



Universitatea *Transilvania* din Braşov

TEZĂ DE ABILITARE

**OPTIMIZAREA AERODINAMICĂ
A AUTOMOBILELOR**

Domeniul: Inginerie Mecanică

Autor: Dr ing. Angel HUMINIC
Universitatea Transilvania din Braşov

BRASOV – 2016

CUPRINS

Lista de notații	2
(A) Summary	3
(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	
(B-i) Realizări științifice și profesionale	7
Introducere	7
Cap. 1 - Studiul Interacțiunii Aerodinamice Automobil - Cale de Rulare	16
1.1 Efectul de sol în aerodinamica automobilelor	16
1.2 Abordări teoretice de evaluare a interacțiunii aerodinamice automobil - cale de rulare	19
1.3 Studiul interacțiunii aerodinamice automobil - cale de rulare în medii virtuale	27
1.4 Influența roților asupra caracteristicilor aerodinamice în studiile de aerodinamica automobilelor	49
1.5 Studiul experimental al interacțiunii aerodinamice automobil – cale de rulare	72
Cap. 2 - Studiul Structurilor Auxiliare cu Rol Aerodinamic în Construcția Caroseriilor	92
2.1 Aripi deportante de automobile. Metode de control al desprinderii stratului limită ...	92
2.2 Studiul experimental al unui eleron de automobil	97
2.3 Studiul teoretic al structurilor deportante de automobile asistate de efectul Coandă	100
2.4 Studiul numeric al structurilor deportante de automobile asistate de efectul Coandă	103
(B-ii) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	119
(B-iii) Bibliografie	123

Lista de notații

c	coeficient aerodinamic pe unitatea de lungime (anvergură), pentru structuri 2D [-]
c_p	coeficientul de presiune [-]
e_G	energie fluidică specifică unității de greutate [J/N]
k	energia cinetică turbulentă [$m^2 s^{-2}$]
l_r	lungimea de referință [m]
p	presiunea statică [N/m^2]
p_0	presiunea în condiții de referință [N/m^2]
p_∞	presiunea curentului de aer neperturbat [N/m^2]
p_d	presiunea dinamică [N/m^2]
p_t	presiunea totală [N/m^2]
s	anvergura [m]
t	temperatura [$^{\circ}C$]
t	timpul [s]
u^+	viteza adimensională pe direcție tangențială la suprafață [-]
\bar{u}	viteza medie pe direcție tangențială la suprafață [m/s]
u_τ	viteza de frecare la perete [m/s]
v	viteza curentului de aer [m/s]
v_∞	viteza curentului de aer neperturbat [m/s]
y^+	coordonata (distanța) adimensională, măsurată pe direcție normală de la suprafață [-]
C	coeficient aerodinamic global, pentru structuri 3D [-]
F_A (F)	forța (aerodinamică) [N]
K	coeficient caracteristic/indicator [-]
M	momentul aerodinamic [$N m$]
Ma	numărul Mach [-]
P_c	puterea consumată [W]
Q	debitul volumic [m^3/s]
Re	numărul Reynolds [-]
T	gradul de turbulență [%]
ε	disipația turbulentă [$m^2 s^{-3}$]
μ	vâscozitatea dinamică a fluidului [$kg/m s$]
ν	vâscozitatea cinematică a fluidului [m^2/s^2]
ω	frecvența de disipația turbulentă [s^{-1}]
ρ	densitatea [kg/m^3]
τ	efortul tangențial de frecare vâscoasă [N/m^2]
τ_0	tensiunea tangențială de frecare la perete [N/m^2]

Summary

ROAD VEHICLE AERODYNAMIC DESIGN

Until recently, the exterior shape of the vehicles was the main concern of the engineers, the underbody geometry playing a secondary role, or being neglected for some type of vehicles, as for off-road ones. In the last decade, in order to reduce the values of the drag coefficient of cars, the underbody flow management becomes a major problem of the designers, too. In this sense, the thesis presents some theoretical, CFD and experimental results concerning the influence of the underbody geometry on main aerodynamic characteristics of a car.

The first part of the thesis presents an overview of the main concepts of road vehicle aerodynamics, which are used in the next chapters.

A theoretical study of the aerodynamic interaction between vehicles and road is performed in chapter 1.2. Thus, because the decomposition of the aerodynamic forces into measurable components would facilitate the optimization of the design process, it was presented a theoretical method for computation of the drag of an underbody shaped as a Venturi tube/nozzle. In this way, there was proposed the decomposition of the total drag (D) into two following components

$$D = D_{ext} + D_{ub}$$

where D_{ext} is the drag due to the airflow on external upper surfaces of the vehicle, having the flow rate Q_{ext} , and

D_{ub} is the drag due to the flow under the body of vehicle, in the space between the lower surface of the vehicle and road, treated as a convergent-divergent nozzle, having the area $b \times h$ and flow rate Q_{ub} .

Assuming that the resultant fluid is homogeneous in the entire cross section of the nozzle ($b \times h$), for the second component of the drag of vehicles was established analytically the following Equation

$$D_{ub} = \zeta_{ub} b h \frac{\rho v^3}{2 v_\infty},$$

where ζ_{ub} is the coefficient of the equivalent aerodynamic resistance of the nozzle (underbody geometry),

v is the average velocity of the air through the constant section of the nozzle.

Also, the following dimensionless indicators were proposed in order to characterize the underbody airflow

- K_D is the coefficient what represent the ratio between underbody drag and total drag defined as product of three dimensionless factors,
- K_Q is the coefficient which shows the contribution of the underbody flow rate on total flow rate

$$K_D = \frac{D_{ub}}{D} = \frac{\zeta_{ub}}{c_D} \frac{b h}{A} \left(\frac{v}{v_\infty} \right)^3,$$

$$K_Q = \frac{Q_{ub}}{Q},$$

where (ζ_{ub}/c_D) is the relative drag,
 $(b h/A)$ is the relative area,
 (v/v_∞) is the relative velocity.

In this way, the underbody drag coefficient $c_{D_{ub}}$ can be expressed as

$$c_{D_{ub}} = K_D c_D = \zeta_{ub} \frac{b h}{A} \left(\frac{v}{v_\infty} \right)^3.$$

The results, using as example the experimental model ARO 26 of ARO SA former Automotive Company, show that the increasing of the flow rate under the vehicle has a negative impact on underbody drag of vehicle, also for total drag. Thus, there is necessary to minimise the value of Q_{ub} using auxiliary structural elements, as a special profiled aerodynamic radiator shell, or using a solution with lateral apertures to exhaust the air from engine compartment. Obviously, the decreasing of Q_{ub} can be obtained through the diminution of the ground clearance of the vehicle, as for the recent automobiles which have variable ground clearance with speed.

In chapter 1.3, with the aid of the CFD techniques, there were studied the influence of the wheels motion and underbody geometry on drag. The vehicle body (ARO 26 as in theoretical study) was drawn as a CAD data. It was carefully reproduced, with the exception of the air-cooling vent, which was closed for this study. For the underbody geometry were considered medium and large assembly, as chassis with reinforcing frames and bracing rib, front and rear main suspensions, elements of rear transmission and driving axle, guard screen of the front axle and also some components of the exhaust of burnt gasses, respectively the rear silencer. Also, the exterior surfaces of the wheels and wheelhouses were carefully reproduced in order to achieve realistic results, much as possible.

Concerning the wheels, there are two possibilities to put them in motion during experiments in wind tunnels: using a rolling stand, and with the aid of a moving belt device. In this sense, were performed four kinds of CFD analyses, without and with wheels in motion. Analysis with wheels in motion showed variations of the aerodynamic characteristics, more significant in the case of the lift coefficient, revealed also by the experiments performed with rotating wheels: $\Delta C_D = (3 - 5)\%$, $\Delta C_L = (15 - 20)\%$. For both methods used, ΔC_D has a parabolic variation with a minimum value for $Re \cong 10^7$, what is corresponding for economical sped of the car from fuel consumption point of view. Concerning ΔC_L , its variation depends on method for driving of wheels. For the moving belt method, ΔC_L has a variation similarly as ΔC_D .

Using the method of the rolling stand, the ΔC_L variation changes, and it is continuously increasing.

The obtained results suggest that is important, from quantitative point of view, to simulate the rotation of the wheels for small and higher velocity. Also lift coefficient is more sensitive by the underbody flow, comparatively with the drag coefficient. From qualitative point of view, taking into consideration of the wheels' rotation is important for a better evaluation of the aerodynamic characteristics of the vehicle. In this way the vortex structures generated by wheels can be visualised, their contribution at the wake of vehicle being important.

Concerning the underbody geometry, the results show that it influences the drag more than 40% for vehicle with a large ground clearance and many unprotected components (from aerodynamics point of view). This percentage is a larger for lower to medium velocity and is decreasing for higher velocity. A major percent of underbody drag is due to the wheels, and their influence on drag decreases with velocity. An opposite behaviour has the elements of structure exposed to the airstream. The drag due to these elements is rising with the velocity.

In chapter 1.4 there are presented the equipments used in experimental research and the tests performed in order to evaluate their performances according with SAE requirements J2084 JAN93.

A gauge balance was designed for the evaluation of the aerodynamic loads. It was connected to an automatic data system acquisition, which is controlled by a PC. In order to reproduce the relative motion between road and vehicle, a moving belt device was designed and built.

In chapter 1.5 there are presented the results of the experimental studies, which were focused on

- the influence of the ground clearance on the main aerodynamic characteristics (drag and lift) of the car (ARO 26) having the underbody as a Venturi tunnel;
- the influence of the underbody geometry of a car on aerodynamic characteristics;
- the influence of the method to simulate the ground (flat wall and moving belt device).

The obtained results show an improvement of the aerodynamic characteristics of the car using a Venturi tunnel configuration for the underbody geometry, emphasised mainly by the lift coefficient.

Also, it was revealed an increasing of the aerodynamic coefficients for the underbody geometry having structural elements exposed to the air stream, including the wheels, which represent areas of impact.

In the second chapter of the thesis there are presented several results concerning the aerodynamic characteristics of the automobiles with ailerons and the effect of the later ones on the lift and drag.

There are also studied the ailerons assisted by Coandă effect, using as reference ClarkY (11.7 %) and Eppler E423 (12.5 %) airfoils. This type of active control of flows represents a new approach in the field of the auxiliary devices of the cars, used to generate download. In this sense, such of automotive ailerons takes advantages of both types of usually used fixed ailerons of cars, without mechanical parts in motion, and respectively, the adjustable ailerons, mechanically controlled, used to generate variable download.

The influence of several parameters was investigated, as the initial velocity of jet and the characteristic dimension of nozzle (width of slot). The results show that Coandă effect can be used to reduce trailing edge separation, in order to improve the aerodynamic characteristics of the ailerons, and latter to increase the aerodynamic behavior of the vehicle concerning the aerodynamic loads, drag and lift, consequently, stability and handling.

Introducere în aerodinamica automobilelor

Aerodinamica reprezintă una dintre aplicațiile moderne ale mecanicii fluidelor, ale cărei fundamente teoretice au fost formulate de către matematicienii Daniel Bernoulli (1700-1782) și Leonhard Euler (1707-1783), utilizând un model de fluid fără rezistență la deformare, cunoscut în prezent ca *modelul de fluid ideal*, fără vâscozitate. La forma modernă a acestei științe au contribuit decisiv matematicienii și fizicienii George Gabriel Stokes (1819-1903) și Osborne Reynolds (1842-1912), cu numeroase rezultate, printre care formularea ecuațiilor de mișcare ale fluidelor reale. De asemenea, contribuții semnificative au fost aduse de către inginerul Ludwig Prandtl (1875-1953), cel care a introdus și a dezvoltat teoretic conceptul de *strat limită*, punând astfel bazele aerodinamicii.

Aerodinamica are ca obiect de studiu interacțiunea dinamică dintre aerul atmosferic și diverse categorii de corpuri solidele, denumite generic *structuri aeromecanice*. În funcție de categoriile în care se pot grupa corpurile, în prezent se poate vorbi despre următoarele ramuri distincte ale aerodinamicii, ce constituie, de asemenea și principalele aplicații ale acestei științe

- *aerodinamica aeronavelor*, care studiază aripi portante, ampenaje, fuselaje, sau alte componente ale unei aeronave (nacele, piloni, trenuri de aterizare etc) atât ca structuri izolate, dar și interdependent,
- *aerodinamica automobilelor*, care studiază în principal curgerea în jurul caroseriilor, dar care abordează și probleme legate de curgerea aerului în compartimentul motorului sau în habitacul,

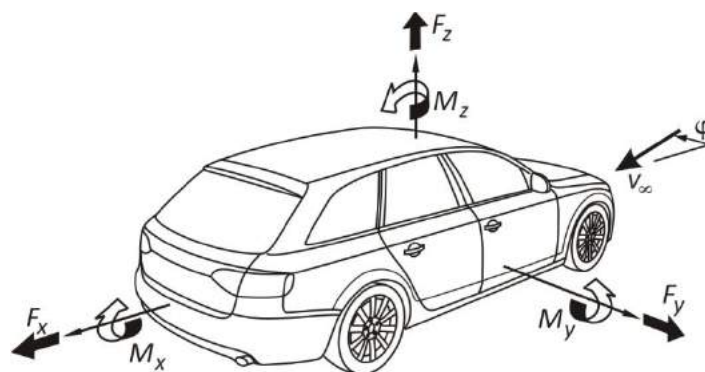


Fig. 1.1 – Forțele și momentele care acționează asupra unui automobil

- *aerodinamica rotorilor paletați*, precum în cazul studiului elicelor propulsive sau a turbinelor eoliene,
- *aerodinamica industrială*, care se ocupă cu studiul celorlalte categorii de corpuri, precum clădiri, poduri, antene, diverse elemente de infrastructură supuse acțiunii vântului sau curenților de aer.

Interacțiunea dintre un curent de aer și un solid (denumit generic structură aeromecanică) aflat în mișcare relativă față de fluid, are ca rezultat formarea unei forțe rezultante (F_A) și a unui moment corespunzător (M_A), ale căror componente sunt prezentate în figura 1.1 pentru un automobil, raportate la sistemul de referință al acestuia. Uzual, în studiile de aerodinamică se urmărește determinarea forțelor și momentelor generate de acțiunea aerului asupra structurilor aeromecanice, figura 1.1, considerate ca fiind rigide, nedeformabile, unde

F_x	forța de rezistență la înaintare (R),
F_y	forța laterală (L),
F_z	forța portantă (P),
M_x	momentul aerodinamic de ruluu,
M_y	momentul aerodinamic de tangaj (răsturnare),
M_z	momentul aerodinamic de girație,
v_∞	viteza relativă a curentului de aer față de automobil,
φ	unghiul dintre v_∞ și axa longitudinală a automobilului (Ox).

Alte aspecte, precum cele de natură acustică, sau legate de deformațiile pe care le suferă corpurile sub acțiune aerului, sunt tratate de științe interdisciplinare precum aeroacustica și aerolasticitatea. Pentru acestea, rezultatele unui studiu aerodinamic constituie condițiile inițiale necesare determinării soluției problemei abordate.

De asemenea, în funcție de valoarea vitezei relative dintre aer și solidul supus acțiunii acestuia (v_∞), se poate vorbi despre

- aerodinamica vitezelor mici, care tratează curgeri în regim subsonic, care pot fi considerate și incompresibile, ale căror elemente de bază sunt prezentate în acest paragraf introductiv,
- aerodinamica vitezelor mari în care sunt soluționate mișcările în care aerul suferă variații semnificative ale parametrilor, densitate, vâscozitate, temperatură: cazul curgerilor transonice sau supersonice.

Precum și în cazul mecanicii fluidelor, metodele de abordare și soluționare pot fi

- teoretice, caz în care putem face referire la corpuri profilate aerodinamic, a căror geometrie poate fi descrisă și matematic: aripi, ampenaje, fuselaje etc,
- experimentale, specifice corpurilor tip bluff-body (automobile), profilate în urma unor teste repetate,
- mixte, în care soluțiile matematice sunt validate/optimizate și experimental.

Pentru studiile experimentale au fost concepute instalații speciale, numite suflerii, tunele de vânt sau tunele aerodinamice, prevăzute cu camere de testare în care sunt reproduse condițiile de evoluție ale structurii aeromecanice, fixă, în interiorul unui curent de aer. Din punct de vedere al rezultatelor (forțe și momente aerodinamice), situația este similară celei în care structura se deplasează cu aceeași viteză în interiorul atmosferei aflată în repaus.

Natura forței aerodinamice globale, precum și a componentelor ei, poate fi interpretată din două perspective diferite: cea a solidului, respectiv cea a aerului atmosferic prin care acesta se deplasează.

Astfel, din perspectiva structurii aeromecanice, valoarea forței pe care curentul de aer o exercită asupra acesteia se poate calcula prin integrarea pe suprafețele exterioare (ΣS_{ext}) a forțelor elementare care acționează asupra acestora

- forțele de presiune, $d\vec{F}_p = p \vec{n} dS$, pe direcție normală, respectiv
- forțele tangențiale de frecare vâscoasă, $d\vec{F}_\tau = \tau \vec{t} dS$, care se exercită în stratul limită ce se formează la nivelul suprafețelor corpului expuse acțiunii aerului.

$$\vec{F}_A = \int_{(\Sigma S_{ext})} (p \vec{n} + \tau \vec{t}) dS. \quad (1.1)$$

Așadar, forța aerodinamică se poate scrie ca sumă a două componente, dintre care una de presiune (\vec{F}_p) și a doua de frecare vâscoasă (\vec{F}_τ)

$$\vec{F}_A = \vec{F}_p + \vec{F}_\tau. \quad (1.2)$$

Evaluarea directă a celor două componente, separat, necesită cunoștințe detaliate despre distribuția de presiuni și eforturi tangențiale de frecare pe întreaga suprafață a structurii studiate. Aceste distribuții se obțin extrem de dificil pe cale experimentală, pentru corpuri complexe din punct de vedere geometric. Este practică doar în cazul anumitor suprafețe, unde distribuția de presiuni este rezonabil uniformă.

Calculul celor două componente se poate realiza cu o precizie suficient de bună cu ajutorul tehnicilor CFD (*Computational Fluid Dynamics*) utilizând un program de calcul adecvat, după cum este prezentat în figura 1.2 în cazul variației presiunii pe caroseria unui automobil [1].

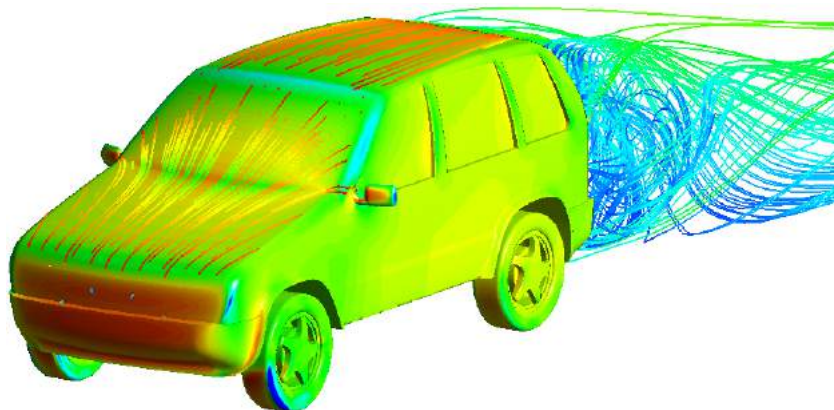


Fig. 1.2 – Trena de vârtejuri și variația presiunii pe caroseria unui automobil, [1]

Uzual, componentele forței aerodinamice rezultante se pot evalua experimental în mod direct, cu ajutorul unei balanțe aerodinamice.

Din perspectiva curentului de aer, forțele aerodinamice se determină aplicând teorema impulsului masei de aer cuprinsă într-un volum de control de mari dimensiuni din jurul solidului. În această direcție unul din rezultatele semnificative ale cercetărilor din domeniu a fost determinarea rezistenței la înaintare ca o consecință a trenei de vârtejuri care se formează în spatele corpului, ce își au originea în zonele de desprindere a stratului limită (de presiune ridicată). Astfel, o forță aerodinamică se poate determina experimental în mod indirect, prin determinarea variației vitezelor (presiunilor) dintre două planuri situate în amonte, respectiv în aval față de structură, perpendiculare pe direcția de acțiune a forței.

Pentru a putea compara din punct de vedere aerodinamic diferite structuri se utilizează coeficienți adimensionali definiți cu relații de forma

$$C = \frac{F}{p_{d_\infty} A_r}, \quad (1.3)$$

$$C_m = \frac{M}{p_{d_\infty} A_r l_r}, \quad (1.4)$$

unde F, M reprezintă forța aerodinamică, respectiv momentul aerodinamic care acționează asupra structurii,
 p_{d_∞} reprezintă presiunea dinamică a curentului de aer neperturbat de prezența solidului (teoretic la infinit),
 A_r aria de referință a structurii evaluate aerodinamic; în cazul unei aripi de aviație, sau de automobil, reprezintă suprafața aripii; pentru un automobil se consideră ca referință aria proiecției automobilului pe planul transversal,
 l_r lungimea de referință (caracteristică) luată în considerare la calculul forțelor aerodinamice.

În funcție de axa la care ne raportăm, figura 1.1, se operează cu următorii coeficienți aerodinamici

C_x coeficientul forței de rezistență la înaintare,
 C_y coeficientul forței aerodinamice laterale,
 C_z coeficientul forței de portanță,
 C_{mx} coeficientul momentului aerodinamic de ruluu,
 C_{my} coeficientul momentului aerodinamic de tangaj,
 C_{mz} coeficientul momentului aerodinamic de girație.

Un alt coeficient adimensional utilizat frecvent în studiile de aerodinamică este coeficientul de presiune (c_p) definit de relația

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{p_{d_\infty}}, \quad (1.5)$$

unde p reprezintă presiunea statică măsurată într-un punct de pe suprafața structurii,
 p_∞ este presiunea statică a curentului de aer neperturbat,

p_{d_∞} este presiunea dinamică a curentului de aer neperturbat.

Aplicând ecuația lui Bernoulli pentru calculul diferenței de presiuni statice

$$p - p_\infty = p_{d_\infty} - p_d = \frac{\rho}{2} (v_\infty^2 - v^2),$$

coeficientul de presiune poate fi exprimat și în funcție de viteze cu relația

$$c_p = 1 - \frac{v^2}{v_\infty^2}. \quad (1.6)$$

Astfel, modul în care un solid interacționează cu aerul atmosferic, poate fi evaluat și cu ajutorul diagramelor de variație ale coeficientului de presiune pe suprafața acestuia, figura 1.3.

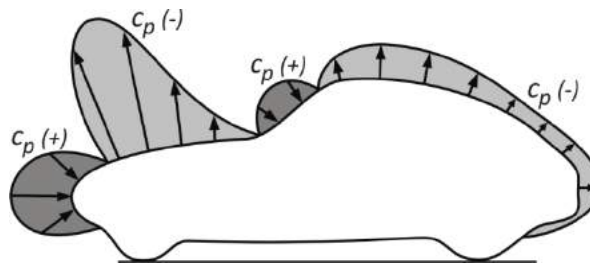


Fig. 1.3 – Variația c_p pe conturul unui automobil

Cu ajutorul acestor diagrame se poate determina componenta datorată distribuției de presiuni F_p a forței aerodinamice globale ca fiind aria definită de curbele de variație ale coeficientului de presiune și, de asemenea, punctul de aplicație al acesteia, centrul aerodinamic (CA), în centru de greutate al respectivei arii.

Primele cercetări sistematice de aerodinamica autovehiculelor au fost realizate în Europa, la aproximativ 25 de ani de la apariția primului automobil. Astfel, în 1922 Klemperer W. publica în presa de specialitate articolul *Investigations of the Aerodynamic Drag of Automobiles* în care erau prezentate rezultatele unor experimente efectuate în tunelul aerodinamic al uzinelor Zeppelin, referitoare la influența formei autovehiculelor asupra rezistenței la înaintare a acestora, evidențiind posibilitatea obținerii unei valori a coeficientului de rezistență la înaintare $c_x = 0.15$ pentru un corp pe roți având forma unei jumătăți de picătură de apă, figura 1.4 [2]. Un autovehicul având această formă a fost brevetat și ulterior realizat de inginerul Aurel Persu în același an [3].

Cronologic au urmat studii referitoare la influența forțelor aerodinamice asupra stabilității automobilelor, întreprinse de un grup de cercetători condus de Wunibald Kamm W., fondându-se cu această ocazie Institutul de Cercetare a Vehiculelor în Stuttgart, care în prezent este integrat în Universitatea Tehnologică din Stuttgart.

În USA, primele studii de aerodinamica autovehiculelor au fost efectuate la începutul anilor '30 de către firmele Chrysler și Ford, dar au fost sistematizate abia la după 1950, perioadă în care studiile de aerodinamica aeronavelor au avut ca efect o îmbunătățire radicală a performanțelor avioanelor.

Până spre sfârșitul anilor '70 principala preocupare a inginerilor a fost îmbunătățirea mecanicii și funcționalității automobilelor, aerodinamica acestora fiind o problemă secundară. Aerodinamica autovehiculelor revine în actualitate odată cu

- creșterea vitezei de deplasare, a volumului de mărfuri transportat și a capacității de transport a autovehiculelor;
- determinarea influenței pe care o are forța de rezistență la înaintare asupra puterii necesare unui autovehicul [4], figura 1.4 și implicit asupra consumului de combustibil.

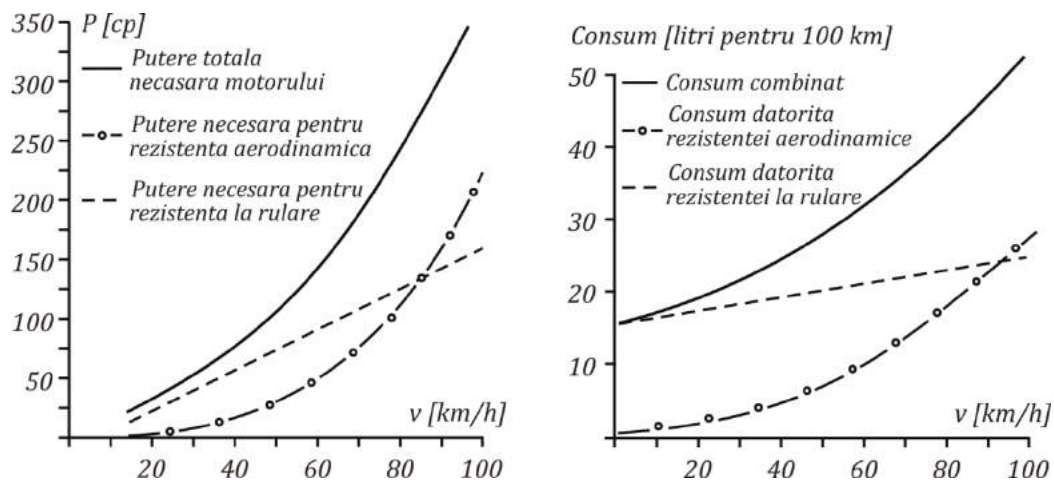


Fig. 1.4 - Necesarul de putere și consumul pentru un autovehicul greu [4]

În acest context, reducerea coeficientului de rezistență aerodinamică constituie una din principalele priorități, atât pentru autovehiculele de mare tonaj [5], cât și pentru automobile [6]. În acest sens, se efectuează studii complexe, care pun în evidență aportul fiecărei componente a structurii caroseriei la rezistența totală, evidențiindu-se posibilitățile de îmbunătățire a comportamentului aerodinamic a autovehiculelor, automobilele concepute recent având coeficienți de rezistență aerodinamică foarte mici, referințe fiind

- $C_x = 0.27$, BMW 318i, VW Passat, Lexus LS400,
- $C_x = 0.26$, Opel Calibra, Mercedes C180,
- $C_x = 0.25$, Honda Insight, Lexu LS430, Audi A2.
- $C_x = 0.24$, Mercedes-Benz C-Class, Tesla S, cu propulsie electrică.

Evoluția în timp a formei caroseriilor automobilelor de serie corelată cu valorile coeficientului de rezistență aerodinamică este prezentată în figura 1.5. De asemenea, sunt și evidențiate și valorile coeficienților de rezistență aerodinamică ale unor corpuri generice de automobil utilizate în studiile din domeniu.

Principalele studii efectuate pe această direcție de cercetare, precum și rezultatele acestora sunt prezentate în capitolul 1 al tezei.

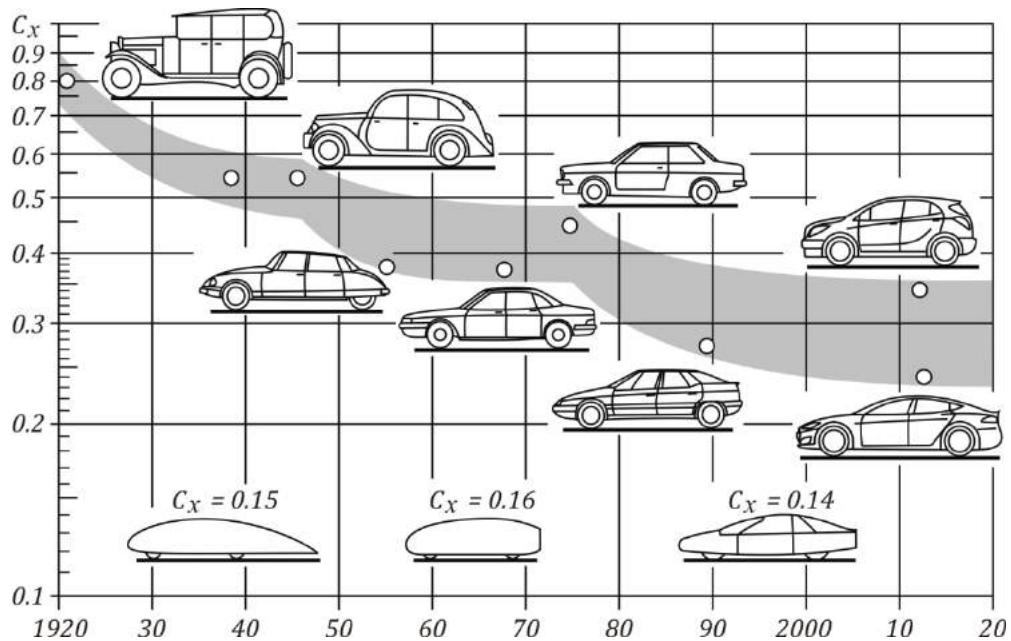


Fig. 1.5 - Evoluția în timp a coeficientului de rezistență aerodinamică [2]

La obținerea unor valori mici ale coeficienților de rezistență aerodinamică contribuie și elementele auxiliare ale caroseriei, cu dublu rol, atât aerodinamic cât și estetic: spoiler¹ față/spate, eleroane², praguri, defletoare și generatoarele de vârtej (turbulatoare). Deși, în limbajul uzual termenii de spoiler și eleron sunt sinonimi, diferența dintre aceste elemente cu rol aerodinamic este dată de modul de integrare în caroserie.

¹ Deflector de aer lung și îngust, integrat în forma caroseriei și montat, uzual, la spatele caroseriei unui autoturism (transversal, pe capotă, hayon sau pavilion) cu scopul diminuării portanței și pentru creșterea stabilității la viteze ridicate prin realizarea unui contact mai bun al roților spate cu calea de rulare. Uneori, în mod impropriu, sunt denumite spoiler și jupele pentru parașocurile față sau spate. Sinonimia cu eleronul este aproximativă.

² Deflector de aer lung și îngust, neintegrat în forma caroseriei (fără continuitate de stil), montat uzual la spatele unui autoturism (transversal - pe capotă, hayon sau pavilion), având același scop ca și un spoiler.

Unul din exemplele recente de reducere a coeficientului de rezistență aerodinamică îl constituie programul de îmbunătățire aerodinamică a caroseriei automobilului Dacia Logan [7], figura 1.6, utilizând elemente structurale cu rol aerodinamic, turbulatoare, spoiler, defletoare, în urma căruia s-a obținut o reducere de 20%, de la $C_x = 0.36$ la valoarea $C_x = 0.29$.

O consecință imediată a îmbunătățirii caroseriei din punct de vedere aerodinamic a reprezentat-o reducerea consumului de combustibil și implicit reducerea emisiilor de CO_2 cu 5 g/km (în varianta de motorizare Diesel). Comparativ, utilizarea unor anvelope performante a avut ca efect reducerea emisiilor de CO_2 doar cu 2 g/km .

O altă consecință importantă a utilizării elementelor cu rol aerodinamic o reprezintă creșterea apăsării aerodinamice și implicit a îmbunătățirii stabilității și manevrabilității autovehiculelor, în special pentru viteze mai mari de 25 m/s . Astfel, utilizarea spoilerelor și eleroanelor devine esențială, fapt dovedit și de numărul mare de brevete de invenție existente. O simplă căutare în bazele de date internaționale de mărci și brevete (<http://ep.espacenet.com>), cu termenii cheie „spoiler and car”, relevă existența unui număr de peste 470 de brevete de invenție (septembrie 2015), ce prezintă diferite tipuri constructive spoiler, de la soluția simplă a utilizării unui spoiler fix [8], la soluții complexe de utilizare a acestor dispozitive, cu unghi de

poziționare variabil [9], cu geometrie variabilă [10], sau chiar cu reglarea activă a suprafeței și poziției față de caroserie, în funcție de viteza de deplasare a automobilului [11].

De asemenea, importanța spoilerelor/eleroanelor este evidențiată și de numărul mare de lucrări științifice publicate, care au ca subiect utilizarea acestor dispozitive [12, 13].

Rezultatele studiilor referitoare la utilizarea structurilor auxiliare cu rol aerodinamic în construcția automobilelor sunt prezentate în capitolul 2 al tezei.

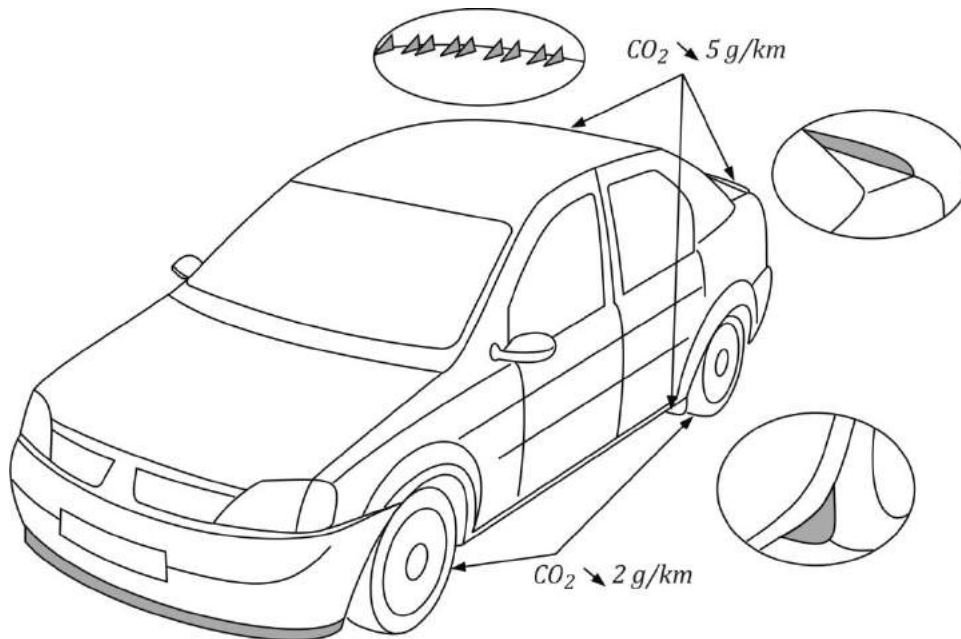


Fig. 1.6 –Automobil Dacia Logan cu caroserie îmbunătățită din punct de vedere aerodinamic [7]

Creșterea semnificativă a numărului de cercetări din domeniul aerodinamicii autovehiculelor, se datorează în mare măsură și dezvoltării recente a performanțelor calculatoarelor, precum și a programelor de calcul din domeniul CFD, în special a facilităților oferite de acestea în ceea ce privește vizualizarea rezultatelor. Astfel, investigarea autovehiculelor din punct de vedere aerodinamic se realizează recent și în medii virtuale.

Succesul studiului autovehiculelor în medii virtuale se datorează faptului că proiectarea acestora devine, pe zi ce trece, un proces integrat pe calculator, inginerii putând face predicții asupra comportamentului aerodinamic al unui prototip înainte ca acesta să fie realizat fizic, scurtându-se semnificativ timpul de lansare pe piață.

În general, în desfășurarea unui proces CFD se parcurg trei etape distincte, după cum urmează: pre-procesarea, soluționarea numerică, post-procesarea.

Pre-procesarea este partea cea mai complexă și mai laborioasă a unui proces de modelare numerică. În această etapă au loc:

- stabilirea domeniului de calcul, în concordanță cu fenomenul studiat și elaborarea modelului geometric al acestuia,
- discretizarea domeniului de calcul,
- impunerea condițiilor de curgere pe frontierele domeniului,
- stabilirea parametrilor ce definesc procesul studiat și a schemei de soluționare numerică (pot fi incluse și în etapa următoare).

Soluționarea numerică este etapa în care se rezolvă efectiv sistemul de ecuații ce definesc fenomenul studiat.

În faza de post-procesare are loc vizualizarea și evaluarea rezultatelor obținute în etapa anterioară. Din punct de vedere al prezentării grafice a rezultatelor, tehnicile CFD oferă numeroase facilități. Astfel, rezultatele obținute în urma simulărilor numerice vin în completarea celor obținute în tunele aerodinamice, nuanțându-le datorită posibilităților de afișare, oferind astfel informații despre procesele de curgere în intimitatea acestora.

Capitol 1

Studiul Interacțiunii Aerodinamice Automobil - Cale de Rulare

1.1 Efectul de sol în aerodinamica automobilelor

Ca fenomen aerodinamic, efectul de sol este definit de interacțiunea dintre aerul atmosferic și un vehicul, când acesta evoluează în apropierea unei suprafețe dense, cel mai adesea reprezentată de sol, dar care poate fi și suprafața liberă a unei ape. Este pus în evidență de modificarea caracteristicilor aerodinamice față de cele obținute într-un curent de aer liber.

Ca majoritatea termenilor folosiți în aerodinamica autovehiculelor și acesta a fost adoptat din terminologia curentă studiului aeronavelor, dar semnificația lui a suferit modificări.

Astfel, din punctul de vedere al structurilor portante de aviație două fenomene contribuie la apariția acestui efect, când o aripă se apropie de sol, acestea datorându-se influenței anvergurii și influenței cozii aripii. Rezultatul final constă într-o reducere a rezistenței aerodinamice induse, urmată de o creștere de portanță. Uzual, când menționează efectul de sol, inginerii de aviație fac referire la componenta datorată anvergurii aripii, dominantă în acest fenomen. Reducerea rezistenței la înaintare în efect de sol se datorează faptului că structurile de vârtej care se dezvoltă la capetele aripii sunt influențate de prezența solului, după cum este ilustrat în figura 1.7.

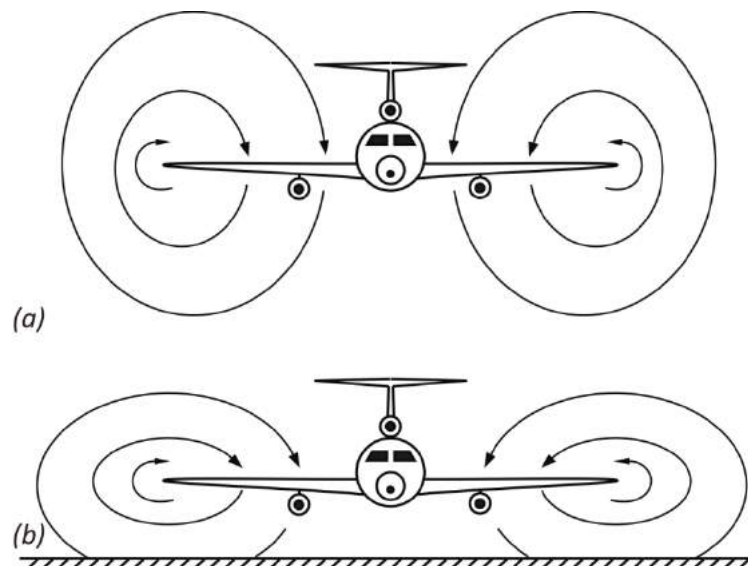


Fig. 1.7 - Efectul de sol în aviație

Aceste vârtejuri se datorează circulației aerului din zonele de presiune ridicată (intradusul aripii) spre zonele de presiune mică, de pe extradusul aripii, care modifică distribuția de portanță, după cum se poate observa în figura 1.8 (a). Practic, pentru a limita acest fenomen se utilizează aripioare laterale (winglets), precum în figura 1.8 (b).

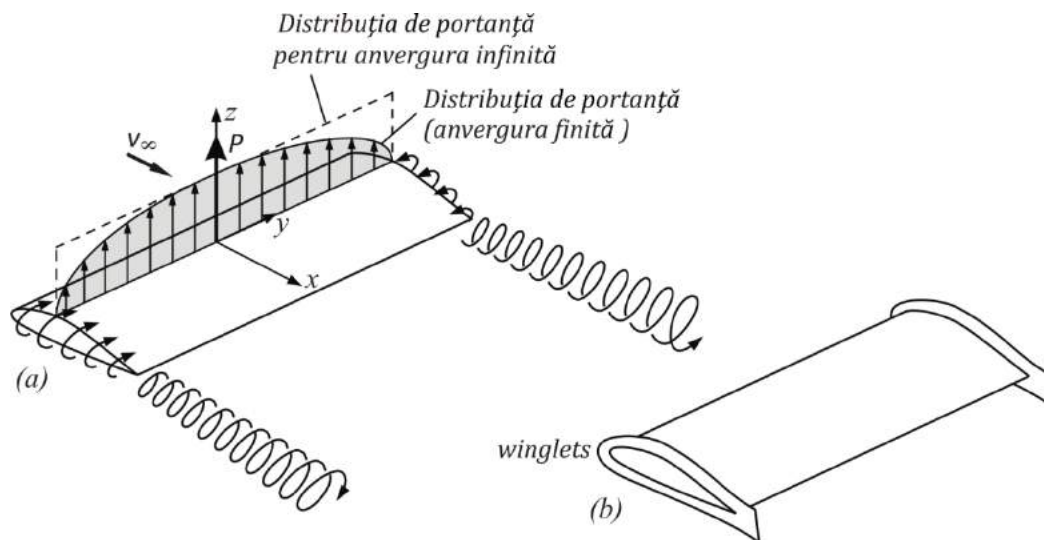


Fig. 1.8 - Formarea vârtejurilor la capetele unei structuri portante

Referitor la influența corzii, efectul de sol nu se concretizează întotdeauna printr-o creștere de portanță. Este posibil ca în anumite situații, când intradosul aripii este convex, la unghiuri mici de atac, între suprafața inferioară a aripii și sol să se formeze un tunel Venturi. Presiunea scăzută din interiorul acestuia generează o zonă de suucțiune care duce la scăderea portanței, fapt relevat și de studiile efectuate în această direcție [14] pe un profil Clark Y 11.7%, vezi figurile 1.9 și 1.10.

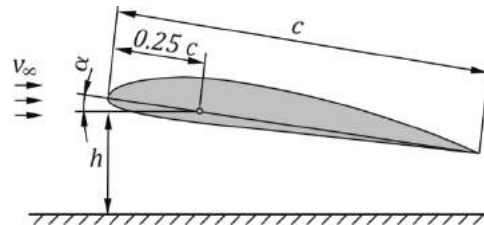
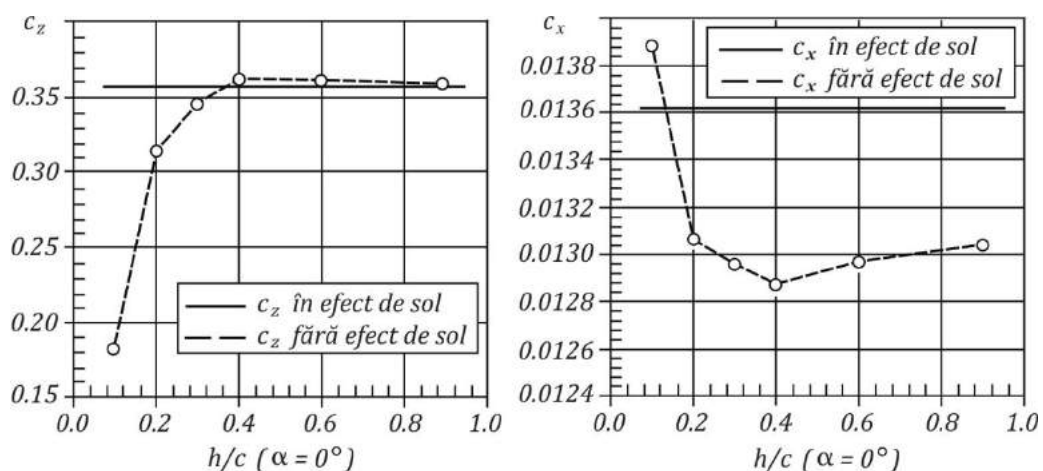


Fig. 1.9 - Profilul Clark Y 11. 7% în efect de sol, [14]

Fig. 1.10 - Variația coeficienților aerodinamici pentru profilul Clark Y 11. 7% în efect de sol în funcție de raportul h/c , [14]

Acest tip de efect de sol este utilizat la proiectarea automobilelor de viteză, care au suprafața inferioară modelată astfel încât să genereze acest fenomen, mărindu-se astfel forța normală de apăsare, aderența pneurilor și o mai bună transmitere a cuplului la roțile motoare.

Efectul de sol este bine evidențiat de mașinile de Formula 1, figura 1.11, la a căror construcție se îmbină cele două idei anterior expuse: de a avea o aripă care să ruleze în imediata vecinătate a solului și de a profila corespunzător suprafața inferioară astfel încât să se creeze efectul de tunel Venturi între aceasta și pistă. Primii care au exploatat acest fenomen au fost inginerii echipei McLaren în anii '80.

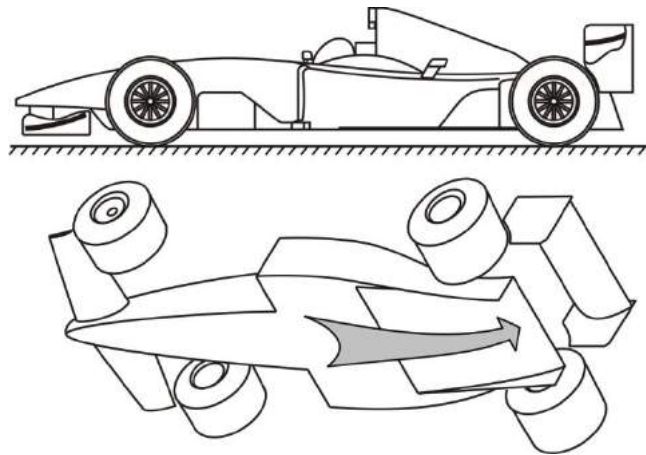


Fig. 1.11 - Configurație automobil de competiție F1

În cazul mașinilor fabricate în de serii mari, nu se mai poate vorbi de efect de sol, după cum a fost prezentat în paragraful anterior. Autovehiculele sunt concepute să se deplaseze în apropierea solului, în contact cu acesta prin intermediul pneurilor, deci în "efect de sol". În consecință, utilizarea acestui termen în cazul automobilelor păstrând semnificația specifică aviației devine inadecvată. În concordanță cu fenomenele care au loc în cazul automobilelor, un termen adecvat este acela de *efect Venturi*.

Sunt situații în care inginerii de automobile folosesc expresia "efect de sol" când menționează mișcarea relativă dintre calea de rulare și mașini, în situațiile în care acestea sunt evaluate experimental în tunele aerodinamice.

1.2 Abordări teoretice de evaluare a interacțiunii aerodinamice automobil - cale de rulare

Deși studiul aerodinamic al automobilelor are un caracter dominant experimental, recent au fost dezvoltate și modele de evaluare teoretică a anumitor caracteristici aerodinamice, precum rezistența generată de structura inferioară.

Astfel, după cum a fost prezentat anterior în introducere, forța de rezistență aerodinamică reprezintă suma a două componente, dintre care una datorită distribuției de presiuni (\vec{F}_p), cea de a doua fiind componenta de frecare vâscoasă (\vec{F}_τ), relația (1.2).

Evaluarea directă a celor două componente, separat, necesită cunoștințe detaliate despre distribuția de presiuni și eforturi tangențiale de frecare vâscoasă pe întreaga suprafață a structurii studiate. Aceste distribuții se obțin extrem de dificil pe cale experimentală pentru corpuri complexe din punct de vedere geometric. Este practică doar în cazul anumitor suprafețe, unde distribuția de presiuni este rezonabil uniformă.

Deoarece descompunerea forțelor aerodinamice în componente măsurabile facilitează procesul de optimizare al formei caroseriei în fazele inițiale ale proiectării, a fost considerată [15, 16] descompunerea forței globale de rezistență la înaintare în alte două componente

$$R = R_{ext} + R_{ub} , \quad (1.7)$$

unde R_{ext} reprezintă forța de rezistență aerodinamică exterioară, determinată de interacțiunea curenților de aer cu suprafețele exterioare ale autovehiculului, caracterizat de debitul Q_{ext} ,

R_{ub} este forța de rezistență determinată de curgerea aerului pe sub vehicul (*underbody*), în spațiul determinat de suprafața inferioară a vehiculului și calea de rulare, având debitul Q_{ub} , figura 1.12.

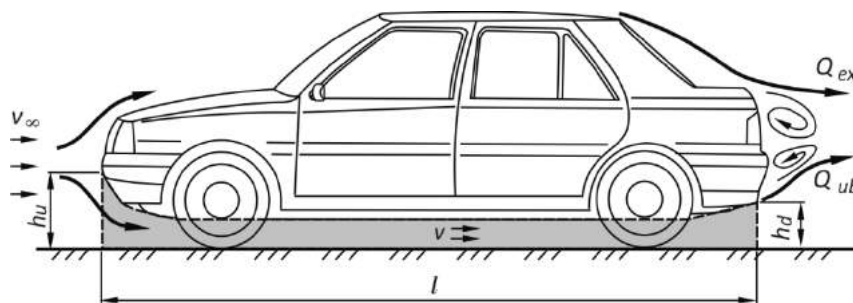


Fig. 1.12 - Curgerea în jurul unui automobil

Calculul componentei R_{ub} se poate realiza datorită similitudinii (figura 1.13) dintre curgerea printr-un tub Venturi și cea prin spațiul delimitat de suprafața inferioară a vehiculului (podeaua caroseriei) și calea de rulare [17].

