



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Transporturi
Departamentul Autovehicule rutiere

***Cercetări privind îmbunătățirea performanței
aerodinamice ale autovehiculelor***

-Optimizarea aerodinamică a autovehiculelor-

- Rezumatul tezei de doctorat -

Conducător de doctorat: Prof.univ.em.dr.ing. Gheorghe Frățilă

Autor: Ing. Laurențiu Ilea

București
2023

Mulțumiri

Sunt profund recunoscător profesorilor care mi-au ghidat fiecare pas în parcursul academic, cu profesionalism și înțelegere pentru anii tinereții mele. Apreciez în mod deosebit îndrumarea oferită de conducătorul acestei teze – prof. dr. ing. Gheorghe Frățilă, un adevărat exemplu de dăruire și profesionalism, alături de conf. dr. ing. Daniel Iozsa și prof. dr. ing. Mihaela Popa, fără de care această lucrare nu ar fi fost posibilă. Îmi exprim recunoștința și respectul față de întregul colectiv de cadre didactice din cadrul Departamentului de Autovehicule Rutiere al Facultății de Transporturi al Universității Politehnica din București.

Apreciez sprijinul și îndrumarea oferită de colegii de la Renault Technologie Roumanie, unde am avut șansa să aplic și să-mi dezvolt cunoștințele și abilitățile de inginerie a automobilelor. Mulțumiri speciale colegei mele dr. ing. Raluca Iovănel, pentru îndrumare directă pe parcursul stagiului de practică în echipa de simulare numerică tip CFD, asociată programului de cercetare SMART, program care mi-a oferit șansa de a finaliza acest studiu.

Nu în ultimul rând, le mulțumesc părinților, soției și fiului meu, pentru că mi-au fost alături și ca m-au ajutat să depășesc momentele dificile.

Cuvinte cheie

Aerodinamica autovehiculelor de intervenție

Optimizare aerodinamică

Reducerea emisiilor poluante pentru autovehicule

Studiu CFD pentru aerodinamica autovehiculelor

CUPRINSUL LUCRĂRII

1. INTRODUCERE

1.1. AERODINAMICA ÎN INDUSTRIA AUTOVEHICULELOR

1.2. OBIECTIVELE TEZEI

1.3. STRUCTURA TEZEI

2. AERODINAMICA AUTOVEHICULELOR RUTIERE

2.1. PRINCIPIILE AERODINAMICE ALE AUTOVEHICULELOR RUTIERE

2.1.1. LINIILE DE CURENT

2.1.2. PRESIUNEA AERULUI

2.1.3. DENSITATEA AERULUI

2.1.4. VÂSCOZITATEA AERULUI

2.1.5. NUMĂRUL REYNOLDS

2.1.6. STRATUL LIMITĂ

2.1.7. COEFICIENTUL DE FRECARĂ

2.1.8. RELAȚIA BERNOULLI

2.1.9. DISTRIBUȚIA GENERALĂ A PRESIUNII ÎN VECINĂTATEA UNUI VEHICUL

2.2. EVALUAREA FORȚEI AERODINAMICE

2.3. METODE DE MĂSURARE A REZISTENȚEI AERODINAMICE A AUTOVEHICULELOR

2.4. METODA TUNELULUI AERODINAMIC

2.4.1. TIPURI DE TUNELURI AERODINAMICE

2.4.2. DIFICULTĂȚI ÎN PROIECTAREA UNUI TUNEL AERODINAMIC

2.4.3. AVANTAJELE ȘI DEZAVANTAJELE MĂSURĂTORILOR ÎN TUNELUL AERODINAMIC

2.5. AUTOVEHICULE DE REFERINȚĂ ÎN ISTORIA AERODINAMICĂ

3. STADIUL ACTUAL AL PROBLEMATICII STUDIAȚE

3.1. CARACTERISTICILE AUTOVEHICULULUI CARE INFLUENȚEAZĂ FORȚA AERODINAMICĂ

3.1.1. DIMENSIUNILE AUTOVEHICULELOR

3.1.2. DESIGN-UL AUTOVEHICULELOR

3.1.3. ACCESORII AERODINAMICE GENERICE

3.2. LITERATURA DE SPECIALITATE

4. MODELE MATEMATICE PENTRU SIMULĂRI CFD

4.1. ECUAȚIILE NAVIER-STOKES

4.2. TURBULENȚELE ȘI MODUL ÎN CARE SUNT MODELATE

4.3. METODA REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)

4.4. METODA NUMERICĂ DIRECTĂ (DNS)

4.5. MODEL DE TURBULENȚĂ K - E

4.6. MODEL DE TURBULENȚĂ K - E REALIZABIL

4.7. MODEL DE TURBULENȚĂ K - Ω

4.8. MODELUL DETACHED EDDY SYSTEM (DES)

4.9. MODELUL LARGE EDDY SIMULATION (LES)

4.10. METODA LATTICE BOLTZMANN

5. DETERMINAREA FORȚEI AERODINAMICE PRIN METODA CFD

5.1. MODELUL DE PROIECTARE ASISTATĂ PE CALCULATOR (CAD)

5.2. MEDIUL DE TESTARE

5.3. DISCRETIZAREA MEDIULUI VIRTUAL DE TESTARE

5.4. CONDIȚII LA LIMITĂ

5.5. CONVERGENȚA REZULTATELOR SIMULĂRII CFD

5.6. REZULTATELE AERODINAMICE PENTRU MODELELE STUDIAȚE, FĂRĂ DISPOZITIV DE AVERTIZARE LUMINOASĂ

5.7. REZULTATELE AERODINAMICE PENTRU MODELELE STUDIAȚE, CU DISPOZITIV DE AVERTIZARE LUMINOASĂ

5.8. STUDII DE ÎMBUNĂȚĂȚIRE A PERFORMANȚEI AERODINAMICE A VEHICULELOR DE INTERVENȚIE

5.9. INFLUENȚA VÂNTULUI LATERAL ASUPRA AERODINAMICII AUTOVEHICULULUI

5.10. REZULTATE CFD PENTRU AUTOVEHICULE DE INTERVENȚIE, OPTIMIZATE AERODINAMIC

5.11. STUDII PRIVIND DISPOZITIVELE DE AVERTIZARE LUMINOASĂ PENTRU AUTOCAMIOANE

6. REZULTATE EXPERIMENTALE

7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1. CONCLUZII FINALE

7.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

7.3. CERCETĂRI VIITOARE

NOTAȚII UTILIZATE

LISTA ABREVIERILOR

BIBLIOGRAFIE

1. INTRODUCERE

Pentru asigurarea unui sistem de transport (comercial sau necomercial) eficient și curat, organismele legislative au introdus primul set de reguli [1] privind emisiile autovehiculelor cu câteva decenii în urmă, cu scopul de a reduce efectele poluării asupra oamenilor și mediului [2]. Industria autovehiculelor a început astfel un proces de transformare care este încă în curs. Datorită diversității mari de factori și a complexității problemei, tema este intens disputată în industrie dar și în lumea academică. Chiar dacă se vede o evoluție importantă în domenii precum tehnologia sistemului de propulsie, designul autovehiculelor, tehnologia materialelor etc., încă există soluții pentru îmbunătățirea performanței autovehiculelor, iar inginerii lucrează zilnic pentru a le găsi și a le face disponibile pentru utilizatorii de autovehicule.

În acest context, lucrarea actuală caută, prin mijloace CFD, să îmbunătățească performanța aerodinamică a vehiculelor de intervenție. Acest tip de autovehicule speciale sunt cel mai frecvent scutite de la normele de emisie pentru autovehiculele rutiere [4], dar contribuie la poluarea aerului urban și suburban, în special din cauza dispozitivelor de avertizare montate pe plafon. Studiul practic a fost organizat în 3 părți. Prima parte este axată pe evaluarea performanței aerodinamice a trei tipuri de caroserie, respectiv caroseriile care sunt cel mai frecvent utilizate de către autorități și forțele de intervenție – sedan, hatch back și SUV. A doua parte va determina influența aerodinamică a dispozitivelor de avertizare luminoasă, în diferite cazuri de utilizare și, în final, a treia parte vizează îmbunătățirea performanțelor autovehiculelor speciale prin adăugarea de piese suplimentare pentru a compensa degradarea generată de prezența dispozitivului de avertizare luminoasă.

În anticiparea unei posibile evoluții a legislației privind stabilirea unui nivel maxim al emisiilor vehiculelor speciale, obiectivul tezei este de a evalua rezistența aerodinamică a autovehiculelor echipate cu dispozitive de avertizare luminoasă pe plafon și de a identifica soluții tehnice posibile și ușor de implementat pentru diminuarea impactului negativ al acestora asupra performanțelor aerodinamice. Astfel, se urmărește identificarea accesoriilor care ar putea fi montate cu ușurință pe autospeciale de intervenție pentru anularea efectului dispozitivului de avertizare luminoasă asupra performanței aerodinamice și obținerea acelorași performanțe aerodinamice ca autovehiculul de bază, cel fără dispozitivul de avertizare luminoasă.

2. AERODINAMICA AUTOVEHICULELOR RUTIERE

Capitolul detaliază legile de bază care guvernează interacțiunea dintre un obiect în mișcare și un fluid, în cazul nostru un autovehicul care se deplasează prin aer.

Experimentele și studiile efectuate pentru dinamica autovehiculelor au demonstrat că, pe lângă forțele din zona de contact, există întotdeauna un schimb de forțe care are loc între corpul autovehiculului și aerul care îl înconjoară. Odată ce sistemele de propulsie au evoluat și, ca o consecință directă viteza medie crescut, atât conducătorii, cât și oamenii de știință au observat că autovehiculul a devenit mai puțin eficient la viteze mari, iar consumul de combustibil a fost semnificativ mai mare.

Forța imprimată de aerul în care se mișcă obiectul asupra acestuia este definită ca rezistență aerodinamică și este compusă din două componente principale, o forță de frecare și o forță de presiune. Principalele noțiuni descrise în cadrul acestui capitol sunt: Liniile de curent, Presiunea aerului, Densitatea aerului, Vâscozitatea aerului, Numărul Reynolds, Stratul limită, Coeficientul de frecare, Relația Bernoulli.

Pe baza conceptelor fundamentale ale aerodinamicii, distribuția globală a presiunii în zona caroseriei unui autovehicul poate fi analizată. Rezistența turbulentă este dată de curgerea turbulentă de aer din zona din spate a autovehiculului și este influențată de forma acestuia, precum și de diferența de presiune dintre partea din față și cea din spate a vehiculului. Modul în care are loc fenomenul de separare a aerului conduce atât la amplitudinea rezistenței turbulente, cât și la creșterea formei asociate. Curgerea turbulentă este dependentă de timp, periodic (dacă factorii externi sunt constanți). Astfel, se generează un fenomen pulsatoriu care poate avea amplitudini foarte mari și poate afecta stabilitatea altor autovehicule, de exemplu în cazul autocamioanelor.

Presiunea (perpendiculară pe suprafața caroseriei autovehiculului) și forța de frecare (paralelă cu fluxul de aer) determină rezistența aerodinamică globală și pot fi exprimate, în scopul studiului, printr-un sistem spațial format din 3 axe (OX, OY, OZ), pe baza căruia poate fi exprimat coeficientul aerodinamic.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A} \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A} \quad C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A}$$

Pentru a determina rezistența aerodinamică a unui autovehicul, este necesar să se determine forța care trebuie dezvoltată de unitatea de putere pentru a părăsi starea de repaus. În cadrul lucrării sunt detaliate câteva din principalele metode aplicate de-a lungul timpului

pentru cercetarea acestei forțe și dificultățile asociate, respectiv: măsurători efectuate pe pistă, cu autovehiculul izolat de mediul înconjurător, aplicarea unei rețele de bucăți de fire cu un capăt liber, metoda timpului de decelerare pe pistă, măsurători efectuate în diferite tipuri de tunel aerodinamic.

Ideea asociată tunelului aerodinamic este de a aborda întregul fenomen studiat dintr-o altă perspectivă, și anume, autovehiculul nu se mișcă prin aer, ci aerul se mișcă în jurul autovehiculului. Pornind de la această premisă, a fost dezvoltată ideea unei incinte, în centrul căreia se află obiectul studiat, autovehiculul, în timp ce aerul este mișcat de ventilatoare de mare putere.

Principalele avantaje asociate acestei metode sunt:

- (i) toate dispozitivele necesare pentru măsurători nu mai trebuie transportate la bord, deoarece vehiculul este staționar,
- (ii) viteza curentului de aer poate fi controlată perfect asemenea direcției în raport cu vehiculul,
- (iii) presiunea și temperatura pot fi controlate cu precizie,
- (iv) experimentele sunt efectuate în aceleași condiții și pot fi ușor duplicate,
- (v) timpul necesar pentru pregătirea unei noi sesiuni este relativ scurt.

