



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI
FACULTATEA DE MECANICĂ

DISPOZITIV AERODINAMIC PENTRU MĂRIREA ADERENȚEI AUTOMOBILELOR

(rezumat)

Doctorand
Ing. BORDEI F. ȘTEFAN

Conducător științific
Prof.dr.ing. Florin POPESCU

Noiembrie 2012

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane
2007 - 2013.

Titlul proiectului: EFICIENT.



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MI
DI
SI
OSDRU



CUPRINSUL INTEGRAL AL TEZEI

Pag.

MULȚUMIRI.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
REZUMAT.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
CUPRINS.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
LISTA TABELELOR.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
LISTA FIGURILOR.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
NOTAȚII ȘI ABREVIERI.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
1. INTRODUCERE.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
IMPORTANTA ȘI UTILITATEA.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
SCOPUL ȘI OBIECTIVELE.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
DESCRIEREA PROBLEMEI TEHNICE DE REZOLVAT	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2. STADIUL ACTUAL AL TEHNICII ȘI DEFINIREA OBIECTIVELOR	
CERCETĂRII.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.1 Modele de turbulență.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.1.1 Modelarea turbulenței.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.1.2 Modelul Spalart - Allmaras	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.1.3 Modele de turbulență $k-\omega$...	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.1.4 Condiții la limită. Funcții la perete	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.2. Stadiul cercetărilor curgerii în jurul automobilelor	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.2.1. Modele simplificate.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.2.2. Modele complexe.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.3. Analiza numerică a profilelor aerodinamice din literatura de specialitate.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.3.1. Profile de aripi inversate cu eficiență și forță de apăsare maxime.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
2.4. Concluzii.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3. ANALIZA COMPARATIVĂ A MODELELOR DE TURBULENȚĂ APLICATE ÎN STUDIUL AERODINAMICII AUTOTURISMELOR SPORT	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.1. Introducere.....	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2. Modelarea curgerii în jurul unui corp simplificat (Ahmed Body)	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.1. Dezvoltarea metodelor de studiu	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.2. Alegerea parametrilor rețelei de discretizare	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.3. Preprocesarea (Condiții la limită)	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.4. Algoritm de modelare a curgerii	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.5. Studiul numeric al modelelor de turbulență	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.5.1. Analiza critică a modelelor utilizate	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
3.2.5.2. Analiza coeficienților de portanță și rezistență la	

- înaintare**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 3.2.5.3. Analiza topologiei curgerii**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 3.2.5.4 Validarea metodelor și analiza comparativă
 calitativă și cantitativă a rezultatelor modelelor de turbulență**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 3.3. Modelarea curgerii în jurul aripilor ..**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 3.3.1. Discretizarea domeniului...**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 3.3.2. Alegerea parametrilor pentru funcțiile la perete**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 3.3.3. Validarea metodelor și analiza rezultatelor**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 3.4. Concluzii.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 4. CONCEPTE NOI DE ARIPI INVERSATE ȘI OPTIMIZAREA LOR**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

- Introducere.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 4.1. Teoria metodelor de optimizare din DesignXplorer**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.1. Metoda pentru modificarea parametrizată a discretizării (morphing).....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.1.1. Descrierea scurtă a funcțiilor și algoritmului care stau la baza RBF Morph .**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.1.2. Optimizarea cu ANSA**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.2. Proiectarea experimentelor**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.2.1. Central Composite Design**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.2.2. Box-Behnken Design**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.3. Algoritmii de optimizare folosiți**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.1.3.1 Algoritmul genetic multiobiectiv (MOGA)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 4.2. Optimizarea aerodinamică multiobiectiv a aripilor inversate create**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.2.1. Metoda de studiu utilizată .**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.2.2 Crearea unor concepte de profile premergătoare optimizării, plecând de la brevetul de invenție Nr 123456**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.2.3 Descrierea celor mai bune două profile create**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 4.3. Metoda de optimizare aplicată.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.1. Optimizarea profilelor aerodinamice (în 2D)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.1.1. Optimizarea conceptului c25 (J6.1÷J6.4 c25)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.1.2. Optimizarea conceptului c4.1 (J6.1 –J6.7 c4.1)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.2. Optimizarea aripilor în 3D pe automobilul simplificat de curse**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.2.1. Optimizarea conceptului Spiroid tip (J7.1s și J7.2s)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.2.2. Optimizarea conceptului Blended winglet (J7.1 bw si J7.2 bw).....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.2.3. Optimizarea conceptului WING-GRID (J7.1 w-g)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.2.4. Optimizarea bordurii marginale (J7.1 bm)**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
 - 4.3.2.5 Optimizarea distribuției răsucirii aripii inversate (J7.1r).....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
- 4.4. Discuția și analiza rezultatelor.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

4.5. Concluzii.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5. STUDIUL INFLUENȚEI GEOMETRIEI AUTOTURISMULUI ASUPRA ARIPII INVERSATE **Eroare!**

Marcaj în document nedefinit.

- 5.1. Modelarea curgerii în jurul unui autoturism sport simplificat**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.1.1. Convergența discretizării...**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.1.2. Preprocesarea.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.1.3 Analiza coeficienților de portanță și rezistență la înaintare**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.1.4. Analiza topologiei curgerii **Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2. Simularea numerică a curgerii în jurul unui automobil sport complex**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.1. Concepția geometrică**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.2. Discretizarea domeniului...**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.2.1 Optimizarea suprafeței de creștere a stratului limită**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.2.2 Divizarea volumului in subdomenii**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.3. Preprocesarea.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.4. Analiza coeficienților de portanță și rezistență la înaintare**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.2.5. Analiza topologiei curgerii **Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
5.3. Concluzii.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

- 6.1. Concluzii.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
6.2 Contribuții personale**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**
ANEXA A BREVETUL DE INVENȚIE**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

ANEXA B REGULAMENTUL TEHNIC FIA GT1 ȘI GT2**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

ANEXA C STADIUL TEHNICII PENTRU PROFILE AERODINAMICE**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

BIBLIOGRAFIE**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

BREVETUL DE INVENȚIE**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

LUCRĂRI PUBLICATE.....**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

BIBLIOGRAFIA SELECTIVĂ**Eroare! Marcaj în document nedefinit.**

1. INTRODUCERE

Sinergia dintre CFD (Mecanica fluidelor computațională) și încercările în tunel au mărit potențialul optimizării aerodinamicii externe în procesul de dezvoltare al mașinilor de curse. CFD este adesea utilizat în motor sport pentru a optimiza forma automobilului pentru forța de apăsare (portanța negativă), rezistența la înaintare, corelări cu teste în tunel și teste pe pistă.

Cel mai bun exemplu este procesul de dezvoltare bazat pe CFD al DBRS9¹, care a început cu un model CFD și a trecut direct pe pistă fără faza de tunel. A câștigat cursa de 24 de ore de la Le Mans.

Pentru a realiza optimizarea formei aripii inversate pe automobilul de curse, trebuie atinsă convergența către o metodă de simulare numerică robustă și de încredere, care să ne permită să comparăm modificări alternative ale aripii. Simularea numerică este dependentă de constanțerile de memorie RAM și timp de simulare. Aceste constrângeri determină strategia de modelare folosită în funcție de numărul total de noduri din discretizare și complexitatea geometrică a modelului numeric. Cu cât rezoluția este mai mare, cu atât crește precizia (cu excepția cazului în care valoarea medie a y^+ este greșită - atunci rezultatele vor fi și mai departe de adevăr), dar timpul de simulare va fi mai îndelungat. Din acest motiv, este necesar să se găsească cel mai bun compromis între costul computațional al simulării și acuratețe, proces care implică o serie de dificultăți. De ce ar fi așa de importantă acuratețea simulării? Un exemplu bun ar fi WINGGRID-ul², o invenție foarte eficientă în reducerea rezistenței induse cu 50% sau mai mult, care, nici până în ziua de azi, nu a avut o simulare numerică care să atingă același nivel de eficiență aerodinamică din punct de vedere cantitativ³. În această lucrare se va prezenta o corelare cu succes pentru parametrii calitativi și cantitativi pentru dispozitive de la extremitatea aripii care includ și WINGGRID-ul. Nu trebuie să uităm că există o eroare de până la 5% între diferite teste în tunele aerodinamice pentru aceeași geometrie suflată⁴. Încercările în zbor pentru winglet au arătat o reducere a rezistenței la înaintare de 7%, în timp ce testele în tunel au arătat o reducere de doar 2%⁵. Aceasta înseamnă că validarea finală ar trebui să se facă în mediul natural de operare al aripii: teste în zbor pentru domeniul aerospațial și teste pe pistă pentru motor sport.

În această lucrare se prezintă și un benchmark de 135 simulări numerice pe care le-am efectuat pentru a realiza o ierarhie în funcție de resursele de calcul și acuratețea predicției numerice a rezistenței la înaintare, portanței și eficienței aerodinamice. Analiza rezultatelor acestor simulări se face în capitolul 3. În urma acestor experimente numerice a rezultat cea mai bună metodă de simulare. Am prezentat mai întâi o comparație a rezultatelor simulărilor cu rezultate experimentale din literatură⁶, pe bine cunoscutul model Ahmed body de mașină simplificată⁷.

În faza a doua a cercetării, pornind de la analiza rezultatelor numerice pentru curgerea în jurul corpului simplificat Ahmed body, am aplicat cele mai bune două modele de turbulență pentru simularea curgerii în jurul unui automobil de curse simplificat (model ANSA), pentru o mai bună înțelegere a tehnicilor de preprocesare și analiză numerică a curgerii în cazul unei geometrii mai complexe.

În continuare, am efectuat o analiză numerică detaliată a curgerii în jurul unui automobil de curse complex (creație proprie), cu partea inferioară simplificată și cu intrările de aer închise.

Am ilustrat în figura 1.1, într-o formă simplificată, etapele de cercetare pe care le-am urmat.

¹ Rob Lewis, 2006. Aston Martin beats the 24 hour clock.

² Ulirch La Roche US Patent 5823480, 1998. Wing with a Wing Grid as the End Section.

³ M. J. Smith et al., 2001. Performance Analysis of a Wing with Multiple Winglets. AIAA-2001-2407

⁴ W.H. Hucho, 1998. Aerodynamics of Road Vehicles, 4th Edition, SAE International.

⁵ Joe Clark, 1999. Personal communication.

⁶ H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker, 2009. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model).

⁷ Ahmed, S.R., Ramm G., 1984. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300.

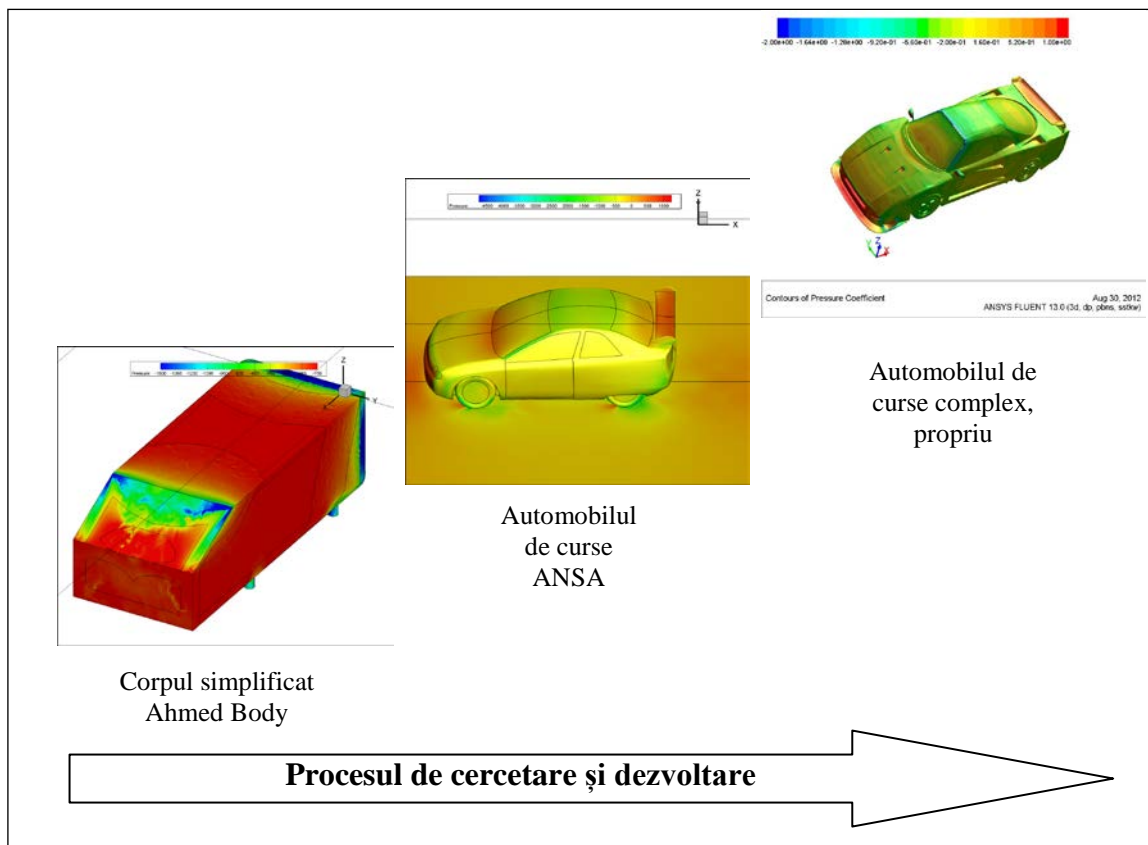


Figura 1.1 - Procesul de cercetare și dezvoltare simplificat.

Apoi, urmează o analiză similară pe același model, dar cu parte tehnică inferioară recreată (discurile de frână, placheții de frână, direcția, transmisia, suspensia etc). Motivul recreării acestor detalii tehnice este influența lor asupra difuzorului spate cu impact direct asupra forței aerodinamice de apăsare a automobilului, deci asupra dimensionării aripii inversate față și spate. Performanța aripii inversate este influențată de cuplajul între diferite elemente cum ar fi unghiul la lunetă față de axa longitudinală x , stâlpul C și lungimea portbagajului⁸. Calitatea curgerii către aripi inversate poate fi influențată chiar și de raza și unghiul stâlpului A ⁹ și de forma și poziția oglinzii. Asta înseamnă că studierea doar a aripii inversate nu este suficient de relevantă, datorită imposibilității de reproducere a interacțiunilor complexe între diferite elemente ale mașinii, prin introducerea de condiții la limită simple. De asemenea, aripi inversate induce o creștere a amplitudinii coeficientului de presiune negativă de-a lungul întregului planșeu al mașinii de curse, ceea ce creează mai multă forță de apăsare decât ar fi putut crea aripi singură¹⁰.

După cum a spus¹¹ Dr. Jaroslaw Sobieski, cercetător la NASA Langley, în timpul prelegerii de la MIT din 2005, "factorii din funcția obiectiv ar trebui să fie decizi de timpul obținut de autoturismul sportiv în jurul circuitului. Pe porțiunea de accelerație, greutatea este cea mai importantă și ar trebui minimizată. Pe porțiunea de viteză mare a circuitului, rezistența la înaintare este cea mai importantă și ar trebui minimizată. În viraje, forța aerodinamică de apăsare este cea mai importantă și ar trebui maximizată. Validarea finală ar trebui să fie făcută în tunelul aerodinamic." Pentru a putea răspunde acestor cerințe, am creat automobilul complex de curse cu detalii tehnice la care am adăugat un kit aerodinamic pentru reducerea rezistenței la înaintare și mărirea forței de apăsare, păstrând, în același timp,

⁸ W.H. Hucho, 1998. Aerodynamics of Road Vehicles, 4th Edition, SAE International.

⁹ Murand et al., 2004. Simulation of Vehicle A-Pillar Aerodynamics using Various Turbulence Models. SAE Technical Paper 2004-01-0231.

¹⁰ Joseph Katz, 2006. Race Car Aerodynamics Designing for Speed, 246-247.

¹¹ Guest Lecture by Dr. Jaroslaw Sobieski, NASA. URL: <http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-810-engineering-design-and-rapid-prototyping-january-iap-2005/projects/>

echilibrul aerodinamic al mașinii pentru a nu strica, ci a îmbunătăți dinamica automobilului. Kitul aerodinamic, așa cum l-am conceput, constă în coadă fluidă, decupaj în arcuț în fața și spate tip Nissan Leaf pentru deflectarea fileurilor de aer pe lângă roată, respectiv perforate pe spate, lamă suplă, "splitter" față complex, placă de picaj ("dive plate"), și aripă inversată optimizată (vezi Figura 1.2).

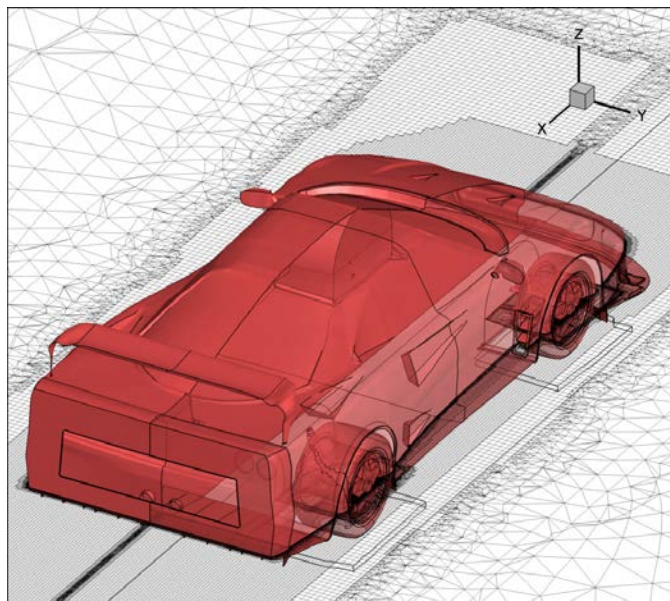


Figura 1.2 - Sistemul creat de la zero cu partea tehnică și cu kit aerodinamic complex.

Procesul de cercetare și proiectare detaliat pe care l-am urmat este ilustrat în Figura 1.3. Această figură ajută la o mai bună înțelegere a filozofiei de cercetare și proiectare pe care am aplicat-o.

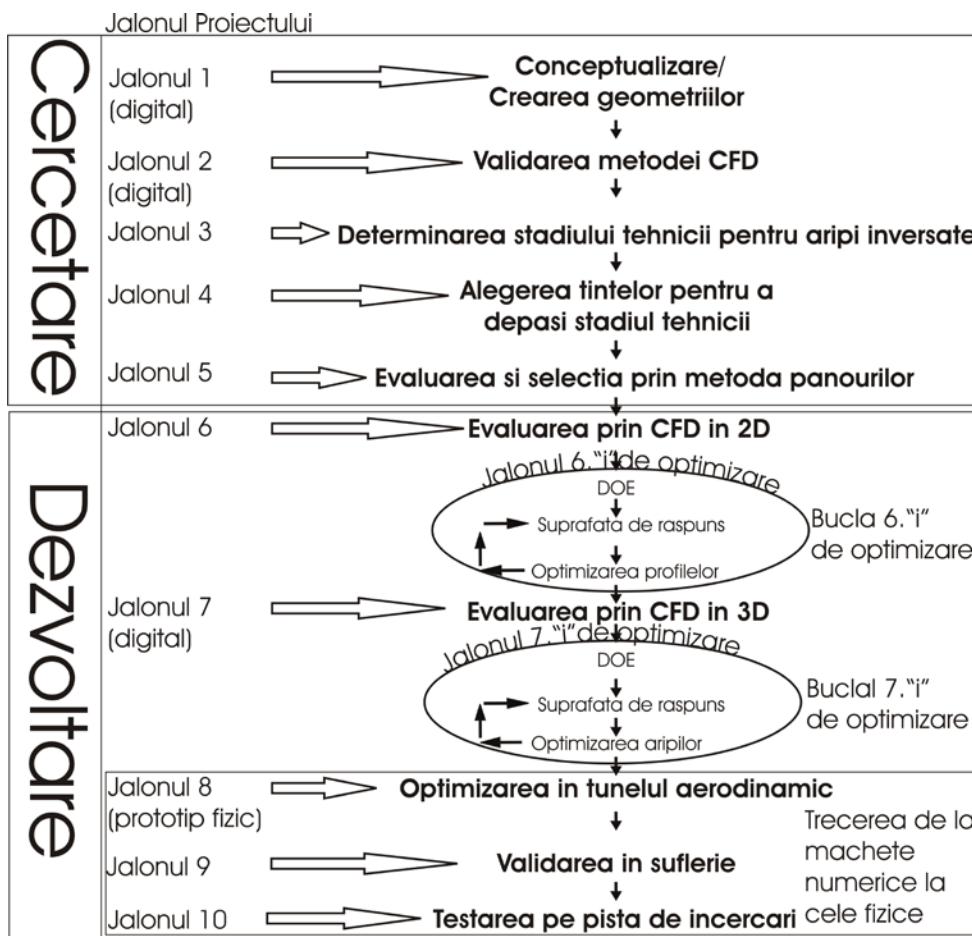


Figura 1.3 - Planul detaliat de cercetare și proiectare.

SCOPUL ȘI OBIECTIVELE

Obiectivul acestei lucrări este crearea unei aripi inversate, mai eficientă decât aripile inversate existente în prezent ptr FIA GT1.

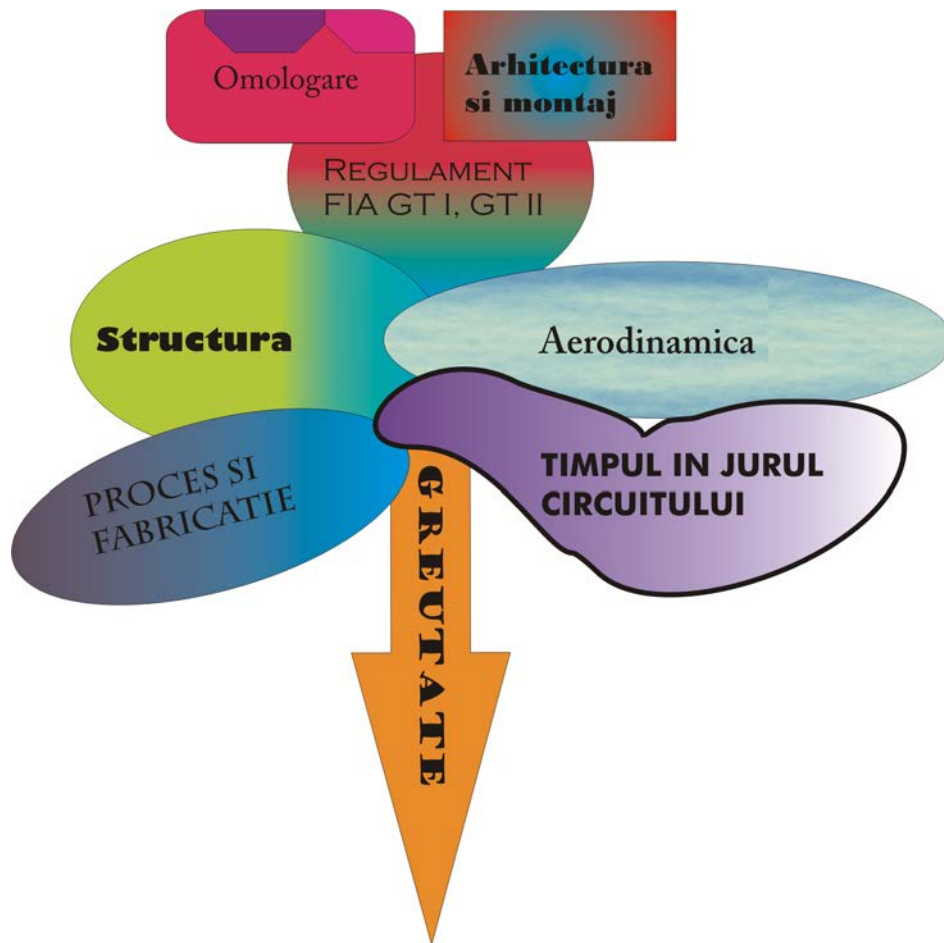


Figura 1.4 - Disciplinele implicate în proiectarea aripii inversate.