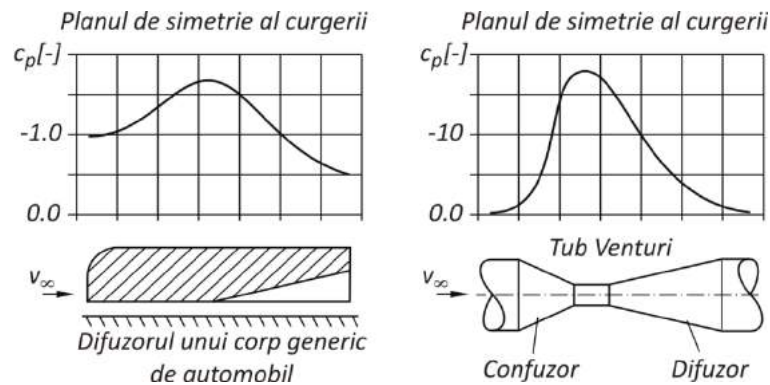


Fig. 1.13 - Caracteristica curgerii printr-un tub Venturi [17]

Astfel, ajutorul anterior menționat este parcurs de următorii curenți de aer:

- aerul staționar, în condiții atmosferice, aflat în repaus în amonte (u , upstream), absorbit de "ajutorul mobil", caracterizat de debitul Q_1 ,
- ramura inferioară a curențului generat prin impact la bordul de atac, care curge pe sub vehicul, caracterizat de debitul Q_2 ; o parte din acesta o reprezintă aerul absorbit în compartimentul motor și utilizat la răcirea motorului și aerul utilizat pentru răcirea discurilor sistemului de frânare de pe puntea față,
- aerul aspirat din lateral prin ejecție liberă, având debitul Q_3 , mult mai mic în raport cu Q_1 și Q_2 .

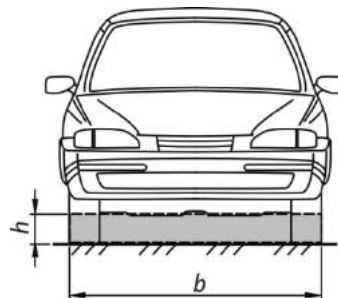


Fig. 1.14 - Secțiunea transversală la curgerea pe sub automobil

Debitul volumic al ajutorului secțiunea transversală ($b \times h$), figura 1.14, poate fi aproximat cu relația

$$Q_{ub} = Q_1 + Q_2 = v b h, \quad (1.8)$$

unde viteza medie a curențului de aer (v) prin secțiunea ajutorului poate fi exprimată cu relația

$$v = c_v \left(\frac{h_u}{h} v_\infty + \frac{Q_2}{b h} \right) \quad (1.9)$$

unde c_v reprezintă coeficientul ce caracterizează distribuția vitezei în secțiunea transversală,
 h_u reprezintă înălțimea la intreprerea în ajutoraj.

Considerând volumul de aer dislocat de automobil în unitatea de timp (Q),

$$Q = Q_{ext} + Q_{ub} = v_{\infty} A, \quad (1.10)$$

unde A reprezintă aria proiecției automobilului pe planul transversal (aria de referință), au fost definiți indicatorii adimensionali $K_{Q_{ub}}$ și $K_{R_{ub}}$

$$K_{Q_{ub}} = \frac{Q_{ub}}{Q} = \frac{v b h}{v_{\infty} A} [-], \quad (1.11)$$

reprezentând participația debitului ce curge pe sub vehicul (Q_{ub}) la debitul total (Q) și

$$K_{R_{ub}} = \frac{R_{ub}}{R} = \frac{\zeta_{ub}}{C_x} \frac{b h}{A} \left(\frac{v}{v_{\infty}}\right)^3 [-], \quad (1.12)$$

reprezentând influența rezistenței generată de curgerea pe sub vehicul (R_{ub}) asupra rezistenței aerodinamice totale a automobilului (R),

unde (ζ_{ub}/c_x) este rezistența aerodinamică relativă, ce exprimă ponderea coeficientului pierderilor de energie datorită curgerii pe sub automobil (ζ_{ub}) la mărimea coeficientului de rezistență aerodinamică al vehiculului (c_x),
 $(b h/A)$ este aria secțiunii de curgere pe sub automobil ($b h$), relativă la aria proiecției automobilului pe planul transversal (A),
 $(v/v_{\infty})^3$ reprezintă viteza relativă.

Astfel, coeficientul rezistenței aerodinamice generată de curgerea pe sub vehicul ($c_{x_{ub}}$) poate fi exprimat cu relația

$$c_{x_{ub}} = K_{R_{ub}} C_x = \zeta_{ub} \frac{b h}{A} \left(\frac{v}{v_{\infty}}\right)^3 [-], \quad (1.13)$$

problema determinării acestuia reducându-se la cea a calculului coeficientului pierderilor de energie la curgerea aerului pe sub automobil (ζ_{ub}).

Cunoscând valoarea ζ_{ub} , pierderea (consumul) de energie fluidică specifică unității de greutate Δe_{ub} la curgerea prin ajutorajul anterior menționat se poate calcula cu relația

$$\Delta e_{G_{ub}} = \zeta_{ub} \frac{v^2}{2 g} \left[\frac{J}{N} \right], \quad (1.14)$$

De asemenea, pierderea (consumul) de putere $P_{c_{ub}}$ datorită rezistenței hidraulice la curgere se calculează cu relația

$$P_{c_{ub}} = \rho g Q_{ub} \Delta e_{G_{ub}} [W], \quad (1.15)$$

unde ρ este densitatea aerului.

Astfel, forța de rezistență la înaintare echivalentă R_{ub} se poate exprima ca fiind

$$R_{ub} = \frac{P_{c_{ub}}}{v_{\infty}} = \zeta_{ub} b h \frac{\rho}{2} \frac{v^3}{v_{\infty}} [N]. \quad (1.16)$$

Pentru un studiu pur teoretic, evaluarea exactă a coeficientului ζ_{ub} este dificilă, chiar și pentru un caz concret bine precizat. Pentru faza de proiect, valoarea aproximativă a acestuia se poate obține din îndrumare de specialitate, precum cel elaborat de Idelcik [18], urmând ca valoarea exactă să fie determinate odată cu realizarea modelului fizic, în medii controlate precum în tunele aerodinamice, sau recent în medii virtuale utilizând metodele CFD.

Rezultatele referitoare la un studiu teoretic au fost prezentate în Huminic et al. [19] în cazul unui automobil de teren ARO 26, model experimental al firmei ARO Câmpulung Muscel, considerând cunoscute următoarele, în concordanță cu figura 1.15:

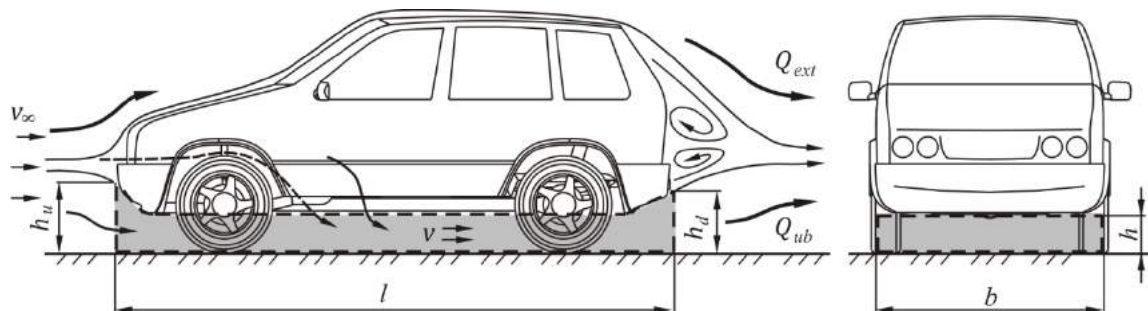


Fig. 1.15 - Automobil experimental de teren, ARO 26

- date geometrice: $A = 2.6 \text{ m}^2$, $b = 1.7 \text{ m}$, $l = 4.1 \text{ m}$, $h = 0.42 \text{ m}$, $h_u = h_d = 0.54 \text{ m}$;
- coeficientul global al rezistenței la înaintare al automobilului, determinat experimental [20] $C_x = 0.443$;
- aerul în condițiile atmosferei standard, având densitatea $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$;
- debitul ce caracterizează curentului de aer generat prin impact la bordul de atac și care curge pe sub vehicul, Q_2 definit ca procent din debitul total Q de fluid dislocat de vehicul; deși se poate determina cu o precizie suficient de bună în urma măsurătorilor pe un model real (sau virtual utilizând tehnici CFD), în acest studiu se va considera ca parametru, având următoarele valori:

$$Q_2 = (0.5\%, 1.0\%, 2.0\%, 4.0\%, 6.0\%, 8.0\%) Q$$

- valoarea coeficientului ζ_{ub} determinată pentru un calcul rapid (specific primei faze a proiectării), conform Idelcik 1984 [18], în "Îndrumător pentru calculul rezistențelor hidraulice", Diagrama 5.25, caz de calcul prezentat și mai jos; este specific trecerilor cu variație bruscă a secțiunii de curgere, caracteristicile geometrice ce le definesc fiind prezentate în figura 1.16.

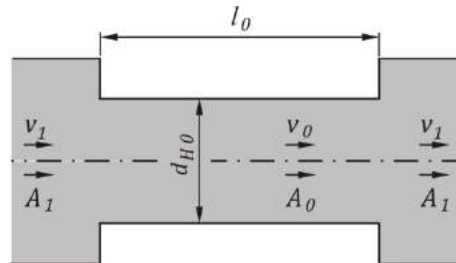


Fig. 1.16 - Caracteristicile geometrice și hidraulice ale trecerilor cu variație bruscă de secțiune [18]

Astfel

$$\zeta_{ub} = k_1(\zeta_i + \zeta_e + \zeta_d) [-]. \quad (1.17)$$

unde ζ_i reprezintă coeficientul de rezistență al admisiei în ajutoraj

$$\zeta_i = 0.5 \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^{\frac{3}{4}} [-], \quad (1.18)$$

ζ_e este coeficientul de rezistență la ieșirea ajutoraj

$$\zeta_e = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 [-], \quad (1.19)$$

ζ_f reprezintă coeficientul rezistenței (distribuite) de frecare

$$\zeta_f = \lambda \frac{l_0}{d_{h0}} [-], \quad (1.20)$$

unde d_{h0} reprezintă diametrul hidraulic echivalent pentru ajutorajul considerat

$$d_{h0} = 4 \frac{b h}{2 b} [m]. \quad (1.21)$$

Curbele de variație ale coeficientul de corecție k_1 în funcție raportul l_0/d_{h0} sunt prezentate în figura 1.17 pentru diferite valori A_0/A_1 . Pentru coeficientul Darcy a fost adoptată valoarea $\lambda = 0.03$, uzuală aplicațiilor practice ale curgerilor turbulente rugoase.

După cum se observă din relația (1.17) un factor determinant asupra valorii ζ_{tot} îl are geometria traseului de curgere, influența vitezei curentului (prin intermediul numărului Reynolds) fiind una secundară, ca de altfel și în cazul altor tipuri constructive de treceri cu schimbări de secțiune.

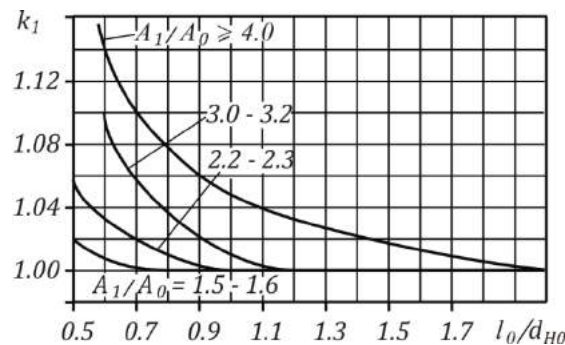


Fig. 1.17 - Curbele de variație ale k_1 în funcție de raportul l_0/d_{H0}

Astfel, pentru $l_0 = 3.75 \text{ m}$, $d_{H0} = 0.84 \text{ m}$, $A_0 = 0.714 \text{ m}^2$, $A_1 = 0.918 \text{ m}^2$, în conformitate cu schema de calcul prezentată în figura 1.16, se obține pentru coeficientul de rezistență echivalentă al ajutorajului valoarea $\zeta_{tot} = 0.345$.

Calculul coeficienților adimensionali $K_{Q_{ub}}$, $K_{F_{ub}}$ și $C_{x_{ub}}$ a fost efectuat pentru următoarele viteze de deplasare ale vehiculului: $v_\infty = (30, 60, 90, 120, 150) \text{ km/h}$, rezultatele obținute fiind prezentate grafic în figurile 1.18 - 1.20.

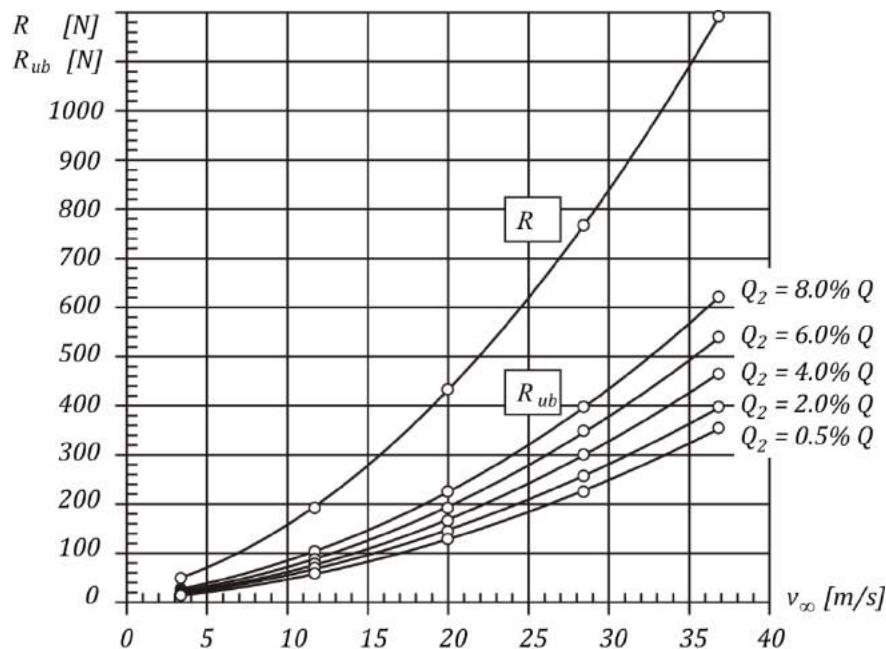


Fig. 1.18 - Curbele de variație ale R și R_{ub} în funcție de v_∞ și Q_2 .

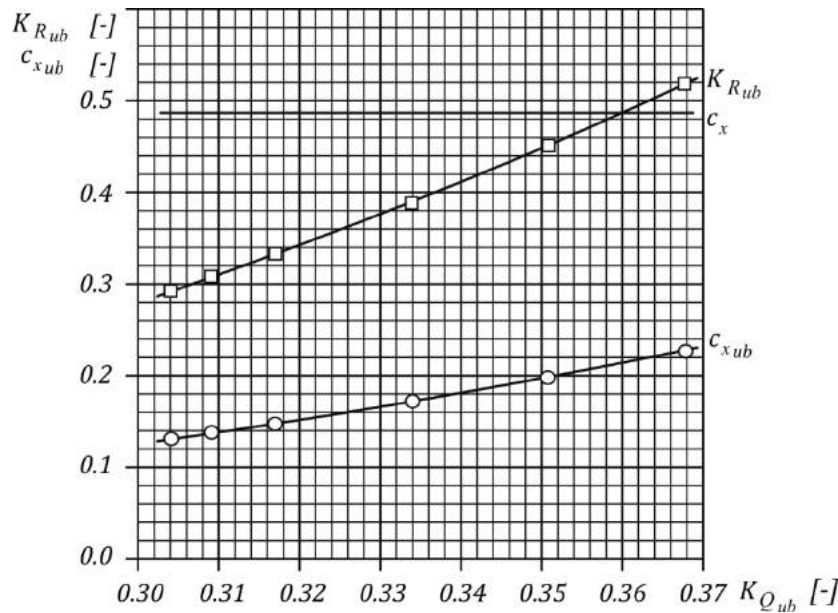


Fig. 1.19 - Curbele de variație ale $K_{R_{ub}}$ și $C_{x_{ub}}$ în funcție raportul $K_{Q_{ub}}$

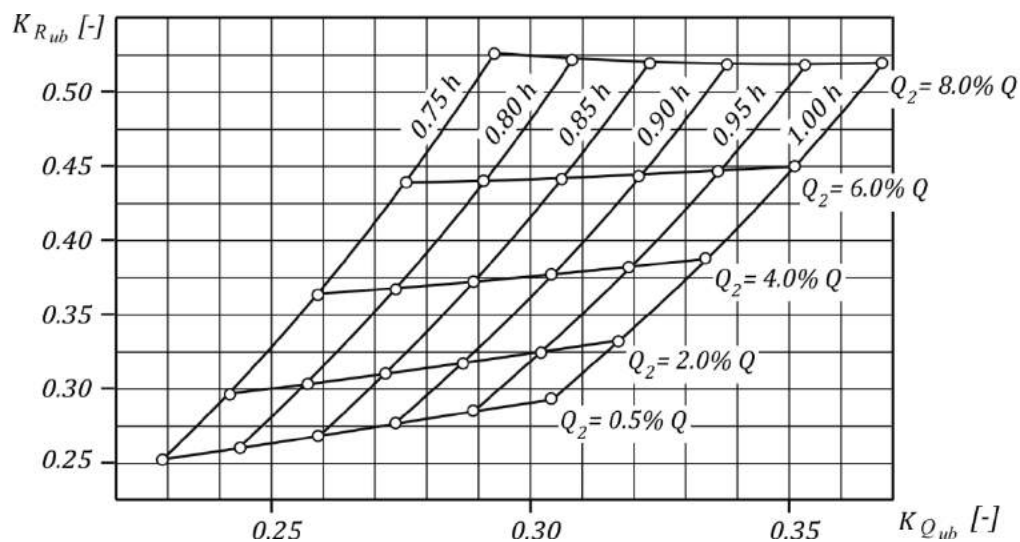


Fig. 1.20 - Curbele de variație ale $K_{R_{ub}}$ în funcție de $K_{Q_{ub}}$, h și Q_2 .

După cum se observă din figurile anterioare, creșterea valorii debitului de aer vehiculat pe sub caroseria autovehiculului duce la mărirea forței de rezistență la înaintare echivalentă din ajutoraj, precum și la creșterea puterii consumate pentru învingerea ei, influența devenind semnificativă pentru valori ale vitezei de deplasare mai mari de $v_{\infty} \geq 25 \text{ m/s}$, motiv pentru care este necesară limitarea, pe cât posibil, a valorilor Q_{ub} .

Pentru vehiculele de serie cu grupul propulsor dispus în față, limitarea debitului de aer vehiculat pe sub acesta se realizează, cel mai adesea, prin utilizarea unor elemente de structură auxiliare, cu rol aerodinamic, precum pragurile laterale, care reduc debitul de aer aspirat din lateral prin ejecție liberă, sau masca față, profilată corespunzător, astfel încât să nu influențeze negativ valoarea gărzii la sol și a debitului de aer necesar răcirii motorului. Pentru mașinile de viteză una din soluții este aceea a evacuării aerului din compartimentul motorului prin fante

practice pe aripile laterale (nu pe sub vehicul), acest lucru putând contribui și la evitarea desprinderii stratului limită în zonele respective.

Limitarea debitului de aer vehiculat pe sub autovehicul se realizează cel mai ușor prin micșorarea gărzii la sol. La automobilele de ultimă generație aceasta este ajustabilă, în funcție de viteza de deplasare, precum la PORSCHE Chayenne.

Se pot construi astfel diagrame de variație ale coeficienților aerodinamici, precum cea prezentată în figurile 1.19 și 1.20, unde sunt reprezentate variațiile coeficienților $C_{x_{ub}}$ și $K_{R_{ub}}$ în funcție de $K_{Q_{ub}}$ pentru cazul de studiu considerat, pentru valori ale gărzii la sol în intervalul $(65 - 100)\% h$.

După cum se observă, în funcție de valoarea debitului vehiculat pe sub vehicul, micșorarea gărzii la sol nu reprezintă întotdeauna o soluție pentru scăderea rezistenței la înaintare. Pentru cazul studiat, reducerea gărzii la sol cu 35% conduce la o mărire a coeficientului de rezistență la înaintare al geometriei inferioare $C_{x_{ub}}$ și implicit a coeficientului global de rezistență aerodinamică al automobilului. Pentru $Q_2 = 0.08 Q$ și o micșorare a gărzii la sol cu 35%, valoarea C_x crește de la 0.443 (experimental) la 0.45.

Cea mai favorabilă dintre situațiile analizate se obține pentru $Q_2 = 0.05 Q$ și o scădere a gărzii la sol cu 35% din valoarea inițială ($h = 0.65\%$), când coeficientul global de rezistență aerodinamică scade la valoarea $C_x = 0.415$.

Informații detaliate despre valorile coeficientului de rezistență echivalentă al geometriei inferioare al unui automobil, precum și despre influența diferitelor elemente de structură, inclusiv despre influența mișcării de rotație a roților, se pot obține în urma analizelor CFD (Computational Fluid Dynamics), precum în paragraful următor, care prezintă rezultatele unor studii efectuate utilizând un corp generic de automobil [21, 22].

1.3 Studiul interacțiunii aerodinamice automobil - cale de rulare în medii virtuale

Întrucât mediul concurențial competitiv impune firmelor de profil lansarea pe piață a unor modele noi la intervale de timp din ce în ce mai scurte, proiectanții caroseriilor au nevoie de date privind performanțele și comportamentul mașinii din punct de vedere aerodinamic încă din faza de anteproiect. În acest context, metodele de analiză CFD (Computational Fluid Dynamics) reprezintă un răspuns viabil la această problemă. Simulările CFD pot fi utilizate chiar din faza în care nu sunt disponibile machete sau modele fizice ale automobilului studiat, care să fie testate în tunelele aerodinamice. De altfel, în acest mod este înlăturat unul dintre neajunsurile testărilor în suflerie, acela al dimensiunilor reduse ale camerei de testare, rezultatele obținute pe cale experimentală fiind afectate de interferențele dintre model și pereții tunelului. În cazul analizelor numerice, domeniul supus investigațiilor poate fi cu mult mai mare, în concordanță cu resursele de calcul avute la dispoziție.

Dezvoltarea mașinilor de calcul, a soft-urilor din domeniul CFD, precum și a facilităților oferite de acestea în ceea ce privește vizualizarea rezultatelor, fac ca estimarea corectă și completă a comportamentului aerodinamic al unui autovehicul să necesite un timp mult mai scurt, implicând un colectiv redus, cu cheltuieli rezonabile.

Avantajele pe care le oferă evaluarea în medii virtuale a performanțelor aerodinamice ale automobilelor decurg din dezavantajele utilizării tunelelor aerodinamice:

- costurile foarte mari ale sufleriilor și ale echipamentelor utilizate, în special a celor ce reproduc mișcarea relativă dintre automobil și sol (de simulare a efectului de sol);
- rezultate influențate de interferențele dintre modelul studiat și tunelul aerodinamic.

Cele două menționate anterior sunt interdependente și încercarea de reducere a uneia dintre ele are ca efect creșterea celeilalte. Astfel, pentru diminuarea interferențelor dintre pereții camerei de testare și mașină (în cazul tunelelor cu secțiune închisă) sunt necesare tunele de mari dimensiuni, cu costuri de realizare și consumuri energetice ridicate. Utilizarea unor suflerii mai mici conduce la mărirea interferențelor suflerie – model testat (la aceleași dimensiuni ale automobilului), cu consecințe negative asupra rezultatelor obținute.

În cazul tunelelor cu secțiune de testare deschisă rezultatele sunt influențate, pe de o parte, de efectul de confuzor (la ieșirea din confuzor are loc o destindere a aerului circulat prin suflerie), iar pe de altă parte, de interferența dintre modelul testat și colectorul (difuzorul) sufleriei. În acest caz, poziția mașinii în zona de testare devine importantă pentru obținerea unor rezultate cât mai bune.

În aceste condiții, evaluarea caracteristicilor aerodinamice pe cale numerică devine tot mai atractivă, odată cu dezvoltarea unor programe de calcul CFD adecvate, concomitent cu creșterea performanțelor mașinilor de calcul. Pentru a fi competitive, metodele CFD trebuie să îndeplinească două condiții:

- să poată reproduce cu acuratețe condițiile fizice din timpul testelor, astfel încât rezultatele obținute să fie suficient de precise; în acest context ar trebui să determine variații ale coeficientului de rezistență la înaintare de ordinul miimilor, $\Delta C_x = 0.002$ [23];
- să dureze mai puțin ca încercările în suflerie.

Deși prima condiție este importantă, uneori se consideră ca fiind suficientă doar a doua. Acest lucru se datorează faptului că proiectarea automobilelor devine, pe zi ce trece, un proces integrat pe calculator, inginerii putând face predicții asupra comportamentului aerodinamic al unui prototip înainte ca acesta să fie realizat fizic, scurtându-se semnificativ timpul de lansare pe piață. De asemenea, prin utilizarea metodelor numerice se elimină inconvenientele legate de spațiul de testare din suflerii și de simulare a efectului sol, acesta realizându-se doar prin impunerea unor condiții la limită pe domeniul supus analizei.

Totuși, datorită limitărilor de ordin matematic ale modelelor ce reproduc mediul fizic de desfășurare a experiențelor în tunele, în acest moment nu se poate vorbi de o renunțare la testarea aerodinamică a automobilelor în suflerii. Rezultatele obținute în urma simulărilor numerice vin în completarea celor obținute clasic în laborator, nuanțându-le, datorită posibilităților de afișare, în acest sens oferind informații despre procesele de curgere în intimitatea acestora.

1.3.1 Studiul Aerodinamic al unui corp generic de automobil având geometria inferioară modelată ca ajutoraj Venturi

Deși o preocupare constantă a inginerilor pentru reducerea rezistenței aerodinamice a automobilelor o reprezintă forma exterioară a structurii superioare a caroseriei, după cum se poate observa și din figura 1.5, recent, atenția acestora se îndreaptă tot mai mult asupra geometriei structurii inferioare a automobilelor în vederea asigurării unei curgeri optime și pe sub vehicule [24].

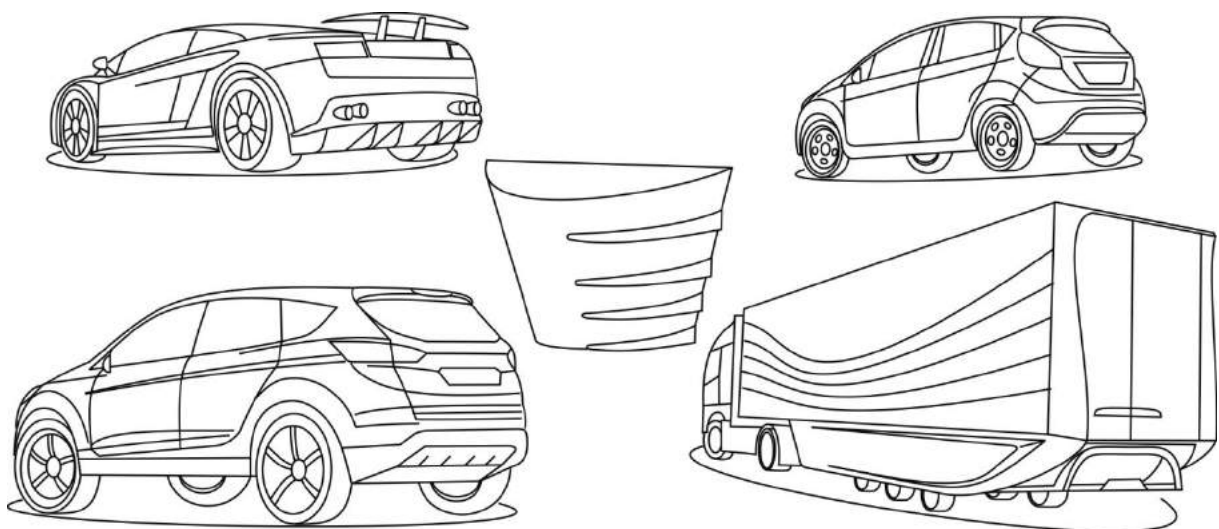


Fig. 1.21 - Autovehicule echipate cu difuzoare.

Pentru a reduce rezistența aerodinamică concomitent cu creșterea forței deportante, multe din autovehiculele moderne au geometria inferioară modelată astfel încât să genereze efectul Venturi la curgerea aerului prin spațiul dintre sol și caroserie, respectiv de reducere a presiunii curenților de aer prin varierea controlată secțiunii de curgere utilizând difuzoare, după cum este prezentat în figura 1.21.

Astfel, difuzorul unui automobil are ca principal rol aducerea curenților de aer ce curge pe sub caroserie, caracterizat de viteză mare și presiune scăzută, la valoarea presiunii atmosferice fără inducerea unor turbulențe (turbioane) suplimentare cauzate de desprinderea curenților de pe suprafața geometriei inferioare. De asemenea, utilizarea unui difuzor dă proiectanților posibilitatea îmbunătății stabilitatea automobilelor controlând poziția centrului de presiune (punctul de aplicație al forței aerodinamice rezultante) prin profilarea adecvată a geometriei difuzorului, respectiv lungimea difuzorului și unghiul acestuia [17].

Referitor la avantajele utilizării difuzoarelor la proiectarea autovehiculelor, până în prezent au fost efectuate numeroase studii utilizând corpuri generice de automobil, precum și geometrii simplificate de caroserii [25], cu sau fără roți, după cum este ilustrat în figura 1.22, respectiv în figura 1.23.

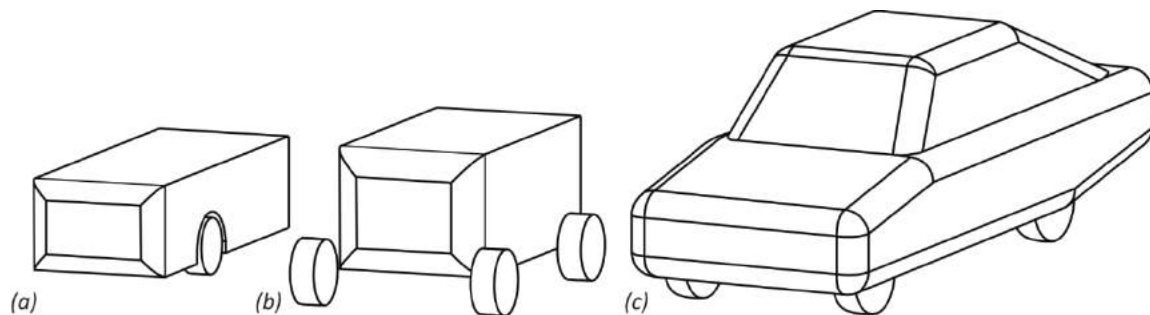


Fig. 1.22 - Corpuri generice de automobil pe roți (a) [26] și (b) [27], respectiv geometrie simplificată de caroserie (c)[25]

Chiar dacă acestea nu pot reproduce toate caracteristicile curgerii în jurul unui automobil real, astfel corpuri sunt frecvent utilizate pentru a studia aspecte particulare ale curgerii în anumite regiuni. Studiile utilizând geometrii idealizate sau simplificate evidențiază tendințele în dezvoltarea unor fenomene, iar rezultatele obținute sunt aplicabile în general și geometriilor reale ale automobilelor. De asemenea, datorită simplității geometrice, aceste corpuri pot fi ușor studiate utilizând tehnici CFD, validarea experimentală a procedurilor numerice utilizate fiind mult mai convenabilă.

Dintre corpurile generice (fără roți) de automobil, utilizate frecvent în studiile de aerodinamica autovehiculelor sunt cele prezentate în figura 1.23: Ahmed body [28] și Rover body [29].

După cum este ilustrat, aceste corpuri reprezintă modele idealizate la scara 1:4 ale autovehiculelor hatchback, monovolum sau în două volume.

Rezultate semnificative referitoare la rolul difuzoarelor închise lateral de au fost raportate în numeroase studii, prezentate pe scurt în paragrafele următoare.

Utilizând un corp Rover echipat cu difuzor, Howell [29] examinează efectul mișcării relative dintre automobil și calea de rulare asupra caracteristicilor aerodinamice, concluzionând că eficacitatea difuzorului în reducerea rezistenței aerodinamice este puternic influențată și de

geometria caroseriei superioare. Astfel, difuzoarele caracterizate de lungimi și unghiuri mici nu influențează semnificativ aerodinamica automobilelor în configurație hatchback verticală (hayon vertical). Importanța difuzoarelor crește în cazurile unor hayoane oblice, în corelație cu valoarea unghiului de înclinare al acestora.

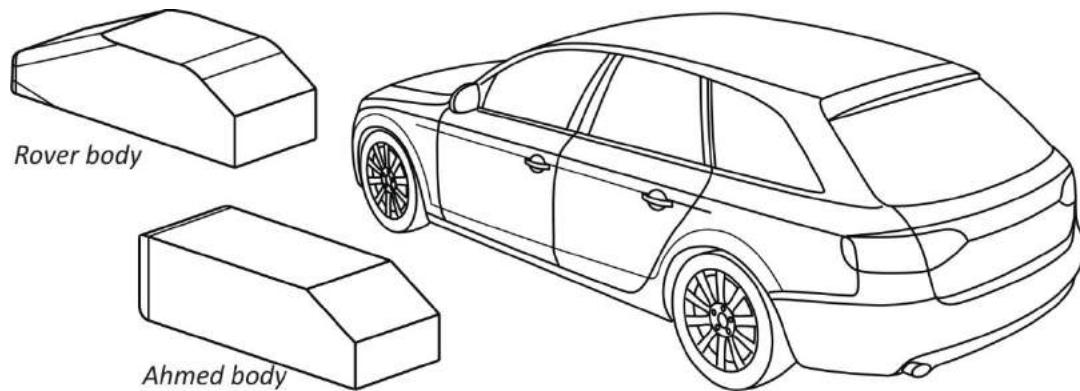


Fig. 1.23 - Corpuri generice de automobil la scara 1:4

Un studiu detaliat referitor la influența parametrilor geometrici ai difuzoarelor asupra aerodinamicii automobilelor a fost efectuat de Cooper et al. [30] pentru mai multe valori ale gârzii la sol, evidențiind și fenomenele aerodinamice care apar la curgerea aerului prin difuzor. Într-un studiu ulterior [31], acesta propune un model analitic de evaluare a forței deportante generate de difuzoare, model utilizat apoi la determinarea caracteristicilor optime ale difuzorului unui automobil de competiție având o geometria inferioară plană, fără elemente de impact. Aceste cercetări sunt continuate de Desai et al. [27] și Breslouer & George [32], care studiază aerodinamica corpului generic de automobil utilizat de Cooper et al. considerând și influența unor roți dispuse lateral, precum în figura 1.22(b). Studii similare au mai fost raportate de către George A. R. [33] și Zhang et al. [34]. Și acestea evidențiază influența geometriei inferioare în mecanismul de generare și creștere a forței aerodinamice deportante.

Utilizând o geometrie simplificată a unui automobil concept VW, Buchheim et al. [35] studiază efectul utilizării difuzorului asupra forțelor aerodinamice, concluzionând că rezistența aerodinamică descrește pentru valori ale unghiului difuzorului $\alpha_d \leq 4^\circ$. Pentru valori mai mari, rezistența aerodinamică crește. De asemenea, forța deportantă crește cu valoarea unghiului difuzorului.

În acest domeniu, unul dintre studiile personale [21] a avut ca scop determinarea influenței geometriei inferioare modelată ca ajutor Venturi, asupra caracteristicilor aerodinamice asupra unui corp generic de automobil, Ahmed [28], echipat cu difuzor și având rază de curbură variabilă a secțiunii frontale, precum în figura 1.24.

Opțiunea utilizării acestui model generic de automobil s-a făcut ținând cont că acesta este utilizat în numeroase studii, inclusiv utilizând tehnici CFD, care în ultimul deceniu au devenit un instrument puternic în analiza autovehiculelor din punct de vedere aerodinamic [36]. Valoarea unghiului de înclinare a suprafeței corespunzătoare hayonului, $\alpha = 35^\circ$ a fost aleasă în acord cu concluziile lui Howell [29], anterior menționate.

Studiul a fost efectuat pentru mai multe configurații ale geometriei inferioare, raza secțiunii frontale (r_i), lungimea (l_d) și unghiul difuzorului (α_d) fiind parametri variați sistematic în intervale cu valori relevante pentru un automobil în configurație hatchback. Ulterior, utilizând

abordarea teoretică prezentată anterior, au fost determinați coeficienții de rezistență aerodinamică pentru secțiunea frontală și pentru difuzor.

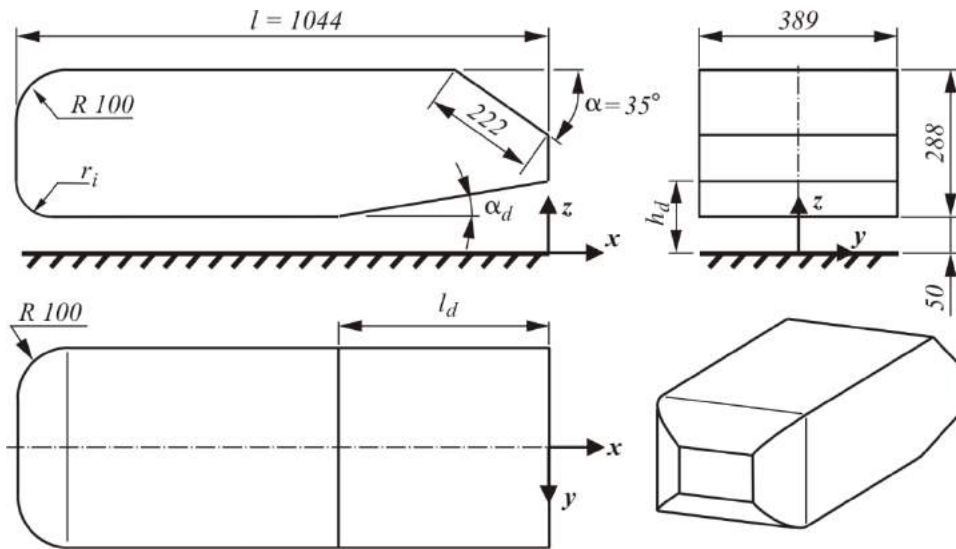


Fig. 1.24 - Geometria unui corp generic de automobil, Ahmed, cu difuzor, [37]

Prin descompunerea geometriei inferioare a automobilului în zone distincte, precum în figura 1.25, respectiv în secțiune de intrare, mediană și de evacuare (zona de difuzor) coeficientul ζ_{ub} poate fi evaluat prin însumarea pierderilor de energie specifice fiecărei secțiuni

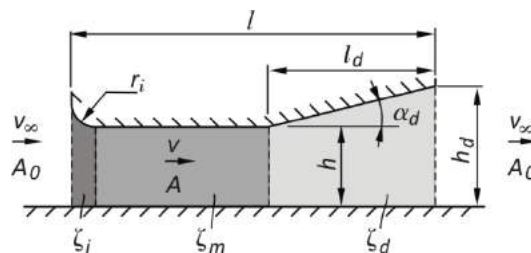


Fig. 1.25 - Caracteristicile geometriei inferioare ale corpului generic de automobil, Ahmed, cu difuzor, [37]

$$\zeta_{ub} = \zeta_i + \zeta_m + \zeta_d. \quad (1.22)$$

unde ζ_i , ζ_m și ζ_d reprezintă coeficienții pierderilor de energie în secțiunile de intrare, respectiv mediană și în difuzor.

Evaluînd variația presiunii totale (Δp_t) între secțiuni, acești coeficienți se calculează cu relația

$$\zeta = \frac{\Delta p_t}{\frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2}} = \frac{(p_{in} - p_{out})_t}{\frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2}}. \quad (1.23)$$

În paragrafele următoare sunt prezentate principalele etape ale procesului de modelare numerică precum și rezultatele obținute în urma analizelor CFD referitoare la influența geometriei inferioare asupra caracteristicilor aerodinamice ale corpului studiat.

1.3.1.1 Modelul CAD. Domeniul de calcul

Corpul generic de automobil utilizat în acest studiu a fost propus 1984 și utilizat inițial [28] în studiul vârtejurilor (dărei aerodinamice) generate de corpuri 3D. După cum se observă și în figurile 1.23, 124 și 1.26, este compus din trei secțiuni, dintre care una frontală cu muchii rotunjite ($R = 100$), una mediană de secțiune dreptunghiulară constantă (288×389) și o secțiune de capăt având suprafața superioară, reprezentând hayonul, înclinată cu unghiul α , variabil. Lungimea acestui corp este de 1044 mm.

Astfel, geometria acestui corp a fost special concepută pentru a studia influența hayonului asupra trenului de vârtejuri, implicit și asupra rezistenței aerodinamice. Studiul inițial, completat ulterior de altele similare, a fost efectuat pentru valori ale unghiului de înclinare în intervalul $\alpha = [0^\circ, 40^\circ]$. Descrieri detaliate ale rezultatelor obținute au fost publicate în mai multe articole [28, 36, 37, 38]. Acestea au relevat existența a două unghiuri critice, $\alpha = 12.5^\circ$ și $\alpha = 30^\circ$, la care structura dărei aerodinamice se modifică semnificativ, modificări evidențiate și de schimbarea curburii variației coeficientului de rezistență aerodinamică, figura 1.31.

Pentru valori $\alpha < 12.5^\circ$, curgerea peste suprafața înclinată rămâne atașată de aceasta, iar desprinderile au loc pe suprafața verticală a secțiunii de capăt. De asemenea, curgerea peste suprafața înclinată și suprafețele laterale generează o pereche de vârtejuri de sensuri contrare care se dezvoltă în aval pe o distanță $\sim 0.48 l$ raportată la lungimea corpului (l) [37].

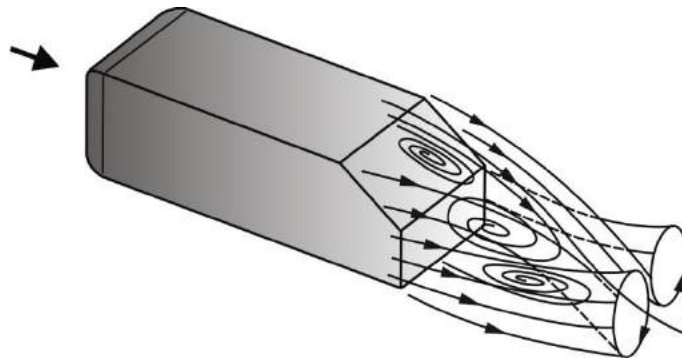


Fig. 1.26 - Aspectul curgerii în spatele corpului Ahmed, $\alpha = 35^\circ$, [36]

Pentru $12.5^\circ < \alpha < 30^\circ$, aspectul curgerii peste suprafața înclinată devine dominant tridimensional, deoarece vârtejurile anterior menționate cresc în dimensiune. Datorită influenței acestor vârtejuri, curgerea rămâne atașată pe suprafața înclinată până la valori apropiate de $\alpha = 30^\circ$, când apare fenomenul de separație locală (bubble separation) a curgerii. O reatașare a curentului se produce în zona mediană a suprafeței înclinate, urmată apoi de o nouă desprindere. Dacă $\alpha > 30^\circ$, curgerea devine complet separată, situație în care presiunea pe suprafața înclinată este cvasiconstantă [37] și în consecință variațiile rezistenței aerodinamice devin ne semnificative.

Astfel, pe baza celor prezentate anterior și în acord cu concluziile lui Howell [29], studiile proprii în acest domeniu [21, 38] au fost efectuate pentru un unghi de înclinare a acestei suprafețe corespunzător valorii $\alpha = 35^\circ$, fig 1.24. Unghiul corespunde unei configurații cu

valoare minimă a rezistenței aerodinamice, fig. 1.31 și, de asemenea unei curgeri cvasibidimensionale conform Guilmineau [36], în care intensitatea vârtejurilor laterale descrește.

Corpul modelat ca geometrie CAD parametrizată cu ajutorul modulului geometric integrat în ANSYS Workbench, a fost plasat în interiorul unui domeniu de calcul de formă paralelipipedică, figura 1.27, la o distanță $h = 50 \text{ mm}$ față suprafața care reproduce calea de rulare (*Ground*), precum în studiul inițial efectuat de Ahmed et al. [28]. De asemenea, pentru a simula și mișcarea relativă dintre corp și calea de rulare (efectul de sol), nu au fost modelate și elementele de legătură dintre corp și suprafața camerei de experiențe prezente în studiul experimental.

Dimensiunile domeniului de calcul au fost astfel stabilite încât suprafețele acestuia să nu perturbe semnificativ curgerea în jurul corpului studiat - interferențe aerodinamice neglijabile datorită efectelor de blocaj. Raportat la lungimea corpului (l) valorile acestora sunt

- $2.5 l$ în fața corpului,
- $12 l$ în spate,
- $1.5 l$ în lateral în raport cu planul de simetrie și
- $1.5 l$ între suprafața inferioară și cea superioară.

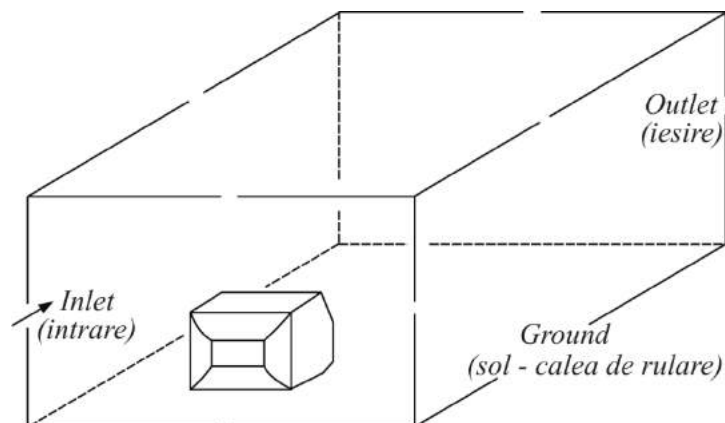


Fig. 1.27 - Corpul generic de automobil Ahmed - vedere axonometrică din față

Astfel, valoarea raportului de blocare a fost sub 2%, mult mai mică decât în cazul testelor în tunele aerodinamice.

1.3.1.2 Grila de discretizare și condiții la limită

Grila generată a fost de tip multi-bloc [40], cu elemente tetraedrale în interiorul domeniului de calcul și hexaedrale la nivelul suprafețelor corpului (solide), figura 1.28, a căror lungime a laturilor a fost impusă în intervalul $(0.001 \div 0.004)$ m pentru a modela cu acuratețe curgerea în apropierea acestuia.

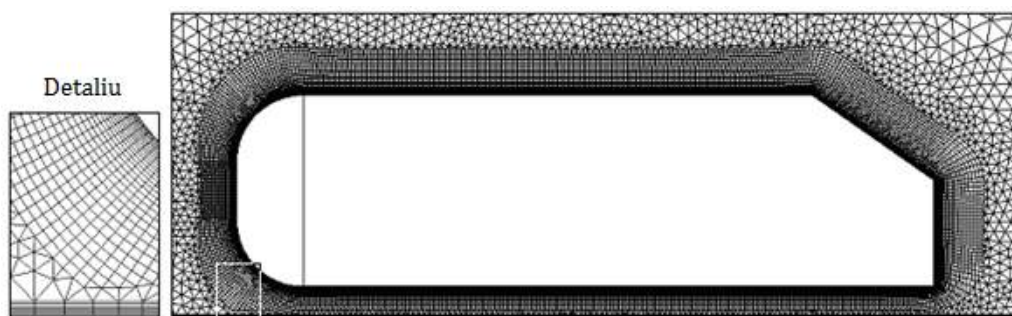
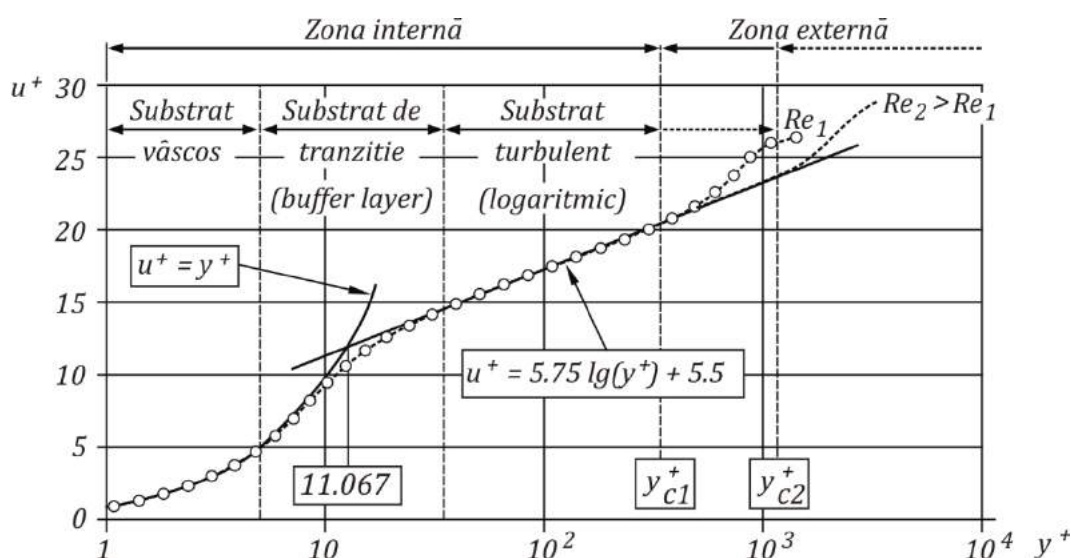


Fig. 1.28 - Aspectul grilei de discretizare în planul de simetrie

De asemenea, dimensiunea elementelor pe direcție normală măsurată de la nivelul suprafețelor solide a fost impusă astfel încât să fie îndeplinită condiția $30 \leq y^+ \leq 100$, în acord cu modelul de calcul utilizat - RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, ecuațiile Navier-Stokes mediate Reynolds) cu variație logaritmică a vitezei la perete, figura 1.29.