Unele dintre cele mai reprezentative exemple de design aerodinamic sunt prezentate în cadrul acestui subcapitol pentru a evidenția evoluția care a avut loc în ultimul secol, din punct de vedere aerodinamic, cât și performanța actuală.



Figura 1 Modele La Jamais Contente, Stanley Steamer Rocket, Rumpler Tropfenwagen, Autovehiculul aerodinamic al lui Aurel Perșu

În figura 1 poate fi vizualizat 'La Jamais Contente', primul autovehicul cu propulsie electrică care a depășit 100km/h, în 1899. După doar 7 ani, propulsia aburului și o caroserie aerodinamică au permis atingerea și depășirea pragului de 200 km/h de către 'Stanley Steamer Rocket'. Marile beneficii ale științei aerodinamicii au fost dovedite de Rumpler "Tropfenwagen", din 1921, având un design asemănător formei de picătură de apă în cădere.

Un exemplu remarcabil al aceluiași principiu, cu desen brevetat în 1922, este autovehiculul creat de inginerul român, Aurel Perșu, care nu putea găzdui același număr de pasageri ca Rumpler, dar avea o valoare C_d de doar 0,22. Actual, unul din cele mai performante autovehicule, destinat mai multor pasageri, este modelul Light year, din 2022, cu un coeficient aerodinamic de doar 0.175.

3. STADIUL ACTUAL AL PROBLEMATICII STUDIATE

Există 3 caracteristici principale care, printr-o abordare adecvată, pot avea o influență pozitivă importantă în controlul și reducerea rezistenței aerodinamice: dimensiunile autovehiculului, forma autovehiculului și accesoriile specifice care influențează curgerea aerului din jurul acestuia.

Un factor cheie care influențează rezistența aerodinamică este reprezentat de dimensiunile autovehiculului. Suprafața din spate a autovehiculului este direct legată de dimensiunea inițială a turbionului din spate, ceea ce înseamnă că, dacă încercăm să reducem dimensiunea turbionului spate, suprafața din spate ar trebui să fie minimă. Cele mai bune rezultate pentru parametrul C_dA sunt obținute pentru autovehiculele care imită prin design formele picăturii de apă în cădere, deci cu suprafața posterioară cât mai redusă.

A doua caracteristică a autovehiculului care are influență asupra forței aerodinamice este, desigur, designul său. Scopul general este de a minimiza rezistența locală în fața autovehiculului, de a asigura o reatașare rapidă a fluxului de aer și de a menține, cât mai mult timp posibil, un flux de aer stabil în apropierea panourilor caroseriei, până când aerul ajunge pe suprafața din spate a autovehiculului [37].

În cazul autovehiculelor, accesoriile tehnice utilizate pentru a reduce rezistența aerodinamică variază în funcție de dimensiune, formă și poziție de montare. Acestea sunt dezvoltate specific pentru fiecare autovehicul. Scopul este de a controla fluxul de aer din jurul autovehiculului (adică pe ambele zone laterale, dar și în zona inferioară și superioară a autovehiculului) pentru a controla forma și dimensiunea turbionului din spate.

Prin urmare, adoptarea unor concluzii generale pentru segmentul autovehiculelor hatch back doar prin extrapolarea unor măsurători pe un model specific de autovehicul hatch back poate duce la rezultate semnificativ diferite și deci la concluzii eronate. În acest context, luând în considerare toate aceste constrângeri, studiul se concentrează pe un model specific, generic ales, iar concluziile sunt adoptate acceptând posibilele dispersii în concluziile descoperite pentru clasa respectiva de autovehicule.

Accesoriile aerodinamice fixe general utilizate sunt reprezentate de deflectoare (spate, și lateral spate, roți), respectiv carenaje (motor, central, punte spate). Deflectorul spate și deflectoarele lateral spate sunt menite să controleze punctul de detașare la o coordonată specifică, care este reglată cu precizie pentru un turbion spate echilibrat. Carenajele aerodinamice sunt special concepute pentru a acoperi cea mai mare parte din suprafața zonei inferioare a caroseriei autovehiculului, cu un coeficient de planeitate cât mai apropiat posibil de 100%. În plus față de carenaje ce au rol de a asigura uniformitatea fluxului de aer sub autovehicul, și elemente aerodinamice cu rol de deflector pot fi amplasate sub autovehicul. Pentru a compensa turbioanele laterale ale roții, producătorii de automobile au adăugat pasaje deschise pe părțile laterale ale barei de protecție din față. Aceste pasaje preiau fluxul de aer cu energie mare din partea din față a autovehiculului și reduc dimensiunea turbionului lateral al roții.

Pe lângă elementele tradiționale menționate, există și elemente aerodinamice active, disponibile pe scară mai largă, precum: deflectoarele active ale roților față, difuzorul spate activ, lamelele grilei față, deflectorul spate activ și capacele active pentru roată.

Toate elementele de mai sus, fixe sau active, au o varietate de forme, dimensiuni și oferă rezultate diferite în funcție de aplicarea lor. În plus față de acestea, care sunt principalele elemente analizate din punct de vedere aerodinamic, fiecare element exterior este examinat pentru a maximiza eficiența mișcării. Forma și dimensiunea oglinzilor exterioare, dacă nu sunt deja înlocuite cu camere video de mici dimensiuni, roți aerodinamice, chiar și modelul aerodinamic al anvelopelor, spații cât mai reduse între panourile caroseriei sau măști suplimentare pe intrările de aer din față sunt doar câteva dintre celelalte elemente care sunt optimizate continuu pentru o performanță mai bună.

Tot acest efort este o consecință directă a contextului actual în care, pe de o parte, legislația impune un nivel strict al emisiilor de gaze și, pe de altă parte, clienții sunt mai atenți la consumul de combustibil și, în plus, la influența autovehiculului utilizat, asupra mediului.

Literatura de specialitate confirmă că influența dispozitivelor de avertizare luminoasă atunci când sunt montate pe autovehicule de tip ambulanță [50] indică o similitudine între rezultatele obținute în mediul CFD și, de asemenea, în tunelul aerodinamic la scară redusă, folosind metoda firelor aplicate. Se evidențiază faptul că flota Yorkshire 'Ambulance Service Trust' (YAST) are 1500 de ERV-uri (autoutilitara tip dubă) care se deplasează 40 de milioane de mile în fiecare an (~64.4 milioane kilometri), rezultând un consum de 4,2 milioane de litri de combustibil la un cost de peste 6 milioane de lire sterline.

Aceste studii sintetice prezentate în lucrarea prezentată aduce în atenție o selecție atentă a literaturii relevante privind beneficiile designului aerodinamic și îmbunătățirea posibilă a economiei de combustibil pentru autovehiculele comerciale. O altă sursă valoroasă de informații este identificată a fi lucrarea lui Ali Reza Taherkhani [53] care pornește de la noțiuni teoretice de bază. Lucrarea indică evoluția valorii Cd pentru diferite autovehicule, demonstrând beneficiile importante ale optimizării aerodinamice - coeficientul aerodinamic mediu al HGV-urilor (autovehicule care transportă bunuri comerciale) care a fost de 0,7 în anii 1920, iar astăzi această valoare este redusă la aproximativ 0,5.

Referindu-ne la autovehiculele grele cu remorcă, reducerea generală a rezistenței la înaintare ar putea ajunge la 23% atunci când se combină carenaje laterale cu dimensiuni extinse, carenaje aerodinamice, suprafețe de extensie în spatele remorcii și acoperirea zonelor dintre roți [55]. Aider indică chiar obținerea unei reduceri a rezistenței la înaintare de 25,2% printr-o combinație de dispozitive suplimentare din cele menționate, pe diferite zone ale autovehiculului.

Deși concluziile regăsite sunt coerente cu cele ale lucrării actuale, nu a fost identificat un studiu specific privind dispozitivele de avertizare luminoasă pentru caroseriile actual analizate (sedan, hatch back, SUV), nici influența acestora asupra performanțelor aerodinamice. Prin urmare, rezultatele obținute ca urmare a efectuării acestui studiu și detaliate în cele ce urmează în cadrul lucrării sunt cu atât mai importante pentru domeniul aerodinamicii autovehiculelor de intervenție (autovehicule cu dispozitiv de avertizare luminoasă pe plafon).

4. MODELE MATEMATICE PENTRU SIMULĂRI CFD

Metoda CFD sau metoda de calcul al dinamicii fluidelor este principalul instrument de lucru utilizat în prezent de inginerii aerodinamicieni. Metoda matematică de prezicere a fluxului unui fluid este utilizată cu succes în studiul aerodinamicii autovehiculelor. Trebuie reținut faptul că baza modelării fluxului de fluid este setul de ecuații diferențiale Navier-Stokes. Soluția poate fi obținută printr-o abordare directă sau probabilistică.

Pentru a modela fluxuri complexe, este necesar să se introducă unele simplificări în sistemul de ecuații. Acestea vin sub formă de modele de turbulență, cum ar fi k-epsilon, k-omega etc.

O altă metodă implică înlocuirea soluției directe a sistemului de ecuații cu abordarea probabilistică propusă de Boltzmann. Astfel, prin parametrizarea unei familii de funcții probabilistice, comportamentul fluidului poate fi modelat din perspectiva componentei fluide

dintr-o multitudine de particule care se pot deplasa într-o rețea dată, de unde și numele metodei Lattice-Boltzmann. Ambele metode sunt utilizate de programele software care sunt folosite pentru a evalua performanța aerodinamică a autovehiculelor.

Sistemele informatice au cunoscut o multitudine de aplicații, inclusiv în domeniul ingineriei. Pentru a studia teoretic fluxul de fluide, respectiv aer în cazul aerodinamicii autovehiculelor, se utilizează ecuațiile Navier-Stokes, descrise astfel:

$$\frac{\partial(pu)}{\partial t} + \frac{\partial(pu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(puv)}{\partial y} + \frac{\partial(puw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \nabla V - 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} [\mu (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})]) + \frac{\partial}{\partial z} [\mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(pv)}{\partial t} + \frac{\partial(puv)}{\partial x} + \frac{\partial(pv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(pvw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x} [\mu (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})]) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \nabla V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} [\mu (\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z})] + \rho f_y$$

$$\frac{\partial(pw)}{\partial t} + \frac{\partial(puw)}{\partial x} + \frac{\partial(pvw)}{\partial y} + \frac{\partial(pw^2)}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial y} [\mu (\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z})] + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \nabla V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}) + \rho f_z$$

Sistemul este alcătuit din ecuații neliniare, cuplate și parțial diferențiale. Aceste proprietăți conduc la imposibilitatea găsirii unei soluții analitice [8]. O metodă de abordare în identificarea soluțiilor Navier Stokes este modelul numeric.

Unul dintre pașii esențiali în parametrizarea unei simulări CFD constă în definirea modelului de turbulență a fluidului. Această acțiune are un impact direct asupra naturii rezultatelor și a erorii în raport cu fenomenul real. În mod ideal, se încearcă rezolvarea unui flux complex cu un model de turbulență cât mai simplu posibil pentru un consum minim de resurse.

Turbulențele sunt un fenomen variabil în timp. O altă caracteristică importantă este că structurile de stres turbionar se deplasează de-a lungul fluxului, având o durată de viață relativ lungă. Din acest motiv, anumite turbulențe nu pot fi caracterizate ca fiind locale. Astfel, debitul din amonte are o importanță vitală pentru fluxul din zona analizată.

Pentru caracterizarea componentei de turbulență, au fost create mai multe modele cu abordări diferite: fie prin aproximarea soluției ecuațiilor RANS, fie prin rezolvarea lor directă.

Pentru modelele de tip RANS:

a. Modelul cu vâscozitate turbionară (model cu vâscozitate turbionară – EVM)

În acest model, se presupune că efortul asociat turbulențelor este proporțional cu rata medie de stres. Vâscozitatea turbionară este derivată din ecuația transportului turbulent.

b. Modele de vâscozitate turbionară neliniară (modele neliniare cu vâscozitate turbionară – NLEVM)

Efortul de turbulență, în acest caz, este modelat ca o funcție neliniară a gradientilor vitezei medii. Scalarea turbulenței este determinată prin rezolvarea ecuațiilor de transport. Acest model este utilizat pentru a evidenția turbulențele asociate cu anumite tipuri de eforturi.

c. Modele de stres diferențial (DSM)

Această categorie constă în modele de transport de stres Reynolds sau modele de închidere de ordinul doi (modele de închidere - SOC).

