Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Facultatea de Transporturi

Analiza performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor și metode de îmbunătățire ale acestora

~Rezumatul tezei de doctorat~

Conducător științific: Prof. univ. em. dr. ing. Gheorghe FRĂȚILĂ

Autor: Ing. Emanuel-Mihai VIERU

București 2025

Mulțumiri

Această lucrare nu ar fi fost posibilă fără sprijinul acordat necondiționat și îndrumarea atentă și continuă a conducătorului de doctorat prof. univ. em. dr. ing. Gheorghe FRĂȚILĂ, un adevărat mentor, a cărui răbdare și experiență mi-au oferit suportul necesar pentru continuarea lucrării atunci când situațiile au fost împotriva mea. Îmi exprim gratitudinea față de dl. Frățilă care a făcut ca tot acest parcurs pentru elaborarea lucrării să fie plin de acumulare a unor noi cunoștințe.

Aș vrea să îmi arat recunoștința față de cadrele didactice din departamentul Autovehicule Rutiere al facultății de Transporturi din cadrul UNST Politehnica București care, în decursul anilor de studii universitare au inspirat în mie ideea de a caută și de a experimenta mai mult în domeniul vast al autovehiculelor.

Mulțumiri aș vrea să aduc și conf. dr. ing. Daniel-Mihail IOZSA care prin sugestiile oferite m-a ajutat la elaborarea acestei lucrări. Suportul acordat în decursul anilor universitari au generat în mine încrederea că pot mai mult.

În final, realizarea acestei lucrări a fost posibilă și datorită sprijinului oferit de familie.

Drd. Ing. Vieru Emanuel-Mihai

Cuvinte Cheie

Performanța aerodinamică a autocamioanelor

Optimizarea aerodinamică

Simulări numerice pentru îmbunătățirea aerodinamică a autocamioanelor

Soluții constructive pentru autocamioane cu profil aerodinamic

Cuprins

Introducere

Capitolul 1. Evoluția autocamioanelor în traficul rutier

1.1 Necesitatea utilizării autocamioanelor pentru transportul de mărfuri

1.2 Istoria dezvoltării autocamioanelor

1.3 Importanța eficientizării transportului de mărfuri cu autocamioane

1.4 Concepte generale legate de performanța aerodinamică

1.4.1 Noțiuni generale legate aerodinamică

1.4.2 Concepte de bază în dezvoltarea autocamioanelor din punct de vedere aerodinamic

Capitolul 2. Studiul performanțelor aerodinamice în domeniul autocamioanelor

2.1 Concepte de bază în dezvoltarea autocamioanelor din punct de vedere aerodinamic

2.1.1 Acoperișul cabinei

2.1.2 Zonele laterale ale cabinei

2.1.3 Zona frontală și inferioară a cabinei

2.1.4 Analiza zonelor laterale ale autocamioanelor

2.1.5 Analiza construcției zonei de transport a mărfii

2.1.6 Analiza zonei roților autocamioanelor

2.2 Autocamioanele electrice

Capitolul 3. Studiul verificării performanței aerodinamice

3.1 Verificarea în mediul fizic

3.2 Verificarea în mediul virtual

3.3 Considerente legate de verificări în mediul virtual și fizic

Capitolul 4. Analiza performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor

4.1 Modelele de autocamioane analizate

4.1.1 Autocamionul convențional

4.1.2 Soluții constructive de autocamioane

4.2 Încercări în mediul virtual

4.2.1 Mediul de încercare

4.2.2 Analiza în mediul virtual pentru autocamionul convențional

4.2.3 Analiza în mediul virtual pentru diferite soluții constructive de autocamioane

4.2.4 Concluzii pentru încercările în mediul virtual

4.3 Încercări în mediul fizic

4.3.1 Construcția tunelului aerodinamic experimental

4.3.2 Analiza aerodinamică a unor modele simpliste
4.3.3 Analiza în mediul fizic a autocamionului convențional
4.3.4 Analiza în mediul fizic pentru un autocamion cu profil aerodinamic
4.4 Concept autocamion aerodinamic
Capitolul 5. Inteligența artificială în domeniul aerodinamicii
Capitolul 6. Concluzii
6.1 Concluzii finale
6.2 Contribuții personale
6.3 Diseminarea rezultatelor
6.4 Direcții viitoare de cercetare
Bibliografie

Introducere

Domeniul dezvoltării autocamioanelor în ceea ce privește performanțele dinamice, de consum și de transport a mărfurilor este abordat cu un interes ridicat, mai ales ținând cont de tendințele actuale legate de transportul eficient al mărfurilor și de reducerea a emisiilor poluante. Autocamioanele, deși din punct de vedere al procentajului de rulare pe drumurile publice au o pondere mai scăzută decât a autovehiculelor personale (de clasă mică) acestea, prin construcție, au potențialul de a consuma și genera mai mult, vorbind aici de combustibil, putere sau emisii poluante. Așadar, există o necesitate de analizare și aprofundare a potențialelor soluții care ar putea eficientiza transportul de mărfuri.

Domeniul aerodinamicii în ceea ce privește autocamioanele are o serie de limitări apărute ca urmare a unor compromisuri necesare pentru buna desfășurare a transportului de mărfuri.

Lucrarea de față are scopul de a analiza diferitele constrângeri actuale și de a propune diferite soluții pentru îmbunătățirea performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor. Așadar, ca obiective propuse pentru lucrare se pot enumera:

- analiza soluțiilor constructive ale autocamioanelor actuale;
- încercarea de optimizare a actualelor soluții constructive ale autocamioanelor;
- propunerea unor noi soluții pentru îmbunătățirea performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor.

Capitolul 1. Evoluția autocamioanelor în traficul rutier

Printre mulți alți factori, o societate are nevoie de mărfuri pentru a exista dar și pentru a se dezvolta continuu. În acest caz mărfurile, reține într-un singur cuvânt tot necesarul, la modul general, de care are nevoie omul pentru a exista: mâncare, articole vestimentare, materii prime, pre-fabricate, produse finite și altele. Aceste mărfuri necesită sa fie transportate, mai ales în contextul dezvoltării actuale ale societăților în care există o interconectare globală. Acest transport, pentru a fi eficient, a exploatat toate ramurile disponibile: rutier, feroviar, naval și aerian. Fără a se întrepătrunde, cele 4 ramuri au zone specifice de funcționare, lucru care împarte acest transport în 4 sectoare diferite. Sectoare care au fost forțate să aducă soluții inovative pentru o dezvoltare durabilă și care au concurat, chiar, în unele cazuri pentru a-și arăta potențialul în piața de transport mărfuri.

Lucrarea de față va pune accentul pe transportul rutier de mărfuri executat, în principal, cu autocamioane. Văzând importanța acestui sector, acest lucru favorizează studii specifice în vederea unei evoluții. În același timp trebuie ținut cont și de constrângerile actuale impus, în principal, pentru: reducerea emisiilor poluante, implicit a reducerii consumului de combustibil dar și pentru transportarea unui volum cât mai mare de mărfuri.

Aerodinamica în ceea ce privește autocamioanele nu a avut un impact foarte mare ca performanță atunci când s-a inițiat dezvoltarea în masă a acestor tipuri de autovehicule. Însă, dat

fiind condițiile actuale, apare un interes destul de crescut pentru acest domeniu și aliniază noi constrângeri în ceea ce privește dezvoltarea acestora [50].

Încă din cele mai vechi timpuri, mărfurile au fost transportate fie pentru comerț, fie pentru utilizarea personală. Primele metode de transport erau rudimentare și acestea se realizau prin utilizarea unor saci cărați în spate sau în trăsuri specifice puse în mișcare de animale însă, mai apoi, după industrializarea masivă, s-au accentuat transporturile rutiere, feroviare, navale și chiar aeriene. În principal, pentru o dezvoltare economică cât mai bună, o mare parte din mărfuri erau transportate peste oceane, sau mări, de pe un continent pe altul, ori de la o țară la alta. Din porturi, mărfurile trebuiau să ajungă fie la diferiți agenți economici sau la diferiți utilizatori. Pentru efectuarea acestor transporturi principalele metode erau fie feroviar, fie rutier. Dat fiind că s-a făcut o recurență în ceea ce privește această conectare între diferitele ramuri de transporta a apărut și necesitatea optimizării acestora.

Transportul rutier, cu autocamioane, a devenit o necesitate și, în plus, a devenit indispensabil pentru conectarea localităților atât pe distanțe mici, medii și mari. În plus, autocamioanele permit cea mai mare acoperire a locațiilor terestre dat fiind răspândirea căilor de rulare, pe lângă transportul feroviar care, deși permite transportul unui volum mai mare de mărfuri dintr-un singur transport, nu are o răspândire terestră atât de mare sau chiar geografic terenul nu permite. Pe lângă acoperirea terestră destul de mare, prin intermediul rețelei de drumuri, autocamioanele au avantajul transportului mixt de mărfuri. Acest lucru se referă pe de o parte la livrarea unor mărfuri de volum redus între două locații sau pe de altă parte vizează mai multe locații consecutive cu un singur transport.