Fig. 1.29 – Legea distribuției vitezei la perete $u^+(y^+)$ [40]

Astfel

$$u^+ = 5.756 \lg(y^+) + 5.5, \quad (1.24)$$

unde u^+ reprezintă viteza adimensională, pe direcție tangențială la suprafață

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau}, \quad (1.25)$$

\bar{u} viteza medie pe direcție tangențială la suprafață

y^+ coordonata (distanța) adimensională, măsurată pe direcție normală de la suprafața solidă, având semnificația unui număr Reynolds definit în raport cu u_τ și y

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}, \quad (1.26)$$

u_τ viteza de frecare la perete, datorită faptului că din punct de vedere dimensional are dimensiunea unei viteze

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (1.27)$$

τ_0 reprezintă tensiunea tangențială de frecare la perete,

ρ este densitatea fluidului,

ν este vâscozitatea cinematică a fluidului.

Pentru a defini cât mai bine zona de curgere din interiorul stratului limită, a fost generată o grilă de discretizare cu 30 elemente hexaedrale, după cum se poate observa în detaliul din figura 1.28.

Pentru o jumătate a domeniului de analiză, grilele de discretizare generate au avut un număr de noduri mai mare decât

- 1.275.000 noduri pentru întreg demeniul de calcul, dintre care
- 32.500 noduri pe suprafețele corpului studiat.

Condițiile pe frontierele domeniului au fost impuse în acord cu experimentele efectuate de Strachan et al. [37], rezultatele acestora fiind utilizate și pentru validarea procedurii CFD adoptate. Astfel, raportat la un sistem de referință precum în figura 1.30 au fost considerate următoarele condiții la limită

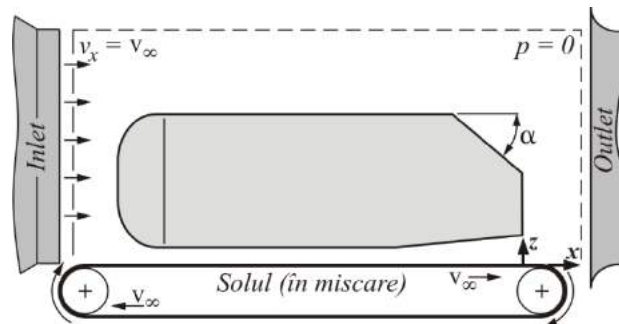


Fig. 1.30 – Condițiile la limită, în acord cu [37]

- o viteză uniformă $v_x = v_\infty$ (viteza de referință a curentului) și $v_y = v_z = 0$ pe suprafața ce definește intrarea fluidului în domeniul de calcul (*inlet*),
- $v_x = v_\infty$ și $v_y = v_z = 0$ pe suprafața ce definește solul (calea de rulare), modelată ca suprafață solidă în mișcare (*solid moving wall*), pentru a simula mișcarea relativă dintre corp și sol,
- suprapresiune nulă ($p = 0$) pe suprafața ce definește ieșirea fluidului din domeniul de analiză (*outlet*), în raport cu presiunea de referință p_∞ ,
- $v_x = v_y = v_z = 0$ pe suprafețele ce definesc corpul studiat (*no slip conditions*),

- pentru restul suprafețelor au fost considerate condiții specifice frontierelor fluide (*free slip conditions*).

1.3.1.3 Ecuațiile modelului matematic utilizat și parametrii de referință

Pentru simulări a fost utilizat CFX-12.0, un program de analiză CFD integrat în platforma ANSYS Workbench, care oferă soluții complete pentru modelare parametrizată CAD, discretizare, algoritmi pentru soluționări rapide și robuste, precum și facilități de post-procesare a rezultatelor obținute.

Analizele CFD au fost efectuate utilizând infrastructura de calcul disponibilă în laboratorul de Aerodinamică din Universitatea Transilvania din Brașov, care în momentul de față dispune de un cluster de stații grafice însumând 32 de nuclee de calcul în paralel și 160 GB RAM.

Variabilele procesului de curgere au fost determinate soluționând ecuațiile RANS (ecuațiile Navier-Stokes mediate Reynolds) (1.28) împreună cu ecuația continuității (1.29), pentru curgeri turbulente ($v_i = \bar{v}_i + v'_i$), în regim staționar ($(\partial v_i / \partial t) = 0$), subsonice ($Ma < 0.2$), incompresibile ($\rho = ct = \rho_\infty$), fără variații ale temperaturii fluidul de lucru ($T = ct = T_\infty$, deci și $\mu = ct = \mu_\infty$), neglijând influența forțelor masice (unitare) $f_{m_i} = 0$ (fluid ușor - aer), aceste condiții fiind caracteristice proceselor de aerodinamica automobilelor

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial z^2} \right) - \\ \quad - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{v'_x v'_x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \overline{v'_y v'_x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{v'_z v'_x}) \right], \\ \rho \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial z^2} \right) - \\ \quad - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{v'_x v'_y}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \overline{v'_y v'_y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{v'_z v'_y}) \right], \\ \rho \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial z^2} \right) - \\ \quad - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{v'_x v'_z}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \overline{v'_y v'_z}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{v'_z v'_z}) \right], \end{array} \right. \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} = 0. \quad (1.29)$$

Folosind convenția de sumare Einstein, sistemul anterior de ecuații poate fi scris și în forma compactă

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{v'_i v'_j}) \\ \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \end{array} \right. \quad (1.30)$$

unde următoarele reprezintă

v_x, v_y, v_z	componentele vitezei în sistemul de referință cartezian (xOyz),
v_i, v_j	componenta "i", respectiv "j" a vitezei, unde $i, j = \{x, y, z\}$,
\bar{v}_i, \bar{v}_j	mediile componentelor vitezei,
v'_i, v'_j	fluctuațiile componentelor vitezei, în raport cu mediile acestora,
x_i, x_j	coordonata "i", respectiv "j" în sistemul de referință (xOyz),
$\rho = \rho_\infty$	densitatea curenului neperturbat (de referință),
$T = T_\infty$	temperatura curenului neperturbat,
$\mu = \mu_\infty$	vâscozitatea dinamică a curenului neperturbat,
\bar{p}	media presiunii,

Vitezele medii (similar și presiunea medie) în intervalul de timp Δt se claculează cu relația

$$\bar{v}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} v_i dt, \quad (1.31)$$

iar tensiunile Reynolds $\rho \overline{v'_i v'_j}$ sunt modelate în funcție de vâscozitatea aparentă și vitezele de deformație utilizând ipoteza extinsă a lui Boussinesq [41]

$$-\rho \overline{v'_i v'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k, \quad (1.32)$$

unde

μ_T	reprezintă vâscozitatea (turbulentă) aparentă,
k	este energia cinetică turbulentă

$$k = \frac{1}{2} \overline{v_i'^2} = \frac{1}{2} \left(\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2} \right). \quad (1.33)$$

Pentru închiderea sistemului de ecuații a fost utilizat modelul de turbulență *Shear-Stress-Transport (SST)* elaborat de Menter [42] pe baza celui propus de Wilcox [43].

Este unul dintre modelele cu două ecuații de transport cunoscute și ca modele de ordinul doi ce permit atât calculul energiei cinetice turbulente cât și a scării de lungimi pentru structurile turbulente de dimensiuni mari. Prima dintre ecuații este cea de transport a energiei cinetice turbulente k . Scara de lungimi \hat{l} , sau o mărime echivalentă exprimată de o funcție Z în forma $Z = k^n \hat{l}^m$ (m și n fiind constante reale) este determinată din a doua ecuație de transport, care în formă generală este exprimată de relația[44]

$$\underbrace{\frac{\partial Z}{\partial t} + v_{xi} \frac{\partial Z}{\partial x_i}}_{\text{Transport convectiv}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\sqrt{k} L}{\sigma_z} \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)}_{\text{Difuzie}} + \underbrace{C_{z1} \frac{Z}{k} P}_{\text{productie}} - \underbrace{C_{z2} Z \frac{\sqrt{k}}{L}}_{\text{disipatie}} + \underbrace{\sum}_{\text{sursa suplimentară}}, \quad (1.34)$$

unde următoarele reprezintă:

C_{Z1}, C_{Z2}, σ_z	constante (determinate empiric),
P	termenul de producție a energiei turbulente cinetice, k ,
S	sursă suplimentară ce depinde de alegerea funcției Z ,
L	lungime caracteristică procesului de curgere.

Cele mai cunoscute formulări ale funcției Z sunt:

$$Z \equiv \varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\hat{l}} \left(= \frac{k \sqrt{k}}{\hat{l}} \right) \left[\frac{m^2}{s^3} \right] \quad (\text{Chou [45], Jones \& Launder [46]: modele } k - \varepsilon), \quad (1.35)$$

$$Z \equiv \omega = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\hat{l}} \left(= \frac{\varepsilon}{k} \right) \left[\frac{1}{s} \right] \quad (\text{Kolmogorov, sau Wilcox [43]: modele } k - \omega), \quad (1.36)$$

unde ε este *disipația turbulentă*

ω reprezintă *frecvența de disipația turbulentă*.

Modelul de turbulență *SST* este utilizat frecvent în studiile curente de aerodinamică deoarece îmbină avantajele modelelor

$k - \omega$ care modelează satisfăcător curgerea în apropierea suprafețelor solide și

$k - \varepsilon$ care modelează cu acuratețe curgerea în zona exterioară stratului limită,

utilizând o funcție care face trecerea între cele două modele de turbulență, furnizând astfel rezultate satisfăcătoare evințate de numeroase studii, inclusiv personale [21, 38, 47].

Condițiile de referință considerate pentru acest studiu au fost cele corespunzătoare atmosferei standard: presiunea atmosferică $p_\infty = 101325 \text{ Pa}$ și temperatura atmosferică $t_\infty = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_\infty = 288.15 \text{ K}$), valorile acestora fiind utilizate apoi pentru calculul celorlalți parametri ai aerului, precum densitatea (ρ) și vâscozitatea (μ)

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \left[\frac{kg}{m^3} \right], \quad (1.37)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right], \quad (1.38)$$

unde termenii cu indice "0" sunt parametrii aerului în starea de referință, respectiv atmosfera fizică normală: $p_0 = 101325 \text{ N/m}^2$ ($p_0 = 760 \text{ mm Hg}$) și temperatura $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273.15 \text{ K}$).

Pentru aer,

$$\begin{aligned}\rho_0 &= 1.293 \text{ kg/m}^3, \\ \mu_0 &= 1.712 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m s)}, \\ C_{aer} &= 111 \text{ K (constantă de variație a vâscozității dinamice a aerului} \\ &\text{cu temperatura)}.\end{aligned}$$

Astfel, pentru condițiile considerate se obțin valorile

$$\rho_\infty = 1.225 \text{ kg/m}^3 \text{ și } \mu_\infty = 1.785 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m s)}.$$

Viteza de referință a curentului de aer a fost impusă precum în studiul inițial efectuat de Ahmed et al. [28], $v_\infty = 40 \text{ m/s}$, pentru care valoarea numărului Reynolds corespunzător este $Re = 2.63 \cdot 10^6$, calculat în funcție de lungimea de corpului ($l = 1.044 \text{ m}$)

$$Re = \frac{v_\infty l}{\frac{\mu_\infty}{\rho_\infty}}. \quad (1.39)$$

Gradul de turbulență impus a fost $T = 0.2\%$, precum în studiul efectuat de Strachan et al. [37]

$$T = \frac{\sqrt{v'^2}}{v_\infty} \cdot 100 [\%]. \quad (1.40)$$

unde v' reprezintă fluctuațiile vitezei în raport cu valoarea medie a acesteia (v_∞).

1.3.1.4 Validarea modelului numeric adoptat

În prima etapă a fost verificată acuratețea cu care programul soluționează curgerea în jurul corpului studiat pentru grila generată și modelul numeric adoptat, utilizând rezultatele experimentale furnizate de Strachan et al. [37].

Pentru aceasta a fost simulată curgerea în jurul corpului Ahmed în condițiile descrise de de Strachan et al.: $v_\infty = 25 \text{ m/s}$, corespunzătoare unei valori a numărului Reynolds $Re = 1.64 \cdot 10^6$ și la un grad de turbulență $T = 0.2\%$, cu simularea efectului de sol, MG (moving ground). Pentru modelul studiat nu a fost studiată și influența suportului de fixare, datorită lipsei informațiilor referitoare la geometria (profilul) acestuia.

Soluțiile au fost considerate finalizate atunci când variația normelor reziduale de convergență a variabilelor procesului (componentele vitezei și presiunea) a devenit nesemnificativă pe parcursul unui număr semnificativ de iterații. Principalele criterii avute în vedere pentru convergența soluțiilor au fost:

- scăderea normelor reziduale de convergență la valori mai mici decât 10^{-4} ,
- o distribuție continuă a variabilelor procesului în întreg domeniul de calcul, cu valori realiste;
- variații ale coeficienților aerodinamici C_x și C_z (pentru iterațiile finale) sub 10^{-4} , în acord cu normele SAE [23] care impun determinarea unor variații ale coeficientului de rezistență aerodinamică $\Delta C_x = \pm 0.001$

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2} A_r}, \quad C_z = \frac{F_z}{\frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2} A_r}. \quad (1.41)$$

Din punct de vedere cantitativ au fost evaluați coeficienții aerodinamici pentru diverse valori ale unghiului de înclinare a suprafeței ce modelează hayonul (α), rezultatele obținute fiind prezentate în figura 1.31 împreună cu cele furnizate de Strachan et al. [37].

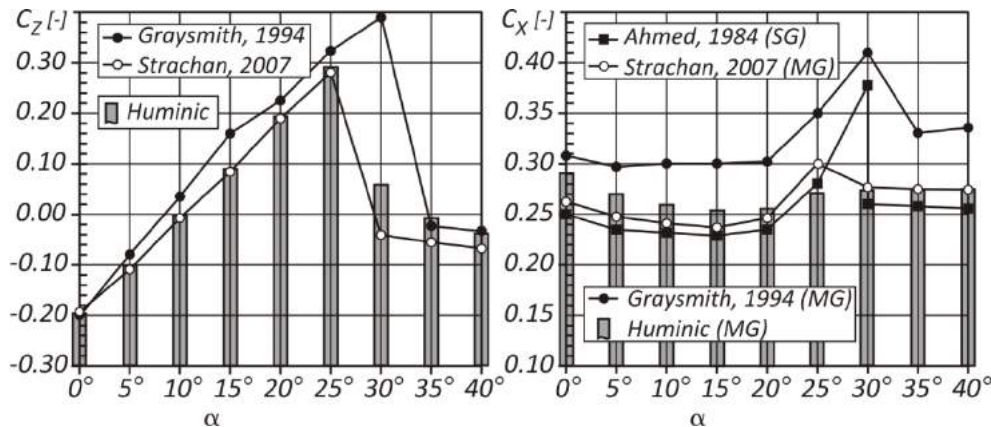


Fig. 1.31 – Variația coeficienților aerodinamici C_z și C_x în raport cu valorile experimentale furnizate în [37]

După cum se poate observa, acuratețea cu care programul soluționează curgerea în jurul corpului studiat pentru grila generată și modelul numeric adoptat este foarte bună, valorile obținute fiind apropiate de cele indicate de Strachan .

Precum și în experimente, analizele CFD evidențiază existența celor două valori critice ale unghiului de înclinare a hayonului, anterior menționate, la care structura dărei aerodinamice se modifică semnificativ, evidențiată de schimbarea curburii variațiilor coeficienților de portanță C_z și de rezistență aerodinamică C_x .

Din punct de vedere al valorilor coeficientului de portanță, valori excelente au fost obținute pentru valori $\alpha < 25^\circ$. Abateri mai mari ($\sim 10\%$) au fost înregistrate pentru $\alpha > 30$, acestea fiind cauzate de existența suportului de fixare a modelului în camera de experiențe, după cum arată Hetherington et al. [48].

Valorile coeficientului de rezistență aerodinamică sunt foarte apropiate de cele experimentale pentru $\alpha > 30$ când curgerea devine complet separată, după cum a fost menționat anterior în paragraful 1.3.1.1.

Din punct de vedere calitativ, a fost studiat câmpul de viteze (afișaj multi-contur) în aval, în planul (yOz) pentru care $(x/l) = 0$, corespunzător cazului $\alpha = 25^\circ$, precum în studiul efectuat de Strachan, unde " l " reprezintă lungimea corpului Ahmed. În studiul experimental [37] câmpul de viteze a fost studiat utilizând tehnica LDA (Laser Doppler Anemometry).

Pentru o comparație directă a valorilor obținute, din acest plan a fost extras un segment de dreaptă pe direcția (Oy) pentru care $(x/l) = 0$ și $(z/l) = 0.26$, rezultatele fiind prezentate în figurile 1.32 și 1.33.

După cum se poate observa din câmpurile de viteze prezentate în figura 1.32, cele trei studii prezintă rezultate similare, toate evidențiind perechea de vârtejuri de sensuri contrare care se dezvoltă în aval de corp.

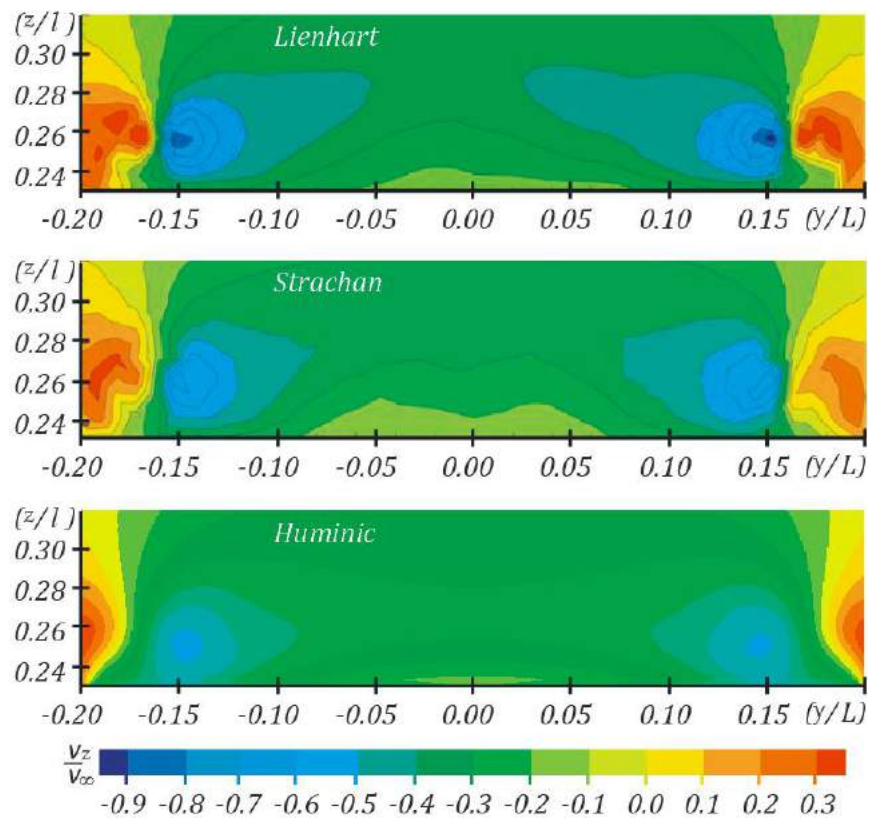


Fig. 1.32 – Variația v_z/v_∞ în planul (yOz) pentru $(x/l) = 0$ și $\alpha = 25^\circ$ [37]
 Lienhart ($v_\infty = 40$ m/s), Strachan ($v_\infty = 25$ m/s), Huminic ($v_\infty = 25$ m/s),

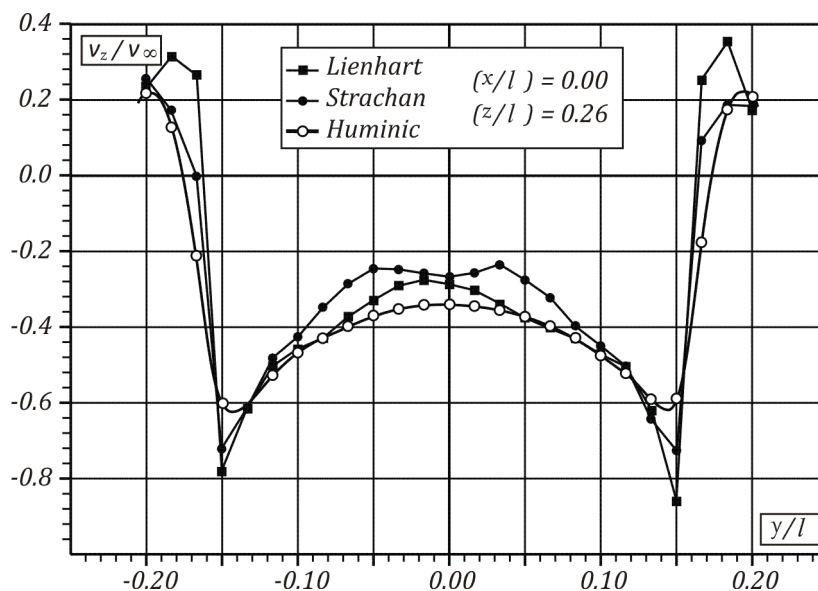


Fig. 1.33 – Variația v_z/v_∞ pe direcția (Oy) pentru $(x/l) = 0$, $(z/l) = 0.26$ și $\alpha = 25^\circ$ [37]
 Lienhart ($v_\infty = 40$ m/s), Strachan ($v_\infty = 25$ m/s), Huminic ($v_\infty = 25$ m/s),

Valorile coeficienților aerodinamici pentru configurația studiată, $\alpha = 35^\circ$, sunt prezentate separat în figura 1.34, comparativ cu cele furnizate de Stachan. Pentru acestea, abaterile (relative) calculate cu relația (1.42) sunt $\delta_{C_x} < 1\%$ și $\delta_{C_z} \cong 10\%$.

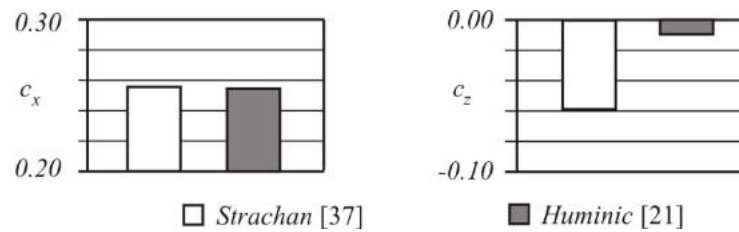


Fig. 1.34 – Valorile coeficienților aerodinamici C_x și C_z pentru $\alpha = 35$ și $v_\infty = 25$ m/s

$$\delta = \frac{C_{\text{experiment}} - C_{\text{CFD}}}{C_{\text{experiment}}} \cdot 100 [\%]. \quad (1.42)$$

Astfel, pe baza rezultatelor prezentate anterior se constată că programul soluționează cu acuratețe curgerea în jurul corpului studiat pentru grila generată și modelul numeric adoptat.

1.3.1.5 Rezultate și Concluzii.

În prima etapă a studiului a fost analizată influența geometriei difuzorului, lungimea (l_d) și unghiul difuzorului (α_d) fiind parametri variați sistematic în intervale cu valori relevante pentru un automobil în configurație hatchback.

În acest sens au fost studiate configurații cu lungimi ale difuzorului definite de rapoartele

$$(l_d/l) = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4,$$

unghiul difuzorului având valorile

$$\alpha_d = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$$

pentru fiecare dintre aceste lungimi.

În a doua etapă a fost analizată și influența secțiunii frontale pentru următoarele valori ale razei de curbură (figurile 1.24 și 1.25)

$$r_i = (0, 20, 40, 60, 80, 100) \text{ mm}.$$

La alegerea valorilor parametrilor studiați s-a ținut cont de concluziile formulate de Buchheim et al. [35] menționate anterior și de faptul că pentru mașinile de serie r_i și h_d sunt limitate constructiv de prezența unor elemente structurale precum barele de amortizare.

Pentru determinarea influenței geometriei inferioare modelată ca ajutor Venturi asupra caracteristicilor aerodinamice ale corpului generic de automobil au fost analizate rezultatele referitoare la variația coeficienților aerodinamici în configurațiile studiate precum și variația coeficientului de presiune în planul de simetrie al corpului. De asemenea, a fost studiat și aspectul curgerii în spațiul dintre geometria inferioară și calea de rulare, rezultatele fiind prezentate în figurile următoare.

După cum se poate observa, prezența difuzorului influențează semnificativ curgerea în jurul corpului datorită efectului Venturi generat de mișcarea aerului în spațiul delimitat de geometria inferioară și calea de rulare. Acest fenomen conduce la îmbunătățirea caracteristicilor aerodinamice prin creșterea forței de apăsare aerodinamică (forță de portanță negativă), figura 1.35 și scăderea rezistenței aerodinamice, figura 1.36.

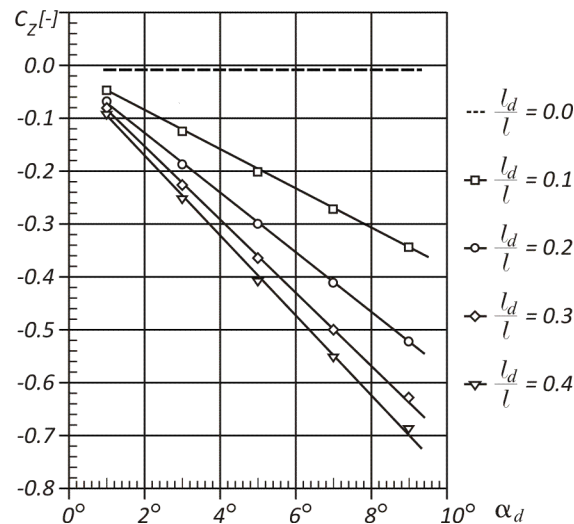


Fig. 1.35 – Variația coeficientului aerodinamic de portanță C_z pentru $\alpha = 35^\circ$ și $v_\infty = 40 \text{ m/s}$

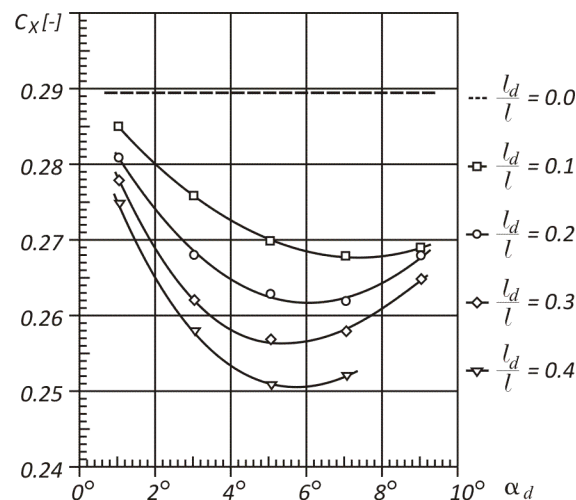


Fig. 1.36 – Variația coeficientului de rezistență aerodinamică C_x pentru $\alpha = 35^\circ$ și $v_\infty = 40 \text{ m/s}$

Astfel, din figura 1.35 se poate observa o descreștere continuă a coeficientului de portanță atât cu creșterea valorii unghiului difuzorului, variația fiind liniară, cât și cu creșterea lungimii difuzorului. Pentru configurațiile studiate valoarea minimă $C_z \cong -0.7$ a fost obținută când $\alpha_d = 9^\circ$ și $l_d = 0.4 l$.

Variația forței de rezistență aerodinamică cu unghiul difuzorului este curbilinie evidențiind o valoare minimă a $C_x = C_x(\alpha)$ pentru fiecare dintre lungimile l_d studiate. Din figura 1.36 se poate observa că descreșterea forței de rezistență aerodinamică are loc până la valori $\alpha_d \cong 6^\circ$. Pentru valori mai mari ale unghiului difuzorului, se constată că variația ΔC_x devine pozitivă datorită, marcând apariția fenomenului de desprindere a curentului de pe suprafața difuzorului.

Pentru $\alpha_d \cong 9^\circ$, variațiile coeficientului de rezistență aerodinamică devin nesemnificative în raport cu lungimea difuzorului, curgerea în acest caz fiind influențată semnificativ de

vârtejurile laterale generate de desprinderile curentului de aer de pe suprafață difuzorului, care cresc în dimensiune, după cum se poate observa din figura 1.37 pentru trei valori ale α_d corespunzătoare unei lungimi a difuzorului $l_d = 0.3 l$.

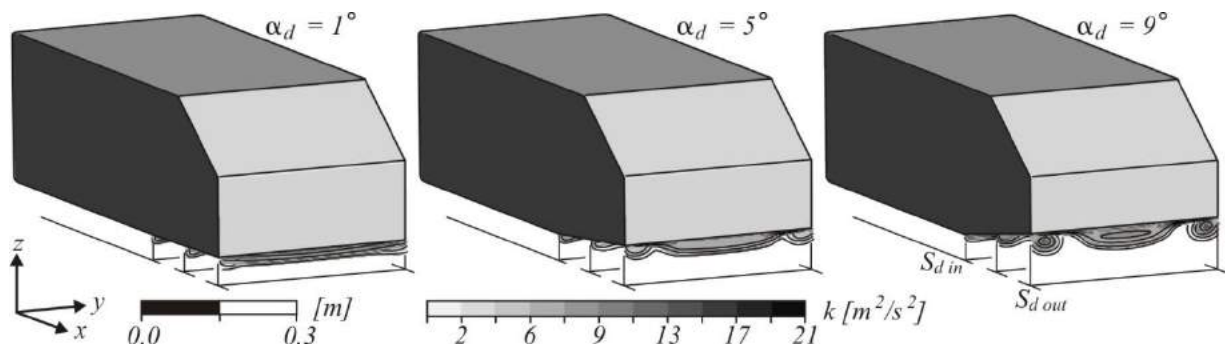


Fig. 1.37 – Evidențiere vârtejurilor laterale care se dezvoltă pe suprafața difuzorului, pentru $\alpha = 35^\circ$ și $v_\infty = 40 \text{ m/s}$ și $l_d = 0.3 l$.

Referitor la influența curburii secțiunii frontale nu au fost înregistrate variații semnificative ale forțelor aerodinamice. Valorile r_i determină modul în care evoluează presiunea pe suprafață inferioară, după cum se observă în figura 1.38, care prezintă variația coeficientului de presiune c_p în secțiunea corespunzătoare planului de simetrie. Linia punctată reprezintă cazul corpului Ahmed ($\alpha = 35^\circ$) utilizat ca referință și în validare.

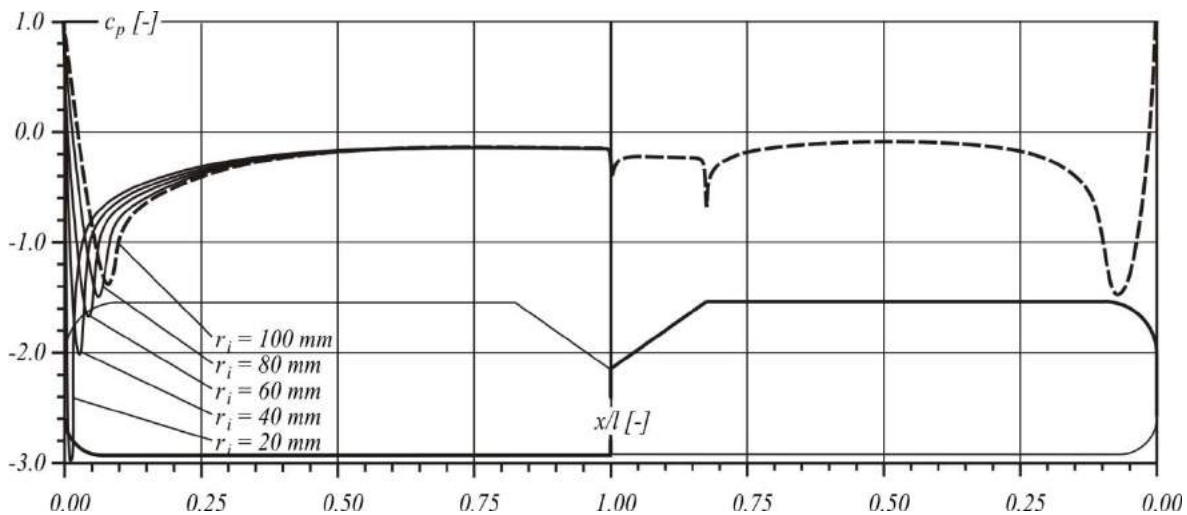


Fig. 1.38 – Variația coeficientului de presiune c_p în planul de simetrie pentru valorile r_i studiate.

Astfel, creșterea valorii r_i conduce la variații mai mici ale coeficientului de presiune în secțiunea frontală a corpului, relevând și viteze mai mici de intrare a curentului de aer în ajutorul Venturi delimitat de geometria inferioară și calea de rulare. Variațiile coeficientului de presiune sunt semnificative doar în secțiunea caracterizată de rapoarte $(x/l) < 0.25$. Așadar, geometria secțiunii frontale nu influențează semnificativ curgerea în jurul corpului.

Variații importante ale coeficientului de presiune pot fi observate datorită prezenței difuzorului, figura 1.39. Acestea pot oferi informații utile despre rolul difuzorului în mecanismul de generare a forțelor aerodinamice deportante.

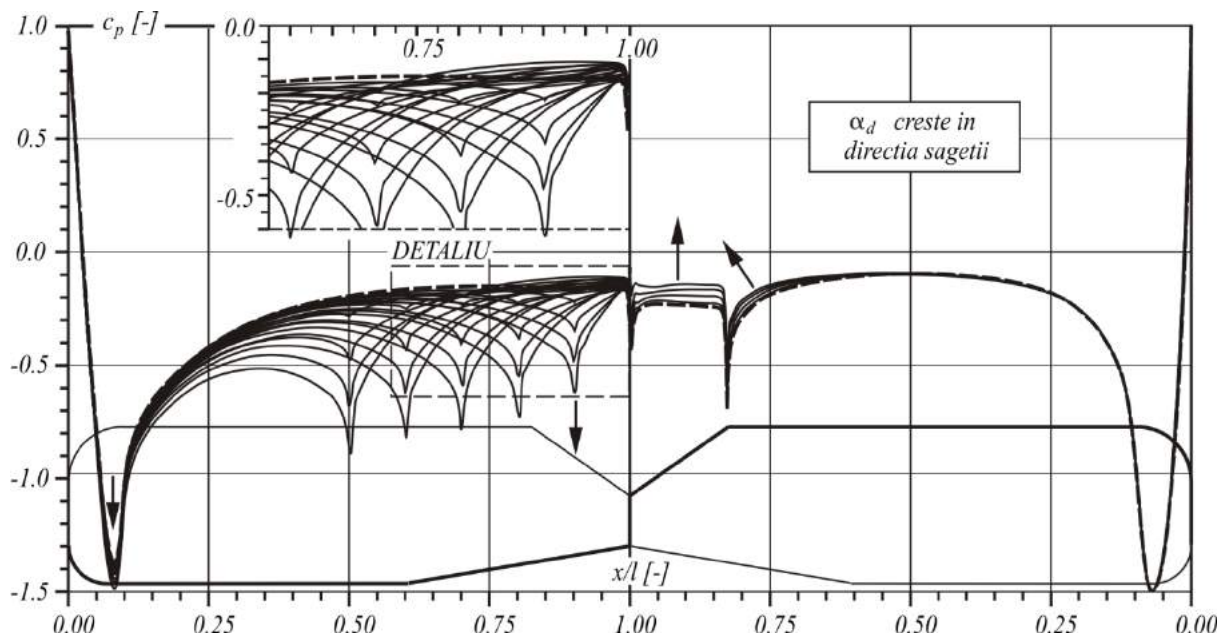


Fig. 1.39 – Variația coeficientului de presiune c_p în planul de simetrie în funcție de parametrii geometrici ai difuzorului.

Astfel, pornind din zona secțiunii frontale, unde valoarea coeficientului de presiune este apropiată de unitate (valoare caracteristică punctelor de stagnare), curentul de aer este accelerat în jurul suprafeței curbe inferioare, fenomen ce conduce la apariția unei zone depresionare al cărei punct de minim se află la începutul suprafeței plane din secțiunea mediană a corpului. Valoarea minimă a coeficientului de presiune din această zonă este direct proporțională cu lungimea difuzorului l_d și variază invers proporțional cu raza de curbură r_i .

Zona de accelerare a curentului este urmată de o decelerare a acestuia și de revenire a presiunii la valori apropiate de cea a atmosferei ($c_p \rightarrow 0$). Dacă în cazul corpului fără difuzor revenirea presiunii are loc continuu, într-o singură etapă precum în figura 1.38, în cazul corpului echipat cu difuzor revenirea se face în două etape, deoarece o nouă accelerare a curentului de aer are loc în zona intrării în difuzor, evidențiată de un nouă descreștere a coeficientului de presiune care atinge un alt minim, a cărui valoare scade odată cu creșterea lungimii difuzorului și cu creșterea unghiului difuzorului, semnificativ mai mult datorită α_d după cum se poate observa din figura 1.39.

Această nouă descreștere a presiunii în zona difuzorului conduce la creșterea forței deportante care acționează asupra corpului și la o scădere a rezistenței aerodinamice, care reprezintă principala îmbunătățire din punct de vedere aerodinamic în cazul unui automobil.

De asemenea, datorită faptului că variația rezistenței aerodinamice este una continuă pentru $\alpha_d < 7^\circ$, după cum se observă în figura 1.36, pot fi determinate relații de calcul a coeficienților de rezistență aerodinamică corespunzători secțiunii de intrare în ajutorul Venturi (ζ_i) și secțiunii difuzorului (ζ_d), după cum au fost definiți în subcapitolul 1.2.

Astfel, pentru calculul ζ_i a fost adoptată o relație similară cu (1.18), propusă de Idelcik [18 pag. 105] pentru calculul pierderilor de presiune datorită curgerilor cu variație a secțiunii de curgere

$$\zeta_i = C_i^r \left(1 - \frac{h}{h + r_i}\right)^m = C_i^r \left(1 - \frac{h}{1 + \frac{r_i}{h}}\right)^m, \quad (1.43)$$

unde C_i^r reprezintă un coeficient care cuantifică influența curburii secțiunii de intrare asupra valorii ζ_i ,

$$C_i^r = 0.5 \text{ dacă } r_i = 0 \text{ [18].}$$

O relație similară a fost adoptată și pentru calculul ζ_d , în acord cu concluziile formulate de Cooper et al. [30], care arată că variația presiunii la trecerea curenului de aer prin difuzor depinde de raportul dintre aria secțiunii de intrare și aria secțiunii de ieșire (gradul de divergență)

$$\zeta_d = C_d^\alpha \left(1 - \frac{h}{h_d}\right)^n, \quad (1.44)$$

unde C_d^α reprezintă un coeficient care cuantifică influența unghiului difuzorului asupra valorii ζ_d .

Valorile exponenților m și n depind de uniformitatea profilului de viteze a curenului de aer în secțiunea de intrare a elementului considerat. Conform [18], aceștia variază în intervalul (0.75, 1.0). Astfel

$$\begin{aligned} m, n &\cong 1.0 && \text{în cazul unui profil uniform al vitezelor,} \\ m, n &\cong 0.75 && \text{în cazul unui profil neuniform al vitezelor,} \end{aligned}$$

În prima etapă, valorile ζ_i și ζ_d au fost calculate cu ecuația (1.23) utilizând informațiile furnizate de analizele CFD referitoare la presiunea totală în secțiunile de intrare "in" și ieșire "out", evidențiate în figura 1.37 pentru cazul difuzorului.

Cunoscând ζ_i și ζ_d , au fost determinate apoi valorile coeficienților C_i^r și C_d^α în funcție de r_i , respectiv α_d , variațiile acestora fiind prezentate în figura 1.40. Ulterior, C_i^r și C_d^α au fost exprimați și analitic, utilizând funcții exponențiale

$$C_i^r = e^{[a_1 \cdot \lg(\frac{r_i}{h}) + b_1]}, \quad (1.45)$$

$$C_d^\alpha = e^{[a_2 \cdot \lg(\alpha_d) + b_2]}, \quad (1.46)$$

unde pentru coeficienții a_i , b_i au fost determinate următoarele valori

$$a_1 = -0.34, b_1 = -3.17, a_2 = -0.85 \text{ și } b_2 = -2.24.$$

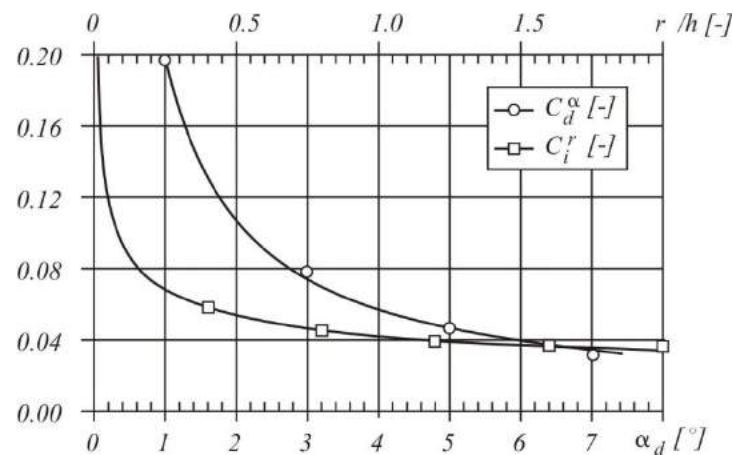


Fig. 1.40 – Variațiile $C_i^r = C_i^r(r/h)$ și $C_d^\alpha = C_d^\alpha(\alpha)$

Astfel, coeficienții de rezistență aerodinamică corespunzători secțiunii de intrare (ζ_i) și difuzorului (ζ_d) pot fi determinați analitic în funcție de caracteristicile geometrice.

În figura 1.41 este prezentată variația tridimensională $\zeta_d = \zeta_d(\alpha_d, h/h_d)$ pentru cazul unui profil neuniform al vitezelor în secțiunile de intrare ($m, n = 0.75$).

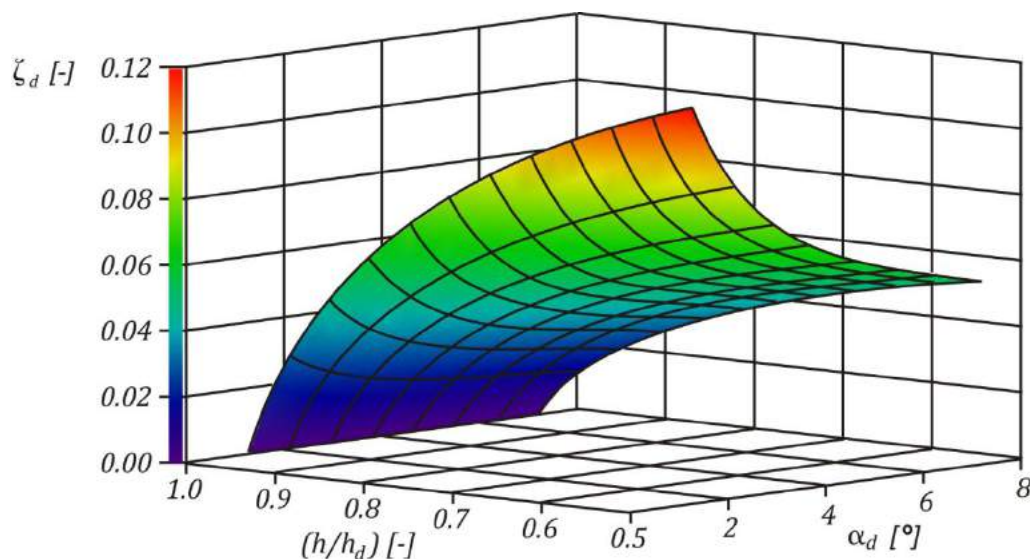


Fig. 1.41 – Variația 3D pentru $\zeta_d = \zeta_d(\alpha_d, h/h_d)$

Distribuția abaterilor rezultatelor analitice față de cele obținute din analizele CFD sunt prezentate în figura 1.42

După cum se observă pentru cazurile studiate, abaterile dintre rezultatelor analitice ($X_{analytic}$) față de cele obținute din analizele CFD (X_{CFD}) sunt foarte mici, media ponderată a acestora fiind

$$\frac{N(X_{CFD} - X_{analytic})}{\sum X} = 0.00115. \quad (1.47)$$

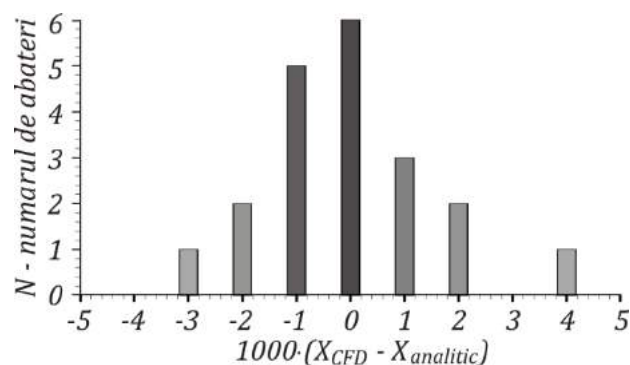


Fig. 1.42 – Abaterile rezultatelor analitice față de cele obținute din analizele CFD

Evaluarea analitică a coeficienților de rezistență aerodinamică prezentați anterior permite stabilirea contribuției fiecărei componente a unui automobil la rezistența aerodinamică rezultantă înainte ca un model fizic să fie realizat și testat, contribuind astfel la accelerarea procesului de definire optimă a caroseriei din punct de vedere aerodinamic.

Acest studiu a fost completat cu unul referitor la influența roților asupra curgerii prin difuzor, după cum este prezentat în paragraful 1.4.2.

1.4 Influența roților asupra caracteristicilor aerodinamice în studiile de aerodinamica automobilelor

1.4.1 Efectul Magnus în aerodinamica automobilelor

Important în studiul aerodinamic al roților în mișcare este apariția *efectului Magnus*, concretizat prin modificarea aspectului curgerii în jurul roții și implicit a distribuției de presiuni pe aceasta, față de situația în care roata e fixă, după cum este prezentat în figura 1.43 [49].

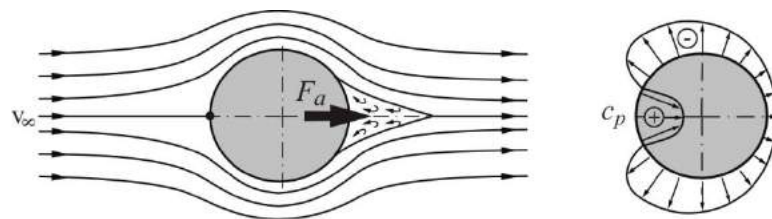


Fig. 1.43 - Aspectul curgerii și distribuția de presiuni în cazul roții fixe

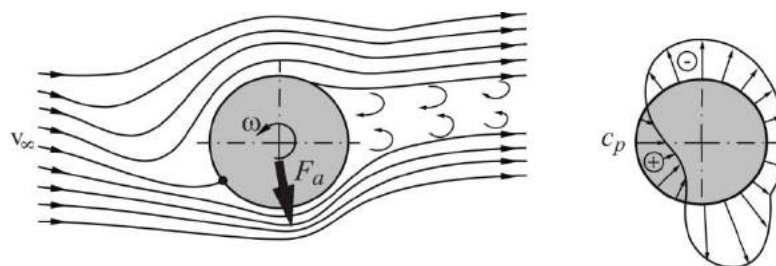


Fig. 1.44 - Aspectul curgerii și distribuția de presiuni în cazul rotației roții cu viteza unghiulară ω

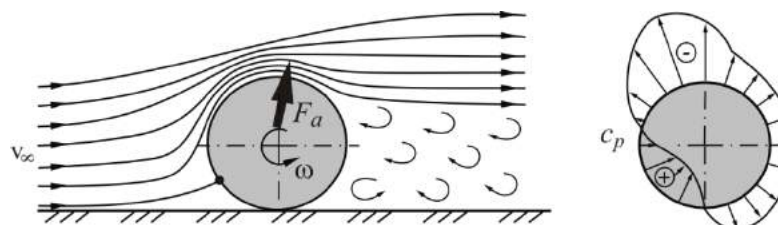


Fig. 1.45 - Aspectul curgerii și distribuția de presiuni în cazul rotației roții cu viteza unghiulară ω în prezența solului

Acest fapt duce la apariția unei componente verticale (forță deportantă) a forței aerodinamice globale, după cum se poate observa și în figura 1.44. Situația se schimbă în prezența solului, componenta verticală schimbându-și orientarea, devenind pozitivă, situație prezentată în figura 1.45.

În figura 1.46 este prezentat modul în care prezența solului influențează valoarea componentei verticale a forței aerodinamice ce acționează asupra roții [49].

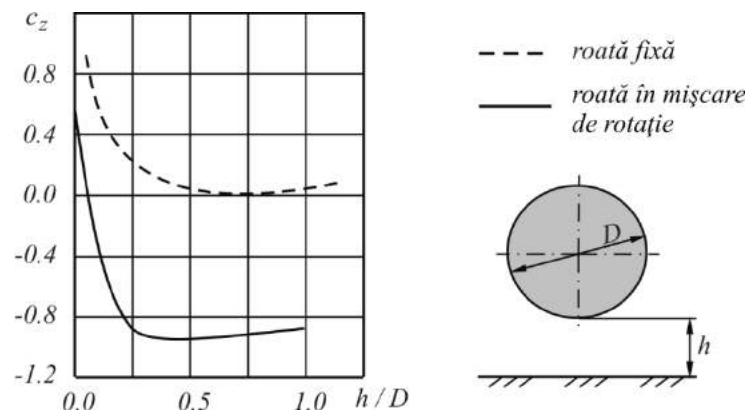


Fig. 1.46 - Influența solului asupra componentei verticale a forței aerodinamice ce acționează asupra roții

Evident, efectul Magnus este diminuat dacă roțile sunt carosate, precum în cazul majorității automobilelor de serie, datorită limitării suprafeței de interacțiune dintre acestea și curentul de aer neperturbat. În figura 1.47 sunt prezentate variațiile coeficienților aerodinamici ai roții pentru această situație, precum și influența lățimii roții asupra coeficientului de rezistență aerodinamică.