Pentru calcularea cantităților fluctuante, există următoarele metode:

a. Simulare turbionară macroscopică (simulare turbionară mare - LES)

Aceasta presupune calcularea variației fluxului în timp, modelată pe baza interacțiunilor la nivel de subrețea.

b. Metoda simulării directe (simulare numerică directă – DNS)

Această metodă nu se bazează pe modelare, ci pe calculul direct al întregului flux. [57]

O abordare diferită este metoda bazată pe principiile propuse de Ludwig Boltzmann [61]. Contribuția sa majoră a fost dezvoltarea matematicii statistice care explică și prezice modul în care proprietățile atomilor pot determina proprietățile fizice ale materiei (cum ar fi vâscozitatea, conductivitatea termică și difuzia). El a pus bazele teoriei cinetice și ale distribuției de tip Maxwell-Boltzmann a vitezelor moleculelor unui gaz.

Astfel, din metoda de tip ,lattice', derivă metoda rețelei Boltzmann utilizată în prezent de software-ul CFD. Principalul avantaj comparativ cu metoda anterioară este compensarea zgomotului prin abordarea statistică. Conform principiilor teoretice descrise, prin intermediul teoriei cinetice, starea fluidului este descrisă printr-o metodă newtoniană pentru a identifica poziția și viteza moleculelor. Aplicarea metodei Boltzmann este posibilă și pe fluidele non-newtoniene, dar complexitatea modelului matematic trebuie crescută.

Pentru studiul curgerii unui fluid în spațiul tridimensional (cum ar fi fluxul curenților de aer într-o cameră) se utilizează modelul D3Q19, care este aplicat cu succes pentru numerele Reynolds în spectrul subunitar Mach și cu proprietăți izoterme. Aceasta este o metodă hibridă, bazată pe particule, continuă. Modelarea complexă prin detaliile coliziunii particulă-particulă sau a nivelului său de expansiune poate fi aplicată cu succes pe arhitecturi computaționale paralele. În acest fel, se obține o reducere semnificativă a nevoii de resurse și reducerea timpului necesar pentru efectuarea unei simulări.

5. DETERMINAREA FORȚEI AERODINAMICE PRIN METODA CFD

Metoda CFD a început să fie utilizată pe scară largă de toți producătorii în faza de dezvoltare a unui nou proiect datorită multiplelor sale beneficii, cum ar fi: posibilitatea de a efectua mai multe iterații într-o perioadă scurtă de timp, o configurare relativ rapidă a experimentului în comparație cu cea fizică, un buget semnificativ redus pentru experimentul CFD în comparație cu cel fizic, posibilitatea de a vizualiza fluxul de aer cu instrumentul CFD.

Având în vedere obiectivul lucrării și definirea autovehiculelor speciale, metoda CFD aleasă necesită un autovehicul de bază pe care, într-o etapă succesivă, va fi adăugat un dispozitiv de avertizare luminoasă, urmărind astfel scenariul real.

Pentru a asigura o reprezentativitate minimă, dar și pentru a pune accentul pe o varietate redusă, studiile au fost efectuate pe trei tipuri generice de caroserie care au fost considerate a fi cele mai frecvent utilizate ca autovehicule speciale: tipul de caroserie hatch back, tipul de caroserie sedan și tipul de caroserie SUV. În timp ce această ipoteză simplificatoare reduce resursele necesare și varietatea posibilă de rezultate, rezistența aerodinamică este extrem de sensibilă nu numai la tipologia caroseriei, ci și la mici variații ale dimensiunilor și, desigur, la designul caroseriei. Astfel, a fost necesară o a doua ipoteză simplificatoare, și anume alegerea unui design specific pentru fiecare tip de caroserie menționat, cu luarea în considerare a faptului că rezultatele obținute nu vor putea fi aplicate cu exactitate pentru întreaga categorie, dar vor permite obținerea unei imagini generale privind influența aerodinamică a montării unui dispozitiv de avertizare luminoasă, dar nu și valorile exacte.

Având în vedere cele două ipoteze menționate, autovehiculele alese sunt ilustrate în figura 2.



Figura 2 Modelul CAD al autovehiculului SUV

Având în vedere acest mediu de testare și caracteristicile sale, experimentul virtual este construit folosind aceleași proporții și dispozitive funcționale specifice tunelului aerodinamic. Camera de testare este asamblată dintr-o intrare și ieșire izolate cu pereți laterali, o podea și un tavan. Obiectul studiat se găsește la o distanță egală de pereții laterali.

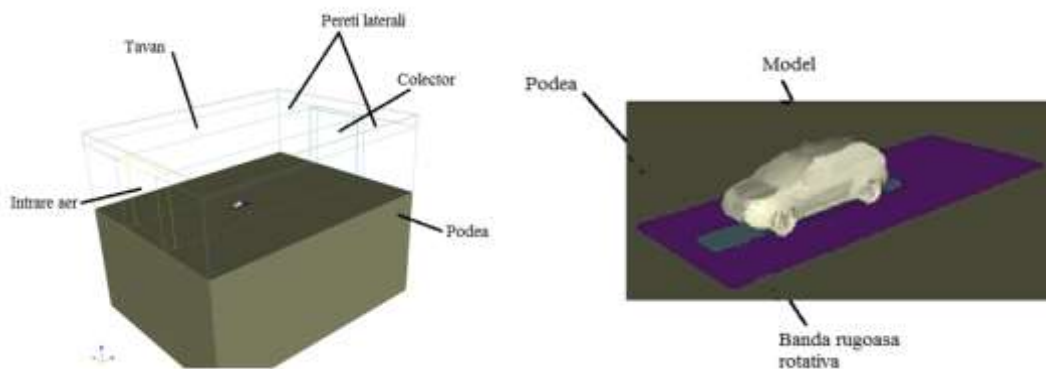


Figura 3 Configurarea testului în mediu virtual [60]

Modelul CAD este situat în apropierea zonei de intrare a aerului și mai departe de ieșire pentru a permite măsurarea mai precisă a turbionului din spate.

Discretizarea de volum se realizează prin utilizarea unei metode hibrid între cele două metode, cea manuală și cea automată. Astfel, programul este parametrizat să aibă cea mai fină dimensiune (celule cu lungimea de 2mm) lângă autovehicul în timp ce lângă pereți un nivel mai mare (celule cu lungimea de 64mm), trecerea fiind făcută cu o multiplicare de 2 pentru a facilita procesul de convergență. Rezultatele sunt înregistrate în fiecare celulă și sunt asamblate pentru vizualizarea presiunii, vitezei, turbionului și valorii numerice a coeficientului aerodinamic, prin aplicarea modelului matematic Lattice Boltzmann.

În timp ce condițiile la limită pentru elementele fixe, cum ar fi pereții, intrarea și ieșirea, sunt definite cu valori numerice fixe, toate condițiile limită legate de obiectul studiat sunt definite în funcție de parametrii săi specifici, cum ar fi lungimea, lățimea, coordonatele roților și, în consecință, definiția domeniilor de rezoluție este amplificată pentru obținerea în final a unui rezultat relevant.

Pentru a reduce eroarea de simulare, utilizatorul trebuie să identifice un pas de timp de la care oscilațiile convergenței sunt reduse. Simularea CFD efectuată în lucrarea curentă utilizează 250.000 de iterații, deoarece această valoare permite o curbă de convergență stabilizată pe acest tip de model. De asemenea, toate simulările au fost mediate pornind de la 100.000 de iterații, datorită oscilațiilor relativ mari din prima zonă a graficului.

Prima etapă a cercetării a fost determinarea performanțelor aerodinamice de bază ale celor trei tipologii de caroserie studiate (hatch back, sedan și SUV). Modelele imită cât mai mult posibil autovehiculele reale, luând în considerare designul, dimensiunile și, de asemenea, piesele tehnice situate sub caroserie.

Tabelul 1 Performanța aerodinamică pentru autovehiculele de bază, exprimată în CdA

Caz studiat	Aria (A)	CdA [m ²]
Tip caroserie : sedan	2.240m ²	0.659
Tip caroserie :hatch back	2.390m ²	0.836
Tip caroserie : SUV	2.445m ²	1.000

O comparație între valorile de referință ale CdA indică, așa cum era de așteptat, că o caroserie tip sedan are cele mai bune performanțe aerodinamice, în timp ce caroseria tip SUV are cea mai mare valoare CdA. Principalii factori ce duc la obținerea acestor rezultate sunt forma și dimensiunea spatelui autovehiculului, precum și garda la sol a acestuia, elemente ce au o influență directă asupra nivelului de energie turbionului din spate.

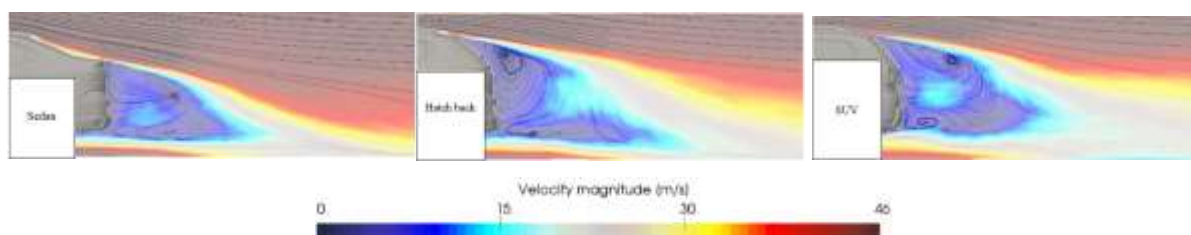


Figura 4 Turbionul din spate reprezentat de liniile de curent și magnitudinea vitezei [70]

Deoarece caroseria tip sedan are o suprafață mai mică în spate și forma acesteia este mai asemănătoare cu o picătură de apă în cădere, turbionul din spate este mai redus în înălțime și chiar în lungime, ceea ce indică dimensiuni generale mai mici. Pentru autovehiculele cu caroserii tip hatch back și SUV, caracteristicile caroseriei determină crearea unui turbion mult mai mare pe direcția Z, care este mai dificil de disipat, motivu pentru care acesta are o dimensiune mai mare pe direcția X. Se poate observa că, deși nu este semnificativ, turbionul din spate a autovehiculului cu caroseria tip SUV este mai mare decât turbionul din spate a autovehiculului cu caroseria tip hatch back.

Al doilea pas în efectuarea studiului a fost reprezentat de evaluarea performanțelor aerodinamice ale aceluiași autovehicule, dar cu adăugarea dispozitivului de avertizare luminoasă pe acoperișul acestora. Pentru a obține o imagine cât mai completă privind posibila dispersie a performanței, dispozitivul de avertizare va fi montat în poziție avansată (cazul "i"), poziție mediană (cazul "ii") și poziție spate (cazul "iii"). În acest scop, a fost ales un dispozitiv arbitrar ca forma și dimensiune, chiar dacă există o diversitate mare a designului dispozitivului de avertizare, precum și variații ale geometriei acestuia.



Figura 5 Pozițiile de montare pentru dispozitivul de avertizare

Cu dispozitivul de avertizare luminoasă montat, valoarea CdA crește de la +5,8% la +37%, în funcție de tipul autovehiculului și poziția de montare. Cea mai mare influență se înregistrează pentru caroseria tip sedan, cu dispozitivul de avertizare montat în poziția avansată. Fluxul de aer este foarte turbulent, deoarece dispozitivul este plasat direct în calea fluxului de aer de mare viteză care vine din zona parbrizului. Această definiție tehnică va determina creșterea valorii de dioxid de carbon produs cu aproximativ +12 g CO₂/km. Cea mai bună soluție pentru caroseria tip sedan se dovedește a fi poziția mediană de montare, cu un plus de +0,094 m² în valoarea CdA și creșterea valorii de dioxid de carbon produs cu +5 g CO₂/km. În acest caz, dispozitivul de avertizare nu se află în calea fluxului de aer de mare viteză al parbrizului, astfel încât turbionul asociat nu este adăugat la turbionul din spate cu aceeași amplitudine. Poziția de montare spate va determina creșterea valorii de dioxid de carbon produs cu +6,5 g CO₂/km.

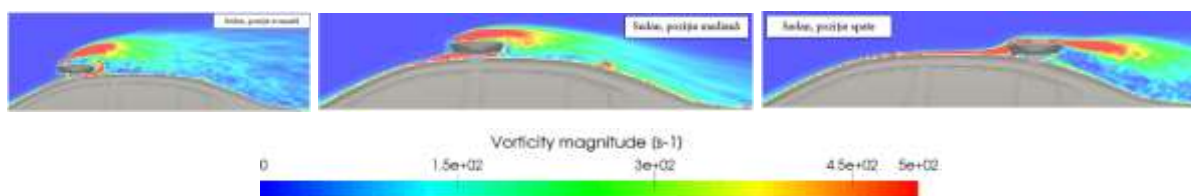


Figura 6 Magnitudinea vorticității pentru caroseria tip sedan cu dispozitiv de avertizare

Aplicând același tip de analiză pe caroseria de tip hatch back, a rezultat că dispozitivul de avertizare aduce o degradare între +8,2% (cazul "iii") și +19% (cazul "i"). Trebuie menționat faptul ca pozițiile de montare mediană și spate pot fi tratate ca generând aceleași rezultate.