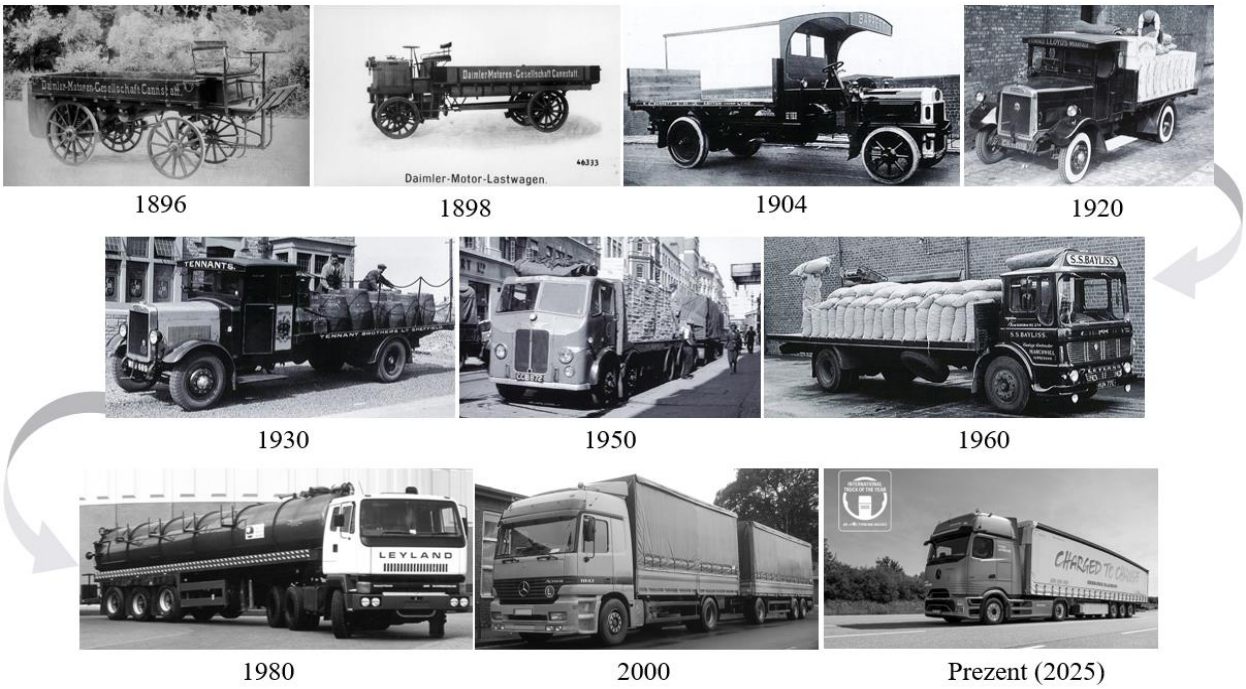


Figura 1. Evoluția autocamiaonelor în decursul anilor, reprezentată exemplificativ. [22], [23], [24], [25], [26].

În plus, manevrabilitatea facilă a acestui tip de autovehicule este potrivită pentru transportul de mărfuri din proximitatea orașelor, la periferie, în depozite unde transportul feroviar nu este o opțiune potrivită

Ținând cont de o multitudine de constrângeri și reglementări, autocamioanele s-au dezvoltat și au evoluat într-o direcție, relativ, clară din punct de vedere al formei. În figura 1 se poate observa această evoluție a autocamioanelor.

După cum se poate observa în figura 1 începând cu, aproximativ, anul 1900 designul autocamioanelor a început să aibă o formă comună. În principal, toți constructorii au adoptat aceeași soluție constructivă, deci camion cu benă. Trecând mai departe, cronologic la anul 1920, ținând cont și de necesitățile pentru marea varietate de mărfuri o multitudine de soluții constructive s-au adoptat. În jurul anului 1950 a fost introdus un nou design pentru camioane, în special pentru cabina acestora [26]. Schimbările au fost majore în principal din punct de vedere al dimensiunilor cât și al capacităților de încărcare; în plus și motoarele cu ardere internă au evoluat. Mergând către anul 1980 autocamioanele au adoptat soluții constructive diverse și au început să fie construite punându-se mai mult accent pe conducător, astfel s-a ajuns ca autocamioanele să fie mai confortabile, mai sigure și mai ergonomice [26]. Anii 2000 au adus în proiectarea camioanelor, noi constrângeri legate de siguranță și au pus accentul pe reducerea emisiilor poluante și reducerea consumului de combustibil lucru care a subliniat mai mult interesul pentru performanța aerodinamică. În prezent autocamioanele, cu o varietate foarte mare de soluții constructive, sunt supuse unor norme foarte stricte de reglementare legate de securitate atât a conducătorului, a mărfii cât și a celorlalți participanți la trafic. Iar acest lucru impune, din nou, o serie de constrângeri în ceea ce privește proiectarea.

În contextul lucrării de față analiza în ceea ce privește istoria dezvoltării autocamioanelor pune mai mult accentul pe profilul acestora și nu canalizează o mare atenție asupra diferitelor performanțe, ca de exemplu puterea lor.

Pe lângă designul cabinei, un alt punct al unui autocamion care s-a schimbat mult în decursul anilor este zona de încărcare (mai exact zona în care sunt transportate mărfurile). În decursul anilor, mai ales pe continentul european, tipul de ansamblu rutier pentru autocamioane, deci camioane cu semiremorcă, s-a dezvoltat foarte mult, după cum se poate observa și în figura 1.

Transportul se poate considera eficient atunci când: se realizează într-un timp scurt, este rentabil din punct de vedere economic (pentru ambele părți: transportator și beneficiar) și se realizează în siguranță. Executarea transportului într-un timp scurt este important pentru asigurarea unui flux continuu de mărfuri ce vor fi utilizate/comercializate. Din punct de vedere economic, transportul de mărfuri are două componente: transportul trebuie să își asigure o rentabilitate crescută luând în considerare consumul de combustibil, mentenanța camionului și altele, iar pentru beneficiarul mărfurilor livrate să fie profitabil mai apoi, în vederea comercializării sau utilizării bunurilor.

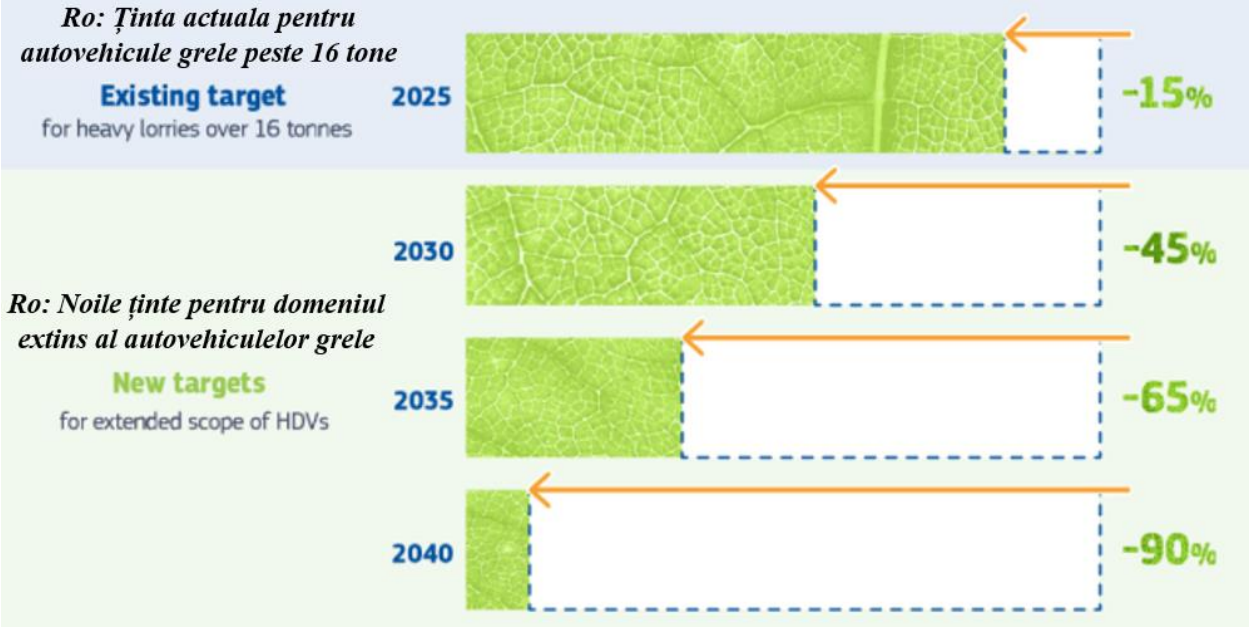


Figura 2. Țintele, pe ani, pentru reducerea emisiilor poluante specifice autovehicuelor grele, la nivel European [50].

În principal, o bună performanță aerodinamică a autovehiculului conduce la un consum redus de combustibil (deci și emisii poluante reduse), o bună stabilitate direcțională, un zgomot aerodinamic redus și eficientizarea răcirii motorului și a frânelor [1].

Performanța aerodinamică se poate obține prin măsurarea coeficientului aerodinamic c_D, care este adimensional. Acesta se poate calcula și cu ajutorul formulei 1.1 ținând cont de parametrii enunțați mai jos ca: forța aerodinamică, densitatea aerului etc..

$$c_D = \frac{F}{\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^2\cdot A} \tag{1.1}$$

F este forța aerodinamică;

ρ este desnitatea aerului;

v este viteza de deplasare;

A este aria transversală [1].

Coeficientul aerodinamic poate fi calculat pe cele 3 axe: x, y, z și are corespondentă forța aerodinamică (a aerului) pe fiecare dintre acestea: F_x, F_y, F_x. Ponderea cea mai mare pentru estimarea performanței aerodinamice a unui vehicul este pe axa x [1].