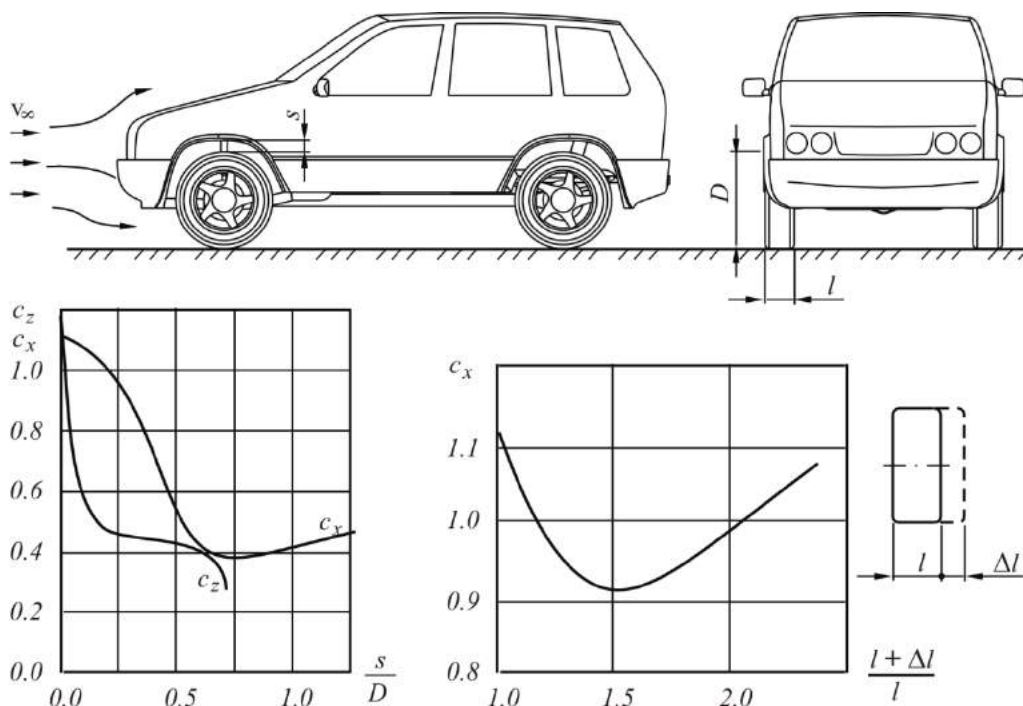


Fig. 1.47 - Influența geometriei carenajului asupra caracteristicilor aerodinamice ale roții

Legat de acest fenomen, printre primele semnalări ale unor studii CFD care au considerat și mișcarea de rotație a roților sunt și cele proprii [50, 51], pentru care punctul de plecare l-a constituit studiul "Ground Effect Simulation for Full-Scale Cars in the Pininfarina Wind Tunnel"

realizat de inginerii de la Pininfarina Industries [52]. Aceștia au construit un dispozitiv cu banda rulanta cu suprafata de $(1 \times 3.8) m^2$ cu ajutorul căruia au testat modelul unei mașini la scările 1:5 și 1:3, iar în final mașina în mărime naturală, cu și fără efect de sol. Referitor la testele efectuate pe modele la scară studiul a raportat variații mai mari ale coeficientului de rezistență aerodinamică pentru modelul la scara 1:3, figura 1.48. Variațiile coeficientului de portanță au fost comparabile pentru ambele modele.

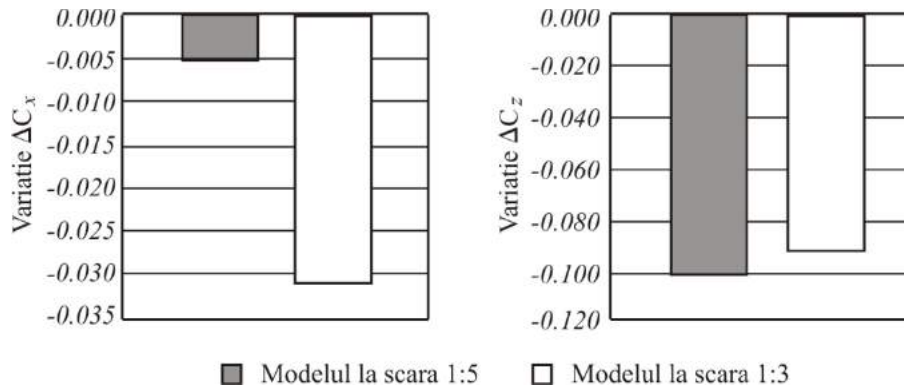


Fig. 1.48 - Rezultate experimentale referitoare la studiul influenței mișcării roților[52],

Deoarece raportul dintre dimensiunile benzii și cele ale mașinii este mai favorabil (mai mare) pentru modelul la scara 1:5, variații mai mari erau de așteptat în cazul acestuia. O explicație pentru rezultatele raportate este că la reproducerea efectului de sol în medii controlate, precum în tunelele aerodinamice, mișcarea de rotație a roților are un rol determinant datorită vârtejurilor pe care le provoacă.

În paragrafele următoare sunt prezentate rezultatele studiilor proprii referitoare la influența roților asupra caracteristicilor aerodinamice ale automobilelor. Sunt analizate trei situații:

- corpul generic de automobil studiat anterior, pentru care a fost luată în considerare și prezența roților (§ 1.4.2),
- automobil cu roți carosate (§ 1.4.3).
- automobil (de viteză) cu roți necarosate, expuse curentului de aer (§ 1.4.4).

1.4.2 Studiul Aerodinamic al unui corp generic de automobil pe roți având geometria inferioară modelată ca ajutoraj Venturi

Studiul corpul generic de automobil prezentat în paragraful 1.3.1 a fost completat și pentru situațiile în care acesta este considerat pe roți. Deoarece domeniul de analiză și grilele generate, precum și modelul de calcul utilizat și condițiile de referință au fost similare, în cele ce urmează sunt prezentate doar informațiile referitoare la modificările efectuate și rezultatele obținute.

de rulare, precum în studiul prezentat anterior. De asemenea, au fost considerate aceleași dimensiuni pentru domeniului de analiză.

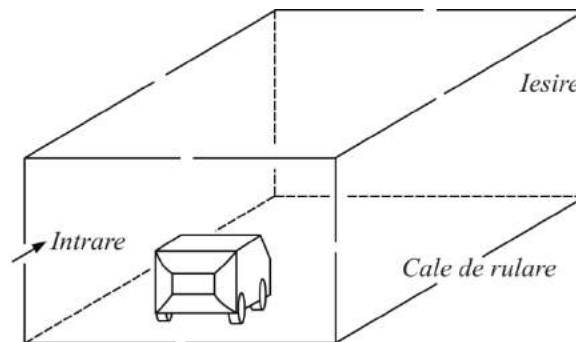


Fig. 1.50 - Corpul generic de automobil Ahmed echipat cu roți, vedere axonometrică din față

1.4.2.2 Grila de discretizare și condiții la limită

Discretizarea domeniului de calcul a fost efectuată precum în studiul anterior pentru îndeplinirea criteriului $30 \leq y^+ \leq 100$. Pentru întreg domeniul de analiză, grilele de discretizare generate au avut un număr de noduri mai mare decât

- 2.600.000 noduri pentru întreg domeniul de calcul, dintre care
- 90.000 noduri pe suprafețele corpului studiat, dintre care
- 40.000 noduri pe suprafețele roților.

Condițiile pe frontierele domeniului au fost impuse, de asemenea, în acord cu experimentele efectuate de Strachan et al. [37], considerând și mișcarea de rotație a roților cu viteza unghiulară ω_r , precum în figura 1.51

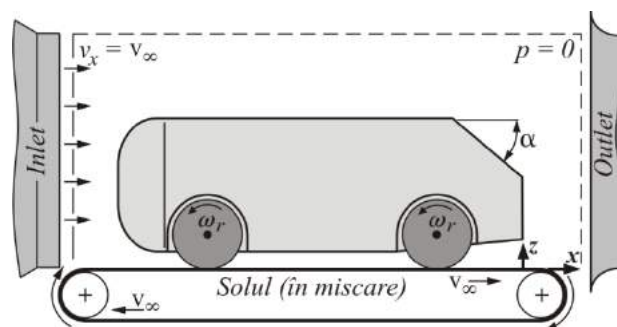


Fig. 1.51 – Condițiile la limită pentru corpul pe roți

- o viteză uniformă $v_x = v_\infty$ (viteza de referință a curentului) și $v_y = v_z = 0$ pe suprafața ce definește intrarea fluidului în domeniul de calcul (*inlet*),
- viteza unghiulară $\omega_r = (2v_\infty/d_r)$ pentru suprafețele ce definesc roțile, în sisteme de referință cu originea în axele acestora,

- $v_x = v_\infty$ și $v_y = v_z = 0$ pe suprafața ce definește solul (calea de rulare), modelată ca suprafață solidă în mișcare (*solid moving wall*), pentru a simula mișcarea relativă dintre corp și sol,
- suprapresiune nulă ($p = 0$) pe suprafața ce definește ieșirea fluidului din domeniul de analiză (*outlet*), în raport cu presiunea de referință p_∞ ,
- $v_x = v_y = v_z = 0$ pe suprafețele ce definesc corpul studiat (*no slip conditions*),
- pentru restul suprafețelor au fost considerate condiții specifice frontierelor fluide (*free slip conditions*).

Condițiile de simulare au fost cele corespunzătoare atmosferei standard: $p_\infty = 101325 \text{ Pa}$ (presiunea atmosferică) și $t_\infty = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_\infty = 288.15 \text{ K}$, temperatura atmosferică) pentru care densitatea și vâscozitatea au valorile $\rho_\infty = 1.225 \text{ kg/m}^3$, respectiv $\mu_\infty = 1.785 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m s)}$.

Viteza de referință a curentului de aer a fost impusă precum în studiul efectuat de Ahmed et al. [28], $v_\infty = 40 \text{ m/s}$, care corespunde unei valori a numărului Reynolds $Re = 2.63 \cdot 10^6$, calculat în funcție de lungimea de corpului ($l = 1.044 \text{ m}$). Gradul de turbulență impus a fost $T = 0.2\%$, precum în studiul efectuat de Strachan et al. [37].

Pentru închiderea sistemului de ecuații RANS (1.28) a fost utilizat și în acest caz modelul de turbulență *Shear-Stress-Transport (SST)*, Menter [42].

1.4.2.3 Rezultate și Concluzii.

Influența roților și a pasajelor acestora asupra performanțelor difuzorului anterior studiat a fost analizată în următoarele configurații

- $\alpha_d = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$ pentru $(l_d/l) = 0.1, 0.2$,
- $\alpha_d = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ și $(l_d/l) = 0.3$,
- $\alpha_d = 1^\circ, 3^\circ$ și $(l_d/l) = 0.4$,

acestea fiind stabilite astfel încât să nu existe interferențe între suprafața difuzorului și axa roților de pe puntea spate.

Rezultatele obținute sunt prezentate grafic ca variații ale coeficienților de portanță (C_z) și rezistență aerodinamică (C_x)

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2} A}, \quad C_x = \frac{F_x}{\frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2} A},$$

unde pentru aria de referință au fost considerate următoarele valori

- $A = 112\,032.000 \text{ mm}^2$ pentru corpul Ahmed fără roți,
- $A = 117\,022.365 \text{ mm}^2$ pentru corpul Ahmed pe roți.

Astfel, în figura 1.52 sunt prezentate comparativ (corp fără roți și corp pe roți) rezultatele referitoare la variația coeficientului de portanță, iar în figura 1.53 rezultatele obținute pentru variațiile coeficientului de rezistență aerodinamică.

Curbele de variație indică faptul că prezența roților conduce la modificări semnificative ale caracteristicilor aerodinamice pentru corpul studiat.

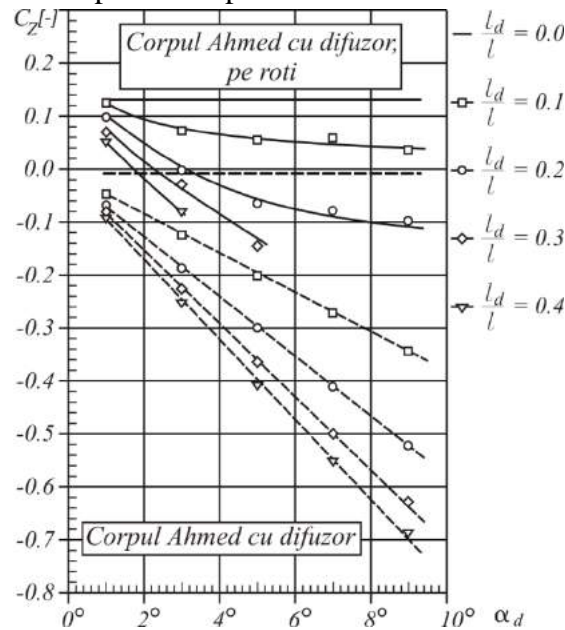


Fig. 1.52 – Variația coeficientului aerodinamic de portanță C_z pentru $\alpha = 35^\circ$ și $v_\infty = 40 \text{ m/s}$

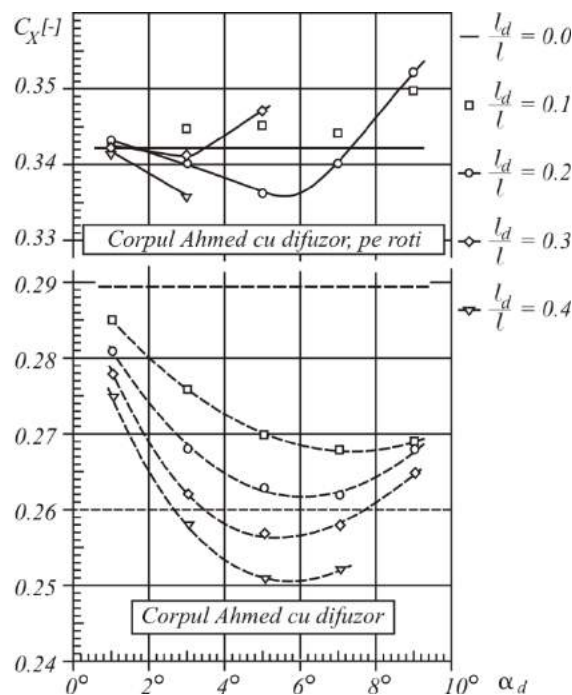


Fig. 1.53 – Variația coeficientului de rezistență aerodinamică C_x pentru $\alpha = 35^\circ$ și $v_\infty = 40 \text{ m/s}$

După cum a fost menționat și în studiile anterioare [26, 53, 54], prezența roților conduce la creșteri importante ale coeficienților aerodinamici datorită alterării curgerii pe suprafețele laterale și inferioară ale corpului, evidențiată de valori mici ale presiunii totale care indică prezența unor vârtejuri, după cum se observă în figura 1.54.

Pentru ambele situații studiate, corp fără roți și corp pe roți, portanța descrește odată cu creșterea lungimii și unghiului difuzorului. După cum a fost prezentat și anterior, în cazul corpului fără roți portanța are doar valori negative, descreșterea fiind liniară datorită apariției și dezvoltării vârtejurilor induse în lateralele difuzorului de absorția curentului de aer dinspre suprafețele laterale în interiorul difuzorului, după cum au fost descrise în [21].

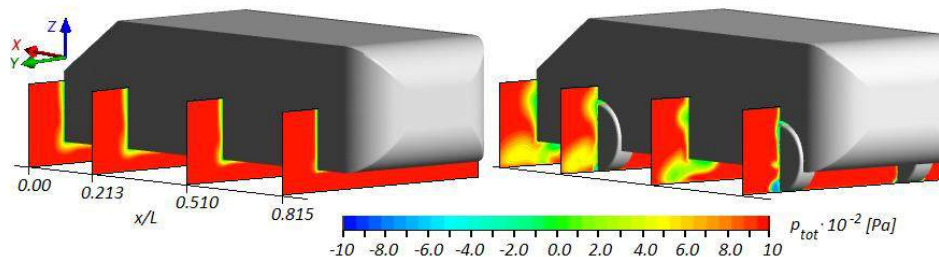


Fig. 1.54 - Variația presiunii totale în jurul corpului fără roți (stânga) și a corpului pe roți (dreapta)

Variația portanței corpului pe roți este una curbilinie datorită interferențelor dintre vârtejurile anterior menționate și cele generate de prezența roților, după cum este evidențiat în figurile 1.55 și 1.56, care prezintă vârtejurile induse de roți, precum și variația presiunii totale în planul transversal de capăt al corpului (yOz) pentru care $x = 0$. Descreșterea portanței scade odată cu creșterea unghiului difuzorului. De asemenea, în cazul corpului pe roți, fără difuzor, portanța generată este pozitivă, această situație fiind specifică și difuzoarelor caracterizate de valori relativ mici ale unghiului α_d și lungimii l_d . Portanța corpului pe roți devine negativă pentru cazurile $(l_d/l) \geq 0.2$ și $\alpha_d \geq 2^\circ$.

După cum a fost relevat și de studiile anterioare, descreșterea portanței este însoțită și de o micșorare a rezistenței aerodinamice datorită efectului Venturi generat la curgerea aerului prin spațiul determinat de geometria inferioară și calea de rulare. Scăderea rezistenței aerodinamice are loc pentru valori moderate ale unghiului difuzorului, $\alpha_d \cong 4^\circ$. Pentru valori mai mari ale acestui unghi, variația rezistenței aerodinamice devine pozitivă, evidențiindu-se astfel posibilitatea obținerii unei valori minime a rezistenței aerodinamice.

Pentru situațiile analizate, variațiile înregistrate pentru coeficienții aerodinamici datorită prezenței roților au avut loc în intervalele $\Delta C_x = (0.037, 0.068)$ și $\Delta C_z = (0.137, 0.385)$, valorile medii fiind $(\Delta C_x)_m = 0.058$, respectiv $(\Delta C_z)_m = 0.243$, unde

$$\Delta C_{x,z} = (C_{x,z})_{cu\ roti} - (C_{x,z})_{fara\ roti} \quad (1.48)$$

Structurile de vârtej pot fi evidențiate și prin analiza celui de-al doilea invariant al tensorului gradientului vitezei, Q , după cum prezintă Jeong și Hussain [55]. Pentru fluide incompresibile

$$Q = \frac{1}{2}(W_{ij} W_{ij} - S_{ij} S_{ij}) \left[\frac{1}{s^2} \right], \quad (1.49)$$

unde S_{ij} și W_{ij} reprezintă partea simetrică, respectiv antisimetrică ale tensorului gradientului vitezei

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \text{ și } W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (1.50)$$

Conform acestui criteriu, vârtejurile corespund zonelor pentru care $Q > 0$, după cum este prezentat în figura 1.55 pentru situațiile studiate, corp fără roți și corp cu roțifără difuzor, $\alpha_d = 0^\circ$, $Q = 4 \cdot 10^4 \text{ [s}^{-2}\text{]}$ și de asemenea în figura 1.56 (dreapta).

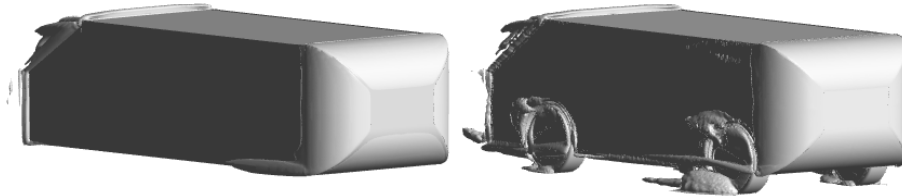


Fig. 1.55 - Izosuprafețele celui de-al doilea invariant al tensorului gradientului vitezei, $\alpha_d = 0^\circ$, $Q = 4 \cdot 10^4 \text{ [s}^{-2}\text{]}$

Vârtejurile generate de roți și pasajele acestora au fost prezentate detaliat în studiul efectat de Regert și Lajos [26], care arată că șase dintre aceste vârtejuri sunt independente de geometria roții și pasajului, principalul efect al acestora fiind deflectarea curentului de aer care curge pe sub vehicul înspre suprafețele laterale ale corpului.

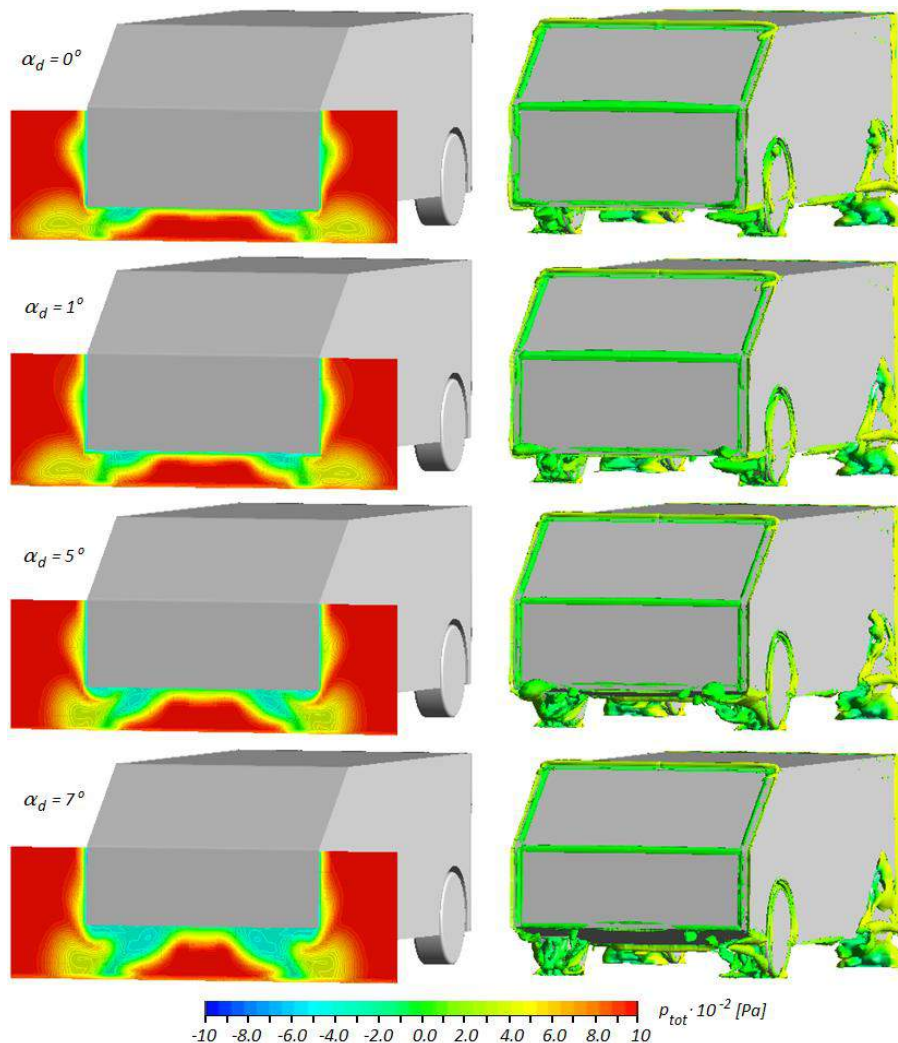


Fig. 1.56 - *Variația presiunii totale în planul de capăt și izosuprafețele celui de-al doilea invariant al tensorului gradientului vitezei, $Q = 4 \cdot 10^4 [s^{-2}]$, $(l_d/l) = 0.2$*

În cele ce urmează sunt prezentate rezultatele proprii bazate pe analiza izosuprafețelor celui de-al doilea invariant al tensorului gradientului vitezei, presiunea totală și aspectul liniilor de curent în trena de vârtejuri a corpului. Variațiile presiunii totale și ale Q datorită creșterii unghiului difuzorului sunt prezentate în figura 1.56. De asemenea, prin analiza aspectului liniilor de curent, figura 1.57 este relevat și fenomenul care conduce la variația coeficientului de rezistență aerodinamică datorită modificării α_d .

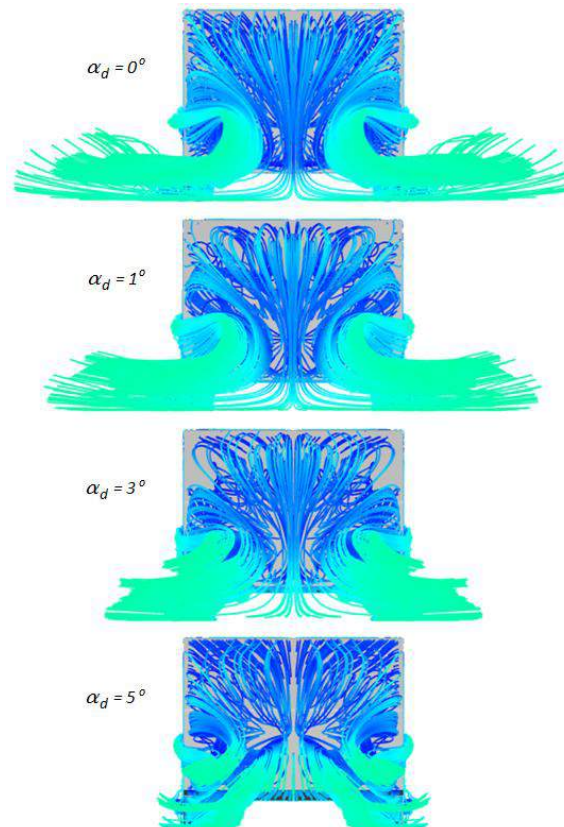


Fig. 1.57 - *Aspectul liniilor de curent, $(l_d/l) = 0.2$, vedere din spate*

Astfel, la valori mici ale unghiului difuzorului se observă că vârtejurile care ies din pasajele roților spate și se dezvoltă pe suprafețele laterale sunt deflectate înspre sol datorită presiunii scăzute de sub geometria inferioară, amplitudinea trena de vârtejuri fiind semnificativ mare și de asemenea și valoarea coeficientului de rezistență aerodinamică. Odată cu creșterea valorii unghiului difuzorului și a depresiunii din interiorul acestuia, amplitudinea trena de vârtejuri se micșorează, conducând astfel și la o scădere a C_x , acest trend continuînd până la valori $\alpha_d \cong 5^\circ$ când se obțin valori minime ale rezistenței aerodinamice. Pentru valori mai mari ale unghiului difuzorului, vârtejurile care ies din pasajele roților interferează cu cele induse în lateralele difuzorului, fapt ce conduce la creșterea intensității acestora. Apare fenomenul de desprindere a curentului de aer de pe suprafața difuzorului iar rezistența aerodinamică începe să crească, fapt relevat și de alte studii în domeniu [56], după cum este prezentat în figura 1.58.

Cele mai favorabile dintre situațiile analizate corespund următoarelor valori ale parametrilor difuzorului: $\alpha_d = 5^\circ$, $(l_d/l) = 0.2$ și $\alpha_d = 3^\circ$, $(l_d/l) = 0.4$, pentru care raportul $((h_d - h)/h) \cong 0.4$.

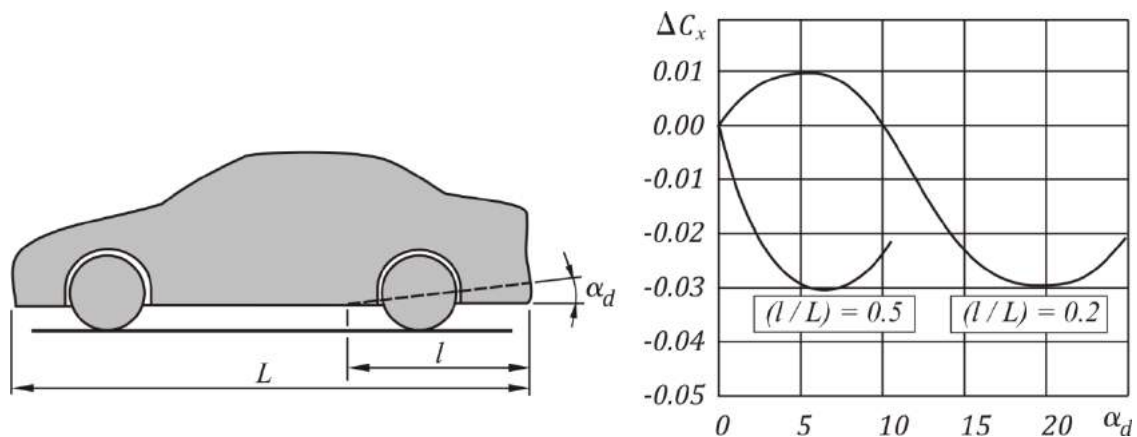


Fig. 1.58 – Variația coeficientului de rezistență aerodinamică ΔC_x în funcție de unghiul difuzorului α_d [56]

O excepție este reprezentată de cazul difuzorului scurt, $(l_d/l) = 0.1$, pentru care rezistența aerodinamică crește continuu pentru toate valorile α_d . De asemenea, pentru aceste difuzoare, scăderea portanței este relativ mică, astfel încât utilizarea unor difuzoare scurte are o relevanță redusă din punct de vedere aerodinamic, situație semnalată și de Heisler H. [56], figura anterioară pentru modelul unui automobil real.

1.4.3 Studiul interacțiunii aerodinamice automobil – cale de rulare pentru modele reale de automobile

Pentru acest studiu au fost alese două automobile, unul din clasa (reprezentativă) SUV (Sport Utility Vehicle), prezentat în figura 1.59 [1, 47, 57] și un automobil de viteză, cu roțile expuse în întregime acțiunii curentului de aer [58, 59], prezentat în figura 1.60, pentru studiul influenței mișcării de rotație al roților.

Domeniile de analiză și grilele generate, precum și modelul de calcul utilizat și condițiile de referință au fost similare precum în studiile prezentate anterior. În paragrafele următoare sunt prezentate principalele informații referitoare la analizele efectuate și rezultatele obținute.

1.4.3.1 Modelele CAD.

Modelele geometrice ale automobilelor au fost realizate utilizând facilitățile unui soft CAD de specialitate, respectiv Pro/Engineer. Pentru obținerea unor rezultate corecte din punctul de vedere al curgerii aerului în jurul mașinilor, acestea au fost atent modelate. Astfel, detaliile suprafețelor exterioare ale caroseriilor au fost reproduse cât mai exact posibil (și necesar), singura excepție majoră fiind faptul că grila radiatorului este închisă în cazul automobilului de serie, curgerea interioară prin compartimentul motorului fiind neglijată.

Pentru geometria modelului SUV au fost considerate și detalii legate de elementele structurii inferioare ale mașinii, precum scutul motor, elemente de rezistență ale platformei (lonjeroane), punți cu suspensii, elemente ale sistemului de transmisie și sistemului de evacuare a gazelor arse, după cum sunt prezentate în figurile 1.77 și 1.78.

În cazul automobilului de competiție a fost modelată și casca pilotului, expusă acțiunii curentului de aer. Alte detalii referitoare la componentele considerate sunt prezentate și în figura 1.72.

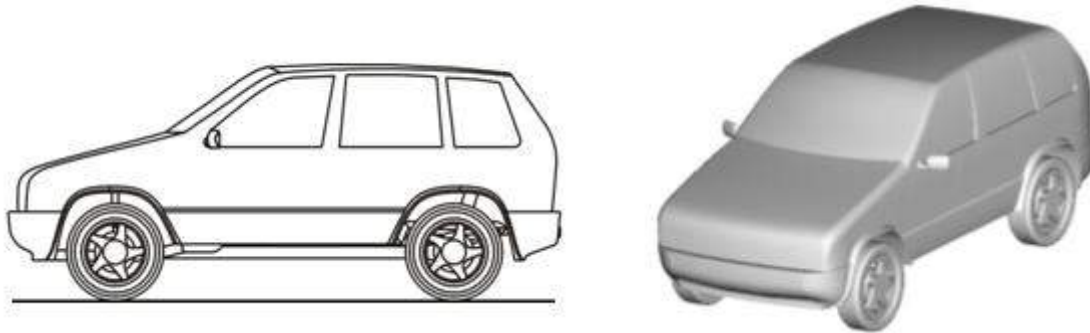


Fig. 1.59 - Modelul geometric al automobilului SUV

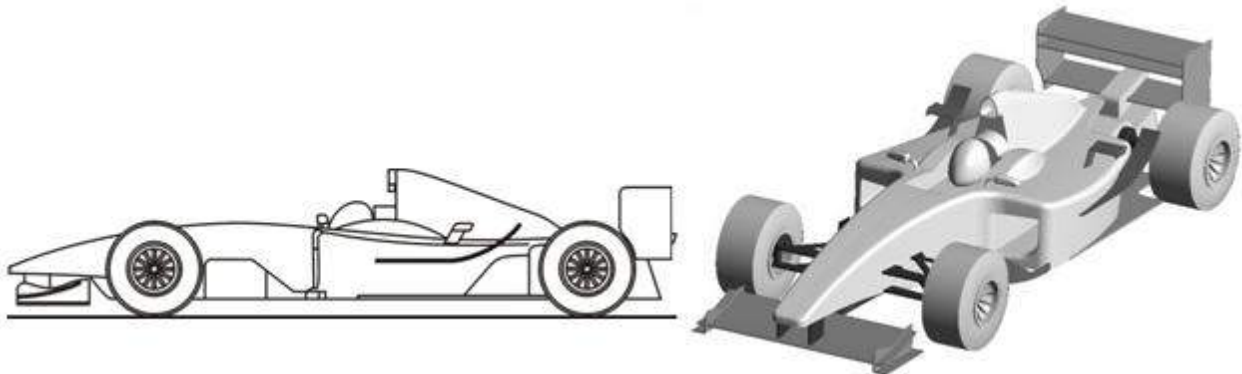


Fig. 1.60 - Modelul geometric al automobilului de viteză

Modelele geometrice au fost exportate în mediul FEA ANSYS ca fișier IGES și discretizate utilizând o schemă mixtă, cu grilă structurată pe suprafețe caroseriilor și pe suprafața ce definește solul, pentru o definiție cât mai bună a zonei de strat limită. Raportat la dimensiunea de referință a modelului studiat (lungimea L), dimensiunile domeniilor de analiză de forme paralelipipedice (vezi figura 1.61 în cazul automobilului de viteză) sunt:

- $2L$ în fața modelului (după direcția axei Ox) și pe verticală (după direcția axei Oz),
- $5L$ în spatele modelului (după direcția axei Ox),
- $2.5L$ în lateral (după direcția axei Oy).

Corespunzător acestor dimensiuni, rapoartele de blocaj pentru care au fost efectuate studiile a fost sub 3.0%.

1.4.3.2 Grilele de discretizare și condițiile la limită impuse.

Pentru a mări densitatea punctelor de calcul pe caroseria automobilului s-a optat pentru utilizarea unei grile multibloc. Mărimea elementelor (tetraedale) de discretizare pentru suprafețele ce definesc automobilul a fost în intervalul (0.002 - 0.02) raportată la unitatea de lungime (m), similară și altor studii efectuate anterior.

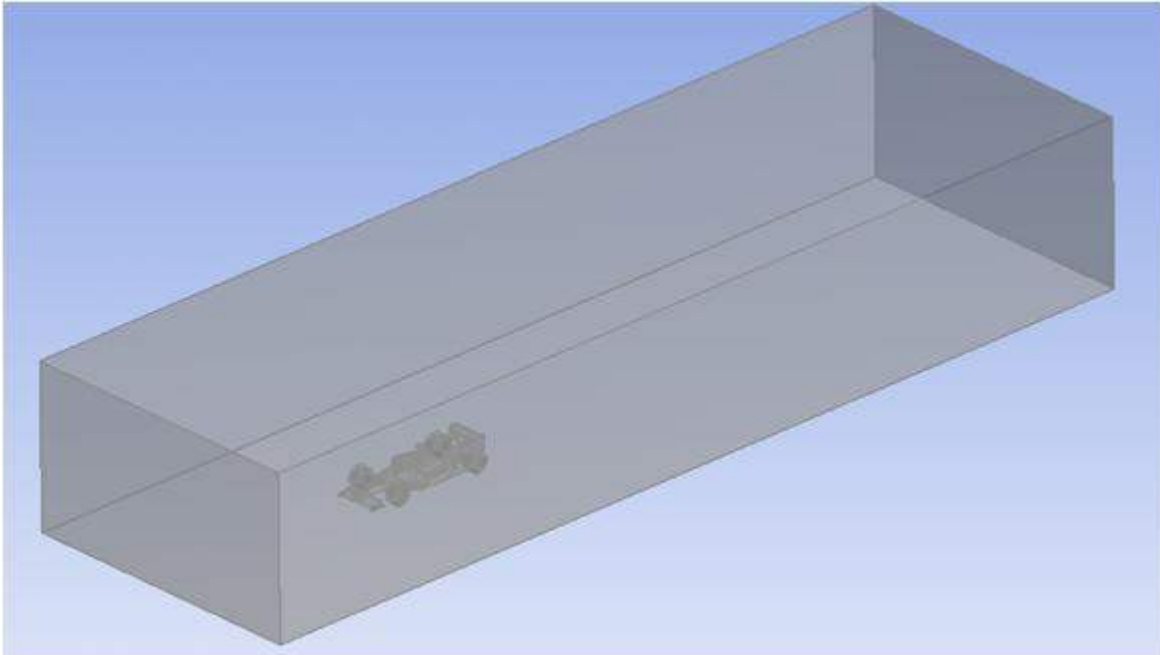


Fig. 1.61 - Dimensiunile domeniului de analiză pentru automobilul de viteză

În urma procesului de discretizare pentru $\frac{1}{2}$ din domeniile de calcul, dimensiunile celor două grile au fost:

- pentru automobilul de viteză
 - 1.666.975 puncte de calcul pe întreg domeniul, dintre care
 - 188.683 puncte de calcul pe suprafețele automobilului, dintre care
 - 54.751 puncte de calcul pe suprafețele roților.
- pentru automobilul de serie:
 - 1.396.828 puncte de calcul pe întreg domeniul, dintre care
 - 155.507 puncte de calcul pe suprafețele automobilului, dintre care
 - 57.279 puncte de calcul pe suprafețele roților.

Pentru a evidenția influența mișcării roților, au fost efectuate simulări pentru trei situații, după cum urmează:

- Analize considerând solul și roțile fixe, precum în cazul unor teste uzuale în tunele aerodinamice, situație prezentată în figura 1.62.
- Analize considerând mișcare relativă dintre sol și automobil, dar cu roți fixe, după cum este prezentat schematic în figura 1.62 în cazul testelor în suflerie utilizând un dispozitiv cu bandă rulantă.

- Analiza considerând mișcarea relativă dintre sol și automobil și cu roți în mișcare de rotație, precum în figura 1.51.

Condițiile pe frontierele domeniilor analizate s-au impus corespunzător analizelor efectuate, după cum au fost prezentate și în paragrafele anterioare.

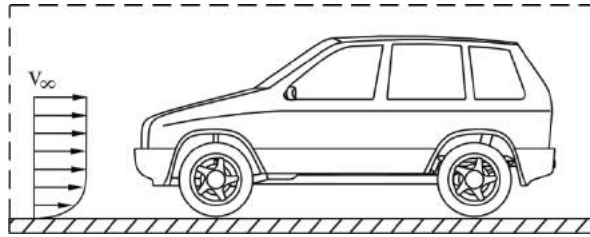


Fig. 1.62 – Simulare fără reproducerea efectului de sol (cale de rulare fixă)

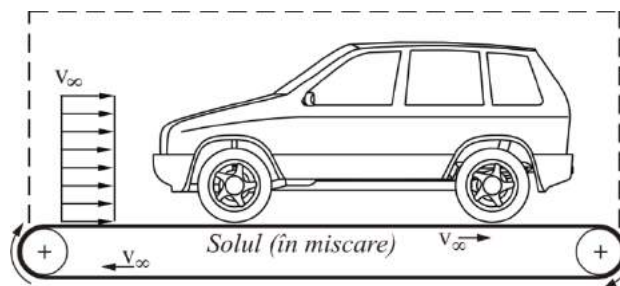


Fig. 1.63 – Simulare cu reproducerea efectului de sol utilizând un dispozitiv cu bandă rulantă

De asemenea, simulările au fost efectuate în condiții de curgere permanentă, adiabatică, fără variația densității și vâscozității aerului atmosferic, considerat la temperatura și presiunea corespunzătoare atmosferei standard, $T_{aer} = 288 \text{ K}$ ($t_{aer} = 15 \text{ °C}$), respectiv $p_{aer} = 101325 \text{ N/m}^2$. Pentru a obține o imagine concludentă a fenomenelor investigate, acest studiu a fost efectuat pentru șase numere Reynolds, după cum urmează:

- Pentru automobilul de serie: $Re_1 = 2.302 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 1} = 30 \text{ km/h}$), $Re_2 = 4.605 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 2} = 60 \text{ km/h}$), $Re_3 = 6.908 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 3} = 90 \text{ km/h}$), $Re_4 = 9.212 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 4} = 120 \text{ km/h}$), $Re_5 = 11.515 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 5} = 150 \text{ km/h}$) și $Re_6 = 13.818 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 6} = 180 \text{ km/h}$).
- Pentru automobilul de competiție: $Re_1 = 4.300 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 1} = 50 \text{ km/h}$), $Re_2 = 8.585 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 2} = 100 \text{ km/h}$), $Re_3 = 12.880 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 3} = 150 \text{ km/h}$), $Re_4 = 17.170 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 4} = 200 \text{ km/h}$), $Re_5 = 21.880 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 5} = 250 \text{ km/h}$) și $Re_6 = 25.755 \cdot 10^6$ ($v_{\infty 6} = 300 \text{ km/h}$).

Pentru închiderea sistemului de ecuații RANS (1.28) a fost utilizat și în acest caz modelul de turbulență *Shear-Stress-Transport (SST)*, Menter [42], acesta asigurând o convergență bună a soluțiilor.

1.4.3.3 Rezultate și Concluzii

Pentru aceste studii, analizele s-au considerat finalizate când valorile normele reziduale de convergență au scăzut cu cel puțin trei ordine de mărime, iar variația lor a devenit ne semnificativă pe parcursul ultimilor iterații. De asemenea, s-a mai avut în vedere ca

- variațiile rezultatelor intermediare să fie mai mici decât 0.5%, pe parcursul ultimilor iterații, atât pentru rezistența aerodinamică (F_x), cât și în cazul forței de portanță (F_z)

$$\Delta F_{x(i)} = 100 \frac{F_{x(i)} - F_{x(i-1)}}{F_{x(i-1)}} < 0.5\%, \quad \Delta F_{z(i)} = 100 \frac{F_{z(i)} - F_{z(i-1)}}{F_{z(i-1)}} < 0.5\%,$$

- distribuția mărimilor ce caracterizează procesul de curgere să fie una continuă, cu valori credibile, după cum este prezentat în figurile 1.64 – 1.67.
- $y^+ < 100$ pe suprafețele ce definesc pereții solizi.

Pentru evaluarea rezultatelor, atât din punct de vedere cantitativ cât și din punct de vedere calitativ, au fost studiate

- variația coeficientului de presiune pe caroserii, roți și la nivelul solului,
- aspectul liniilor de curent în jurul caroseriilor,
- valorile forțelor aerodinamice, de rezistență și portanță și a coeficienților aerodinamici corespunzători C_x și C_z .

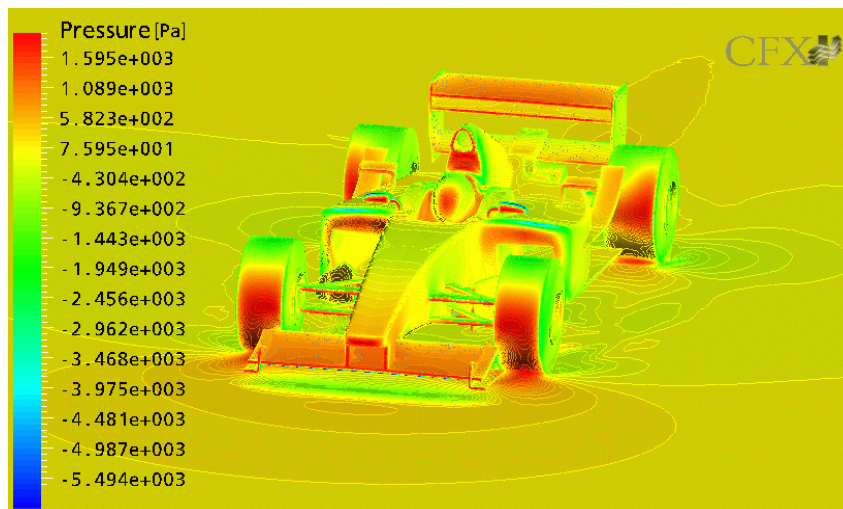


Fig. 1.64 - Variația presiunii pe suprafața automobilului de competiție considerând mișcarea relativă dintre sol și automobil și cu roți în mișcare de rotație, $v_\infty = 200 \text{ km/h}$

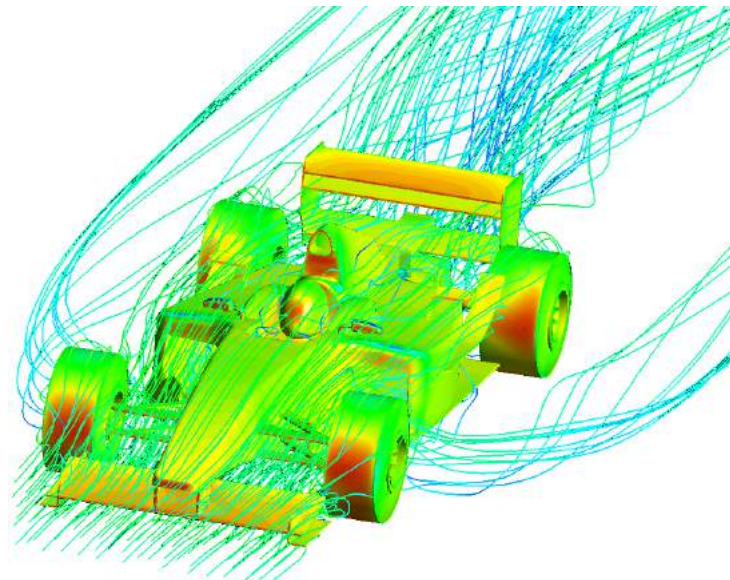


Fig. 1.65 – Aspectul liniilor de curent în cazul automobilului de competiție cu mișcare relativă între sol și automobil și cu roți în mișcare de rotație, $v_{\infty} = 200 \text{ km/h}$

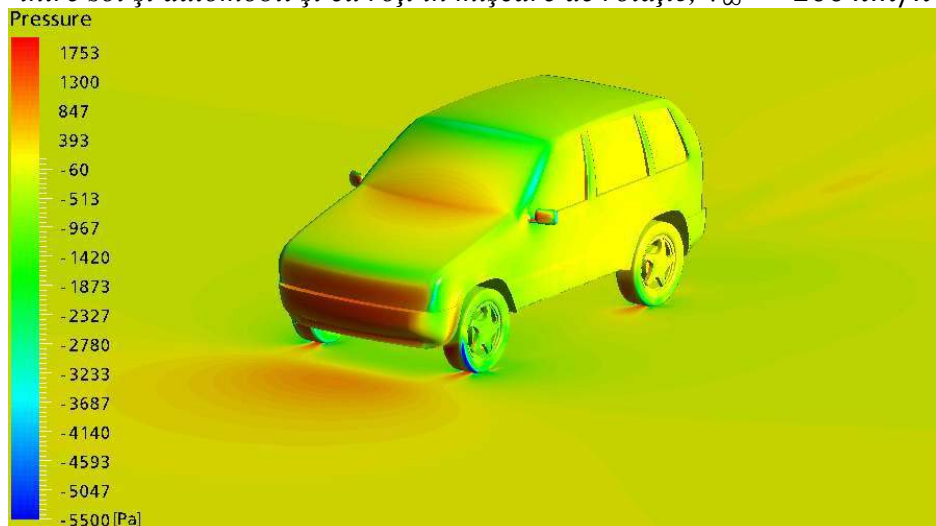


Fig. 1.66 - Variația presiunii pe suprafața automobilului de serie considerând mișcarea relativă dintre sol și automobil și cu roți în mișcare de rotație, $v_{\infty} = 180 \text{ km/h}$

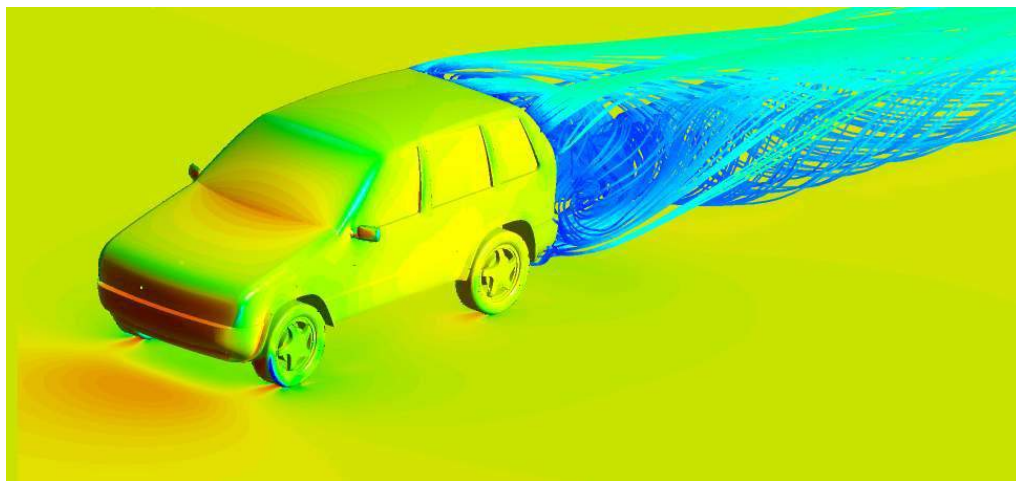


Fig. 1.67 – Trena de vârtējuri în cazul automobilului de serie considerând mișcarea relativă dintre sol și automobil și cu roți în mișcare de rotație, $v_{\infty} = 180 \text{ km/h}$

Pentru fiecare dintre automobilele studiate, rezultatele obținute sunt prezentate sub formă grafică în figurile 3.32 - 3.42, după cum urmează

- Variația coeficienților aerodinamici, de rezistență și de portanță, figurile 1.68 și 1.69;
- Contribuția procentuală a structurilor inferioare ale automobilelor studiate la forțele aerodinamice globale, figurile 3.34 - 3.42.

Astfel, după cum a fost evidențiat și în studiile prezentate anterior, pentru ambele automobile, o pondere importantă a încărcărilor aerodinamice, de rezistență și de portanță, se datorează componentelor structurilor inferioare ale automobilelor.