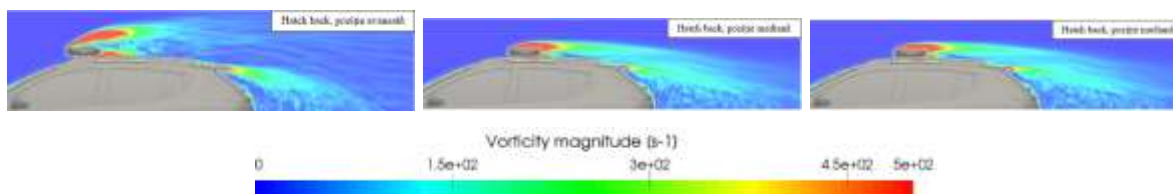


Figura 7 Magnitudinea vorticității pentru caroseria tip hatch back cu dispozitivul de avertizare

Se poate concluziona că, din cauza turbulențelor autovehiculelor cu caroserie tip hatch back ce este în mod natural mai deficitar (în comparație cu autovehiculele cu caroserie tip sedan), influența dispozitivului de avertizare luminoasă asupra valorii CdA este mai redusă, cu o diferență totală de emisii de dioxid de carbon de 1,5 g CO₂ / km pentru cel mai bun scenariu, respectiv de 4 g CO₂ / km pentru scenariul mai rău.

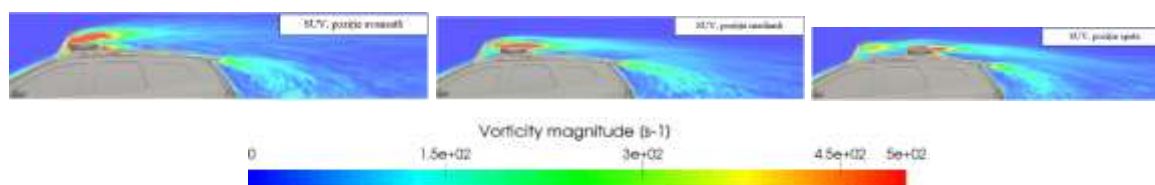


Figura 8 Magnitudinea vorticității

Având în vedere rezultatele descrise anterior, pasul 3 va prezenta provocarea de a reduce influența aerodinamică a dispozitivului de avertizare prin adaptarea sau adăugarea de noi accesorii aerodinamice. Criteriul de bază este ca modificarea să fie minimă pentru un beneficiu maxim, astfel încât studiul să poată fi utilizat pentru aplicarea practică a soluțiilor identificate. Elementele considerate a fi ușor de adăugat pentru a îmbunătăți aerodinamica, sunt: accesorii pentru roți (jantă, ornament de roată) și carenaje sub caroserie.

Roțile au fost studiate în mod specific, pe aceleași tipuri de caroserie, pentru a evalua beneficiul CdA care ar putea fi obținut. Doi factori aleși pentru a fi studiați sunt planeitatea și porozitatea designului roților.

Pentru a evalua impactul porozității jantei asupra rezistenței totale, a fost efectuată o analiză folosind 7 configurații diferite - (P): 2,3%, 3,32%, 17,64% (soluții existente), 50%, 35%, 15% și 0% (soluții propuse)

Janta din oțel cu ornament de roată permite obținerea unei performanțe de 0,388 a coeficientului aerodinamic, valoarea considerată de referință. După îndepărtarea ornamentului, valoarea CdA este îmbunătățită cu 0,004. Câștigul este și mai semnificativ (0,023) după înlocuirea jantei și ornamentului din oțel cu o jantă din aliaj. Concluzia este că, din punct de vedere aerodinamic, configurația jantei din aliaj analizată (cazul 3) este cea mai eficientă. Proprietățile superioare ale materialului utilizat permit inginerilor să aibă un control mai bun al formei și, prin urmare, un control mai bun al fluxului de aer.

Următorul pas după evaluarea soluțiilor generice existente este de a verifica ce se întâmplă dacă deschiderile roților sunt reduse treptat în dimensiune. În acest scop, un capac

complet închis ($P = 0\%$), un capac deschis relativ maxim ($P = 50\%$) și două soluții intermediare ($P = 35\%$, $P = 15\%$) au fost testate în aceleași condiții ca primele 3 cazuri.

Cel mai bun rezultat este obținut atunci când se utilizează capacul complet ($P = 0\%$), în timp ce rezultatul cel mai slab este obținut pentru capacul cel mai deschis.

În comparație cu janta din oțel, cu sau fără capac de roată, janta din aliaj are rezultate aerodinamice mai bune. În ceea ce privește posibilitatea integrării unui capac de roată mai închis sau chiar a unui capac de roată activ, prin prezentul studiu s-a identificat cel mai bun rezultat pentru o soluție cu porozitate zero. Cu un câștig total de 0,033 în raport cu janta standard din oțel și 0,005 în raport cu jantele din aliaj, capacul roții complet închis este considerat a fi o abordare bună pentru o reducere a CdA global.

După cum s-a evidențiat, capacul roții cu porozitate zero poate aduce beneficii și din punct de vedere aero-acustic. Principalul impact negativ care nu a fost studiat în această lucrare, dar care ar putea împiedica implementarea acestei soluții este răcirea frânelor. Evoluția către autovehicule hibride și electrice implică și o remodelare a sistemului de frânare, prin urmare și acest impediment ar putea fi surmontat.

Acoperirea roții din spate ar trebui, teoretic, să limiteze fluxul de aer de rotație în jurul roții, să reducă turbionul local lateral în direcția Y și să permită fluxului longitudinal de aer să urmeze o cale lină de la ușa din față până la aripa din spate a autovehiculului. Astfel, într-o primă fază a fost evaluată dimensiunea măștii. Cel mai bun rezultat Cd este obținut pentru arcu roții complet închis, cu o delta de 0,024 în comparație cu o configurație standard. Cazurile 2 și 3 arată tendința de scădere a coeficientului aerodinamic, o dată cu creșterea măștii pasajului roții.

Tabelul 2 Rezultatele CFD ale pasajelor de roată, pentru autovehiculul de bază

Setup no.	Cazul 1	Cazul 2	Cazul 3	Cazul 4
Cd	0.377	0.367	0.364	0.353
ΔCd		0.011	0.013	0.024
Reprezentare vizuala				
Descriere	Caz standard	Pasaj inchis pana la nivelul pneului	Pasaj inchis pana la nivelul capacului	Pasaj complet inchis

În a doua fază, s-au comparat trei configurații diferite ale măștii complete – marginea posterioară dreaptă, marginea posterioară curbată și marginea posterioară spate dreaptă plus zona de tăiere. Simulările CFD indică faptul că cazul 4 este mai favorabil aerodinamic decât cazul 5 datorită unei valori mai mici a presiunii în spatele roților.

În timp ce impactul defletoarelor a fost redus în comparație cu masca completă, studiul detaliat a arătat că deflectorul profilat având aceeași înălțime ca cel drept a adus cel mai mare câștig [74].

Sensibilitatea aerodinamicii autovehiculului la vânt lateral este studiată pentru un autovehicul hatch back, la un unghi (α) cuprins între -20° și $+20^\circ$ abatere de la axa autovehiculului X, așa cum este descris grafic în figura 9. Aceste valori au fost alese datorită frecvenței ridicate de apariție în viața reală, după cum arată unele studii.

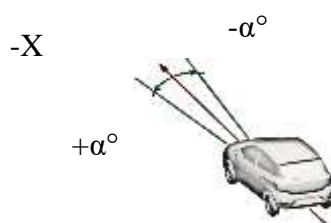


Figura 9 Definirea sistemului de coordonate ale autovehiculului, pentru studiul vântului lateral

Un prim set de rezultate, reprezentat grafic în figura 10, arată că pentru $0^\circ < \alpha < 2^\circ$, coeficientul aerodinamic este relativ constant. Acesta este urmat de un câștig de 0,025 unități pentru $4^\circ < \alpha < 6^\circ$. La aproximativ 8° , se observă o inflexiune în variația C_d . Pentru $10^\circ < \alpha < 20^\circ$, coeficientul aerodinamic crește în mod liniar.

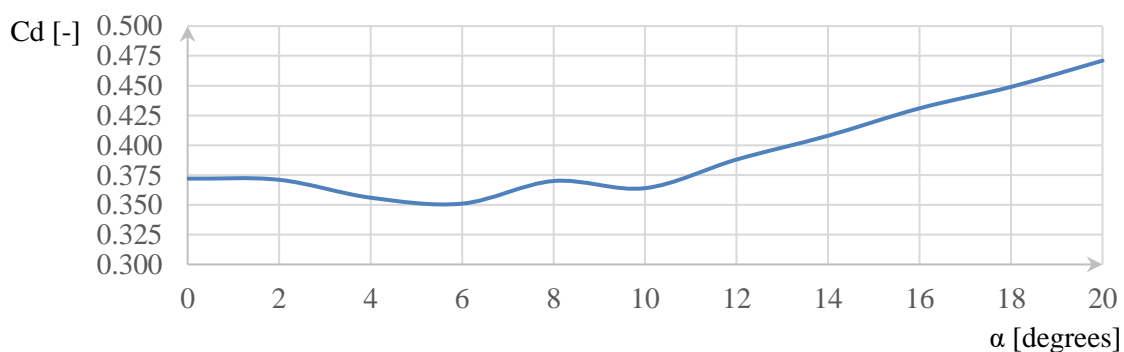


Figura 10 Variația C_d cu unghiul de deviere, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$

Dezvoltarea rezistenței la înaintare variază semnificativ în funcție de valoarea unghiului de abatere. Principalele surse de rezistență la înaintare pentru un autovehicul sunt: roțile din față și din spate, stâlpul din față asociat cu oglinzile retrovizoare și partea din spate a

autovehiculului, aceasta din urmă fiind, de asemenea, principala sursă de consum de energie aerodinamică.

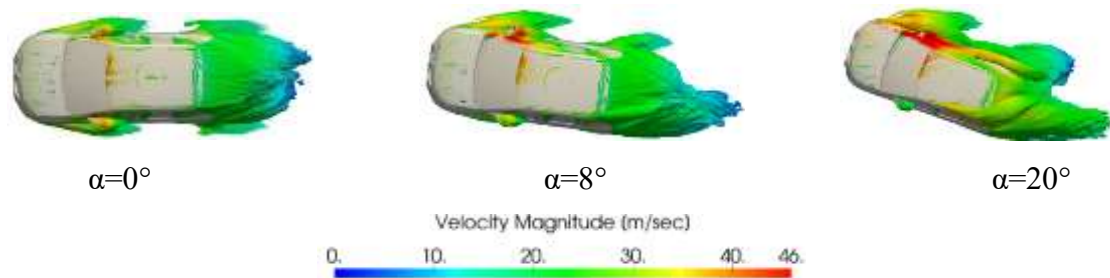


Figura 11 Evoluția formei turbionului a autovehiculului cu unghiul de deviere, α .

Valorile CdA pentru unghiul α pozitiv sau negativ prezintă mici diferențe, acestea sunt date de asimetria pieselor mecanice găsite sub caroseria autovehiculului.

Deoarece cercetarea actuală se bazează pe instrumente CFD, este obligatoriu să se asocieze rezultatele obținute cu o perspectivă asupra posibilelor surse de eroare. O sursă importantă este timpul de simulare (adică pentru cât timp trece aerul pe lângă autovehicul), care în lumea virtuală este fragmentat în mulți pași mici numiți iterații. Expunerea la fluxul de aer trebuie să fie suficient de lungă pentru a permite formelor de rezistență să se formeze și să se stabilizeze. Pe de altă parte, dacă expunerea la fluxul de aer este prea lungă, datele înregistrate vor fi prea mari și avantajul instrumentului CFD va fi redus. Pentru studiul actual, simulările au fost efectuate atât la 250.000 de iterații, cât și la 500.000 de iterații, iar figura 12 prezintă diferențele obținute.