DESCRIEREA PROBLEMEI TEHNICE DE REZOLVAT

Pentru a atinge țintele stabilite, mi-am propus să rezolv următoarea problemă tehnică: crearea un profil aerodinamic care să fie la limita desprinderii (forță maximă de apăsare), minimizând în același timp rezistența la înaintare. Rezistența la înaintare și masa ansamblului aripa - suport trebuie minimizată, păstrând forța de apăsare maximă. Constrângerile regulamentului tehnic FIA GT (vezi anexa B), împreună cu cele de proces și fabricație, trebuie, de asemenea, respectate. Am anticipat două soluții finale: una pentru forță de apăsare maximă și una pentru finețe absolută maximă. Rezistența minimă la înaintare a automobilului de curse este considerată în absența aripii inversate. Astfel, nu este necesară proiectarea unei aripi inversate de rezistență minimă la înaintare. S-a demonstrat de către Dr. Rob Dominy în ¹² că astfel de soluții măresc finețea aerodinamică absolută a automobilului de curse GT. Rezultă, astfel, un timp mai rapid în jurul circuitului, potrivit simulărilor de dinamica mașinii.

2. STADIUL ACTUAL AL TEHNICII ȘI DEFINIREA OBIECTIVELOR CERCETĂRII

În acest capitol este prezentată munca intelectuală a altor cercetători, relevantă pentru această lucrare, precum și o analiză numerică a unor profile existente în literatura de specialitate. În subcapitolul 2.1 am trecut în evidență doar teoria din spatele experimentelor numerice ce au fost făcute pentru acest proiect, resursele bibliografice fiind redată pe tot parcursul capitolului.

¹² Simon McBeath, 2011, Competition Car Aerodynamics a Practical Handbook Second Edition.

În subcapitolul 2.2 se descrie stadiul cercetărilor pentru modelarea curgerii în jurul automobilelor iar în 2.3. am realizat un studiu numeric pentru o serie de profile aerodinamice existente în literatura de specialitate, precum și a profilului din brevetul propriu de invenție 123456. Acest studiu a fost realizat cu scopul definirii obiectivelor cercetării și pentru a putea înlesni și justifica (cu argumente teoretice și dovezi numerice) o alegere foarte dificilă cu privire la cel mai potrivit model de turbulență, știind că turbulența este încă cea mai mare problemă nerezolvată de mecanica fluidelor. În capitolele următoare am comparat propriile soluții pentru profile aerodinamice cu cele mai bune găsite în literatura de specialitate.

2.3. Analiza numerică a profilelor aerodinamice din literatura de specialitate

Ca parte a procesului de cercetare și dezvoltare (vezi figura 2.5 pentru logica de studiu), în prima etapă, am analizat numeric coeficienții de rezistență la înaintare și portanța pentru 1177 profile aerodinamice (din baza de date "UIUC"), cu metoda panourilor, (cu ajutorul programului Visual Foil) și cu o metodă care are la bază Xfoil denumită "Profili 2.30a Pro" (pentru profile în aer liber, fără automobil).

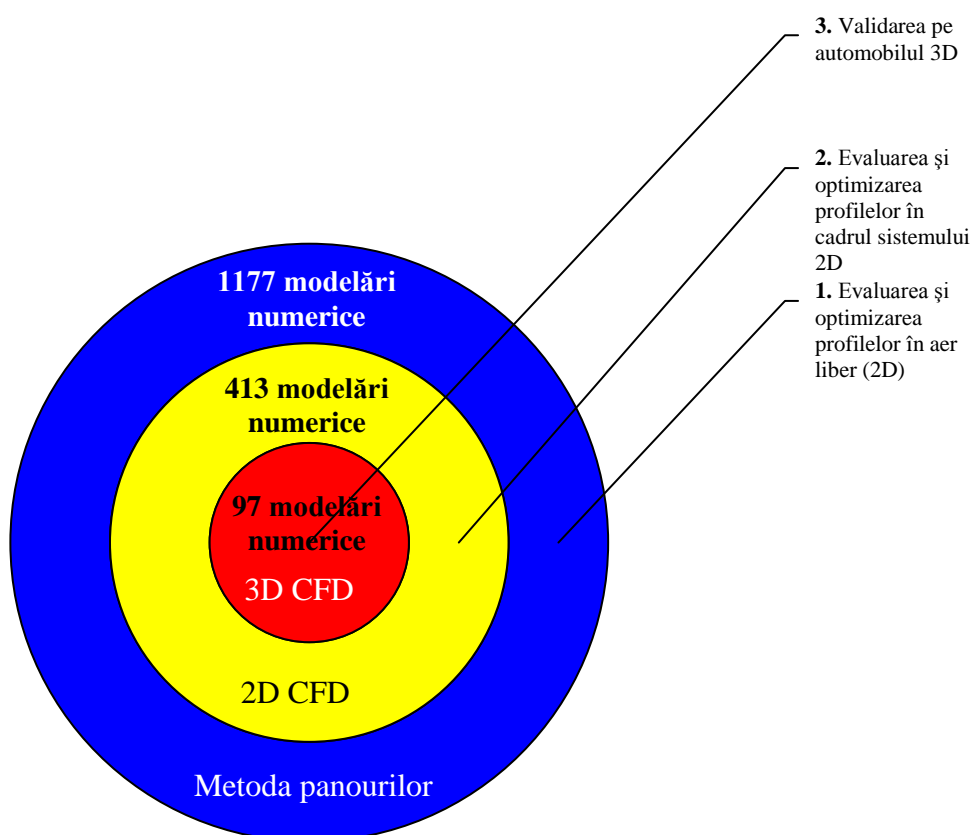


Figura 2.5 - Diagrama logicii de cercetare și dezvoltare a profilelor existente și a celor proprii.

Pornind de la această analiză, am creat profilul aerodinamic din brevetul de invenție numărul 123456, recent aprobat (ianuarie 2012).

Lista completă a profilelor aerodinamice cu portanță ridicată pe care le-am studiat numeric în această lucrare se găsește în anexa C, aceasta fiind reprezentativă pentru stadiul tehnicii, dar fără să fie exhaustivă.

În urma acestei analize, am selectat dintre cele 1177 profile doar 378 de profile pentru care am obținut cele mai bune rezultate.

În următoarea etapă am efectuat evaluare numerică și optimizare (automată) în 2D a celor 378 de profile montate pe un autoturism. Pentru unul dintre profile (NACA 4412) am efectuat 36 modelări numerice pentru a stabili cea mai bună metodă de calcul. Modelările au fost realizate cu ajutorul programului Fluent, cu modelul de turbulență SST k -omega, în regim staționar și pentru o viteză a curentului de aer de 100 MPH ($Re = 918\ 113$). Am ilustrat în figurile 2.6a și 2.7 sistemul format din autoturismul 3D, din care am extras profilul 2D utilizat în analizele numerice realizate, precum și un detaliu de discretizare pentru profilul din brevetul de invenție 123456 (figura 2.8). Autoturismul 3D, precum și modalitatea de obținere a profilului 2D sunt descrise detaliat în capitolul 4.

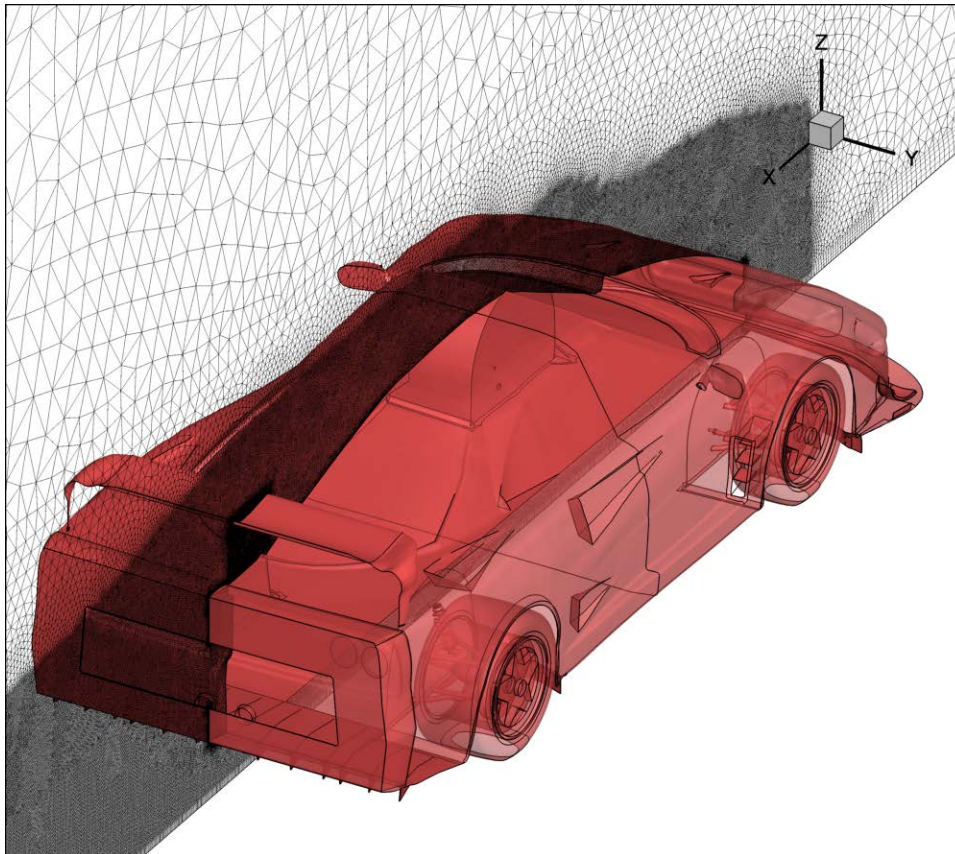


Figura 2.6a Autoturismul 3D și procesul de extragere a profilului 2D prin secționare în plan median longitudinal.

În tabelul 2.1 sunt descrise cele 378 profile analizate numeric pe ansamblul autoturism + aripă, precum și o sinteză a simulărilor numerice pe care le-am realizat, în 2D.

Nr simulari	CAZ	α global [°]	V_{∞} [m/s]	L_c [m]	b [m]	S [m ²]	ρ kg/m ³	Viscozitate [kg/m-s]	Nr. Reynolds
36	Validarea metodei CFD în 2D / TM563	- 0.5÷22.1	50	0,87	0,76	1	1,225	1,79E-05	3.000.000
42	G1 rar (brevet)	0	41,79	0,3	1,5	0,45	1,225	1,79E-05	858.301
47	ATC si Stadiul Tehnicii (cu CFD)	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
28	Concepte initializare opti profile, abordare "Gunshot"	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
79	Optimizare	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113

	c4.1 M6								
11	Optimizare c4.1 M4- M5	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
27	Optimizare c4.1 M1- M3	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
65	Optimizare c4.1 M7 ANSA	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
1	c4.1 decapitat/detuned	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
27	Optimizare c25 M1	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
28	Optimizare c25 M2, M3	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113
21	Optimizare c25 M4 10 p (21 din 149 dp)	0	44,70	0,3	1,40	0,42	1,225	1,79E-05	918.113

Tabelul 2.1 Sinteza simulărilor 2D

Rezultatele 2D privind coeficienții de rezistență la înaintare și portanța, pe care le-am obținut prin analiza numerică a profilelor din literatura de specialitate pentru automobilul sport complex sunt sintetizate în figurile 2.9 și 2.10. Aceste rezultate, împreună cu analiza numerică a profilelor aerodinamice existente, reprezintă “coloana vertebrală” a acestei lucrări, baza de la care a pornit dezvoltarea propriilor profile, precum și punctul de pornire al concluziilor.

După evaluarea numerică pe automobilul de curse în 2D, am stabilit următoarele ținte de atins și, dacă este posibil, de depășit:

- Pentru finețe maximă absolută ($|k|=|Cl/Cd|$): Liebeck L1003, cu $|k|=143.3$;
- Pentru forță de apăsare maximă ($-Cl$): APR Performance GTC500, cu $-Cl=2.79$
- Ținta pentru coeficientul minim de rezistență la înaintare (Cd) rezultat este: L1003, cu $Cd=0.011129$,

Restricțiile de care am ținut cont în cercetare sunt date de regulamentul FIA GT1 și GT2 (vezi anexa B) și pot fi sintetizate după cum urmează:

- toate profilele trebuie să aibă un flaps Gurney
- coarda maximă este de 300 mm pentru GT2 și 400 mm pentru GT1,
- înălțimea aripii inversate deasupra portbagajului nu poate fi cel mai înalt punct al automobilului și nu mai mult de 520 mm,
- este permisă aripă cu un singur element. De asemenea, au fost adăugate constrângeri de fezabilitate structurală și de producție.

În logica de studiu inițială au fost trecute teste în tunel și pe pistă, ca ultim jalon de optimizare și validare, dar aceste teste nu au fost efectuate din motive de finanțare.

2.3.1. Profile de aripi inversate cu eficiență și forță de apăsare maxime

Unele profile aerodinamice analizate din lista profilelor din literatura de specialitate (vezi anexa C) pot fi clasificate ca foarte eficiente (și în același timp cu $-Cl$ mare) atunci când depășesc $|k|=60$ (vezi figurile 2.9 și 2.10).

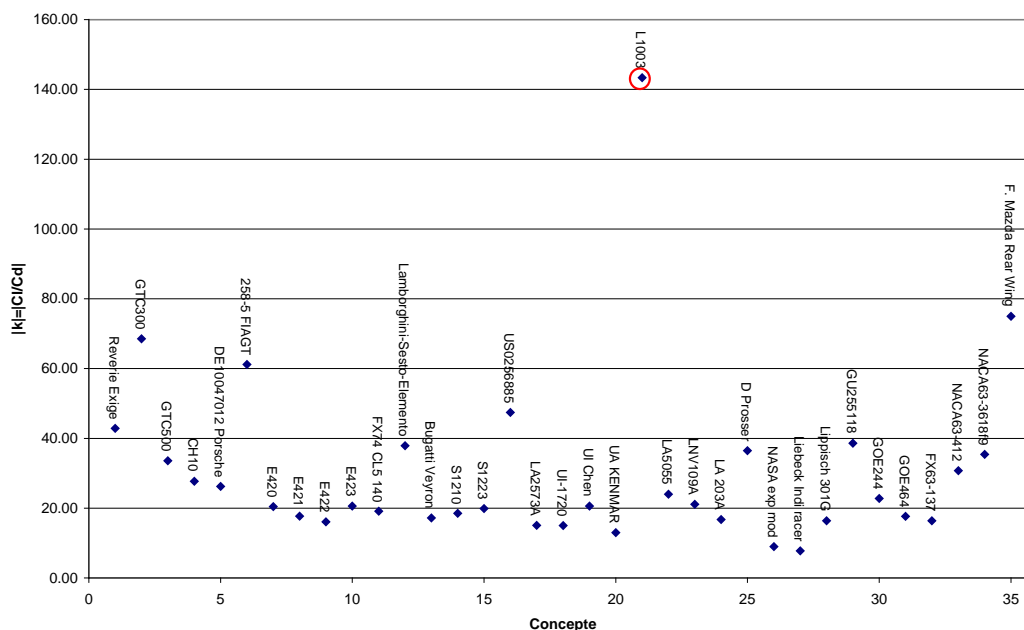


Figura 2.9 - Finețea maximă absolută pe automobilul de curse FIA GT în 2D, pentru cele mai bune 35 de profile analizate numeric.

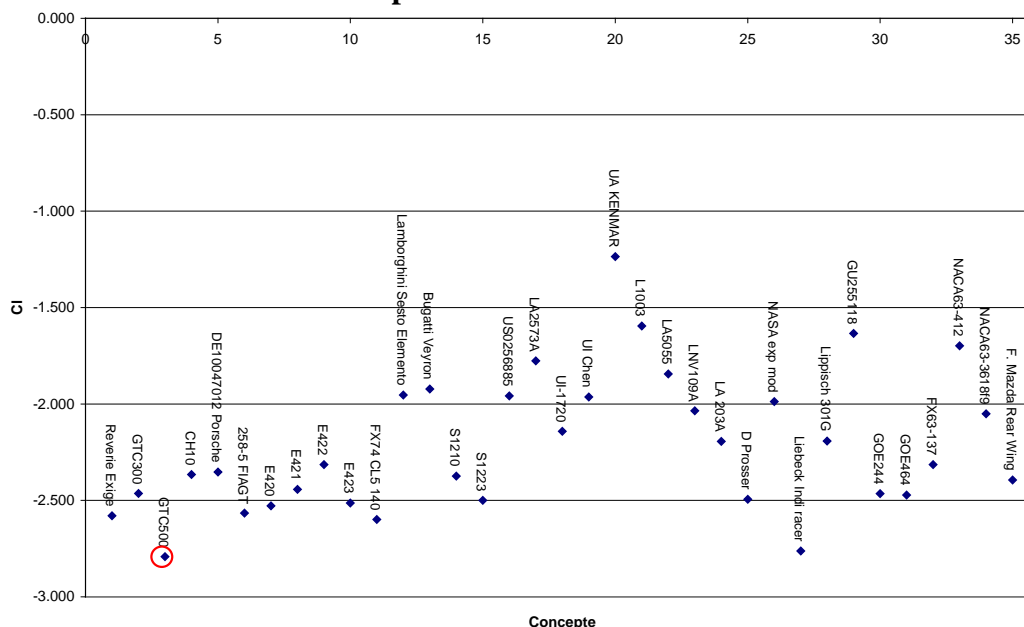


Figura 2.10 – Coeficientul de forță de apăsare pentru cele mai bune 35 de profile.

LISTA PROFILELOR EXISTENTE ÎN LITERATURA DE SPECIALITATE, CU C _l ȘI k _{MAX} , CARE AU FOST ANALIZATE NUMERIC		
Reverie Exige (Lotus)	FX 63-137	Douglas Liebeck LNV 109A
APR Performance GTC 300	Profilul aripii inversate de pe Lamborghini-Sesto-Elemento 2010	Douglas Liebeck 203A
APR Performance GTC 500	Lippisch 301G	University of Alberta Kennedy and Marsden
CH10	Profilul aripii inversate de pe Bugatti Veyron	University of Illinois UI-1720

Brevetul Porsche DE10047012	Selig S1220	UI Chen
Profilul din figura 258-5 a regulamentului FIA GT	Selig S1223	University of Glasgow GU25-5-11-8
Eppler E423	Brevetul US2004 0256885	GOE244
E422	Profilul Liebeck al elementului principal ptr Indianapolis	GOE464
E421	L1003	NACA63-412
E420	LA5055	Profilul elementului principal pentru aripa spate Formula Mazda
Wortmann FX74 CL5 140	LA2573A	NASA experimental high lift airfoil modificat

Tabelul 2.2 Lista profilelor existente în literatura de specialitate, cu Cl și k_{max} , care au fost analizate numeric.

2.4. Concluzii

Urmând logica cercetării descrisă deja, (vezi figura 2.5), în prima etapă, am analizat numeric coeficienții de rezistență la înaintare și portanța pentru pentru 1177 profile aerodinamice (din baza de date “UIUC”), cu metoda panourilor, (cu ajutorul programului Visual Foil) și cu o metodă care are la bază Xfoil (profile în aer liber, fără automobil).

În urma acestei analize, am selectat dintre cele 1177 profile doar 378 de profile pentru care am obținut cele mai bune rezultate și pentru care, în următoarea etapă, am efectuat o evaluare numerică 2D a celor 378 de profile montate pe un autoturism, utilizând modelul de turbulență SST k -omega, care am dovedit, în urma unei analize numerice, că dă cele mai bune rezultate pentru aceste probleme de aerodinamică.

După evaluarea numerică a profilelor aerodinamice menționate în capitolul anterior (vezi figura 2.9 și figura 2.10) pe automobilul de curse în 2D, am stabilit obiectivele de atins și, dacă este posibil, de depășit pentru aripile pe care le voi optimiza în capitolele ce urmează:

- Pentru finețe maximă absolută ($|k|=|Cl/Cd|$): Liebeck L1003, cu $|k|=143.3$;
- Pentru forță de apăsare maximă ($-Cl$): APR Performance GTC500, cu $-Cl=2.79$
- Ținta pentru coeficientul minim de rezistență la înaintare (Cd) rezultat este: L1003, cu $Cd=0.011129$,
- Restricțiile de care am ținut cont în cercetare sunt date de regulamentul FIA GT1 și GT2 (vezi anexa B).

Odată analizate numeric profilele din literatura de specialitate, am stabilit planul de acțiune pentru depășirea performanțelor celor mai bune profile. Acest plan este concretizat în capitolul 5 (optimizarea profilelor și a aripilor inversate) plecând, ca și în domeniul aerospațial, de la cel mai bun profil pe care l-am creat (în cazul de față de la brevetul de invenție nr. 123456).

3. ANALIZA COMPARATIVĂ A MODELELOR DE TURBULENȚĂ APLICATE ÎN STUDIUL AERODINAMICII AUTOTURISMELOR SPORT

3.1. Introducere

Efortul din acest capitol este direcționat către găsirea răspunsului la întrebarea ”care este cea mai potrivită combinație de solver și, mai ales, model de turbulență din punct de vedere al acurateței, în ziua de azi?”. Răspunsul a fost folosit în majoritatea simulărilor din restul tezei. Practic, toată dezvoltarea ulterioară a fost făcută cu metoda și modelul de turbulență deduse din cercetare.