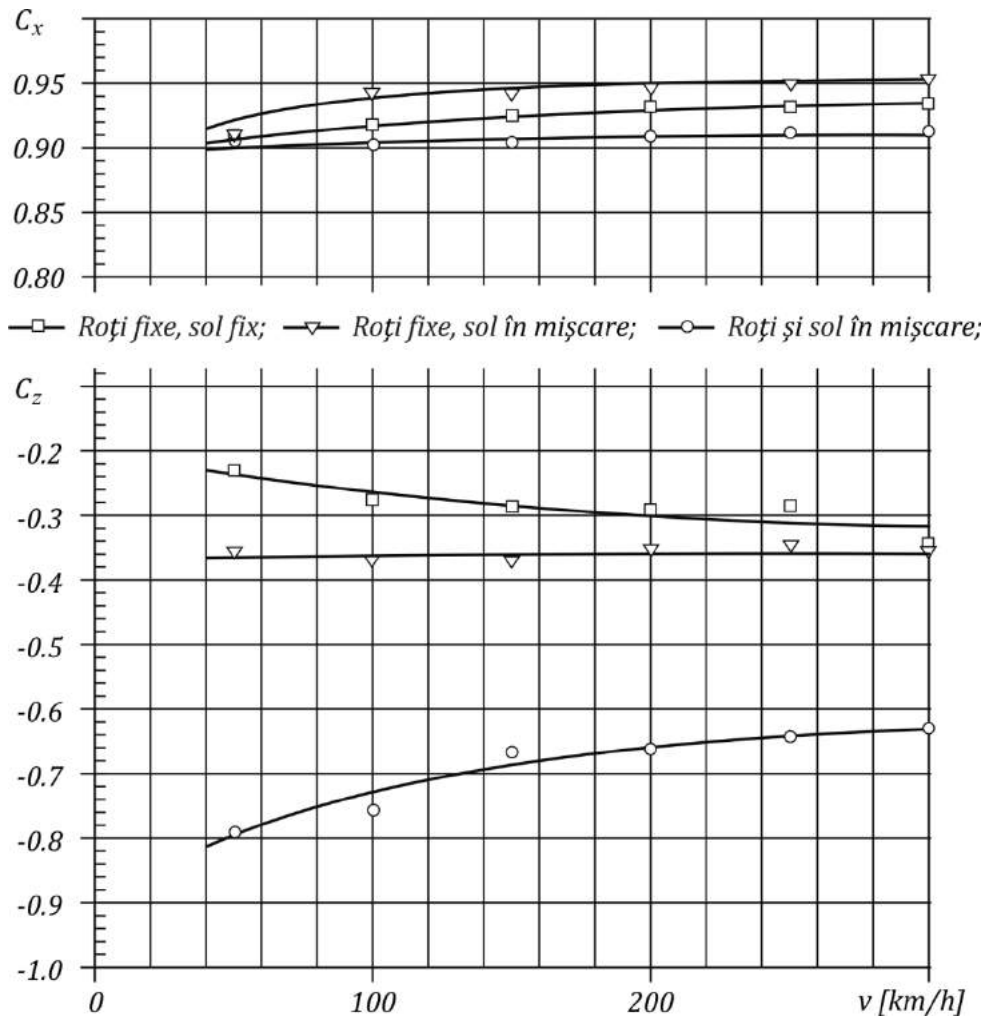


Fig. 1.68 – Variația coeficienților aerodinamici C_x și C_z pentru automobilul de viteză

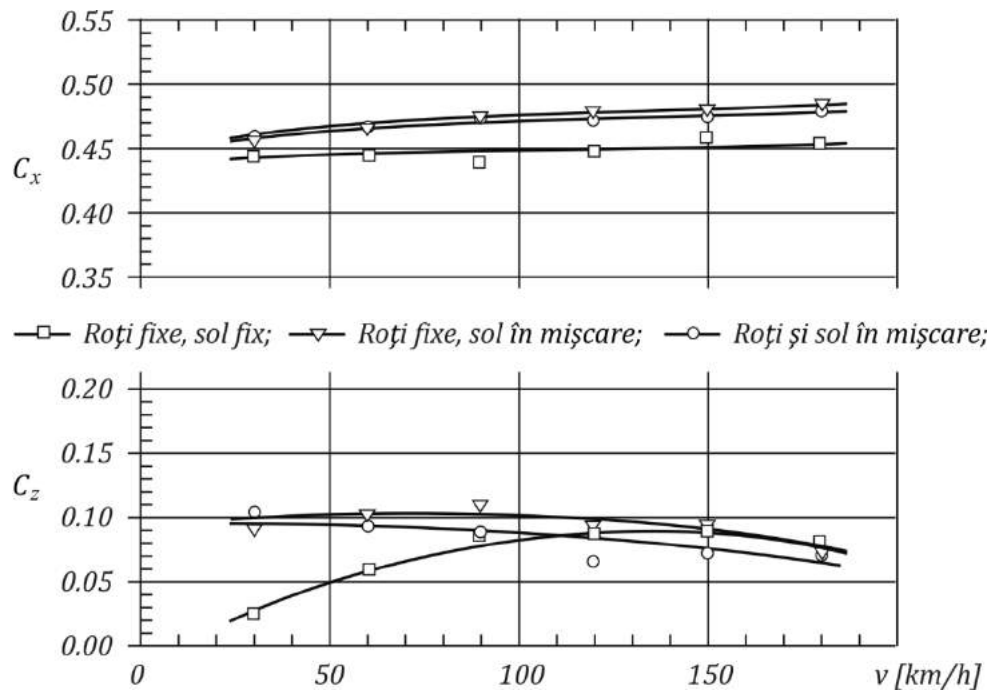


Fig. 1.69 – Variația coeficienților aerodinamici C_x și C_z pentru automobilul de serie

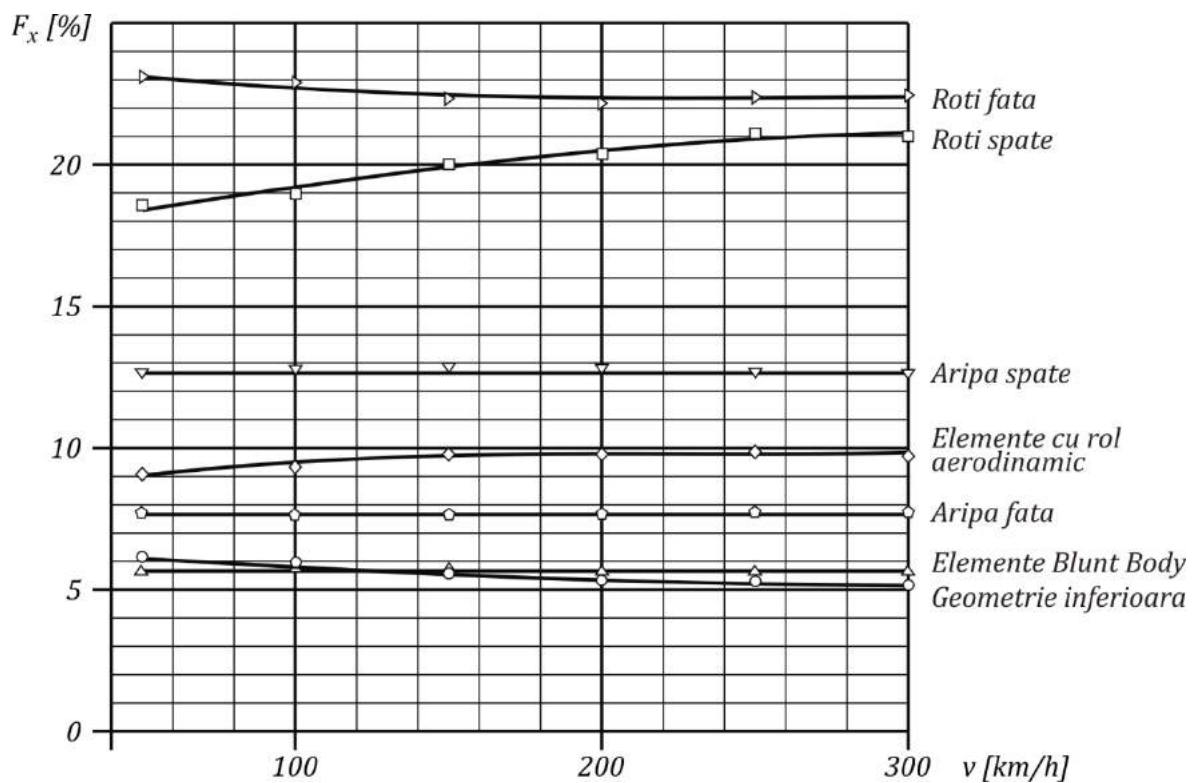


Fig. 1.70 – Contribuția procentuală a componentelor automobilului de competiție (figura 3.37) la rezistența aerodinamică pentru analizele cu roți și sol în mișcare

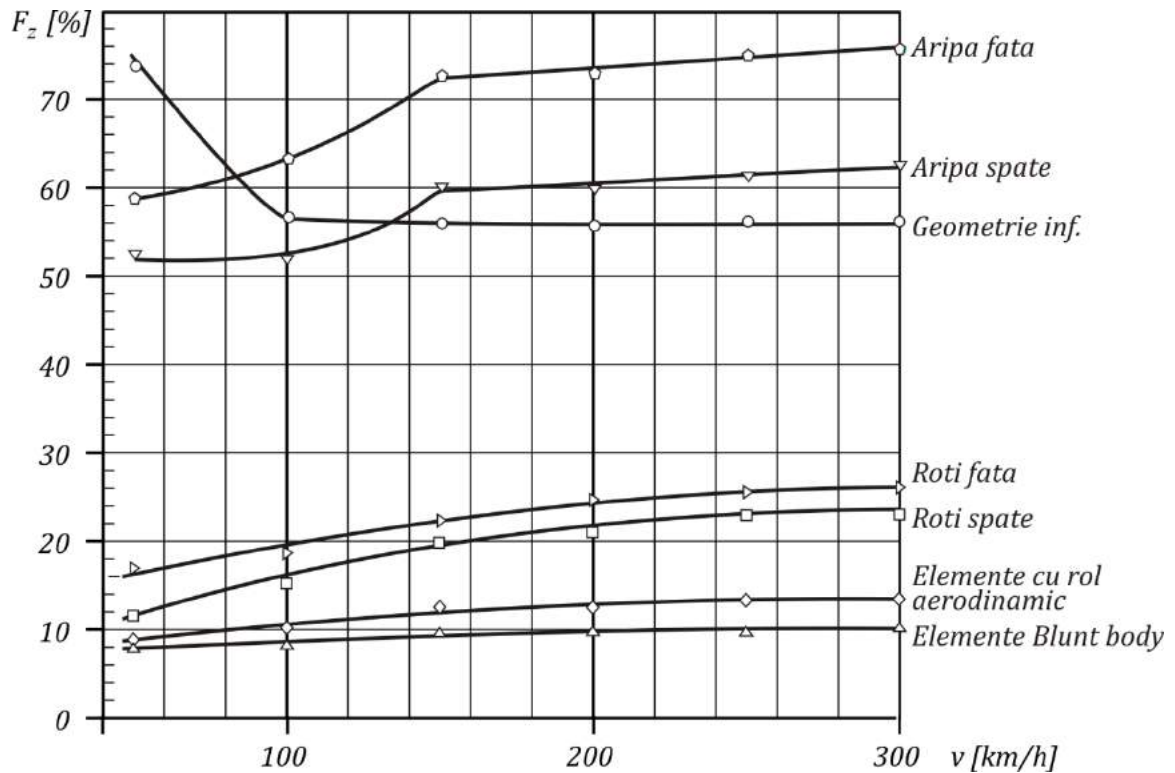


Fig. 1.71 – Contribuția procentuală a componentelor automobilului de competiție (figura 3.37) la forța de portanță pentru analizele cu roți și sol în mișcare

În figura 1.72 sunt prezentate componentele de structură evaluate în acest studiu pentru automobilului de viteză. Orientarea forțelor verticale este prezentată în figura 1.72.

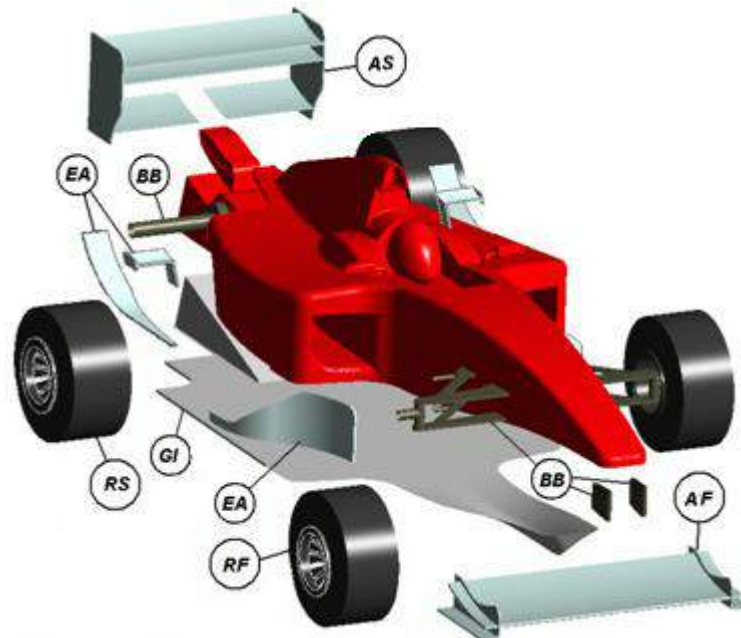


Fig. 1.72 – Componentele evaluate pentru automobilul de competiție: AF (aripă față), AS (aripă spate), RF (roți față), RS (roți spate), EA (elemente cu rol aerodinamic), BB (elemente blunt body), GI (geometrie inferioară)

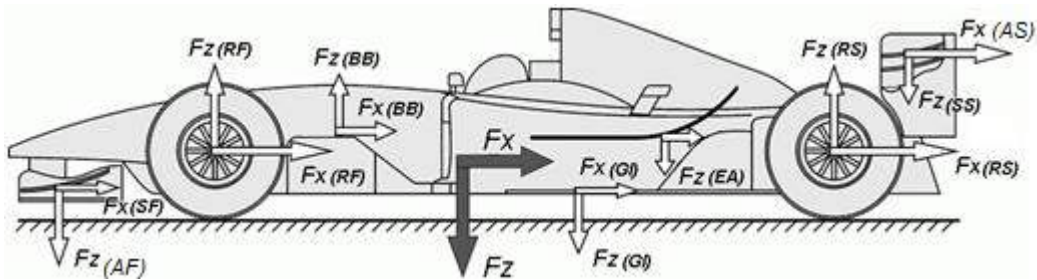


Fig. 1.73 – Orientarea forțelor verticale pentru componentele automobilului de competiție

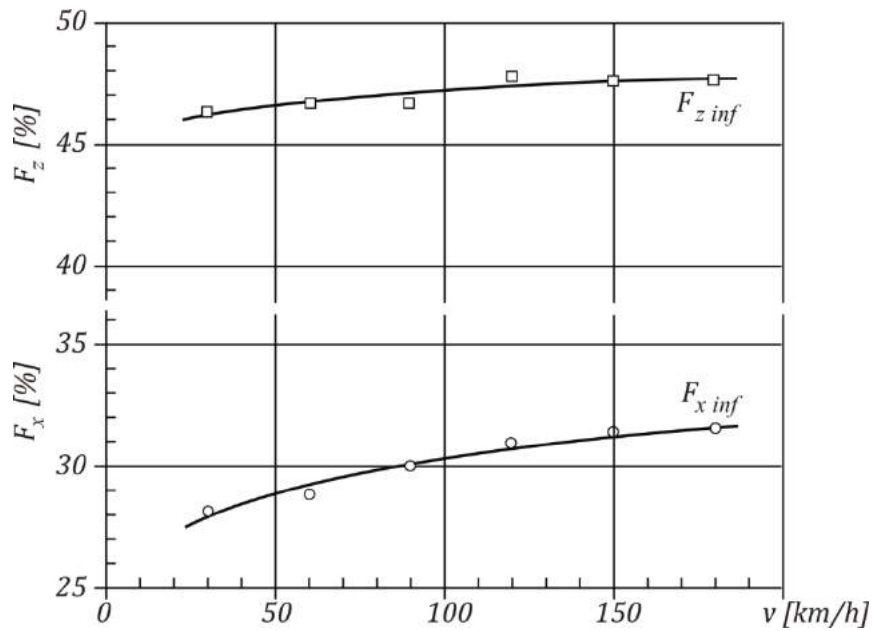


Fig. 1.74 – Contribuția geometriei inferioare la forțele aerodinamice globale pentru automobilul de serie

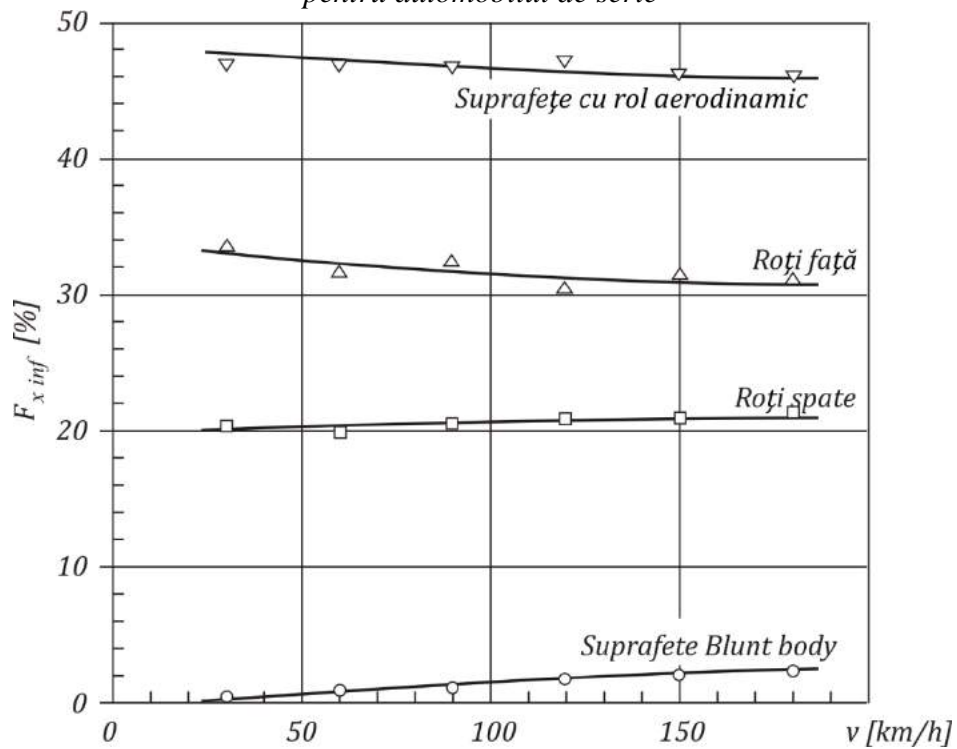


Fig. 1.75 – Contribuția procentuală a componentelor automobilului de serie

la rezistența aerodinamică inferioară, analize cu roți și sol în mișcare

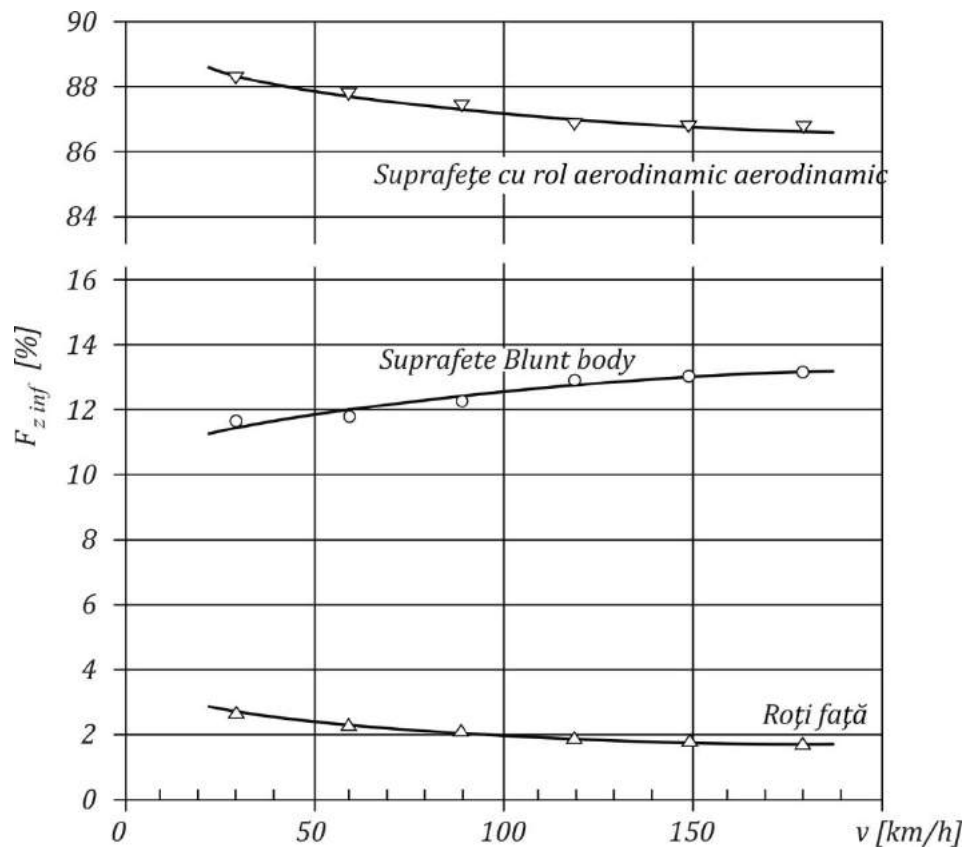


Fig. 1.76 – Contribuția procentuală a componentelor automobilului de serie la forța de portanță inferioară, analize cu roți și sol în mișcare

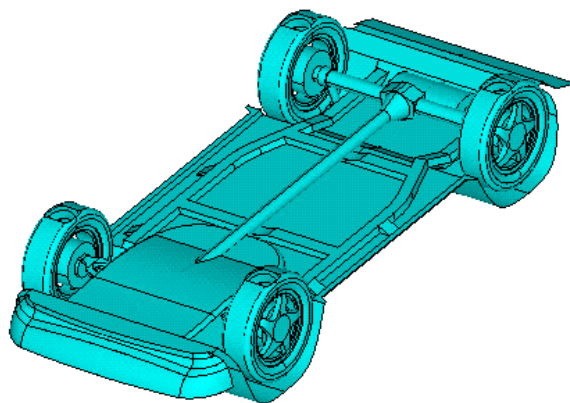


Fig. 1.77 – Suprafețele ce definesc structura inferioară a modelului

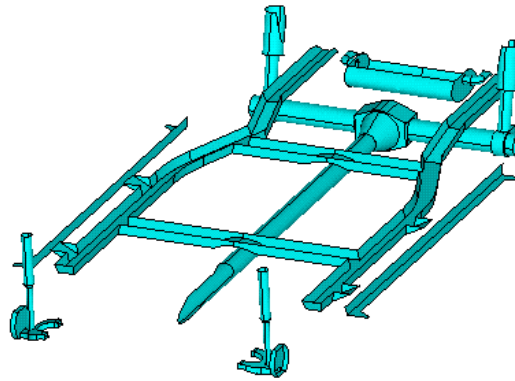


Fig. 178 – Suprafețele ce definesc componentele structurii inferioare ale automobilului de serie, neprotejate aerodinamic (blunt body)

Analizele efectuate pentru ambele automobile au relevat importanța simulării mișcării roților, valorile coeficienții aerodinamici variind semnificativ în cele trei cazuri studiate. De asemenea, simularea mișcării relative dintre calea de rulare și automobil este esențială doar pentru automobilele cu valori mici ale gărzii la sol.

Referitor la automobilul de viteză, cea mai mare contribuție, peste 40% o au roțile, datorită mărimii acestora și a faptului că sunt complet expuse curentului de aer. Rezistența aerodinamică generată de roțile față descrește cu viteza de deplasare a autovehiculului, în opoziție cu rezistența aerodinamică generată de roțile spate, care crește cu viteza de deplasare, deoarece curgerea în jurul acestora este afectată de structurile caroseriei, poziționate în față. De asemenea, o contribuție importantă, peste 30%, la forța aerodinamică rezultantă o au cele două aripi, față și spate și elementele de structură cu rol aerodinamic precum aripioarele deportante și deflectoarele. Și rezistența aerodinamică generată de acestea crește cu viteza. Datorită efectului Venturi, generat între calea de rulare și geometria inferioară a automobilului, rezistența aerodinamică generată de această structură scade cu creșterea vitezei.

Din punctul de vedere al forței verticale rezultante, sunt componente care generează portanță, precum suprafețele neprofilate aerodinamic (tip blunt body) și roțile, datorită combinării efectelor Magnus și de sol. Forța verticală rezultantă, orientată înspre sol (deportantă) se datorează în principal celor două spoileruri și geometriei inferioare, cea mai semnificativă contribuție având-o spoilerul față, peste 70%. Variația acestora este una rapidă pentru viteze mai mici de 50 m/s (limita convențională a curgerilor subsonice incompresibile) și crește ușor pentru viteze mai mari.

Referitor la automobilul de serie, pentru cazul analizat, variațiile $F_{x\ inf}$ și $F_{z\ inf}$ sunt crescătoare cu viteza de deplasare a automobilului și reprezintă peste 30%, respectiv 45% din încărcările aerodinamice rezultante F_x și F_z . După cum se observă, un procent ridicat din forța de rezistență la înaintare generată de curgerea aerului pe sub structura inferioară a automobilului se datorează roților, peste 50%, influența acestora scăzând odată cu creșterea vitezei, când vârtejurile generate de roți sunt antrenate (și atenuate) de curentul de aer ce curge pe suprafețele laterale ale mașinii.

O variație în opoziție o are ponderea datorată componentelor structurii inferioare a automobilului, neprotejate aerodinamic. La creșterea vitezei, crește și participația $F_{x\ BB}$ la $F_{x\ inf}$

și implicit la F_x . Deși participația acestora la rezistența aerodinamică este una scăzută, ele au o contribuție semnificativă la forța deportantă generată de geometria inferioară, peste 10%.

Rezultatele obținute evidențiază de asemenea, posibilitățile de analiză aerodinamică a caroseriilor de automobile în medii virtuale precum și utilitatea acestora. Ele permit o evaluare calitativă superioară metodelor experimentale clasice, deoarece oferă informații despre procesul de curgere și variația mărimilor ce-l caracterizează în intimitatea acestuia. Analiza detaliată a distribuției unor mărimi precum coeficientul de presiune și/sau tensiunea tangențială de frecare face posibilă evidențierea contribuției locale la rezistența de înaintare și identificarea structurilor care generează vârtejuri, aceste informații fiind utile în procesul de optimizare a formei caroseriei.

Astfel, pentru situațiile analizate, obținerea unui coeficient de rezistență $C_{x\ inf}$ minim al automobilului se impune

- carosarea roților, într-o proporție cât mai mare posibil, în vederea reducerii influenței vârtejurilor generate de acestea;
- protejarea, din punct de vedere aerodinamic, a elementelor structurii inferioare a automobilelor.
- proiectarea unor structuri ale geometriei inferioare care să faciliteze apariția fenomenului Venturi.

1.5 Studiul experimental al interacțiunii aerodinamice automobil – cale de rulare

1.5.1 Tunele aerodinamice. Infrastructura utilizată în cercetare

Deoarece forțele aerodinamice care acționează asupra unui automobil au un rol semnificativ asupra comportamentului dinamic al acestuia în ceea ce privește stabilitatea, manevrabilitatea, sensibilitatea la rafale laterale și nu în ultimul rând asupra consumului de combustibil, aerodinamica a devenit unul dintre cele mai importante considerente care stau la baza proiectării autovehiculelor.

Principalele direcții ale studiului aerodinamic ale unui autovehicul se pot grupa după cum urmează.

- Determinarea forțelor și momentelor aerodinamice la care este supus un autoturism în cadrul interacțiunii cu aerul atmosferic. Dintre cele 6 componente ce caracterizează performanțele aerodinamice ale unui autovehicul cea mai importantă este rezistența aerodinamică (F_x). Studiile efectuate în acest sens au relevat faptul că reducerea coeficientului de rezistență la înaintare pentru o mașină obișnuită de la $C_x = 0.4$ la $C_x = 0.3$ conduce la o reducere a consumului de combustibil cu aproximativ 7%, cu consecințe importante inclusiv asupra prețului petrolului pe piața mondială.
- Studiul curgerii aerului în jurul autoturismului, cât mai detaliat posibil. Curgerea exterioară este cea care determină traseul picăturilor de ploaie, mecanismul de depunere al prafului, zgomotul aeroacustic, răcirea frânelor, forțele care acționează asupra ștergătoarelor de parbriz etc. Astfel, calitatea unui autoturism din punct de vedere aerodinamic depinde în mare măsură de succesul modelării caroseriei acestuia, în sensul obținerii unui câmp de curgere exterior astfel încât să fie rezolvate favorabil problemele prezentate anterior.
- Curgerea aerului în interiorul compartimentului motorului. Curgerea corespunzătoare a curentului de aer contribuie la o reducere a suprafeței utile a radiatorului și la o răcire mai bună a componentelor aflate în acest compartiment.
- Climatizarea compartimentului pasagerilor pentru obținerea unui confort sporit al acestora.

Studiul aerodinamic al autovehiculelor este strâns legat de experimentele realizate în tunele aerodinamice, în a căror camere de experiențe se reproduc condițiile de mediu în care structurile aeromecanice testate evoluează în mod curent.

Din punct de vedere constructiv există o diversitate mare de astfel de instalații, principalele criterii după care acestea se pot clasifica fiind următoarele

- după arhitectura acestora, se disting tunele aerodinamice cu circuit deschis, tip Eiffel, figura 1.79, sau cu circuit închis, tip Prandtl, figura 1.80.

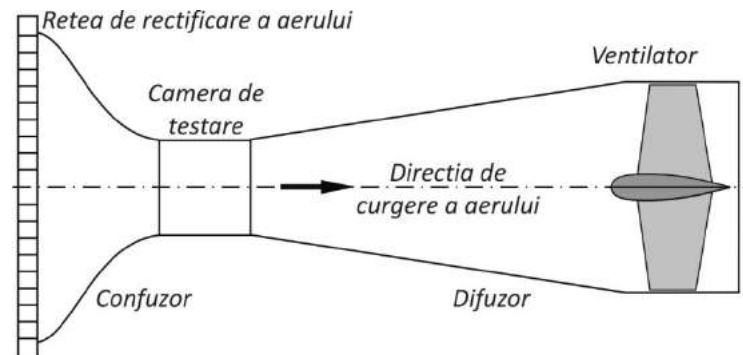


Fig. 1.79 - Tunel aerodinamic tip Eiffel

- după tipul camerei de experiențe, se disting tunele aerodinamice cu cameră de experiențe deschisă (prezintă avantajul unor interferențe reduse între modelul studiat și pereții camerei de testare, dar sunt mari consumatoare de energie), sau cu cameră de experiențe închisă, (prezintă avantajul unui consum de energie mai mic);

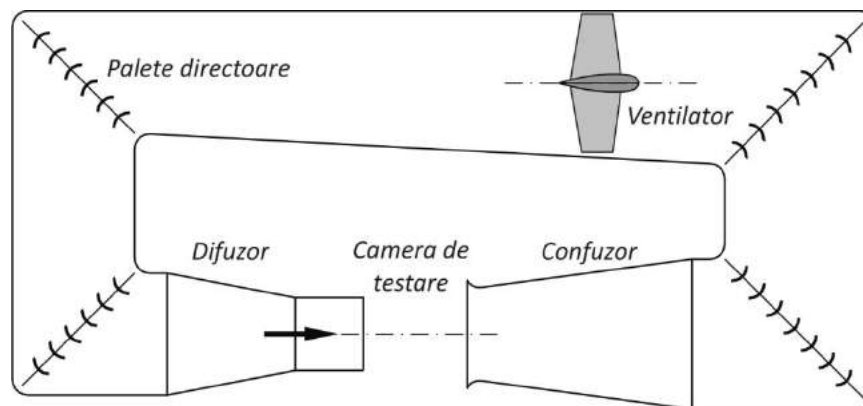


Fig. 1.80 - Tunel aerodinamic tip Prandtl

- după valoarea vitezei maxime de referință (din camera de experiențe), se pot clasifica în tunele aerodinamice subsonice incompresibile, subsonice compresibile și supersonice;
- după valoarea presiunii din camera de experiențe, pot fi tunele aerodinamice atmosferice sau presurizate, de densitate variabilă.

Pe lângă tunelele aerodinamice descrise anterior au fost construit și unele cu destinație specială, precum cele de vizualizare a curgerii, aeroacustice etc. Legat de principalele componente constructive ale tunelelor aerodinamice menționate anterior sunt prezentate pe scurt câteva detalii în cele ce urmează.

- Camera de experiențe (testare) este zona unde se plasează modelul de studiat și în care se reproduc condițiile atmosferice în care acesta evoluează în mod obișnuit. În secțiunea transversală camera de testare poate avea diferite forme, cele mai utilizate fiind (în funcție de destinația tunelului) cele dreptunghiulare, circulare, mai rar octogonale sau eliptice. Lungimea recomandată pentru camera de experiențe este $L_{CE} \cong 1.5 D_{h_{CE}}$, unde $D_{h_{CE}}$ reprezintă diametrul hidraulic al secțiunii camerei de testare. În cazul unor lungimi mai mari, grosimea stratului limită poate influența negativ precizia măsurătorilor.

- Confuzorul este plasat înaintea camerei de experiențe și are rolul de a mări viteza curentului de aer la valoarea de testare, micșorând în același timp și turbulența curentului la intrarea în camera de experiențe. Valorile recomandate ale gradului de convergență sunt $n \cong (5 - 20)$: raportul dintre aria secțiunii de intrare în confuzor și aria secțiunii de ieșirea din confuzor (respectiv de intrare în camera de experiențe).
- Difuzorul este plasat după camera de experiențe și trebuie astfel conceput încât să nu se producă desprinderi ale curentului de aer de pe pereții acestuia. Pentru secțiuni circulare valoarea maximă recomandată a unghiului de evazare al pereților este de aproximativ $\alpha \cong (5^\circ - 7^\circ)$. Această valoare poate ajunge la $\alpha = 12^\circ$ în cazul secțiunilor dreptunghiulare, unde creșterea secțiunii se realizează, frecvent, prin evazare într-un singur plan, precum în cazul prezentat în figura 1.82.
- Rețeaua de rectificare este utilizată pentru micșorarea turbulenței curentului de aer și conducerea favorabilă a acestuia spre alte componente de interes ale tunelului, precum confuzorul. Cele mai simple din punct de vedere constructiv sunt realizate din plase. Cele mai eficiente sunt cele din rigle de grosime constantă, ale căror ochiuri pot avea diferite forme, mai des întâlnite fiind cele dreptunghiulare.
- Ventilatorul reprezintă sursa de putere a instalației, asigurând circulația aerului prin tunel. Pentru tunelele clasice, mai des utilizate sunt cele axiale. Pentru diminuarea vârtejurilor generate de rotorul ventilatorului se folosește uneori soluția montării succesive a două ventilatoare identice care se rotesc în sensuri contrare. Se montează cât mai departe posibil de camera de experiențe. În cazul în care turația ventilatorului este constantă, debitul de aer se reglează cu ajutorul unei vane.
- Elemente de legătură sunt necesare în general tunelelor în circuit închis și fac legătura între principalele componente. Sunt reprezentate cel mai adesea de coturi și corpuri de trecere de la un tip de secțiune la altul, ca de exemplu de la secțiunea circulară a ventilatorului la secțiunea caracteristică de curgere.

În figurile 1.81 și 1.82 este prezentat unul dintre tunelele aerodinamice din laboratorul de aerodinamică al universității Transilvania din Brașov, împreună cu o parte din instrumentația aferentă. Din punct de vedere constructiv este compus din

- | | |
|---|------------------------------------|
| <i>1 - camera de experiențe,</i> | <i>10 - cot difuzor,</i> |
| <i>2 - ventilator axial,</i> | <i>12 - vană de reglare debit,</i> |
| <i>3 - suportul ventilatorului,</i> | <i>14 - platformă de lucru,</i> |
| <i>7 - rețea de rectificare,</i> | <i>15 - balanța aerodinamică,</i> |
| <i>8 - confuzor,</i> | <i>16 - model testat,</i> |
| <i>9 - difuzor,</i> | |
| <i>4, 13 - corpuri de legătură (trecere) ventilator axial – coturi de întoarcere,</i> | |
| <i>5, 6, 11 - coturi de întoarcere, prevăzute cu pale directoare.</i> | |

Are următoarele caracteristici funcționale

- dimensiunile secțiunii camerei de testare: $0.6 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,
- domeniul vitezelor de testare: $v = (2 \div 40) \text{ m/s}$,
- gradul de turbulență: $T_{min} = 0.25 \%$,

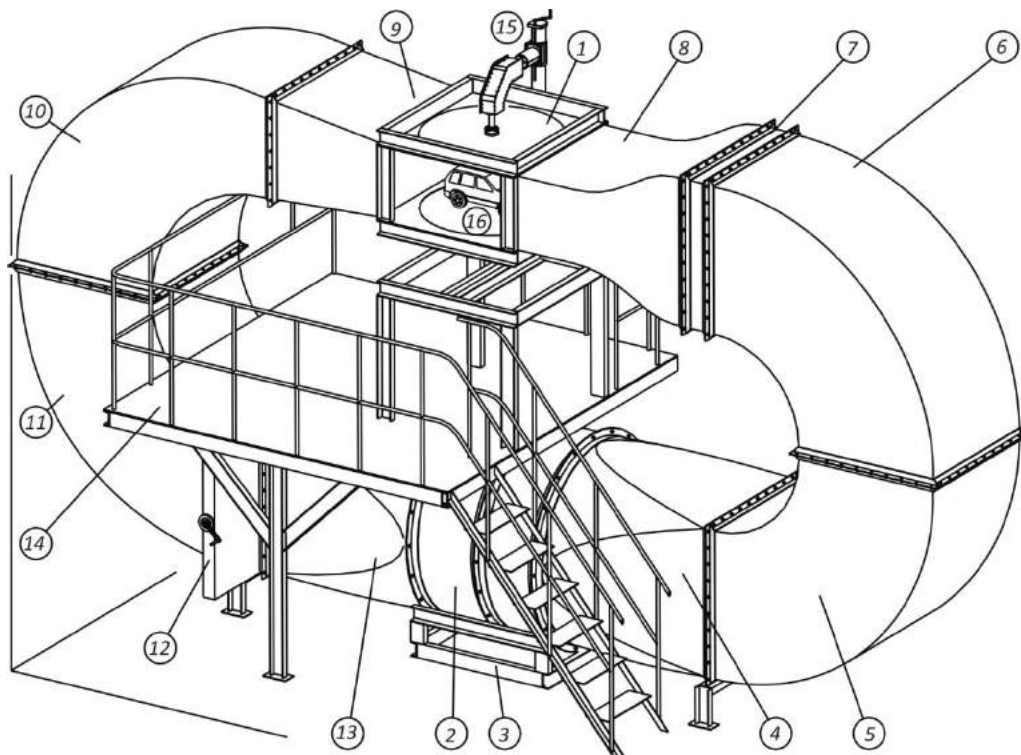


Fig. 1.82 - Tunel aerodinamic - laboratorul de Aerodinamică,
Universitatea Transilvania din Braşov

și îndeplinește normele SAE (Society of Automobile Engineers, USA) [23] referitoare la curentul de aer din camera de testare cu blocaj zero

- abaterea unghiulară față de planul orizontal $\Delta\alpha \leq \pm 0.5^\circ$,
(unghiul dintre direcția de curgere a aerului și planul orizontal este considerat pozitiv pentru devieri în sus),

- abaterea unghiulară față de planul longitudinal $\Delta\beta \leq \pm 0.5^\circ$,
(unghiul dintre direcția de curgere a aerului și planul longitudinal este considerat pozitiv pentru devieri de la stânga la dreapta),
- uniformitatea distribuției de viteze a curentului definită de relația $\Delta v \leq 1.0 \%$,

$$\Delta v = \frac{v - v_\infty}{v_\infty} 100 [\%], \quad (1.51)$$

unde v este viteza locală (în punctul în care este măsurată),
 v_∞ este viteza de referință,

- gradul de turbulență $T \leq 0.5 \%$,
- uniformitatea distribuției de presiuni pe direcția de curgere definită de relația $\Delta p \leq 1 \%$,

$$\Delta p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} 100 [\%], \quad (1.52)$$

- lungimea zonei de presiune constantă $(\Delta l/L) \geq 1.0$,
(raportată la lungimea caracteristică modelului studiat L),
- grosimea de deplasare, a stratului limită $\delta^* \leq 0.1 h$,
raportată la valoarea distanței minime dintre modelul testat și pereții camerei de experiențe; pentru un automobil h reprezintă garda la sol.

Pentru un blocaj maxim 10 % pot fi determinate caracteristicile profilelor aerodinamice la valori ale numărului Reynolds $Re \cong 10^6$. De asemenea, pot fi studiate machete de automobile la scara 1:5.

Blocajul camerei de experiențe (b_{CE}) reprezintă raport procentual între aria proiecției automobilului (A) pe planul transversal al secțiunii de testare și aria secțiunii de testare (A_{CE})

$$b_{CE} = \frac{A}{A_{CE}} 100 [\%]. \quad (1.53)$$

Este utilat cu două balanțe aerodinamice, dintre care una (figura 1.83) de uz general (balanță externă, tensometrică, multielement, cu excentric pentru mărirea sensibilității) cu 4 componente, utilizată pentru determinarea caracteristicilor aerodinamice globale Fz (P , forța de portanță), Fx (R , rezistența aerodinamică), Fy (forța laterală) și Mz (momentul după axa Oz).

Această balanță a fost proiectată și realizată conform specificațiilor SAE [23]:

- balanța și sistemul de achiziție date nu trebuie să perturbe curgerea aerului în apropierea modelului testat, iar dacă există influențe, acestea trebuie să fie minime, determinate și eliminate în procesul de calcul al forțelor aerodinamice,
- nu trebuie să existe influențe ale curgerii aerului în camera de experiențe asupra sistemului de achiziție date; efectele variației temperaturii și curenților din încăperea în care se află balanța și sistemul de achiziție date asupra comportamentului acestora trebuie

atent verificate; din acest punct de vedere sunt preferabile încăperile cu atmosferă controlabilă,

- influența curgerii aerului pe sub vehicul să poată fi controlată, precum și variațiile poziției pe verticală ale modelului testat,
- influența frecărilor dintre componentele între care există mișcare relativă să fie minimă, ca și eroarea de histeresis al curbelor de etalonare a balanței; din acest punct de vedere, sistemul de măsurare a forțelor trebuie să poată înregistra variații ale coeficientului de rezistență la înaintare $\Delta C_x = 0.002$.

Din punct de vedere constructiv, principalele componente ale sistemului de măsurare a forțelor aerodinamice sunt următoarele, conform figurii 1.83:

- suportul 2 (bară) de fixare (rigidă) a modelului 1 studiat de balanța aerodinamică 3,

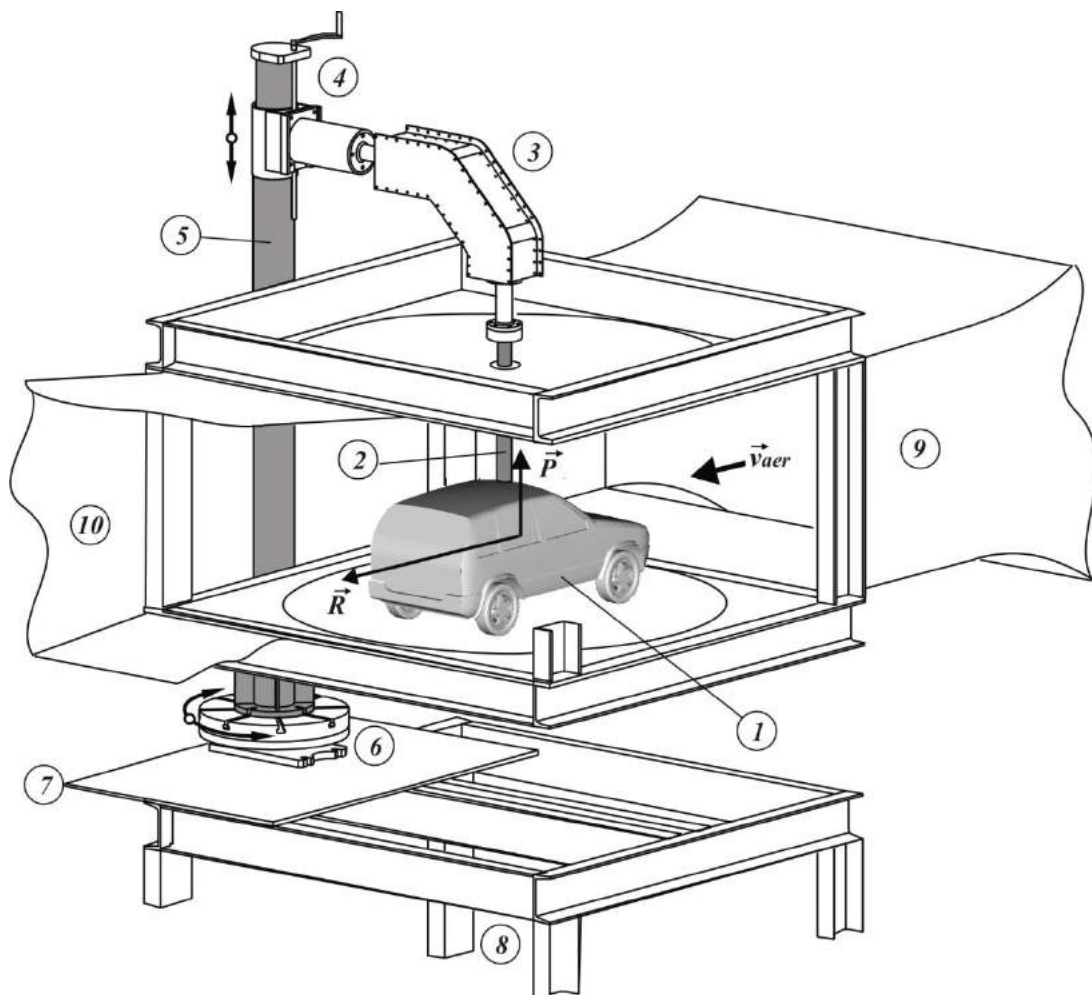


Fig. 1.83 - Vedere axonometrică a sistemului de măsurare a forțelor

- dispozitivul 4 cu mecanism cu șurub conducător; acesta permite culisarea balanței pe coloana de ghidare 5, realizându-se astfel controlul poziției pe verticală a modelului în camera de testare,
- masa rotativă 6 pe care este fixată coloana de ghidare; permite alinierea finală a balanței la sistemul de referință ales, ca de exemplu cel raportat la direcția curentului de aer din

camera de testare; aceasta este fixată prin intermediul unei plăci suport 7 de un cadru metalic 8, independent de structura tunelului, izolându-se astfel sistemul de măsurare de perturbațiile induse de vibrațiile tunelului,

- în figura 1.83 au mai fost reprezentate parțial confuzorul 9, respectiv difuzorul sufleriei 10.

Balanța aerodinamică este prezentată în detaliu în figura 1.84. Aceasta se compune din:

- brațul 2, în formă de cot; acesta reprezintă și partea centrală a balanței, având structura în formă de cheson, realizat din plăci de aluminiu (pentru ușurarea greutateii) rigidizate cu corniere fixate cu șuruburi și piulițe,
- elementele elastice 4 și 5, bare cu pereți subțiri din oțel, ale căror axe longitudinale formează un unghi drept; pe suprafețele exterioare ale acestora au fost lipite mărcile tensometrice, în punte completă,
- componentele 1 și 2 care realizează legătura balanței cu suportul de fixare al modelului, respectiv cu dispozitivul de culisare al acesteia.

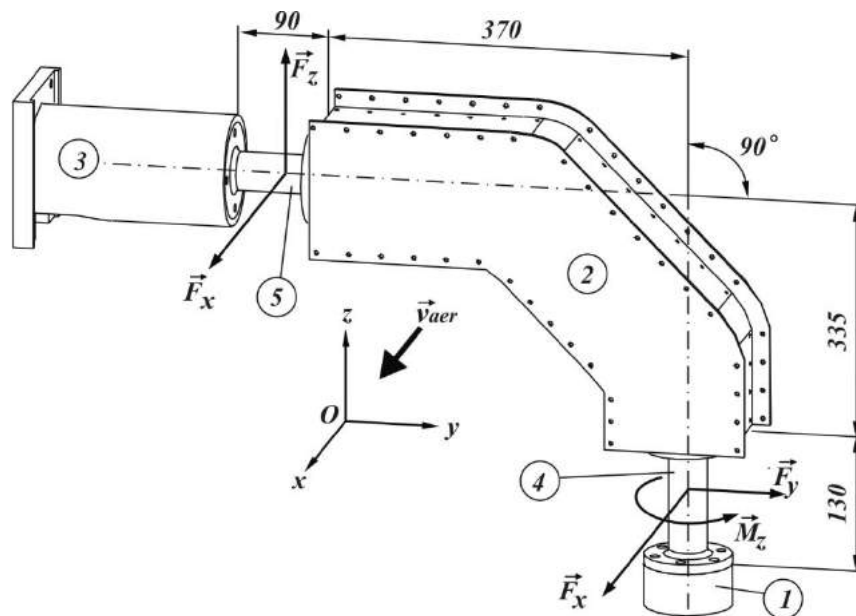


Fig. 1.84 - Vedere axonometrică a balanței aerodinamice

Punțile tensometrice lipite pe cele două elemente elastice permit determinarea următoarelor eforturi, în sistemul de referință raportat la direcția curentului de aer din camera de testare, după cum urmează:

- două forțe, după axele Ox și Oy și momentul după axa Oz , pe primul element;
- două forțe, după axele Ox și Oz pe cel de al doilea element.

Astfel, balanța concepută poate determina patru din cele șase componente ale tursorului format din forța aerodinamică globală și momentul corespunzător acesteia, dintre care una dublu redundantă. În configurația de lucru curentă, prezentată în figurile anterioare, se pot determina cele trei componente ale forței aerodinamice, \vec{F}_x , \vec{F}_y , \vec{F}_z și momentul \vec{M}_z .

Deoarece balanța a fost concepută ca o construcție modulară, prin interschimbarea poziției celor două elemente elastice se pot determina eforturile și în configurația \vec{F}_x , \vec{F}_y , \vec{F}_z și \vec{M}_y .