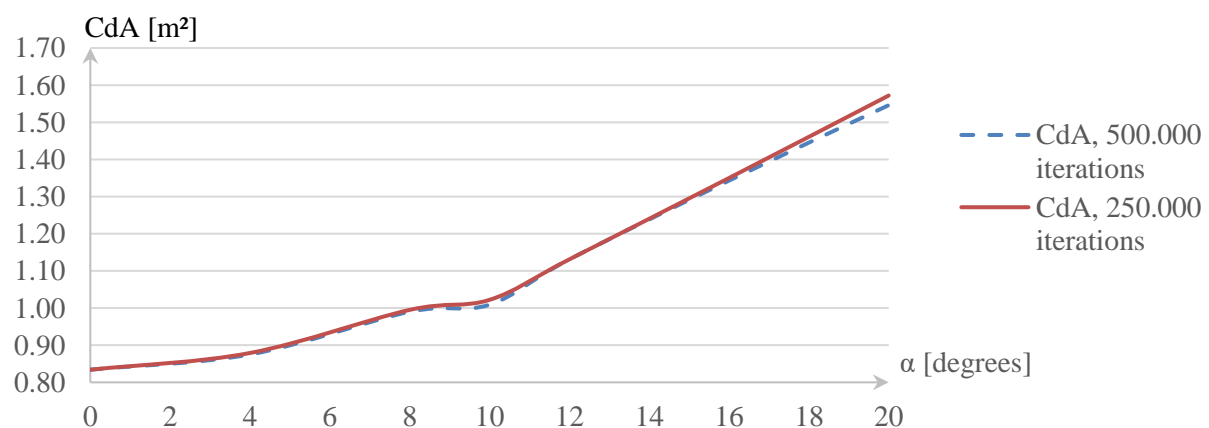


Figura 12 Variația Cd în funcție de timpul de simulare CFD

Se consideră că rezultatele CFD obținute pentru un timp de simulare de 250.000 de iterații sunt valabile, având în vedere scopul prezentei lucrări.

Rezultatele obținute prin simulări CFD arată că, pentru unghiuri mici de deviere, performanța autovehiculului poate fi considerată uniformă până la $\alpha < 8^\circ$ și după $\alpha > 10^\circ$ performanța se degradează într-o manieră liniară.

În continuare va fi considerată o configurație standard a roților – jantă din oțel de 15 inch fără capac de roată și o configurație aerodinamică a roților – jantă din aliaj de 15 inch echipată cu capace complete ale roților față și spate și carenaj pentru roțile din spate, așa cum este prezentat în figura 13.

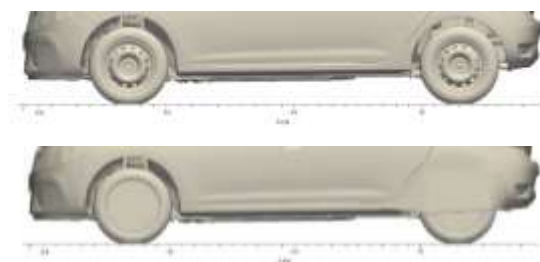


Figura 13 Configurații studiate ale roților, în condiții de vânt lateral

Rezultatele CFD sunt integrate într-un grafic care indică variația coeficientului aerodinamic cu unghiul de deviere. Evoluția Cd poate fi împărțită în două părți principale, pentru $\alpha < 10^\circ$ și pentru $\alpha > 10^\circ$. Cd scade cu 0,020 până la $\alpha = 4^\circ$ și continuă cu o ușoară creștere până la $\alpha = 8^\circ$. Pentru $\alpha = 10^\circ$ se poate observa o mică degradare, urmată de creșterea constantă a valorii Cd. Dacă pentru $\alpha < 10^\circ$ se poate considera că Cd are în medie aproximativ aceeași valoare, pentru $\alpha > 10^\circ$ este evident că performanța aerodinamică se degradează fără nici un indiciu de înclinare spre valori mai mici.

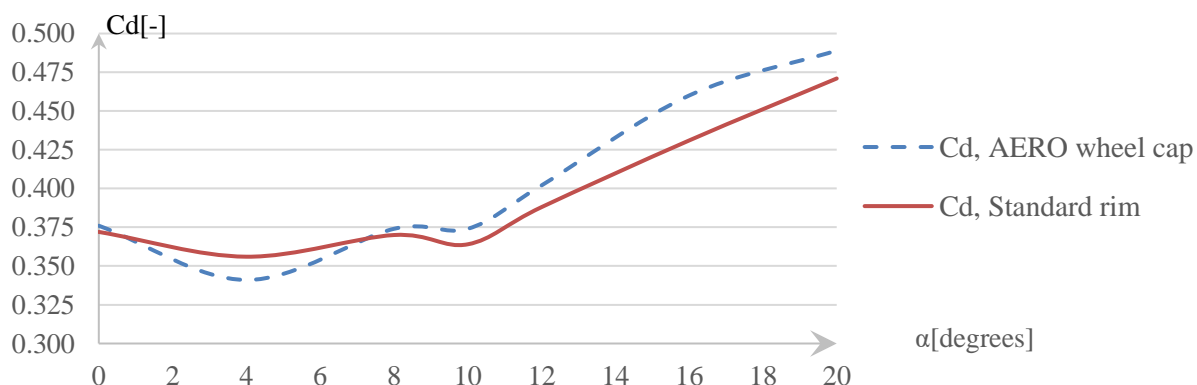


Figura 14 Variația Cd cu α , pentru roțile standard și aerodinamice

Pentru a înțelege și evalua evoluția coeficientului aerodinamic este necesar să analizăm zonele de rezistență care sunt dezvoltate sub diferite unghiuri de deviere.

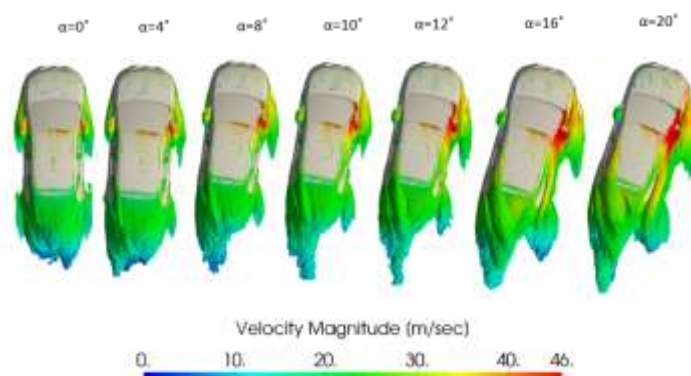


Figura 15 Variația formei turbionului cu unghiul de deviere, α

Pentru $\alpha < 10^\circ$ se poate observa că turbionul din spate este transformat dintr-o formă aproape uniformă într-o formă asimetrică, cu un volum mai lung, dar mai subțire. În același timp, rezistența asociată cu stâlpul frontal drept și oglinda exterioară se intensifică. Oscilația C_d în funcție de α poate fi explicată, în acest caz specific, prin cantitatea diferită de energie consumată de fiecare zonă de rezistență locală menționată.

Pentru $\alpha < 8^\circ$ există un efect benefic datorită energiei reduse în rezistența spate, care pentru autovehicule este cea mai importantă, deși celelalte zone sunt încă stabile și aproape la același nivel de energie. Pentru $-8^\circ < \alpha < 8^\circ$, începe să apară o intensificare a rezistenței stâlpului și a roții din față. Acesta este modul în care poate fi explicată ușoara creștere a C_d global.

Pentru $\alpha \geq 10^\circ$, principala diferență constă în detașarea formei de rezistență locală a stâlpului drept. Cercetările anterioare au indicat un câștig important al C_d care poate fi obținut cu ajutorul definiției tehnice aerodinamice pentru roți: capac complet al roților pe toate cele patru roți și defletoare ale roților pentru roțile din spate.

După cum s-a menționat deja, pentru a avea o mai bună înțelegere a rezistenței aerodinamice totale a autovehiculului, este necesar să se raporteze la parametrul C_dA și nu numai la C_d . În figura 16, poate fi analizată evoluția C_dA cu α .

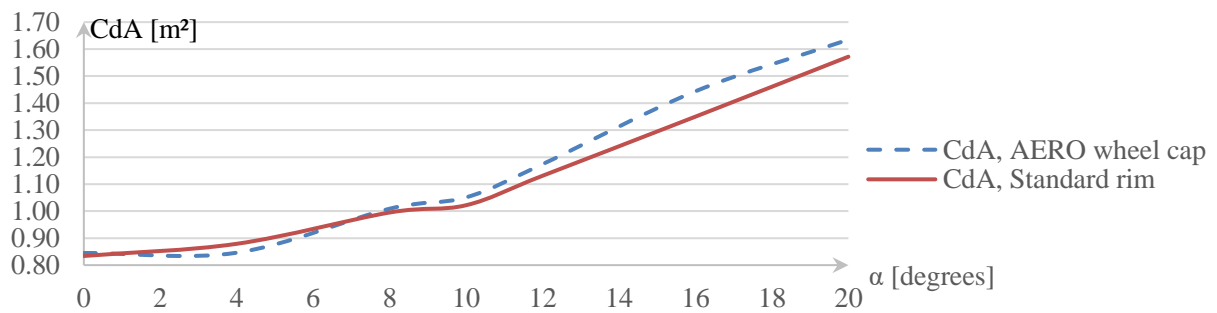


Figura 16 Variația CdA cu α , pentru proiectarea roților standard și aerodinamice

Soluțiile optimizate pentru procesul actual de omologare pot ridica probleme semnificative pentru noile proceduri, cum ar fi RDE (Real Driving Emissions). Cu toate acestea, se consideră că este obligatorie includerea elementelor aerodinamice active în definiția tehnică a autovehiculului pentru a respecta normele dure CAFÉ (Corporate average fuel economy).

Pe baza studiilor aerodinamice prezentate, care evaluează performanța de bază a trei tipuri de caroserie disponibile pe scară largă pentru uz general, dar și pentru autovehicule de intervenție, plus rezultate favorabile pentru unele dintre scenariile de roți studiate (atât în direcția longitudinală standard a vântului, cât și în vântul lateral), se decide evaluarea în continuare a posibilului beneficiu aerodinamic al înlocuirii carenajelor sub caroserie cu piese extinse în suprafață și cu o planeitate îmbunătățită a roților

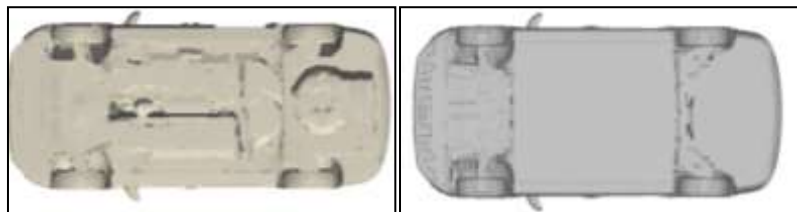


Figura 17 Carenaje standard sub caroserie (imaginea 1) versus carenaje propuse sub caroserie (imaginea a 2-a)

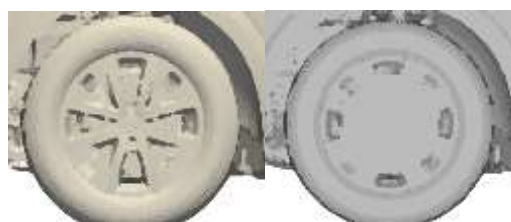


Figura 18 Janta standard (partea stângă) versus janta aerodinamică propusă (dreapta)

Simulările CFD efectuate pe fiecare tip de caroserie, cu evoluțiile tehnice detaliate mai sus, indică o influență diferită a pieselor adăugate asupra performanței generale a CdA, așa cum se arată în tabelul 3.

Tabelul 3 Rezultatele CdA pentru definierea tehnică optimizată, în raport cu baza și autovehiculul de intervenție

Caz studiat	Sedan "autovehicul de bază"	Sedan "autovehicul de intervenție"	Sedan "autovehicul optimizat"
SCx [m ²]	0.659	0.753	0.708
Δ SCx [m ²]	-	+ 0.094	+ 0.049
Δ SCx [%]	-	+ 14	+7.44
Caz studiat	Hatch back "autovehicul de bază"	Hatch back "autovehicul de intervenție"	Hatch back "autovehicul optimizat"
SCx [m ²]	0.836	0.910	0.899
Δ SCx [m ²]	-	+0.074	+ 0.063
Δ SCx [%]	-	+8.8	+7.54
Caz studiat	SUV "autovehicul de bază"	SUV "autovehicul de intervenție"	SUV "autovehicul optimizat"
SCx [m ²]	1.000	1.059	0.998
Δ SCx [m ²]	-	+0.059	-0.002
Δ SCx [%]	-	+5.8	- 0.02

Analizând rezultatele obținute, se pot trage mai multe concluzii. În primul rând, așa cum era de așteptat, un element nou introdus nu va avea același efect asupra diferitelor tipuri de caroserii. Acest lucru se datorează unei forme diferite a autovehiculului și vitezei fluxului de aer deasupra și sub caroserie (oferind o formă și dimensiuni specifice de turbion spate). În consecință, pentru obținerea unor rezultate mai bune, este necesară personalizarea specifică per caroserie. În al doilea rând, rezistența aerodinamică a dispozitivului de avertizare luminoasă poate fi compensată complet (caroserie SUV – turbion spate echilibrat) sau redusă la jumătate

(caroserie sedan – turbion spate ușor dezechilibrată în direcția descendentă) prin utilizarea unui kit de caroserie relativ simplu pentru autovehiculele de intervenție.