Cazul pe care l-am definit în vederea analizei comparative a modelelor de turbulență este curgerea în jurul unui corp simplificat, bine cunoscutul Ahmed body, pentru care există rezultate experimentale care pot fi utilizate în vederea validării rezultatelor numerice.

Am analizat numeric toate modelele de turbulență disponibile în programele de modelare Fluent, CFX, PowerFLOW și OpenFOAM, rezultatele fiind comparate cu cele existente în literatură pentru teste în tunel¹³ și¹⁴ pentru PowerFLOW¹⁵, OpenFOAM^{16, 17, 18}, Star-CCM+¹⁹.

3.2. Modelarea curgerii în jurul unui corp simplificat (Ahmed Body)

3.2.1. Dezvoltarea metodelor de studiu

Dezvoltarea metodei de studiu în Fluent

Strategia de simulare cu Fluent este ilustrată în figura 3.13, fiind discutată în detaliu în subcapitolul 3.2.3.

- Au fost folosite atât solver-ul tranzitoriu cât și cel staționar.
- Solver-ul liniar: V-Cycle (AMG) pentru toate variabilele.
- Cuplarea presiune - viteză : SIMPLEC
- Schema de discretizare : Ordinul Doi pentru toate variabilele. Factorul de relaxare: 0.65 pentru Presiune și 0.5 pentru restul.
- Modelele de turbulență care au fost folosite sunt: Spalart-Allmaras, realizable k- ϵ (RKE), k- ω Shear Stress Transport (k- ω SST), Transition k-kl-w, Transition -SST, Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulation (DES), scale adapted simulation (SAS) și v2f.

¹³ Ahmed, S.R., Ramm G., 1984. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300

¹⁴ H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker, 2009. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model).

¹⁵ Ehab Fares, 2006. Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach.

¹⁶ Sebastian MÖLLER, et al., 2008. Investigation of the flow around the Ahmed body using RANS and URANS with various turbulence models.

¹⁷ Louis Gagnon, Marc J. Richard, 2010. Parallel CFD of a prototype car with OpenFOAM.

¹⁸ M. Islam, et al., 2009. Application of Detached-Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development.

¹⁹ Nor Elyana Ahmad et al., 2010. Mesh Optimization for Ground vehicles Aerodynamics. CFD Letters, 54-65.

- Funcția la zid: standard

Dezvoltarea metodei de studiu în CFX

CFX cu funcțiile sale la zid automate folosește cel mai bine rezoluția disponibilă rețelei de discretizare dovedindu-se cel mai bun pentru ΔC_d mediu și numărul 3 pentru ΔC_l . Pierde locuri în clasament pentru eficiența aerodinamică $\Delta k=C_l/C_d$, și ajunge pe locul 6.

Interpolatorul din CFX este văzut ca un avantaj serios atunci când este comparat cu metoda coarse-to-fine din PowerFLOW și cel din OpenFOAM pentru că facilitează optimizarea de formă în timp ce reduce timpul de simulare, și nu mai menționăm disponibilitatea pentru cuplaj dublu aero-structural prin intermediul workbench ANSYS²⁰

- Au fost folosite atât solver-ul tranzitoriu cât și cel staționar.
- Pentru simularea tranzitorie am folosit pas de timp automat (adaptat): valoarea maximă fiind de 0.0005 [s] și minimă fiind de 5e-05 [s].
- Setările solver-ului:
- Turbulența și schema numerică: rezoluție ridicată.
- Forțele inerțiale:
- Tipul medierii forțelor: volume-weighted (din volum)
- Controlul convergenței:
- Numărul maxim al ” coefficient loops”: minim 1 și maxim 10.
- Criteriile de convergență:
- Ținta pentru Residual: 0.000001
- Tipul de Residual: RMS
- Schema tranzitorie:
- Ordinul doi Euler inversat
- Cuplarea presiune-viteză:
- Opțiunea Rhie Chow: Ordinul patru
- Model de turbulență folosit: k- ω SST
- Funcția la zid: automată.

Dezvoltarea metodei de studiu în PowerFLOW

Acest program de modelare numerică tridimensională este bazat pe metoda Boltzmann pe rețea (LBM), o abordare recentă și versatilă pentru dezvoltarea schemelor numerice aplicate simulării curgerii fluidelor pe geometrii complexe.

Metoda Boltzmann pe rețea joacă un rol dominant în comunitatea CFD²¹. Aceste modele de viteze discrete sunt bazate pe o discretizare specială a ecuațiilor cinetice macroscopice, de exemplu, prin construirea modelelor cinetice simple, care includ fizica fundamentală a proceselor microscopice și aplică metode numerice noi de discretizare ale acestor formulări cinetice. Este evident că modelele vitezelor discrete au la bază ecuația lui Boltzmann și teoria cinetică /kinetic theory în loc de ecuațiile Navier-Stokes și teoria continuității. În plus față de generalitatea teoretică, metodele bazate pe teoria cinetică pot

²⁰ ANSYS CFX 13.0., 2011. User Guide and Tutorial Guide.

²¹ S.Chen, G.D. Doolen, “Lattice Boltzmann methods for fluid flows”, Ann. Rev. Fluid Mech. 30, pp. 329-364, 1998.

avea avantaje numerice și de simulare, pentru că ecuația lui Boltzmann este o ecuație de ordinul I, liniară cu diferențiale parțiale (PDE) spre deosebire de ecuația Navier-Stokes care este un PDE de ordinul II neliniar.

- Modelul de turbulență folosit: RNG k-ε (singurul disponibil în PWF)
- Funcția la zid: cea implicită (singura disponibilă)

Am exclus PowerFLOW cu metoda lui Boltzmann D3Q19 și modelul de turbulență RNG k-ε din cauza problemelor de dezvoltare și de acuratețe de care suferă: eroarea relativă a rezistenței la înaintare de 59%, atunci când este comparat cu experimentul²² (al 14-lea în clasamentul din figura 3.15) și 6.5% eroare relativă pentru portanță (al 9-lea în clasament din figura 3.16.). Rezolvarea acestei probleme (care durează de 4 ani) este similară cu referința prezentată în²³, cu excepția regimului de curgere care nu este supersonic pentru automobile și funcția filtru este diferită, dar PowerFLOW este singurul program comercial care folosește metoda lui Boltzmann pe rețea, având un înalt nivel de inovație (brevet de invenție) și avantaje teoretice asupra abordării RANS^{24, 25, 26, 27, 28, 29, 30}.

Dezvoltarea metodei de studiu în OpenFOAM

OpenFOAM-ul este foarte atractiv din punct de vedere economic (codul sursă este disponibil fără preț pe licență=open), al cercetării^{31, 32} și al dezvoltării³³. Este în puternic contrast cu prețul foarte scump al licenței PowerFLOW. OpenFOAM ajunge la convergență mai repede decât Fluent, dar are mai puțină acuratețe cu aceeași rezoluție a rețelei de discretizare.

Solver-ul folosit a fost : SimpleFoam, staționar. Schemele de discretizare utilizate au fost:

- Grad Schemes: Gauss linear.
- Div Schemes: Gauss upwind.
- Laplacian Schemes: Gauss linear corrected.

²² W. Meile, 2007. Forces and pressure distribution

²³ Rainald Löhner, 2008. Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods, Second edition, pp. 167-169.

²⁴ Ehab Fares, 2006. Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach.

²⁵ Exa Corporation, 2006. PowerFLOW Best Practices Comprehensive Guide of: Geometry Preparation, External Aerodynamics, Aeroacoustics, and Thermal Management.

²⁶ HUDONG CHEN et al. 1997. Digital Physics Approach to Computational Fluid Dynamics: Some Basic Theoretical Features.

²⁷ Mehtab Pervaiz and Christopher Teixeira, 1999. Two Equation Turbulence Modeling with the Lattice-Boltzmann Method.

²⁸ HUDONG CHEN et al., 1998. Realization of fluid boundary conditions via discrete Boltzmann dynamics.

²⁹ HUDONG CHEN, 1998. Volumetric formulation of the lattice-Boltzmann method for fluid dynamics: Basic concept.

³⁰ Yangbing LI et al., 2004. Numerical study of flow past an impulsively started cylinder by the lattice-Boltzmann method.

³¹ Sebastian MÖLLER, et al., 2008. Investigation of the flow around the Ahmed body using RANS and URANS with various turbulence models.

³² Louis Gagnon, Marc J. Richard, 2010. Parallel CFD of a prototype car with OpenFOAM.

³³ M. Islam, et al., 2009. Application of Detached-Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development

- Solver-ul linear a fost: GAMG (Multigrid) cu "smoother": Gauss Seidel și nCellsInCoarsestLevel 150 de asemenea toleranța solver-ului a fost $1e-7$.
- Factorii de relaxare au fost 0.3 pentru pressure și 0.7 pentru celelalte variabile (U, k și omega). Modelul de turbulență folosit a fost: k- ω SST cu funcția la zid: omegaWallFunction.

3.2.2. Alegerea parametrilor rețelei de discretizare

Scopul acestui subcapitol este de a determina selecția unei strategii de discretizare a domeniul fluid pentru automobilul complex, argumentată științific cu rezultatele cele mai precise obținute cu Ahmed Body.

Curățirea geometriilor complexe și discretizarea lor sunt procesele cele mai repetitive și scumpe ca resursă de timp în ziua de azi pentru CFD.³⁴ ..

Simulările cu geometria corpului simplificat Ahmed^{35, 36} au fost făcute cu 13 discretizări cu rezoluții diferite (vezi tabelul 3.1) și au durat un an (timp de preparare, rulare și post-procesare). Cele 13 discretizări au fost: 200k, 500k, 530k, 1.3M (500k transformat în polyhedra), 1.68M, 1.79M (polyhedra), 1.9M, 5M (1.9M transformat în polyhedra), 7.69M, 13.8M, 14.58M, 14.6M și 23.5M elemente, vezi tabelul 3.1 pentru mai multe informații. Readuc aminte semnificația notației "base level": rezoluția cea mai rară a rețelei de discretizare și Lc este lungimea caracteristică.

Nr rețelei de discretizare	Mărimea rețelei de discretizare [elemente]	Base level [mm]	Lc a discretizării pe suprafață [mm]	Tipul elementelor din volum	Nr. elemente în BL	Ahmed Body complet sau 1/2	Software-ul folosit
1	200k	160	10	hexas, tetras	0	1/2	HARPOON
2	500k	160	5	hexas, tetras	0	1/2	HARPOON
3	530k	160	5	Hexas	2	1	PowerFLOW DISCRETIZER
4	1.3M	160	5	polyhedras, hexas	0	1/2	HARPOON
5	1.68 M	270	5	hexas, tetras, prisms	5	1	ANSA 13
6	1.79M	160	5	polyhedras, hexas, prisms	5	1	ANSA 13
7	1.9 M	160	2.5	hexas, tetras	2	1/2	HARPOON
8	5M	160	2.5	polyhedras, hexas	2	1/2	HARPOON
9	7.69 M	28.8	5	Hexas	2	1	PowerFLOW DISCRETIZER
10	13.8M	80	5-0.625	hexas, tetras	12	1	HARPOON
11	14.58 M	80	1.25	Hexas, tetras	2	1	HARPOON
12	14.6 M	80	1.25	hexas, tetras	2	1	HARPOON
13	23.5 M	30	0.93	hexas, tetras	0	1	HARPOON

Tabelul – 3.1. Cele 13 rețele de discretizare pentru Ahmed Body.

Nivelul cel mai rar de rezoluție (base level) pentru discretizarea de 500k (vezi figura 3.1) a fost de 160 mm, lungimea de referință a discretizării pe suprafață a fost de 5 mm iar în zonele de desprinderi 2.5 mm, în volum rezoluția cea mai fină a fost de 10 mm.

³⁴ Kent P. Misegades et al. Rapid Mesh Generation for Fluent Automotive Simulations.

³⁵ Ahmed, S.R., Ramm G., 1984. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300.

³⁶ H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker, 2009. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)

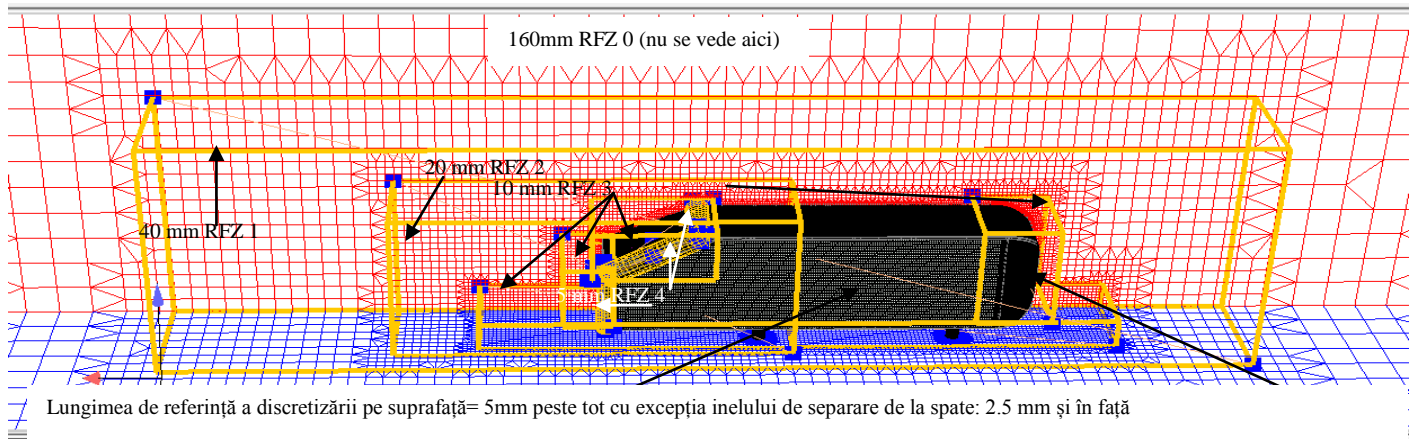


Figura 3.1 - Rețeaua de discretizare rară (500k) pentru 1/2* "Ahmed body" cu unghiul la lunetă

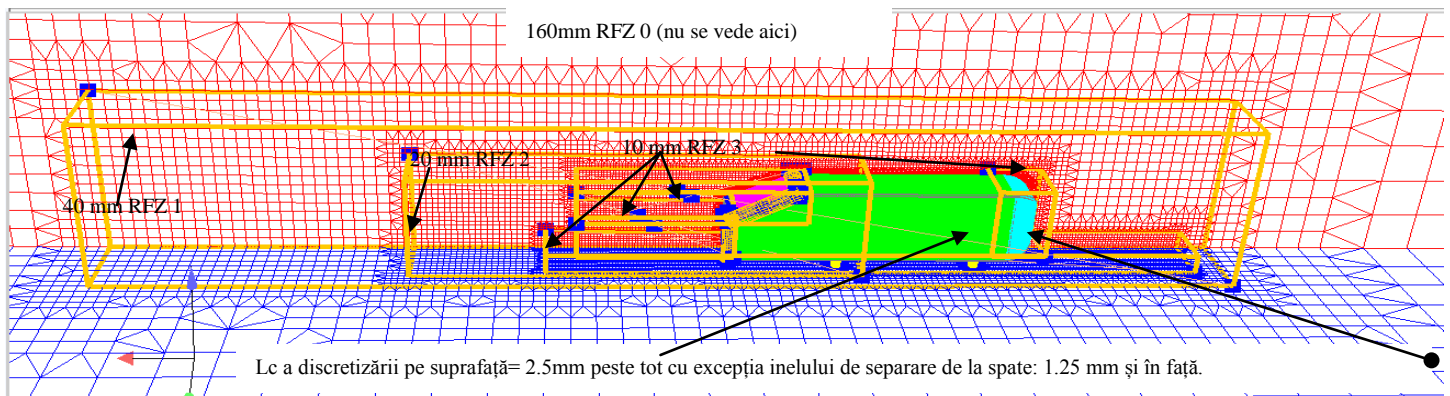
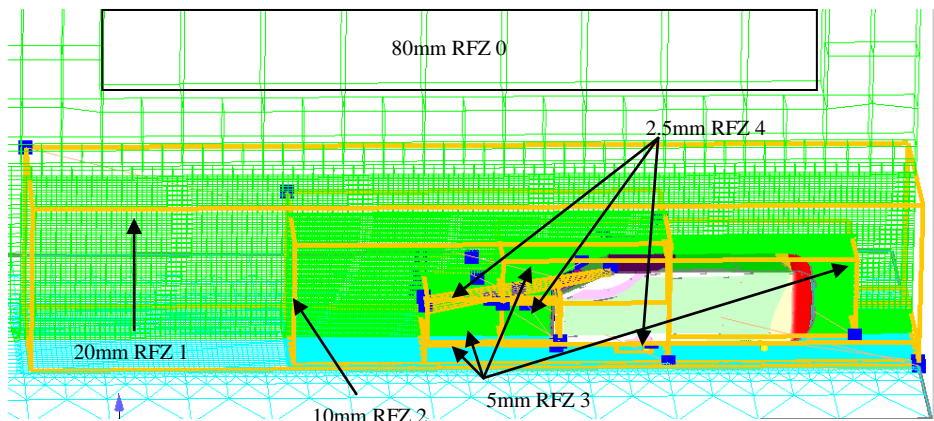


Figura 3.2 - Rețeaua de discretizare medie (1.9M) pentru 1/2* "Ahmed body" cu unghiul la lunetă

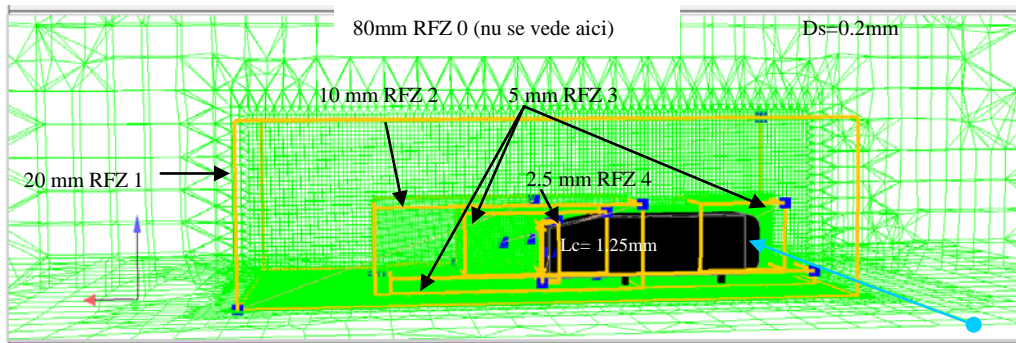
Nivelul cel mai rar de rezoluție (base level) pentru discretizarea de 13.8M (vezi Figura 3.3) a fost de 160 mm, lungimea de referință a discretizării pe suprafață a fost adaptată după C_p (determinat înainte într-o altă simulare) și variază între de la 5mm la 0.625mm. Dimesiunea domeniului de calcul a fost redusă drastic pentru a testa "trasparența" condițiilor la limită (subiect în ordinea de zi a articolelor recente, cele mai bine cotate, considerate vârf de lance): X [-10.44m, 22m], Y [± 0.93 m], Z [0, 1.4m].



Discretizarea de suprafață a fost adaptată (într-o simulare precedentă) după C_p și variază între 5mm și 0.625mm

Figura 3.3 - Rețeaua de discretizare fină (13.8M) pentru “Ahmed body”

Nivelul cel mai rar de rezoluție (base level) pentru discretizarea de 14.58M (vezi Figura 3.4) a fost de 80 mm, lungimea de referință a discretizării pe suprafață a fost de 1.25mm și cea mai fină zonă de rezoluție (RFZ4) a fost de 2.5mm



L_c a discretizării pe suprafață= 1.25mm peste tot cu excepția inelului de separare de la spate.: 0.625 mm și în față

Figura 3.4 - Rețeaua de discretizare fină (14.58M) pentru “Ahmed body” cu unghiul la lunetă $\phi = 12.5^\circ$.

Discretizarea cea mai fină a fost cea cu rezoluția (base level) de 30 (vezi figura 3.10). Cu alte cuvinte discretizarea de 23.5 M (vezi tabelul 3.1).

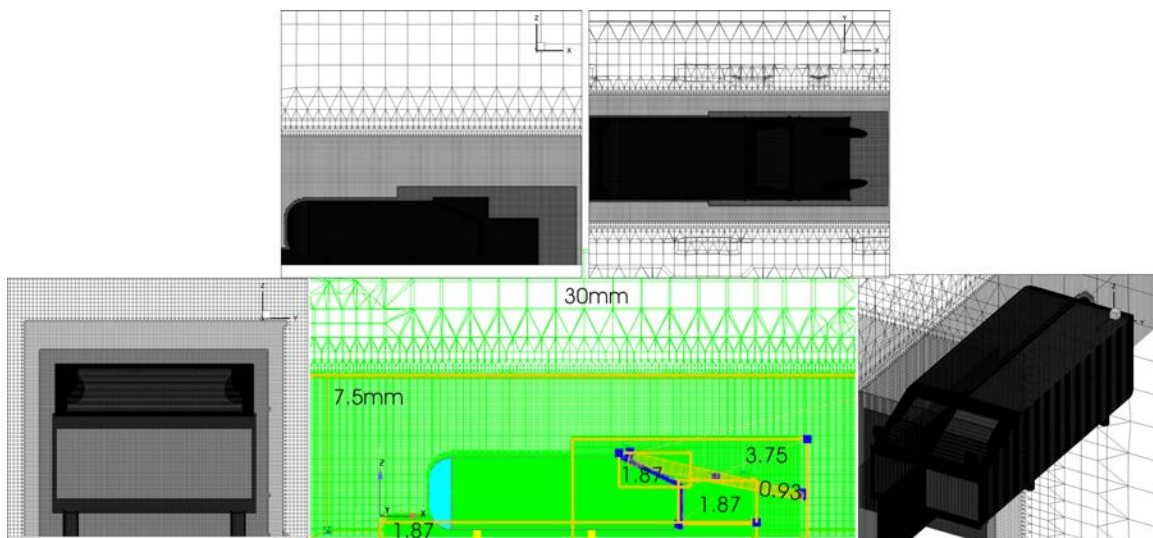


Figura 3.10 - Rețeaua de discretizare de 23.5M, făcută cu HARPOON.

3.2.3. Preprocesarea (Condiții la limită)

Condițiile la limită sunt prezentate în figura 3.11 și tabelul 3.2.