Pentru determinarea forțelor aerodinamice, care acționează asupra modelului studiat, punțile tensometrice de pe elementele elastice au fost conectate prin cabluri ecranate, multifilare, la un tensometru electronic cu patru canale, Vishay Micro-Measurements model P3. Aceste aparate funcționează pe principiul alimentării punților de mărci tensometrice în curent alternativ, oferind în schimbul reglajelor, mai laborioase, o stabilitate bună.

Forțele aerodinamice ce acționează asupra modelului încercat în suflerie sunt transmise prin intermediul suportului de fixare al modelului la elementele elastice ale balanței, deformațiile acestora fiind preluate de mărcile tensometrice care își modifică rezistența. Astfel, se realizează transformarea forțelor mecanice în variații ale unei mărimi electrice, convertită de tensometru în semnale electrice, afișate digital.

Tensometrul electronic este conectat la rândul său la un calculator, cu ajutorul căruia se poate controla procesul de achiziție a datelor, prezentat în figura 1.86. Fluxul mărimilor măsurate este prezentat în figura 1.85.

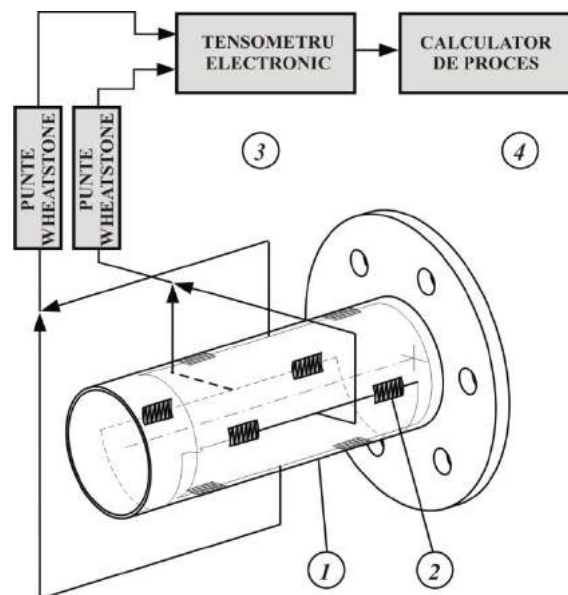


Fig. 1.86 - Fluxul mărimilor măsurate

De asemenea, acest tunel este echipat cu dispozitiv de simulare a efectului de sol, cu bandă rulantă și instrumentație adecvată pentru determinarea parametrilor curentului de aer din camera de testare (viteză, temperatură, presiune, umiditate, grad de turbulență), verificată și certificată metrologic

- Echipament multifuncțional KIMO pentru determinarea și monitorizarea parametrilor de stare pentru fluide ușoare, compatibil cu toate sondele SMART PRO și software pentru transferul și prelucrarea de date:
 - Sonde termoanemometrice cu fir cald

domeniul de măsurare al vitezei: (0.0, 3.0) m/s, (3.1, 30) m/s, cu precizie $\pm 3\%$ și rezoluție 0.01m/s, respectiv 0.1 m/s,
 domeniul de măsurare al temperaturii: (-20, 80) °C, cu precizie $\pm 2\%$ și rezoluție 0.1 °C,

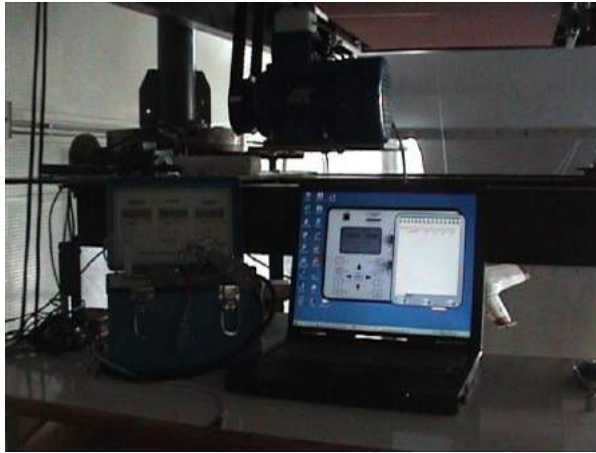


Fig. 1.86 – Sistemul de achiziție date

- Sondă termoanemometrică cu turbină, \varnothing 70 mm
 domeniul de măsurare al vitezei: (0.3, 35.0 m/s), cu precizie $\pm 2\%$ și rezoluție 0.1 m/s,
 domeniul de măsurare al temperaturii: -20 - 80°C, cu precizie $\pm 2\%$ și rezoluție 0.1 °C,
- Tuburi Pitot-Prandtl
 domeniul de măsurare al vitezei: (4, 30) m/s, (31, 100) m/s, cu precizie $\pm 3\%$ și rezoluție 0.1 m/s,
- Sondă higrometrică
 domeniul de măsurare al umidității: (3 – 30) % cu precizie $\pm 1\%$ și rezoluție 0.1 %,
- Micromanometru
 domeniul de măsurare al presiunilor: (0, ± 1000) mmH₂O, cu precizie $\pm 0.5\%$ și rezoluție 0.1 mmH₂O,
- Echipament multifuncțional TESTO, pentru determinarea vitezei și temperaturii aerului, cu sonde termoanemometrice și software pentru transferul și prelucrarea datelor:
 - Sondă termoanemometrică cu turbină \varnothing 16 mm
 domeniul de măsurare al vitezei: (0.4 – 60) m/s cu precizie $\pm 0.5\%$ și rezoluție 0.1 m/s,
 - Sondă termoanemometrică cu senzor NTC
 domeniul de măsurare al vitezei: (0.00 – 10.00) m/s cu precizie $\pm 0.05\%$ și rezoluție 0.01 m/s.

Detalii referitoare la evaluarea calității tunelului aerodinamic și ale paramerilor curentului de aer din camera de experiențe, precum și procedura de etalonare a balanței aerodinamice și precizia cu care se pot face măsurători au fost prezentate în detaliu în teza de doctorat proprie [60].

De asemenea, pentru evaluarea propriului sistem de determinare a forțelor aerodinamice au fost efectuate măsurători pe modelul automobilului ARO 26, model experimental al SC ARO Câmpulung SA, la scara 1:6, prezentată în figura 1.87.

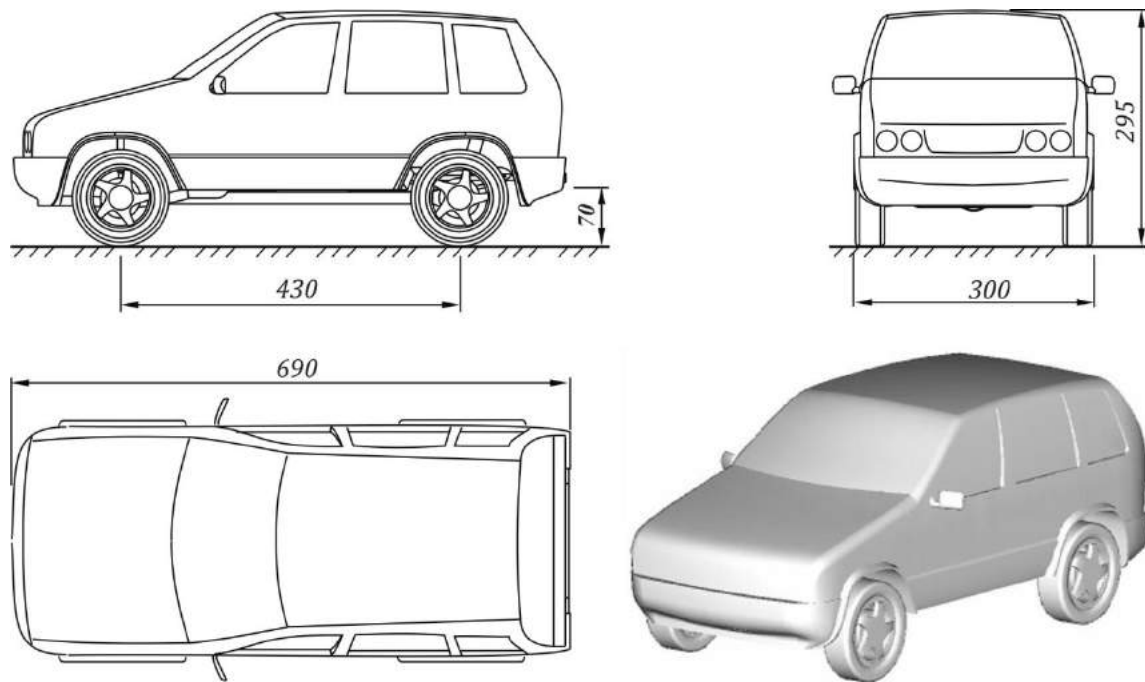


Fig. 1.87 – *Principalele vederi ale machetei automobilului*

Măsurătorile au fost efectuate în condiții similare cu cele desfășurate în tunelul aerodinamic al Institutului Național pentru Creație și Știință (actual INCAS) [20], pentru o valoare $\varphi = 0^\circ$ a unghiului dintre viteza curentului neperturbat v_∞ și axa longitudinală a automobilului (fără vânt lateral).

Deoarece studiul efectuat la INCREST a vizat doar influența geometriei exterioare a caroseriei și a pasajelor roților asupra caracteristicilor aerodinamice ale automobilului, nu s-a acordat importanță detaliilor structurii inferioare. Aceasta a fost simplificată, după cum este prezentată în figura 1.88.

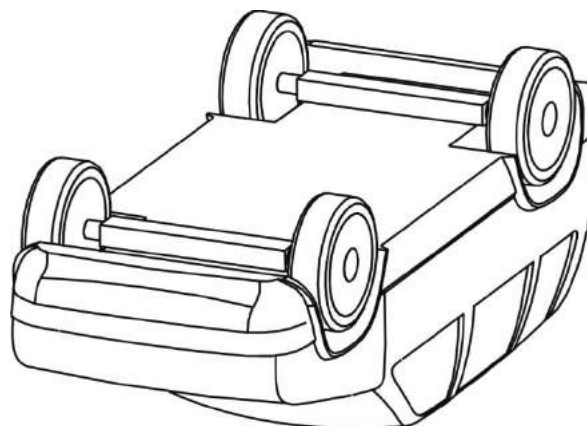


Fig. 1.88 – *Geometria structurii inferioare a modelului testat în condițiile INCREST*

Ca referințe au fost considerate rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate pe modelul cu pasaje la roți, macheta proprie fiind dotată cu aceste elemente.

Rezultatele obținute în urma celor două evaluări sunt prezentate comparativ în tabelul 11. După cum se observă rezultatele obținute sunt foarte bune în ceea ce privește evaluarea coeficientului de rezistență la înaintare, valoarea coeficientului de rezistență aerodinamică C_x variind foarte puțin (sub 1%) odată cu creșterea numărului Reynolds. Diferența dintre numerele Reynolds caracteristice celor două experimente și sistemul de fixare a modelului influențează, sensibil, valoarea coeficientului de portanță, obținându-se o diferență de ~9.5% la evaluarea C_z .

Tabelul 1.1

	Re	C_x	C_z
Experiment INCREST	$4.7 \cdot 10^6$	0.431	0.115
Experiment propriu	$1.5 \cdot 10^6$	0.435	0.104

La calculul coeficienților aerodinamici corespunzători, ca suprafață de referință s-a considerat aria secțiunii transversale maxime a modelului, $A_{ref} = 0.0738 \text{ m}^2$. Utilizând acest model împreună cu altele, au fost efectuate o serie de experimente care au vizat:

- studiul influenței geometriei inferioare asupra caracteristicilor aerodinamice ale automobilelor,
- studiul influenței difuzoarelor în trei configurații constructive,
- studiul influenței metodei de reproducere a suprafeței de rulare asupra caracteristicilor aerodinamice – suprafață mobilă.

În acord cu studiile experimentale, laboratorul dispune și de un sistem de calcul (cluster de stații grafice) cu ajutorul căruia sunt realizate simulări CFD (Computational Fluid Dynamics) de complexitate ridicată, pentru o mai bună înțelegere a fenomenelor studiate.



Fig. 1.89 – Sistemul de calcul paralel din dotarea laboratorului de aerodinamică

În prezent, sistemul de calcul este compus din trei stații grafice fixe și o stație grafică mobilă Dell Precision 490, T7400, T7500 și M6600, însumând 48 de nuclee de calcul și o memorie de 230 GB RAM, cu soft licențiat pentru analiza proceselor de transfer de căldură și dinamica fluidelor ANSYS CFD 17 Academic Research pentru 24 nuclee de calcul paralel, ce constituie o platformă de simulare bazată pe tehnologii integrate și care permite parcurgerea tuturor etapelor unei analize CFD:

- realizarea modelului CAD și integrarea acestuia în domeniul de analiză,
- discretizarea domeniului de analiză,
- pre-procesarea analizei,
- soluționarea numerică,
- post-procesarea rezultatelor obținute.

Cu o poziție de lider în domeniul soluțiilor de simulare a proceselor de dinamica fluidelor, ANSYS CFX dispune de o experiență considerabilă în studierea pompelor, motoarelor de avion, turbinelor, compresoarelor și ale altor mașini rotative. De asemenea soft-ul dispune de modelele specializate pentru procesele de combustie, curgere reactivă și radiație și permite inclusiv studii parametrizate

1.5.2 Studiul influenței geometriei inferioare asupra caracteristicilor aerodinamice ale automobilelor

Experimentele au fost efectuate utilizând modelul de automobilului ARO experimental, fiind efectuate măsurători pentru determinarea caracteristicile aerodinamice, în cazul unei geometrii inferioare cu structuri neprotejate din punct de vedere aerodinamic, figura 1.90. În acest sens au fost reproduse principalele elemente ale structurii precum scutul motor, elemente de rezistență ale platformei și punțile cu suspensii. Roțile au fost și ele atent modelate, punându-se accentul pe detaliile referitoare la geometria jantelor și forma anvelopelor. Modelul realizat e similar celui utilizat în studiile din paragraful 1.4.3.

Se asemenea, același model a fost studiat și în cazul unei geometrii inferioare care să genereze efectul Venturi, fără elemente de impact, eliminându-se inclusiv roțile, precum în figura 1.91.

Rezultatele obținute pentru fiecare dintre configurații sunt prezentate numeric în tabelele 1.2, 1.3 și grafic în figurile 1.92 și 1.93 pentru două viteze ale curentului de aer în camera de experiențe, $v_{aer} = 90 \text{ km/h}$ ($v_{aer} = 25 \text{ m/s}$) și $v_{aer} = 120 \text{ km/h}$ ($v_{aer} = 33 \text{ m/s}$) și o valoare a gărzii la sol $h = 65 \text{ [mm]}$. Pentru acest studiu, calea de rulare s-a reprodus ca suprafață fixă cu prag (punct de formare și control a stratului limită).

Rezultatele obținute relevă faptul că utilizarea unei configurații a geometriei structurii inferioare a automobilelor cu elemente de impact și de rezistență locală are efecte negative în ceea ce privește rezistența aerodinamică a automobilului datorită creșterii C_x și a sarcinilor aerodinamice verticale care generează portanță, cu efecte negative asupra aderenței pneurilor la calea de rulare și a stabilității și manevrabilității automobilului.

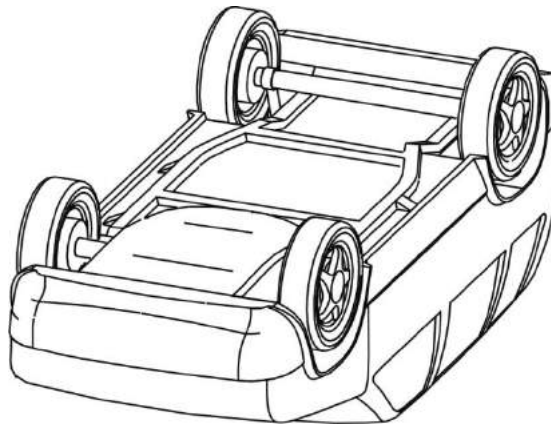


Fig. 1.90 – Geometria structurii inferioare a modelului cu elemente neprotejate din punct de vedere aerodinamic

Tabelul 1.2

h [mm].	$v_{aer} = 25 \text{ m/s}$		$v_{aer} = 33 \text{ m/s}$	
	C_x	C_z	C_x	C_z
65	0.434	0.199	0.446	0.204

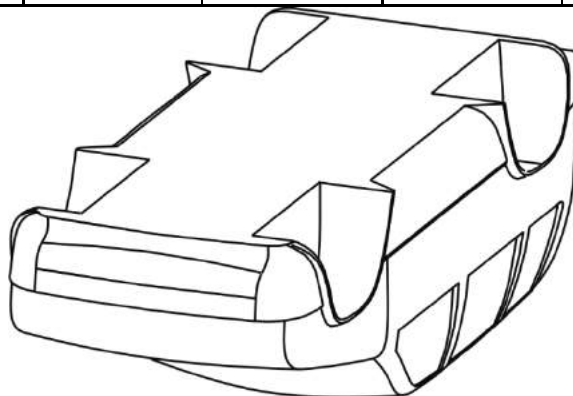


Fig. 1.91 – Geometria structurii inferioare a modelului care să genereze efectul Venturi, fără elemente de impact

Tabelul 1.3

h [mm].	$v_{aer} = 25 \text{ m/s}$		$v_{aer} = 33 \text{ m/s}$	
	C_x	C_z	C_x	C_z
65	0.380	-0.046	0.393	-0.014

De asemenea, pentru o configurație tunel Venturi a geometriei structurii inferioare a modelului se constată o îmbunătățire a caracteristicilor aerodinamice ale automobilului, în raport cu cazul precedent, mai semnificativă în cazul C_z care devine negativ. Astfel, utilizarea unei configurații a geometriei structurii inferioare a automobilelor, care favorizează apariția efectului

Venturi, este esențială în vederea obținerii unor forțe verticale deportante, ce măresc aderența pneurilor la sol și implicit stabilitatea și manevrabilitatea.

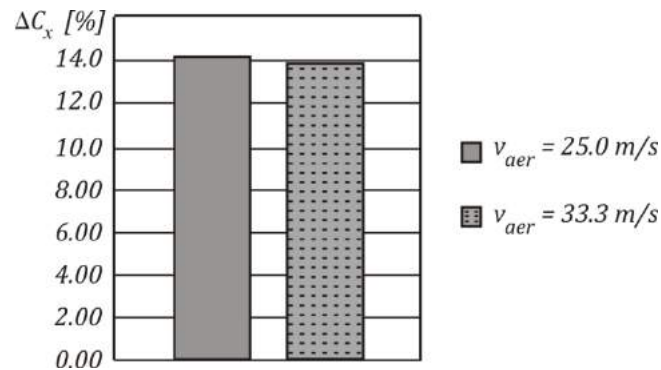


Fig. 1.92 – Variațiile ΔC_x [%] la modificarea geometriei structurii inferioare a modelului

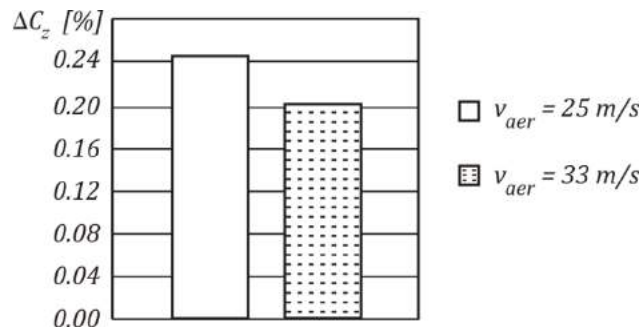


Fig. 1.93 – Variațiile ΔC_z [%] la modificarea geometriei structurii inferioare a modelului

1.5.3 Studiul influenței geometriei inferioare cu difuzorului asupra caracteristicilor aerodinamice ale automobilelor.

Studiul referitor la influența geometriei inferioare asupra caracteristicilor aerodinamice ale automobilelor a fost extins ulterior prin efectuarea unor teste referitoare la eficiența utilizării difuzoarelor. Astfel, utilizând o machetă de automobil la scara 1:5, având aria de referință $A_{ref} = 0.065 \text{ m}^2$, prezentată în figura 1.94, au fost analizate în raport cu varianta de bază două variante constructive de difuzor, după cum sunt prezentate în figura 1.95:

- plan simplu, sub un unghi $\alpha_d = 20^\circ$ și
- plan, $\alpha_d = 20^\circ$, racordat la caroserie cu o suprafață de curbură $r = 10 \text{ mm}$.

Valoarea raportului dintre lungimea difuzorului (l_d) și lungimea machetei automobilului (l) a fost $(l_d/l) = 0.15$.



Fig. 1.94 – Macheta de automobil (în camera de experiențe) echipat cu difuzor plan racordat

Testele au fost efectuate pentru o viteză a aerului $v_{aer} = 120 \text{ km/h}$ ($v_{aer} = 33.3 \text{ m/s}$), corespunzătoare unui număr Reynolds $Re = 1.45 \cdot 10^6$ calculat în funcție de lungimea machetei, $l = 0.7 \text{ m}$.

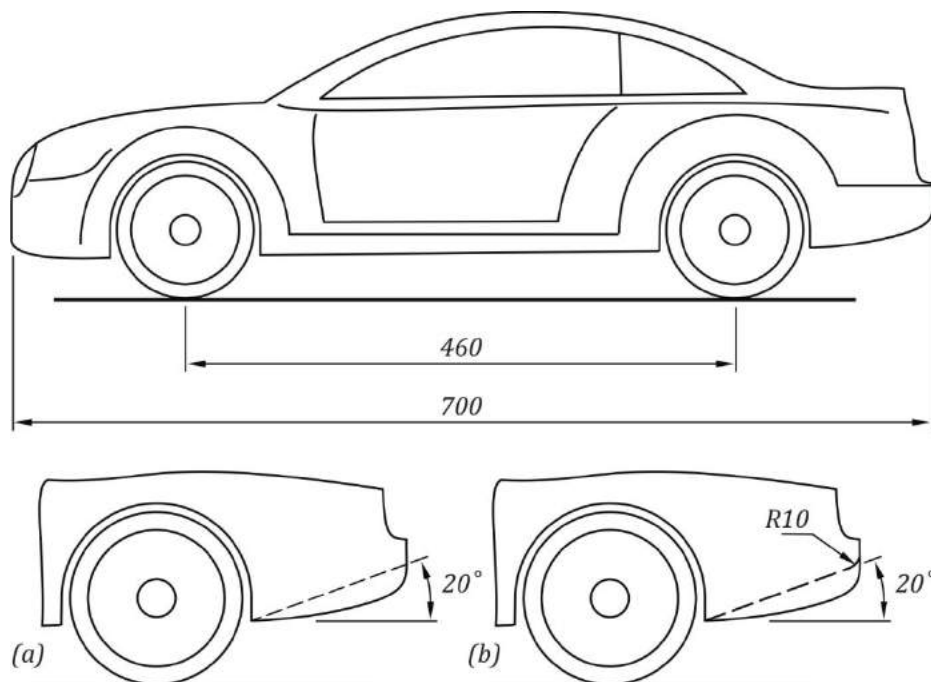


Fig. 1.95 – Tipurile de difuzoare studiate: (a) plan simplu, (b) plan racordat

În raport cu geometria de bază, au fost obținute următoarele valori ale coeficienților aerodinamici, prezentate numeric în tabelule 1.4 și 1.5.

Tabelul 1.4

<i>Configurație de bază (fără difuzor)</i>		<i>Configurație cu difuzor plan simplu</i>		<i>Configurație cu difuzor plan racordat</i>	
C_x	C_z	C_x	C_z	C_x	C_z
0.3961	-0.0705	0.3892	-0.0974	0.3863	-0.1032

Astfel, pentru cazurile studiate au fost înregistrate următoarele variații ale coeficienților aerodinamici relativ la valorile caracteristice configurației de bază $C_{xref} = 0.3961$, respectiv $C_{zref} = -0.0705$,

$$\Delta C_{x(i)} = \frac{C_{x(i)} - C_{xref}}{C_{xref}} 100 [\%], \quad \Delta C_{z(i)} = \frac{C_{zref} - C_{z(i)}}{C_{zref}} 100 [\%].$$

În urma experimentelor efectuate a rezultat că prin profilarea adecvată a geometriei inferioare a unui automobil utilizând un difuzor se pot obține reduceri ale coeficienților aerodinamici, descreșterea fiind mai semnificativă în cazul forței de portanță generată de acțiunea aerului asupra caroseriei.

Tabelul 1.5

<i>Configurație cu difuzor plan simplu</i>		<i>Configurație cu difuzor plan racordat</i>	
ΔC_x [%]	ΔC_z [%]	ΔC_x [%]	ΔC_z [%]
-1.74	-38.15	-2.47	-46.38

De asemenea, curgerea aerului prin difuzor poate fi îmbunătățită prin racordarea difuzorului plan la caroseria automobilului.

1.5.4 Studiul influenței metodei de reproducere a suprafeței de rulare asupra caracteristicilor aerodinamice (suprafață mobilă).

Dintre posibilitățile practice de reprezentare a căii de rulare și implicit a interacțiunii aerodinamice dintre aceasta și automobil, cele mai utilizate sunt următoarele:

- *metoda oglindirii*, utilizând un model identic cu cel studiat, plasat simetric față de primul (vezi figura 1.96); această metodă afectează negativ raportul de blocare al tunelului în cazul modelelor la scară 1:1, sau implică studii pe modele la scări subunitare; de asemenea, nu pot fi evidențiate structurile de vârtej generate de mișcarea roților;

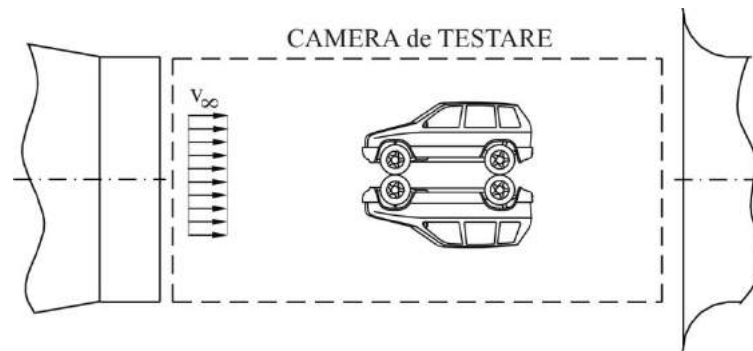


Fig. 2.9 - Reproducerea căii de rulare cu metoda oglinzirii

- *suprafață solidă fixă* (vezi figura 1.97); este cea mai simplă și mai des utilizată metodă, dar în acest mod nu se pune în evidență mișcarea relativă dintre vehicul și sol și cel mai adesea nici mișcarea de rotație a roților; între acestea și podea este necesară existența unui spațiu h necesar izolării modelului studiat și înregistrării corecte a forțelor aerodinamice; grosimea stratului limită (δ) poate fi micșorată prin utilizarea unei configurații cu prag, precum în figură, cu ajutorul căruia poate fi controlat punctul de formare a stratului limită, implicit și dezvoltarea acestuia;

Controlul grosimii stratului limită la nivelul suprafeței ce definește solul se mai poate realiza prin ejecție, sau prin sucțiune, după cum este prezentat în continuare.

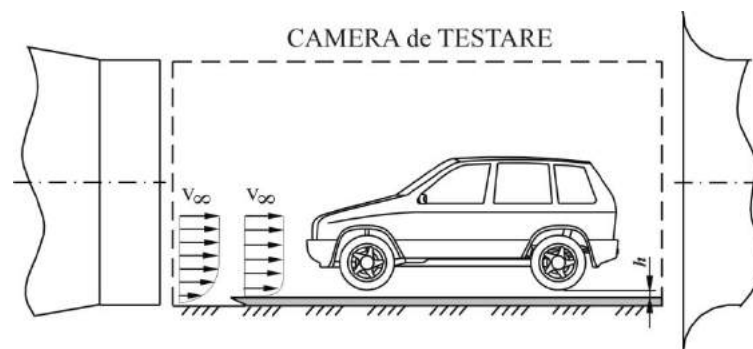


Fig. 1.97 – Reproducerea căii de rulare ca suprafață solidă, fixă, în configurație cu prag

- prin ejecție, suflând un curent de aer de grosime mică și viteză mare, tangențial la suprafața podelei (vezi figura 1.98), care să realizeze o distribuție de viteze acceptabil uniformă la nivelul secțiunii de testare prin micșorarea grosimii stratului limită la nivelul suprafeței ce reproduce calea de rulare;
- metoda anterior prezentată este îmbunătățită dacă se utilizează dispozitive de control a stratului limită la nivelul podelei, pe întreaga suprafață a acesteia; în figura 1.99 este ilustrată situația în care acest control se realizează prin sucțiune; principalul inconvenient este legat de dificultatea determinării vitezei de aspirație;

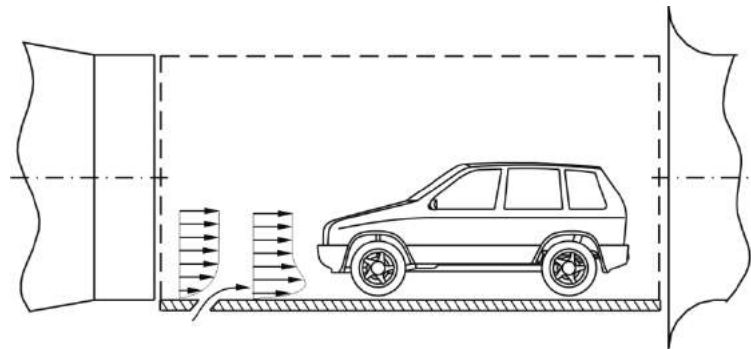


Fig. 1.98 - Reproducerea căii de rulare cu suprafață fixă controlând stratul limită prin ejecție

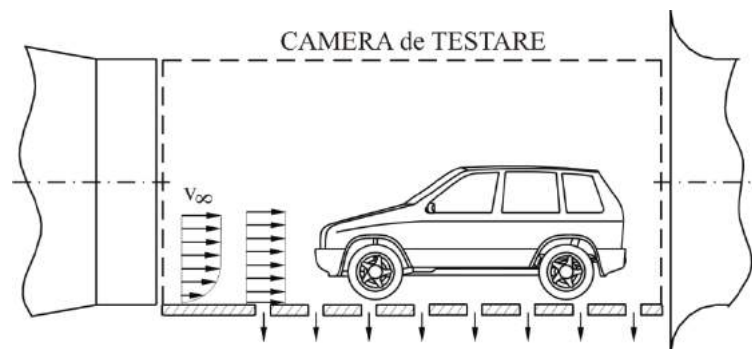


Fig. 1.99 - Reproducerea căii de rulare controlând stratul limită prin sucțiune

- cu bandă rulantă, cu antrenarea roților (figura 1.63) sau fără luarea în considerare a mișcării de rotație a roților, precum în figura 1.100; principalul inconvenient derivă din capacitatea limitată a benzii rulate de a suporta greutatea modelelor la scara 1:1; în cazul în care roțile sunt fixe, această capacitate se îmbunătățește; de asemenea, dimensiunile benzii rulante sunt limitate în raport cu cele ale modelelor studiate.

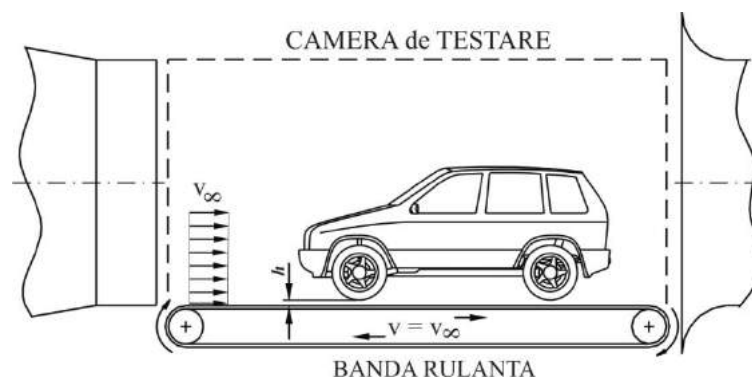


Fig. 1.100 - Reproducerea căii de rulare cu covor rulant (roți fixe)

Oricare dintre tehnici este utilizată la simularea efectului de sol în tunele aerodinamice trebuie avute în vedere:

- mărimile fizice δ , δ^* , θ ce definesc stratul limită și care trebuie reproduse; în situații reale, la o distanță mare în fața și spatele automobilului nu există strat limită la nivelul

solului, datorită absenței mișcării relative dintre aer și sol; de asemenea, câmpul de viteze și a grosimea stratului limită pot evolua diferit, în funcție de geometria vehiculului, unghiului de atac s.a.;

- metoda utilizată pentru reproducerea acestui fenomen.

Singura metodă care, în principiu, este capabilă să reproducă toate proprietățile stratului limită care se dezvoltă la nivelul solului în situații reale pentru un curent de aer uniform este cea în care se utilizează o bandă rulantă, evoluția grosimii stratului limită la nivelul benzii fiind prezentată în figura

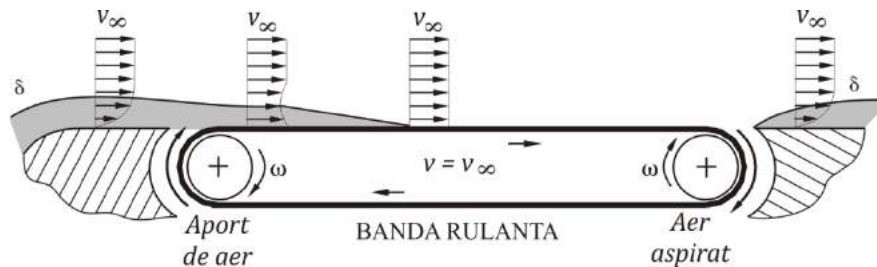


Fig. 1.100 - Evoluția stratului limită în cazul utilizării unui dispozitiv cu bandă rulantă

Totuși, realizarea acestor dispozitive, din punct de vedere tehnic, este departe de a rezolva toate problemele legate de simularea efectului de sol. Acestea se datorează în primul rând:

- dimensiunilor limitate ale benzii rulante în raport cu cele ale modelelor la scara 1:1;
- stabilității acestora în timpul funcționării (pot apare fenomene de flutter);
- dificultăților legate de corelarea mișcării benzii cu cea a roților s.a.

Ca și celelalte metode de simulare a efectului de sol, nici aceasta nu permite studii de aerodinamică cu vânt lateral.

În cele ce urmează sunt prezentate rezultatele unui studiu referitor la influența metodei de reproducere a căii de rulare, ca suprafață fixă și ca suprafață mobilă, asupra forțelor aerodinamice ce acționează asupra unei machete a automobilului de viteză prezentat în paragraful 1.4.3, utilizând dispozitivul cu covor rulant care echipează tunelul aerodinamic (vezi figura 1.96).

Pentru a corela ușor viteza de deplasare a benzii cu viteza curentului de aer, motorul de antrenare al benzii a fost echipat cu un variator electronic de turație.

După stabilirea dependenței dintre viteza curentului de aer din camera de testare și turația necesară motorului de antrenare, au fost efectuate o serie de teste cu modelul de automobil fixat de balanța aerodinamică și cu roțile în contact cu banda de antrenare a dispozitivului, având ca scop evidențierea influenței mișcării benzii de antrenare a roților asupra forțelor înregistrate de balanța aerodinamică.

S-a constatat că mișcarea benzii dispozitivului de reproducere a efectului de sol influențează valorile rezistenței aerodinamice. Practic, au fost înregistrate forțe după direcția de mișcare a benzii în absența acțiunii unui curent de aer. Astfel, la testele efectuate și cu tunelul aerodinamic în funcțiune, s-a ținut cont și de existența acestei influențe exercitată de dispozitivului cu bandă rulantă.



Fig. 1.96 – Modelul automobilului de viteză testat

Referitor la forța verticală deportantă, încărcările pe această direcție datorită acțiunii dispozitivului de simulare a efectului de sol au fost nule, acestea fiind preluate de suspensiile celor două punți.

Au fost efectuate două tipuri de încercări, fără și cu dispozitivul de reproducere a efectului de sol în acțiune pentru viteza de testare $v_{aer} = 21 \text{ m/s}$ ($v_{aer} = 75.6 \text{ km/h}$), înregistrându-se valorile forțelor aerodinamice F_x și F_z .

Variațiile ΔF_x și ΔF_z înregistrate datorită modificării metodei de reprezentare a căii de rulare au fost $\Delta F_x = +5\%$, respectiv $\Delta F_z = -420\%$, unde ca referințe au fost considerate valorile obținute în cazul căii de rulare fixă cu roți fixe.

După cum se observă, reproducerea căii de rulare utilizând un dispozitivul cu covor rulat (simularea efectului de sol) are ca rezultat o modificare a forțelor aerodinamice înregistrate, mult mai semnificativă în cazul forței de portanță, pentru care s-a înregistrat o valoare de peste 4 ori mai mare decât în cazul în care nu este simulată mișcarea relativă automobil – cale de rulare.

Rezultate ale cercetărilor experimentale au fost publicate în studiile [47, 57, 61].

Capitol 2

Studiul Structurilor Auxiliare cu Rol Aerodinamic în Construcția Caroseriilor.

2.1 Aripă deportantă de automobile. Metode de control al desprinderii stratului limită

După cum precizăm și în capitolul de introducere, la obținerea unor valori mici ale coeficienților aerodinamici contribuie și elementele auxiliare ale caroseriei, cu dublu rol, atât aerodinamic cât și estetic, precum deflectoarele, spoilerurile sau aripile deportante. Consecințele utilizării elementelor auxiliare cu rol aerodinamic sunt:

- reducerea rezistenței aerodinamice, implicit și reducerea consumului de combustibil,
- reducerea forței de portanță, creșterea apăsării aerodinamice, implicit și îmbunătățirea stabilității și manevrabilității autovehiculelor,
- reducerea zgomotului generat de interacțiunea caroserie – aer atmosferic și realizarea unui confort acustic adecvat pasagerilor și participanților în trafic.

În funcție de soluția constructivă adoptată, există mai multe tipuri de spoiler/eleroane. Frecvent utilizate sunt:

- spoiler fixe încastate, precum în figura 2.1,

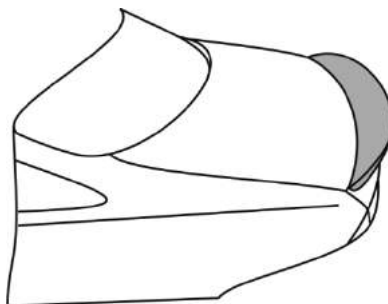


Fig. 2.1 – Spoiler fix încastat

- eleroane (aripi deportante) fixe, precum în figura 2.2,

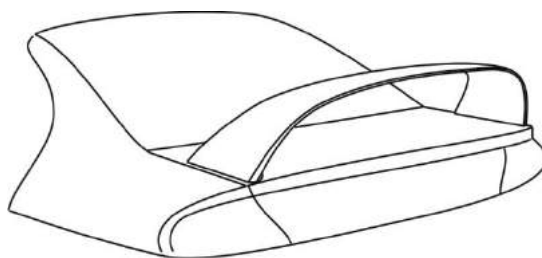


Fig. 2.2 – Eleron fix

- eleroane cu geometrie variabilă și reglare activă a suprafeței și poziției față de caroserie în funcție de viteza de deplasare a automobilului [11], figura 2.3.

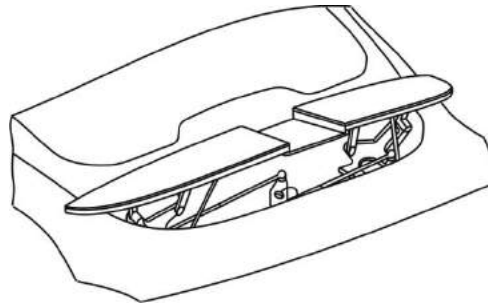


Fig. 2.2 – Aripă deportantă cu geometrie variabilă

Primele două tipuri de spoiler/eleroane au avantajul simplității din punct de vedere constructiv. Dezavantajul în funcționare derivă din faptul că poziția lor este fixă în raport cu caroseria, astfel încât forța aerodinamică generată de acestea are o valoare optimă (F_z/F_x) doar pentru un interval scurt al vitezei curentului de aer v_{aer} relativă la caroserie, stabilită de proiectant în concordanță cu destinația autovehiculului.

Pentru cazurile în care se dorește extinderea domeniului de optim al forței aerodinamice generate de eleroane în funcție de viteza de deplasare, se modifică caracteristicile geometrice ale eleronului referitoare la profilul și suprafața acestuia și/sau se modifică corespunzător poziția eleronului față de caroserie. Mecanismele de acționare utilizate prezintă dezavantajul unor construcții complicate, precum în cazul soluției prezentate în figura 2.3. De asemenea, nici această soluție nu elimină apariția fenomenului de desprindere a curentului de aer de pe intradosul aripilor deportante care conduce la creșterea rezistenței aerodinamice și scăderea forței deportante generate.

Desprinderea stratului limită are ca efect formarea *trenii de vârtejuri* (*dârei aerodinamice*), care reprezintă o măsură a rezistenței aerodinamice a structurilor care evoluează în curenți de fluid, după cum este ilustrat în figura 2.4(b) în cazul unui profil care evoluează la unghiuri mari de atac (α). Astfel, o trenă de vârtejuri mare corespunde unei rezistențe aerodinamice ridicate.

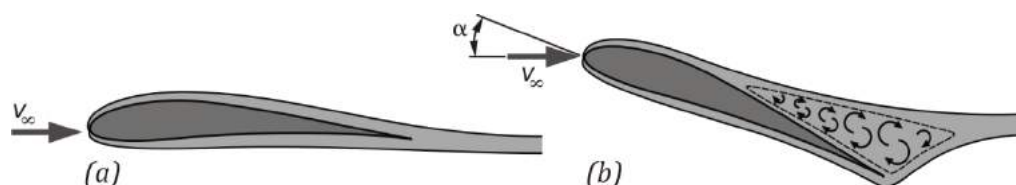


Fig. 2.4 – Desprinderea stratului limită și formarea trenii de vârtejuri

Pentru a controla desprinderea stratului limită de pe suprafețele structurilor aerodinamice se utilizează diverse metode, care pot fi grupate în:

- metode pasive, fără aport de energie din exterior, în care geometria structurii este modificată utilizând turbulatori al căror rol este acela de a accelera local curentul de fluid,

împiedicând în acest mod desprinderi masive ale acestuia, după cum este ilustrat în figura 2.5,

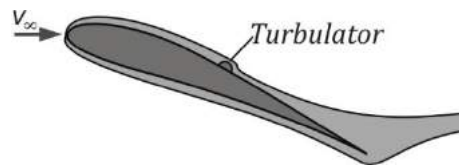


Fig. 2.5 – Controlul desprinderii stratului limită prin metode pasive

- metode active, cu aport de energie din exterior, în care controlul activ al curgerii se realizează prin suflarea stratului limită, precum în cazul utilizării efectului Coandă, ilustrat în figura 2.6;

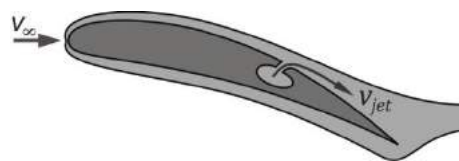


Fig. 2.6 – Controlul desprinderii stratului limită prin metode active

Efectul Coandă reprezintă fenomenul de atașare a jeturilor de fluid pe suprafețele curbe peste care curg. Poartă numele savantului român Henri Coandă care l-a observat pentru prima dată în 1910 în timpul testării unuia dintre avioane sale (Coandă-1910, primul avion cu reacție care a zburat). Astfel, în timpul zborului, Coandă a putut observa alipirea jeturilor de gaze arse de fuselajul avionului, deși evacuarea acestora se făcea transversal față de axa fuselajului. Ulterior, prin studierea și înțelegerea acestui fenomen, Henri Coandă trece la utilizarea practică a acestuia. Astfel, obține o serie de brevete de invenție, primul dintre ele în anul 1934 (Franța): *Procedeu și dispozitiv pentru devierea unui fluid într-un alt fluid*. Acesta este urmat și de alte invenții precum *Aerodina Lenticulară*, *Dispozitiv pentru îmbunătățirea randamentului motorului cu combustie internă*, *Frâna de recul pentru armele de foc* etc. În total, pe parcursul întregii cariere științifice, Henri Coandă a obținut 215 brevete de invenție referitoare la dispozitive ce utilizează efectul Coandă și poartă și numele.

Un efect similar se obține și prin utilizarea unor fante profilate adecvat prin care curenții având energie cinetică ridicată sunt dirijați în zonele cu gradient de presiune nefavorabil, figura 2.7.



Fig. 2.7 – Controlul stratului limită utilizând fantă bord de fugă (BF)

Cercetările efectuate în domeniu au condus la numeroase utilizări practice ale efectului Coandă, precum propulsia și sustentarea vehiculelor aeriene, îmbunătățirea turbinelor cu gaze, amplificatoare cu fluide, aparate pneumatice, amortizoare de zgomote, condiționarea aerului,

transportul pneumatic etc. În România, efectul Coandă a fost studiat de către numeroși cercetători, precum ing. C. Teodorescu-Țintea (INCREST București) și dr. ing. V. Benche (Universitatea Transilvania din Brașov). Dintre dispozitivele, funcționând pe baza efectului Coandă, concepute și brevetate de cei doi menționați anterior, semnificative sunt:

- Teodorescu-Țintea, C., *Rețelele de voleți depresivi*, cunoscute în prezent sub denumirea de rețele Teodorescu-Coandă,
- Teodorescu-Țintea, C., *Turbină radială cu palete depresive*,
- Teodorescu-Țintea, C., *Amortizor de zgomot pentru motoarele cu combustie internă și pentru turbomotoarele de avion*,
- Benche, V., Benche, L., *Vent-ejector cu volet depresiv*,
- Benche, V., Benche, L., *Vent-ejector*,
- Benche V., Benche L., *Vent-ejector cu tambur depresiv*.

Aflându-se la baza a numeroase aplicații, efectul Coandă este, fără îndoială, una dintre cele mai reprezentative mărci ale tehnicii românești.

Recent, acest fenomen a început să fie exploatat și în domeniul construcției de automobile. Sunt semnalate [62] în acest sens preocupările unui grup de cercetători de la Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași care utilizează efectul Coandă la dispozitivele de control al debitului aerului de răcire la motoarele cu ardere internă.

De asemenea, studiile proprii [63, 64, 65, 66] au evidențiat avantajele utilizării ejecției Coandă la îmbunătățirea performanțelor aerodinamice ale structurilor aerodinamice deportante ale autovehiculelor. Procedeele propuse și studiate constă în controlul curgerii aerului pe intradosul structurii (eleron/difuzor), utilizând un dispozitiv cu ejecție, prin fante care realizează efectul Coandă, la care viteza inițială de lansare a jetului $v_{0\text{jet}}$ este corelată cu viteza relativă de referință a curentului de aer v_{aer} astfel încât să nu apară fenomenul de desprindere a stratului limită de pe intradosul structurii, după cum este prezentat schematic în figura 2.8.

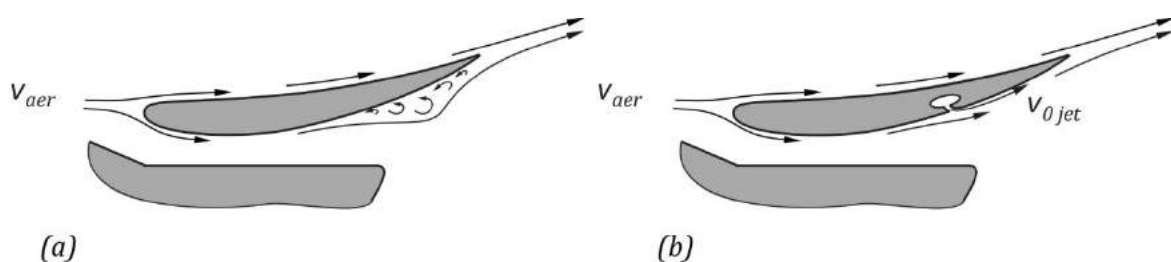


Fig. 2.8 – (a) *Curgerea în jurul unui eleron fără control al stratului limită,*
(b) *Controlul stratului limită la curgerea în jurul unui eleron*
utilizând efectul Coandă

Așadar, această metodă poate fi utilizată pentru creșterea forței de apăsare aerodinamică a autovehiculelor F_z , generată de spoilerii și/sau eleroane, precum și de geometria inferioară a automobilelor (figura 2.9) în cazul în care aceasta a fost profilată adecvat, îmbunătățindu-se astfel comportamentul dinamic în ceea ce privește stabilitatea, manevrabilitatea și forța de rezistență aerodinamică F_x .

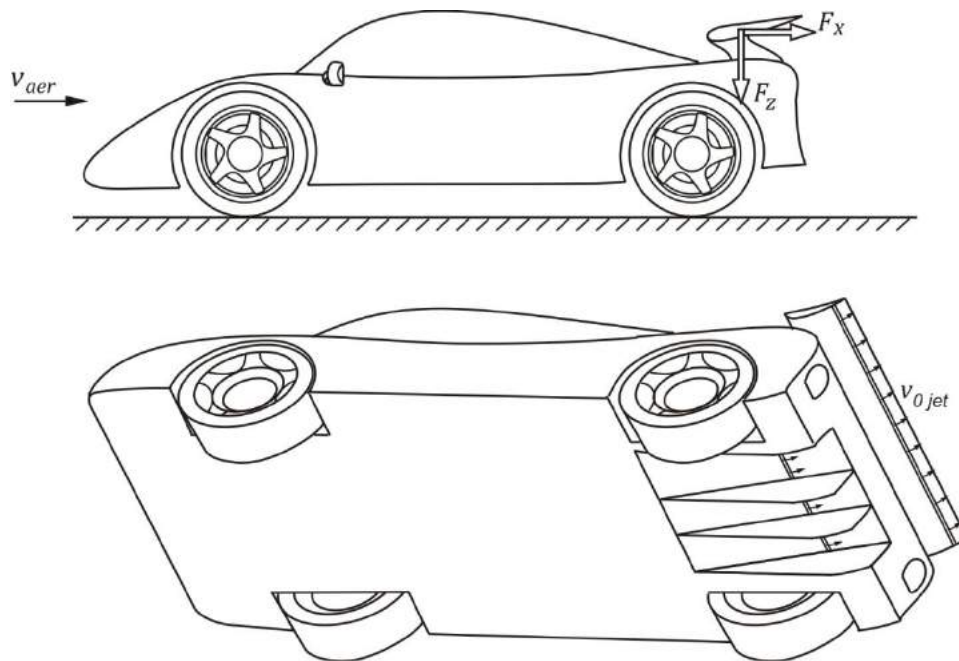


Fig. 2.9 – Automobil echipat cu eleron și geometrie inferioară asistate de efectul Coandă

În acest sens, analizele CFD [63] efectuate pentru un profil deportant *Epler E205* plasat sub un unghi de atac de $\alpha = -5^\circ$, în efect de sol, au confirmat îmbunătățirea (semnificativă) caracteristicilor aerodinamice ale profilului (creșterea forței deportante și micșorarea rezistenței aerodinamice) în cazul în care este utilizată ejecția Coandă pentru a controla curgerea aerului în jurul profilului.