Rezistența aerodinamica unui autovehicul este direct proporțională cu viteza de deplasare. Din figura 3 se poate observa că rezistența aerodinamică (*Aerodynamic drag*) apare începând cu viteza de 20 km/h dar raportat la puterea necesară învingerii acestei rezistențe (*Power*), aceasta se poate

considera neglijabilă [21]. Începând cu valori ale vitezei de aproximativ 80 km/h se observă că și puterea necesară învingerii rezistenței aerului crește semnificativ.

Un alt factor care îngreunează înaintarea autovehiculelor este rezistența la rulare (*Rolling resistance*) care crește liniar odată cu viteza. Deci, autovehiculul trebuie să dezvolte o putere suficient de mare pentru a învinge aceste două rezistențe enunțate. Valorile din figura 3 corespund unui autocamion de 40 tone cu un c_D de 0,5.

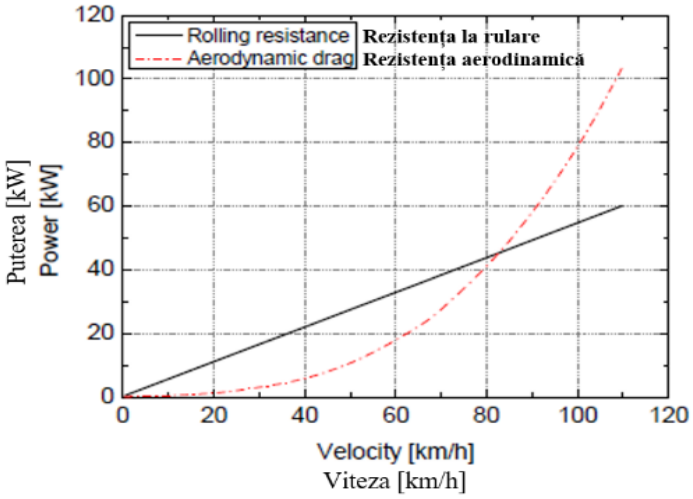


Figura 3. Relația dintre puterea necesară pentru a învinge rezistența la rulare și cea aerodinamică [21].

O ecuație simplă descrie faptul că un consum mare de combustibil generează și un consum mare de emisii poluante. În contextul actual este necesar ca aceste noxe să fie diminuate pe cât de mult posibil și de ce nu, chiar eliminate. Pe lângă soluțiile tehnice aplicate motoarelor cu ardere internă, reducerea frecărilor interne ale diferitelor componente și utilizarea unor combustibili alternativi, încă mai există arii care au potențial de reducere a emisiilor [19]. După cum s-a observat în figura 3 rezistența la înaintare are în componență și rezistența aerului și cea de derulare. Cum cea din urmă se poate ameliora, de exemplu, și prin dezvoltarea unor anvelope mai performante așa și rezistența aerului se poate diminua prin reducerea coeficientului aerodinamic. Acest lucru se poate face, în principal prin proiectarea unui profil care să fie cât mai *fluid*, astfel să permită aerului o curgere lină, fără perturbații. În figura 4 avem două tipuri de autocamioane: *A* – autocamion cu un coeficient aerodinamic ridicat (performanță aerodinamică scăzută) și *B* – autocamion cu un coeficient aerodinamic scăzut (performanță aerodinamică ridicată).

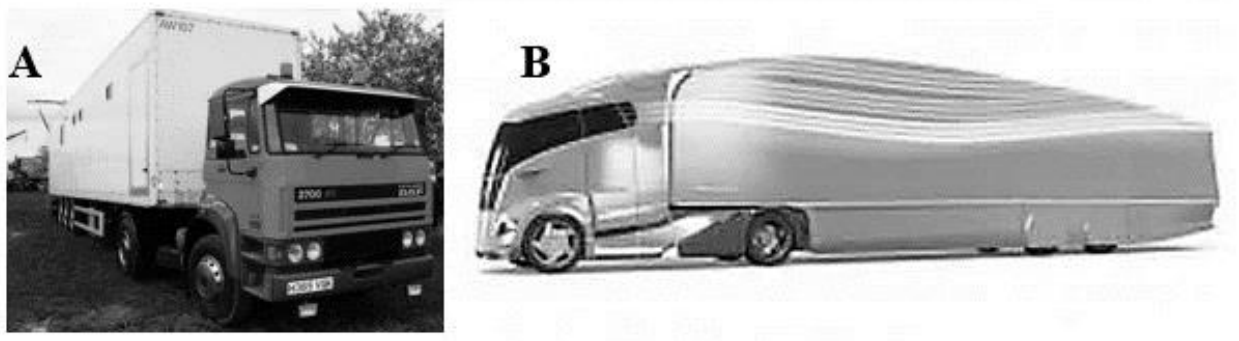


Figura 4. Tipuri de autocamioane cu performanță aerodinamică diferită: *A* - c_D crescut, *B* - c_D scăzut, [33], [24].

Diferența dintre cele două autovehicule este sesizabilă, în cazul autocamionului *A* nu există zone care să indice o bună performanță. Pe de altă parte, modelul *B* are o formă continuă, margini și muchii rotunjite și descrie o formă generală bună din punct de vedere aerodinamic, aceasta fiind apropiată de picătura de apă.

Zonele care au cel mai mare potențial pentru îmbunătățirea performanței aerodinamice ale autocamioanelor sunt:

- Cabina: partea frontală, acoperișul și zonele laterale ale acesteia;
- Zonele laterale dintre punțile autocamionului sau ale capului tractor;
- Semiremorca sau capitonajul, în cazul autocamioanelor simple;
- Zonele roților;
- Zonele laterale ale semiremorcilor;
- Zona dintre cabină și semiremorcă sau capitonaj.

În figura 5 sunt prezentate zonele enumerate mai sus, pe un ansamblu rutier de timp cap tractor cu semiremorcă și care nu are elemente pentru îmbunătățirea performanței aerodinamice

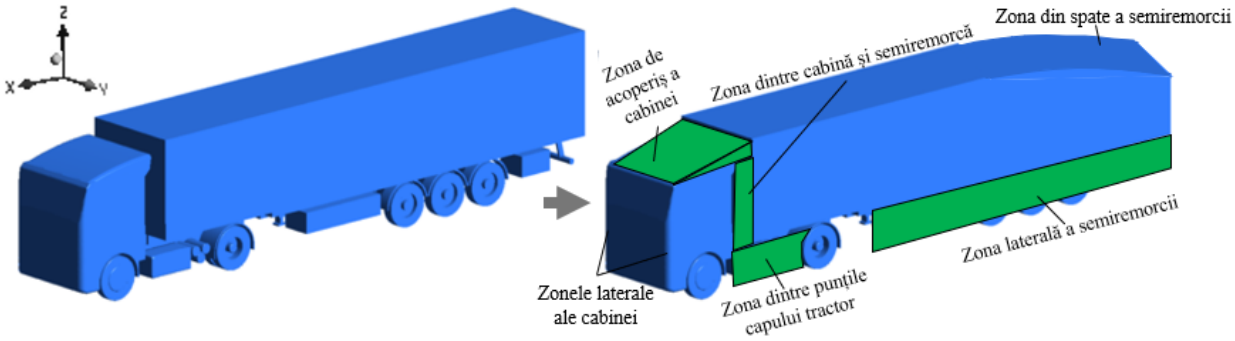


Figura 5. Zonele cu potențial pentru îmbuătățirea performanțelor aerodinamice ale unui ansamblu rutier [4].

Capitolul 2. Studiul performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor

Pe baza celor prezentate anterior se poate considera că performanța aerodinamică este dată de mai mulți factori, printre care cei mai importanți ar fi: forma generală și elementele auxiliare adăugate acesteia. Deși vehiculele comerciale au avut evoluții din punct de vedere aerodinamic în ultimii ani încă, există soluții pentru perfecționarea acestora. Plecând de la figura 5 se vor detalia, din punct de vedere constructiv dar și al performanței elementele prezentate . În plus, se va ține cont și de diferite constrângeri legate de livrarea mărfii, siguranță ori confort. Studiul nu se va concentra pe o soluție constructivă specifică, ca de exemplu ansamblu rutier format din cap tractor și semiremorcă, ci va analiza toate soluțiile adoptate de pe piața vehiculelor comerciale. În principal, fie că vorbim despre camion articulat sau un camion scurt cu furgon, principiul de îmbunătățire al performanței aerodinamice rămâne același: eliminarea sau diminuarea zonelor de presiune înaltă care duce la creșterea coeficientului c_D. În figura 6 sunt prezentate zonele de presiune înaltă, deci cele care generează rezistența la înaintare din punct de vedere aerodinamic [19]. Se poate observa, din aceasta, că zonele cu presiune foarte mare (marcate cu „+”) pentru

secțiunea la centrul vehiculului sunt: zona frontală a cabinei și a furgonului deasupra cabinei, în zona acoperișului acesteia. Ariile marcate cu "-" sunt reprezentate de presiune redusă sau *negativă*; presiunea poate fi doar zero sau pozitivă, însă enunțarea unei presiuni negative este dată de valori de presiune sub valoarea celei atmosferice.