Când vine vorba de tipul de caroserie hatch back, vor trebui efectuate studii suplimentare pentru a identifica un set adecvat de piese care să se potrivească cu turbionul autovehiculului de bază, deoarece configurația actuală are un turbion spate dezechilibrat, cu dimensiuni mari. Unele opțiuni care vor fi testate pentru a vedea dacă îmbunătățesc turbionul pentru autovehiculele de intervenție de tip caroserie hatch back sunt: acoperirea parțială a caroseriei, adăugarea de defletoare pe carenajul inferior al caroseriei sau extinderea difuzorului superior spate.

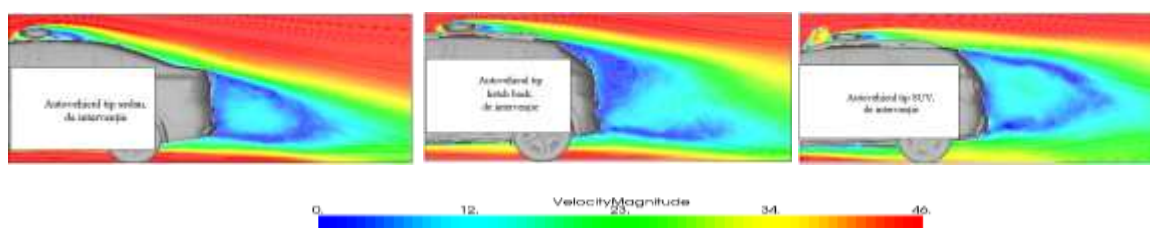


Figura 20 Turbionul spate al autovehiculelor de intervenție optimizate

Studiul de față s-a axat pe un dispozitiv de avertizare luminoasă generic și nu pe cele optimizate aerodinamic, deoarece primele menționate sunt disponibile pe scară mai largă, sunt deja aplicate pe majoritatea autovehiculelor de intervenție, sunt ușor de instalat și prezintă un risc redus de a nu respecta legile aplicate în acest domeniu.

În plus, pentru studiul CFD efectuat pe autovehicule de pasageri precum sedan, hatch back, SUV și modul în care dispozitivele de avertizare luminoasă influențează performanța aerodinamică, au fost deja inițiate studii suplimentare pentru domeniul autovehiculelor comerciale grele, cum ar fi autocamioanele. Chiar dacă încă într-o stare incipientă, este prezentat un rezumat al primilor pași făcuți împreună cu colegi cercetători din domeniul aerodinamic al automobilelor. [75] [76]

Autocamioanele au dimensiuni relativ mari având în vedere segmentul auto al transporturilor, fapt impus de destinația lor generică pentru transportul de marfă, categorie aleasă a fi de interes primordial datorită vitezelor relativ mari și numărului mare de ore de lucru. Prin urmare, din punct de vedere aerodinamic, aceste autovehicule au dezavantajul de a genera o rezistență ridicată la înaintare.

Sunt definite unsprezece cazuri de studiu pentru dispozitivul de avertizare luminoasă de pe acoperiș, dispozitive care vor fi montate pe o cabină de tractor generică

Simulările CFD se realizează în mediul virtual și doar capul tractor va fi utilizat, fără aplicarea unei semiremorci ca urmare a faptului că zona de interes se află pe acoperișul cabinei.

Pentru interpretarea rezultatelor, s-a ales utilizarea liniilor de curent, a vectorilor de viteză și a presiunilor. De asemenea, pentru o bună vizibilitate a parametrilor analizați, precum liniile de curent și vectori de viteză, s-a ales exemplificarea acestora pe un plan ZOY la coordonata Y0 unde în aproape toate cazurile există elemente care perturbă fluxul de aer.

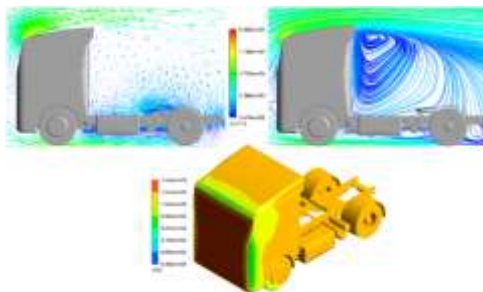


Figura 21 Curgerea aerului pentru cabina de autocamion

Pe baza valorilor numerice și a interpretării fluxurilor de aer pentru cazurile studiate, se poate spune că modulele de avertizare luminoasă degradează performanțele aerodinamice ale camioanelor. În consecință, integrarea lor în deflectorul de acoperiș poate fi considerată o opțiune viabilă. Configurațiile de la 7 la 11 permit prin natura construcției un flux mai bun de aer, deci o performanță aerodinamică mai mare decât în cazurile anterioare.

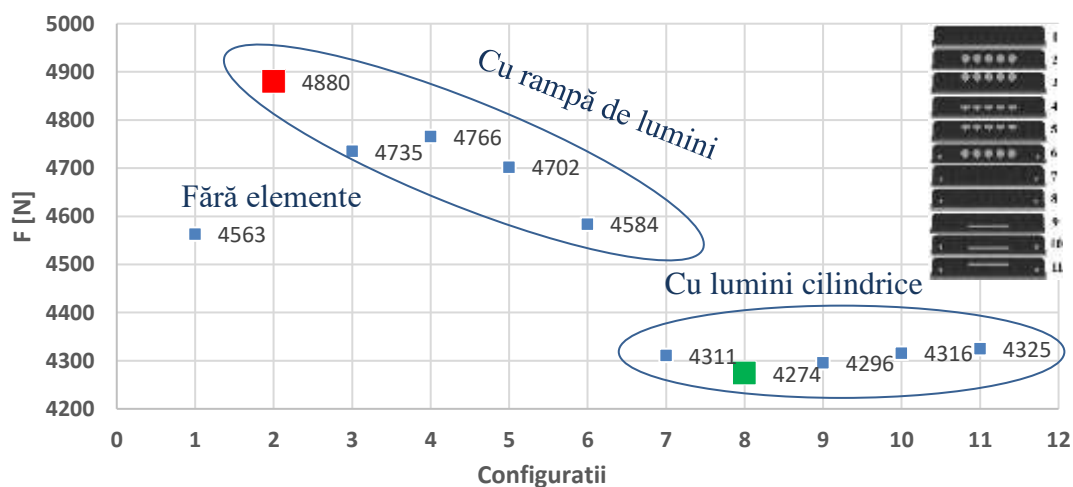


Figura 22 Valorile forțelor pe axa X în funcție de configurațiile studiate

6. REZULTATE EXPERIMENTALE

Rezultatele experimentale și concluziile aferente, obținute în mediul virtual și detaliate în cadrul capitolului 5, sunt validate prin realizarea unor experimente fizice cât mai apropiate de condițiile mediului real, dar în condiții de laborator.

Parametrii controlați în realizarea măsurătorilor fizice sunt cei ai aerului ambiant din camera de test precum: temperatura aerului de 20 grade Celsius, densitatea aerului de 1,2041 kg/m³, iar viteza prestabilită de deplasare a aerului este de 140 km/h.

În lucrare se prezintă trei cazuri măsurate în vederea corelării măsurătorilor virtuale. Scenariile alese sunt identificate ca fiind cele cu dispozitivul de avertizare luminoasă montat în poziție centrală deoarece studiul detaliat în cadrul capitolului 5 identifică aceste cazuri ca fiind printre cele mai benefice pentru rezistența aerodinamică a autovehiculelor de intervenție pe de o parte, iar pe partea cealaltă, deoarece este scenariul cel mai întâlnit pentru autovehicule de intervenție.

Pentru efectuarea testului, a fost introdus în incintă autovehiculul de tip sedan și conectat la modulul de măsurare, pentru a se realiza primul test de referință. Apoi, menținându-se exact aceeași poziție a autovehiculului s-a montat în poziție mediană dispozitivul de avertizare luminoasă descrisă în cadrul capitolului 5. S-a efectuat astfel măsurătoarea cu dispozitivul montat și s-a înregistrat noul rezultat pentru coeficientul aerodinamic. Diferența dintre cele două valori este analizată și apoi comparată cu rezultatul obținut în aceleași condiții, în mediu virtual.

Procedura de test este repetată în aceleași condiții pentru toate cele trei caroserii, sedan, hatch back și SUV, analizate în cadrul lucrării. Modul de amplasare a dispozitivului de avertizare luminoasă în zona mediană este exemplificată în figura 23 pentru cele trei tipuri de caroserii analizate.



Figura 23 Amplasarea dispozitivului de avertizare luminoasă

Măsurătorile fizice indică faptul că dispozitivul de avertizare luminoasă utilizat, în poziție de montare mediană, pentru un autovehicul de tip sedan aduce o degradare de 18%. Dacă ne raportăm la măsurătorile realizate în condiții virtuale, prin simulări de tip CFD, degradarea obținută în aceleași condiții este de 14%. Se constată în acest caz o diferență de 4 puncte procentuale între cele 2 măsurători realizate.

Pentru cazul autovehiculului de tip hatch back, prin aplicarea acelorași condiții de test, degradarea adusă de dispozitivul de avertizare luminoasă este de 8%. Se poate constata în acest caz o diferență de doar 0.8 puncte procentuale față de rezultatele obținute în mediul virtual.

Cazul autovehiculului tip SUV indică prin măsurătoare fizică a coeficientului aerodinamic o degradare de 5.5%, în timp ce rezultatele numerice prezentate în capitolul 5 indica o degradare de 5.8% în mediul virtual. Diferența dintre cele două măsurători fiind de doar 0.3 puncte procentuale

Valorile obținute pentru scenariile prezentate confirmă concluziile enumerate în cadrul capitolului 5 și anume:

- Dispozitivele suplimentare amplasate pe plafonul autovehiculelor au o influență negativă asupra rezistenței aerodinamice deoarece afectează echilibrul fluxului de aer pentru autovehiculul de baza (fără dispozitive adăugate)
- Dispozitivul de avertizare luminoasă are o influență mai mare asupra autovehiculelor de tip sedan, comparativ cu celelalte tipuri de caroserie.
- Influență dispozitivului suplimentar scade în pondere de la sedan, către hatch back și în final către caroseria de tip SUV, datorita turbionului spate diferit și a interacțiunii dintre acesta și turbionul local al dispozitivului de avertizare luminoasă.

Prin prisma măsurărilor fizice efectuate se considera ca studiul realizat în mediul virtual este concludent, iar concluziile acestuia sunt valide.

7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Lucrarea a abordat influența dispozitivelor de avertizare luminoasă montate pe plafon, specifice vehiculelor de intervenție, asupra curgerii aerului și deci a performanței aerodinamice. Subiectul a fost ales pentru studiu dat fiind că o rezistență aerodinamică mărită conduce la obținerea unei cantități mai mari de emisii poluante la țeava de eșapament și deci la un efect negativ amplificat asupra mediului și sănătății populației. Legislația actuală exclude categoria autovehiculelor de intervenție de la regulile și penalitățile asociate unei cantități de emisii poluante mărite. Totuși, în contextul decarbonizării întregului segment de transport, este anticipată crearea unui cadru legislativ mai restrictiv și pentru autovehiculele de intervenție.

Cu ajutorul fenomenelor asociate curgerii aerului în jurul autovehiculelor și a metodelor de măsurare a rezistenței aerodinamice, a fost realizat un studiu prin metoda CFD, pentru a studia aerodinamica autovehiculelor de tip sedan, hatch back și SUV. Aceste tipologii sunt alese dat fiind că adesea sunt utilizate în medii urbane sau suburbane, de către instituții sau alte autorități care necesită utilizarea unor autovehicule cu echipamente de avertizare.

Studiul a constatat în evaluarea performanței de bază a performanței aerodinamice pentru autovehicule fără elemente de avertizare montate pe plafon. S-a constatat astfel că autovehiculul de tip sedan are cea mai bună performanță aerodinamică dintre cele 3 enumerate. Acest fapt este datorat preponderent unei suprafețe spate reduse în dimensiuni, apropiindu-se de forma unei picături de apă în cădere. Spre deosebire de autovehiculul de tip sedan, autovehiculul de tip hatch back are o suprafața spate mărită și deci un turbion spate amplificat în dimensiuni. Astfel rezistența aerodinamică a acestuia este considerabil mai mare decât în

cazul autovehiculului sedan. Cu referire la autovehiculul de tip SUV, a fost înregistrată o creștere a rezistenței aerodinamice în raport cu autovehiculul de tip sedan, dar și față de cel tip hatch back. Chiar dacă nu a fost înregistrată o diferență foarte mare față de hatch back, valorile măsurate pentru coeficientul aerodinamic specifice SUV-ului indică atât un turbion spate mai mare, dar și efectul negativ asupra echilibrului turbionului spate, asociat unei gârzi la sol mai mare.

Etapa intermediară a lucrării a prezentat rezultatele unui studiu extins asupra aerodinamicii roților și a pasajului de roată. Scopul a fost de a determina în ce măsură optimizări realizate la nivelul acestei zone pot ameliora rezistența aerodinamică a autovehiculelor. Această zonă a fost aleasă considerând ipoteza că potențialele modificări aduse sunt facil de realizat, fără să necesite schimbări semnificative la nivelul caroseriei sau a structurii de bază a autovehiculului.