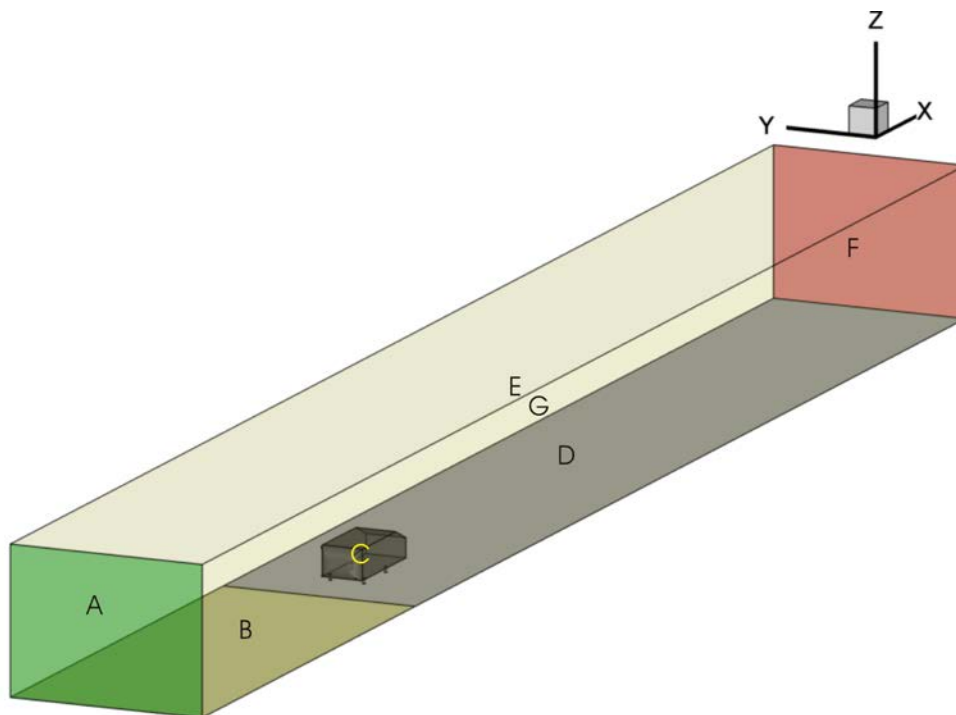


Figura 3.11 - Etichetarea frontierelor pentru Ahmed body cu unghi $\phi = 25^\circ$.

Boundary	Fluent	CFX	OpenFoam	PowerFLOW
A=inlet	velocity-inlet	inlet	inlet	inlet velocity
B=road slip	symmetry	free slip wall	slip	frictionless wall
C=Ahmed body	wall, no slip	wall, no slip	wall, no slip	wall, no slip
D=road no slip	wall, no slip	wall, no slip	wall, no slip	wall, no slip
E=sealing	symmetry	free slip wall	slip	frictionless wall
F=outlet	pressure-outlet	outlet	inletOutlet	outlet: static pressure, free flow direction
G=side walls	symmetry	free slip wall	slip	frictionless wall

Table 3.2 - Condiții la limită pentru Ahmed Body cu unghi la lunetă ϕ de 25° .

Modelele de turbulență utilizate aici au fost: Spalart-Allmaras, realizable k- ϵ (RKE), RNG k- ϵ (in PowerFLOW), k- ω Shear Stress Transport, Transition k-kl-w, Transition Shear Stress Transport (T-SST), Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulation (DES), scale adapted simulation (SAS) și k- ϵ -v2 (v2f).

3.2.4. Algoritm de modelare a curgerii

Condițiile la limită

Este crucial să se reproducă, prin intermediul condițiilor la limită potrivite, cât mai fidel posibil experimentul cu care vrem să facem corelarea³⁷. O simulare bună poate deveni invalidă prin simpla omisiune a unei piese neadusă la zi (asta este binenteles valabil și pentru testele în tunel).

Figura 3.13 dezvăluie algoritmul de simulare tranzitorie (cu Fluent) care este descris în continuare.

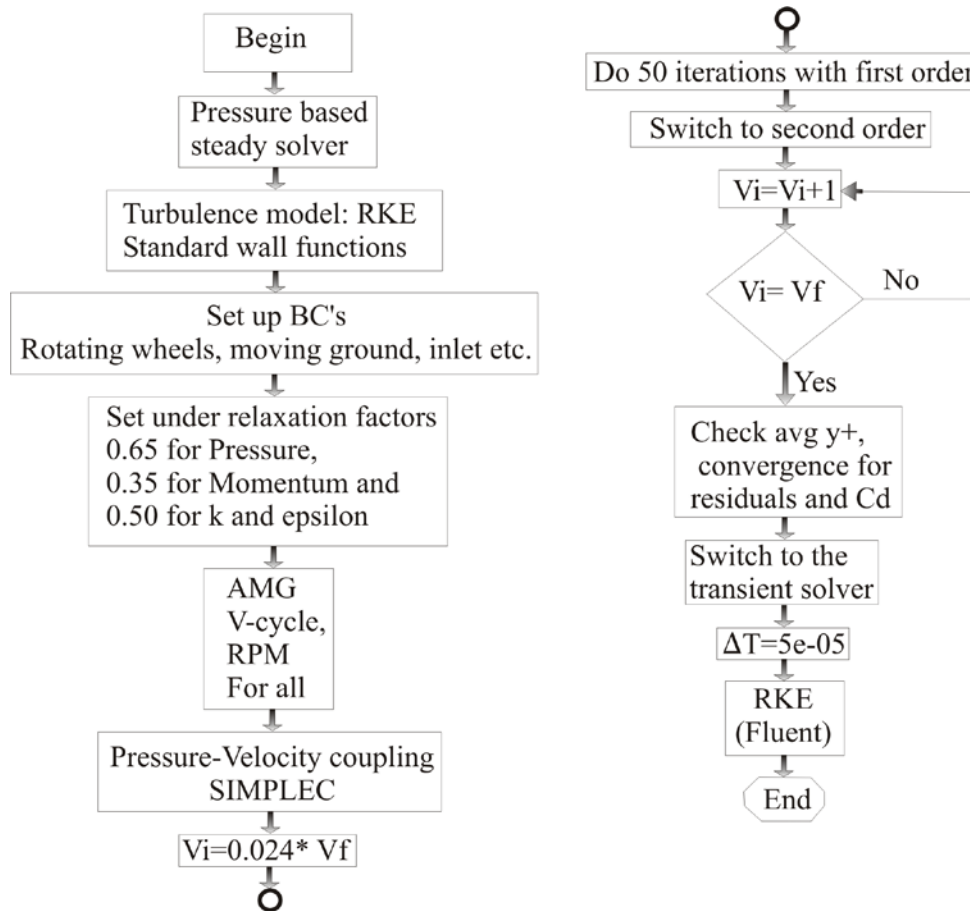


Figura 3.13 - Strategia de simulare tranzitorie.

3.2.4.1. Analiza critică a modelelor utilizate

Modelele de turbulență pe care le-am analizat numeric sunt enumerate în tabelele 3.3 și 3.4 adică: Spalart-Allmaras, realizable $k-\epsilon$ (RKE), $k-\omega$ Shear Stress Transport ($k-\omega$ SST), Transition $k-k_l-w$, Transition -SST, Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulation (DES), scale adapted simulation (SAS) și $v2f$.

3.2.4.2. Analiza coeficienților de portanță și rezistență la înaintare

Pe baza tuturor experimentelor numerice cu Ahmed body efectuate pentru această lucrare putem afirma că cel mai potrivit model de turbulență, din punct de vedere al corelării calitative este SST $k-\omega$ din Fluent iar din punct de vedere cantitativ (vezi tabelele 3.3 și 3.4) pentru ΔC_d , surprinzător, este S-A. Ambele modele necesitând optimizarea rețelei de discretizare pentru a se apropia cât mai mult de minimul erorii relative.

Cu o rețea de discretizare optimă SST $k-\omega$ din Fluent, pentru cazul cel mai dificil de corelat numeric $\phi=25^\circ$, prezice cel mai bine liniile de separare, turbioanele puternice și structura siajului cu resurse computaționale relativ reduse.

³⁷ Rob Lewis & Philip Postle, 2003. CFD Validation for External Aerodynamics.

Din punct de vedere al resurselor computaționale pentru optimizări (automate) aerodinamice, Spalart-Allmaras este cel mai potrivit (fiind modelul de turbulență cu cel mai redus nivel de resurse consumate), dacă funcția obiectivă este concentrată pe minimizarea Cd și dacă se alocă și se prevede suficient timp pentru găsirea optimului rețelei de discretizare.

MĂRIMEA DISCRETIZĂRII ȘI MODELUL DE TURBULENȚĂ	AHMED BODY SLANT $\phi=25^\circ$					
	Cl	Cd	k	Iterații	Ds [mm]	y+ mediu
Experiment ³⁸	0.345	0.299	1.154	-	-	-
500k RKE steady	0.339	0.302	1.125	2,587	0.200	248.5
500k RKE Unsteady	0.331	0.304	1.088	9,669	0.200	248.0
1.3M Polyhedra RKE steady	0.305	0.295	1.036	2,644	1.533	193.2
1.9M RKE Unsteady	0.357	0.374	0.956	11,139	0.869	112.0
13.8M RKE unsteady	0.364	0.349	1.042	86,974	2.113	14.0
23.5M Hexa RKE unsteady	0.385	0.312	1.234	31,165	0.716	90.42
500 k RSM	0.437	0.410	1.066	2,150	0.200	248.0
1.9M RSM	0.332	0.259	1.281	7,323	0.869	104.0
500 k DES	0.305	0.234	1.306	4,451	0.200	206.0
1.9M DES	0.474	0.399	1.186	12,000	0.869	112.0
500 k LES	0.377	0.356	1.058	3,500	0.200	229.0
1.9M LES	0.302	0.241	1.254	24,326	0.869	92.0
13.8M LES	0.234	0.427	0.547	28,600	2.113	10.2
500 k T-SST	0.300	0.267	1.126	8,542	0.200	224.6
1.9M T-SST	0.344	0.260	1.323	19,600	0.869	206.4
5M T-SST Polyhedra	0.347	0.255	1.362	40,447	0.736	86.8
1.9 M T-SST+S-A Polyhedra	0.311	0.288	1.081	5,887	0.736	84.9
200k S-A	0.366	0.337	1.087	4,818	3.32	369.5
500 k S-A	0.288	0.301	0.957	11,778	0.200	216.3
1.9M S-A	0.309	0.306	1.011	2,898	0.869	99.4
1.3M Polyhedra S-A	0.292	0.301	0.971	7,800	1.533	184.3
1.68M Hexa S-A	0.356	0.319	1.113	3,000	1.600	86.0
1.8M Polyhedra S-A	0.369	0.308	1.199	3,160	0.2÷1.6	20.4
2.5M Polyhedra S-A	0.338	0.307	1.102	20,000	1.533	186.2
13.8M Hexa S-A	0.337	0.459	0.735	62,005	2.113	13.5
23.5M Hexa S-A	0.337	0.270	1.250	10,382	0.716	84.7
500k T k-kl-w	0.273	0.230	1.189	14,514	0.200	122.5
1.9M T k-kl-w	0.417	0.331	1.260	27,575	0.869	140.4
500k k- ω SST Fluent	0.302	0.270	1.119	18,090	0.200	227.2
1.9M k- ω SST Fluent	0.382	0.268	1.424	91,482	0.869	102.7
1.68M k- ω SST Fluent	0.320	0.285	1.122	2,000	0.742	84.83
13.8M k- ω SST Fluent	0.290	0.363	0.799	50,005	2.113	13.5
500k SST CFX	0.354	0.323	1.098	633	0.200	423.7
1.9M SST CFX steady	0.295	0.296	0.997	100	0.869	184.7
1.6M k- ω SST OpenFoam	0.347	0.253	1.371		0.742	47.37
530kRNG k- ϵ PowerFLOW	0.367	0.543	0.677	62,736	5	269.6
7.69M RNG k- ϵ PowerFLOW	0.396	0.476	0.832	174,558	1.8	98.56
500k SAS Fluent	0.320	0.307	1.043	11,273	0.2	224.4
1.9M SAS Fluent	0.3662	0.3093	1.184	2,787	0.869	103.6
500k v2f Fluent	0.3405	0.3221	1.057	1,000	0.322	308.4

Tabelul 3.3 – Rezultatele simulărilor cu corpul simplificat Ahmed pentru unghi la lunetă de $\phi=25^\circ$.

³⁸ W. Meile, 2007. Forces and pressure distribution.

MODELUL DE TURBULENȚĂ	MĂRIMEA DISCRETIZĂRII	AHMED BODY $\varphi=12.5^\circ$			
		Cd	Avg y+	CPU h	Ds[mm]
LES+WALE	14.5M	0.2283	11.6	584	0.2
RKE	14.5M	0.2246	16.2	624	0.2
DES+rke	14.5M	0.2446	16.1	50	0.2
DES+SST k- ω	14.5M	0.2405	19.1	369	0.2
RSM	14.6M	0.2248	30.4	280	0.2-1.6

Tabelul 3.4 - Rezultatele simulărilor cu corpul simplificat Ahmed pentru unghi la lunetă de $\varphi=12.5^\circ$.

3.2.4.3. Analiza topologiei curgerii

Rezistența la înaintare simțită de un autovehicul la scară reală este puternic legată de structura siajului cu o cuantificare de $SC_x=CdA\approx 0.110m^2$ pentru un siaj dezechilibrat.

Rezultatele simulărilor pentru topologia/structura siajului au fost comparate cu referința³⁹ pentru unghi la lunetă de $\varphi=25^\circ$ iar pentru $\varphi=12.5^\circ$ cu cele din referința⁴⁰. Analiza figurii 3.23 și figurii 3.24 cu topologia siajului la diferite instanțe pe X și a erorii relative duce la o ierarhie calitativă între diferitele modele de turbulență și unde este cazul a metodelor numerice în care au fost implementate.

Din punct de vedere calitativ cazul SST k- ω de 13.8M este cel mai bun, după cum se poate vedea și în figura 3.22 (dacă nu este explicit menționat, cazul este considerat a fi tranzitoriu).

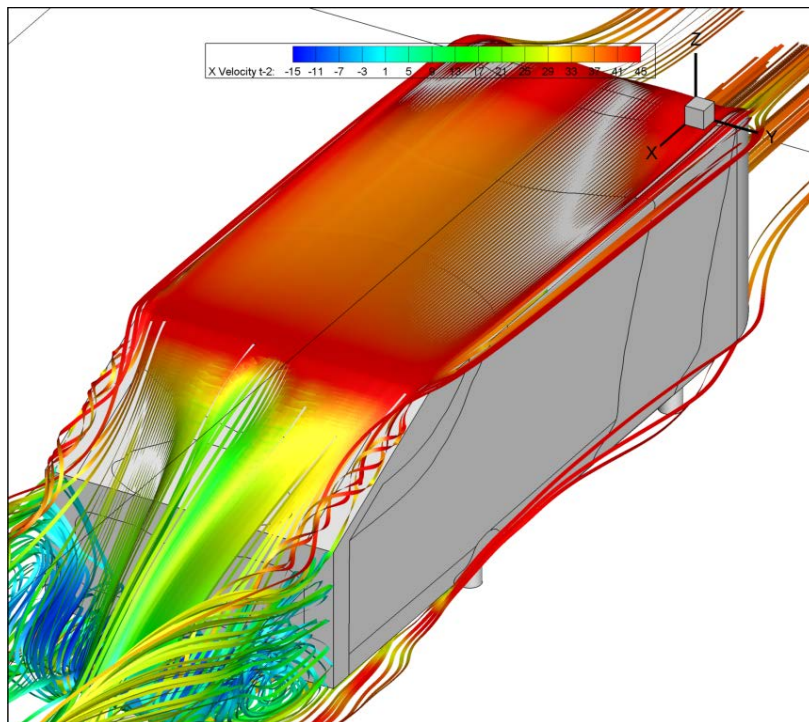


Figura 3.22 - Linii de curent pentru $\varphi=25^\circ$, 13.8M, Fluent k- ω SST.

³⁹ H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker, 2009. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model).

⁴⁰ Ahmed, S.R., Ramm G., 1984. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300

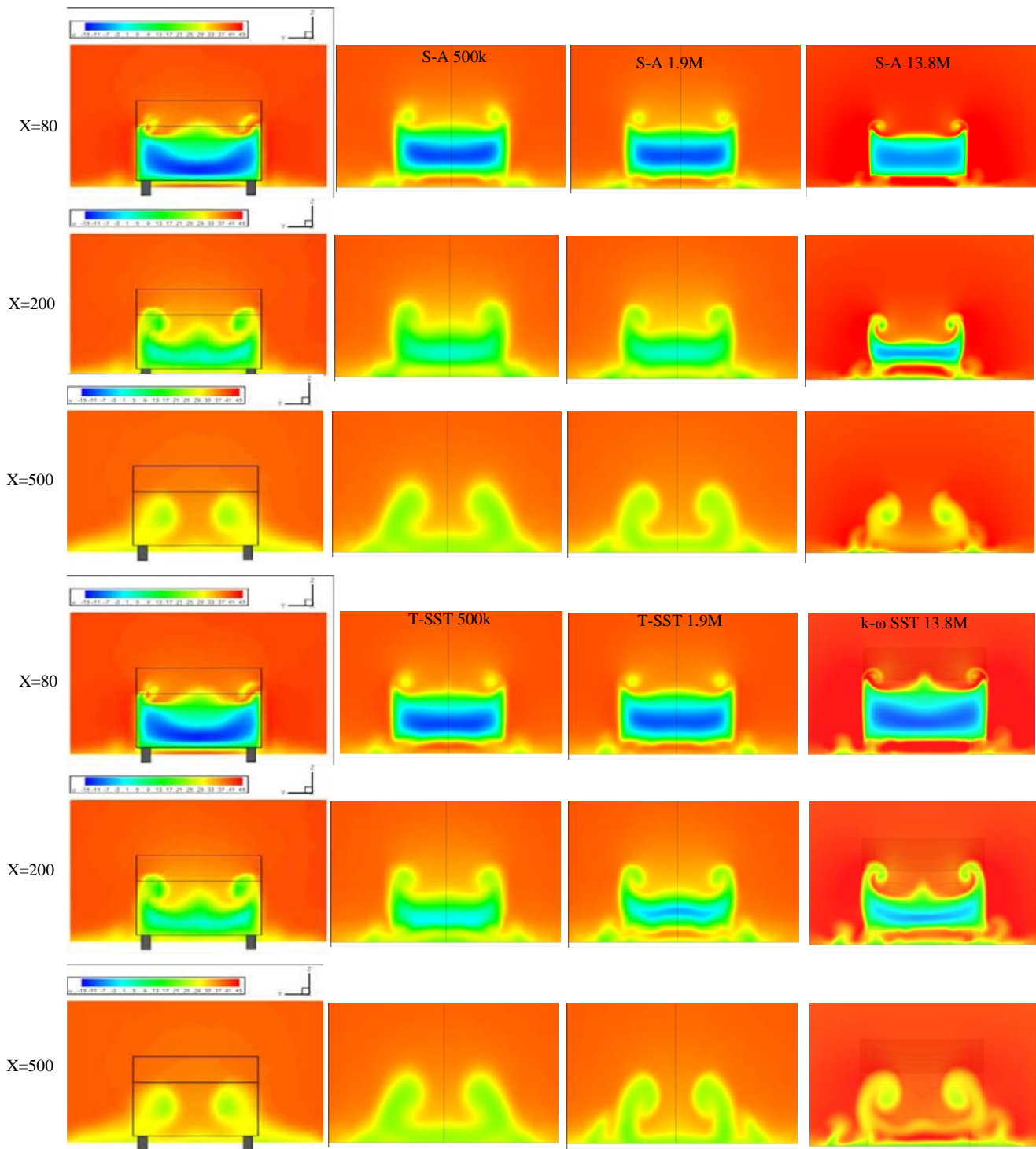


Figura 3.23 - Distribuția vitezei de-a lungul curgerii (V_x) la $X=80\text{mm}$, 200mm , 500mm . Experiment, simulare pe rețea rară, medie și fină (de la stânga la dreapta) pentru “Ahmed body” cu $\varphi=25^\circ$. Modelele de turbulență din Fluent: S-A, T-SST, k- ω SST.

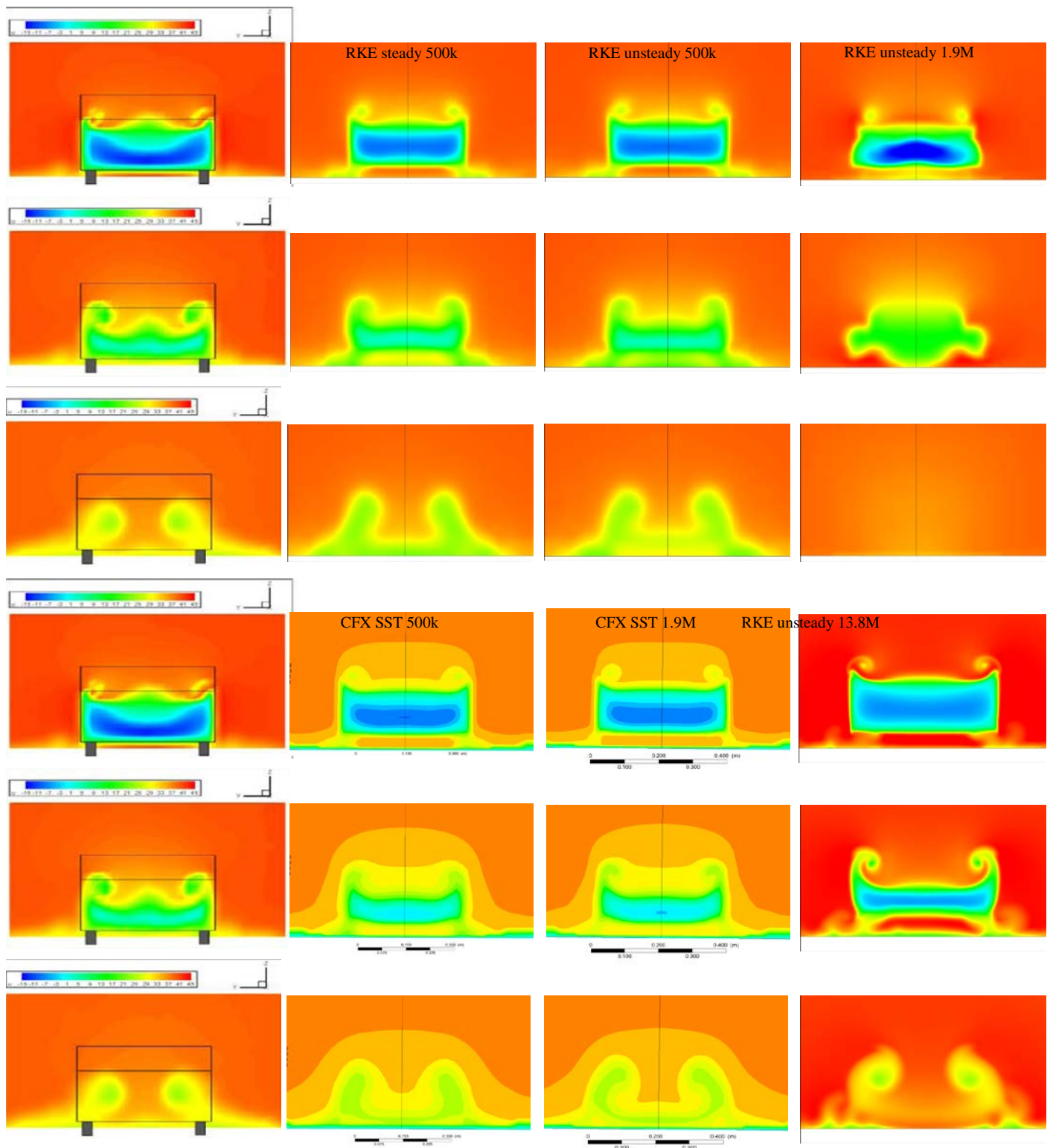


Figura 3.24 - Distribuția vitezei de-a lungul curgerii (V_x) la $X=80\text{mm}$, 200mm , 500mm . Experiment, simulare pe rețea rară, medie și fină (de la stânga la dreapta) pentru “Ahmed body” cu $\phi=25^\circ$. Modelele de turbulență din Fluent: RKE staționar, nestaționar și $k-\omega$ SST din CFX.

