului de mărfuri [120].

În cadrul reglementărilor generale, cerințele aplicabile autocamioanelor sunt structurate pe categorii. În domeniul siguranței active sunt incluse reglementările privind sistemele de direcție (ECE R79), frânare (ECE R13), avertizare sonoră (ECE R28), vizibilitate indirectă (ECE R46), echipamente de iluminare (ECE R48), identificarea comenzilor și martorilor de bord (ECE R121), vitezometrul (ECE R39), anvelopele (EU 458/2011), dispozitivele antifurt (ECE R18) și accesul în vehicul (EU 130/2012) [17][120]. În domeniul siguranței pasive sunt prevăzute norme referitoare la rezervoarele de combustibil (ECE R34), încuietorile și sistemele de blocare ale ușilor (ECE R11), rezistența scaunelor (ECE R17), ancorajele centurilor de siguranță (ECE R14), centurile de siguranță (ECE R16), protecția laterală (ECE R73), protecția frontală inferioară (ECE R93), protecția exterioară (ECE R61), geamurile de siguranță (ECE R43) și dispozitivele de limitare a vitezei, precum în figura nr. 2.1 [17][12][120]. Capitolul evidențiază că, deși cadrul general de omologare include numeroase cerințe funcționale, rezistența structurală a cabinei este reglementată distinct prin Regulamentul ONU ECE R29 [17][12][120].

Evoluția standardelor privind structura de rezistență a cabinelor de autocamion este prezentată în raport cu dezvoltarea conceptului de spațiu de supraviețuire. Primul test de rezistență a cabinei a fost introdus în 1959 de Volvo și consta într-un impact frontal cu un pendul solid de o tonă, având ca scop verificarea păstrării spațiului de supraviețuire în cazul răsturnării. Fundamentul conceptual al acestei abordări este asociat cercetărilor lui Hugh DeHaven, care a formulat principiul existenței unui volum protector în jurul ocupantului, în care forțele de impact sunt disipate prin deformarea controlată a zonelor înconjurătoare [31]. În 1969, Franchini a subliniat importanța menținerii unui spațiu rezidual de 74,9 cm deasupra punctului H al ocupantului, pentru toate tipurile de coliziuni, inclusiv în cazul autocamioanelor [34].

Un moment decisiv în standardizarea rezistenței cabinelor l-a reprezentat introducerea, în 1974, a Regulamentului ONU ECE R29, care a stabilit primele dispoziții uniforme privind protecția ocupanților cabinei autocamioanelor. Acest regulament a introdus trei încercări principale: impact frontal, rezistența acoperișului și rezistența peretelui posterior, având ca obiectiv menținerea unui spațiu de supraviețuire adecvat în urma unor solicitări mecanice severe [13][34].

În anii 1990, sub coordonarea programului de cercetare SAE, a fost dezvoltat un cadru de analiză mai avansat pentru siguranța structurală a cabinelor. Prima etapă a acestui program a vizat statistica accidentelor, reconstrucția evenimentelor și simularea dinamicii ocupanților, iar etapa a doua s-a concentrat pe simularea răsturnării dinamice la 180° și pe deformarea statică a plafonului. În urma acestor cercetări au fost identificate trei elemente esențiale pentru protecția ocupanților: integritatea structurală a cabinei, spațiul de supraviețuire disponibil și performanța sistemelor de retenție [13]. Etapa a treia a condus la elaborarea unor proceduri de testare pentru evaluarea sistemelor de reținere, a impactului ocupanților cu interiorul cabinei și a rezistenței structurale a cabinei. Rezultatul principal al acestor cercetări a fost publicarea recomandărilor SAE J2420 și SAE J2422 în anul 1998 [13].

În continuare, capitolul prezintă contribuția grupului de lucru constituit în cadrul OICA în jurul anului 2000, cu scopul armonizării standardelor structurale pentru cabinele de autocamion.

Analiza realizată de acest grup a condus la concluzia că scenariile relevante pentru evaluarea rezistenței structurale sunt coliziunile frontale, răsturnările la 90° cu impacturi ulterioare și răsturnările la 180° [13][32]. În acest context, s-a considerat că metoda cu pendul utilizată în ECE R29 este o soluție practică pentru evaluarea rezistenței frontale, iar scenariul de răsturnare la 180° este acoperit adecvat de standardul SAE J2422 [13].

Regulamentul ONU ECE R29 este prezentat în capitol ca principalul document normativ pentru evaluarea protecției ocupanților cabinei vehiculelor din categoria N. Prima versiune, publicată în 1974, a reprezentat prima standardizare internațională a testelor de rezistență a cabinei, incluzând încercările de impact frontal, rezistență a acoperișului și rezistență a peretelui din spate [34]. Ulterior, regulamentul a fost actualizat prin seria 02 de amendamente, intrată în vigoare în 2002, care a preluat elemente din testul suedez și a definit trei teste structurale: Testul A – impact frontal, Testul B – rezistența plafonului și Testul C – rezistența peretelui posterior [34][56]. Capitolul arată însă că, pe baza literaturii tehnice și a documentelor GRSP, testul C și-a pierdut treptat relevanța în configurațiile moderne, datorită separării structurale dintre cabină și compartimentul de marfă, normelor stricte privind fixarea încărcăturii și incidenței reduse a pătrunderii acesteia în cabină.

Seria 03 de amendamente, intrată în vigoare în 2011, a adus modificări semnificative, printre care introducerea unui test suplimentar de solicitare laterală a plafonului și creșterea energiei de impact pentru încercarea frontală A, de la 44,1 kJ la 55 kJ pentru vehiculele cu masa totală maximă autorizată de peste 7,5 t [34]. Aceste modificări urmăresc reproducerea mai fidelă a scenariilor reale de răsturnare și impact. Conform ECE R29.03, vehiculele N1 și N2 cu masa totală maximă autorizată de cel mult 7,5 t trebuie supuse încercărilor A și C, iar vehiculele N3 și N2 cu masa totală de peste 7,5 t trebuie supuse încercărilor A, B și C [35].

Testul A, de impact frontal, se realizează cu un impactor rigid din oțel, cu masă de minimum 1.500 kg și cu o suprafață de impact plană dreptunghiulară. Energia de impact este de 29,4 kJ pentru vehiculele N1 și N2 $\leq 7,5$ t și de 55 kJ pentru vehiculele N3 și N2 $> 7,5$ t [35]. Testul B, obligatoriu pentru vehiculele N3 și N2 $> 7,5$ t, utilizează un impactor cilindric rigid, cu masă de minimum 1.000 kg, aplicat asupra montanților frontali cu o energie de 29,4 kJ [35]. Testul C este definit în forma actuală ca încercare de rezistență a plafonului și include, pentru vehiculele N2 $> 7,5$ t și N3, o preîncărcare dinamică laterală urmată de o sarcină statică aplicată pe acoperiș, fără depășirea valorii de 98 kN [35].

Capitolul analizează apoi Testul suedez VVFS 2003:29, prezentat ca primul test elaborat special pentru evaluarea rezistenței cabinelor de autocamion și ca bază pentru dezvoltările ulterioare la nivel internațional [36]. Acesta presupune trei încercări succesive aplicate pe aceeași cabină: o încărcare verticală statică a plafonului, un impact frontal cu pendul asupra stâlpului A și un impact posterior cu pendul asupra peretelui din spate [34][36]. Sarcina verticală aplicată la testul de plafon este de până la 147 kN [36], iar impacturile frontal și posterior sunt realizate cu pendule de 1.000–1.500 kg, având o energie de impact de 29,4 kJ [36]. Capitolul subliniază că direcția oblică a impactului asupra montantului A, la 15° față de axa longitudinală a vehiculului, face ca testul suedez să fie mai sever decât o încărcare frontală directă, în special în ceea ce

privește menținerea ușii în poziție închisă [17][36]. Totodată, prin utilizarea unor impactori mai concentrați și a unor suprafețe de contact mai reduse, testul suedez produce deformări locale mai severe decât ECE R29.03, pentru aceeași energie totală [17][36].

În ceea ce privește standardele SAE, capitolul evidențiază rolul SAE J2420 și SAE J2422 în dezvoltarea metodelor moderne de evaluare a cabinelor. SAE J2420 se referă la evaluarea dinamică a rezistenței frontale pentru cabinele de tip COE și a fost elaborat pentru autocamioanele cu zonă frontală redusă de deformare [32]. Testul constă în lovirea cabinei montate pe șasiu cu o placă rigidă care simulează partea din spate a unei remorci de autocamion greu, cu o energie minimă de [32]. Revizia din 2003 a completat procedura inițială prin introducerea condițiilor de încărcare și a criteriilor de trecere/respingere preluate din Regulamentul ECE 29 [32].

SAE J2422 definește o procedură pentru evaluarea rezistenței plafonului cabinei printr-o încărcare aproximativ-statică, destinată simulării unei răsturnări la 180°. Procedura include două faze: o preîncărcare dinamică laterală la un unghi de 20° și o încărcare cvasi-statică a plafonului [32]. Energia recomandată pentru preîncărcarea dinamică este de maximum 17.625,6 J, iar sarcina aplicată pe plafon trebuie să fie echivalentă cu capacitatea maximă admisă a punții față, fără a depăși 98,07 kN [32]. Capitolul arată că elemente din această procedură au fost ulterior preluate în amendamentele aduse Regulamentului ECE R29 în anul 2011 [32].

În concluzie, capitolul evidențiază faptul că siguranța activă și pasivă a autocamioanelor este reglementată printr-un ansamblu complex de norme tehnice, însă integritatea structurală a cabinei este tratată distinct prin standarde și reglementări specifice. Evoluția de la primele teste de rezistență până la formele actuale ale ECE R29, VVFS 2003:29, SAE J2420 și SAE J2422 arată o maturizare progresivă a criteriilor de evaluare și o orientare către scenarii de accident mai relevante din punct de vedere structural. Dintre acestea, Regulamentul ONU ECE R29 reprezintă referința principală pentru evaluarea rezistenței cabinei, în timp ce testul suedez și standardele SAE au avut un rol important în dezvoltarea și consolidarea cerințelor moderne privind menținerea spațiului de supraviețuire al ocupanților [13][17][32][34][36].

CAPITOLUL 3

STADIUL ACTUAL AL CONSTRUCȚIILOR STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A CABINEI DE AUTOCAMION

Capitolul analizează stadiul actual al construcțiilor caroseriei și al structurii de rezistență a cabinei de autocamion, cu accent pe forma constructivă a caroseriei, evoluția arhitecturii autocamioanelor, clasificarea cabinelor și cadrul general de reglementare aplicabil proiectării capului tractor. De asemenea, sunt prezentate structura de rezistență a cabinei, componentele structurale principale, soluțiile constructive pentru podea, pereți și acoperiș, precum și direcțiile actuale privind materialele utilizate și reducerea masei structurale.

Autocamioanele sunt definite ca autovehicule destinate transportului de mărfuri, caracterizate prin mase totale maxime ridicate și capacități mari de încărcare. Din punct de vedere constructiv, acestea sunt alcătuite, în majoritatea cazurilor, dintr-un șasiu portant separat, pe care sunt montate cabina conducătorului auto și suprastructura destinată transportului încărcăturii [1][3][27][88]. Această arhitectură modulară permite adaptarea vehiculului la diverse misiuni de transport și influențează direct cerințele constructive, dimensionale și funcționale impuse cabinei [1][3].

Capitolul evidențiază faptul că autocamioanele moderne sunt proiectate în principal pentru maximizarea sarcinii utile și/sau a volumului de marfă transportat, aceste obiective fiind esențiale din punct de vedere economic. Totodată, reglementările Uniunii Europene privind masele și dimensiunile maxime admise limitează flexibilitatea de proiectare, inclusiv în ceea ce privește integrarea unor soluții suplimentare pentru siguranță sau aerodinamică [1][27]. În acest context, dezvoltarea cabinei presupune un compromis între cerințele de utilitate, performanțele aerodinamice și nivelul de siguranță pasivă. Optimizarea siguranței impune structuri capabile să absoarbă eficient energia de impact și să limiteze intruziunea în spațiul ocupanților, fără a crește semnificativ masa proprie a vehiculului, ceea ce justifică adoptarea strategiilor de proiectare ușoară și a utilizării materialelor avansate [1][56].

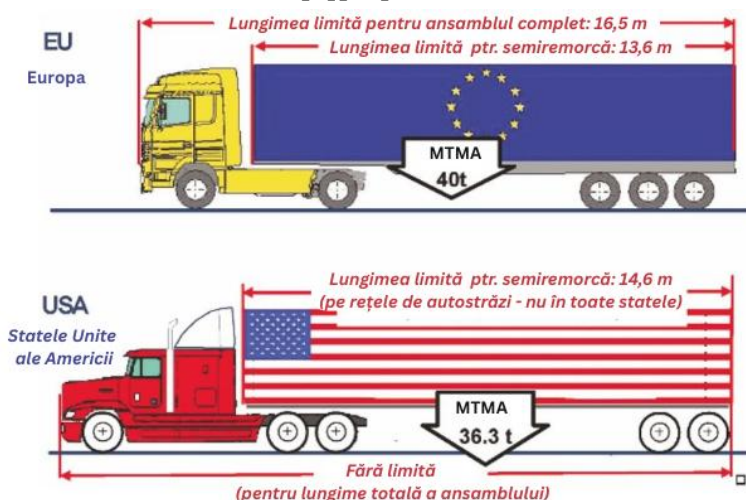


Figura nr.3.1 Comparație între limitările legale privind lungimea semiremorcii și a ansamblului complet în Uniunea Europeană și Statele Unite [20].