Studiile extinse realizate la nivelul aerodinamicii roților de autovehicul au fost transpuse atât pentru scenariul în care fluxul de aer vine din față acestuia, dar și pentru scenariul de amplasare distinctă între autovehicul și fluxul de aer, deci condiții de vânt lateral. Această extensie a lucrării a fost considerată necesară pentru o evaluare cât mai completă a aerodinamicii autovehiculului și analiza beneficiilor identificate pentru curgerea fluxului de aer atât pe axa X, dar și a variației cu $\pm 20^\circ$ față de axa X. De asemenea, studiul aerodinamicii autovehiculelor în scenariul cu vânt lateral este necesar și datorită verificărilor cantității de emisii poluante în condiții reale, prin metoda RDE, efectuată de autorități.

În cadrul determinărilor în condiții de vânt lateral, un efect interesant a fost constatat în cazul comparației realizate între definiția de roată standard și cea definită ca fiind aerodinamică. Dacă pentru unghiuri relativ reduse roata aerodinamică a avut un efect pozitiv, se constată că la mărirea unghiului lateral, efectul de suprafață proiectată mărită a condus la un efect global negativ și deci la creșterea rezistenței aerodinamice. Concluzia principală este că, pentru o imagine de ansamblu completă și corectă asupra performanței aerodinamice, nu este suficientă validarea doar cu flux de aer strict aliniat cu axa X a autovehiculului, ci este necesară evaluarea și determinarea valorilor coeficientului aerodinamic și în condiții de vânt lateral. Această componentă poate contribui semnificativ la reducerea diferenței dintre consumul de carburant anunțat de producător (determinat în condiții de laborator) și consumul de carburant resimțit de client, în exploatarea autovehiculului în condiții normale. Bineînțeles, rezistența aerodinamică este doar una din componentele necesare a fi studiate pentru diminuarea diferenței de consum carburant.

Studiul CFD a constat în evaluarea performanței autovehiculelor de intervenție, pentru cele trei tipuri de caroserii menționate și o analiză a principalelor scenarii de montare a dispozitivului de avertizare luminoasă: anterior, median și spate. Efectele aerodinamice întâlnite local în zona dispozitivului montat pe plafon, dar și efectul asupra turbionului spate al fiecărui autovehicul sunt analizate prin analiza curgerii aerului, vorticitate și deficitul de presiune asociat. Pentru toate cazurile însă, montarea dispozitivului de avertizare luminoasă în poziție față a fost cea mai defavorabilă din cauza poziționării în calea fluxului de aer de mare viteză ce vine din zona parbrizului, conducând astfel la un turbion local amplificat ca mărime și energie.

Etapă finală a studiului a constat în încercarea de ameliorare a rezistenței aerodinamice a autovehiculelor de intervenție cu elemente considerate ușor de aplicat precum: optimizarea ornamentului de roată și a elementelor fixe amplasate sub autovehicul (carenaje), prin extinderea lor și asigurarea unei planeități sporite. Forma carenajelor autovehiculelor este în general condiționată de factori precum materialul din care sunt realizate (ce permite sau nu proximitatea de surse fierbinți a sistemelor de sub autovehicul) și constrângeri de arhitectură sau posibilitate de montare.

Rezultatele CFD ce au fost obținute prin setul de simulări realizat pe autovehiculele de intervenție cu dispozitiv de avertizare luminoasă în poziție mediană, ornament de roată cu porozitate redusă și carenaje optimizate aerodinamic, au indicat posibilitatea de reducere a rezistenței aerodinamice.

Astfel, pentru autovehiculul de tip sedan, efectul elementelor aerodinamice adiționale a permis o compensare parțială a prezenței dispozitivului de avertizare luminoasă. Rezultatele numerice au indicat o reducere cu aproape 50% a efectului creat inițial de prezența dispozitivului de avertizare luminoasă, ceea ce subliniază pe de o parte aportul studiului realizat, dar și perspectivele posibile de reducere suplimentară a rezistenței aerodinamice. În cazul autovehiculului de tip hatch back, aceeași tendință a fost întâlnită, însă cu un efect semnificativ redus, acest fapt fiind datorat unui turbion spate deficitar. Forma turbionului spate și echilibrul acestuia, în cazul autovehiculului de tip hatch back, sunt în comparație cu autovehiculul sedan, deficitare și deci efectul dispozitivului de avertizare luminoasă este diferit în cele 2 cazuri. Pentru autovehiculul de tip hatch back sunt necesare elemente suplimentare de optimizare aerodinamică pentru a face posibil același câștig ca în cazul sedan. Efectul negativ al turbionului asociat unei suprafețe spate mari este cu atât mai mult subliniat în cazul autovehiculului de tip SUV unde aplicarea elementelor de optimizare menționate are efect nul. Acest rezultat este datorat faptului că elementele optimizate au o influență relativ redusă în

ecuația globală a aerodinamicii autovehiculului de tip SUV. Pentru acest caz este deci necesară identificarea altor zone de optimizare pentru a putea reduce rezistența aerodinamică.

Concluzia studiului este că dispozitivele de avertizare luminoasă au o influență semnificativă asupra autovehiculelor, iar studiul asupra caroseriilor de tip sedan, hatch back și SUV este vital pentru reducerea consumului de carburant și implicit al emisiilor poluante asociate. Se poate obține astfel un efect benefic de natură financiară dar și o contribuție importantă în decarbonizarea transportului, preponderent în zona urbană și suburbană.

Corelarea rezultatelor numerice obținute pentru performanța aerodinamică a autovehiculelor de intervenție a fost realizată prin experimente fizice de măsură, pe autovehicule la scara 1:1 de tip sedan, hatch back și SUV. Condițiile de măsurare au fost similare între metoda virtuală și cea fizică pentru a permite validarea studiului realizat. În urma măsurătorilor s-a constatat că pentru autovehiculul de tip sedan diferența între cele 2 măsurători este de 4 puncte procentuale, pentru autovehiculul de tip hatch back de 0.8 puncte procentuale, iar pentru autovehiculul de tip SUV diferența este de doar 0.3 puncte procentuale. Aceste rezultate sunt preponderent date de sensibilitatea echilibrului pentru turbionul spate al fiecărui tip de autovehicul. Dat fiind că autovehiculul sedan are o performanță mai bună dar un echilibru mai sensibil, metoda numerică nu surprinde complet fenomenologia acestuia, așa cum se realizează în cadrul experimentului fizic. Însă, pentru hatch back și SUV, unde turbionul are dimensiuni mai mari dar este mai stabil, metoda numerică și cea fizică au indicat rezultate foarte apropiate.

Continua transformare a industriei autovehiculelor, dorința de eficientizare a transportului, dar și obligativitatea reducerii emisiilor poluante conduc la necesitatea studiilor aerodinamice, precum lucrarea de față, asupra autovehiculelor de intervenție prevăzute cu dispozitive de avertizare luminoasă. Studiul actual se remarcă prin abordarea acestei tematici pentru autovehicule de tip sedan, hatch back și SUV, dat fiind că nu au fost identificate lucrări similare, publicate în literatura de specialitate. Gradul de unicitate al subiectului prezentat și utilizarea în număr mare a acestor tipuri de caroserii pentru autovehicule de intervenție indică o contribuție importantă în domeniu.

Lucrarea nu prezintă doar o analiză globală a aerodinamicii autovehiculelor sedan, hatch back și SUV ci studiază extensiv aerodinamica locală a roților de autovehicul și influența în performanța globală. Contribuțiile aduse constau în realizarea unei imagini de ansamblu, detaliată, asupra curgerii aerului în zona jantelor de roată, prin studiul factorilor de porozitate și planeitate a unor scenarii distincte, ce pot fi corelate cu modelele utilizate în prezent în industria autovehiculelor.

În cadrul lucrării sunt prezentate pentru prima dată în țara noastră rezultatele cercetărilor cu referire la măsurători pentru dispozitivul de avertizare luminoasă pentru sedan, hatch back și SUV, nu doar în mediul virtual prin metoda CFD, dar și corelat cu măsurători fizice pe autovehiculele scara 1:1. Prezenta lucrare poate fi un studiu de referință în cazul studiului reducerii de carburant pentru autovehiculele utilizate de poliție, jandarmerie, transport pacienți, pompieri, numind doar câteva instituții care utilizează frecvent autovehiculele de tipul celor studiate și prezentate în lucrarea actuală.

Studiile vor fi continuate în primul rând cu analiza accesoriilor ce pot ameliora rezistența aerodinamică a autovehiculelor de tip sedan cu dispozitiv de avertizare luminoasă, dar mai ales a accesoriilor necesare autovehiculelor de tip hatch back și SUV cu dispozitiv de avertizare luminoasă. Scopul rămâne acela de a identifica un set de elemente care să permită anularea efectului negativ al dispozitivului de avertizare luminoasă asupra performanței aerodinamice.

O altă cale de cercetare o reprezintă implementarea elementelor aerodinamice active, precum roțile cu ornament a căror porozitate poate fi variată, astfel încât performanța să fie optimizată nu doar pentru situația teoretică a fluxului de aer aliniat cu axa X a autovehiculului, ci și pentru diferite situații reale unde apare vântul lateral.

Cercetările se pot extinde și asupra altor tipologii de caroserii utilizate de autorități și instituții, precum autovehiculele de tip „station wagon” sau autoutilitare tip „dubă” sau „pick-up”. În acest sens, colaborări deja demarate urmăresc studiul aerodinamic al autovehiculelor grele tip cap tractor și influența diferitelor dispozitive de avertizare luminoasă ce pot fi utilizate, după cum este prezentat în finalul lucrării actuale.

Tematica aerodinamicii autovehiculelor de intervenție este considerată relevantă și de real interes pentru eficientizarea segmentului de transport, optimizarea costurilor asociate carburantului consumat, dar și a reducerii emisiilor poluate și a influenței asupra mediului. În acest context, studiul prezintă primii pași realizați, căile viitoare de cercetare, urmărind extinderea validărilor fizice pentru o corelare completă, astfel încât materialul să poată fi considerat un punct de referință în acest domeniu.

Bibliografie

1. Reducerea emisiilor de carbon: obiective și politici ale UE, Parlamentul European, aprilie 2023
2. Michelle Mongo, Fateh Belaïd, Boumediene Ramdani, The effects of environmental innovations on CO2 emissions: Empirical evidence from Europe (Efectele inovațiilor de mediu asupra emisiilor de CO2: dovezi empirice din Europa), Environmental Science & Policy, volumul 118, 2021, paginile 1-9, ISSN 1462-9011,
3. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/vehicle-categories_en
4. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-02/policy_transport_hdv_20230214_proposal_en_0.pdf
5. John D. Anderson Jr., O istorie a aerodinamicii și impactul acesteia asupra mașinilor zburătoare, Universitatea din Maryland, 2001, ISBN 0521669553
6. <https://www.britannica.com/topic/Lilienthal-standard-glider>
7. https://www.wright-brothers.org/History_Wing/History_of_the_Airplane/Doers_and_Dreamers/Wright_Smithsonian_Controversy/00_Wright_Smithsonian_Controversy_Intro.htm
8. Oliviu SUGAR GABOR, Modelul liniei de ridicare neliniare folosind o formulare vectorială a teoremei instabile Kutta-Joukowski, Inginerie aeronautică și mecanică, Școala de calcul, știință și inginerie, Universitatea din Salford, DOI: 10.13111/20668201.2019.11.1.15, Conferința Internațională de Științe Aerospațiale "AEROSPATIAL 2018"
9. Furoni, D & Lima, Ernani & Anderson, Fabiana & Ribeiro, D & Almeida, Franciana & Pedrochi, Francielle & Sato, Gisele & Philippsen, Gustavo & Max, Dearo & Simonetti, Iara & Mantovani, Antonio & Maeda, Kelly & Christine, D & Silva, Michel & Zan, Marcelo & Freitas, D & Andrade, Bordim & Sanches, Cristina & Oliveira, De & Neves, Semn. (2005). SANTOS-DUMONT S &D - danhoni. 10.13140/RG.2.2.18475.46885.
10. <https://historyforce.com/20-romanian-inventors-and-their-great-inventions/>
11. <https://www.britannica.com/technology/automotive-industry/The-modern-industry>
12. Curs „DINAMICA AUTOVEHICULELOR”, Prof. Dr. Ing. Cristian Andreescu, Facultatea Transporturi, Dept. Autovehicule Rutiere, UPB, 2012-2013
13. E I Houghton, P W Carpenter "Aerodinamica pentru studenții ingineri", ediția a 5-a, Universitatea din Warwick
14. J. Pavlovic, B. Ciuffo, G. Fontaras, V. Valverde, A. Marotta, How much difference in type-approval CO2 emissions from passenger cars in Europe may be expected from change to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)?, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 111, 2018, Pages 136-147, ISSN 0965-8564
15. Saša VASILJEVIĆ, Nataša ALEKSIĆ, Dragan RAJKOVIĆ, Rade ĐUKIĆ, Milovan ŠARENAC, Nevena BANKOVIĆ, BENEFICIILE APLICĂRII TEHNOLOGIEI CAD/CAE ÎN DEZVOLTAREA VEHICULELOR DIN INDUSTRIA AUTO, A CTA TECHNICA CORVINIENSIS – Buletin de inginerie, volumul XI, 2018, Capitolul 2
16. Keck, Helmut și bolnav, Mirjam, Treizeci de ani de simulare a debitului numeric în turbomașini hidraulice, Acta Mechanica. 2008, 201. 211-229. 10.1007/S00707-008-0060-4