4. CONCEPTE NOI DE ARIPI INVERSATE ȘI OPTIMIZAREA LOR

Introducere

Cele două obiective ale capitolului 4 sunt:

- 1) optimizarea profilelor aerodinamice selectate în două valuri: (1) evaluarea prin metoda panourilor a profilelor din literatura de specialitate și (2) crearea de profile noi, optimizarea și alegerea celor mai bune creații, în funcție de performanța aerodinamică pe automobil;
- 2) optimizarea aripilor și a dispozitivelor de la extremitatea lor în funcție de performanța aerodinamică pe automobil.

4.2. Optimizarea aerodinamică multiobiectiv a aripilor inversate create

Progresia logică a cercetării a fost:

- 1) am realizat o evaluare simplă în 2D pentru toate profilele aerodinamice cu scopul de a determina câteva care au cel mai mare potențial pentru eficiența aerodinamică și forță de apăsare;
- 2) am investigat acele profile pe automobilul 2D sau 3D pentru performanța adevărată.
- 3) am investigat diverse dispozitive la capăt de aripă pentru două aripi, pentru a vedea dacă performanța poate fi îmbunătățită în continuare.

Modelarea CFD

PREPROCESAREA

În acest paragraf am descris pașii pe care i-am urmat pentru a realiza inițializarea optimizării pentru conceptele 2D și 3D ale profilelor respectiv aripilor montate pe automobilul de curse.

CONCEPȚIA GEOMETRIEI

Am pornit de la o geometrie inițială care a fost apoi parametrizată fie cu CATIA v5, fie cu RBF Morph, fie cu ANSA pentru fiecare concept, păstrând prezent sistemul (automobilul de curse) în mod constant. Figurile următoare ilustrează geometriile sistemelor (automobil + aripă inversată) pe care le-am creat în vederea analizei numerice.

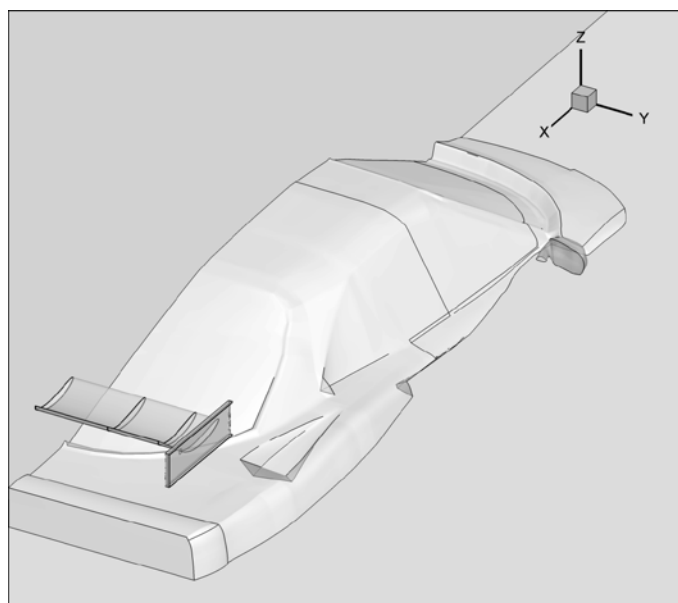


Figura 4.2 – Bordura marginală “box endplate” la capătul aripii inversate dreptunghiulare (cu profilul din brevetul meu nr.123456) în prezența sistemului simplificat.

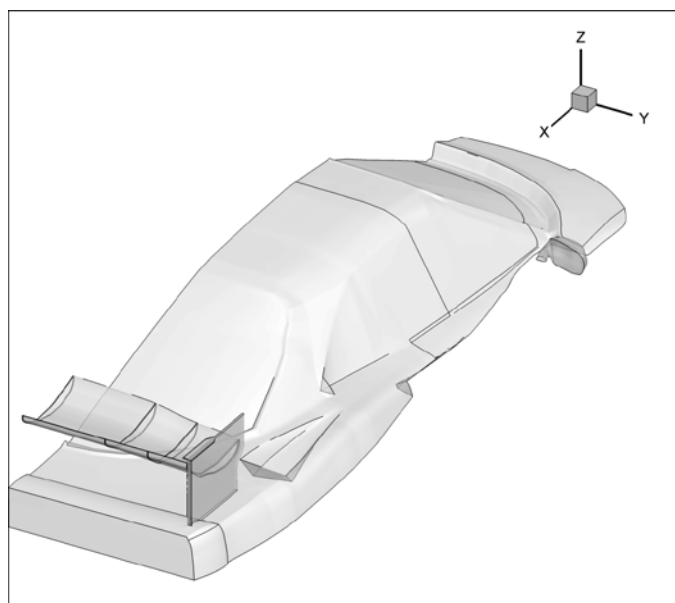


Figura 4.3 – Bordura marginală cu adâncime maximă și flaps Gurney la capătul aripii inversate (cu profilul c25optM3) cu răsucire în prezența sistemului simplificat.

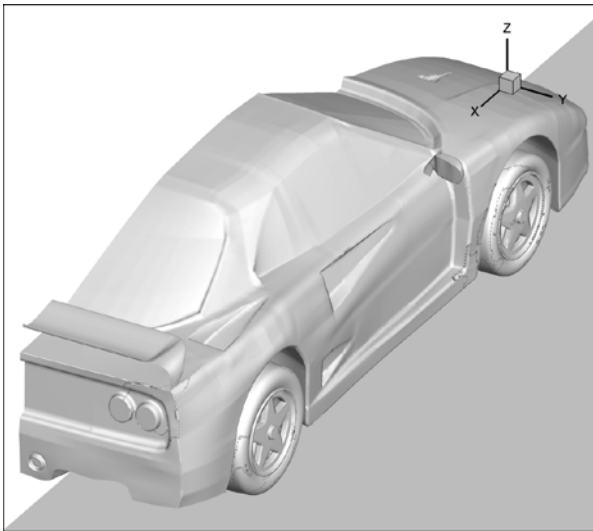


Figura 4.4 – Blended winglet scurt la capătul aripii inversate (cu profilul din brevetul meu nr.123456 cu flaps Gurney) în prezența sistemului simplificat.

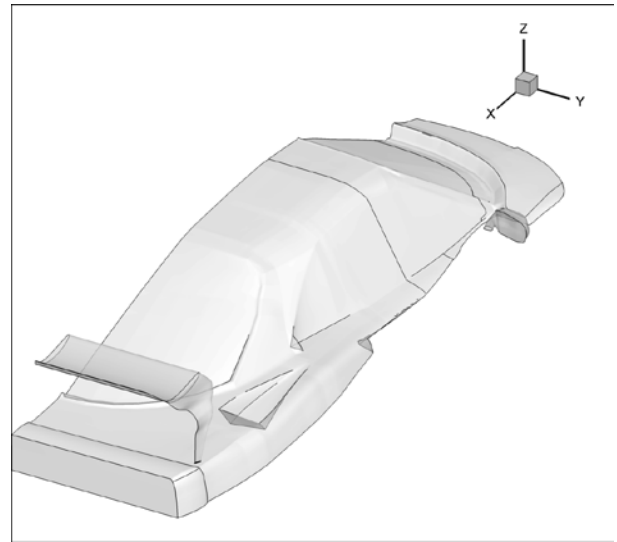


Figura 4.5 – Blended winglet lung la capătul aripii inversate (cu profilul din brevetul meu nr.123456 cu flaps Gurney) în prezența sistemului simplificat.

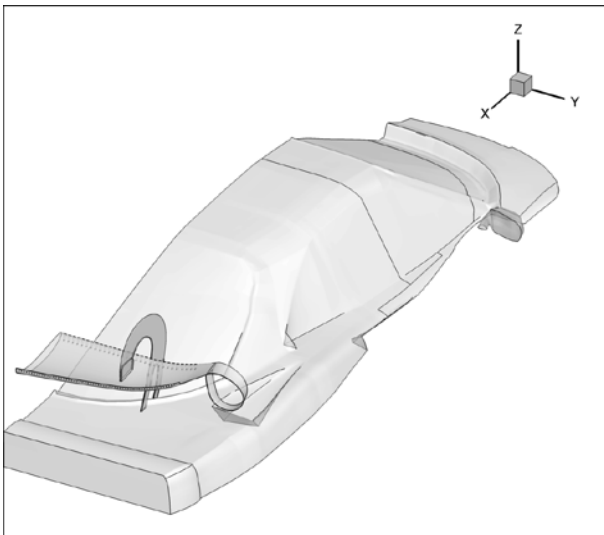


Figura 4.6 – Spiroid tip la extremitatea aripii inversate complexe (cu profilul din brevetul meu nr.123456 cu flaps Gurney perforat) cu bordul de atac perforat în prezența sistemului simplificat și a suportului “gât de lebădă”.

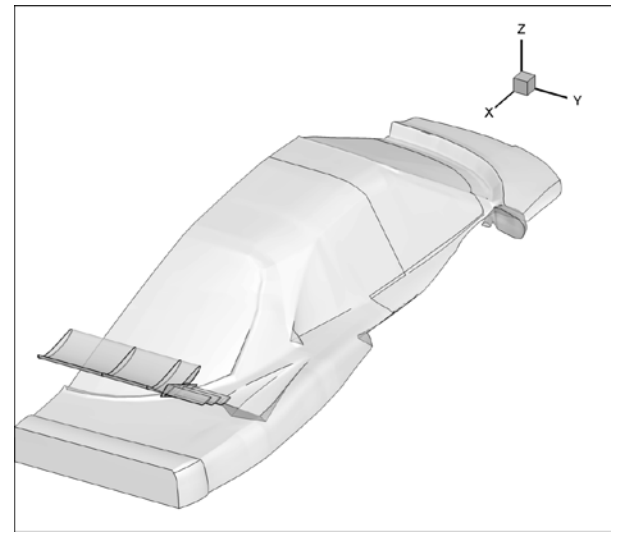


Figura 4.7 – WING-GRID cu 3 pale la extremitatea aripii inversate dreptunghiulare (cu profilul din brevetul meu nr.123456) în prezența sistemului simplificat.

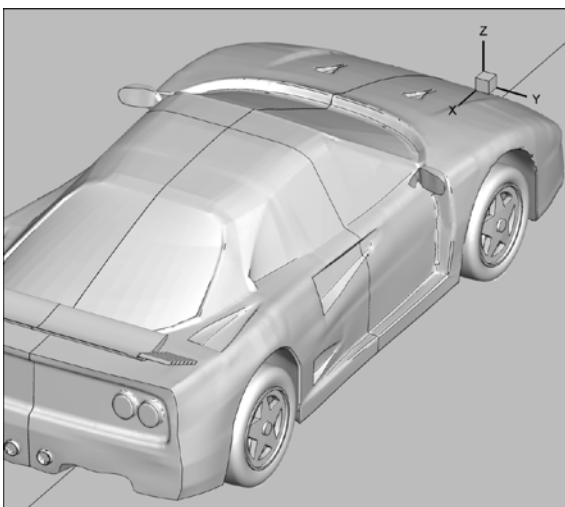


Figura 4.8 – WING-GRID cu 7 pale la extremitatea aripii inversate (cu profilul din brevetul meu nr.123456) în prezența sistemului cu tren față și spate simplificat.

DOMENIUL DE CALCUL

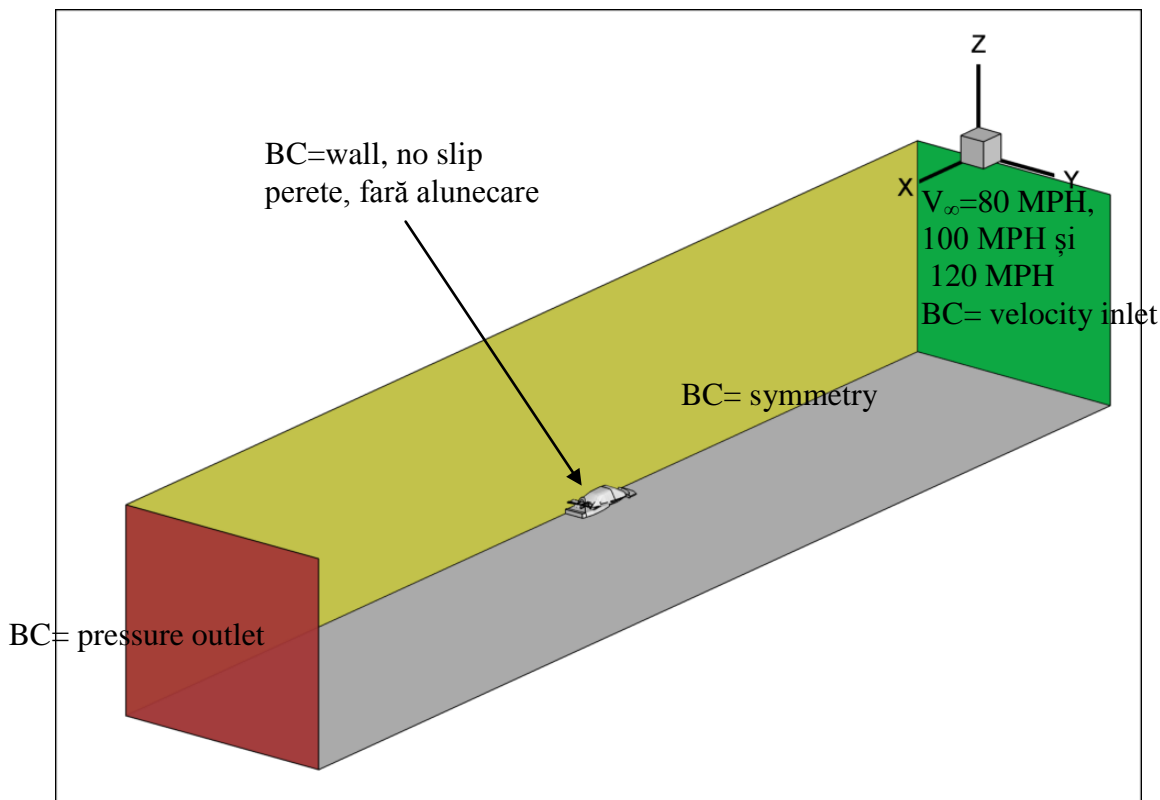


Figura 4.9 – Domeniul de calcul pentru cazurile de optimizare în 3D.

După cum se poate observa în figura 4.9, datorită simetriei, am redus la jumătate domeniul de calcul pentru sistemul complet (simetric față de Y_0 , vezi figura 4.9), cu originea pe sol la jumătatea ampatamentului (la fel ca în suflerie). Am definit lungimea (pe X) de 50 m iar lățimea și înălțimea (pe Y , respectiv Z) de 9 m. Jumătate din domeniu (simetric față de Y_0 , vezi figura 4.9) pentru sistemul simplificat are dimensiunea $X=50$ m, $Y=9$ m și $Z=9$ m.

GENERAREA REȚELEI DE DISCRETIZARE 3D

Am descris deja în capitolul 3 și articolul asociat⁴¹ convergența și optimizarea rețelei de discretizare. În capitolul curent am aplicat aceeași strategie din capitolul 3, dedusă din analiza numerică a curgerii în jurul corpului simplificat Ahmed body.

În stratul limită vâcos am dezvoltat zece celule cu o distanță a primei celule față de suprafață (D_s) egală cu 0.758 mm și y^+ mediu între 30 și 40 în cazul aripii inversate pentru cazurile 2D. În stratul limită vâcos am dezvoltat șapte celule (pentru a reduce numărul de elemente) cu o distanță a primei celule față de suprafață, D_s egală cu 0.004 mm pe aripa inversată plus dispozitivul de la capăt și $D_s=0.758$ pe automobil cu y^+ mediu ~ 1 în cazul aripii inversate, pentru cazurile 3D. Opțiunile pe care le-am ales pentru crearea stratului limită sunt prezentate în tabelul 4.1.

Am utilizat ANSA pentru a crea rețeaua de discretizare nestructurată cu hexahedra, tetrahedra și polyhedra, având cea mai fină zonă de rafinare egală cu 12 mm, cu excepția cazului WING-GRID cu 7 pale unde am ales zona de rafinare de 4.7 mm.

În Figura 4.10 am ilustrat rețeaua de discretizare pe care am generat-o pentru sistemul simplificat și aripa inversată cu bordura marginală "box endplate". Algoritmii de discretizare pe suprafață au fost: CFD, advancing front cu triunghiuri (opțiunea implicită) și cu triunghiuri orientate ortogonal, MAP cu

⁴¹ Bordei S. and Popescu F., 2011, AERODYNAMIC RESULTS FOR A NOTCHBACK RACE CAR, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Volume II, pp.159-178, ISSN 1221-4566, <http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2011/V2/>

triunghiuri (MAP în special pe aripa inversată și zonele cu curbură) cu opțiunea best skewness și Spot mesh.

Algoritmul pe care l-am ales pentru discretizarea volumului a fost hexa interior pentru figura 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16.

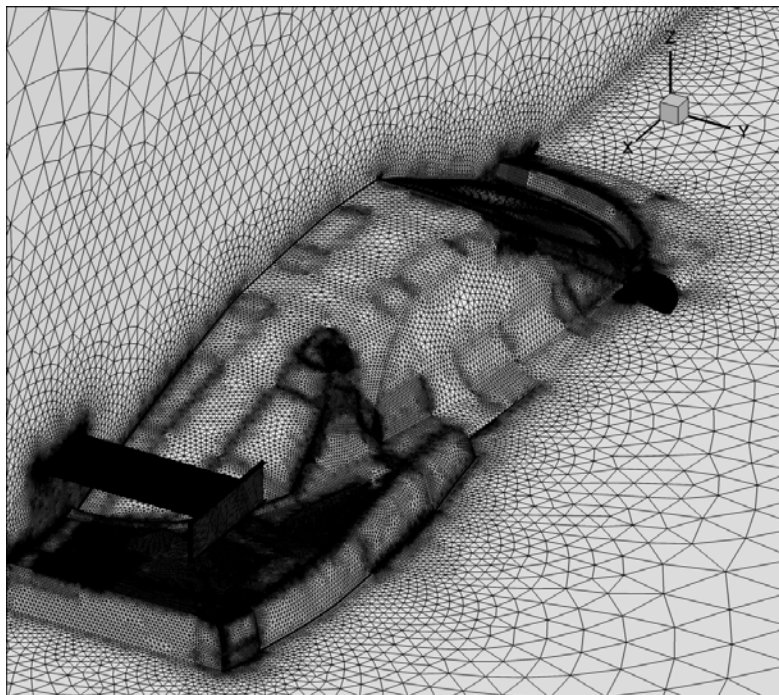


Figura 4.10 – Rețeaua de discretizare pentru sistemul simplificat și aripa inversată cu bordura marginală “box endplate”.

Domeniile de calcul discretizate și descrise în figurile 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 au 4.6×10^6 elemente totale (pe suprafață și în volum).

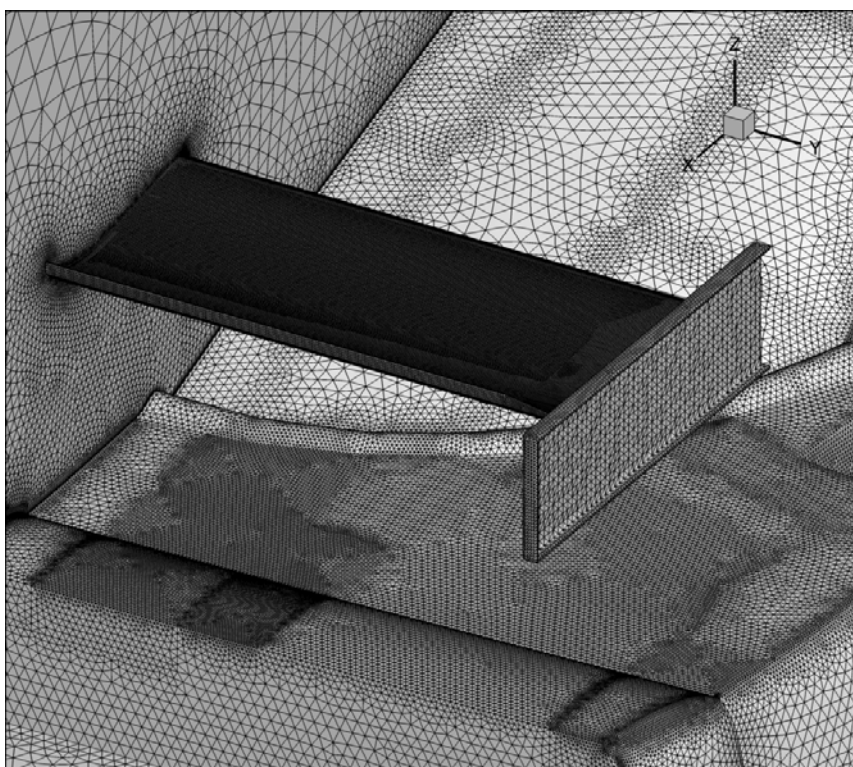


Figura 4.11 – Detaliu rețelei de discretizare pentru sistem și aripa inversată (cu profilul din brevetul meu nr.123456) cu bordura marginală “box endplate”.