Din punct de vedere legislativ, capitolul arată că în Uniunea Europeană dimensiunile și masele maxime ale vehiculelor utilitare sunt stabilite prin Directiva 96/53/CE. Sunt precizate limitele de lățime, înălțime, lungime și masă totală maximă autorizată pentru vehiculele simple și pentru ansamblurile articulate, precum și încărcările maxime admise pe axe (figura nr. 3.1)[20][58]. Sunt evidențiate și diferențele față de legislația din Statele Unite, unde nu există o limitare strictă a lungimii totale a vehiculului, ci doar a lungimii spațiului de încărcare, ceea ce explică diferențele semnificative de arhitectură dintre autocamioanele europene și cele nord-americane [20][58].

Totodată, sunt prezentate principalele tipuri de sarcini de transport și categoriile de vehicule utilizate pentru acestea: autoutilitare, autocamioane, capete tractor, semiremorci și remorci, precum și suprastructuri specifice. Capitolul subliniază că diversitatea misiunilor de transport conduce la cerințe funcționale diferite pentru proiectarea cabinei, cu impact asupra configurației constructive, masei proprii, ergonomiei, nivelului de confort și siguranței conducătorului auto [16][58][61].

În ceea ce privește forma constructivă a caroseriei autocamioanelor, se arată că elementul structural de bază al capului tractor este șasiul, pe care sunt montate toate celelalte componente ale vehiculului, inclusiv cabina, grupul motopropulsor, suspensia, direcția și frânele [27]. Cabina este realizată ca structură autoportantă, cu rol de protecție a ocupanților și de asigurare a unui spațiu de supraviețuire adecvat în caz de accident, iar sistemele de fixare și susținere sunt proiectate pentru a prelua și disipa energia de impact [1][27]. Se precizează că vehiculele utilitare moderne trebuie să răspundă simultan unor cerințe privind siguranța activă și pasivă, disponibilitatea și eficiența economică, fiabilitatea, competitivitatea și protecția infrastructurii și a încărcăturii [61].

Capitolul tratează și influența semiremorcii asupra formei constructive a ansamblului rutier. Sunt comparate semiremorciile convenționale cu cele optimizate aerodinamic, arătându-se că utilizarea carenajelor laterale și a altor elemente de ghidare a fluxului de aer reduce rezistența aerodinamică și contribuie la scăderea consumului de combustibil. Această optimizare influențează inclusiv forma și dimensiunile cabinei, mai ales în zona frontală și în zona de tranziție cabină-semiremorcă [27].

Un subcapitol distinct este dedicat evoluției istorice a arhitecturii autocamioanelor. Se arată că dezvoltarea configurațiilor actuale de cabină este rezultatul interacțiunii dintre cerințele de transport, constrângerile legislative și progresul tehnologic al șasiului și grupului motopropulsor. Reducerea lungimii maxime admise a ansamblurilor rutiere a condus la re poziționarea motorului sub cabină, la adoptarea configurației „cabina deasupra motorului”, la utilizarea motoarelor mai compacte, la trecerea de la ansambluri cu remorcă la configurații cap tractor-semiremorcă și la introducerea cabinei rabatabile [61]. În paralel, creșterea puterii specifice a motoarelor diesel și implementarea normelor de emisii au influențat suplimentar poziționarea motorului și dezvoltarea cabinei ca modul funcțional complex, integrând sisteme ergonomice, de protecție și telematice.

Clasificarea autocamioanelor după amplasarea grupului motopropulsor evidențiază două configurații constructive principale: vehicule cu motor frontal și capotă și vehicule cu cabină avansată, cu motorul amplasat sub cabină [1][60][58]. Pentru vehiculele convenționale, avantajele constau în accesul facil la motor, buna izolare fonică și termică și un nivel ridicat de confort, însă aceste avantaje sunt compensate de creșterea lungimii totale a vehiculului [60][61]. În schimb, configurația cu cabina deasupra motorului permite o utilizare mai eficientă a lungimii totale disponibile, o vizibilitate bună și o lungime utilă mai mare a șasiului, dar presupune o izolare fonică mai complexă și o cabină rabatabilă pentru acces la motor [1][60][58]. Capitolul arată că această configurație este dominantă în Europa, ca efect direct al restricțiilor legislative privind lungimea totală a vehiculului.

Cabinele sunt clasificate și în funcție de destinația de utilizare, fiind prezentate cabine scurte, cabine de zi și cabine cu spațiu de odihnă, respectiv variantele Sleeper Low, Sleeper Normal, Sleeper Highline și Sleeper Topline [1][58][27][63]. Această clasificare reflectă cerințele impuse de durata curselor, necesitatea utilizării cabinei ca spațiu de lucru și odihnă și nivelul de confort cerut în exploatarea pe distanțe lungi. Capitolul subliniază că majoritatea producătorilor utilizează platforme modulare de cabină, care permit dezvoltarea unor variante diferite de lungime, înălțime și lățime, cu un grad ridicat de standardizare a componentelor [65].

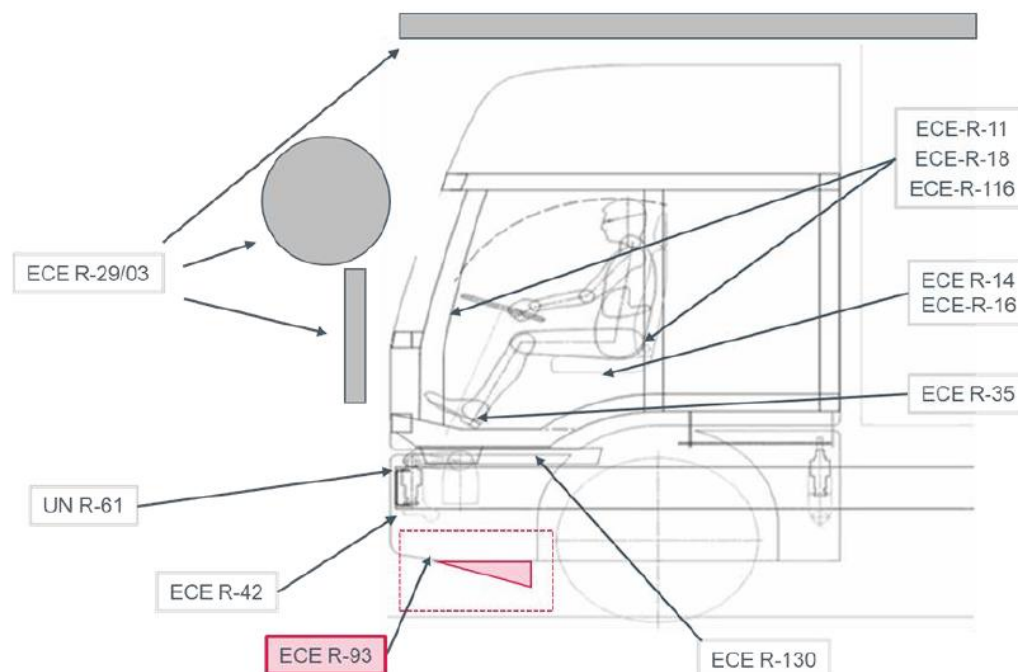


Figura 3.2 Sinteza a principalelor directive și regulamente care influențează proiectarea capului tractor și a cabinei [64].

Cadrul general de reglementare aplicabil proiectării capului tractor este prezentat sintetic, fiind evidențiate directivele și regulamentele europene care influențează siguranța pasivă, siguranța activă, dimensiunile și masele maxime admise, vizibilitatea, iluminarea, aerodinamica

și protecția mediului, precum în figura nr. 3.2[20][41][27][44][64]. Capitolul arată că arhitectura cabinei este influențată nu doar de cerințele privind integritatea structurală, ci și de un ansamblu larg de reglementări privind protecția laterală și frontală, vizibilitatea indirectă, sistemele de iluminare, dispozitivele de avertizare, masele și dimensiunile maxime admise și alte cerințe complementare [27][44]. Este menționată și modificarea legislativă privind dimensiunile cabinei, intrată în vigoare începând cu anul 2021, care permite creșterea dimensiunilor exterioare ale cabinei fără afectarea lungimii utile de încărcare, creând astfel posibilitatea îmbunătățirii aerodinamicii, siguranței la impact frontal și confortului interior [65].

În partea centrală a capitolului este analizată structura cabinei de autocamion, denumită body-in-white (BIW), definită ca structura portantă de bază a cabinei, pe care sunt montate ulterior elementele exterioare și componentele interioare [1][65][71]. Structura BIW asigură forma geometrică a cabinei, rigiditatea ansamblului și capacitatea de preluare a solicitărilor mecanice. Capitolul arată că această structură este concepută pe baza unui principiu modular, cu elemente fixe și elemente scalabile, ceea ce permite realizarea unei familii de cabine cu dimensiuni și mase diferite, păstrând aceeași arhitectură de bază. În cazul cabinelor cu lungimi diferite, partea frontală rămâne identică până la nivelul stâlpului B, ceea ce favorizează standardizarea și eficiența constructivă.

Din punct de vedere constructiv, structura cabinei este realizată integral din bare și plăci, în principal din componente ambutisate din tablă de oțel sau, în anumite aplicații, din aliaje de aluminiu, asamblate prin sudură [1]. Sunt prezentate principiile generale privind utilizarea profilelor longitudinale și transversale, a ranforsărilor locale și a diferitelor tipuri de secțiuni structurale, proiectarea urmărind obținerea unui compromis optim între masă proprie redusă și rigiditate structurală ridicată [1][59].

Capitolul detaliază apoi componentele structurale principale ale cabinei: podeaua, peretele frontal, pereții laterali, peretele spate și acoperișul [1]. Aceste elemente formează împreună structura portantă a cabinei și asigură rigiditatea globală, transferul controlat al sarcinilor și protecția ocupanților în diferite scenarii de solicitare.

Podeaua cabinei este prezentată ca principal element portant al structurii, prin intermediul căruia sarcinile sunt transferate către șasiu. Ea este realizată, de regulă, sub forma unei structuri ranforsate, alcătuită din lonjeroane longitudinale și traverse transversale, care asigură rigiditatea la încovoiere și torsiune [1]. Capitolul evidențiază rolul lonjeroanelor principale, al tunelului central și al lonjeroanelor secundare laterale, precum și relația dintre geometria podelei și tipul de cabină. Sunt prezentate și sistemele de prindere ale cabinei pe șasiu, cu accent pe montarea în patru puncte și pe mecanismul de rabatare, realizat prin articulații frontale, elemente elastice posterioare și sisteme hidraulice sau mecanico-elastice cu bară de torsiune [65][69][76]. De asemenea, sunt descrise tipurile constructive de podele: podea plană, podea cu tunel central și podea în trepte, precum și utilizarea podelelor ranforsate pentru aplicații speciale [1][64].

Peretele frontal este analizat ca o componentă structurală esențială în comportamentul cabinei la impact frontal. Acesta este conectat direct cu podeaua, stâlpii A și structura plafonului și are rol în rigidizarea zonei frontale, redistribuirea sarcinilor, integrarea coloanei de direcție, a

bordului și a pedalierului și în menținerea geometriei spațiului de supraviețuire [1][69]. Capitolul menționează că panourile peretelui frontal prezintă decupaje mari pentru acces la subansamblurile vehiculului și subliniază că această soluție reprezintă un compromis între cerințele structurale și cele funcționale.

Pereții laterali ai cabinei sunt prezentați ca elemente structurale esențiale pentru rigiditatea globală și pentru protecția ocupanților la impact lateral sau răsturnare. Aceștia includ stâlpii A, B și, după caz, C, care realizează legătura dintre podea și acoperiș [1]. Capitolul evidențiază rolul special al stâlpului A, care participă atât la rigidizarea zonei frontale, cât și la comportamentul cabinei la impact frontal localizat și la solicitările de răsturnare. Sunt descrise soluții constructive bazate pe ranforsări locale și pe structuri modulare ale stâlpului A, realizate din elemente distincte, proiectate pentru optimizarea comportamentului la impact și integrarea funcțională a componentelor cabinei [29][33].

Peretele spate este tratat ca element structural de închidere a cadrului cabinei și de contribuție la rigiditatea globală a ansamblului. Acesta realizează legătura dintre pereții laterali, podea și acoperiș și participă la preluarea solicitărilor mecanice din exploatarea normală și din situații de accident, inclusiv în cazul deplasării încărcăturii către cabină [1][60].