Față de soluțiile utilizate în mod curent, cu spoilere/eleroane acționate mecanic pentru a putea controla forța deportantă generată, această soluție prezintă avantajul îmbinării simplității constructive (eleron fix, fără componente în mișcare relativă) cu cel al posibilității de control al forței aerodinamice deportante generate. Se poate obține în acest mod o valoare optimă a forței de apăsare aerodinamică pe spoiler în întreg intervalul de viteze de deplasare a autovehiculului.

În paragrafele următoare sunt prezentate rezultatele studiilor proprii referitoare la utilizarea eleroanelor/aripilor deportante asistate de efect Coandă în construcția automobilelor, precum și posibilitățile de îmbunătățire a performanțelor acestora.

2.2 Studiul experimental al unui eleron de automobil

În acest paragraf sunt prezentate rezultatele unui studiu referitor la influența unei aripi deportante asupra caracteristicilor aerodinamice ale unui automobil. Pentru aceasta, macheta prezentată în paragraful 1.5.3 a fost echipată cu un eleron deportant, curb în arc de cerc $r_{med} = 54 \text{ mm}$, având coarda $c = 55 \text{ mm}$ și anvergura $b = 200 \text{ mm}$, raportul dintre anvergura și lățimea mechetei având valoarea 0.75.

Acesta a fost poziționat în raport cu caroseria automobilului la o distanță h , după cum este prezentat în figura 2.10.

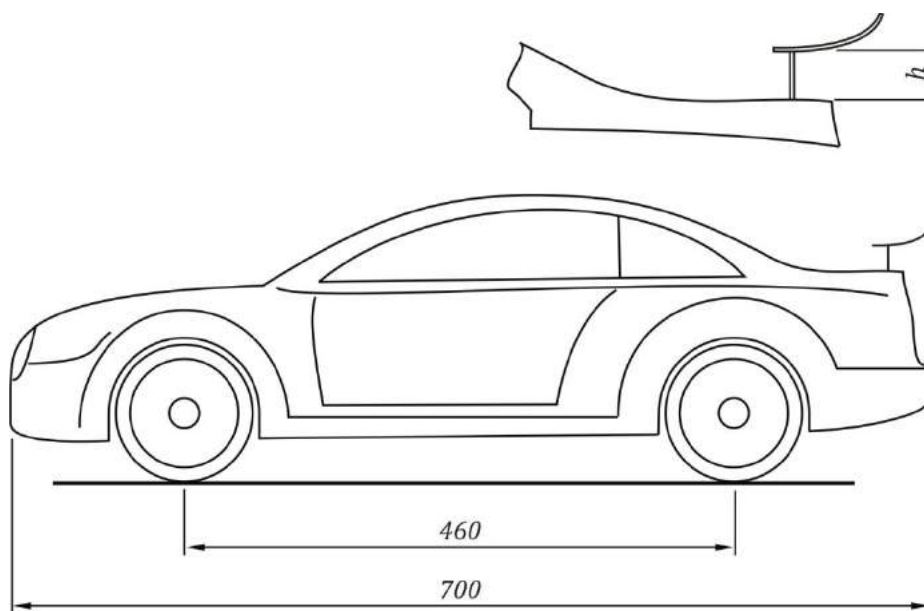


Fig. 2.10 – Poziția eleronului în raport cu caroseria automobilului

Și în acest caz, experimentele s-au desfășurat utilizând infrastructura laboratorului de aerodinamică, anterior prezentat, figura 2.11.



Fig. 2.11 – Macheta automobilului echipat cu eleron în camera de experiențe

În raport cu varianta de bază, au fost studiate trei poziții (h) ale eleronului, caracterizate de următoarele rapoarte

$$\frac{h}{l} = \frac{15}{700}, \quad \frac{h}{l} = \frac{25}{700} \quad \text{și} \quad \frac{h}{l} = \frac{35}{700},$$

calculate în raport cu lungimea machei, $l = 700 \text{ mm}$.

Testele au fost efectuate pentru o viteză a aerului $v_{aer} = 120 \text{ km/h}$ ($v_{aer} = 33.3 \text{ m/s}$), corespunzătoare unui număr Reynolds $Re = 1.45 \cdot 10^6$ calculat în funcție de lungimea machetei, fără simularea efectului de sol

Valorile coeficienților aerodinamici sunt prezentate numeric în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1

Configurație de bază (fără eleron)		$\frac{h}{l} = \frac{15}{700}$		$\frac{h}{l} = \frac{25}{700}$		$\frac{h}{l} = \frac{35}{700}$	
C_x	C_z	C_x	C_z	C_x	C_z	C_x	C_z
0.3961	-0.0705	0.4363	-0.0846	0.4602	-0.0909	0.4696	-0.0928

După cum se observă, forța de portanță care acționează asupra caroseriei echipată cu un eleron deportant scade în raport cu configurația de bază (fără eleron), având valori negative. Deși caroseria cu echipată cu eleron prezintă avantajul unei forțe de portanță scăzută (încărcare aerodinamică mai mare), acesta creștere a încărcării aerodinamice (efect pozitiv) este însoțită și de creșterea forței de rezistență la înaintare (dezavantaj), implicit și de creșterea consumului de combustibil.

De asemenea, după cum se observă, odată cu creșterea înălțimii poziției eleronului crește atât forța de apăsare aerodinamică cât și forța de rezistență aerodinamică.

Pentru experimentele efectuate au fost înregistrate următoarele variații ale coeficienților aerodinamici relativ la valorile caracteristice configurației de bază $C_{x_{ref}} = 0.3961$, respectiv $C_{z_{ref}} = -0.0705$,

$$\Delta C_{x(i)} = \frac{C_{x(i)} - C_{x_{ref}}}{C_{x_{ref}}} 100 [\%], \quad \Delta C_{z(i)} = \frac{C_{z_{ref}} - C_{z(i)}}{C_{z_{ref}}} 100 [\%].$$

Tabelul 2.2

$\frac{h}{l} = \frac{15}{700}$		$\frac{h}{l} = \frac{25}{700}$		$\frac{h}{l} = \frac{35}{700}$	
ΔC_x [%]	ΔC_z [%]	ΔC_x [%]	ΔC_z [%]	ΔC_x [%]	ΔC_z [%]
10.15	-20.00	16.18	-28.94	18.55	-31.63

Astfel, în raport cu rezultatele prezentate în paragraful 1.5.3, soluția utilizării unui difuzor e mai avantajoasă, atât prin prisma scăderii forței de portanță, cât mai ales datorită descreșterii rezistenței aerodinamice.

Cele două soluții pot fi utilizate simultan în cazurile în care sunt necesare descreșteri semnificative ale forței de portanță.

Prin vizualizarea curgerii aerului în jurul caroseriei, figurile 2.12 și 2.13, a fost evidențiat fenomenul de desprindere a curentului de aer de pe suprafața eleronului, care apare atunci când poziția acestuia este maximă în raport cu caroseria automobilului.

De asemenea, în cazul machetei de automobil în configurația de bază, fără eleron, dâra aerodinamică în planul longitudinal al curgerii este definită de o singură structură de vârtejuri, care este orientată către calea de rulare.

În cazul utilizării eleroanelor, mai apare o structură de vârtej distinctă, datorită curgerii în jurul eleronului, evidențiată în figura 2.13 și care contribuie la creșterea rezistenței aerodinamice.



Fig. 2.12 – Aspectul trenei de vârtejuri în cazul automobilului fără eleron deportant



Fig. 2.13 – Aspectul trenei de vârtejuri în cazul automobilului echipat cu eleron deportant

2.3 Studiul teoretic al structurilor deportante de automobile asistate de efectul Coandă

Pentru acest studiu se pornește de la exemplul în figura 2.14, în care este prezentat schematic profilul aerodinamic al unui eleron (spoiler) deportant de automobil, asistat de efectul Coandă pe suprafața inferioară, intradosul profilului pentru cazul de față, împreună cu un detaliu referitor la construcția și alimentarea dispozitivului de ejecție al aripii deportante.

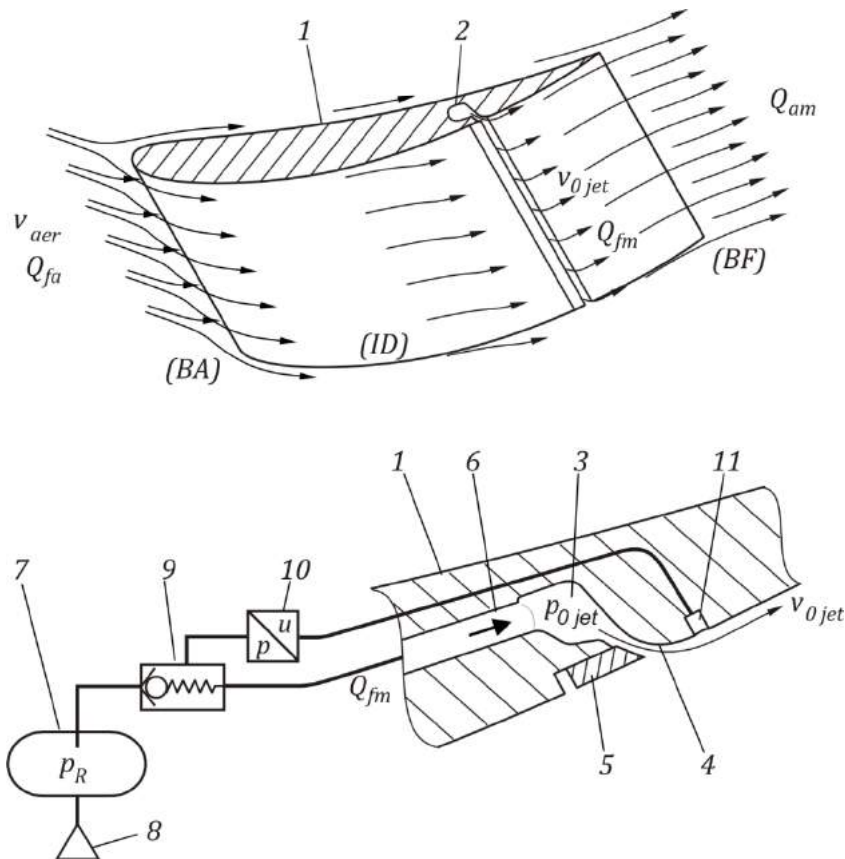


Fig. 2.14 – Principiul eleronului deportant asistat de efectul Coandă

Astfel, dispozitivul cu ejecție (2) se compune dintr-o cameră de presiune constantă (3) și ajutoraj (fantă/fante) de lansare a fluidului activ, format între suprafața (curbă) depresivă (4) și corpul de reglare al fantei (5). Dispozitivul cu ejecție este plasat în interiorul aripii deportante (1), pe toată anvergura acesteia, cu ajutorajul de ejecție poziționat pe intradosul aripii, în jumătatea dinspre bordul de fugă (BF), raportat la lungimea caracteristică (c) a aripii deportante, măsurată între bordul de atac (BA) și bordul de fugă (BF). Suprafața depresivă, convexă, este astfel profilată încât, în corelație cu lățimea fantei/fantelor, să genereze efectul Coandă pentru fluidul motor, respectiv de atașare a acestuia la indradosul aripii deportante.

Alimentarea cu fluid de lucru a dispozitivului de ejecție se face prin conducta (6) de la un rezervor de acumulare (7), alimentat la rândul său de la o sursă de putere (compresor) (8). Conducta de alimentare este prevăzută cu supapă unisens (9) între rezervorul de acumulare și dispozitivul de ejecție. Funcționarea sursei de presiune are loc până când în rezervorul de

acumulare se atinge presiunea p_R , a cărei valoare poate fi fixă, prestabilită, sau în funcție de viteza de deplasare a autovehiculului, realizându-se în acest mod corelarea vitezei inițiale de lansare jetului de fluid $v_{o\ jet}$ cu viteza relativă a curentului de aer la caroserie v_{aer} . Deschiderea supapei unisens (9) se face în momentul în care are loc apariția fenomenului de desprindere a curentului de aer de pe extradrosul aripii deportante, la indicația unui senzor de presiune (10) conectat la o priză de presiune (11) plasată pe intradosul aripii deportante, între fanta de lansare a fluidului de lucru și (BF).

Stabilirea cotei de poziție a fantei de lansare a jetului, dimensiunea acesteia, poziția prizei de presiune statică și dependența $v_{o\ jet} = f(v_{aer})$ se fac în funcție de caracteristicile geometrice ale eleronului și profilul aerodinamic utilizat, astfel încât să nu apară fenomenul de desprindere a curentului de aer de pe intradosul aripii deportante în timpul rulării autovehiculului.

Din punct de vedere funcțional, datorită depresiunii generate de jetul de fluid lansat prin fantă pe intradosul aripii deportante (fluid motor, fm), având debitul $(Q_m)_{fm} = \rho_{fm} Q_{fm}$, o masă suplimentară de aer este antrenată (fluid antrenat, fa), cu debitul masic $(Q_m)_{fa} = \rho_{fa} Q_{fa}$, rezultând un amestec (am) de debit $(Q_m)_{am} = \rho_{am} Q_{am}$.

Bilanțul masic al amestecului de fluide este descris de ecuația

$$(Q_m)_{am} = (Q_m)_{fm} + (Q_m)_{fa}, \quad (2.1)$$

iar ecuația bilanțului de putere este

$$\begin{aligned} P_{fm} + P_{fa} = P_{am} &\Leftrightarrow \left(Q_m \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right)_{fm} + \left(Q_m \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right)_{fa} = \\ &= \left(Q_m \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right)_{am}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Prin raportare la debitul masic al fluidului motor, $(Q_m)_m$, ecuația anterioară devine

$$\left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right)_{fm} + u \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right)_{fa} = (1 + u) \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right)_{am}, \quad (2.3)$$

unde u reprezintă coeficientul adimensional de inducție (amplificare) fluidică, de creștere a circulației aerului pe intradosul aripii deportante, definit ca raport între debitul masic al fluidului antrenat și debitul masic al fluidului motor

$$u = \frac{(Q_m)_{fa}}{(Q_m)_{fm}}. \quad (2.4)$$

În cazul unei aripi asistată de efectul Coandă, pentru forța deportantă (F_z^C) a fost propusă următoarea relație determinată în urma experimentelor efectuate pe ventejectoare asistate de efectul Coandă [67]

$$F_z^C = (1 + u)^2 F_z = (1 + u)^2 \frac{\rho_{\infty} v_{\infty}^2}{2} S C_z \quad (2.5)$$

unde F_z este forța de portanță generată de aripă în absența efectului Coandă,

$$F_z = \frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2} S C_z, \quad (2.6)$$

S este aria de referință a aripii, respectiv produsul dintre anvergură (b) și coardă (c),

$$S = b c,$$

C_z este coeficientul de portanță al aripii în absența efectului Coandă,

Astfel, se poate defini un coeficient de amplificare al forței deportante (C_{F_z}), ca raport între forța de portanță generată de aripă în absența efectului Coandă (F_z) și forța deportantă cu efect Coandă (F_z^C)

$$C_{F_z} = \frac{F_z}{F_z^C} = (1 + u)^2. \quad (2.8)$$

În figura 2.15 este prezentată dependența coeficientului de amplificare de coeficientul adimensional de inducție, din care se observă că la o creștere a u , implicit și a vitezei inițiale de lansare a jetului Coandă, crește forța deportantă generată.

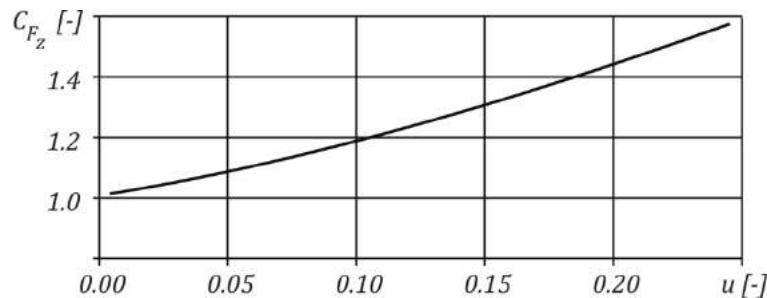


Fig. 2.15 - Variația C_{F_z} în funcție de u

Pentru determinarea influenței ejecției Coandă asupra performanțelor aripiilor deportante se propun următorii indicatori energetici:

- K_{F_z} de valorificare a puterii fluidice motoare, P_{fm}

$$K_{F_z} = \frac{F_z^C}{P_{fm}} = C^L \frac{L}{\left(Q_m \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right)_{fm}} \left[\frac{N}{W} \right], \quad (2.9)$$

- $K_C = K_{L_z}^{-1}$ de consum motor specific unitar.

Se pot determina astfel oportunități de creștere a eficienței aripiilor deportante asistate de efectul Coandă.

De asemenea, calculele efectuate pentru determinarea necesarului de energie fluidică au relevat că eleroanele deportante asistate de efect Coanda pot funcționa eficient în regim

intermitent, ca o măsură suplimentară de protecție care să împiedice pierderea aderenței pe puntea spate a unui automobil.

2.4 Studiul numeric al structurilor deportante de automobile asistate de efectul Coandă

După cum am menționat și în capitolul anterior, dezvoltarea unor programe de calcul CFD adecvate, concomitent cu creșterea performanțelor mașinilor de calcul fac ca evaluarea caracteristicilor structurilor aeromecanice pe cale numerică să devine tot mai atractivă.

În următoarele paragrafe sunt prezentate rezultatele unor studii proprii referitoare la aerodinamica eleroanelor (aripi deportante de automobile)

2.4.1 Studiul unui profil aerodinamic asistat de efectul Coandă, în efect de sol

Pentru acest studiu a fost utilizat un profil aerodinamic Clark-Y (11%), ale cărui caracteristici aerodinamice sunt bine cunoscute datorită numeroaselor studii experimentale, precum cel efectuat de Silverstein [68]. Profilul a fost studiat în ambele configurații:

- profil deportant în curent liber, această analiză (A1) fiind utilizată și pentru determinarea acurateței soluției și
- profil deportant în proximitatea unei suprafețe solide (A2), situație specifică aplicațiilor din industria constructoare de automobile, fără efect Coandă, precum în figura 2.16,
- profil deportant în proximitatea unei suprafețe solide, asistat de efectul Coandă (A3 și A4).

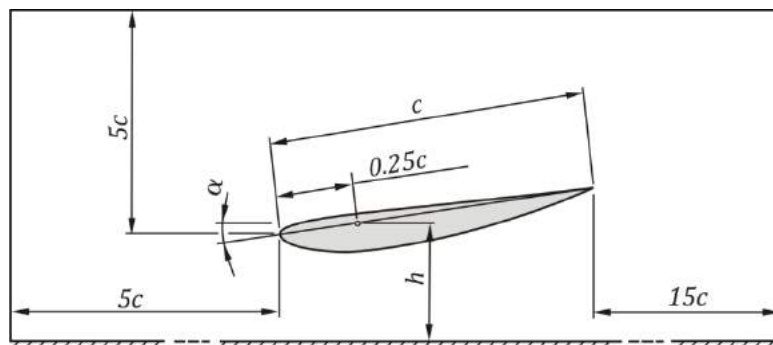


Fig. 2.16 – Profilul Clark-Y (11.7 %) în configurație doportantă și efect de sol (perete)

Definirea domeniilor de analiză și grilele generate, precum și modelul de calcul utilizat și condițiile de referință au fost similare studiilor prezentate în primul capitol. În cele ce urmează sunt evidențiate doar principalele informații referitoare analizele efectuate și rezultatele obținute.

Astfel, profilul modelat ca geometrie CAD având lungimea caracteristică $c = 200 \text{ mm}$ (coarda) a fost plasat în interiorul unui domeniu de analiză rectangular, ale cărui dimensiuni au fost:

- $5c$ în față și deasupra, măsurate din bordul de atac,

- $15c$ în spatele profilului, măsurată din bordul de fugă,
- h distanța dintre centrul aerodinamic al profilului și frontiera ce definește solul.

Grila generată a fost de tip multi-bloc, cu elemente triunghiulare în interiorul domeniului de calcul și patrulaterare la nivelul frontierelor profilului pentru o definiție cât mai bună a zonei de strat limită, după cum se poate observa în figura 2.17, care prezintă un detaliu din zona bordului de atac.

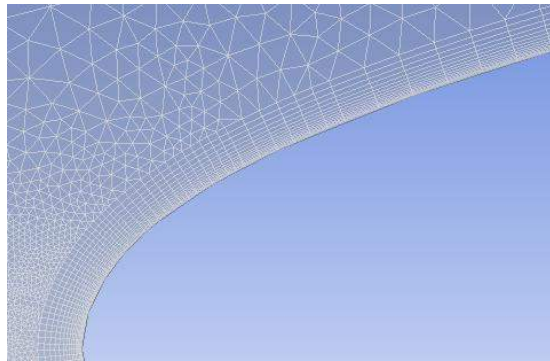


Fig. 2.17 – Grila de discretizare pentru profilul Clark-Y, Detaliu

În urma procesului de discretizare a domeniului de calcul, dimensiunea grilei generate a fost:

- 151.595 puncte de calcul pe întreg domeniul, dintre care
- 1.149 puncte de calcul pe conturul profilului.

De asemenea, simulările au fost efectuate în condiții de curgere permanentă, adiabatică, fără variația densității și vâscozității aerului atmosferic, considerat la temperatura și presiunea corespunzătoare atmosferei standard, $T_{aer} = 288 K$ ($t_{aer} = 15^\circ C$), respectiv $p_{aer} = 101325 N/m^2$, pentru care densitatea și vâscozitatea aerului au valorile $\rho_{aer} = 1.225 kg/m^3$, respectiv $\mu_{aer} = 1.785 \cdot 10^{-5} kg/(m s)$.

Condițiile pe frontierele domeniului analizat s-au impus corespunzător analizelor efectuate, după cum au fost prezentate și în paragrafele din capitolul anterior.

Profilul a fost plasat într-un curent de aer cu viteza $v_\infty = 40 m/s$ ($Re = 5.0 \cdot 10^5$), sub un unghi de atac $\alpha = 5^\circ$ (în sens trigonometric) și o gardă la sol $h = 0.5c$, precum în cazul unei aripi deportante de automobil.

Și în acest caz, pentru închiderea sistemului de ecuații (1.28) a fost utilizat modelul de turbulență *Shear-Stress-Transport (SST)*, acesta asigurând o acuratețe foarte bună a soluțiilor, după cum a fost prezentat anterior.

Pentru analizele profilului asistat de efectul Coandă, a fost considerat pe intradosul profilului un ajutor de lansare a jeturilor (fantă submilimetrică) având lățimea inițială $\delta = 0.7 mm$, după cum este prezentat în figura 2.18.

Studiul profilului asistat de efectul Coandă a fost efectuat pentru două viteze inițiale ale jetului, $v_{1jet} = 50 m/s$ și $v_{2jet} = 75 m/s$.

Rezultatele obținute în urma soluționării proceselor de curgere au fost studiate atât din punct de vedere calitativ, cât și cantitativ. Astfel, din punct de vedere calitativ au fost analizate câmpurile de viteze (afișaj multi-contur) în domeniile de curgere, precum în figurile 2.19, 2.20, 2.21 și 2.22.

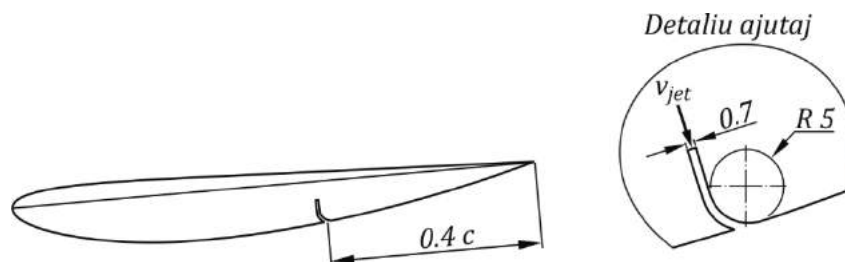


Fig. 2.18 – Poziționarea și geometria Ajutajului de lansare a jeturilor

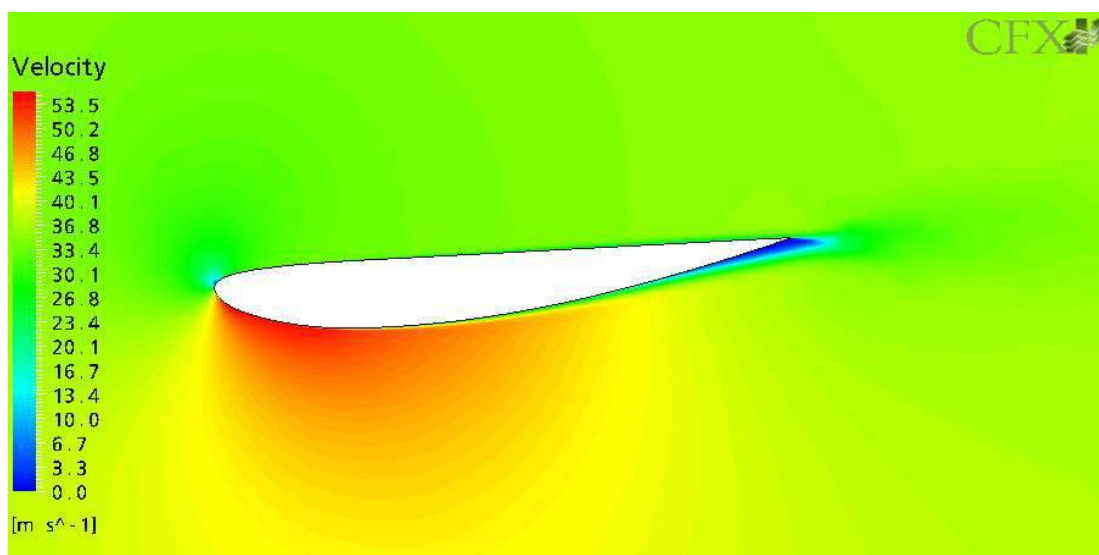


Figura 2.19 – Câmpul de viteze în jurul profilului în curent liber, (A1)

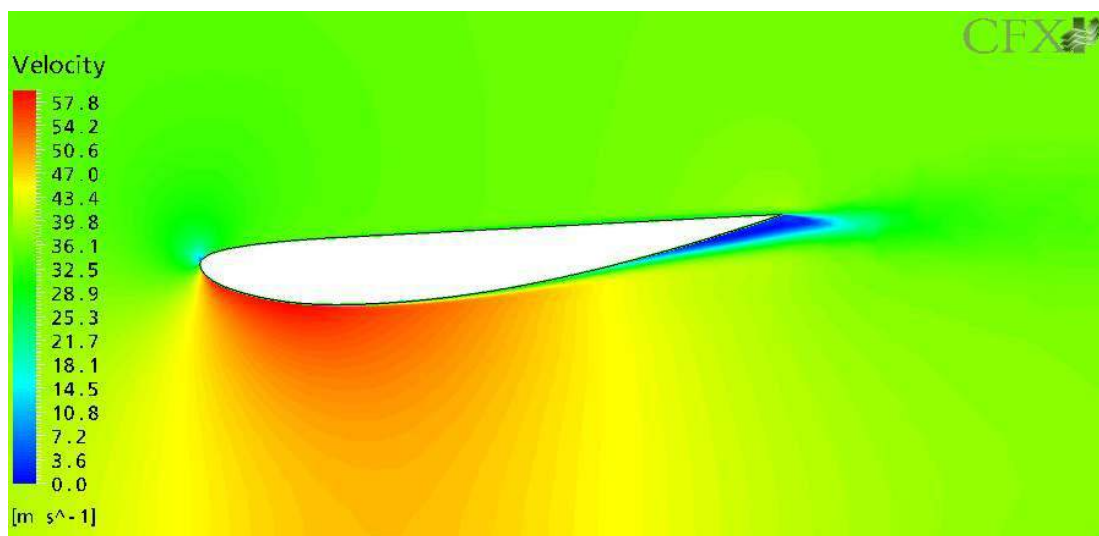


Figura 2.20 – Câmpul de viteze în jurul profilului în efect de sol, (A2)

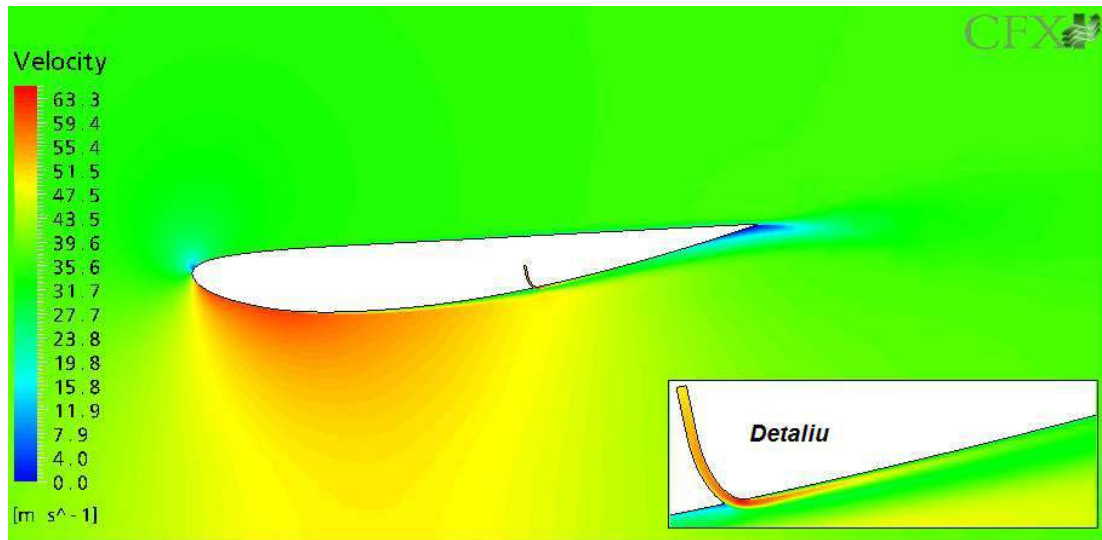


Figura 2.21 – Câmpul de viteze în jurul profilului în efect de sol, asistat de efect Coandă, $v_{1jet} = 50 \text{ m/s}$, (A3)

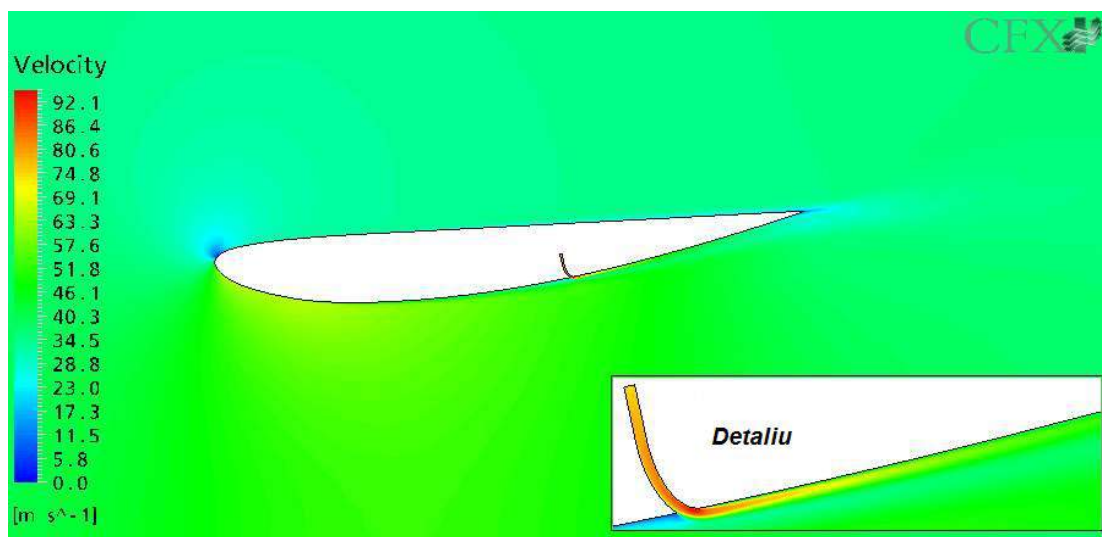


Figura 2.22 – Câmpul de viteze în jurul profilului în efect de sol, asistat de efect Coandă, $v_{2jet} = 75 \text{ m/s}$, (A4)

Pentru validarea grilei de discretizare și modelului numeric utilizat, rezultatele obținute în Analiza 1 au fost comparate cu cele furnizate de Silverstein [68] pentru o valoare a numărului Reynolds $Re = 1.1 \cdot 10^6$ (disponibile în literatura de specialitate), figura 2.23, prezentate de asemenea și în studiul propriu [14].

După cum se observă, abaterile valorilor numerice față de cele experimentale în acest caz sunt satisfăcătoare, $\Delta C_z, \Delta C_x \cong 6 \%$, valorile acestora fiind influențate în principal de diferența de număr Reynolds. După cum am arătat în studiul propriu, abaterile uzuale sunt semnificativ mai mici, $\Delta C_z, \Delta C_x < 3 \%$.

Referitor la rezultatele obținute, acestea indică o creștere semnificativă a zonei de recirculare care apare pe intrados în bordul de fugă (zona cu viteze mici, de culoare albastră) în cazul (A2) în care profilul evoluează în efect de sol (este plasat în apropierea unei frontiere

solide), aspectul câmpului de viteze indicând apariția fenomenului de desprindere a stratului limită și implicit creșterea rezistenței aerodinamice a profilului.

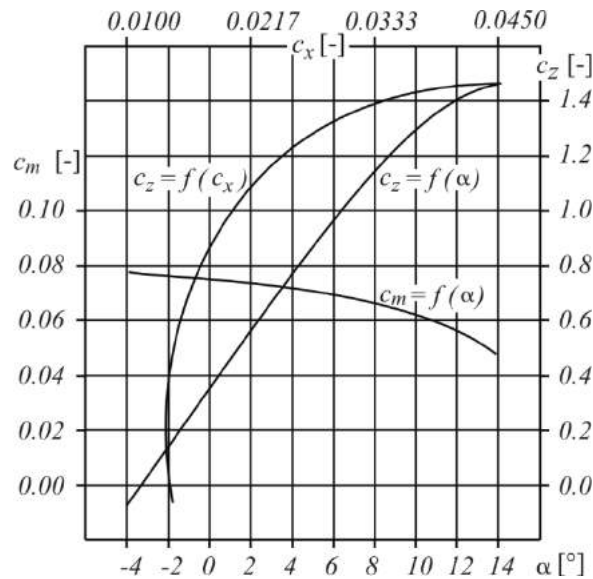


Figura 2.23 – Polarele profilului Clark-Y (11.7 %) pentru $Re = 1.1 \cdot 10^6$, [68]

De asemenea, se constată o creștere a vitezei curentului pe intradosul profilului (~10 %) datorită efectului Venturi care apare la curgerea aerului prin spațiul delimitat de profil și frontiera solidă, indicând creșterea forței deportante generate în cazul evoluției în efect de sol.

Zona de pe intradosul profilului afectată de desprinderea stratului limită este semnificativ redusă (figura 2.21) în cazul (A3) în care profilul este asistat de efectul Coandă, $v_{1jet} = 50 \text{ m/s}$, sau este complet eliminată (figura 2.22) pentru situația (A4) în care $v_{2jet} = 75 \text{ m/s}$. Se constată, de asemenea, creșteri suplimentare ale vitezei curentului pe intradosul profilului asistat de efectul Coandă (A3, A4).

Din punct de vedere cantitativ au fost evaluați coeficienții aerodinamici ai profilului pentru cele 4 situații studiate precum și variația coeficientului de presiune (c_p) pe conturul profilului, rezultatele obținute fiind prezentate în tabelul 2.3, respectiv în figura 2.24.

În tabelul 2.4 sunt prezentate variațiile ΔC_z și ΔC_x , definite de relațiile

$$\Delta C_{z(i)} = \frac{|C_{z(i)}| - |C_{zref}|}{|C_{zref}|} 100 [\%], \quad \Delta C_{x(i)} = \frac{C_{x(i)} - C_{xref}}{C_{xref}} 100 [\%],$$

unde ca referințe au fost considerate valorile obținute în prima analiză (A1), pentru profilul plasat în curent liber în configurație deportantă, $C_z = -0.7997$, respectiv $C_x = 0.0192$.

Analizând variația coeficientului de presiune pe conturul profilului se constată o accelerare locală a curentului în zona ajutorului de lansare a jetului Coandă, variația acestuia înregistrând un salt în zona suprafeței depresive a ajutorului, în intervalul $c_p = (-1.0, -2.5)$. Datorită zonei depresionare creată de ejecția Coandă (forțată), curentul de aer este accelerat pe întreg intradosul profilului prin ejecție liberă, acest efect resimțindu-se într-o măsură mai mică inclusiv la nivelul extradosului.

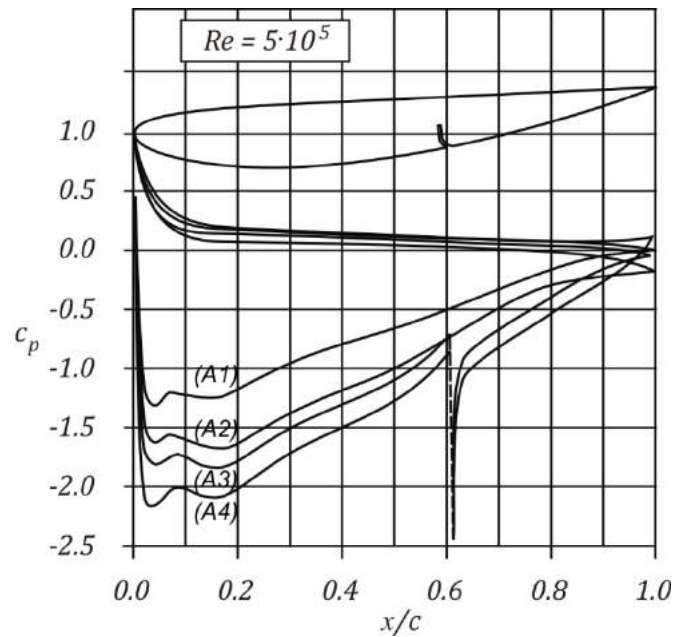


Figura 2.24 – Variația coeficientului de presiune (c_p) pe conturul profilului pentru cele 4 situații analizate

De asemenea, se poate observa cu claritate zona de debut al desprinderii stratului limită în cazul analizelor A1 și A2, indicată de modificarea curburii variației coeficientului de presiune pe intrados. Astfel, în cazul profilului plasat în efect de sol (perete), fără ejecție Coandă, se poate constata că aproximativ 20 % din conturul profilului în zona bordului de fugă este afectată de desprinderea curentului.

Tabelul 2.3

Analiză 1		Analiză 2		Analiză 3		Analiză 4	
C_z [-]	C_x [-]	C_z [-]	C_x [-]	C_z [-]	C_x [-]	C_z [-]	C_x [-]
-0.7997	0.0192	-0.9927	0.0275	-1.1322	0.0256	-1.3703	0.0279

Tabelul 2.4

Analiză 2		Analiză 3		Analiză 4	
ΔC_z [%]	ΔC_x [%]	ΔC_z [%]	ΔC_x [%]	ΔC_z [%]	ΔC_x [%]
24.13	43.22	41.58	33.33	71.35	45.31

După cum se poate observa, plasarea profilului în efect de sol conduce la creșterea forțelor aerodinamice, mult mai semnificativă în cazul forței de rezistență aerodinamică. După cum am menționat anterior, această creștere a C_x se datorează desprinderii curentului de pe intradosul profilului.

Utilizarea ejecției Coandă conduce la o îmbunătățire a raportului $\Delta C_z / \Delta C_x$ care devine supraunitar pentru analizele A3 și A4. Rezultatele obținute în Analiza 3, $v_{1jet} = 50 \text{ m/s}$, indică o îmbunătățire a coeficienților aerodinamici, inclusiv din punct de vedere al C_x . Astfel, se constată micșorarea coeficientului de rezistență aerodinamică, $C_{x(A3)} < C_{x(A2)}$.

Creșterea forței deportante generate continuă în cazul Analizai 4, $v_{2jet} = 75 \text{ m/s}$, pentru care $\Delta C_z \cong 70 \%$, dar aceasta este însoțită și de o ușoară creștere a rezistenței aerodinamice în raport cu referința (A2) utilizată ($\sim 2 \%$).

Astfel, concluziile analizei calitative a rezultatelor sunt susținute și de rezultate obținute. Așadar, utilizarea efectului Coandă conduce la eliminarea fenomenului de desprindere a stratului limită de pe conturul profilului și implicit la îmbunătățirea performanțelor aerodinamice ale acestuia.

2.4.2 Studiul unei aripi deportantă asistată de efectul Coandă, în efect de sol

Studiul profilului 2D prezentat anterior a fost completat cu analize pentru cazul unei aripi 3D, studiată apoi și ca eleron deportant pentru un corp generic de automobil [4]. Raportat la figura 2.25, caracteristicile geometrice ale aripii au fost

- $c = 0.2 \text{ m}$ coarda profilului aerodinamic,
- $s = 7.78 \cdot c$ anvergura aripii,
- $\alpha = 15^\circ$ unghiul de atac (măsurat în sens trigonometric în acord cu configurația studiată),
- $h = 0.5 \cdot c$ distanța dintre centrul aerodinamic al profilului și frontiera ce definește solul.

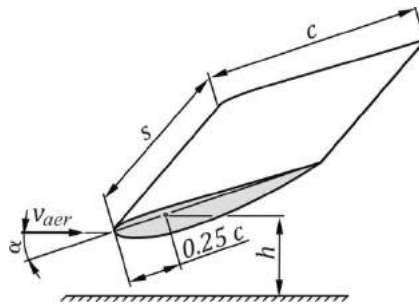


Fig. 2.25 – Aripă cu profil Clark-Y (11.7 %) în configurație deportantă și efect de sol

Precum și în studiul anterior, pe intradosul aripii la distanță $0.4 \cdot c$ în raport cu bordul de fugă, s-a considerat un ajutoraj de lansare a jeturilor (fantă submilimetrică) având lățimea inițială $\delta = 0.7 \text{ mm}$, după cum este prezentat în figura 2.18, dispusă pe întreaga anvergură a aripii.

Aripa deportantă a fost studiată în patru situații:

- aripă deportantă în curent liber și efect de sol (perete), fără efect Coandă (S1),
- aripă deportantă în curent liber și efect de sol, cu efect Coandă (S2),
- aripă deportantă fără efect Coandă, în varianta în care echipează un model generic de automobil (S3),

- aripă deportantă asistată de efect Coandă, în varianta în care echează un model generic de automobil (S4).

Pentru definirea corpului generic de automobil s-a pornit de la geometria corpului Ahmed [28], dar cu dimensiunile de gabarit specifice unui automobil real (scara 1:1) de clasă medie în configurație sedan. Aripa deportantă a fost poziționată la aceeași distanță față de corp precum în analizele A1 și A2. Detaliile la referitoare la geometria acestuia se găsesc în figura 2.26.

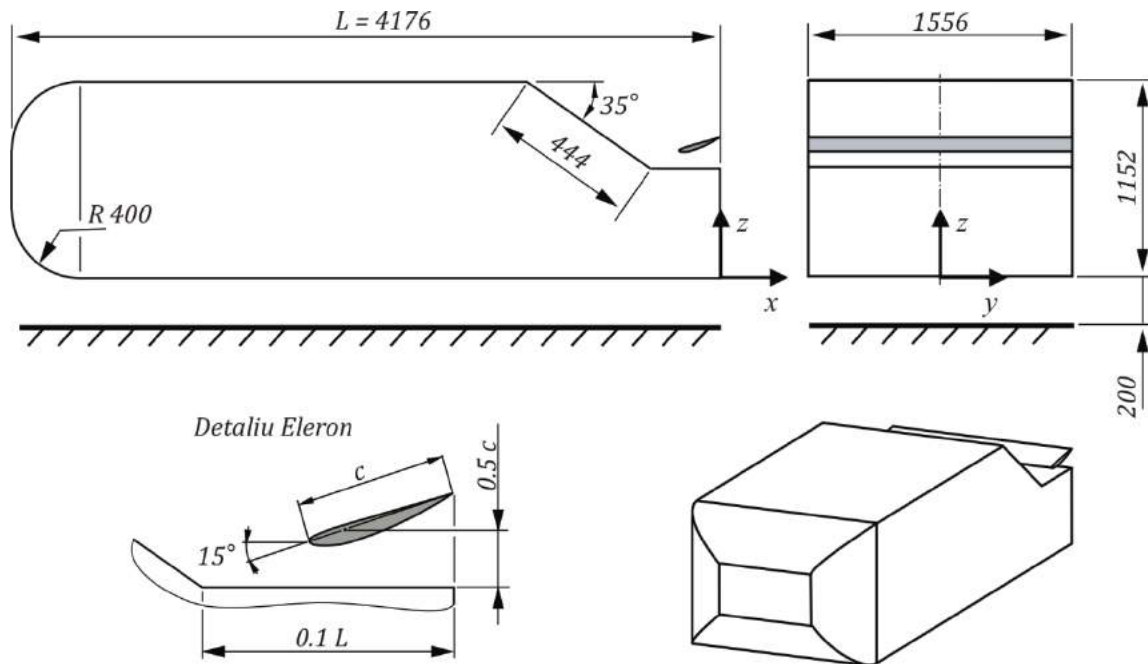


Fig. 2.26 – Corpul generic de automobil în configurație sedan echipat cu eleron cu profil Clark-Y (11.7 %)

Și aceste simulări au fost efectuate în condiții de curgere permanentă, adiabatică, fără variația densității și vâscozității aerului atmosferic, considerat la temperatura și presiunea corespunzătoare atmosferei standard, $T_{aer} = 288 \text{ K}$ ($t_{aer} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$), respectiv $p_{aer} = 101325 \text{ N/m}^2$, pentru care $\rho_{aer} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ și $\mu_{aer} = 1.785 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m s)}$.

Aripa deportantă, precum și corpul generic de automobil echipat cu aceasta, au fost analizate pentru o viteză a curentului de aer $v_\infty = 25 \text{ m/s}$ ($v_\infty = 90 \text{ km/h}$). Studiul aripii deportante asistate de efectul Coandă a fost efectuat pentru viteza de lansare a jetului $v_{jet} = 50 \text{ m/s}$.

Și în acest studiu, rezultatele obținute în urma soluționării proceselor de curgere au fost studiate atât din punct de vedere calitativ, cât și cantitativ. Similar, au fost analizate câmpurile de viteze (afișaj multi-contur), aspectul liniilor de curent și variația coeficientului de presiune pe suprafețele aripii și corpului generic de automobil, precum în figurile 2.27, 2.28, 2.29, 2.30 și 2.31.

Precum și în studiul anterior, rezultatele obținute arată că ejecția Coandă poate fi utilizată pentru controlul curgerii pe suprafețele aripii, micșorând sau eliminând zonele afectate de desprinderea stratului limită, fenomen care afectează negativ performanțele funcționale ale structurilor aeromecanice, figurile 2.27 și 2.28.

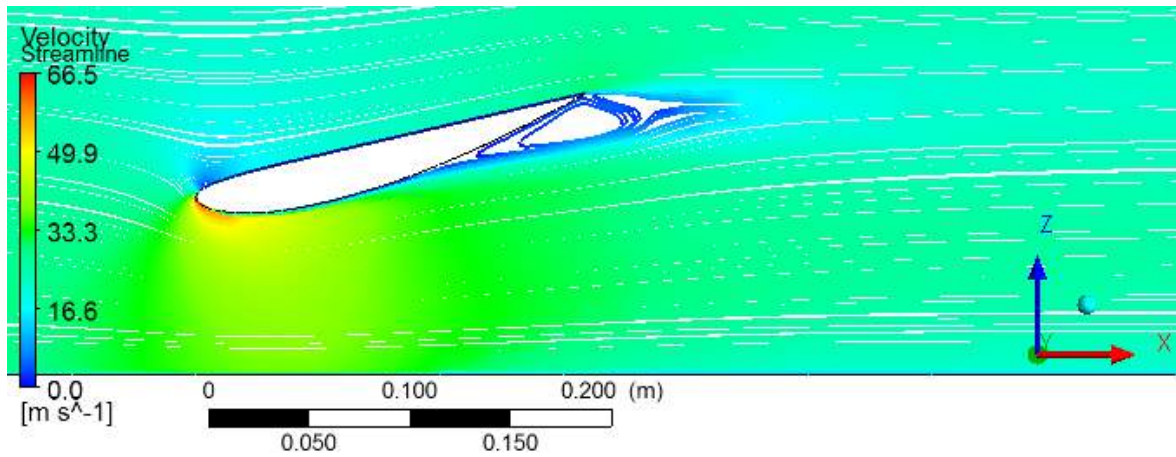


Fig. 2.27 – Aspectul liniilor de curent în planul de simetrie al aripii, Analiza fără efect Coandă (S1)

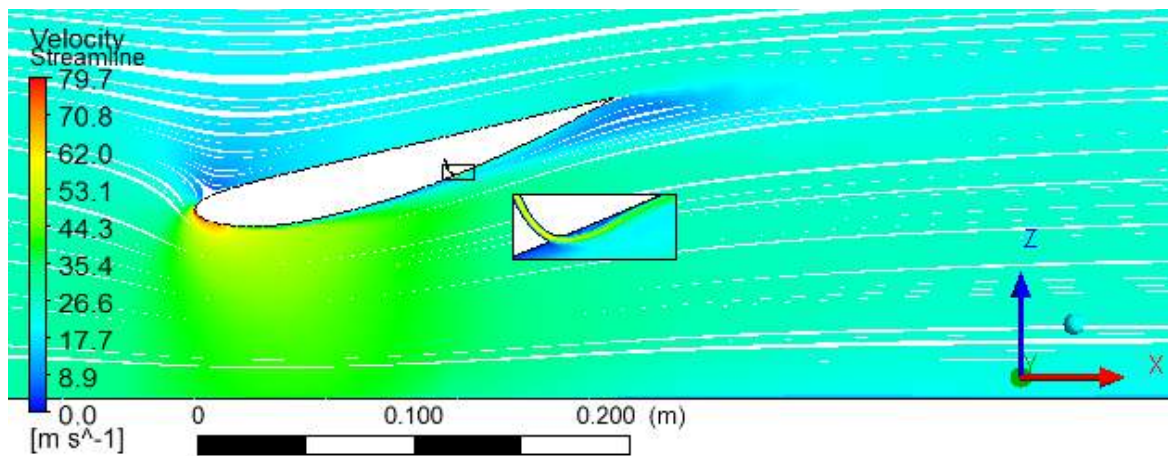


Fig. 2.28 – Aspectul liniilor de curent în planul de simetrie al aripii, Analiza cu efect Coandă (S2)

Noutatea acestui studiu în raport cu cel precedent este evidențierea structurilor de vârtej care se formează la capetele eleronului datorită circulației curentului de aer de pe intrados (zonă de presiune ridicată) spre extradados (zona de presiune scăzută), precum în figura 2.29 și care afectează negativ performanțele aerodinamice ale aripii.