17. Denton J. D., 2010, "Unele limitări ale CFD-urilor turbomachinery". ASME. Turbo Expo: Putere pentru uscat, mare și aer, Vol. 7, doi: 10.1115 / GT2010-22540.
18. R L IOVĂNEL, Simularea numerică a debitului într-o turbină KAPLAN, teză de doctorat, București, 2018
19. Wang, B., Wang, B., Lv, B., Wang, R. (2022). Impactul gazelor de eșapament ale autovehiculelor asupra calității aerului dintr-un oraș urban. *Aerosol Air Qual. Rez.* 22, 220213. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220213>
20. Wolf-Heinrich Hucho, Aerodinamica vehiculelor rutiere: de la mecanica fluidelor la ingineria vehiculelor, ediția a 4-a,
21. Babinsky, Holger. (2003). Cum funcționează aripile?, 38. 497. 10.1088/0031-9120/38/6/001.
22. <https://www.greenoptimistic.com/100-year-old-aerodynamics-problem-solved-could-increase-mpg-dramatically-20080927/>
23. Jones Classical Aerodynamic Theory, Standford Course
24. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/boundary-layer/>
25. Pijush K. Kundu, Ira M. Cohen, David R. Dowling, Capitolul 9 - Straturi limită și subiecte conexe, Editor(i): Fluid Mechanics (ediția a cincea), Academic Press, 2012, , ISBN 9780123821003,
26. V.N. Constantinescu, St. Galetuse, Mecanica fluidelor și elemente de aerodinamica, Didactica și Pedagogica, 1983
27. Uruba, Vaclav. (2018). Despre interpretarea fizică a numărului Reynolds. *Lucrările conferinței AIP.* 2000. 020019. 10.1063/1.5049926.
28. Aerodinamica mașinilor de curse, Joseph Katz, ediția 1
29. Mishra, Pankaj și Aharwal, K. (2018). O revizuire a selecției modelului de turbulență pentru analiza CFD a fluxului de aer într-un depozit frigorific. *Seria de conferințe IOP: Știința și ingineria materialelor.* 402. 012145. 10.1088/1757-899X/402/1/012145.
30. Charles N. Eastlake, Viziunea unui aerodinamician asupra lui Lift, Bernoulli și Newton
31. <https://racecar-engineering.telegraph.co.uk/articles/f1-ferrari-sf90-testing-update/>
32. <https://www.aip-automotive.de/en/Products/Test-Stands/RESEARCH-DEVELOPMENT/Wind-Tunnel-Balance>
33. Barlow, Jewel B., Rae, William H., Pope, Alan. Testarea tunelului aerodinamic la viteză redusă. *Regatul Unit: Wiley*, 1999.
34. <https://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-1-1899-1939/>
35. <https://www.topgear.com/car-news/electric/these-are-10-most-aerodynamically-efficient-evs-sale-today>
36. <https://ceautoclassic.eu/persu-forgotten-streamliner-pioneer/>
37. Obidi, T. Yomi. Teoria și aplicațiile aerodinamicii pentru vehiculele terestre. *Statele Unite: SAE International*, 2014.
38. <https://www.serus-dacia.ro/noul-sandero-stepway>
39. <https://heycar.co.uk/blog/new-2023-toyota-prius>
40. <https://configurator.porsche.com/en-US/model/992120/option/1NV>
41. <https://newsroom.toyota.eu/prius-plug-in-hybrid/>

42. <https://cnevpost.com/2023/01/11/regulatory-filing-heres-what-nios-new-es6-looks-like/>
43. <https://whyisthisinteresting.substack.com/p/the-aero-wheel-edition>
44. <https://ehfcv.com/air-curtains/>
45. <https://insideevs.com/news/520224/doug-demuro-reviews-vw-xl1/>
46. <https://www.magna.com/products/body-exterior-structures/active-aerodynamics>
47. <https://www.car-engineer.com/renault-eolab-aerodynamics-features/>
48. <https://www.digitaltrends.com/cars/road-rave-how-aerodynamics-is-reshaping-the-car-industry/>
49. <https://g05.bimmerpost.com/forums/showthread.php?t=1612428>
50. Taherkhani, Sam și de Boer, Greg și Gaskell, P.H. și Gilkeson, C.A. și Hewson, Rob și A, Keech și Thompson, Harvey și Toropov, Vassili. (2015). Reducerea rezistenței aerodinamice a vehiculelor de intervenție în caz de urgență. Progrese în ingineria automobilelor. 4. 1000122. 10.4172/2167-7670.1000122.
51. Tendințe de îmbunătățire pentru motoarele cu ardere internă. Croația: IntechOpen, 2018.
52. Anil K. Madhusudhanan, Daniel Ainalis, Xiaoxiang Na, Isabel Vallina Garcia, Michael Sutcliffe, David Cebon, Efectele modificărilor semiremorcii asupra consumului de combustibil HGV, Cercetare în domeniul transporturilor Partea D: Transport și mediu, volumul 92, 2021, 102717, ISSN 1361-9209,
53. Taherkhani, Sam. (2015). Optimizarea bazată pe dinamica fluidelor computaționale a vehiculelor de intervenție în caz de urgență.
54. Bayraktar, I. și T. Bayraktar, Ghid pentru simularea CFD a aerodinamicii vehiculelor terestre. SAE International 10.4271/2006-01-3544, 2006.
55. Aider, J. și J.F. Beaudoin, reducerea rezistenței la înaintare și ridicare a unui corp de cacealma 3D folosind clapete. Experimente în fluid 10.1007/s00348-007-0392-1, 2008.
56. David C. Brock, Înțelegerea legii lui Moore: patru decenii de inovație. Statele Unite: Fundația Patrimoniului Chimic, 2006.
57. Tudor BARACU, Ecuatiile Navier-Stokes, Universitatea Politehnica din București
58. Jurij SODJA, Modele de turbulență în CFD, Universitatea din Ljubljana, Facultatea de matematică și fizică Departamentul de fizică, Introducere
59. Jurij SODJA, Modele de turbulență în CFD, Universitatea din Ljubljana, Facultatea de matematică și fizică, Departamentul de Fizică, Ljubljana, martie 2007
60. Dieter A. Wolf-Gladrow Alfred Wegener Institutul pentru Polare și Marină
61. Dieter A. Wolf-Gladrow , cercetare, Automate celulare cu zăbrele și modele Boltzmann cu zăbrele - o introducere, Germania,
62. Luan, Huan-Bo și Xu, Hui și Chen, Li și Sun, Dongliang și Tao, Wen-Quan. (2010). Ilustrații numerice ale cuplării dintre metoda Boltzmann cu zăbrele și metodele macronumerice de tip finit. Transfer numeric de căldură. Partea B: Fundamente. 147-171. 10.1080/15421400903579929.
63. https://www.soufflerie2a.com/en/moyens_soufflerie/soufflerie-echelle-11-561.html
- 64. L Ilea, D Iozsa și G Fratila , Modelarea unui tunel aerodinamic virtual pentru masuratori aerodinamice ale vehiculelor, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Ing. 1220 012027, 10.1088/1757-899X/1220/1/012027**
65. <https://www.soufflerie2a.com/en/>

66. https://www.soufflerie2a.com/en/moyens_soufflerie/soufflerie-echelle-11-561.html
67. Manual de utilizare ANSA
68. Emmanuel Lévêque, F. Toschi, Liang Shao, Jean-Pierre Bertoglio. Modelul Smagorinsky îmbunătățit prin forfecare pentru simularea turbionară a fluxurilor turbulente legate de pereți. Jurnalul de mecanică a fluidelor, 2007, 570, pp.491-502. ff10.1017/S0022112006003429ff. fhal-00272169f
69. Ilea, L., Iozsa, D., Stan, C., Fratila, G. (2019). impactul jantei roții asupra aerodinamicii vehiculelor de pasageri. În: Burnete, N., Varga, B. (eds) Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018). AMMA2018 2018. Proceduri în ingineria auto. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94409-8_11
70. D Iozsa, L Ilea și G Fratila, Influența luminilor de avertizare pentru vehiculele de intervenție asupra performanțelor aerodinamice, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Ing. 997 012118, 10.1088/1757-899X/997/1/012118
71. <https://www.mvslight.com/Product/15-inch-E--Type-Multi-LED-Light-Bar/29/>
72. L Ilea, D Iozsa și G Fratila, Un studiu teoretic aerodinamic privind accesoriile exterioare ale vehiculelor de intervenție, 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Ing. 1235 012034, DOI 10.1088/1757-899X/1235/1/012034
73. L Ilea și D Iozsa, Aerodinamica roților și impactul asupra coeficientului aerodinamic al vehiculelor de pasageri, 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Ing. 444 072005, DOI 10.1088/1757-899X/444/7/072005
74. Ilea, L., Iozsa, D., Stan, C., Teodorescu, C. (2020). Studiu CFD privind performanța aerodinamică a roților în condiții de vânt lateral pentru un vehicul hatchback. În: Dumitru, I., Covaciu, D., Răcilă, L., Roșca, A. (eds) The 30th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering. SMAT 2019. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32564-0_15
75. Influența fluxului de aer din zonele laterale ale unui cap tractor asupra performanțelor aerodinamice ale acestuia, E M Vieru, D Iozsa, L Ilea și G Frățilă / ACME 2022 / E M Vieru et al 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1262 012075
76. The influence of warning lights on the truck cabins on aerodynamic performance, E M Vieru, D Iozsa, L Ilea and G Frățilă / EAEC - MVT 2022 (in curs de publicare)
77. Adithya Hariram, Thorsten Koch, Björn Mårdberg , Jan Kyncl, Un studiu privind opțiunile de îmbunătățire a profilului aerodinamic al vehiculelor grele în Europa, 2019
78. Anexa 64: Regulamentul nr. 65, Dispoziții uniforme privind omologarea lămpilor speciale de avertizare pentru autovehicule și remorcile acestora, Organizația Națiunilor Unite, 7 decembrie 2011
79. <https://www.dauto.ro/bara-proiectoare-volvo-fh4-euro-6-globetrotter-xl-3.html?>
80. <https://www.paul-trans.ro/img/56921agabaritic.jpg>
81. <https://www.obiectivdesuceava.ro/local/la-noapte-si-maine-traffic-ingreunat-din-cauza-a-doua-transporturi-agabaritice-care-vor-strabate-judetul-suceava/>
82. Liu, Y. și Glass, G. (2013). Efectele densității ochiului de plasă asupra analizei elementelor finite. Seria de hârtie tehnică SAE. doi:10.4271/2013-01-1375 Liu, Y. și

- Glass, G. (2013). Efectele densității ochiului de plasă asupra analizei elementelor finite. Seria de hârtie tehnică SAE. doi:10.4271/2013-01-1375
83. Suresh, K. și Regalla, S. P. (2014). Efectul parametrilor ochiului de plasă în simularea cu elemente finite a procesului de formare a foilor incrementale într-un singur punct. Procedia Știința Materialelor, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.048
84. Mihail Daniel Iozsa, Caroserii pentru autovehicule rutiere, Editura Politehnica Press, Bucuresti, 2016
- 85. D Iozsa , Study on the Influence of the Convoy Rolling over Aerodynamic Resistance, D Iozsa et al 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 252 012035**
86. <https://www.aip-automotive.de/en/Products/Test-Stands/RESEARCH-DEVELOPMENT/Wind-Tunnel-Balance>
87. <https://jaimeirastorza.wordpress.com/2014/08/22/a-primer-on-automotive-wind-tunnels/>
88. <https://www.directindustry.com/cat/force-measurement-BO.html>
89. https://www.jstor.org/stable/44724870?read-now=1&seq=9#page_scan_tab_contents
90. <https://uk.motor1.com/news/672374/for-new-rolling-road-wind-tunnel-200mph/>
91. <https://arstechnica.com/cars/2022/03/honda-just-built-the-worlds-most-advanced-wind-tunnel-in-ohio/>