Acoperișul cabinei completează structura portantă și contribuie semnificativ la rigiditatea globală și la protecția ocupanților în cazul răsturnării. Structura sa este alcătuită din rama perimetrală și din cel puțin două elemente longitudinale de rigidizare, dispuse între rama frontală și cea posterioară [33][49]. Capitolul arată că poziționarea acestor elemente este corelată cu stâlpii structurali ai cabinei pentru crearea unor căi eficiente de transfer al sarcinilor. În funcție de destinația cabinei, acoperișul poate avea configurații joase sau înalte, adaptate cerințelor de ergonomie, volum interior, aerodinamică și funcționalitate, fără compromiterea rezistenței structurale [26].

Materiale utilizate în structura cabinei și direcții moderne de dezvoltare

Secțiunea dedicată materialelor evidențiază faptul că, pe lângă geometria și arhitectura structurală, alegerea materialelor reprezintă un factor determinant în proiectarea cabinei de autocamion. Structura cabinei este realizată dintr-o combinație de materiale metalice și nemetalice, selectate în funcție de cerințele privind rezistența structurală, rigiditatea, comportamentul la impact, durabilitatea și masa proprie. Alegerea materialelor influențează în mod direct comportamentul cabinei în condiții de solicitare statică, dinamică și de impact, precum și capacitatea de a satisface cerințele impuse de reglementările de siguranță, în special Regulamentul ONU ECE R29 [27][65].

Se evidențiază diferențe regionale în ceea ce privește utilizarea materialelor. În Europa, cabinele sunt realizate predominant din panouri din oțel sudate, datorită volumelor mari de producție și a tehnologiilor bine consolidate. În schimb, în Statele Unite, cabinele sunt frecvent realizate din aluminiu, fiind utilizate metode de îmbinare precum nituirea, înșurubarea și lipirea structurală [65]. Această diferență reflectă atât particularitățile pieței, cât și constrângerile legislative și economice.

Un concept central prezentat este cel de structură multimaterial, în care diferite tipuri de materiale sunt distribuite strategic în funcție de rolul structural al fiecărei zone. Astfel, oțelurile cu rezistență foarte ridicată (UHSS) sunt utilizate în zonele critice pentru siguranță, oțelurile de înaltă rezistență (AHSS) în zonele solicitate structural, iar oțelurile convenționale sau materialele compozite în zonele mai puțin solicitate. Această abordare permite optimizarea simultană a masei, rigidității și capacității de absorbție a energiei [71].

Evoluția materialelor structurale evidențiază tranziția de la utilizarea uniformă a oțelurilor convenționale către utilizarea oțelurilor avansate de înaltă rezistență (AHSS) și a oțelurilor cu rezistență foarte ridicată (UHSS). Aceste materiale oferă un compromis superior între rezistență, ductilitate și formabilitate, comparativ cu materialele tradiționale [64][71]. În mod particular, dezvoltarea noilor generații de AHSS a permis depășirea limitărilor clasice ale relației dintre rezistență și alungire, evidențiată prin diagrama globală de formabilitate (Global Formability Diagram), în care materialele moderne ocupă zone caracterizate simultan prin rezistență ridicată și ductilitate acceptabilă [104].

În contextul creșterii dimensiunilor și nivelului de confort al cabinelor moderne, reducerea masei structurale devine un obiectiv esențial. Utilizarea AHSS permite realizarea unor structuri mai ușoare, menținând în același timp compatibilitatea cu tehnologiile de fabricație existente și lanțurile de aprovizionare consacrate [64].

Secțiunea dedicată substituției materialelor evidențiază compromisul fundamental dintre reducerea masei și creșterea costurilor. Oțelul rămâne materialul dominant datorită costului redus, în timp ce aluminiul și materialele compozite, precum CFRP, oferă reduceri semnificative de masă, dar implică costuri mai ridicate de producție [27]. Se subliniază că, în practică, potențialul maxim de construcție ușoară nu poate fi exploatat complet, deoarece reducerea excesivă a masei conduce la creșteri disproporționate ale costurilor [108].

Analiza proprietăților materialelor evidențiază diferențe semnificative între oțel, aluminiu, magneziu și titan în ceea ce privește densitatea, modulul de elasticitate, rezistența mecanică și costul. Alegerea materialului trebuie realizată în funcție de aplicație, având în vedere cerințele privind rigiditatea, rezistența, tenacitatea și comportamentul la deformare [108]. Astfel, materialele cu densitate redusă sunt avantajoase pentru reducerea masei, însă trebuie să asigure simultan performanțe mecanice adecvate.

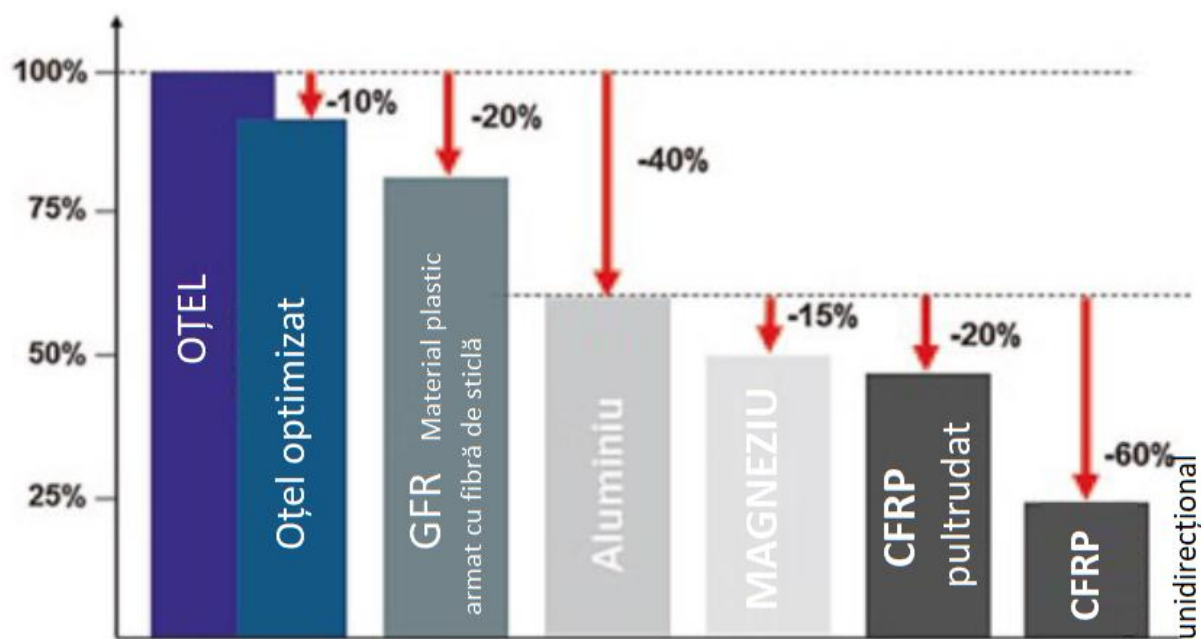


Figura 3.3 Potențialul de reducere a masei prin substituția materialelor structurale [107].

Un rol important îl au și tehnologiile de îmbinare și fabricație. Înlocuirea îmbinărilor mecanice tradiționale (șuruburi, nituri) cu tehnici moderne, precum lipirea structurală și sudarea laser, permite reducerea acumulărilor de material și îmbunătățirea rigidității și rezistența la oboseală, conform figurii 3.3 [105][106][107][108]. De asemenea, utilizarea tablelor cu grosime variabilă permite adaptarea locală a materialului în funcție de solicitări, contribuind la optimizarea structurală.

Din punct de vedere constructiv, sunt prezentate trei tipuri principale de structuri: construcția diferențială, construcția integrală și construcția integrată. Construcția diferențială oferă flexibilitate ridicată, dar implică un număr mare de îmbinări, în timp ce construcția integrală reduce numărul de componente, dar impune cerințe tehnologice ridicate. Construcția integrată reprezintă un compromis între cele două, fiind frecvent utilizată în aplicațiile moderne [106].

În cadrul construcțiilor ușoare multimaterial, sunt evidențiate soluții precum structurile sandwich, construcțiile fibră-metal și structurile hibride. Acestea oferă un raport favorabil între rigiditate și masă, însă utilizarea lor este limitată în prezent la aplicații speciale sau serii mici, din cauza costurilor ridicate [108].

Secțiunea dedicată direcțiilor de cercetare evidențiază tendința clară de reducere a masei structurii cabinei, prin utilizarea oțelurilor avansate, a optimizării geometrice și a conceptelor modulare. Studiile recente indică posibilitatea reducerii masei structurii BIW cu până la aproximativ 20–24%, fără compromiterea cerințelor structurale [33][64]. Analiza distribuției masei arată că cele mai grele componente sunt podeaua și pereții laterali, ceea ce indică potențialul de optimizare în aceste zone.

Reducerea masei este susținută și de soluții constructive precum:

- modularizarea structurii;
- utilizarea pieselor turnate din oțel cu pereți subțiri;
- utilizarea profilelor formate la cald din oțel aliat cu bor de tip 22MnB5;
- integrarea funcțională a componentelor.

Aceste soluții permit reducerea numărului de piese, creșterea rigidității și adaptarea locală a proprietăților mecanice [33][64].

O direcție inovatoare importantă este reprezentată de conceptele bio-inspirate și optimizarea topologică, care utilizează principii inspirate din structurile naturale pentru a obține un raport optim între masă și rezistență. Studiile realizate de EDAG Engineering GmbH demonstrează potențialul acestor metode, utilizând optimizarea topologică și fabricația generativă pentru dezvoltarea unor structuri de tip „os”, caracterizate prin distribuția eficientă a materialului în funcție de traseele de sarcină [109].

Procesul de dezvoltare implică:

- definirea spațiului de proiectare pe baza designului exterior;
- aplicarea optimizării topologice;
- conversia rezultatelor în modele CAD utilizabile;
- validarea structurală prin simulări FEM.

Structurile obținute sunt capabile să îndeplinească cerințele de rigiditate și siguranță, inclusiv cele impuse de Regulamentul ECE R29, menținând în același timp o masă redusă [109].

Analiza cazurilor de încărcare evidențiază importanța evaluării rigidității la torsiune și încovoiere, precum și a simulărilor de impact. Integrarea acestor analize încă din faza de concept permite optimizarea structurii înainte de fazele finale de proiectare [109].

Optimizarea topologică conduce la structuri cu distribuție eficientă a materialului, în care acesta este concentrat în zonele solicitate, iar regiunile redundante sunt eliminate. Conversia acestor structuri în modele CAD utilizabile reprezintă o etapă critică, realizată prin metode avansate precum suprafețele Poly-NURBS [109]. Un exemplu al distribuției eforturilor și al optimizării locale a grosimilor în cadrul unei structuri bio-inspirate este prezentat în figura 3.4.

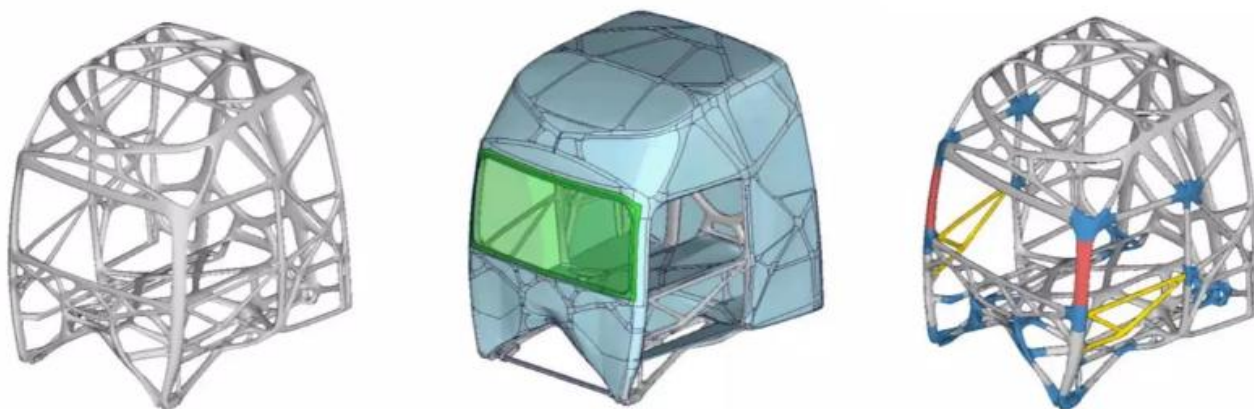


Figura 3.4 Distribuția eforturilor și optimizarea locală a grosimilor în structura bio-inspirată [109].

Etaplele finale includ ajustarea grosimilor și optimizarea locală a structurii, utilizând analize neliniare FEM. Această etapă permite rafinarea comportamentului structural și obținerea unui compromis optim între masă, rigiditate și siguranță.

În concluzie, direcțiile moderne de dezvoltare indică o tranziție către:

- structuri multimaterial optimizate;
- utilizarea oțelurilor avansate și a materialelor ușoare;
- integrarea tehnologiilor moderne de fabricație;
- utilizarea optimizării topologice și a designului bio-inspirat.