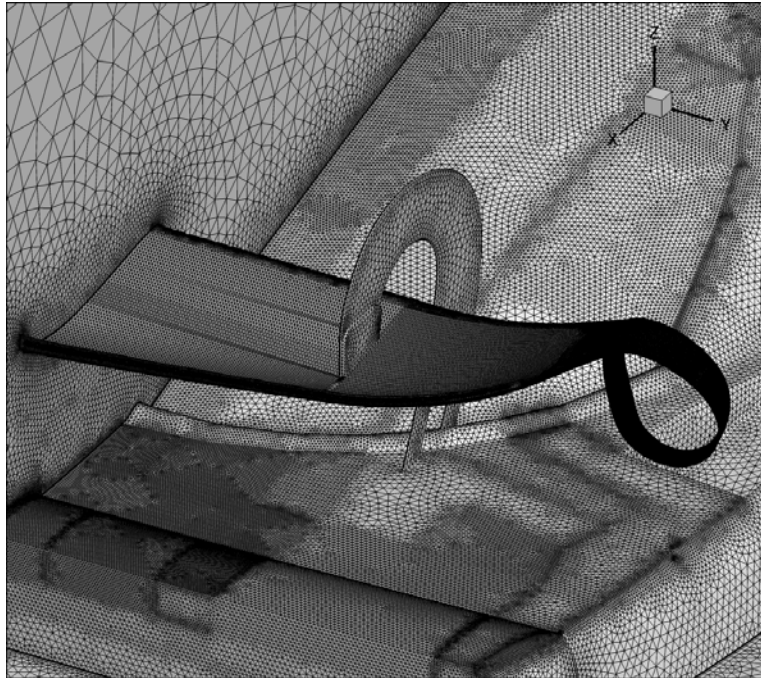


Figura 4.15 – Detaliul rețelei de discretizare pentru sistemul simplificat și aripa inversată complexă (cu profilul din brevetul meu nr.123456 cu flaps Gurney perforat) cu bord de atac perforat, cu spiroid tip și cu suport tip “gât de lebedă”.

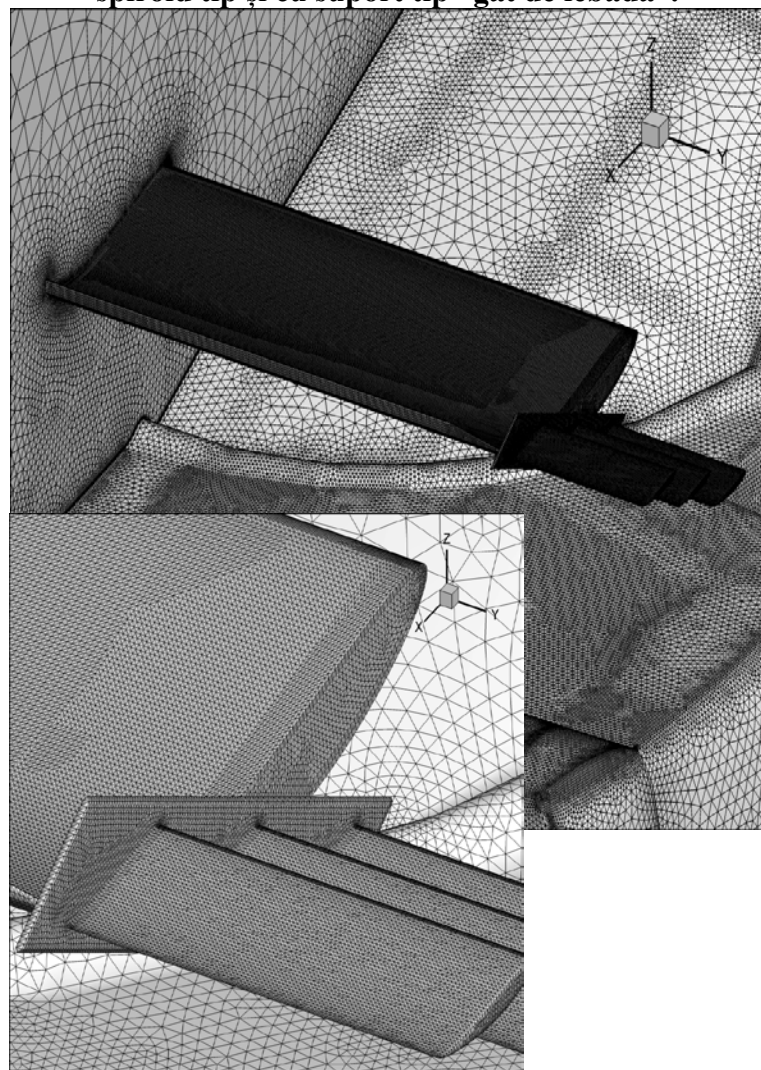


Figura 4.16 – Detaliul rețelei de discretizare pentru sistemul simplificat și aripa inversată (cu profilul din brevetul meu nr.123456 cu flaps Gurney) cu WINGGRID (3 pale).

4.2.2 Crearea unor concepte de profile premergătoare optimizării, plecând de la brevetul de invenție Nr 123456

Pentru a evita timpul uriaș necesar pentru simularea întregului automobil de curse (42 milioane de elemente pentru automobilul F40 complex vezi figura 4.20) cu fiecare concept în 3D, s-a folosit varianta 2D a automobilului (vezi anexa C). Sistemul 2D este constituit din planul YO de simetrie al automobilului de curse (vezi figura 4.18) pentru a accelera procesul de optimizare și a reduce variabilele de proiectare.

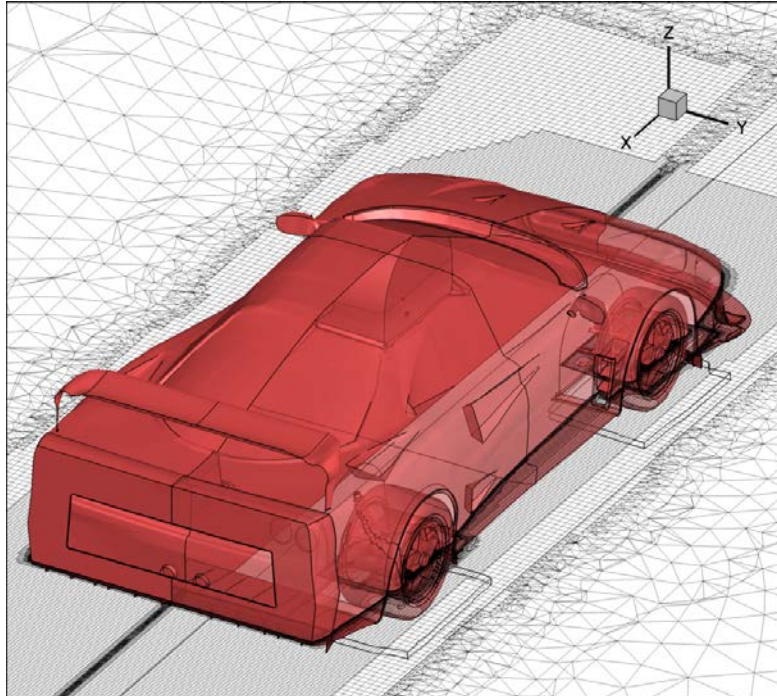


Figura 4.20 - Sistemul creat de la 0 cu tren față și spate detaliat și kit aerodinamic.

4.2.3 Descrierea celor mai bune două profile create

Conceptul c4.1 are bordul de atac și flapsul Gurney perforat. După evaluarea acestui concept în comparativ cu literatura de specialitate, acest profil poate fi considerat ca fiind o nouă versiune a "slat"-ului (dispozitiv aerodinamic de hipersustentație la bordul de atac). Cu alte cuvinte, are o gaură simplă conică în bordul de atac la intervale fixe de-a lungul anvergurii (vezi figura 4.31). Acest concept a avut (în prezența automobilului de curse în 2D) o eficiență aerodinamică de 232, și a depășit ținta de 143.3. Figura 4.31 va fi menționată din nou în capitolul 4.3.2.1 pentru optimizarea Spiroid tip.

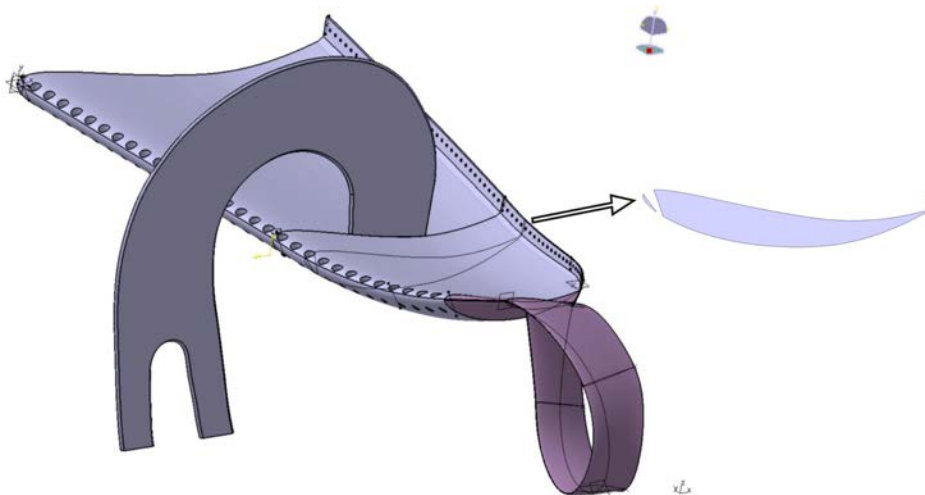


Figura 4.31 - Conceptul c4.1: se pot vedea găurile din bordul de atac și din flapsul Gurney. (ilustrare grafică completă a profilului).

Conceptul c25 depășește ținta pentru forță maximă de apăsare (vezi figura 4.32 pentru geometrie). Genele de bază provin din profilul S1223, dar sunt modificate (cu ANSA morphing) în săgeată, locația săgeții, grosime, locația grosimii, raza bordului de atac și are o atitudine de "nas" (bord de atac) ridicat și flapsul Gurney obligatoriu. Cu alte cuvinte a devenit un profil aeroninamic nou.

Inspirat de această abordare, cu scopul de a evita modificarea manuală a discretizării, am folosit ANSA edge fit morphing pentru a transforma profilul S1223 în: E423, E422, E421, Lippisch 301G, profilul University of Alberta Kennedy și Marsden, UI Chen, GOE244, GOE464, NACA63-412.



Figura 4.32 - Conceptul c25 proiectat pentru forță maximă de apăsare cu rezistență

4.3. Metoda de optimizare aplicată

Optimizarea profilelor a fost efectuată urmând planul de lucru deja prezentat în capitolul 4.2.1:

1. Am ales cele mai bune două profile pe care le-am obținut anterior (c4.1 și c25) pe care le-am optimizat în 2D;
2. Aceste profile au fost încorporate în aripile 3D pentru care am efectuat optimizarea dispozitivelor de la extremități pentru a reduce rezistența datorită presiunii;

Am realizat procesul de optimizare automată cu ajutorul ANSYS DesignXplorer⁴².

4.3.1. Optimizarea profilelor aerodinamice (în 2D)

4.3.1.1. Optimizarea conceptului c25 (J6.1-J6.4 c25)

Pentru optimizarea conceptului c25, am aplicat patru metode de optimizare diferite, independente una de cealaltă, cu scopul de a depăși țintele pentru portanță negativă maximă și finețe aerodinamică.

Metoda 1 de optimizare automată (J6.1 c25)

Am ales 5 parametri geometrici continui, egal depărtați, pe partea cu depresiune a profilului cu un grad de libertate (vezi figura 4.33). Conceptul c25 a fost evaluat cu aceeași metodă numerică și a fost montat pe automobilul de curse 2D (vezi anexa C) la fel ca toate profilele prezentate în această lucrare.

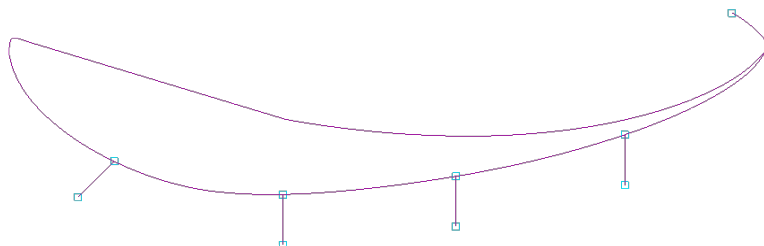


Figura 4.33 - Parametrii RBF Morph și limitele lor pentru conceptul c25 la Jalonul 6.1.

⁴² ANSYS DesignXplorer 13.0, 2011. User Guide and Tutorial Guide.

Proiectarea experimentelor folosită a fost de tip "optimal space filling" blocul B2 în Figura 4.34. Intervalul folosit pentru toți parametrii RBF Morph a fost [0;10]. Au rezultat 27 de puncte de proiectare simulate. Tipul suprafeței de răspuns a fost: rețele neuronale. Algoritmul de optimizare utilizat a fost Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). Toate deciziile de mai sus au fost lăsate cu opțiuni implicite. Schema folosită pentru proiectul de optimizare automată este prezentată în figura 4.34. Obiectivele multiple au fost:

- maximizează forța de apăsare și
- minimizează forța de rezistență la înaintare.

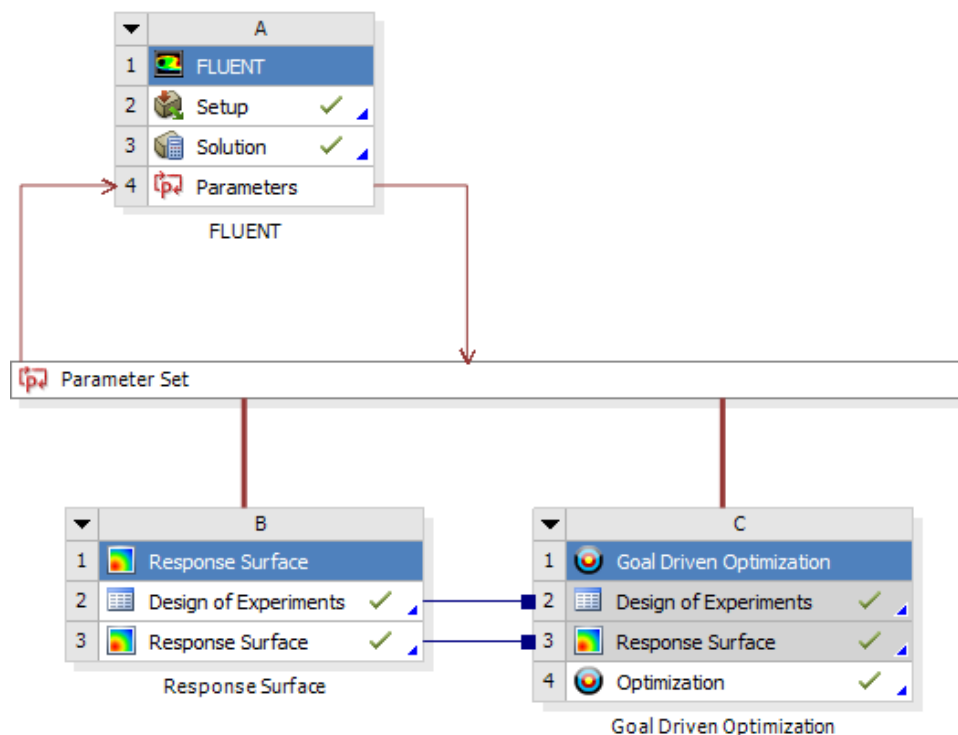


Figura 4.34 - Schema proiectului de optimizare ANSYS DesignXplorer folosită pentru c25, c4.1, Spiroid Tip și Blended Winglet.

4.3.2. Optimizarea aripilor în 3D pe automobilul simplificat de curse

În acest subcapitol sunt descrise metodele pe care le-am folosit în vederea optimizării aripilor în 3D. Analiza rezultatelor se face în subcapitolul 4.4.

4.3.2.3. Optimizarea conceptului WING-GRID (J7.1 w-g)

Acest concept a fost optimizat în prezența automobilului de curse, apreciind că poate avea potențialul maxim de eficiență aerodinamică, în afara regulilor FIA GT. Prin metoda aplicată pentru optimizarea WING-GRID-ului au fost variați doi parametri: numărul de pale ale WING-GRID-ului (două puncte de proiectare cu 7, respectiv 3 pale) cu unghi de incidență egal al palelor. Geometria pentru aceste configurații este dată în figura 4.40. Figura 4.40 va fi rediscutată în secțiunea cu rezultate și concluzii.

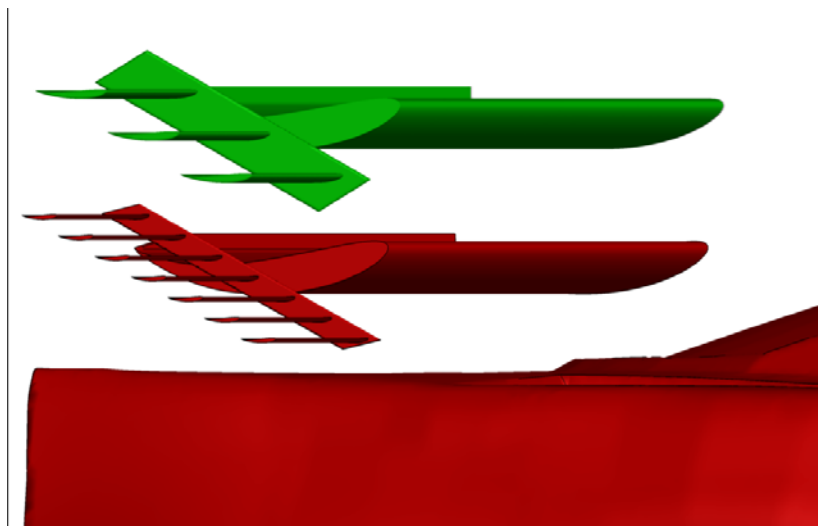


Figura 4.40 - Vizualizarea celor două puncte de proiectare pentru WING-GRID.

4.3.2.4. Optimizarea bordurii marginale (J7.1 bm)

Prima versiune a bordurii marginale a fost prezentată în referința⁴³ și în capitolul 4. Studiul CFD din referința⁴⁴ a fost făcut cu o coardă de 300mm și un unghi de incidență de 16° pentru aripa inversată. Optimul adâncimii bordurii marginale din referința⁸ a fost găsit ca fiind 600mm pentru forța de apăsare și 250mm pentru rezistența la înaintare și pentru finețe ca 400mm. Pentru optimizarea acestui profil al bordurii marginale am utilizat aceste informații și procesul de proiectare al bordurii marginale a fost reinițializat cu dimensiunile maxime conform regulamentului FIA GT pentru sezonul din anul 2011: bordura marginală simplă la capătul unei aripi inversate cu 300mm funcționând la un unghi local de incidență de 17° (la jumătatea anvergurii $b/2$) și 7° (la capăt) datorită curgerii amonte generată de automobilul de curse (vezi figura 4.41)

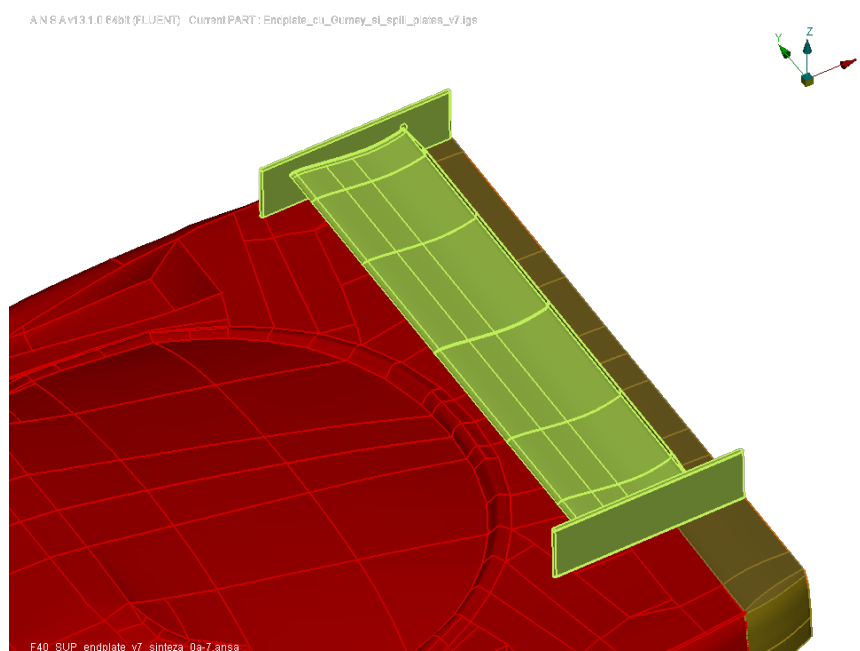


Figura 4.41 - Bordura marginală simplă.

⁴³ Bordei S. and Popescu F., 2011, AERODYNAMIC RESULTS FOR A NOTCHBACK RACE CAR, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Volume II, pp.159-178, ISSN 1221-4566, <http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2011/V2/>

⁴⁴ Simon McBeath, 2011, Competition Car Aerodynamics a Practical Handbook Second Edition.

4.4. Discuția și analiza rezultatelor

Rezultatele obținute în urma analizei și optimizării numerice din acest capitol sunt:

1. profilul c4.1 cu o eficiență aerodinamică $C_l/C_d = 232$ și
2. profilul c25optM3 cu un coeficient de forță de apăsare maximă de $-C_1 = 3.19$ (media rezultatelor pe ultimele 10 frame-uri, 1 frame = 50 iterații).

Analizând numeric performanțele conceptului c4.1 pe care l-am creat și optimizat, putem explica eficiența ridicată a acestui profil care este dată de rezistența de presiune mică și o forță de apăsare mai mică. Rezistența mică datorită presiunii se datorează unui siaj echilibrat (figura 4.49). Siajul echilibrat demonstrează un deficit al presiunii totale mai mic și o energie cinetică turbulentă de valoare mai mică atunci când sunt comparate cu profilul de referință din brevetul de invenție 123456 (vezi figura 4.49).