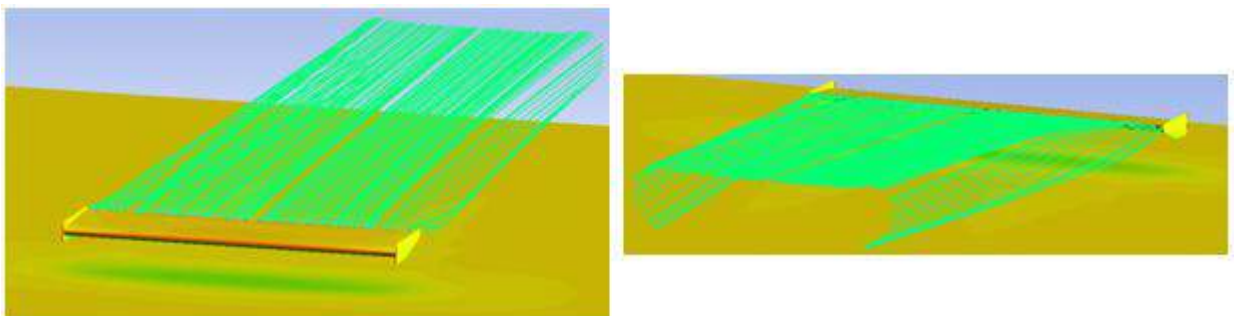


Fig. 2.29 – Evidențierea structurilor de vârtej care se formează la capetele unei aripi evoluând în efect de sol - vederi din față (stânga) și din spate (dreapta)

Dezvoltarea structurilor de vârtej la capetele aripii este evidențiată și de aspectul curbelor de variație a coeficientului de presiune (c_p) în secțiunile din anvergură, precum în figurile 2.30 și 2.31.

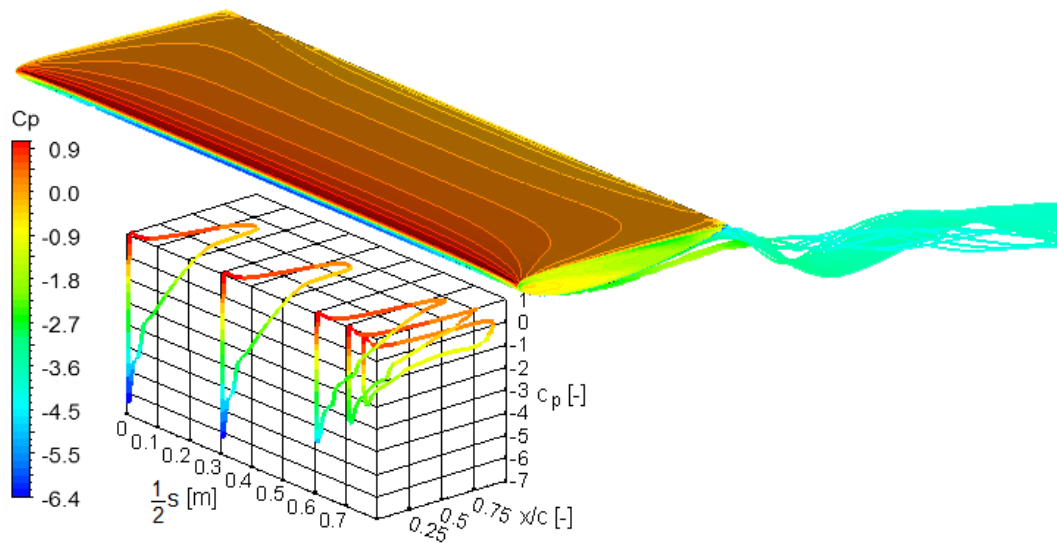


Fig. 2.30 – Variația coeficientului de presiune pe suprafața eleronului și în secțiunile acestuia, Analiza fără efect Coandă (S1)

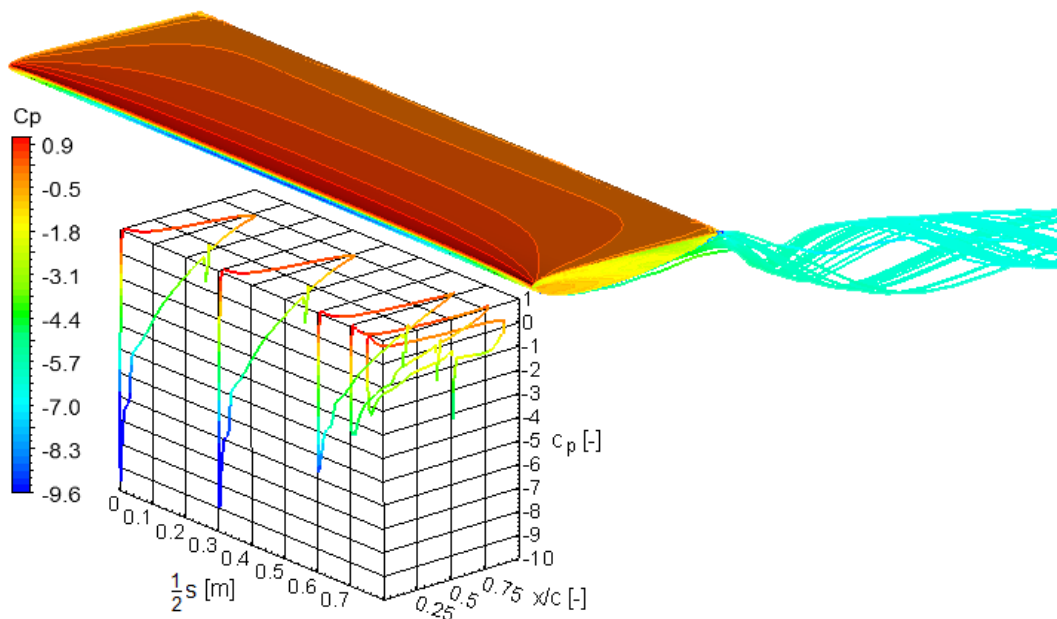


Fig. 2.31 – Variația coeficientului de presiune pe suprafața eleronului și în secțiunile acestuia, Analiza cu efect Coandă (S2)

Astfel, în lungul aripii (pe direcția anvergurii) se constată variații semnificative ale coeficientului de presiune în secțiunile corespunzătoare capetelor eleronului, indicând o descreștere a forței deportante generate în raport cu performanțele profilului (aripa de anvergură infinită). Deși ajută la creșterea performanțelor aerodinamice, ejecția Coandă nu elimină vârtejurile la capetele aripii.

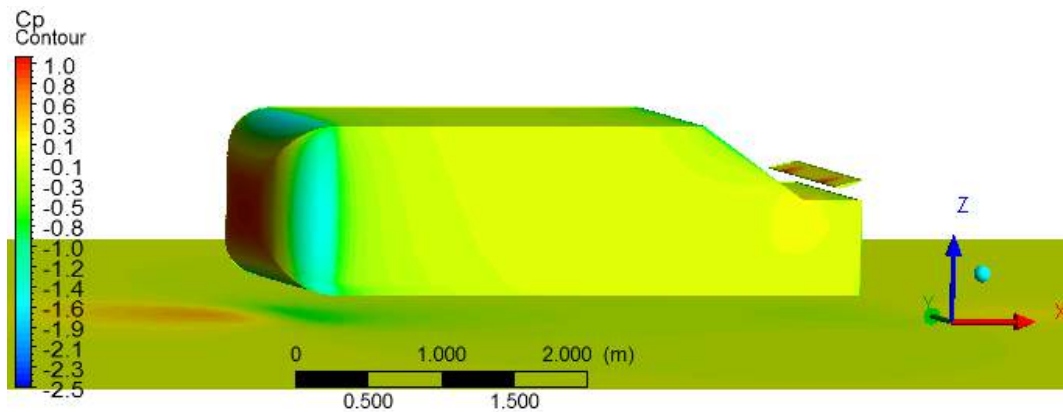


Fig. 2.32 – Variația coeficientului de presiune pe suprafața corpului generic de automobil echipat cu eleron

Valorile coeficienților aerodinamici ai aripii deportante, respectiv ai corpului generic de automobil echipat cu eleron pentru cele 4 situații studiate sunt prezentate în tabelul 2.5 împreună cu variațiile ΔC_z și ΔC_x definite de relațiile

$$\Delta C_{z(i)} = \frac{|C_{z(i)}| - |C_{zref}|}{|C_{zref}|} 100 [\%], \quad \Delta C_{x(i)} = \frac{C_{x(i)} - C_{xref}}{C_{xref}} 100 [\%],$$

unde ca referințe au fost considerate valorile obținute în analizele fără ejecție Coandă.

Tabelul 2.5

	Eleron		Bluff body cu eleron	
	Fără efect Coandă (S1)	Cu efect Coandă (S2)	Fără efect Coandă (S3)	Cu efect Coandă (S4)
C_x [-]	0.133	0.144	0.303	0.273
C_z [-]	-1.660	-2.084	0.075	0.056
ΔC_x [%]	8.27		-9.90	
ΔC_z [%]	25.54		-25.33	

Precum și în studiul precedent, în cazul aripii considerată în curent liber se constată o creștere a forței deportante generate de aceasta în cazul utilizării ejecției Coandă ($\Delta C_z \cong 25\%$). Referitor la variația coeficientului de rezistență aerodinamică, față de cazul anterior se observă o ușoară creștere a C_x pentru aripa considerată în curent liber și efect de perete ($\Delta C_x \cong 8\%$) datorită faptului că ejecția Coandă contribuie la amplificarea vârtejurilor la capetele aripii, după cum se poate observa și comparând figurile 2.30 și 2.31.

De asemenea, studiile efectuate au relevat o îmbunătățire a caracteristicilor aerodinamice ale corpului generic de automobil în cazul utilizării unor eleroane asistate de efectul Coandă, evidențiată atât de scăderea coeficientului de portanță, cât și de scăderea coeficientului de rezistență aerodinamică. Pentru configurația studiată: $\Delta C_z \cong -25\%$ și $\Delta C_x \cong -10\%$.

2.4.3 Studiul influenței debitului fluidului de ejecție pentru o aripă deportantă asistată de efectul Coandă

Studiile prezentate anterior au fost completate cu unul referitor la influența debitului fluidului de ejecție asupra performanțelor aerodinamice ale unei aripi deportante (3D). În acest caz, profilul utilizat a fost E423 având grosimea maximă 12.5 % la 23.7 % din coardă. Acesta a fost conceput de R. Eppler [69] pentru a genera forțe mari de portanță și în acord cu experimentele efectuate de Selig et al. [70] prezintă caracteristici funcționale foarte bune inclusiv la numere Reynolds mici, $Re = (2 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^5)$, caracteristice și aplicațiilor de aerodinamica automobilelor. Astfel, pentru $Re = 3 \cdot 10^5$ coeficientul maxim de portanță al profilului este $C_z \cong 2.0$, după cum se observă din figura 2.35. De asemenea, acest profil are caracteristici aerodinamice semnificativ mai bune în raport cu cele ale profilul studiat anterior, Clark-Y (11.7 %).

Pentru a determina influența debitului fluidului de ejecție asupra performanțelor aerodinamice ale aripii asistată de efectul Coandă, au fost studiate atât efectul vitezei de lansare a jetului Coandă cât și influența lățimii fantei de lansare. Aripa a fost analizată în curent liber (fără efect de perete).

Caracteristicile geometrice ale aripii studiate au fost următoarele, precum în figura 2.33:

- $c = 160 \text{ mm}$ coarda profilului aerodinamic,
- $s = 9.725 \cdot c$ anvergura aripii,
- $\alpha = 6^\circ$ unghiul de atac (măsurat în sens trigonometric) pentru a cărui valoare profilul are finețe maximă, $f = (C_z/C_x) = \max.$ (raportul dintre coeficientul de portanță și coeficientul de rezistență aerodinamică).
- δ lățimea fantei de lansare a jetului Coandă, plasată și în acest caz la distanță $0.4 \cdot c$ măsurată în raport cu bordul de fugă al aripii, pe întreaga anvergură.

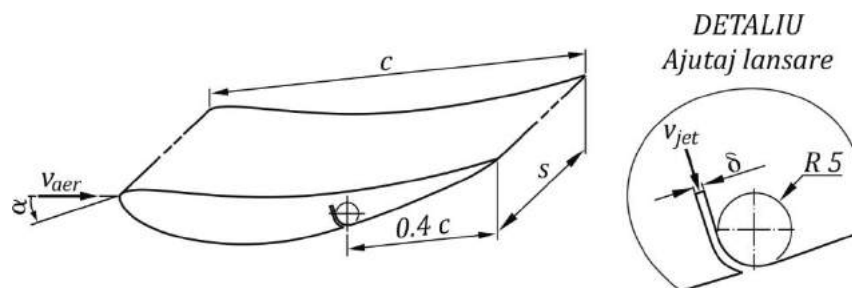


Fig. 2.33 – Aripă cu profil E423 (12.5 %) în configurație deportantă

Studiul a fost efectuat pentru trei valori caracteristice pentru ajutorul de lansare, $\delta = (0.3, 0.5 \text{ și } 0.7) \text{ mm}$. Modelele 1/2 CAD tridimensionale ale aripii pentru fiecare dintre ajutăje au fost apoi integrate în domenii de analiză paralelipipedice, ale căror dimensiuni în raport cu coarda profilului (c) și cu anvergura (s) au fost (figura 2.34)

- $5c$ în fața aripii și pentru extrados, măsurate în raport cu bordul de atac,

- $5c$ pentru intrados, măsurată în raport cu bordul de fugă,
- $12c$ în spate, măsurată în raport cu bordul de fugă,
- $2s$ în lateral, în raport cu planul de simetrie.

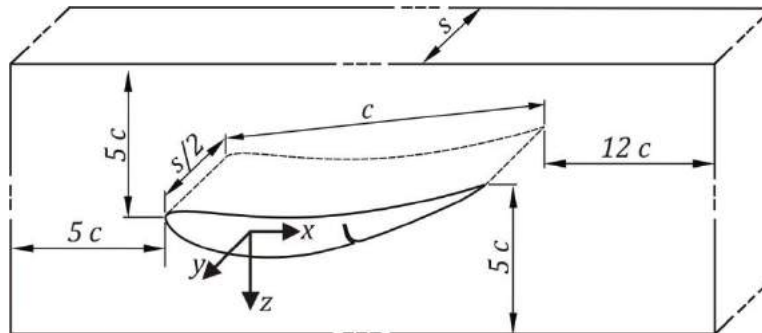


Fig. 2.34 – Domeniul de calcul cu plan de simetrie pentru aripa cu profil E423 (12.5 %) în configurație doportantă

Discretizarea domeniilor de calcul s-a efectuat cu o grilă mixtă conținând 30 de straturi cu elemente hexaedrale la nivelul frontierelor ce definesc aripa pentru a defini cât mai bine zona de curgere din interiorul stratului limită. De asemenea, înălțimea primului strat de elemente a fost calculată astfel încât să fie îndeplinit și criteriul $30 \leq y^+ \leq 100$ pentru o valoare impusă a numărului Reynolds. Grilele de discretizare generate au avut un număr de noduri mai mare decât

- 4.600.000 noduri pentru întreg domeniul de calcul, dintre care
- 50.000 noduri pe suprafețele aripii.

Condițiile pe frontierele domeniului au fost impuse în acord cu experimentele efectuate de Selig et al. [70], rezultatele acestora fiind utilizate și pentru validarea procedurii CFD adoptate. Astfel, raportat la un sistem de referință precum în figura 2.34 au fost considerate următoarele condiții la limită:

- o viteză uniformă $v_x = v_\infty$ (viteza de referință a curentului) și $v_y = v_z = 0$ pe suprafața ce definește intrarea fluidului în domeniul de calcul (*inlet*),
- o viteză $v = v_{jet}$ pe suprafața ce definește intrarea în ajutorul de ejecție, perpendiculară pe aceasta, precum în detaliul din figura 2.33,
- suprapresiune nulă ($p = 0$) pe suprafața ce definește ieșirea fluidului din domeniul de analiză (*outlet*), în raport cu presiunea de referință (p_∞),
- $v_x = v_y = v_z = 0$ pe suprafețele ce definesc aripa (*no slip conditions*),
- pentru restul suprafețelor au fost considerate condiții specifice frontierelor fluide (*free slip conditions*, respectiv *symmetry* pentru planul de simetrie).

Și acest studiu a fost efectuat în condițiile corespunzătoare atmosferei standard: $p_\infty = 101325 Pa$ (presiunea atmosferică) și $t_\infty = 15^\circ C$ ($T_\infty = 288.15 K$, temperatura atmosferică) pentru care densitatea și vâscozitatea au valorile $\rho_\infty = 1.225 kg/m^3$, respectiv $\mu_\infty = 1.785 \cdot 10^{-5} kg/(m s)$.

Viteza de referință a curentului de aer $v_\infty = 27.4$ m/s a fost impusă corespunzător unei valori a numărului Reynolds $Re = 3.0 \cdot 10^5$ calculat în funcție de coarda profilului (c), precum în măsurătorile efectuate de Selig et al. [70] la un grad de turbulență $T = 0.1$ %. Pentru fiecare dintre dimensiunile caracteristice ajutorului, $\delta = (0.3, 0.5$ și $0.7)$ mm, viteza de lansare a jetului Coandă a fost parametrul variat în intervalul $v_{jet} = (25, 50)$ m/s.

Pentru închiderea sistemului de ecuații RANS (1.28) a fost utilizat și în acest caz modelul de turbulență *Shear-Stress-Transport (SST)*, Menter [42].

În prima etapă a fost verificată acuratețea modelului numeric adoptat soluționând curgerea în jurul profilului (simulări 2D) utilizând rezultatele experimentale furnizate în [70] pentru următoarele valori ale unghiului de atac $\alpha = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ și 10° . Precum și studiile prezentate anterior, la determinarea convergenței calculului numeric și a soluțiilor proceselor CFD s-au impus

- scăderea normelor reziduale de convergență la valori mai mici decât 10^{-4} ,
- variații ale coeficienților aerodinamici C_x și C_z (pentru iterațiile finale) sub 10^{-4} , în acord cu normele SAE [23], necesare determinării unor variații ale coeficientului de rezistență aerodinamică $\Delta C_x = \pm 0.001$.

Valorile obținute pentru validarea modelului numeric sunt prezentate (comparativ) în formă grafică în figura 2.35.

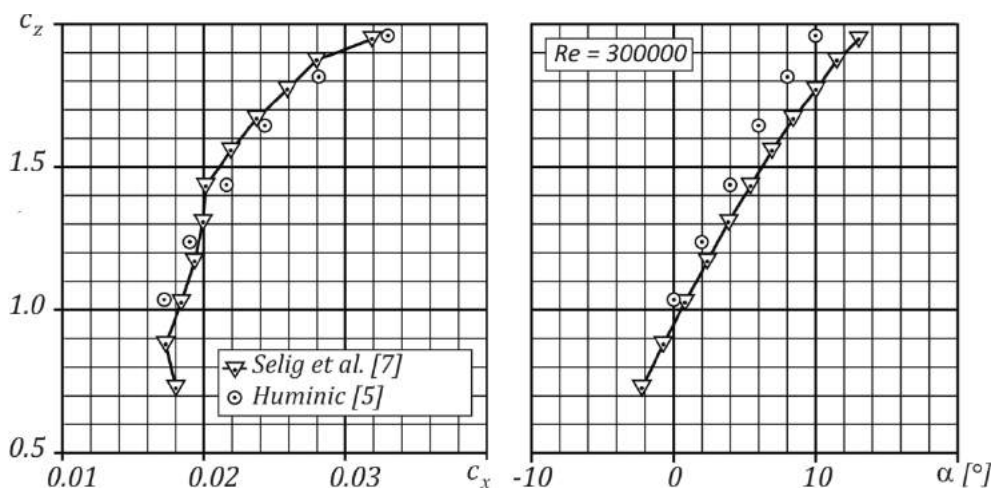


Fig. 2.35 – Polarele profilului Eppler E423 (12.5 %), valori experimentale [70] și numerice [71]

După cum se poate observa, acuratețea cu care programul soluționează curgerea în jurul corpului studiat pentru grila generată și modelul numeric adoptat este bună, valorile obținute fiind apropiate de cele indicate de Selig et al., abaterile (aproximativ 15 %, maxim) datorându-se diferențelor dintre modelul teoretic (utilizat în studiile CFD) și cel fizic construit și utilizat în teste, după cum este menționat în [70]. Aceste diferențe sunt semnificative în zona bordului de atac și a bordului de fugă.

Rezultatele (C_z și C_x) referitoare la influența ejecției Coandă asupra caracteristicilor aerodinamice ale aripii studiate sunt prezentate în tabelele 2.6, 2.7 și 2.8.

Tabelul 2.6

$\delta = 0.7$ [mm]	v_{jet} [m/s]	0	25	30	35	40	45	50
	C_z [-]	1.366	1.245	1.306	1.367	1.422	1.471	1.511
	C_x [-]	0.0755	0.0692	0.0727	0.0770	0.0813	0.0856	0.0896

Tabelul 2.7

$\delta = 0.5$ [mm]	v_{jet} [m/s]	0	25	30	35	40	45	50
	C_z [-]	1.366	1.276	1.314	1.361	1.406	1.449	1.487
	C_x [-]	0.0755	0.0705	0.0726	0.0758	0.0794	0.0830	0.0866

Tabelul 2.8

$\delta = 0.3$ [mm]	v_{jet} [m/s]	0	25	30	35	40	45	50
	C_z [-]	1.366	1.289	1.307	1.337	1.371	1.406	1.440
	C_x [-]	0.0755	0.0704	0.0714	0.0733	0.0758	0.0785	0.0814

Precum și cazul anterior, au fost studiate și variațiile coeficientului de presiune (c_p) în mai multe secțiuni ale aripii, după cum este prezentat în figurile 2.36 și 2.37.

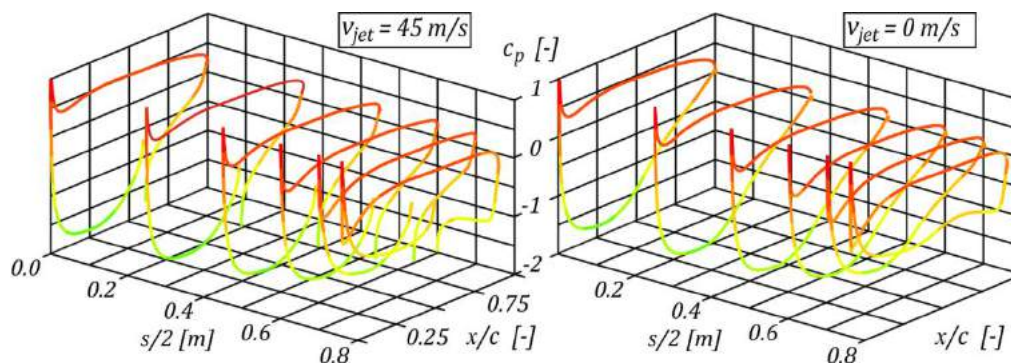


Fig. 2.36 – Variația coeficientului de presiune (c_p) în secțiunile eleronului, reprezentare 3D, Analiza cu efect Coandă (stânga) și fără efect Coandă (dreapta), $\delta = 0.7$ mm

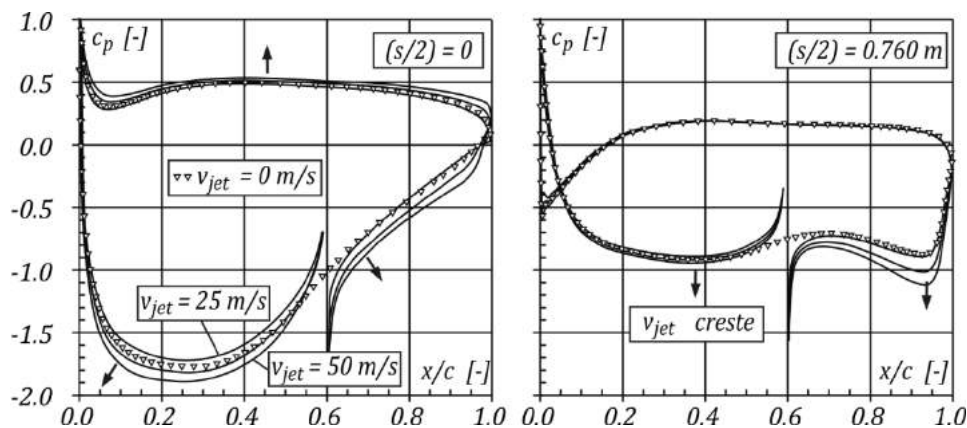


Fig. 2.37 – Variația coeficientului de presiune (c_p) în secțiunile de capăt ale eleronului, reprezentare 2D, $\delta = 0.7$ mm

Rezultatele obținute și în acest caz relevă (de asemenea) faptul că utilizarea ejecției Coandă conduce la o îmbunătățire a performanțelor aerodinamice ale eleronului, raportele maxime $\Delta C_z/\Delta C_x$ fiind prezentate în tabelul 2.9 pentru fiecare ajutoraj de lansare studiat, împreună cu valorile debitelor specifice (Q^*) unității de anvergură ($s = 1 \text{ m}$).

Tabelul 2.9

δ [mm]	v_{jet} [m/s]	δ [mm]	v_{jet} [m/s]	δ [mm]	v_{jet} [m/s]
0.7	40.0	0.5	45.0	0.3	50.0
$(\Delta C_z/\Delta C_x)_{max}$		$(\Delta C_z/\Delta C_x)_{max}$		$(\Delta C_z/\Delta C_x)_{max}$	
13.10		11.07		12.54	
Q^* [m ³ /s]		Q^* [m ³ /s]		Q^* [m ³ /s]	
0.0308		0.0225		0.0150	

Așadar, utilizând ejecția Coandă se pot obține caracteristici aerodinamice similare reducând dimensiunea caracteristică a ajutorajului de lansare (δ) și crescând viteza de lansare (v_{jet}), micșorând în același timp și debitul necesar de fluid de ejecție.

De asemenea, se constată și în acest caz variații semnificative ale coeficientului de presiune în secțiunile corespunzătoare capetelor eleronului, indicând o descreștere a forței deportante generate în raport cu performanțele profilului. După cum am menționat și anterior, deși contribuie la creșterea performanțelor aerodinamice ale aripilor, ejecția Coandă amplifică curgerea turbionară la capetele acestora. Astfel, debitul fluidului de ejecție poate fi micșorat și prin limitarea ejecției Coandă doar la zonele care nu sunt afectate de vârtejurile de capăt.

Reducerea/eliminarea fenomenului de desprindere a stratului limită de pe suprafața aripii este exemplificată pentru acest studiu de variația energiei cinetice turbulente (k) în secțiunea din planul de simetrie, figura 2.37.

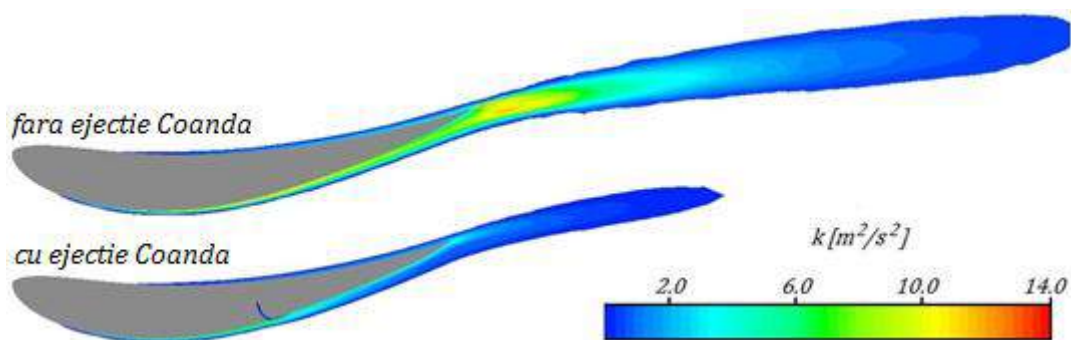


Fig. 2.37 – Variația energiei cinetice turbulente (k) în jurul profilului, în planul de simetrie, Analiza fără efect Coandă (*sus*) și cu efect Coandă (*jos*), $\delta = 0.7 \text{ mm}$

3. PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI

1. OBIECTIVE

1.1 Continuarea cercetării științifice pe direcțiile

- *Aerodinamica automobilelor* (principalele rezultate au fost prezentate în capitolele anterioare ale tezei),
- *Gazodinamică industrială*: utilizarea efectului Coandă în aplicații de ventilație și testarea și îmbunătățirea unor turbine de mici dimensiuni utilizate la ventilarea sistemelor de evacuare a gazelor de ardere din sistemele casnice.
- *Transferul de căldură utilizând nanofluid în schimbătoare de căldură plate, elicoidale, sau cu tuburi termice.*

prin

- 1.1.1 Continuarea îmbunătățirii și dezvoltării infrastructurii de cercetare din laboratorul de Aerodinamică, prezentat anterior în subcapitolul 1.5.
- 1.1.2 Publicarea unor articole în jurnale de referință în domeniu (precum în Lista de lucrări, Fișa pentru îndeplinirea standardelor minimale în domeniul Inginerie mecanică).
- 1.1.3 Prezentarea unor lucrări în conferințe/congrese de referință în domeniu (precum în Lista de lucrări, Fișa pentru îndeplinirea standardelor minimale în domeniul Inginerie mecanică).
- 1.1.4 Implicarea în contracte de cercetare. Proiectele derulate, sau în curs de derulare, sunt prezentate în "Fișa pentru îndeplinirea standardelor minimale în domeniul Inginerie mecanică".

1.2 Perfecționarea activității didactice pentru disciplinele din domeniile ingineriei mecanice și ingineriei autovehiculelor

- *Mecanica fluidelor și aplicații*
- *Aerodinamica aeronavelor și automobilelor*

prin

- 1.2.1 Continuarea îmbunătățirii și dezvoltării laboratoarelor didactice.
- 1.2.2 Publicarea unor manuale suport pentru cursurile didactice. Cele publicate până la data curentă sunt prezentate în "Lista de lucrări" și "Fișa pentru îndeplinirea standardelor minimale în domeniul Inginerie mecanică".
- 1.2.3 Publicarea unor îndrumare pentru aplicațiile asociate cursurilor.

1.2.4 Implicarea studenților în procesele educative și continuarea activității de coordonare pentru elaborarea lucrărilor de licență, disertație și ulterior lucrări de doctorat.

1.3 Creșterea vizibilității internaționale

prin

1.3.1 Continuarea activității în cadrul *SAE Road Vehicle Aerodynamics Committee*, care elaborează regulamentele și normele din domeniul aerodinamicii autovehiculelor, în cadrul [Society of Automobile Engineers](#) (SAE International, USA). Pentru activitatea ca membru SAE am primit în 2008 *Member Service Award*, 2008, SAE International

1.3.2 Continuarea activității de recenzie peer-review pentru jurnale internaționale de referință și extinderea ariei jurnalelor recenzate.

Vizibilitatea internațională din perspectiva lucrărilor publicate, a citărilor primite (pe baza afilierii autorilor, SCOPUS) și a jurnalelor pentru care am efectuat recenzii este ilustrată în figura 3.1.

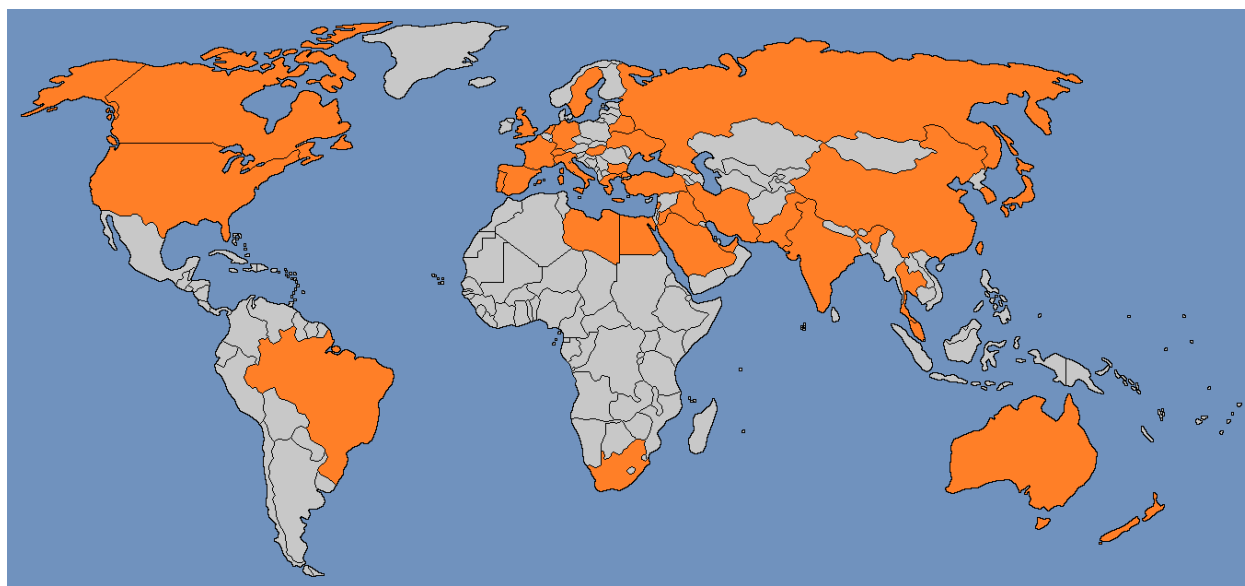


Fig. 3.1 – Vizibilitatea internațională, SCOPUS

Până în prezent am realizat recenzii peer-review pentru următoarele reviste indexate ISI și/sau SCOPUS

[Energy](#) (ELSEVIER),

[Entropy](#) (MDPI),

[Indian Journal of Pure and Applied Physics](#),

[International Journal of Heat and Mass Transfer](#) (ELSEVIER),

[International Journal of Thermal Science](#) (ELSEVIER),

[*Journal of Automobile Engineering*](#) (SAGE),
[*Journal of Heat Transfer*](#) (ASME) și ASME Fluids Engineering Division,
[*Measurement*](#) (ELSEVIER),
[*Microfluidics and Nanofluidics*](#) (SPRINGER),
[*Powder Technology*](#) (ELSEVIER),
[*Scientific Bulletin of Politehnica University of Bucharest*](#) - Mechanical Engineering series.
[*Vehicle Aerodynamics*](#) (SAE),

1.3.3 Publicarea unor articole de TOP, indexate [*Science Direct*](#)

Până în prezent am publicat cinci astfel de articole

Huminic A., Huminic G., Fleaca C., Dumitrache F., Morjan I., "Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles", *Powder Technology*, Vol. 284, pp. 78-84, ISSN: 00325910, 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.06.040,

în Top 25 Hottest Articles, Science Direct, Chemical Engineering, Powder Technology, [July to September 2015, October to December 2015](#)

Huminic G., Huminic A., "Numerical analysis of laminar flow heat transfer of nanofluids in a flattened tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 52-57, 2013, ISSN: 07351933, 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.03.003,

în Top 25 Hottest Articles, Science Direct, Engineering, International Communications in Heat and Mass Transfer, [January to March 2013](#)

Huminic G., Huminic A., "Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 54, Issue 19-20, pp. 4280-4287, ISSN: 00179310, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.05.017,

în Top 25 Hottest Articles, Science Direct, Engineering-Energy, International Journal of Heat and Mass Transfer, [July to September 2011](#)

Huminic G., Huminic A., "Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphons using nanofluids", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 35, Issue 3, 2011, pp. 550-557, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.12.009,

în Top 25 Hottest Articles, Science Direct, Engineering-Energy, Experimental Thermal and Fluid Science, [January to March 2011](#)

Huminic G., Huminic A., I. Morjan I., F. Dumitrache F., "Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 54, Issue 1-3, 2011, pp. 656–661, ISSN: 00179310, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.005,

in Top 25 Hottest Articles, Science Direct, Engineering-Energy, International Journal of Heat and Mass Transfer, [October to December 2010](#)

1.3.4 Implicarea în proiecte internaționale.

În prezent, sunt implicat în proiectul european COST CA15119 ”[Overcoming Barriers to Nanofluids Market Uptake](#)” (membru coordonator pentru România, alături de prof. Alina Minea de la Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași), ale cărui obiective principale sunt realizarea și dezvoltarea unei rețele profesionale în domeniul cercetării nanofluidelor și utilizarea acestora în industrie.

Bibliografie

- [1] Huminic A., Chiru A., "On CFD Investigations of Vehicle Aerodynamics with Rotating Wheels' Simulation", Proceedings of SAE (Society of Automotive Engineers) 2006 World Congress, 2006, Detroit, USA, Paper number 2006-01-0804, ISSN 0148-7191;
- [2] Sumantran V., Sovran G., "Vehicle Aerodynamics", PT-49, SAE International, 1996.
- [3] Cazacu M., et al., Aurel Persu Inventator al automobilului aerodinamic, Editura Tehnică, București, 1996, ISBN 973-31-664-X
- [4] Fitch J.W., "Motor Truck Engineering Handbook", SAE, Forth Edition, ISBN 1-56091-378-9, 1994.
- [5] Englar R.J., "Improved Pneumatic Aerodynamics for Drag Reduction, Fuel Economy, Safety and Stability Increase for Heavy Vehicles", Vehicle Aerodynamics, SP 1985, ISBN Number: 978-0-7680-1696-3, 2005
- [6] Emmelmann H.J., Berneburg H., Schuze J., "The Aerodynamic Development of the Opel Calibra", Vehicle Aerodynamics PT-49, SAE Inc., ISBN 1-56091-594-3, 1996.
- [7] Birch S., "Bibendum Logan Offer Low-cost Clean Solution", Automotive Engineering, SAE International, Ianuarie 2008.
- [8] Braun H. et al., "Wiper Blade", Patent WO2007124989, 2007
- [9] Froeschle M. et al., "Air Guiding System for a Vehicle", Patent US2007236046, 2007
- [10] Williams J., "Adjustable Spoiler", Patent US7213870, 2007
- [11] Froeschle M., Schulzki M., "Rear spoiler for a vehicle", Patent B62D35/00D, 2007
- [12] Inchul K., "Rear Spoiler of a New Type that Reduces the Aerodynamic Forces on a Mini-Van", 2006-01-1631, SAE 2006 World Congress & Exhibition, April 2006, Detroit, MI, USA, Session: Body Design and Engineering
- [13] Min-Ho K., "A Numerical Simulation on the Drag Reduction of Large- Sized Bus Using Rear Spoiler", Vehicle Aerodynamics, SP-1729, ISBN 0-7680-1108-6, 2002
- [14] Huminic A., Lutz Th., "CFD Study of Ground Effect Simulation", Proceedings of HEFAT 2005, 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2005, Cairo, Egypt, ISBN 1-86854-624-1
- [15] Benche V., Huminic A., "Theoretical Evaluation of the Underbody Drag of Road Vehicle", SIAR International Congress on Automotive and Transport Engineering, CONAT 2004, paper CONAT20041009, ISBN 973-635-394-X.
- [16] Huminic A., Benche V., Huminic G., "Theoretical Study of Aerodynamic Interaction Between Road Vehicles and Ground", SIAR International Congress on Automotive, CAR 2005, ISBN 973-690-450-4, paper CAR20051133.
- [17] Katz J., "Race Car Aerodynamics - Designed for Speed", 2nd Edition, Bentley Publisher, 2006, ISBN 978-0-8376-0142-7.
- [18] Idelcik I.E., "Îndrumător pentru Calculul Rezistențelor Hidraulice", Editura Tehnică, București, 1984.
- [19] Huminic A., Chiru A., Huminic G., "Study of the Underhood Airflow on Aerodynamics of the Road Vehicles", FISITA 2006 World Automotive Congress, Paper 20068394.
- [20] Oprean C. et al., "Studiul Aerodinamic al Automobilului ARO 26, Contract de cercetare științifică nr. 1604/1987, ICSITA Pitești - INCREST București.

- [21] Huminic A., Huminic G., Șoica A., "Study of Aerodynamics for a Simplified Car Model with the Underbody Shaped as a Venturi nozzle", *International Journal of Vehicle Design*, Volume 58, Issue 1, 2012, pp. 15-32, ISSN 01433369, doi 10.1504/IJVD.2012.045927.
- [22] Huminic A., Huminic, G., "Numerical flow Simulation for a Generic Vehicle Body on wheels with variable underbody diffuser", *SAE Technical Paper 2012-01-0172*, 2012, doi 10.4271/2012-01-0172.
- [23] SAE, "Aerodynamic Testing of Road Vehicle – Testing Methods and Procedures", *SAE J20784 JAN93*, SAE Information Report.
- [24] Sumantran, V., Sovran, G., "Vehicle Aerodynamics", PT-49, SAE International, USA, 1996, ISBN 1-56091-594-3
- [25] Le Good M.G., Kevin P., Garry P.K., "On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics", *SAE Technical Paper 2004-01-1308*, 2004
- [26] Regert, T., Lajos, T., "Description of flow field in the wheelhouses of cars", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 616–629, 2007.
- [27] Desai, S., Lo, C.-M., George, A.R. "A computational Study of Idealized Bluff Bodies, Wheels, and Vortex Structures in Ground Effect", *SAE Technical paper 2008-01-0327*, *Vehicle Aerodynamics*, 2008, SAE SP-2151.
- [28] Ahmed S., Ramm G., Faltin G., "Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake", *SAE Technical Paper 840300*, 1984.
- [29] Howell J.P., "The influence of a Vehicle Underbody on Aerodynamics of a Simple Car Shapes with an Underfloor Diffuser", *Vehicle Aerodynamics, R.Ae.S. Conference*, Loughborough, UK, pp. 36.1-36.11, 1994
- [30] Cooper K.R., Bertenyi T., Dutil G., Syms J., Sovran G., "The Aerodynamic Performance of Automotive Underbody Diffusers", *SAE Technical Paper 98-0030*, 1998
- [31] Cooper K.R., Sovran G., Syms J., "Selecting Automotive Diffusers to Maximise Underbody Downforce", *SAE Technical Paper 2000-01-0354*, 2000.
- [32] Breslouer J.O., George A.R., "Exploratory Experimental Studies of Forces and Flow Structure on a Bluff Body with Variable Diffuser and Wheel Configurations", *SAE Technical Paper 2008-01-0326*, *Vehicle Aerodynamics*, 2008, SAE SP-2151.
- [33] George, A.R., "Aerodynamic Effects on Shape Chamber, Pitch, and Ground Proximity on Idealized Ground Vehicle Body", *ASME Journal of Fluid Engineering*, ISSN 0098-2202, Vol. 103, pp. 631-638, 1981.
- [34] Zhang X., Senior, A., Ruhrmann A., "Vortices Behind a Bluff Body with an Upswept Aft Section in Ground Effect", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, ISSN 0142-727X, Vol. 25, pp. 1-9, 2004.
- [35] Buchheim R., Deutenbach K.R., Laxckoff H.J., "Necessity and Premises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars", *SAE Technical Paper 810185*, 1981.
- [36] Guilmineau E., "Computational study of flow around a simplified car body", *Journal of Wind and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1207-1217, 2007, doi:10.1016/j.jweia.2007.06.041.
- [37] Strachan R., Knowles K., Lawson N., "The vortex structure behind an Ahmed reference model in the presence of a moving ground plane", *Journal of Experiments on Fluids*, 42(5), ISSN 0723-4864, pp. 659-669, 2007.

- [38] Huminic A., Huminic, G., "Computational study of flow in the underbody diffuser for a simplified car model", SAE Technical Paper 2010-01-0199, Vehicle Aerodynamics, 2010, SAE SP-2269.
- [39] Lungu A., "Modelări Numerice în Hidrodinamică – Grile de Discretizare", Editura Tehnică, București, 2000.
- [40] Huminic A., "Mecanica Fluidelor", Editura Universității Transilvania din Brașov, 2014
- [41] Versteeg H.K., Malalasekera W., "An introduction to computational fluid dynamics. The Finite Volume Method", John Wiley & Sons Inc. USA, ISBN 0-470-23515-2.
- [42] Menter F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", AIAA Journal, ISSN 0001-1452, vol. 32, 1994, pp.1598–1605.
- [43] Wilcox D.C., "Multiscale model for turbulent flows", AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno, Nevada, USA, paper 86-0029, 1986.
- [44] Dănilă S., Berbente C., "Metode Numerice în Dinamica Fluidelor", Editura Academiei Române, 2002, ISBN: 973-99514-9-X.
- [45] Chou P., "On velocity correlation and the solution of the equation of turbulent fluctuation", Journal of Applied Mathematics, vol. 3, 1945, pp. 38—54.
- [46] Jones W., Launder B., "The prediction of laminarisation with two-equation model of turbulence", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15, 1972, pp. 311—314.
- [47] Huminic A., Huminic G., "CFD Study Concerning the Influence of the Underbody Components on Total Drag for a SUV", SAE Technical Paper 2009-01-1157, Vehicle Aerodynamics, 2009, SAE SP-2226.
- [48] Hetherington B., Sims-Williams D., "Support Strut Interference Effects on Passenger and Racing Car Wind Tunnel Models", SAE Technical Paper 2006-01-0565, Vehicle Aerodynamics, 2006, SAE SP-1991.
- [49] Scibor-Rylski A.J., "Road Vehicle Aerodynamics", Pentech Press, London, ISBN 0-7273-18047, 1979.
- [50] Huminic A., Chiru A., "Ground Effect in Design of Vehicle", FISITA 2004 World Automotive Congress, F2004F130.
- [51] Huminic A., Huminic G., "CFD Analysis of Flow Around a Tout-Terrain Vehicle", Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Volume 9(44), ISBN 1223-9631, 2002.
- [52] Cogotti A., "Ground Effect Simulation for Full-Scale Cars in the Pininfarina Wind Tunnel", Vehicle Aerodynamics PT-49, SAE Inc., ISBN 1-56091-594-3, 1996.
- [53] Cogotti A., "Aerodynamic characteristics of car wheels", Technological Advances in Vehicle Design Series, SP3, Impact of Aerodynamics on Vehicle Design, 1983, pp. 173–196.
- [54] Fabijanic J., "An experimental investigation on wheel-well flows", SAE Technical Paper 960901, 1996, DOI:10.4271/960901.
- [55] Jeong J., and Hussain F., "On the identification of a vortex", Journal of Fluid Mechanics, 285, 1995, pp. 69–94. DOI: 10.1017/S0022112095000462.
- [56] Heisler H., "Advanced Vehicle Technology", Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-5131-8, 2002.

- [57] Huminic A., Huminic G., "Studiul Interacțiunii Aerodinamice Automobil – Cale de Rulare," Conferința Națională de Mecanica Fluidelor Caius Iacob, 2006, ISBN (10) 973-635-831-3, Brașov.
- [58] Huminic A., Huminic G., "On the Aerodynamics of the Racing Cars," SAE Technical Paper 2008-01-0099, 2008, doi:10.4271/2008-01-0099.
- [59] Huminic A., Huminic G., "CFD Investigations of an Open-wheel Race Car", 4th European Automotive Simulation Conference, EASC 2009, Munich, Germany, 2009, pp. 85 – 94.
- [60] Huminic A., "Studiul Interacțiunii aerodinamice automobil – cale de rulare", Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2005.
- [61] Huminic A., Chiru, A., Huminic G., "Experimental Study Concerning the Influence of the Underbody Geometry on Aerodynamic Characteristics of a Car", SIAR International Congress on Automotive, 2005, ISBN 973-690-450-4, paper CAR20051183.
- [62] Dăscălescu, S., Dimitriu, L., "Application of Coanda Effect on Cooling Airflow Control Devices Used by Internal Combustion Engines", Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics 50, Vol. IV, 2007, International Congress, Automotive, Environment and Farm Machinery, AMMA 2007, Cluj-Napoca, Romania.
- [63] Huminic A., Huminic G., "Analiza CFD a unui Profil Aerodinamic Deportant în Efect de Sol, cu Efect Coandă", ANSYS & FLUENT Romanian Conference, ISBN 978-973-718-754-4, 2007
- [64] Huminic A., Huminic G., "Study of the Automotive Wings with Coanda Effect", FISITA World Automotive Congress 2010, ISBN: 978-1-61782-507-1, Volume 5, pp. 4134-4143.
- [65] Huminic A., Huminic G., "On Energetics of the Automotive Deportante Wings Assisted by Coanda Effect" , SIAR International Conference Fuel Economy, Safety And Reliability Of Motor Vehicles, ESFA 2009, ISSN 2067-1083, pp.453-460.
- [66] Huminic A., Huminic G., "Automotive wing with active control of flow", UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Volume 76, Issue 4, 2014, Pages 231-238
- [67] Benche V., Huminic A., Huminic G., "Contribuții la Definirea Ventejectoarelor Exhaustoare cu Inducție Fluidică Vortex", Conferința Națională de Mecanica Fluidelor, Caius Iacob, ISBN (10) 973-635-831-3, Brașov, 2006.
- [68] Silverstein A., "Scale Effect on Clark-Y Airfoil Characteristics", Report no. 502, from N.A.C.A. Full-scale Wind-Tunnel Test, NACA, 1935.
- [69] R. Eppler, "Airfoil Design and Data", ISBN 3-540-52505-X, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [70] M. Selig, C. Lyon, P. Giguere, C. Ninham, J. Guglielmo, "Summary of Low-Speed Airfoil Data", vol. 2, ISBN 0-9646747-2-6, SoarTech Publications, Virginia USA, 1996.
- [71] Huminic A., Huminic G., "Automotive Wing with Coanda Effect", CIEM 2013, Politehnica Press, ISSN 2067-0893.