Aceste tendințe sunt confirmate și de numeroase concepte de autocamioane dezvoltate în ultimele decenii, care integrează soluții avansate de aerodinamică, construcție ușoară și siguranță. Evoluțiile recente sunt amplificate de electrificare, digitalizare și integrarea sistemelor inteligente, ceea ce conduce la o abordare de proiectare integrată, în care structura, materialele și sistemele vehiculului sunt dezvoltate simultan pentru a răspunde cerințelor de eficiență, siguranță și sustenabilitate [27].

CAPITOLUL 4

MODELE MATEMATICE PENTRU STUDIUL TEORETIC AL COLIZIUNII AUTOCAMIOANELOR

Capitolul 4 abordează modelarea matematică a fenomenelor de impact în cazul autocamioanelor, evidențiind evoluția de la metode experimentale tradiționale către utilizarea extensivă a instrumentelor analitice și numerice moderne. Dezvoltarea tehnologiilor de calcul a permis introducerea unor modele variate – de la modele simplificate masă–arc–amortizor până la analize complexe cu elemente finite – care permit evaluarea detaliată a comportării structurale a cabinei în condiții de impact, inclusiv conform cerințelor regulamentului ECE R29 [1][81][84].

În contextul siguranței pasive, structura cabinei este concepută astfel încât să funcționeze ca un sistem capabil să absoarbă și să disipe energia cinetică prin deformări controlate, menținând în același timp spațiul de supraviețuire al ocupanților. Analiza impactului se bazează pe principiile fundamentale ale mecanicii – conservarea masei, impulsului și energiei – iar alegerea modelului matematic depinde de nivelul de detaliu necesar și de faza de proiectare [84].

Capitolul prezintă o clasificare a principalelor tipuri de modele utilizate în analiza coliziunilor: modele cu parametri concentrați (LPM), modele cu elemente de grindă (BEM), modele hibride și modele bazate pe metoda elementelor finite (FEM). Modelele FEM permit o descriere detaliată a comportării neliniare a materialelor și a fenomenelor de plastificare și colaps structural, însă implică un cost computațional ridicat și sunt utilizate în special în etapele avansate de proiectare [8].

În vederea analizei preliminare, sunt utilizate frecvent modele simplificate de tip masă–arc–amortizor, care permit estimarea rapidă a răspunsului structural al cabinei. Aceste modele includ elemente elastice (arcuri) și disipative (amortizoare), configurate în scheme de tip Kelvin sau Maxwell, modelul Kelvin fiind preferat datorită simplității și eficienței sale computaționale [83].

Un model fundamental analizat este modelul uni-dimensional al impactului dintre un autocamion și o barieră rigidă. În acest caz, autocamionul este reprezentat printr-o masă concentrată, iar structura frontală deformabilă este modelată printr-un element elastic echivalent. Analiza energetică permite determinarea deformației maxime și a duratei impactului, evidențiind conversia energiei cinetice în energie de deformare structurală [2][10]. În acest context, sunt introduse relații analitice care descriu legătura dintre viteza de impact, rigiditatea structurală și deformația maximă, precum și ecuațiile diferențiale care guvernează mișcarea sistemului.

Capitolul integrează, de asemenea, concepte utilizate în reconstrucția accidentelor, precum modelul CRASH3, în care forța de impact este exprimată ca funcție de deformare și lățimea zonei de contact, prin intermediul coeficienților de rigiditate A și B. Aceste relații permit estimarea severității impactului pe baza deformării reziduale și sunt validate prin analize statistice ale testelor experimentale [110][113].

Pentru analiza coliziunii dintre două autocamioane, este introdus un model cu două grade de libertate, în care fiecare vehicul este reprezentat printr-o masă și un element elastic. Prin aplicarea formalismului lagrangian, sunt deduse ecuațiile de mișcare ale sistemului și sunt

determinate mărimi caracteristice precum deformația maximă, durata impactului și distribuția energiei între cele două structuri [84][10]. Modelul este extins ulterior prin introducerea amortizării, permițând o reprezentare mai realistă a disipării energiei în timpul impactului.

O contribuție originală importantă a acestui capitol constă în conceperea și dezvoltarea unui model matematic propriu de tip pendul pentru studiul impactului dintre elementul de lovire și structura cabinei de autocamion. În acest scop, analiza pornește de la formularea teoretică a pendulului simplu, prin definirea ecuației diferențiale a mișcării, utilizarea aproximației pentru oscilații mici și validarea numerică preliminară prin simulări MATLAB. Pe această bază, a fost elaborat un model matematic dedicat interacțiunii pendul–autocamion, în care zona de contact este reprezentată printr-un sistem echivalent arc–amortizor, iar ecuațiile de mișcare sunt formulate în cadrul formalismului lagrangian. Prin această abordare, modelul propus permite descrierea coerentă a transferului de energie, a deformării structurale și a răspunsului dinamic al cabinei în condițiile unui impact de tip pendul, reprezentând astfel un aport original la studiul teoretic al coliziunilor autocamioanelor [82][85].

Pe baza acestor concepte, este dezvoltat un model avansat de tip pendul elastic pentru analiza impactului frontal al autocamionului. Modelul descrie simultan deformarea frontală, rotația cabinei și efectele gravitaționale, utilizând o formulare neliniară a relației forță–deformație. Caracteristicile structurale sunt aproximată prin funcții liniare în trepte, iar parametrii modelului sunt determinați prin metode de optimizare numerică [100].

În continuare, capitolul prezintă utilizarea metodei elementelor finite pentru simularea impactului frontal și a răsturnării cabinei conform regulamentului ECE R29. Modelele numerice dezvoltate în ANSYS permit evaluarea distribuției deformațiilor, tensiunilor și energiei absorbite, evidențiind comportamentul neliniar al materialelor și identificarea zonelor critice de cedare [87][88].

Rezultatele simulărilor arată că structura cabinei este capabilă să absoarbă energia impactului și să mențină spațiul de supraviețuire al ocupanților, chiar și în condiții severe de încărcare. De asemenea, analizele comparative demonstrează influența configurației constructive asupra rigidității globale, evidențiind, de exemplu, contribuția ușilor la creșterea rigidității structurale și la reducerea deformațiilor [87].

În cazul testului de răsturnare, simulările indică faptul că optimizarea structurii cabinei conduce la reducerea tensiunilor și a deformațiilor plastice, precum și la îmbunătățirea comportării structurale în zona critică. Structura optimizată respectă cerințele regulamentului ECE R29, asigurând integritatea spațiului de supraviețuire și un nivel ridicat de siguranță pentru ocupanți [88].

În ansamblu, capitolul evidențiază faptul că modelarea matematică și simularea numerică reprezintă instrumente esențiale în proiectarea modernă a cabinelor de autocamion, permițând evaluarea și optimizarea comportării la impact încă din fazele incipiente de dezvoltare. Integrarea modelelor analitice simplificate cu simulările avansate oferă un cadru eficient pentru proiectarea unor structuri sigure, capabile să disipe energia impactului și să protejeze ocupanții în condiții reale de accident [84][87][88].

CAPITOLUL 5

VALIDAREA EXPERIMENTALĂ ȘI NUMERICĂ A IMPACTULUI FRONTAL AL CABINEI DE AUTOCAMION

Capitolul 5 prezintă o metodologie integrată experimental–numerică pentru evaluarea comportamentului la impact frontal al unei cabine reale de autocamion, având ca obiectiv validarea modelului numeric prin compararea directă a rezultatelor simulate cu cele obținute în încercarea experimentală la scară reală. Studiul este realizat pe o cabină Iveco Eurocargo 120E18, reprezentativă pentru vehiculele comerciale de tonaj mediu utilizate în transportul european de marfă, iar analiza urmărește capacitatea structurii de a absorbi energia de impact și de a limita intruziunea în spațiul de supraviețuire, în condiții conforme cu cerințele Regulamentului UNECE R29 și ale implementării suedeze VVFS 2003:29 [35][114][101].

O contribuție importantă a capitolului constă în reconstruirea geometrică fidelă a cabinei prin scanare 3D de înaltă rezoluție, utilizând sistemul portabil ZEISS T-SCAN hawk 2 [118]. Procesul de digitizare a fost realizat asupra cabinei în stare dezansamblată, pentru a asigura accesul direct la elementele structurale portante, fiind înregistrate atât suprafețele exterioare, cât și cele interioare relevante pentru transferul sarcinilor și distribuția rigidității structurale. În vederea creșterii acurateței reconstrucției, pe suprafața cabinei au fost aplicate ținte optice autocolante, utilizate pentru alinierea cadrelor succesive de scanare. Norul de puncte rezultat a fost post-procesat pentru asigurarea continuității suprafețelor, fiind ulterior utilizat pentru generarea unui model CAD dimensional consistent al structurii portante. În procesul de reconstrucție au fost păstrate toate elementele structurale principale, inclusiv montanții A, cadrul parbrizului, structura acoperișului, panourile laterale și ansamblurile podelei, în timp ce componentele nestructurale au fost eliminate, pentru a menține un compromis adecvat între fidelitatea geometrică și eficiența computațională, precum în figura 5.1 [101][118].

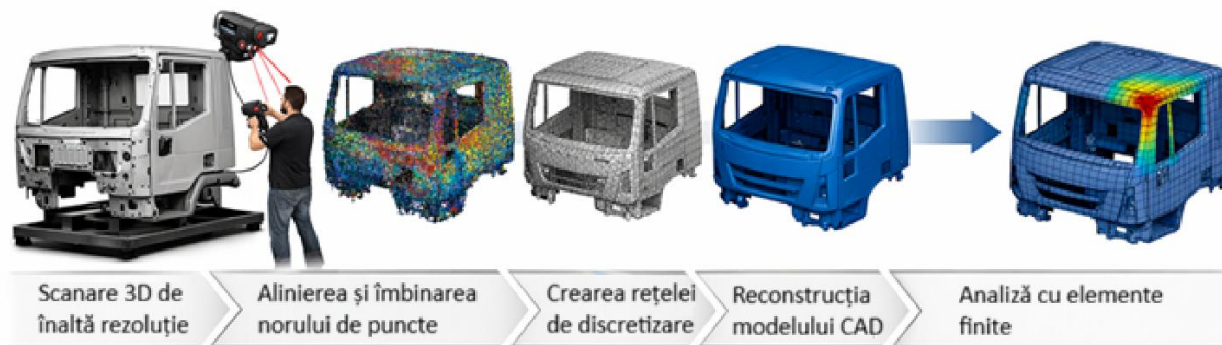


Figura 5.1 Fluxul de lucru pentru scanarea 3D și reconstrucția CAD [122].

Pe baza modelului CAD astfel obținut, a fost realizat un model numeric cu elemente finite în ANSYS Explicit Dynamics, utilizând o formulare explicit-dinamică adecvată fenomenelor tranzitorii puternic neliniare, caracteristice impactului cu pendul [35][114][52]. Structura cabinei a fost discretizată preponderent cu elemente de tip tablă, în concordanță cu practica consacrată în analiza crashworthiness a structurilor sudate din tablă subțire

[115][52][51]. Grosimile nominale atribuite elementelor au fost cuprinse între 1,5 mm și 2,0 mm, conform documentației tehnice a producătorului [101]. A fost adoptată o strategie de discretizare neuniformă, cu o dimensiune globală a elementului de aproximativ 15 mm în zonele necritice și cu rafinare locală până la 8–10 mm în regiunea de impact a montantului A, la îmbinările lonjeroanelor de acoperiș și în zona cadrului parbrizului, pentru surprinderea mecanismelor locale de flambaj și pliere progresivă [119][52]. Structura cabinei a fost considerată realizată din oțel structural de uz auto și a fost modelată utilizând o lege constitutivă elasto-plastică cu ecruisare izotropă. Comportamentul elastic a fost definit printr-un modul de elasticitate Young de 210 GPa și un coeficient Poisson de 0,3, în timp ce comportamentul plastic a fost caracterizat printr-o limită de curgere de 500 MPa și o rezistență maximă la tracțiune de aproximativ 620 MPa, valori corespunzătoare oțelurilor de înaltă rezistență utilizate la cabinele vehiculelor comerciale [116][68][52]. Pentru întregul model a fost adoptată o densitate a materialului de 7850 kg/m³. Pentru a lua în considerare caracterul dinamic al impactului, sensibilitatea materialului la viteza de deformare a fost introdusă prin modelul Cowper–Symonds [20][115][52][67].

Condițiile la limită ale modelului numeric au fost definite astfel încât să reproducă cât mai fidel configurația experimentală reglementată. Cabina a fost constrânsă în punctele de prindere pe șasiu prin blocarea tuturor gradelor de libertate, iar impactorul a fost modelat ca un corp cilindric rigid cu diametrul de 580 mm, lungimea de 1800 mm și masa de aproximativ 1000 kg, în concordanță cu reglementarea VVFS 2003:29 [35][114]. Acesta a fost constrâns să se deplaseze exclusiv pe direcția longitudinală a vehiculului și a primit o viteză inițială de aproximativ 7,7 m/s, corespunzătoare energiei de impact prescrise. Contactul dintre impactor și cabină a fost modelat printr-o formulare de tip penalizare între suprafețe, fără frecare, pentru a evita disiparea artificială a energiei [51]. Monitorizarea energiilor cinetică, internă, de contact și hourglass pe parcursul simulării a confirmat stabilitatea numerică a modelului, energia hourglass rămânând sub 5% din energia totală [51][23][25].