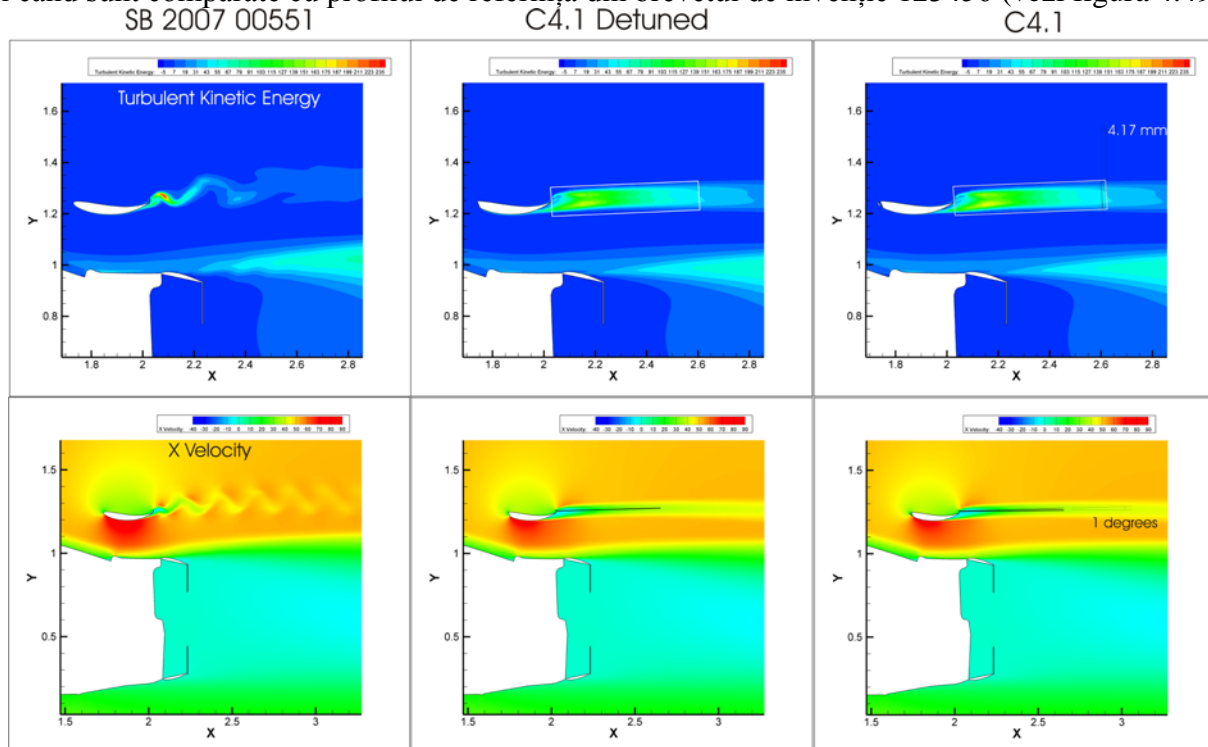


Figura 4.49 - Analiza performanței conceptului c4.1.

În ce privește conceptul c25 optimizat, rezistența la înaintare are un comportament neașteptat: scade cu creșterea forței de apăsare atunci când comparăm c25 cu GTC 500 (vezi figura 4.54 pentru C_p și 4.55 pentru tomografia presiunii statice și totale). Când ne uităm la pierderea de presiune totală în siaj (vezi figura 4.55) este evident că siajul pentru c25optM3 este mai bine echilibrat atunci când îl comparăm cu GTC 500 și c24. Aceasta poate fi de asemenea cuantificat și verificat prin măsurarea "microdrag"-ului în siaj, așa cum este descris în referința⁴⁵.

⁴⁵ Wolf- Heinrich Hucho, 1998, Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition.

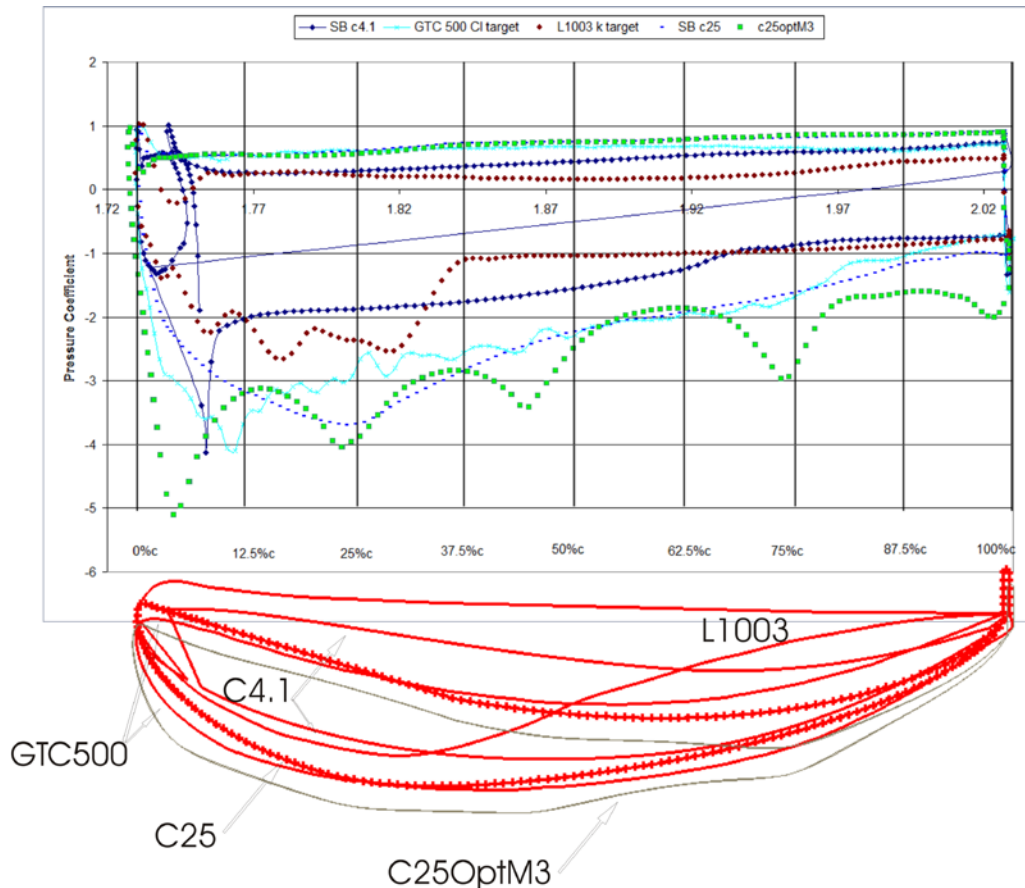


Figura 4.54 – Coeficientul de presiune de-a lungul corzii pentru cele mai importante profile.

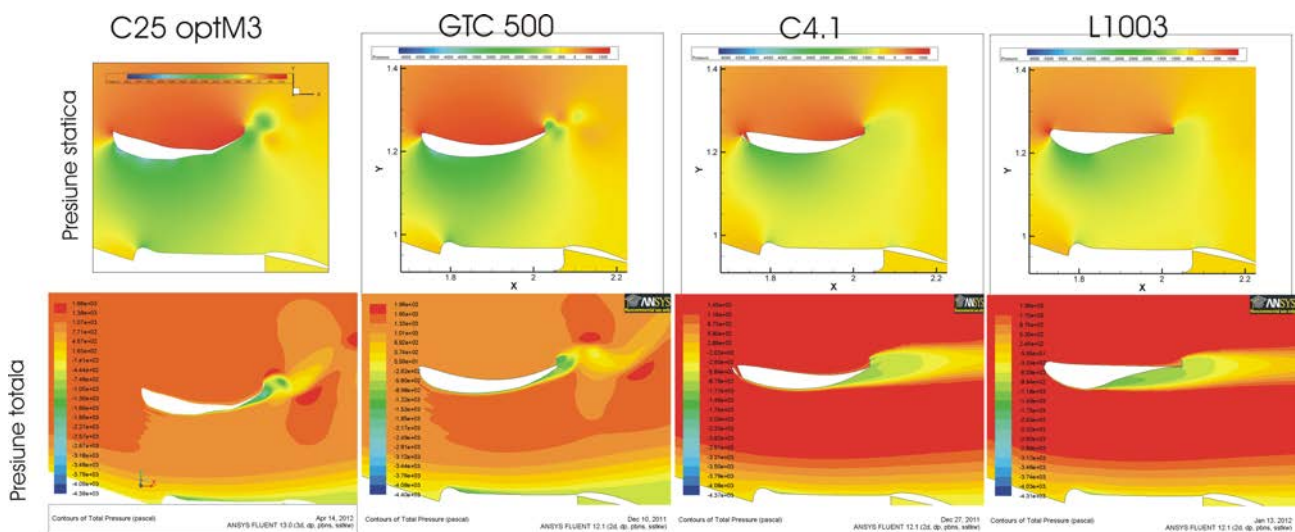


Figura 4.55 – Compararea topologiei curgerii pentru c25optM3, GTC500, c4.1 și L1003.

5. STUDIUL INFLUENȚEI GEOMETRIEI AUTOTURISMULUI ASUPRA ARIPII INVERSATE

Scopul capitolului este de a evalua și de a cuantifica influența sistemului (automobilul) asupra performanței aerodinamice a aripii inversate montată pe spate. Două cazuri au fost alese: unghiul dintre lunetă și axa X, nepotrivit în raport cu cerințele de aerodinamică, în favoarea ergonomiei $\varphi=25.8^\circ$ (automobilul ANSA) și cazul opus $\varphi=15^\circ$ (automobilul sport complex). Am creat automobilul sport complex, inspirat de F40 (cu partea tehnică a trenului față și spate realistă, nu doar superstructura), special pentru această lucrare. Au fost necesare 7 jaloane/variante pentru a ajunge la convergența geometrică de-a lungul unui an.

5.2. Simularea numerică a curgerii în jurul unui automobil sport complex

Am studiat în continuare, pentru un automobil sport complex, cazul cu unghi la lunetă $\phi=15^\circ$, ales, în primul rând, pentru o performanță aerodinamică cât mai bună. Am creat, special pentru această lucrare, automobilul sport complex inspirat de F40 (cu partea tehnică a trenului față și spate realistă, nu doar superstructura). Am ales să creez un automobil de la 0, deoarece nici o geometrie disponibilă gratuit (vezi cazul automobilului ANSA) nu ilustrează, în detaliu, toate elementele geometriei unui automobil real și nu este însoțită de informații pertinente privind alegerile făcute (raze, unghiuri etc).

5.2.1. Concepția geometrică

Cotele mari ale automobilului, fără kit-ul aerodinamic sunt identice cu cele ale Ferrari F40. Crearea geometriei a durat un an de zile și a trecut prin 7 stadii pentru a ajunge la forma finală (vezi figura 5.17).

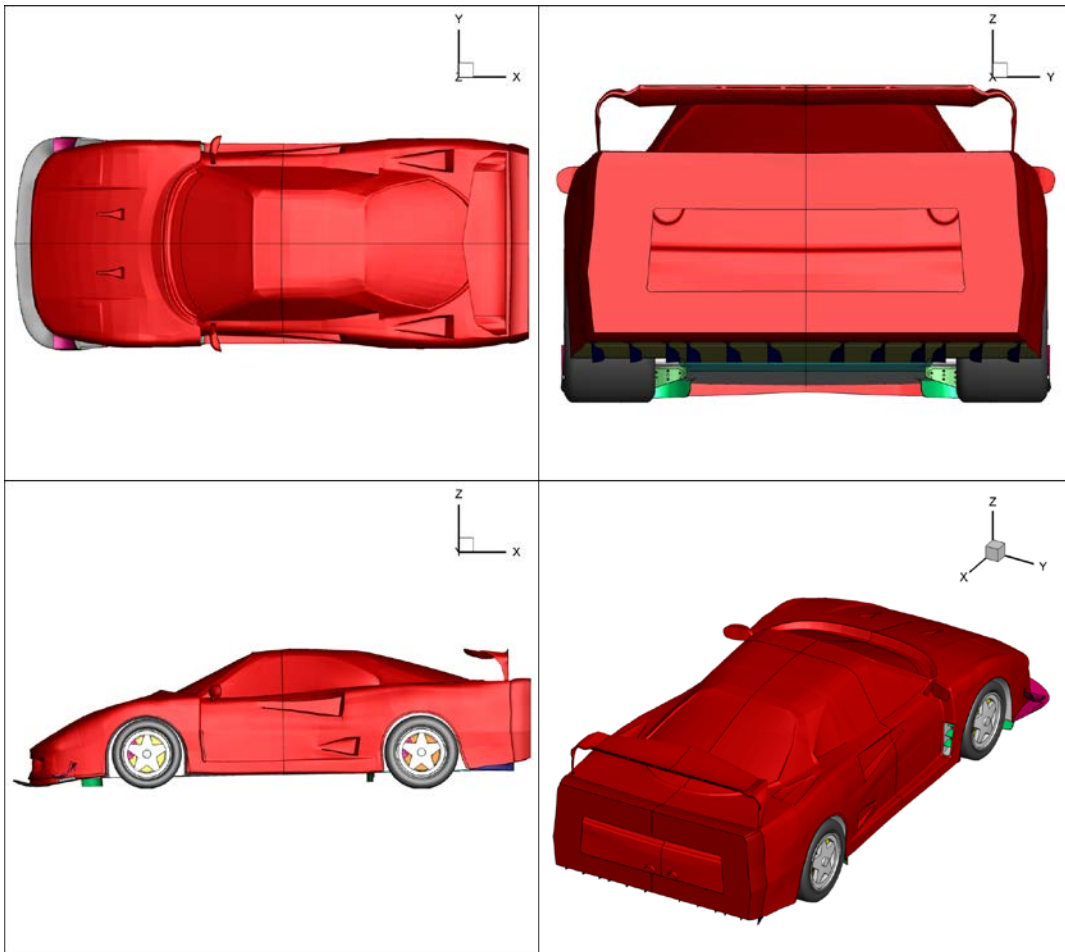
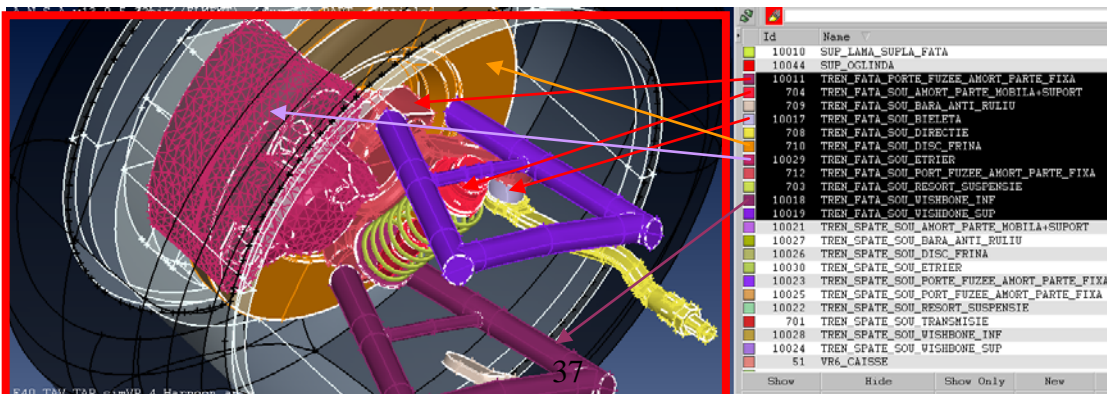


Figura 5.17 – Geometria finală pentru automobilul sport complex inspirat de F40.

Am creat pe lângă superstructura vizibilă în figura 5.17 și partea tehnică de sub mașină: fuzee, amortizor, transmisie, arcuri, portfuzee, discuri de frână, plachetii, protectorul de disc de frână, etrierii, bieleta, bara antiruliu, janta și pneurile (vezi figura 5.18)



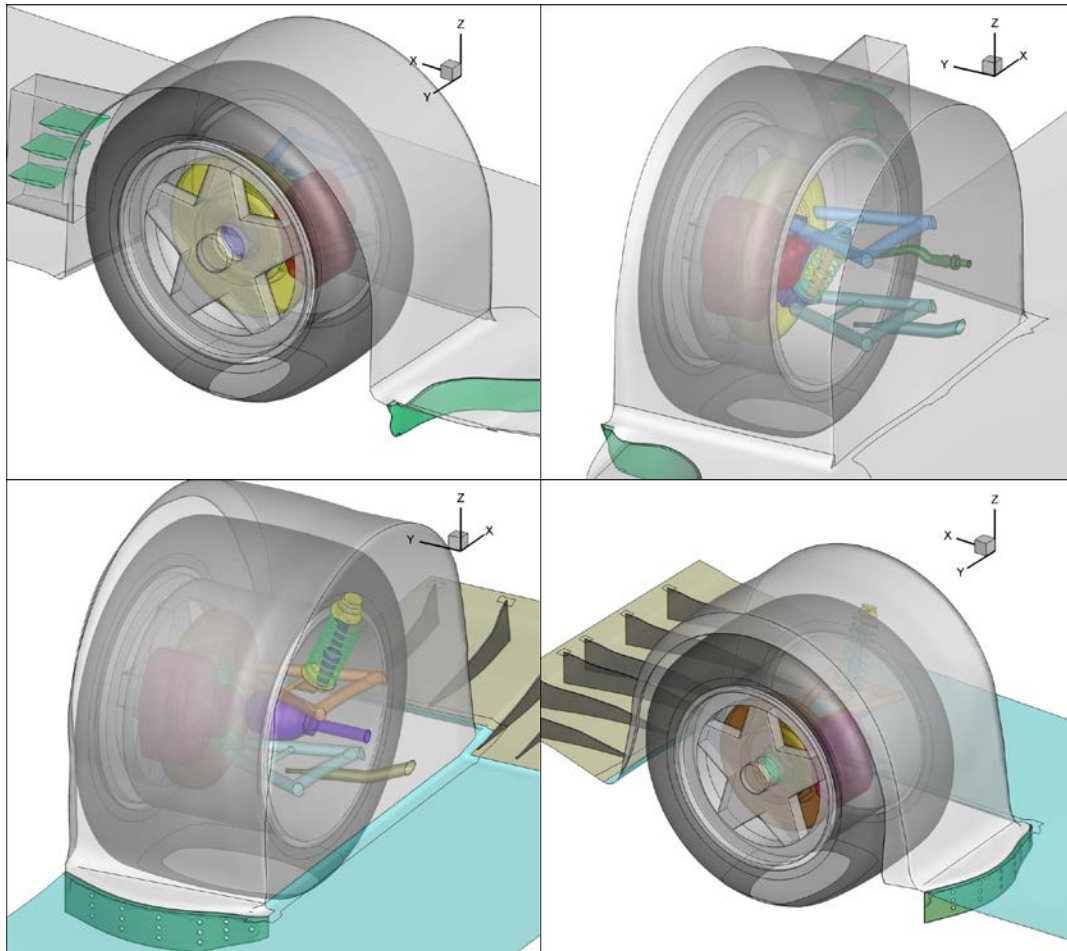


Figura 5.18 – Detaliu geometriei tehnice din arcul roții față (sus) și spate (jos) pentru automobilul sport complex (ansamblul pentru direcție, suspensie, frâne, transmisie, janta și pneu).

Am desenat „dive plate” (vezi figura 5.19) adică o placă de picaj (dispozitiv de control al curgerii), termen luat de la submarine. Acesta servește la crearea de forță de apăsare pe față și de a devia fluxul de aer mai departe de roți. Am ales splitter și nu difuzor pe față pentru că este mai eficient la generarea de forță de apăsare, conform referinței⁴⁶.

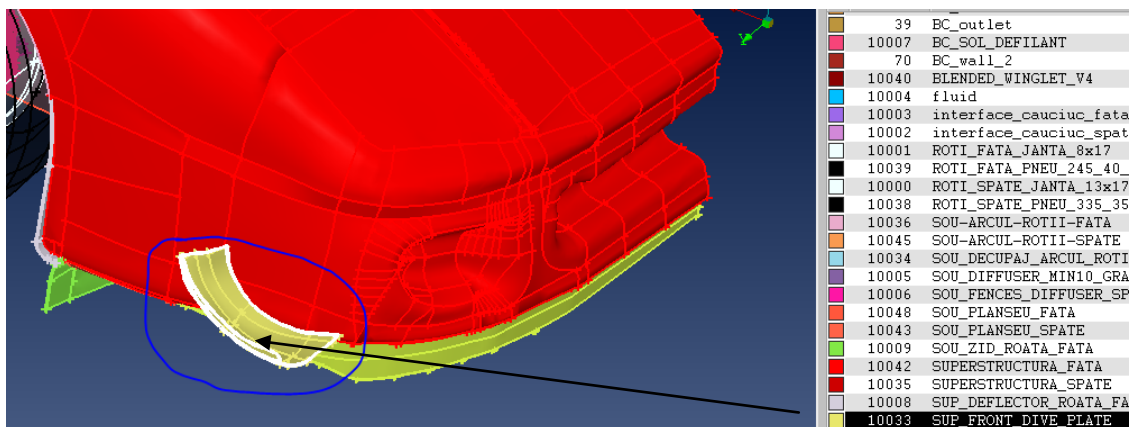


Figura 5.19 – Placa de picaj (dive plate) pentru echilibrarea aerodinamică a automobilului de curse complex (distribuția de forță de apăsare față/spate).

Am desenat un “front splitter” (aripă inversată față din figura 5.20) pentru automobilul sport complex, conform regulamentului actual FIA GT1. De asemenea, am adăugat o bordură marginală între splitter și dive plate;

⁴⁶ Simon McBeath, Competition Car Aerodynamics A Practical Handbook, Second edition.

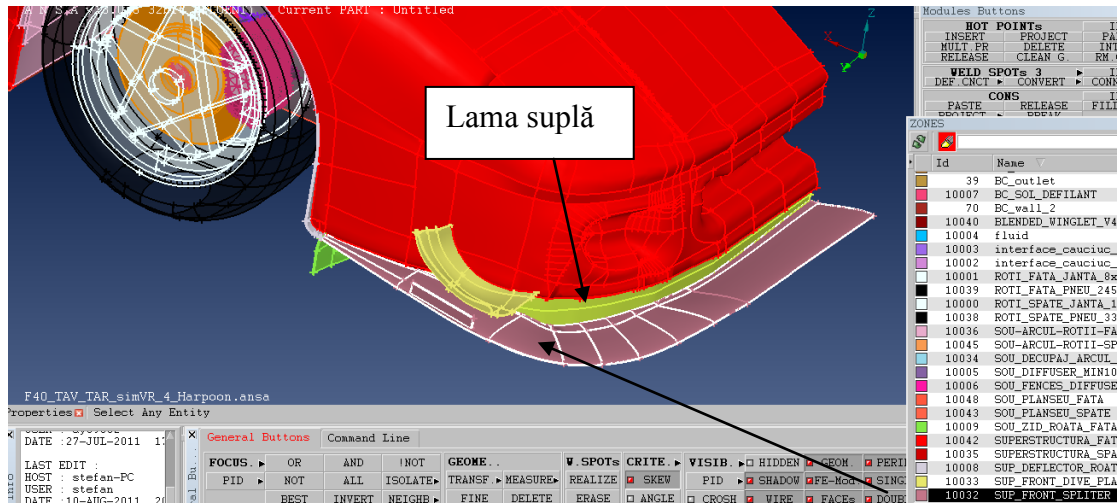


Figura 5.20 – Aripa inversată față (front splitter) pentru echilibrarea aerodinamică a automobilului de curse complex (distribuția de forță de apăsare față/spate).