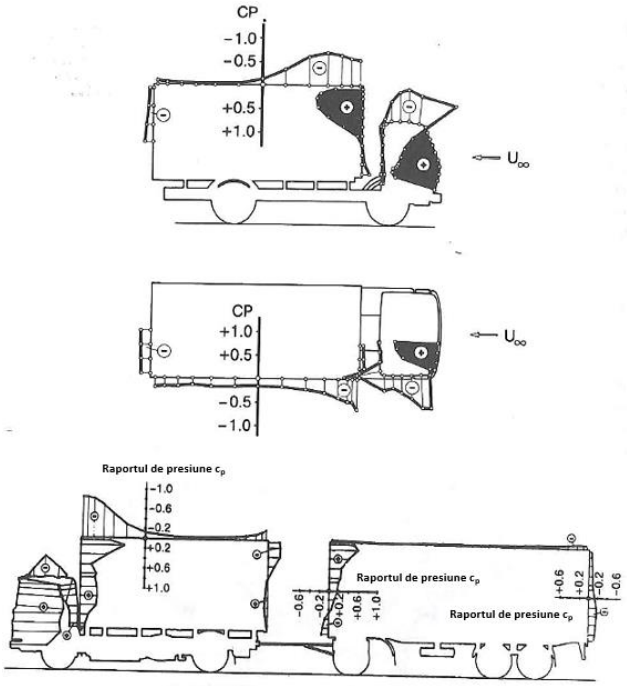


Figura 6. Coeficientul de presiune c_P, pe corpul unui aitocamion, secțiune la centrul vehiculului, viziune de sus; ansamblu rutier format din camion și remorcă [19].

După cum s-a exemplificat și în figura 6 cabina autocamionului este o zonă importantă care generează presiune înaltă, deci și creează o rezistență mare la înaintare. Cabina autocamionului ca ansamblu de arii se poate împărți în: acoperiș, partea frontală și zonele laterale ale acesteia. În plus, aceasta trebuie să asigure: o bună ergonomie pentru conducător, să permită o bună vizibilitate către exterior și în împrejurimile autocamionului și să fie sigură în cazul unui impact. În plus, din punct de vedere tehnic aceasta trebuie să permită o serie de deschideri, denumite în continuare intrări de aer, în partea frontală, în principal, pentru a facilita răcirea motorului cu ardere internă prin intermediul radiatoarelor [18], [22].

Ținând cont de aceste constrângeri producătorii trebuie să îmbine tehnologiile actuale cu reglementările în vigoare în vederea proiectării unui profil cât mai aerodinamic [1], [11], [13].

Acoperișul cabinei pentru un autocamion, convențional, este drept în axa x iar dacă în spatele acestuia se găsește zona de transport (furgonul, capitonajul) care este decalată în axa z, acest lucru generează variațiile de presiune anunțate anterior.

Un alt punct notabil în ceea ce privește potențialul pentru îmbunătățirea performanțelor aerodinamice ale cabinei sunt zonele laterale ale acesteia, în principal *colțurile*. Acestea pot fi considerate ca fiind: oglinzile laterale, joncțiunea între suprafața frontală și cea laterală de sub parbriz, în axa z, și terminațiile laterale din proximitatea furgonului.

Motoarele cu ardere internă încă sunt principalul mod de propulsie pentru autovehiculele comerciale. Cum acestea necesită dezvoltarea unei puteri crescute pentru a putea pune în mișcare un astfel de ansamblu rutier, au nevoie, evident, și de o răcire eficientă. Aceasta se poate face prin intrări de aer bine dimensionate și poziționate pe suprafața radiatoarelor pentru a permite aerului să ajungă eficient pe acestea. Din punct de vedere aerodinamic, permiterea voluntară a deflectării aerului exterior către radiatoare generează o *frână aerodinamică* prin introducerea unei rezistențe la înaintare crescute.

Zona inferioară a cabinei, este un alt punct important pentru o bună *dirijare* a aerului, în special pentru zona de sub autovehicul. Principiul teoretic de optimizare este de a avea zone bine definite fără factori perturbatori ai fluxului de aer.

Utilizând principiul enunțat în capitolul anterior, o performanță aerodinamică bună este descrisă de un flux de aer continuu și neperturbat, care generează un siaj echilibrat. Așadar, este important ca pe suprafețele laterale ale autocamioanelor, fie ca vorbim de ansamblu rutier format din cap tractor și semiremorcă ori camion simplu cu și fără remorcă, să nu existe zone mari care perturbă fluxul de aer. În principal, pentru vehiculele comerciale care au zona de încărcare a mărfii acoperită cu prelată, capitonaj ori chiar container, iar profilul este dreptunghiular încă din partea fața a autocamionului se respectă îmbunătățirile enunțate în rândurile anterioare și se poate considera că fluxul de aer este neperturbat sau are influențe foarte mici [4], [7], [12]. Totuși, o zonă care implică astfel de degradări ale fluxului de aer este cea dintre axele autovehiculului [9]. De cele mai multe ori acestea sunt acoperite de elemente tehnice cum ar fi: rezervorul de combustibil, butelii pentru aer al sistemului de frânare, cutii de depozitare și alte echipamente auxiliare.

Zona de transport a mărfii trebuie să permită atât o suprafață utilă de încărcare, cât și un volum potrivit care să permită aranjarea și încărcarea ușoară a bunurilor. Pentru studiul de față se va pune accentul pe zonele de transport de tip dreptunghiular utilizate pe autocamioane și care sunt acoperite cu prelată sau de tip frigorific ori container. Acestea, prin construcție, au dimensiuni maxime bine stabilite și date reglementările în vigoare.

În vederea deplasării pe drumurile publice a majorității autovehiculelor, roțile sunt indispensabile pentru exploatarea acestora. Dat fiind necesitatea acestora este important să fie acordată o atenție sporită a acestora mai ales dacă au impact în performanța aerodinamică [7]. Dat fiind potențialul de generare a turbulențelor și, deci, perturbarea fluxului global de aer, roțile sunt considerate elemente cu impact în aerodinamică [14], [15].

Capitolul 3. Studiul verificării performanței aerodinamice

Performanța aerodinamică poate fi apreciată prin c_D, parametru care poate fi măsurat sau calculat cu formula 1.1, ținând cont de forța aerodinamică, pe axa de interes. În cazul verificării acestei performanței prin măsurare, există, ca în multe alte domenii, două metode de încercare: mediul virtual (*CFD – Computational Fluid Dynamics*) și mediul fizic (tunel aerodinamic). Fiecare caz de încercare vine cu avantajele și dezavantajele sale. Totuși, pentru o bună dezvoltare a autovehiculelor, și nu numai, îmbinarea celor două metode de încercare este vitală pentru obținerea unor rezultate cât mai concludente [5]. Scopul acestor încercări este de a verifica performanțele exacte ale formelor proiectate, pe de o parte din punct de vedere teoretic dar și al experiențelor acumulate în timp. Astfel, prin intermediul unor încercări de acest tip se pot optimiza, soluții existente și, chiar, cerceta unele noi. Verificările în *CFD* și fizic se fac în paralel și țin cont, în principal, de aceeași parametri de intrare dar și dimensionali.

O muncă intensă este depusă pentru proiectarea unui profil aerodinamic cât mai performant. Pe lângă propunerile teoretice, încercările în mediul fizic sunt absolut necesare. Până a avea un profil finalizat, acesta trece prin mai multe etape ale dezvoltării: apariția unui model la scară redusă și mai apoi la scară 1:1. Lucrul pentru acestea este făcut în tunelul aerodinamic iar modelele sunt pregătite din diferite materiale: lut, fibră de sticlă, polistiren etc. [19]. După ce este creat modelul (fie scară redusă, fie scară normală) într-un studio de design specializat, se trece la încercarea acestuia într-un tunel aerodinamic propriu-zis. Aceste tuneluri sunt, în exploatare, de două tipuri:

- Tunel aerodinamic cu retur închis de tip Göttingen;
- Tunel aerodinamic retur deschis de tip Eiffel [19].

Figura 7 descrie aceste două tipuri de tuneluri aerodinamice, imaginea din sus este de tip Göttingen iar cea de jos este de tip Eiffel.

Pentru metoda de retur închis fluxul de aer este *recirculat* în tunelul aerodinamic pe când metoda de retur deschis descrie un flux de aer *proaspăt* de fiecare dată. Pentru tipul Göttingen avantajul este dat de faptul că necesită o putere redusă pentru punerea în mișcare a aerului din punct de vedere al costului de operare. Așadar, financiar acest tip de tunel aerodinamic este câștigător comparat cu modelul Eiffel. Totuși, un dezavantaj al acestui tunel este dat de dimensiunile foarte mari al acestuia , în special pentru modelele cu scara 1:1 [19].

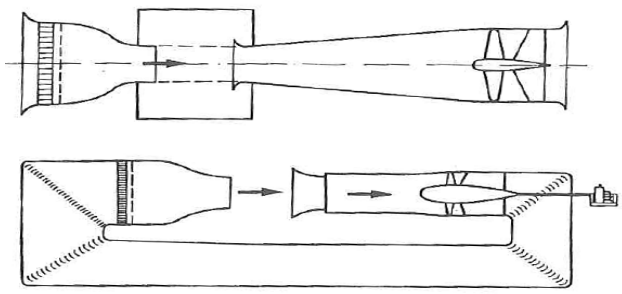


Figura 7. Tipuri de tunel aerodinamic [19].

Modelul cu retur deschis depinde foarte mult de mediul exterior, astfel că, acest tip de tunel este pretabil în zonele cu climat moderat ca urmare a necesității continue a unui flux de aer *proaspăt*. Pe lângă capacitatea acestui tunel de a putea fi operat, în exterior, are multe constrângeri legate de funcționare: condițiile de vânt nu permit o testare corespunzătoare, în ventilator pot intra frunze, ramuri de pom sau alte impurități. În figura 3.2 este prezentat ventilatorul unui tunel aerodinamic cu retur închis pentru încercări ale modelelor la scară 1:1 și se poate observa, prin comparație diametrul acestuia cu o persoană de statură normală.