În paralel cu simularea numerică, a fost realizat un test experimental la scară reală asupra aceleiași cabine, în conformitate cu procedura suedeză VVFS 2003:29, aliniată cu cerințele UNECE R29 [35][114]. Cabina a fost montată pe șasiul propriu, iar vehiculul a fost ancorat prin cabluri dispuse simetric față de axa longitudinală, pentru limitarea deplasării globale în timpul impactului, fără a altera mecanismele reale de deformare structurală în zona montantului A. Pendulul utilizat a fost un cilindru rigid din oțel, cu aceleași caracteristici geometrice și de masă ca impactorul numeric, suspendat într-o configurație de oscilație liberă și aliniat cu regiunea superioară a montantului A. Lungimea brațului pendular a fost de aproximativ 7,5 m, iar pendulul a fost lansat de la o înălțime corespunzătoare energiei de impact necesare, rezultând o viteză de impact apropiată de 7,7 m/s.

Instrumentarea experimentală a fost intenționat limitată, în acord cu constrângerile practice și financiare ale încercării, fiind utilizate o cameră de mare viteză Dewesoft DS-CAM-320C și un accelerometru piezoelectric IEPE montat rigid pe impactor, conectat la modulul Dewesoft IOLITE-1xACC [117]. Camera de mare viteză a fost utilizată pentru urmărirea

cinematicii globale și a modurilor de deformare ale cabinei, iar semnalul de accelerație înregistrat a constituit baza pentru determinarea indirectă a mărimilor principale ale impactului. Pe baza accelerației măsurate $a(t)$, au fost determinate viteza pendulului $v(t)$, forța de impact $F(t)=m \cdot a(t)$, precum și energia absorbită, utilizând atât formularea bazată pe lucrul mecanic, cât și cea bazată pe variația energiei cinetice [117]. Înregistrările video de mare viteză au permis analiza cadru cu cadru a evoluției deformării și estimarea deplasărilor maxime și a deformațiilor reziduale ale montantului A, conform figurii 5.2.

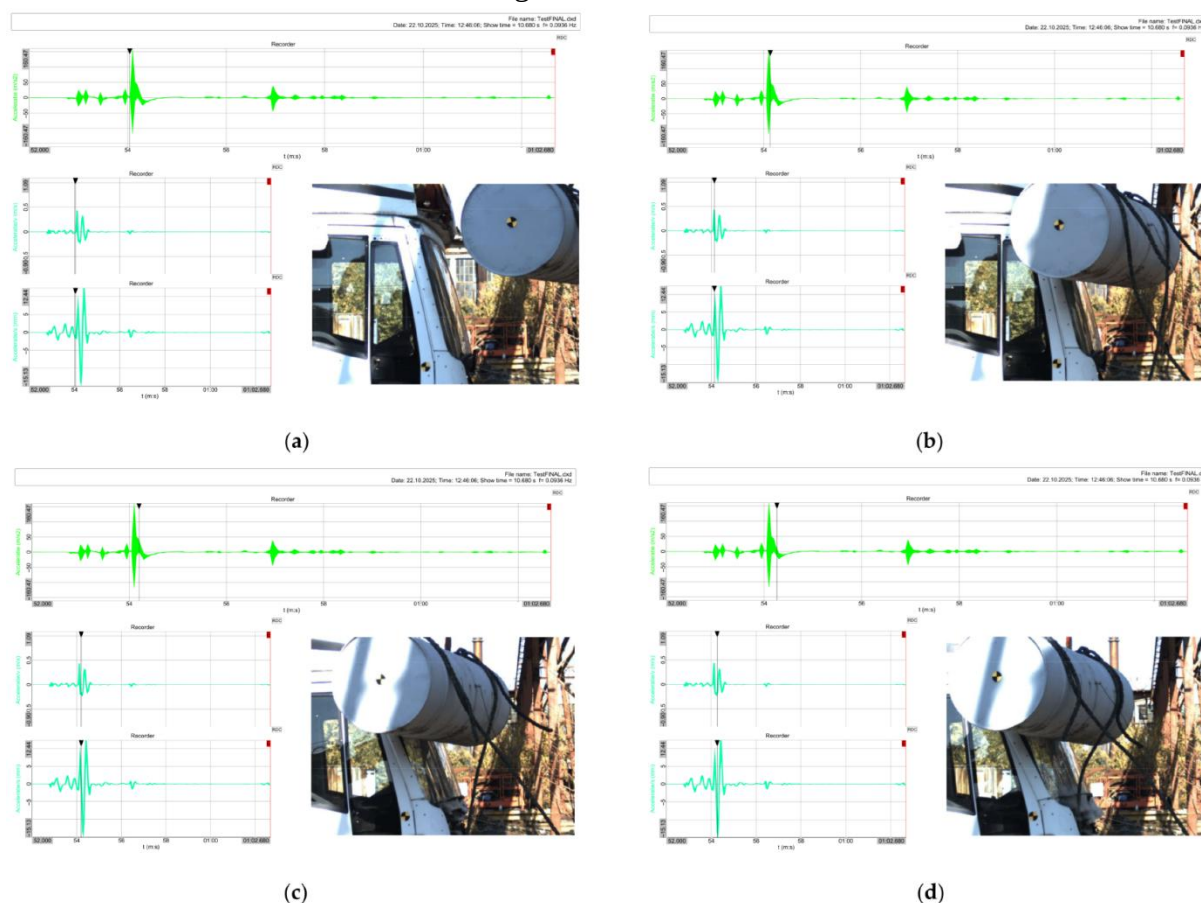


Figura 5.2. Secvență reprezentativă de imagini de mare viteză ilustrând evoluția deformării structurale în zona montantului A în timpul încercării de impact cu pendul, realizată conform VVFS 2003:29:(a) stadiul pre-impact;(b) inițierea contactului dintre pendul și montantul A;(c) atingerea deformării structurale maxime;(d) răspunsul structural în faza post-impact. [122]

Rezultatele numerice au arătat că deformarea plastică a fost inițiată în regiunea superioară a montantului A imediat după contact, urmată de flambaj local progresiv și de redistribuirea sarcinilor către cadrul parbrizului și lonjeronul de acoperiș. Nu au fost observate instabilități globale sau pierderea integrității structurale a cabinei pe durata simulării. Energia cinetică inițială a impactorului a fost convertită progresiv în energie internă a structurii, iar aproximativ 95% din energia inițială a fost absorbită de cabină. Deplasarea maximă a montantului A a fost atinsă la

circa 15–20 ms după contact, valoarea maximă fiind de aproximativ 67 mm, în timp ce deformarea reziduală a rămas în limitele spațiului de supraviețuire definit de regulament.

Rezultatele experimentale au evidențiat moduri de deformare similare cu cele obținute numeric, deformarea permanentă fiind localizată în principal în montantul A impactat și în regiunea adiacentă a lonjeronului de acoperiș. Analiza semnalului de accelerație a arătat că decelerația maximă a pendulului a fost înregistrată imediat după contactul inițial, urmată de o scădere progresivă pe măsură ce energia impactului a fost absorbită de structură. Analiza post-impact a confirmat că deformările structurale produse în urma impactului nu au condus la intruziunea în spațiul de supraviețuire al conducătorului auto, fiind menținută integritatea acestuia, conform evaluării prezentate în figura 5.3 [57][122].

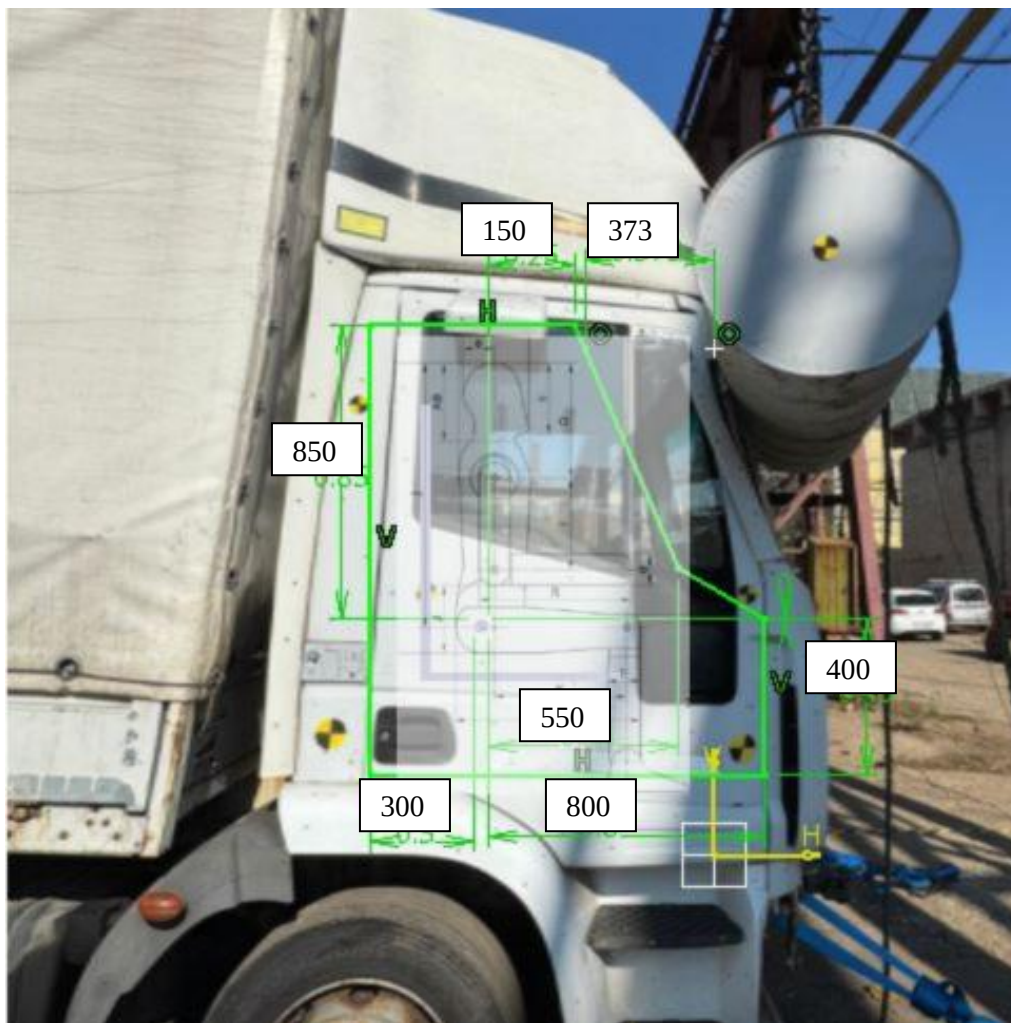


Figura 5.3 Reprezentarea geometrică a spațiului de supraviețuire și evaluarea intruziunii structurale a cabinei autocamionului după impactul experimental în montantul A; spațiul de supraviețuire a fost definit conform metodologiei din [57], evidențiindu-se menținerea integrității acestuia, cu o distanță minimă de 373 mm între elementele deformate ale structurii și limita volumului de protecție al ocupantului.

Comparația cantitativă dintre rezultatele experimentale și cele numerice a evidențiat o concordanță foarte bună. Parametrii de intrare ai impactului au fost aproape identici în cele două cazuri, masa pendulului și unghiul de lansare fiind aceleași, iar diferența dintre viteza de impact experimentală și cea numerică fiind de numai 0,26%. Durata impactului a prezentat o diferență de 6,3%, iar decelerația maximă a diferit cu aproximativ 4,6%, valorile fiind 82,4 m/s² experimental și 78,6 m/s² numeric. În ceea ce privește răspunsul structural, deplasarea maximă a montanului A a fost de 68,1 mm în experiment și de 67,4 mm în simulare, corespunzând unei diferențe relative de numai 1,06%. De asemenea, deformarea reziduală a montanului A și deplasarea maximă a lonjeronului de acoperiș au prezentat diferențe reduse, de 3,6%, respectiv 4,4%. Energia absorbită de structură a fost de 27,9 kJ experimental și 28,4 kJ numeric, cu o diferență sub 3%, iar procentul de energie absorbită a fost de 93,6%, respectiv 95,9%.

Parametrii	Simbol	Experimental	Numerical	Diferență (%)
Masă pendul (kg)	m	1000	1000	0
Unghi de lansare (deg)	θ	33	33	0
Viteză de impact (m/s)	v_0	7.72	7.7	0.26
Energie de impact (kJ)	E_0	29.8	29.6	0.7
Durata impactului (ms)	t_{imp}	32	30	6.3
Daccelerația maximă (m/s ²)	a_{max}	82.4	78.6	4.6

Tabelul 5.1. Parametrii de intrare ai impactului: experimental vs. numeric

Indicator	Unitate	Experimental	Numeric	Diferență (%)
Deplasare maximă montan A	mm	68.1	67.377	1.06
Deformare reziduală montan A	mm	62.0	59.8	3.6
Deplasare maximă lonjeron acoperiș	mm	25.0	23.9	4.4
Intruziune în spațiul de supraviețuire	mm	0	0	—
Instabilitate globală cabină	—	Nu	Nu	—

Tabelul 5.2. Parametrii deformării structurale (

Rezultatele obținute demonstrează că modelul numeric explicit-dinamic bazat pe geometrie reconstruită prin scanare 3D reproduce cu fidelitate răspunsul structural al unei cabine reale de autocamion supuse unui test de impact reglementat. Concordanța foarte bună dintre accelerația maximă, istoricul de energie absorbită, deformarea maximă și modurile generale de deformare confirmă validitatea modelului și adecvarea metodologiei propuse pentru evaluarea comportamentului la impact al cabinelor de autocamion în condiții conforme cu reglementările UNECE R29 [35][114][52][101][118].

Un rezultat important al capitolului este demonstrarea faptului că utilizarea scanării 3D de înaltă rezoluție contribuie semnificativ la creșterea fidelității modelului numeric, prin păstrarea detaliilor geometrice locale relevante. Spre deosebire de modelele CAD idealizate utilizate frecvent în analizele de crashworthiness, modelul derivat din scanare permite captarea

realistă a variațiilor de secțiune, a tranzițiilor de curbura și a geometriei reale a montanților, aspecte decisive pentru evaluarea precisă a rigidității structurale și a absorbției energiei.

Prin urmare, capitolul validează atât metodologia de reconstrucție geometrică și simulare explicită, cât și utilizarea unei instrumentări experimentale relativ simple, dar suficient de relevante pentru corelarea experimental–numerică în context reglementar. Fluxul integrat propus constituie un cadru eficient din punct de vedere economic pentru evaluarea pre-certificare și pentru optimizarea structurală în faze incipiente a cabinelor de autocamion greu, cu potențial de extindere către alte scenarii UNECE R29 și alte arhitecturi de vehicule [35][114][52].

CAPITOLUL 6

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR

Concluzii finale

Principalele concluzii rezultate în urma cercetărilor teoretice și experimentale din cadrul tezei de doctorat sunt:

- Siguranța autocamioanelor trebuie abordată într-o manieră integrată, prin corelarea sistemelor de siguranță activă și pasivă, în vederea prevenirii accidentelor și a reducerii severității consecințelor acestora.
- Analiza statistică a accidentelor rutiere și a scenariilor specifice în care sunt implicate autocamioane evidențiază necesitatea dezvoltării unor soluții tehnice avansate pentru creșterea nivelului de siguranță.
- Sistemele moderne de siguranță activă, precum AEBS și tehnologiile C-ITS bazate pe comunicații V2X, contribuie semnificativ la reducerea riscului de coliziune, însă prezintă limitări în scenarii complexe, ceea ce impune dezvoltări suplimentare.
- Siguranța pasivă a cabinelor de autocamion depinde în mod esențial de capacitatea structurii de rezistență de a menține spațiul de supraviețuire al ocupanților și de a absorbi eficient energia de impact.
- Reglementările internaționale, în special UNECE R29 și procedura VVFS 2003:29, au un rol determinant în definirea cerințelor de siguranță structurală și în orientarea dezvoltării cabinelor moderne.
- Evoluția construcției cabinelor de autocamion se bazează pe integrarea materialelor avansate, a soluțiilor constructive optimizate și a metodelor moderne de proiectare și simulare numerică.
- Modelele matematice simplificate de tip masă–arc și masă–arc–amortizor permit evaluarea parametrilor principali ai impactului și oferă o bază teoretică solidă pentru studiul fenomenelor de coliziune.
- Determinarea rigidității echivalente a structurii pe baza modelului CRASH3 permite integrarea datelor experimentale în modele analitice simplificate pentru analiza impactului frontal.
- A fost conceput și dezvoltat un model matematic original pentru studiul impactului pendul–cabină, care descrie adecvat transferul de energie și condițiile specifice testelor experimentale de impact.
- Simulările numerice realizate în MATLAB confirmă validitatea modelului pendular și evidențiază influența parametrilor geometrici asupra comportamentului dinamic al sistemului.
- Modelarea numerică prin metoda elementelor finite reprezintă un instrument eficient pentru analiza comportamentului structural al cabinei în scenarii de impact frontal și răsturnare.

- Reconstrucția geometrică a cabinei prin scanare 3D de înaltă rezoluție permite obținerea unor modele numerice cu fidelitate ridicată, esențiale pentru simulări realiste.
- Simulările explicit-dinamice realizate în ANSYS au reprodus corect modurile de deformare structurală și mecanismele de absorbție a energiei în timpul impactului.
- Testul experimental la scară reală, realizat cu pendul conform VVFS 2003:29, a permis obținerea unor date relevante pentru validarea modelului numeric.
- Compararea rezultatelor experimentale și numerice a evidențiat o concordanță foarte bună, diferențele fiind în general sub 6% pentru parametrii principali ai impactului.
- Deplasarea maximă a montantului A, energia absorbită și decelerația impactului au fost reproduse cu acuratețe de modelul numeric, confirmând validitatea acestuia.
- În urma impactului, structura cabinei a menținut spațiul de supraviețuire al ocupanților, fără apariția intruziunilor sau a instabilităților globale.
- Metodologia integrată experimental–numerică propusă reprezintă un instrument robust și eficient pentru evaluarea și optimizarea structurală a cabinelor de autocamion.
- Abordarea bazată pe scanare 3D și simulare explicită permite reducerea numărului de teste experimentale costisitoare, contribuind la optimizarea procesului de proiectare.
- Rezultatele obținute confirmă aplicabilitatea metodei pentru evaluări pre-certificare și pentru dezvoltarea unor soluții constructive îmbunătățite în domeniul siguranței pasive.

Contribuții personale

Cercetările teoretice realizate prin modelare–simulare și cercetările experimentale scot în evidență o serie de contribuții personale ale autorului, dintre care se menționează:

- Realizarea unei analize sintetice privind creșterea siguranței active și pasive a autovehiculelor prin introducerea unor sisteme speciale.
- Analiza stadiului actual al reglementărilor legislative referitoare la siguranța activă și pasivă a autocamionelor.
- Elaborarea unor modele matematice pentru studiul coliziunii dintre două corpuri, utilizând diferite metode de calcul pentru analiza comportamentului dinamic în timpul impactului.
- Dezvoltarea unor modele echivalente de tip masă–arc și masă–arc–amortizor, utilizate pentru descrierea fenomenelor de deformare și disipare a energiei în timpul coliziunii.
- Implementarea și rezolvarea modelelor matematice dezvoltate în mediul MATLAB Simulink, utilizând scheme bloc pentru simularea comportamentului dinamic al sistemelor analizate.
- Determinarea principalilor parametri cinematici și dinamici ai impactului, respectiv accelerația, viteza, timpul de impact și deformația totală a sistemului, pe baza simulărilor numerice și a modelelor de calcul realizate.
- Conceperea și dezvoltarea unui model matematic original pentru studiul impactului dintre cabina autocamionului și un pendul, model bazat pe descrierea dinamică a mișcării pendulului și pe transferul de energie în timpul coliziunii.
- Modelarea și simularea numerică a unor modele geometrice tridimensionale ale cabinei de autocamion pentru studiul comportamentului structural în timpul impactului cu pendul și al răsturnării pe acoperiș.

- Analiza comportamentului structural al cabinei în condiții de solicitare dinamică, prin evaluarea modurilor de deformare, a distribuției tensiunilor și a menținerii spațiului de supraviețuire al ocupanților.
- Rezolvarea modelelor numerice utilizând metoda elementelor finite, pentru simularea fenomenelor de impact și evaluarea răspunsului structural al cabinei în diferite scenarii de încărcare.
- Reconstrucția geometrică a cabinei de autocamion pe baza scanării 3D de înaltă rezoluție, urmată de realizarea unui model CAD detaliat utilizat în simulările numerice.
- Dezvoltarea unui model numeric cu elemente finite al cabinei de autocamion în mediul ANSYS Explicit, capabil să reproducă comportamentul structural al cabinei în timpul impactului frontal cu pendul.
- Realizarea unei analize experimentale a impactului frontal al cabinei de autocamion, conform procedurii suedeze VVFS 2003:29 și cerințelor Regulamentului UNECE R29.
- Efectuarea unei validări experimentale a modelului numeric, prin compararea parametrilor caracteristici ai impactului și a deformărilor structurale obținute numeric și experimental.
- Demonstrarea faptului că modelul numeric dezvoltat reproduce cu o bună acuratețe comportamentul structural al cabinei, diferențele dintre rezultatele numerice și cele experimentale fiind în general sub 6%.
- Propunerea unei metodologii integrate experimental–numerice pentru evaluarea comportamentului la impact al cabinelor de autocamion, metodologie care poate fi utilizată în fazele incipiente de proiectare pentru optimizarea structurală și reducerea costurilor de dezvoltare.

Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele obținute în cadrul prezentei lucrări deschid mai multe direcții de cercetare care pot contribui la dezvoltarea și optimizarea structurii cabinelor de autocamion și la îmbunătățirea nivelului de siguranță pasivă, precum următoarele:

- Extinderea modelelor matematice dezvoltate pentru analiza impactului prin includerea unor modele neliniare ale rigidității și amortizării structurii, pentru descrierea mai fidelă a comportamentului materialelor și a fenomenelor de colaps progresiv;
- Extinderea analizei numerice la alte scenarii de impact prevăzute de reglementările UNECE R29, precum impactul frontal și testul de rezistență al plafonului;
- Studiul comportamentului structural al cabinelor de autocamion în cazul impacturilor oblice sau laterale, pentru o evaluare mai completă a siguranței pasive;
- Investigarea utilizării unor materiale avansate, precum oțelurile de înaltă rezistență (AHSS, UHSS) sau materialele compozite, în vederea reducerii masei structurii și îmbunătățirii capacității de absorbție a energiei la impact;
- Dezvoltarea unor metode de optimizare structurală, inclusiv optimizare topologică și bio-inspirată, pentru identificarea unor soluții constructive cu raport optim între masă, rigiditate și capacitate de absorbție a energiei.

Diseminarea rezultatelor cercetărilor

Rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale realizate în cadrul prezentei teze au fost diseminate prin susținerea referatelor de cercetare din cadrul programului doctoral, precum și prin publicarea unor lucrări științifice care prezintă rezultatele obținute.

În cadrul programului de doctorat, am participat, în cadrul catedrei, la realizarea contractelor de finanțare nr. 121 din 04.12.2023 și nr. 146 din 04.12.2023, derulate prin Programul de granturi GNaC ARUT 2023 al Universității Naționale de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București.

1. A Ioniță, ș.a. Frontal impact on truck cabin structure using FE modeling Conference AITS 2021, Chisinau, Republica Moldova, 2021. DOI 10.1088/1757-899X/1220/1/012051.
2. A Ioniță, ș.a. Analytical crash analysis of heavy truck cabin structure according to regulation ECE-R29 IOP Conference, Volume 1235, The 25th Edition of IManEE 2021 DOI 10.1088/1757-899X/1235/1/012032.
3. A Ioniță, ș.a, Experimental test to determine the strength of the seat belt anchorages, Automotive and Integrated Transport Systems, Conference AITS 2021, Chisinau, Republica Moldova, 2021.
4. A Ioniță, ș.a, Finite element analysis for testing safety-belt anchorages, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1235, no. 1, 012048, 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1235/1/012048..
5. A Ioniță ș.a.- Kinematic analysis of the windshield wiper mechanism with two parallel rocker blades, ESFA 2023, București, publicat în IOP, Volume 1303.
6. A. Ioniță ș.a.- Contribution to the syntesis of the windshield wiper mechanism with one rocker-slider, blade, ESFA 2023, București, publicat în IOP, Volume 1303.
7. A.Molea, ș.a., Experimental and Numerical Impact Assessment of a Heavy-Duty Truck Cab Reconstructed from 3D Scanning According to the Swedish VVFS 2003:29 Procedure, Eng, vol. 7, nr. 3, art. 137, 2026, doi: 10.3390/eng7030137.
8. A. Molea, ș.a., Modal Analysis and Optimization of Truck Cabin Structure, Revista Ingineria Automobilului (SIAR), în curs de publicare, 2026;
9. A.Molea, ș.a – „Analytical model for the frontal impact with a non-deformable barrier”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1262, 012067, ACME 2022, 2022, DOI: 10.1088/1757-899X/1262/1/012067.