În ceea ce privește autocamioanele, metodele de testare sunt ușor diferite chiar dacă principiul tunelului aerodinamic este păstrat.

Datorită dimensiunilor și maselor mari ale acestor tipuri de autovehicule este nevoie de o altă abordare pentru verificarea performanței aerodinamice în tunelul de vânt. Așadar, se au în vedere condiții diferite pentru încercarea autovehiculelor comerciale cum ar fi, de exemplu, solul în mișcare este neglijat iar roțile sunt poziționate pe o serie de fixări (marcate cu săgeți în) care pot fi vizualizate în figura 8 [20]. În aceeași figură este descris un tunel aerodinamic (*LLF – Large Low Speed*), pentru autocamioane, DNW din Olanda, care are o secțiune de test de 9,5m x 9,5m.

După cum s-a menționat anterior, verificările în mediul virtual se fac utilizând *Computational Fluid Dynamics*. Acest tip de încercare are la bază un software de calcul care măsoară direct performanța aerodinamică. Interesul adoptat pentru acestă metodă a apărut ca urmare a proceselor, relativ, lungi de dezvoltare a autovehiculelor și necesitatea scurtării acestora. CFD nu este folosit doar în aerodinamică, aplicabilitatea fiind există pe o mare varietate de domenii. Această metodă de testare are numeroase avantaje după cum urmează: reducerea timpului de test pentru pregătirea modelelor, posibilitatea încercării în paralel a mai multor configurații. De cele mai multe ori, CFD este folosit în prezicerea trendului asupra ideii de cum se va modifica curgerea aerului prin adăugarea diferitelor elemente. În mediul virtual există o multitudine de situații de vizualizare a fluxului de aer: presiuni, linii de curent, vectori și altele [19]. Totuși, pentru a avea o bună vizualizare a acestor situații enumerate anterior este nevoie ca pentru procesarea unor rezultate, programului de calcul să îi fie date o serie de date de intrare. Așadar, discutând direct de aer, în lucrarea de față, se poate considera că fluxul generat în raport cu corpul/profilul/autovehiculul creează diferite câmpuri de presiune care sunt rezultatul forțelor aerodinamice experimentate de acesta [19].

Pentru a putea executa o simulare de tip CFD a unui profil, mai multe etape trebuie urmate după cum urmează:

1. Discretizarea formei și/sau a domeniului de test și a modelului;
2. Calculul propriu-zis;
3. Post-procesarea pentru obținerea rezultatelor [19].

Așadar, atât în mediul fizic cât și în cel virtual există situații care prezintă avantaje și dezavantaje. Cu toate acestea lucrul în paralel între cele două metode este absolut necesar. Iar acest *mix* este dat de faptul că pentru un proiect, oarecare, într-o etapă de dezvoltare este necesar să se verifice diferite metode de îmbunătățire a performanței aerodinamice. Dacă ar fi să ne bazăm pentru încercarea acestora doar în mediul fizic ar fi necesar un timp destul de mare de testare și de pregătire al modelelor, energie consumată pentru punerea în funcțiune a tunelului aerodinamic și un volum, relativ, mare de muncă din punct de vedere al personalului. Dacă ne raportăm la același stadiu de dezvoltare iar încercările să fie doar în mediul virtual putem spune că simultan putem testa toate soluțiile propuse. Totuși, trebuie menționat faptul că simularea CFD trebuie pregătită si



Figura 8. Tunel aerodinamic DNW, Olanda (*imagine stânga*). Poziționare autocamion în tunel aerodinamic DNW (*imagine dreapta*) [20], [63].

are un timp de *lucru* specific. Așadar, nu putem descrie o rețetă perfectă pentru momentul utilizării fie a metodelor de încercare din mediul fizic fie a celor din mediul virtual. Pentru diferite proiecte se face o îmbinare, după cum a mai fost menționat, între cele două metode pentru obținerea unor rezultate cât mai bune și precise: mediul virtual permite vizualizarea cu ușurință a fluxului de aer la diferite viteze însă din cauza diferitelor constrângeri, valorile numerice pot avea mici erori si astfel nu reflectă realitatea; mediul fizic nu permite o vizualizare atât de ușoară a fluxului de aer totuși dat fiind metodele de măsurare de măsurare de ultimă generație pot genera valori numerice robuste care pot fi luat în considerare.

Capitolul 4. Analiza performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor

Pentru analiza performanțelor aerodinamice ale autocamioanelor s-au ales în principal ansamble rutiere care au în componența lor semiremorci, de altfel, acestea fiind cele mai uzuale în utilizarea transportului de mărfuri, în special pe autostrăzi și drumuri de mare viteză. Au fost alese mai multe modele de autocamioane, fie des întâlnite pe drumurile publice, fie soluții care au doar potențial aerodinamic din punct de vedere al formei.

Aceste soluții au fost modelate în 3D pentru a putea fi, ulterior, supuse încercărilor în mediul virtual și au scara de 1:35. Mai mult de atât sunt modele relativ simpliste, în special în partea de arhitectura de sub autovehicul. S-a ales să se facă acestă modelare simplistă pentru a evita timpii mari de calcul al simulărilor numerice. În același timp modelele sunt solide complete, așadar criteriul de învârtire al roților este exclus nefiind luat în calcul acest factor în ceea ce privește performanța aerodinamică, aceasta fiind verificată doar din punct de vedere al formei autocamioanelor.

Modelele analizate vor fi prezentate în figura 9 și se va începe cu un autocamion convențional. Deși acesta nu este de actualitate și există deja soluții de îmbunătățire a performanței aerodinamice aplicate pe el, este necesar să fie prezentat un model de bază, un model comparativ cu care se pot pune în paralel diferite soluții și astfel se poate observa mai ușor evoluția în ceea ce privește îmbunătățirea sau degradarea performanței aerodinamice prin soluțiile propuse.

Pentru a verifica soluțiile constructive ale autocamioanelor, împreună cu autocamionul convențional, se va face prin observarea curgerii aerului în jurul

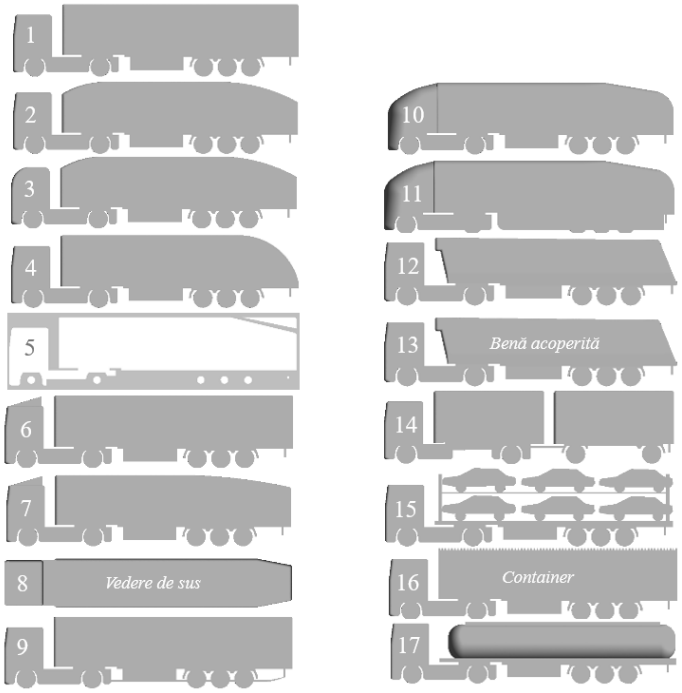


Figura 9. Soluții de autocamioane analizate.

geometriei dar și a măsurătorilor forței pe axa x se va concluziona posibilitatea legată de îmbunătățire a diferitelor soluții constructive.

În ceea ce privește încercarea în mediul virtual a modelelor prezentate mai sus se va face o scurtă prezentare a configurației de test. Din punct de vedere al zonei de test, se va utiliza doar o cameră de test a cărei dimensiuni se pot observa în figura 10. Aceasta este descrisă de două vederi (lateral și frontal) și este prezentată în configurația încercării pentru autocamionul convențional. Cu aceeași ocazie, în următoare figură, se pot observa cotele de gabarit ale autocamionului la scara 1:35; cote care sunt același și pentru celelalte configurații.

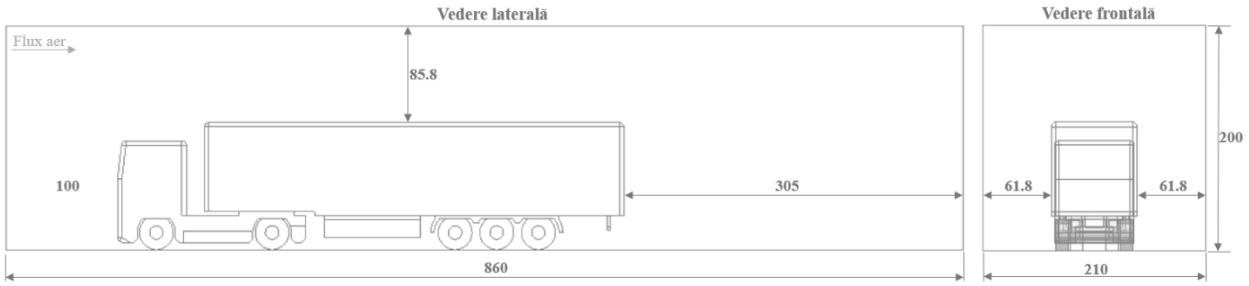


Figura 10. Camera de test din mediul virtual cu autocamion convențional la scara 1:35. *Valori exprimate în mm.*

Pentru o bună observare a fluxului de aer, după cum a fost menționat și în capitolele anterioare discretizarea este un factor foarte important. Astfel, că s-a ales ca dimensiune pentru elementele de discretizare să aibă o valoare de 3 mm. În figura 11 este prezentată discretizarea modelului.