Bibliografie

- [1] Iozsa, D., Caroserii pentru autovehicule rutiere, Politehnica Press, București, 2016;
- [2] Aurel Alecu, Victor Buracu, Mecanica solidului - extinderi și particularizări, Editura PRINTECH, București, (cod CNC SIS 54), ISBN 973-718-329-0, 155 pagini, 2005;
- [3] Iozsa, D., Studii privind analiza în timp real a comportării caroseriilor la impact, în vederea îmbunătățirii securității pasive oferite pasagerilor, Proiect ID-140, Programul IDEI, București, 2009;
- [4] Frățilă, Gh., Frățilă, M., Samoilă, St., Automobile: construcție, întreținere și reparare, Editura Didactică și Pedagogică, R.A., București, 2011;
- [5] Victor Buracu, Aurel Alecu, Aplicații ale teoriei potențialului în mecanica solidelor, Editura TEHNICĂ, București, (cod CNC SIS 166) ISBN 973-31-2272-6, 114 pagini, 200;
- [6] BHISE, Vivek D. Ergonomics in the Automotive Design Process. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1439853008;
- [7] Wolfe, S.M., Heavy Truck Modeling and Estimation for Vehicle-to-Vehicle Collision Avoidance Systems, 2014;
- [8] D. Benson, J. Hallquist, M. Igarashi, K. Shimomaki, M. Mizuno, Application of DYNA3D in large scale crashworthiness calculations, 1986;
- [9] Claudiu SCHONSTEIN, Gabriel FODOR, Mecanică teoretică Statică și Cinematică, UTPRESS Cluj - Napoca, ISBN 978-606-737-606-7 2022;
- [10] Ilie, S., Modelarea fenomenelor de impact ale autovehiculelor, Editura AGIR, București, 2012;
- [11] Willstrand, J., Holmquist, K., Fredriksson, R., et al. (2024). Potential of heavy goods vehicle countermeasures to reduce the number of fatalities in crashes with vulnerable road users in Sweden. Traffic Safety Research, 6. <https://doi.org/10.55329/djpc9540>;
- [12] E.C.E. Truck Safety Cabs – Regulation No. 29. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 15 March 1974;
- [13] SAE J2422 International, Surface Vehicle Recommended Practice;
- [14] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), Technical Guideline TR-03164: Guidance for Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) Public Key Infrastructure (PKI), Bonn, Germany, 2022;
- [15] Manea, A.M., Iozsa, D., Stan, C., Teodorescu C., Frățilă Gh., Mathematical model for study the behavior of the bodywork at impact, The 30th SIAR International Automotive and Transport Engineering Congress, pp 214-220, SMAT, Craiova, România, 2019;
- [16] Volvo Trucks Safety Report 2017. Göteborg, Sweden: Volvo Group, 2017;
- [17] Regulamentul (UE) 2019/2144 al Parlamentului European și al Consiliului, „Regulamentul privind cerințele de omologare de tip pentru siguranța generală a vehiculelor cu 4 sau mai multe roți”, J. Oficial al Uniunii Europene, L. 325, pp. 1-107, 27 Nov. 2019;

- [18] ETAC Consortium. European Truck Accident Causation Study (ETAC). International Road Transport Union (IRU), Geneva, 2007;
- [19] UNECE, Regulation No. 16: Safety-belts and Restraint Systems (2018/629), 2018;
- [20] European Parliament and Council, Directive 96/53/EC on Maximum Authorised Dimensions and Weights, Official Journal of the European Communities, L235, 1996;
- [21] European Commission, Traffic Safety Basic Facts: Heavy Goods Vehicles and Buses, Jun. 2018;
- [22] Global status report on road safety 2023. Geneva: World Health Organization; 2023 (<https://iris.who.int/handle/10665/375016>). Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO;
- [23] UN Population Division, New York (NY): United Nations; 2022 *** <https://population.un.org/wpp/> , 15 iunie 2023);
- [24] Implementing clean energy transitions: Focus on road transport in emerging economies. Paris: International Energy Agency; 2023 (www.iea.org, accessed 15 June 2023);
- [25] Meijer JR, Huijbregts MAJ, Schotten KGJ, Schipper AM. Global patterns of current and future road infrastructure. *Environmental Research Letters* 2018;13:064006 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabd42>, accessed 15 June 2023) ;
17. World road statistics [online database]. Geneva: International Road Federation; 2023 (www.irfnet.ch and www.worldroadstatistics.org, accessed 28 September 2023) ;
- [26] DAF Trucks N.V., Bodybuilder Guidelines – DAF LF, CF and XF105, Update 2012-22, Eindhoven, The Netherlands, 2012;
- [27] Welfers, T., Ginsberg, S., Funcke, M., Hamacher, M., and Matheis, R., Design of a Tractor for Optimised Safety and Fuel Consumption, Report No. 104190, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka), Aachen, Germany, Aug. 2011;
- [28] Ron Marc Schindler A Holistic Safety Benefit Assessment Framework for Heavy Goods Vehicles, Chalmers, 2022 (PhD) ;
- [29] J. Raine and H. Engström, Finite Element Based Parametric Studies of a Truck Cab Subjected to the Swedish Pendulum Test, Master's thesis, Dept. of Management and Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, 2007;
- [30] P. Rieth, J. Remfrey, and U. Stählin, "Telematics—The essential cornerstone of global vehicle and traffic safety," in *Proc. 19th ESV*, 2005, Paper 07-0360.);
- [31] "Accident Survival - Airplane and Passenger Car", DeHaven, Hugh, SAE 520016, SAE Symposium on Packaging the Passenger, 1952;
- [32] University of Michigan Transportation Research Institute and National Highway Traffic Safety Administration, Heavy Truck Crashworthiness: Injury Mechanisms and Countermeasures to Improve Occupant Safety, DOT HS 812 061, UMTRI-2013-41, Mar. 2015;
- [33] EDAG Engineering GmbH, EDAG LightCab 2010 – Structural concepts for truck cabins, EDAG Engineering GmbH, 2010;

- [34] Robinson, B. J. (2015). HGV CAB strength: Investigating the casualty reduction effects of potential regulatory changes (Project Report PPR518). London: Transport Research Laboratory (TRL);
- [35] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2019). Regulation No. 29 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle (Revision 3). Regulation (EU) 2019/1850, Official Journal of the European Union;
- [36] Vägverket. VVFS 2003:29 – Vägverkets föreskrifter om nationellt typgodkännande av system, komponent och separat teknisk enhet. Borlänge: Vägverket, 2003. Disponibil la: <https://webapp.trafikverket.se/TRVFS/pdf/2003nr029.pdf>;
- [37] Ulrich, S., Lothar, W., Automotive Safety Handbook, SAE International, USA, 2007;
- [38] NHTSA. (2013). National Automotive Sampling System (NASS) General Estimates System (GES) Analytical Users Manual 1988-2010. (Report No. DOT HS 811 532); Washington, DC: Author. Available at <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811532.pdf>;
- [39] Jarossi, L., D. Hershberger, and Woodroffe, J. (2012). Trucks Involved in Fatal Accidents Codebook 2010. Ann Arbor, MI: UMTRI;
- [40] C-ITS Korea, “Concept of C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems),” accesat: 12 martie 2025, *** <https://www.c-its.kr/english/introduction.do>;
- [41] UN Economic Commission for Europe, ECE-R73: Lateral protection devices for vehicles, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland, 1988. <http://www.unece.org>;
- [42] NHTSA & FMCSA. (2012). Large Truck Crash Causation Survey Case Viewer. (Online Web site search tool). Retrieved from www-nass.nhtsa.dot.gov/nass/ltccs/SearchForm.aspx;
- [43] I. J. Shaikh and M. Shakebuddin, “Design, Analysis and Optimization of Collapsible Steering Column,” International Journal of Advanced Engineering, Management and Science, vol. 2, no. 8, pp. 1346–1350, Aug. 2016;
- [44] N. N. 2003/19/EC - Masses and Dimensions Directives of the European Parliament <http://eur-lex.europa.eu> Publications Office of the European Union , Luxembourg, 2003;
- [45] Leen, G., & Heffernan, D., “Past and future active and passive safety systems,” în Expanding automotive electronic systems, IEEE Computer, 2002;
- [46] N. N. Field of vision <http://www.mekra.de/Sichtfeld.92.0.html> MEKRA Lang GmbH & Co. KG, Fürth, 2010;
- [47] UN Economic Commission for Europe, ECE-R 93: Front underrun protective devices, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland, 1994. <http://www.unece.org>;
- [48] *** <https://www.volvocars.com/ro/despre-volvo/compania-noastra/mostenirea-noastra/o-traditie-de-inovatie>;
- [49] “Volvo Trucks View on Truck Rollover Accidents”, Ligovic M, Volvo Truck Corporation, Goteborg, Sweden. IRC-15-60 IRCOB Conference 2015;

- [50] DODD, M. Follow up study to the heavy goods vehicle blind spot modeling and reconstruction trial <http://trl.co.uk> Transport Research Laboratory, Wokingham, 2009;
- [51] Hallquist, J.O. LS-DYNA Theory Manual; Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, USA, 2017;
- [52] Belytschko, T.; Liu, W.K.; Moran, B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures; Wiley: Chichester, UK, 2013;
- [53] JG Automotive Industry Platform, Truck Cab Survival Space and Structural Load Transmission Analysis, 20 June 2013;
- [54] P. Seiniger, “Automatic Emergency Braking Systems (AEBS) for Heavy Vehicles,” Federal Highway and Transport Research Institute (BAST), Germany, presented at the 26th Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Conference, 2019;
- [55] UNECE, UN Regulation No. 131—Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicles with Regard to the Advanced Emergency Braking System (AEBS), Geneva: United Nations, 2012;
- [56] H. Raich, Safety Analysis of the New Actros Megaspaces Cabin According to ECE-R29/02, in Proceedings of the 4th European LS-DYNA Users Conference – Crash/Automotive Applications I, 2003;
- [57] B. R. Herbst, Test Methods for Occupant Safety in Heavy Truck Rollovers, IRCOBI Conference Proceedings, 2015;
- [58] P. Hold, Konzeption zukünftiger Lkw-Fahrerhäuser unter Berücksichtigung ergonomischer Richtlinien für den Zeitraum 2025–2035, Master’s thesis, Technische Universität Wien, Vienna, Austria, 2015;
- [59] Scania CV AB, Emergency Services Manual for Diesel Trucks – L, P, G, R and S Series, ICE Diesel, Emergency services technical manual, Södertälje, Sweden;
- [60] B. Hohmann (Ed.), Fachkunde Nutzfahrzeugtechnik, 1st ed., Europa-Fachbuchreihe für Kraftfahrzeugtechnik. Haan-Gruiten, Germany: Verlag Europa-Lehrmittel – Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2000;
- [61] E. Hoepke and S. Breuer (eds.), Nutzfahrzeugtechnik, ATZ/MTZ-Fachbuch series, Wiesbaden, Germany: Vieweg + Teubner / Springer Fachmedien, 2013, doi:10.1007/978-3-8348-2224-6;
- [62] BACHEM, H.; GUSERLE, S. MAN TGX/TGS – Active and Passive Safety MAN Nutzfahrzeuge AG 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, RWTH Aachen University, Aachen, 2009;
- [63] N. N. Image Bank *<http://www.scania.com> Scania AB, Södertälje, 2010;
- [64] EDAG Engineering GmbH; ELRINGKLINGER AG; AEM AERODYNAMIC GMBH. Gemeinsamer Schlussbericht für das BMWK-Verbundvorhaben „Active Aero Trucks (AAT)”. Köln: TÜV Rheinland Consulting GmbH;
- [65] M. Hilgers, Commercial Vehicle Technology: The Driver’s Cab, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2020. ISBN 978-3-662-60846-3;

- [66] Hjelm, L., Bergqvist, B., “European Truck Aerodynamics – A Comparison Between Conventional and CoE Truck Aerodynamics,” *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II*, Springer, 2009;
- [67] A. Bahatmaka et al., “Material performance analysis in frontal collision simulation of electric vehicle frames using explicit dynamic finite element analysis,” *Results Eng.*, vol. 28, Art. no. 107130, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107130;
- [68] Du Bois, P.; Chou, C.C.; Fileta, B.B.; Khalil, T.B.; King, A.I.; Mahmood, H.F.; Mertz, H.J.; Wismans, J. *Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection*; American Iron and Steel Institute: Southfield, MI, USA, 2004;
- [69] Hoepke, E., Breuer, S. (Hrsg.). (2013). *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten* (7., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2224-6>;
- [70] European Road Safety Observatory. (2006). *Vehicle Safety*. European Commission. Retrieved August 10, 2007, from <http://www.erso.eu>;
- [71] Commercial Vehicle Cluster – CVC. (2012). *CVC Newsletter 1 | 2012*. Commercial Vehicle Cluster – Nutzfahrzeug GmbH, Kaiserslautern, Germany. Published July 20, 2012;
- [72] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. *Annual Statistical Report on Road Safety in the EU – 2016*. European Road Safety Observatory (ERSO), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016;
- [73] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. *Annual Statistical Report on Road Safety in the EU – 2025*. European Road Safety Observatory (ERSO), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025;
- [74] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. *Annual Statistical Report on Road Safety in the EU – 2020*. European Road Safety Observatory (ERSO), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020;
- [75] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. *Road Fatalities in the EU: Buses and Heavy Goods Vehicles – Updated Statistical Report 2024*. ERSO Technical Report, version 26 March 2024;
- [76] Lindgren, J. M., & Lindqvist, A. (2007). Apparatus for adjusting force tilting truck cab (U.S. Patent Application No. US20070080011A1). United States Patent and Trademark Office; <https://patentimages.storage.googleapis.com/d2/a7/6c/b8047125362247/US20070080011A1.pdf> ;
- [77] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. *Road Fatalities in the EU: Buses and Heavy Goods Vehicles – Updated Statistical Report 2025*. ERSO Technical Report, version 26 March 2025;
- [78]*** https://w3.unece.org/PXWeb2015/pxweb/en/STAT/STAT__40-TRTRANS__01-TRACCIDENTS/ UNECE Statistical Database;
- [79] DaCoTA (2012a). *Heavy Goods Vehicles – Thematic Report*. European Road Safety Observatory, European Commission;