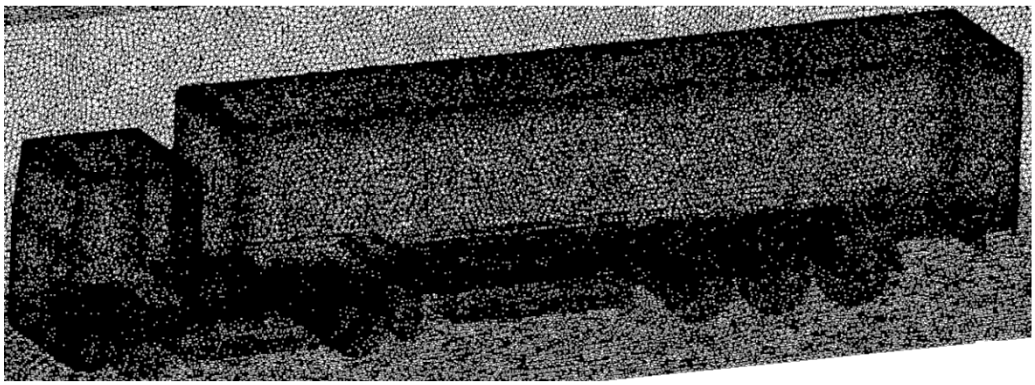


Figura 11. Discretizarea modelului și a camerei de test.

Din punct de vedere al datelor de intrare pentru simulările numerice s-a ales să se adopte ca viteză a fluxului de aer, în camera de test, o valoare de 25 m/s (90 km/h) iar pentru pereții camerei de test a fost pusă condiția de pereți fără alunecare. În ceea privește puterea de calcul aceasta a avut următoarele caracteristici: Procesor Intel® Core™ i5-7200U @ 2.5 GHz, 12 GB memorie RAM, placă video integrata Intel® HD Graphics 620.

Studiul din punct de vedere aerodinamic s-a făcut pe baza analizei curgerii aerului pe fiecare dintre dintre soluțiile prezentate în figura 9. Mai mult de atât, în tabel 4.1 este descrisă, comparativ, forța pe axa x între autocamionul convențional și celelalte confirgurații.

Tabel 4.1. Valoarea forței pe axa x pentru cele 17 modele de autocamioane.

	Imagine	Fx	Δ % față de 3,296 N
Model 1		3,296 N *(bază)*	0.00%
Model 2		3,040 N	-7,76%
Model 3		3,314 N	+0,55%
Model 4		4,787 N	+45,26%
Model 5		3,566 N	+8,20%
Model 6		2,993 N	-9,20%
Model 7		2,845 N	-13,69%
Model 8		3,406 N	+3,34%
Model 9		3,296 N	0,00%
Model 10		2,350 N	-28,70%
Model 11		2,235 N	-32,20%
Model 12		4,005 N	+21,52%
Model 13		3,496 N	+6,07%
Model 14		3,785 N	+14,85%
Model 15		4,002 N	+21.43%
Model 16		5,033 N	+52,69%
Model 17		2,205 N	-33,13%

Pe baza centralizării valorilor obținute în tabelul de mai sus se poate observa că există o variație destul de mare a acestora. Cea mai bună performanță aerodinamică este descrisă de Model 17 care este urmată de Model 11 și descriu îmbunătățiri ale performanței aerodinamice cu peste 30% față de autocamionul convențional. La polul opus, cu o performanță aerodinamică foarte degradantă se găsesc Model 16 și Model 4 care generează degradare aerodinamică cu peste 45%, chiar până la 50%.

În cadrul aceleiași lucrări s-a ales să se construiască și un tunel aerodinamic experimental la scară mică pentru a putea evalua în mediul fizic performanțele aerodinamice ale diferitelor



Figura 13. Model simplist patrulater *(stânga),* model simplist circular (*dreapta).*

soluții constructive. S-a ales să se construiască un tunel cu retur deschis.

Dat fiind obiectul lucrării de față, verificarea acestei performanțe în mediul fizic este vitală în obținerea unei imagini cât mai complete asupra subiectului abordat. Soluția de tunel aerodinamic cu retur deschis a fost aleasă ca urmare a ușurinței construcției dar și dat fiind faptul că se pretează din punct de vedere al încercărilor experimentale. Dimensiunile acesteia au fost alese specific pentru a îmbina corectitudinea și vizualizarea rezultatelor cu timpul și volumul de lucru pentru proiectare și construire. Modul de proiectare a fost ales să fie unul simplist și are la bază 3 module de interes: zona de contracție, de test și cea de difuzie(colecție). Proiectarea propriu-zisă a început de la zona de test: fiind un tunel de dimensiuni reduse s-a creat o zonă pentru vizualizare a curgerii fluxului de aer. Așadar, zona de test a fost proiectată cu dimensiuni mai mari, în special în lungime, față de cotele de gabarit ale geometrilor încercate. Se știe faptul că apropierea pereților camerei de test de modelul de test duce la influențarea rezultatelor obținute într-un mod negativ [5]. Totuși, dimensiunile acestuia au fost limitative dată fiind necesitatea manevrabilității ulterioare a tunelului aerodinamic. În figura 12 este prezentat modelul experimental construit și notarea principalelor zone descris anterior. Din figură se pot observa cele 3 module, distincte, standard ale tunelului aerodinamic experimental; în plus, modelul experimental a fost echipat și cu un sistem de fum pentru vizualizarea fluxului de aer.



Figura 12. Modelul experimental și cele 3 module: *1 – zona de contracție, 2 - zona de test, 3 - zona de colecție*.

Înainte de a încerca o serie de modele la scară (1:35), s-a ales să se testeze două geometrii simpliste pentru verificarea fluxului de aer în modelul experimental. În figura 13 se pot observa aceste curgeri. S-a observat că cele două curgeri ale modelelor simpliste au o caracteristică teoretic, așadar experimentul prin care se va face estimarea calitativa a performanțelor aerodinamice cu tunelul aerodinamic construit va descrie rezultate palpabile și suficient de robuste.

Utilizând tunelul de vânt machetat și prezentata în anterior, s-a ales să se verifice și în mediul fizic performanța aerodinamică a autocamionului convențional. În principal, analiza performanței aerodinamice se va face pe baza curgerii aerului în jurul geometriei și observarea acesteia din vedere laterală; putând astfel să se compare cu încercarea din mediul virtual. În figura 14 este prezentat modelul la scara 1:35 a unui autocamion convențional printat 3D și care va fi utilizat la încercare. Așadar, acesta a fost poziționat în camera de test și s-a pornit ventilatorul la o viteză redusă pentru a ajuta la vizualizarea cât mai bine a fluxului de aer. În figura 4.58 este prezentată curgerea aerului pe partea frontală a autocamionului, la cabină dar și în partea din spate a semiremorcii unde se creează siajul.



Figura 14. Autocamionul convențional la scara 1:35. *Geometrie printată 3D.*

Din figura 15 se poate observa curgerea aerului pentru autocamionul convențional. Pentru cabină se distinge fluxul de aer turbionar pe zona acoperișului și care se păstrează turbulent mai departe către plafonul semiremorcii. În ceea ce privește curgerea aerului pentru zona spate a semiremorcii se observă destul de clar zona de desprindere a acestuia dar se poate observa și forma incipientă a siajului. Pentru semiremorcă se observă că după desprindere, aerul continuă să curgă către spatele autocamionului și generează, practic o curgere teoretică.



Figura 15. Curgerea aerului pe un autocamion convențional pentru zona cabinei și zona spate a semiremorcii – *încercare în tunel aerodincamic experimental*.

Se poate spune că verificare în mediul fizic cu tunelul aerodinamic experimental generează o idee mult mai veridică în ceea ce privește observarea curgerii aerului.

S-a ales să se încerce în mediul fizic, în tunelul aerodinamic experimental, un model de autocamion cu bune performanțe aerodinamice care a fost verificat în mediul virtual și s-a observat că are o scădere a forței pe axa x în comparație cu autocamionul convențional. Așadar, în figura 16 este sunt prezentat un astfel de camion iar analiza se va face pe baza observării curgerii aerului.



Figura 16. Autocamionul aerodinamic printat 3D la scara 1:35.

Se observă în figura 16 că există o diferență semnificativă a curgerii aerului atât în zona cabinei cât și în partea din spate a semiremorcii iar curgerile sunt similare cu cele observate în simulările numerice.

Având în comparație încercarea în mediul fizic cu cea din mediul virtual se poate spune faptul că există similitudini între cele două în ceea ce privește curgerea aerului pe geometrie însă verificarea în tunelul aerodinamic experimental are potențialul de a permite o vizualizare mult mai realistă a fluxului de aer ca urmare a faptului că tipul de curgere al aerului (laminar sau turbulent) este dat, în sine, de metodele arhitecturale utilizate.

În cadrul lucrării s-a ales și să se propună, ca utilizând soluții deja existente, să se adapteze acestea în vederea optimizării performanței aerodinamice a autocamioanelor, în special cele cu semiremorcă.

S-a ales să se plece de la un autocamion convențional și prin modificarea lungimii șasiului și a înălțimii din spate a zonei de transport acestea să poată descrie o foarte bună performanță aerodinamică. Astfel, în figura 17 se poate observa evoluția de la autocamionul convențional la cel concept care are cele mai bune performanțe aerodinamice.

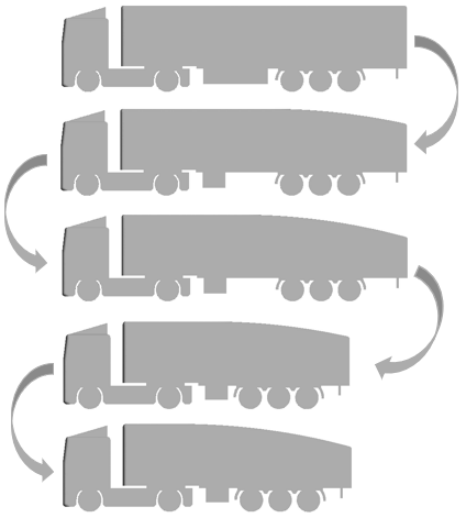


Figura 17.

Evoluția autocamionului concept.

Capitolul 5. Inteligența artificială în domeniul aerodinamicii

În ultimii ani, de la momentul redactării acestei lucrări, s-a exprimat un interes din ce în ce mai crescut pentru inteligența artificială (IA) în diferite domenii. Acești algoritmi au capacitatea de a analiza într-un timp foarte scurt diferite soluții și de a o găsi pe cea mai fezabilă și aplicabilă pentru cerința dată [58]. Printre vastele domenii de, posibilă, aplicare a IA se găsește și ingineria, în cazul de față domeniul aerodinamicii. Numeroase încercări și analize s-au făcut pentru a prezenta și în același timp, dacă este fezabil, de a exploata acest *instrument* pentru o mai bună convergență a diferitelor profile cu o performanță aerodinamică cât mai crescută [59], [60].

IA funcționează direct, cel puțin la acest moment, pe o serie de date/cerințe/indicații precizate de către un utilizator uman, și mai departe, prin intermediul algoritmilor, să genereze rezultate concludente.

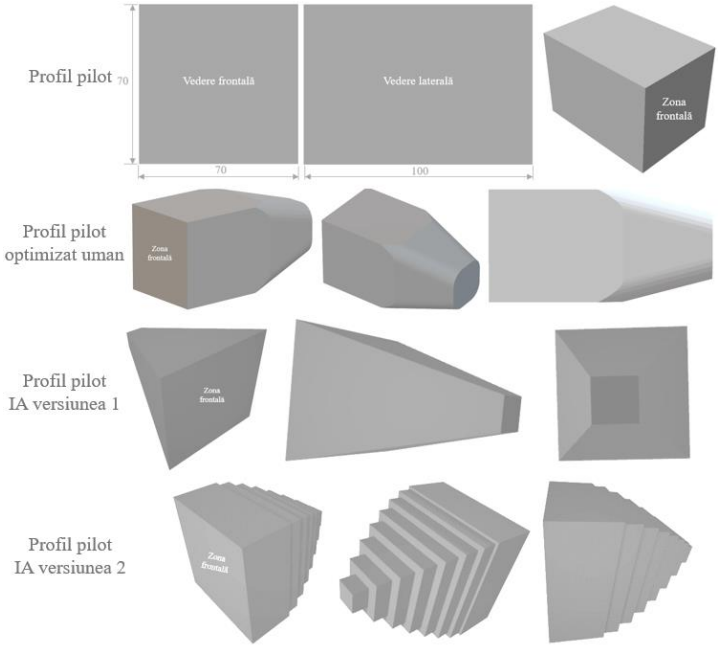


Figura 18. Profilul pilot și optimizările acestuia.

Pentru această lucrare se va face un experiment pentru analizarea soluțiilor propuse de IA în domeniul aerodinamicii. Așadar, experimentul va arăta astfel: utilizatorul uman va construi un profil geometric simplist, fără a ține cont de performanța aerodinamică a acestuia. Acest profil *pilot* va fi prezentat atât utilizatorului uman cât și unui program de inteligență artificială și se va cere, în ambele situații, să se optimizeze din punct de vedere aerodinamic acest profil. În figura 18 este prezentat profilul pilot și soluțiile de optimizare ale utilizatorului uman și cele făcute de către programul de inteligență artificială. Pe baza acestor 4 geometrii s-a făcut o verificare in mediul virtual și s-a observat faptul că pe baza acestui experiment se poate descrie faptul că potențialul de utilizare al acestui instrument în faza de dezvoltare al autocamioanelor poate deveni o necesitate pentru o mai bună dezvoltare globală.

Capitolul 6. Concluzii

Aerodinamica a fost și este un indicator puternic în ceea ce privește performanța energetică a autovehiculelor, fie că vorbim de cele din clasă mică, medie, mare sau chiar autocamioane. Aceasta este unul dintre factorii care contribuie direct la reducerea rezistenței la înaintare și care, adiacent, are beneficii legate de stabilitate și de reducere a zgomotului în rulare.

Pe baza lucrării curente s-a făcut o analiză asupra performanțelor aerodinamice a autocamioanelor. Performanță care a fost studiată cu mult interes și integrată de către toți producătorii în partea de dezvoltare a fiecărui model. Totuși, o modelare ideală din punct de vedere aerodinamic la acest moment nu este fezabilă ca urmare a tehnologiei care nu poate cuprinde încă toate ideile concept. Așadar, producătorii trebuie să adapteze fiecare idee sau ideile la constrângerile tehnice actuale, cele date de transportul de mărfuri dar și reglementări. Mai mult de atât, domeniul aerodinamicii necesită încercări, fie în fizic sau virtual iar acest lucru, pentru camioane mai ales descrie un volum mare de resurse: fie că vorbim de financiare, de calcul sau chiar de spațiu. Analiza performanțelor aerodinamice din actuala lucrare a fost făcută pe direcția observării potențialelor zone care mai pot fi optimizate înainte de a trece la noi tehnologii și, de ce nu, poate alte configurații arhitecturale ale autocamioanelor.

S-a observat că versiunile de autocamioane actuale aflate în exploatare au un grad ridicat de elemente auxiliare care reduc coeficientul aerodinamic sau care chiar prin designul lor aduc o notă pozitivă în ceea ce privește această performanță. Astfel că, punctul de plecare pentru a urma acest trend este de a optimiza soluțiile deja existente sau utilizarea celor preexistente pentru dezvolta unele noi.

Concret, pe baza analizei din lucrarea de față s-a observat că zona cea mai importantă pentru performanța aerodinamică este zona spate a autocamioanelor, deci zona de creare a siajului dar care este corelată cu tot ce se întâmplă înainte de aceasta. Din punct de vedere al analizelor efectuate, acestea s-au făcut pe autocamioane cu scara 1:35 pentru a putea reduce timpii de efectuare al simulărilor însă această alegere ar putea avea și efecte negative deoarece descrie posibilitatea inducerii unor rezultate eronate. Totuși, orientare globală de încercare și pe autocamioane la scară rămâne valabilă și eficientă pentru aproximarea diferitelor impacturi în performanța aerodinamică.

S-a observat că pentru cele două autocamioane cu formă aerodinamică verificate în mediul virtual acestea au descris performanțe bune și din punct de vedere arhitectural acestea ar avea un potențial destul de mare de aplicabilitate.

Având în vedere analiza făcută în această lucrare mai multe soluții se pot propune pentru îmbunătățirea performanțelor aerodinamice pentru diferite soluții constructive. Acestea, deși nu vor fi la același nivel cu autocamioane performante din punct de vedere aerodinamic, totuși vor îmbunătăți coeficientul aerodinamic.

Pentru a pune în practică o serie de soluții pentru îmbunătățirea performanțelor, se va face orientarea ca pentru cercetările viitoare să se facă o extindere a încercărilor în mediul virtual pentru exploatarea totală a soluțiilor tehnice care pot genera un câștig în performanța aerodinamică prin integrarea tuturor constrângerilor și reglementările actuale dar și alinierea cu noile tehnologii. Se va pune și accentul pe rafinarea obținerii rezultatelor în tunelul aerodinamic la scară redusă.

Bibliografie

[1] Mihail-Daniel Iozsa, Caroserii pentru autovehicule rutiere, Editura Politehnica Press, București, 2016;

[2] Aurel P. Stoicescu, Proiectarea performanțelor de tracțiune și de consum ale automobilelor, Editura Tehnica, București, 2007;

[3] Constantin Ghiulai, Mecanica Automobilului, Editura Tehnică, București, 1965

[4] **E M Vieru**, C Stan, I Laurențiu, Analysis of the aerodynamic performance of truck semitrailers, Economicity, Safety and Reliability for Motor Vehicles Congress (and SIAR International Automotive and Transport Engineering Congress), Bucharest, 2023, doi:10.1088/1757-899X/1303/1/012044

[5] **E M Vieru,** D M Iozsa, A M Manea and L Ilea, Analysis of different dimensions of a virtual wind tunnel and different wall conditions, Economicity, Safety and Reliability for Motor Vehicles Congress (and SIAR International Automotive and Transport Engineering Congress), Bucharest, 2023, doi:10.1088/1757-899X/1303/1/012043

[6] **E M Vieru**, M D Iozsa, L Ilea and G Frățilă, The influence of warning lights on the truck cabins on aerodynamic performance, The 32nd International Congress of SIAR of Automotive and Transport, Timisoara, 2023**,** doi:10.1088/1757-899X/1311/1/012017

[7] Navid Balazadeh Meresht, Sina Moghadasi, Sandeep Munshi, Mahdi Shahbakhti, Gordon McTaggart-Cowan, Advances in Vehicle and Powertrain Efficiency of Long-Haul Commercial Vehicles: A Review, 2023