- [80] S. Sharma, S. Sharma, S. Tiwari, and U. Gupta, "Finite element simulation and validation of fully suspended heavy duty commercial vehicle (HCV) as per AIS029 pendulum impact test," SAE Tech. Paper 2015-01-2873, 2015, doi: 10.4271/2015-01-2873;
- [81] Clinciu, M., Chiru, A., Ciunel, S., The Importance of Consumed Energy for Deformation in Study of Collision, CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering, Springer, Romania, 2016;
- [82] R. Marin and E. Deciu, *Mecanică*, 2nd ed., București, România, 1981;
- [83] Huang, M., *Vehicle Crash Mechanics*, 2nd ed., SAE International, CRC Press, Boca Raton, FL, 2002;
- [84] Manea, Ana Maria. *Siguranța pasivă în construcția autovehiculelor*. Teză de doctorat, Universitatea Politehnica din București, Facultatea de Transporturi, 2021;
- [85] LORENTE, Andrés. *Dynamic characteristics of a pendulum system*. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology, 2010. Teză de masterat. ISRN: BTH-AMT-EX--2010/D-01--SE;
- [86] C.-S. Böttcher, S. Frik, B. Gosolits, 20 Years of crash simulation at opel-experiences for future challenge, 2005;
- [87] Ioniță, A., Iozsa, M. D., Stan, C., & Manea, A. M. (2022). Frontal impact on truck cabin structure using FE modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1220, 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1220/1/012051>;
- [88] Ioniță, A., Iozsa, M. D., Stan, C., & Manea, A. M. (2022). Analytical crash analysis of heavy truck cabin structure according to regulation ECE-R29. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1235, 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1235/1/012032>;
- [89] Woodroffe, J., and Blower, D. *Heavy truck crashworthiness: injury mechanisms and countermeasures to improve occupant safety*. (Report No. DOT HS 812 061). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2015;
- [90] Iozsa D, *FE Analysis of a Truck Structure in Order to Predict its Crash Behavior*, 12th Automotive European Congress, EAEC 2009, Bratislava, Slovakia, 2009;
- [91] W. Weijermars, N. Bos, A. Schoeters, J.-C. Meunier, N. Nuytens, E. Dupont, K. Machata, R. Bauer, K. Perez, J.-L. Martin, H. Johansson, A. Filtness, L. Brown, P. Thomas, *Serious road traffic injuries in europe, lessons from the EU research project SafetyCube*, *Trans. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2672 (2018) ;
- [92] G. Noorumar, K. Robbersmyr, S. Rogovchenko, and D. Vysochinskiy, "Crash response of a repaired vehicle—Influence of welding UHSS members," *SAE Int.*, 2020, doi: 10.4271/2020-01-0197;
- [93] J.M. Chang, M. Rahman, M. Ali, T. Tyan, M. El-Bkaily, J. Cheng, *Modeling and design for vehicle pitch and drop of body-on-frame vehicles*, *SAE Tech. Papers* 114 (2005) 329–338, <http://dx.doi.org/10.4271/2005-01-0356>;
- [94] A. Elmarakbi, M. Elkady, J. MacIntyre, *Numerical analysis of vehicle-to-vehicle impact using vehicle dynamics control systems for collision mitigation*, *Int. J. Dyn. Control* 1 (2013) 172–191, <http://dx.doi.org/10.1007/s40435-013-0017-x>;

- [95] G. Noorumar, S. Rogovchenko, K.G. Robbersmyr, D. Vysochinskiy, A. Klausen, A novel technique for modeling vehicle crash using lumped parameter models, in: Proceedings of the 11th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, SIMULTECH 2021, SciTePress, 2021, pp. 62–70, <http://dx.doi.org/10.5220/0010529200620070>;
- [96] J.M. Chang, M. Huang, T. Tyan, G. Li, L. Gu, Structural optimization for vehicle pitch and drop, SAE Tech. Papers (2006) <http://dx.doi.org/10.4271/2006-01-0316>;
- [97] M.M. Kamal, Analysis and Simulation of Vehicle to Barrier Impact, SAE International, 1970, <http://dx.doi.org/10.4271/700414>;
- [98] B.B. Munyazikwiye, D. Vysochinskiy, M. Khadyko, K.G. Robbersmyr, Prediction of vehicle crashworthiness parameters using piecewise lumped parameters and finite element models, Designs 2 (2018) 43, <http://dx.doi.org/10.3390/designs2040043>;
- [99] A. Deb, K.C. Srinivas, Development of a new lumped-parameter model for vehicle side-impact safety simulation, Proc. Inst. Mech. Eng. D 222 (2008) 1793–1811, <http://dx.doi.org/10.1243/09544070JAUTO801>;
- [100] G. Noorumar, S. Rogovchenko, K.G. Robbersmyr, D. Vysochinskiy, Mathematical models for assessment of vehicle crashworthiness: a review, 2021, pp. 1–15, <http://dx.doi.org/10.1080/13588265.2021.1929760>;
- [101] Iveco S.p.A. Iveco Eurocargo—Technical Specifications and Body Builder Guidelines. Iveco Group: Turin, Italy. Available online: <https://www.iveco.com/> (accessed on 23 April 2025);
- [102] Texas A&M Transportation Institute Texas A&M University System, 3135 TAMU College Station, Texas, 77843-3135 Development of a Simplified Finite Element Approach for Investigation of Heavy Truck Occupant Protection in Frontal Impacts and Rollover Scenarios 14th International LS-DYNA Use;
- [103] Lorenzo Morello, Lorenzo Rosti Rossini, Giuseppe Pia, Andrea Tonoli, The Automotive Body Volume I Components Design, Springer, Netherlands, 2011;
- [104] WorldAutoSteel, “Automotive advanced high-strength steel (AHSS) definitions,” WorldAutoSteel. *** <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/> , 2021;
- [105] Wiedemann, J.: Leichtbau - Elemente und Konstruktion. 3. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (2007);
- [106] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. 10. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (2013).
- [107] Horst, E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. ATZ/MTZ Fachbuch, Springer Verlag, Heidelberg (2013);
- [108] S. Hegler, Leichtbau in der Nutzfahrzeugindustrie, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau, Technische Universität Kaiserslautern, Version 1.1;
- [109] VDI – Verein Deutscher Ingenieure. Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016 – Berechnung, Prüfstands- und Straßenversuch. Düsseldorf: VDI Verlag, 2016. (VDI-erichte; Nr. 2279);

- [110] Virtual CRASH LLC, VCX User's Guide, Chapter 10: Reading Kudlich-Slibar Impulse Data. Referenced depth of penetration parameter used to define when impulses are delivered after contact in a collision;
- [111] Campbell, K., Energy Basis for Collision Severity, Paper No. 740565, SAE, Warrendale, PA;
- [112] Scurlock, B., A Generalized Damage-Based Estimate of Crash Severity, Cornell University Library arXiv:1408.4614 (2014);
- [113] J. S. Held and N. M. Bassett, "Vehicle Frontal Crush Stiffness Coefficients & Trends," J.S. Held, Inc., Columbus, OH, USA, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://www.jsheld.com/uploads/Vehicle-Frontal-Crush-Stiffness-Coefficients-Trends.pdf>;
- [114] Holenko, K.; Dykha, O.; Koda, E.; Kernyskyy, I.; Royko, Y.; et al. Validation of frontal crashworthiness simulation for low-entry type bus body according to UNECE R29 requirements. *Appl. Sci.* 2024, 14, 5595. Doi:10.3390/app14135595;
- [115] Papavassiliou, A.; Pavlovic, A.; Minak, G. Crashworthiness investigation on a carbon fiber reinforced plastic solar vehicle. *Compos. Struct.* 2024, 340, 118147. doi:10.1016/j.compstruct.2024.118147;
- [116] Brach, R.M.; Brach, M. *Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2005;
- [117] Dewesoft. DS-CAM-88c / DS-CAM-120c / DS-CAM-175c / DS-CAM-320c – Technical Reference Manual. Version V20-1. Trbovlje, Slovenia: Dewesoft d.o.o., 2020;
- [118] ZEISS. T-SCAN hawk 2—Handheld Laser Scanner: Technical Specifications. Carl Zeiss GOM Metrology GmbH: Braunschweig, Germany. Available online: <https://www.zeiss.com/metrology/en/products/optical-3d/t-scan-hawk-2.html> , (accessed on 23 October 2025) ;
- [119] Wierzbicki, T.; Abramowicz, W. On the crushing mechanics of thin-walled structures. *J. Appl. Mech.* 1983, 50, 727–734.
- [120] GCS Test Denetim ve Belgelendirme, "Heavy Duty Truck-Tractor Type Approval (N2-N3)."***http://gcs-lab.com/en/heavy_duty_truck_tractor_type_approval_n2_n3.html.
- [121] SSAB, AHSS Lightweighting of Truck Components. ***<https://www.ssab.com/en-us/brands-and-products/ssab-docol/automotive-steel-resources/automotive-insights/ahss-lightweighting-of-truck-components>
- [122] A.-M. Dumitrache, I.-A. Dumitrache, D. Iozsa și A. Molea, "Experimental and Numerical Impact Assessment of a Heavy-Duty Truck Cab Reconstructed from 3D Scanning According to the Swedish VVFS 2003:29 Procedure," *Eng.* vol. 7, nr. 3, art. 137, 2026, doi: 10.3390/eng7030137.
- [123] Autoliv. (2025). Commercial Vehicle Side Curtain Airbag. Disponibil: https://www.autoliv.com/sites/autoliv/files/2025-01/Autoliv_Commercial_Vehicle_Side_Curtain_Airbag.pdf

- [124] Haulage Exchange. (2025). European and American trucks compared. Disponibil: ***<https://haulageexchange.co.uk/blog/european-and-american-trucks-compared/>
- [125] China Heavy Truck Parts. (n.d.). Front inner panel assembly. Disponibil: <https://chinaheavytruckparts.com/front-inner-panel-assembly.html>
- [126] UKRO Academy. (2018). Heavy Vehicle Construction. Disponibil : https://ukro.academy/wp-content/uploads/2018/09/UKRO_Heavy_Vehicle_Construction_Lo_Res.pdf
- [127] YouTube. (2024). Side Curtain Airbags Explained (Commercial Vehicles) [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=GcomvBUTtnU>;
- [128] Manea Ana Maria; Iozsa Daniel; Stan Cornelia; Ioniță Alexandra, Experimental test to determine the strength of the seat belt anchorages, în IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1220, art. 012050, lucrările Automotive and Integrated Transport Systems (AITS 2021), Chișinău, Republica Moldova, 2022, doi:10.1088/1757-899X/1220/1/012050;
- [129] Manea Ana Maria; Iozsa Mihai Daniel; Stan Cornelia; Ioniță Alexandra, Finite element analysis for testing safety-belt anchorages, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1235, nr. 1, art. 012048, 2022, DOI:10.1088/1757-899X/1235/1/012048;
- [130] Antonescu Ovidiu; Antonescu Daniela; Ioniță Alexandra, Kinematic Analysis of the Windshield Wiper Mechanism with Two Parallel Rocker Blades, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1303, nr. 1, art. 012041, 2024, doi:10.1088/1757-899X/1303/1/012041;
- [131] Antonescu Ovidiu; Antonescu Daniela; Ioniță Alexandra, Contributions to the Synthesis of the Windshield Wiper Mechanism with One Rocker-Slider Blade, IO Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1303, nr. 1, art. 012042, 2024, doi:10.1088/1757-899X/1303/1/012042;
- [132] Molea Alexandra, Stan Cornelia, Dumitrache Ana Maria; et al., Modal Analysis and Optimization of Truck Cabin Structure, Revista Ingineria Automobilului (SIAR), în curs de publicare, 2026;
- [133] Manea A. M., Iozsa D., Molea A., Stan C. „Analytical model for the frontal impact with a non-deformable barrier”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1262, 012067, ACME 2022, 2022, DOI: 10.1088/1757-899X/1262/1/012067.