[8] **E M Vieru**, D Iozsa, L Ilea and G Frățilă, Influence of air flow in the lateral areas of a tractor unit on its, aerodynamic performance, The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022), Iasi, 2022, doi:10.1088/1757-899X/1262/1/012075

[9] Wei Gao, Yuping He, Deng Zhaowen, A Comparative Study of Tail Air-Deflector Designs on Aerodynamic Drag Reduction of Medium-Duty Trucks, 2022

[10] L Scurtu, M I Gheres, Numerical evaluation of vehicles aerodynamics in platoon using CFD simulation, The XXXI-st SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering "Automotive and Integrated Transport Systems" (AITS 2021), Chisinau, 2021, doi:10.1088/1757-899X/1220/1/012024

[11] A A Markina, A D Lukashuk, S N Chepkasov, A V Starovoytenko, Improving aerodynamic characteristics for drag reduction of heavy truck, Mechanical and Automation Engineering for Industry, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032032

[12] Yifan Gan, Linghao Li, Optimization of Aerodynamic Profile of Ground Vehicle, 2023 2nd International Conference on Aerospace, Aerodynamics and Mechatronics Engineering (AAME 2023), Beijing, 2023, DOI 10.1088/1742-6596/2569/1/012068

[13] J Liu, C Zhuang, S Liu and H M Zhou, Numerical simulation of heavy truck's aerodynamic noise, 2nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering 19–22 August 2019, Beijing, 2019, doi:10.1088/1757-899X/657/1/012070

[14] L Ilea, D Iozsa, Wheels aerodynamics and impact on passenger vehicles drag coefficient, 2018, DOI 10.1088/1757-899X/444/7/072005

[15] SeongJin Cho, SangWook LEE, Aerodynamic Performance Analysis on Various Wheel Configurations of Commercial Vehicle, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3826917/v1

[16] Ausilio Bauen, Inmaculada Gomez, Dave OudeNijeweme, Maria Paraschiv, Alternative Fuels Expert group report, ISBN 978-92-79-71857-1

[17] L 235/59 JURNALUL OFICIAL AL COMUNITĂȚILOR EUROPENE 17.9.1996. DIRECTIVA 96/53/CE A CONSILIULUI din 25 iulie 1996 de stabilire, pentru anumite vehicule rutiere care circulă în interiorul Comunității, a dimensiunilor maxime autorizate în traficul național și internațional și a greutății maxime autorizate în traficul international

[18] D Iozsa, C Stan, L Ilea, Study on the Influence of the Convoy Rolling over Aerodynamic Resistance, CAR2017 International Congress of Automotive and Transport Engineering - Mobility Engineering and Environment 8–10 November 2017, Pitesti, 2017, doi:10.1088/1757-899X/252/1/012035

[19] Wolf-Heinrich Hucho, Syed R. Ahmed, AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, Society of Automotive Engineers, 1998, ISBN 0768000297, 9780768000290

[20] Eddy Willemsen, Kurt Pengel, Herman Holthusen and Albert Kupper (2011), Automotive Testing in in the German-Dutch Wind Tunnels, New Trends and Developments in Automotive Industry, Prof. MarcelloChiaberge (Ed.), ISBN: 978-953-307-998-8, InTech

[21] Odenir de Almeida, Rodrigo Mendes Alves, Validation of Experimental and Numerical Techniques for Flow Analysis over an Ahmed Body, International Journal of Engineering Research and Applications, 2017, DOI: 10.9790/9622-0704036371

[22] *** https://www.worktruckonline.com/10140905/history-of-the-first-truck-1896, accesat la 03.11.2024

[23] *** https://www.ontheroadtrends.com/history-and-development-of-the-truck/?lang=en, accesat la 06.01.2025

[24] *** https://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Actros, accesat la 06.01.2025

[25] *** https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/mercedes-benz-eactros-600-is-international-truck-of-the-year-2025-52835440?modal=asset-modal-uid-30903, accesat la 09.01.2025

[26] *** https://www.leylandtrucksltd.co.uk/en-gb/about-leyland-trucks/leyland-history, accesat la 11.01.2025

[27] *** https://www.mercedes-benz-trucks.com/ro/ro/trucks/eactros-600.html, accesat la 11.01.2025

[28] *** https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-trailer_truck, accesat la 11.01.2025

[29] *** https://en.wikipedia.org/wiki/Chassis_configuration, accesat la 12.12.2024

[30] *** https://www.euload.com/info.php?catID=26, accesat la 22.02.2025

[31] *** https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/intermodal-freight-transport-08-2023/ro/, accesat la 15.03.2025

[32] *** https://www.audi.ro/stories/aerodinamica-lupta-pentru-fiecare-miime, accesat la 12.11.2024

[33] *** 15 https://www.scdigest.com/ASSETS/NEWSVIEWS/12-09-27-1.php?cid=6252, accesat la 02.11.2024

[34] *** https://www.truckanddriver.co.uk/latest-stories/thinking-about-the-rare-daf-3200-ati-an-obscure-and-interesting-truck-from-the-early-90s/, accesat la 06.02.2025

[35] *** https://en.wikipedia.org/wiki/Wake_turbulence, accesat la 03.11.2024

[36] *** https://www.inverse.com/innovation/tesla-semi-price-specs, accesat la 09.01.2025

[37]***https://transporteprofesional.es/noticias-fabricantes/marcas-camion/mercedes-benz/nuevas-versiones-del-actros-y-arocs-de-mercedes, accesat la 06.01.2025

[38]***https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/second-generation-of-mirrorcam-mercedes-benz-trucks-is-evolving-some-important-details-of-the-mirror-camera-system-51930556, accesat la 06.01.2025

[39] *** https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/economy-from-goodaerodynamics-the-new-actros-is-trimmed-for-efficiency-45659918, accesat la 06.01.2025

[40] *** https://www.greencarcongress.com/2012/09/mbaero-2010918.html, accesat la 02.03.2025

[41] *** https://www.volvotrucks.ro/ro-ro/news/press-releases/2024/jan/new-more-powerful-engine-for-volvo-fh16-gives-maximized-productivity.html, accesat la 06.01.2025

[42]***https://www.daf.com/en/news-and-media/news-articles/global/2023/12-05-2023-new-generation-daf-xf-450-crowned-green-truck-2023, accesat la 06.01.2025

[43] *** https://www.autotrader.co.za/commercial/news-and-advice/transportation-news/uncovered-why-the-fh-is-one-of-the-most-aerodynamic-trucks-around/10376, accesat la 06.01.2025

[44] *** https://www.carbodydesign.com/2011/11/mercedes-benz-aero-trailer-concept/, accesat la 09.02.2025

[45] *** https://www.cargobull.com/ro/presa/2021/ecogeneration, accesat la 09.02.2025

[46]***https://www.fleetequipmentmag.com/saving-fuel-improved-truck-trailer-aerodynamic/, accesat la 09.02.2025

[47] *** https://www.fleetequipmentmag.com/aerodynamic-heavy-duty-truck-wheel-covers/, accesat la 09.02.2025

[48] *** https://www.volvotrucks.ro/ro-ro/trucks/electric.html, accesat la 09.02.2025

[49] Miguel A. González Hernández, Ana I. Moreno López, Artur A. Jarzabek, José M. Perales Perales, Yuliang Wu and Sun Xiaoxiao, Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel, 2013, DOI: 10.5772/54169

[50] *** https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/road-transport/heavy-duty-vehicles_en, accesat la 20.04.2025

[51] *** https://www.tesla.com/semi, accesat la 09.02.2025

[52]***https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/safe-vehicles/archive/safety-design-needs/heavy-goods-vehicles_en, accesat la 09.02.2025

[53] *** https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2022/dec/volvo-trucks-cuts-fuel-use-in-road-test.html, accesat la 10.02.2025

[54] *** https://www.daimlertruckshuntingwood.com.au/blog-posts/fuel-efficiency-fore-new-actros-13-litre-delivers-fuel-cuts-four-cent, accesat la 10.02.2025

[55] *** https://en.wikipedia.org/wiki/Volvo_FH, accesat la 10.02.2025

[56] *** https://www.horiba.com/aut/mobility/products/wind-tunnel-balance/, accesat la 10.02.2025

[57] Cihan Bayındırlı, Yahya Akansu, M. Sahir Salman, The Determination Of Aerodynamic Drag Coefficient Of Truck and Trailer Model By Wind Tunnel Tests, 2016, International Journal of Automotive Engineering and Technologies 5(2):53, DOI:10.18245/ijaet.11754

[58] *** https://ro.wikipedia.org/wiki/Inteligen%C8%9B%C4%83_artificial%C4%83, accesat la 04.04.2025

[59] Jiaqing Kou, Tianbai Xiao, Artificial intelligence and machine learning in aerodynamics, 2024, DOI:10.3934/mina.2024009

[60] *** https://www.navasto.de/resources/blog/artificial-intelligence-in-engineering/, accesat la 04.04.2024

[61] *** https://chatgpt.com/, accesat la 04.04.2025

[62] *** https://www.youtube.com/watch?v=1tjJmArxVBM, accesat la 10.02.2025

[63]***https://www.studocu.com/ro/document/universitatea-politehnica-din-bucuresti/dinamica-autovehiculelor/cap-3-rezistente-la-inaintare/10089286, accesat la 15.12.2024

[64]***https://blogs.vahak.in/what-are-the-different-categories-of-trucks-in-india/, accesat la 06.01.2025