Am modificat lama suplă pe față pentru a fi compatibilă cu noul splitter. Lama suplă este un dispozitiv de control al curgerii, menit să reducă rezistența la înaintare prin minimizarea debitului de aer care trece pe sub automobil.

Am creat un decupaj în arcul roții față pentru a crea o ieșire pentru aerul de acolo cu scopul reducerii rezistenței la înaintare (vezi figura 5.21). Profilele inversate de la interior sunt seria 2 de profile supercritice de la NASA (NASA SC2 -1010). Sunt aranjate în stil WINGGRID dar cu o porozitate foarte mare. Dacă se dovedește a fi un dispozitiv de reducere a rezistenței la înaintare atunci va fi păstrat și în simulările viitoare.

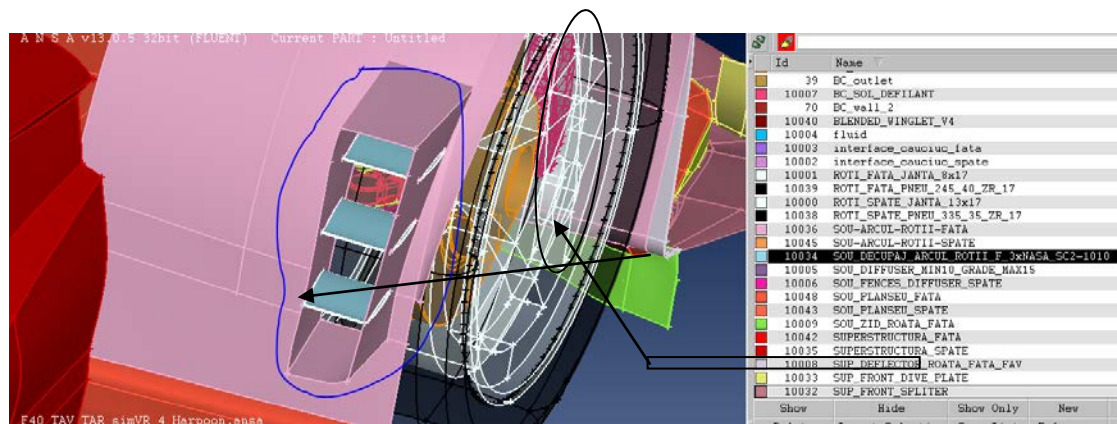


Figura 5.21 – Decupaj în arcul roții față pentru a crea o ieșire aerului cu 3 aripi inversate cu profil NASA SC2 -1010.

Am creat varianta 5 a winglet-ului si am atașat-o la aripa inversată ridicată la înălțimea H max admisă de regulamentul FIA GT1. Rezultatele din acest capitol sunt pentru varianta 6 a winglet-ului care are și flaps Gurney cu înălțime variabilă, dar cu același h max pentru aripa inversată spate.

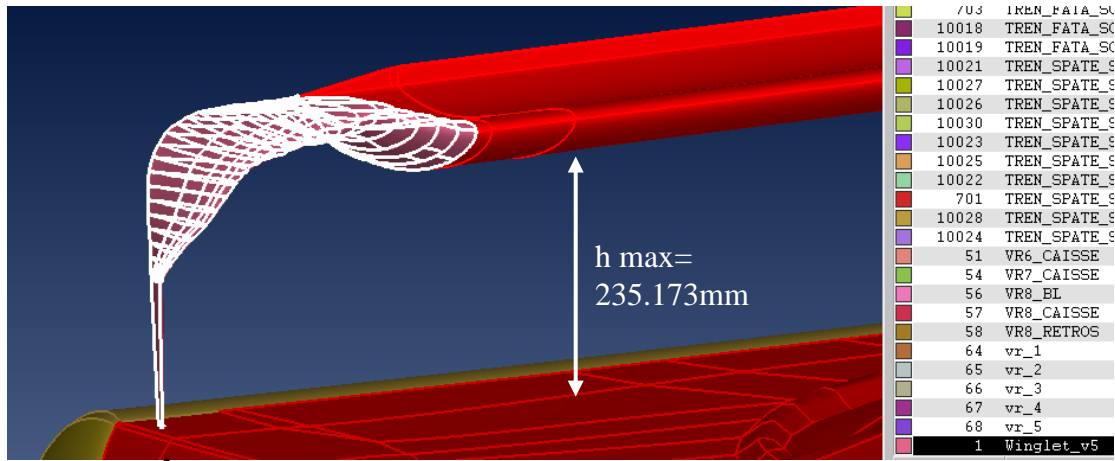


Figura 5.22 – Înălțimea maximă ($h_{max}=235.173\text{mm}$) a aripii inversate spate admisă de regulamentul FIA GT1.

Am creat o coadă fluidă ("fluid tale") pentru reducerea rezistenței la înaintare cu până la 50% (vezi figura 5.23) după regulile de concepție specificate de W-H Hucho în articolul⁴⁷.

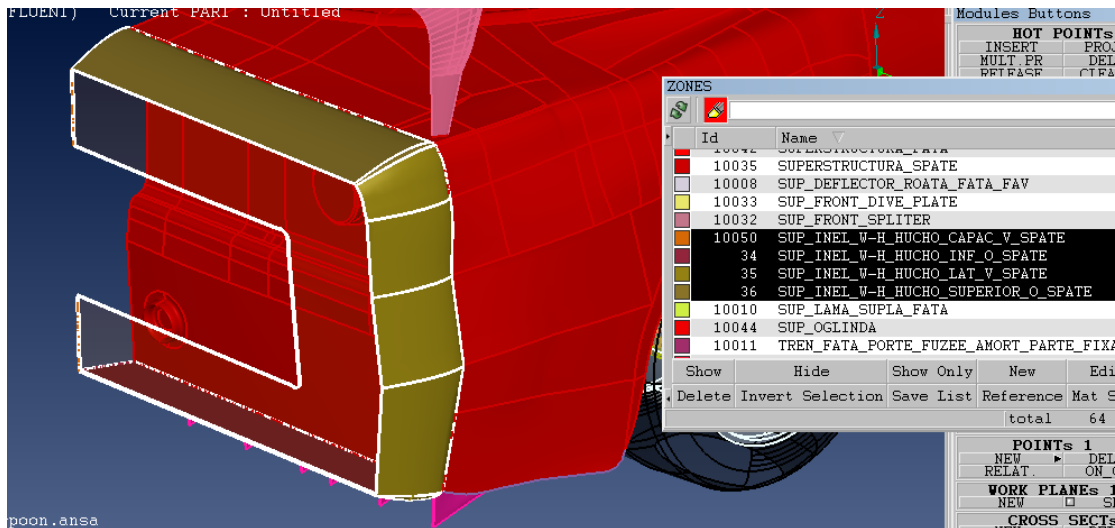


Figura 5.23 – Coada fluidă ("fluid tale") pentru reducerea cu până la 50% a coeficientului de rezistență la înaintare.

5.2.2. Discretizarea domeniului

Am creat volumul de simulare și zonele de rezoluție variabilă aplicând experiența obținută deja în urma analizei curgerii în jurul corpului Ahmed body și am luat în considerare efectul diferenței de scară între cele 2 modele

5.2.2.1 Optimizarea suprafeței de creștere a stratului limită

Pentru a avea încredere în rezultate, am maximizat suprafața de creștere a elementelor penta pentru stratul limită atât pe superstructură cât și pe planșeu (vezi figura 5.26). Constrângerea de respectat a fost definirea automată corectă a subvolumelor rămase și elemente de calitate (fără left handed sau elemente de volum negative).

⁴⁷ Wolf-heinrich Hucho, Halving the Drag Coefficient Seems Possible.

5.2.2.2 Divizarea volumului in subdomenii

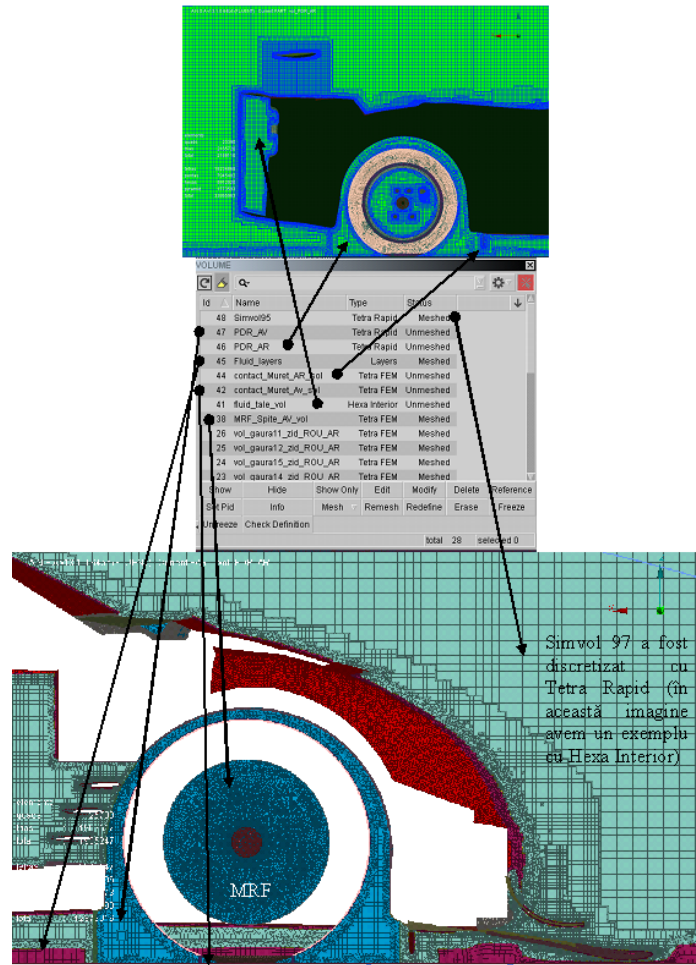


Figura 5.27 – Divizarea optimă a domeniului de calcul în subvolumuri.

5.2.3. Preprocesarea

Condițiile la limită sunt sintetizate în figura 5.28.

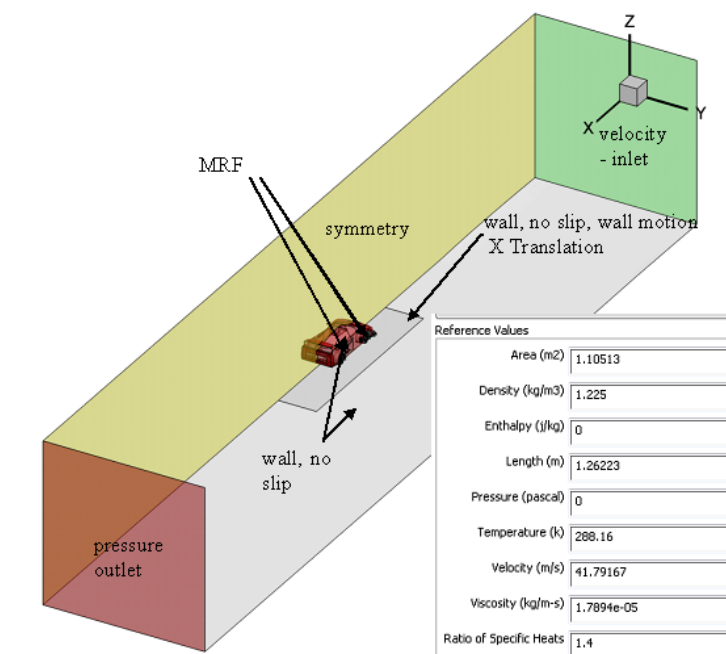


Figura 5.28 – Condițiile la limită și cele inițiale pentru automobilul sport complex.

5.2.5. Analiza coeficientilor de portanță și rezistență la înaintare

Am ilustrat în figura 5.29 analiza detaliată, pe zone, pentru Cd total. Din figura 5.29 observăm că Cd total pentru automobilul complex inspirat de Ferrari F40 atinge valoarea 0.347 care este foarte aproape de 0.35 valoarea de omologare pentru F40.

5.2.5. Analiza coeficientilor de portanță și rezistență la înaintare

Am ilustrat în figura 5.29 analiza detaliată, pe zone, pentru Cd total. Din figura 5.29 observăm că Cd total pentru automobilul complex inspirat de Ferrari F40 atinge valoarea 0.347 care este foarte aproape de 0.35 valoarea de omologare pentru F40.

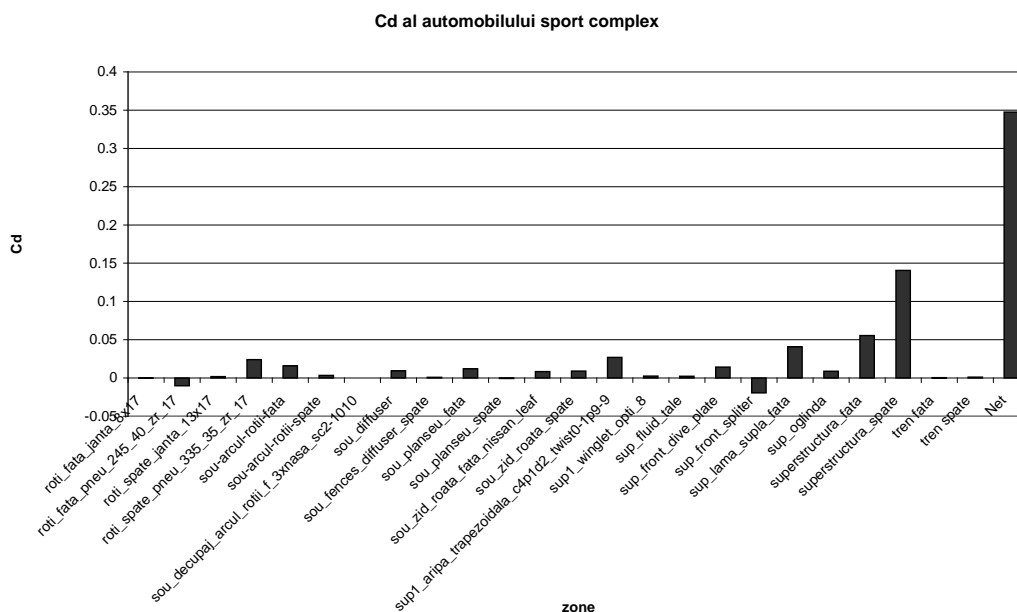


Figura 5.29 – Graficul de analiză a Cd pentru automobilul complex.

Distribuția coeficientului de portanță negativă (-Cl) față/spate este de 96.1% față, respectiv 3.9% spate. Altfel spus, Cl față -0.404, iar Cl spate -0.016. Eficiența aerodinamică, k, a automobilului sport complex a fost de -1.209. Am ilustrat în figura 5.30 analiza detaliată, pe zone, pentru Cl total.

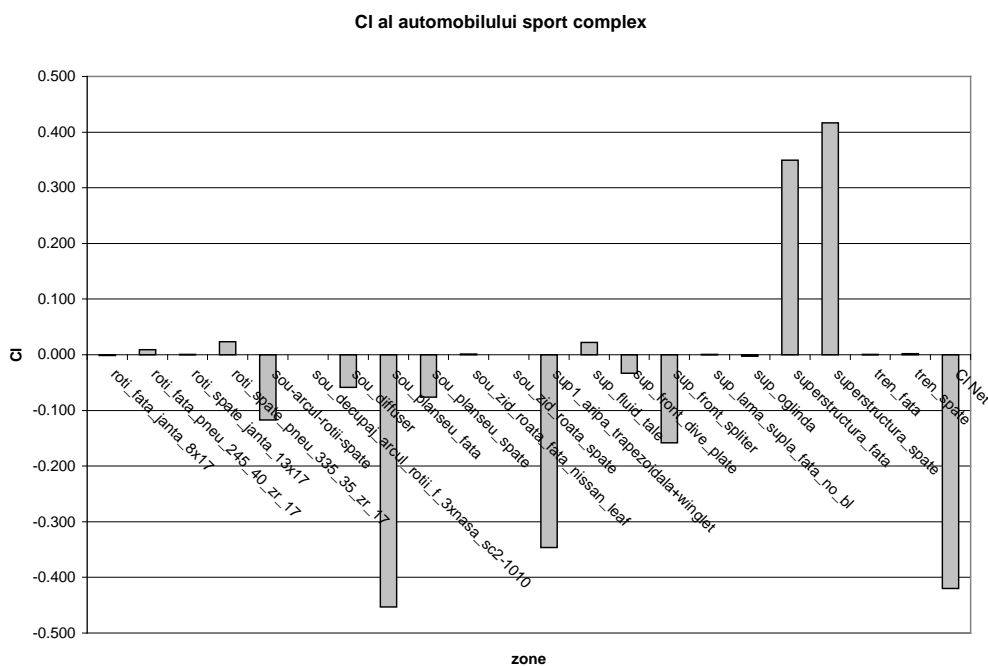


Figura 5.30 – Graficul de analiza a Cl pentru automobilul complex.

5.2.5. Analiza topologiei curgerii

Figurile din acest subcapitol (5.31, 5.32, 5.33, 5.35, 5.35, 5.36, 5.37) dezvăluie mecanismul de funcționare a kit-ului aerodinamic format din splitter față/airpă inversată față, lamă suplă/airdam față, ziduri în fața roții din față înclinate și curbate tip Nissan Leaf, ziduri în fața roților spate, decupaj în arcul roții față cu 3 aripi dispuse ca un WING-GRID, coadă fluidă/fluid tale, dive plate/ placă de picaj față, aripă inversată spate, diffuser-ul spate.

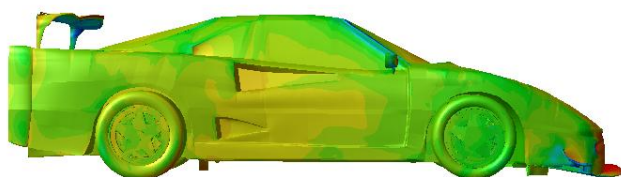
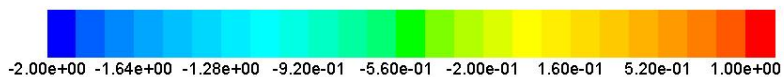


Figura 5.32 – Vizualizarea coeficientului de presiune statică , C_p , pe suprafața automobilului complex (superstructura și roțile), vedere din profil.

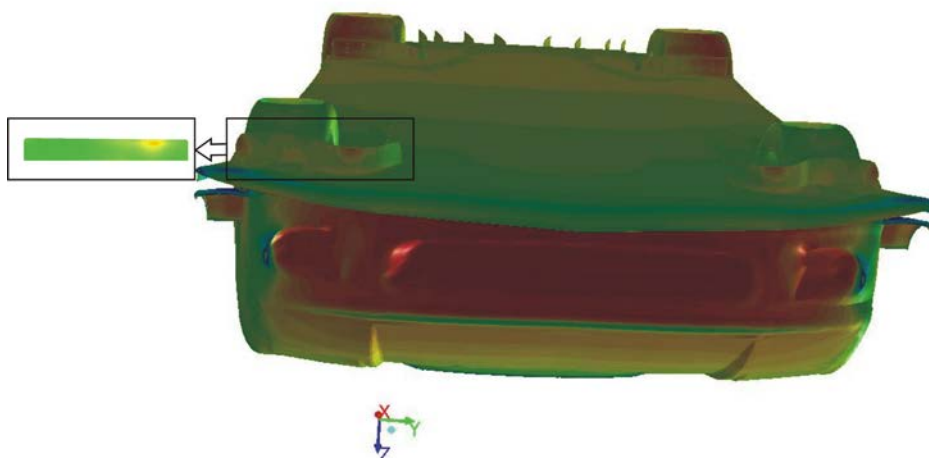
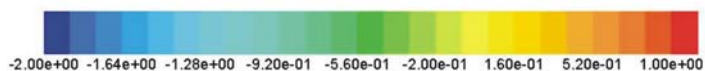


Figura 5.33 – Vizualizarea coeficientului de presiune statică , C_p , pe suprafața automobilului complex (planșeul, partea tehnică inferioară și roțile), vedere de sub automobil.

În figura 5.33 se poate vedea efectul curgerii pe sub automobil, ca ilustrare a explicației pentru forța de apăsare simțită de planșeu: se află în depresiune pe întreaga suprafață. În figura 5.33 se poate observa recuperarea presiunii spre spatele automobilului.

Diffuser-ul spate a fost proiectat în urma aplicării lecțiilor învățate din⁴⁸ și din capitalizarea rezultatelor simulărilor anterioare adică la 10^0 și funcționează corect, după cum se vede în figura 5.34 și figura 5.35.

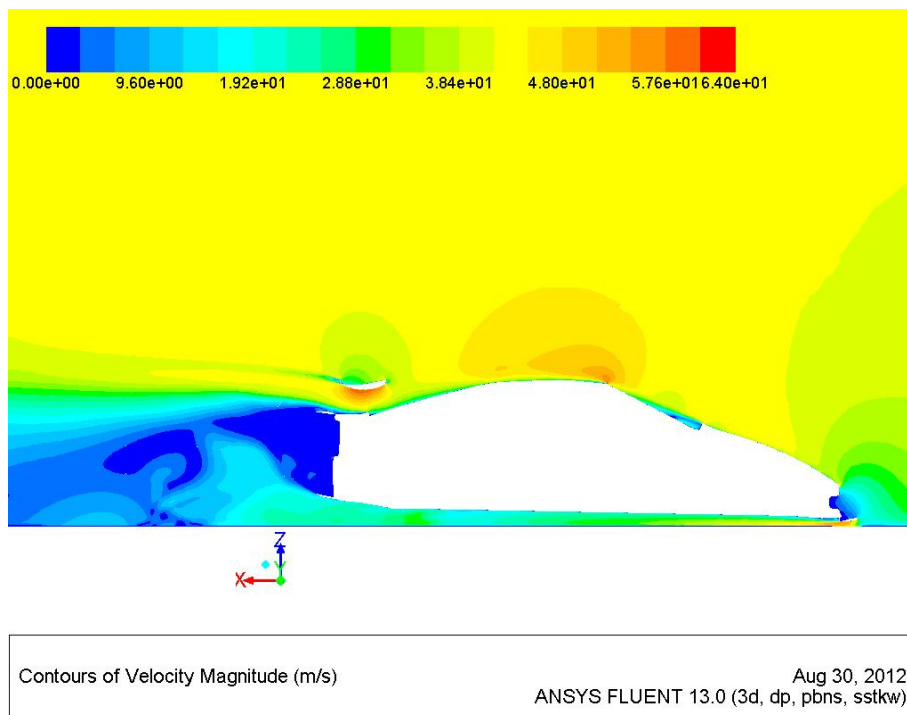


Figura 5.34 – Conturul vitezei la Y0 (mijlocul automobilului pe Y) în fluid.

De asemenea, în figura 5.34 și figura 5.35 se poate observa siajul echilibrat al automobilului complex de curse.

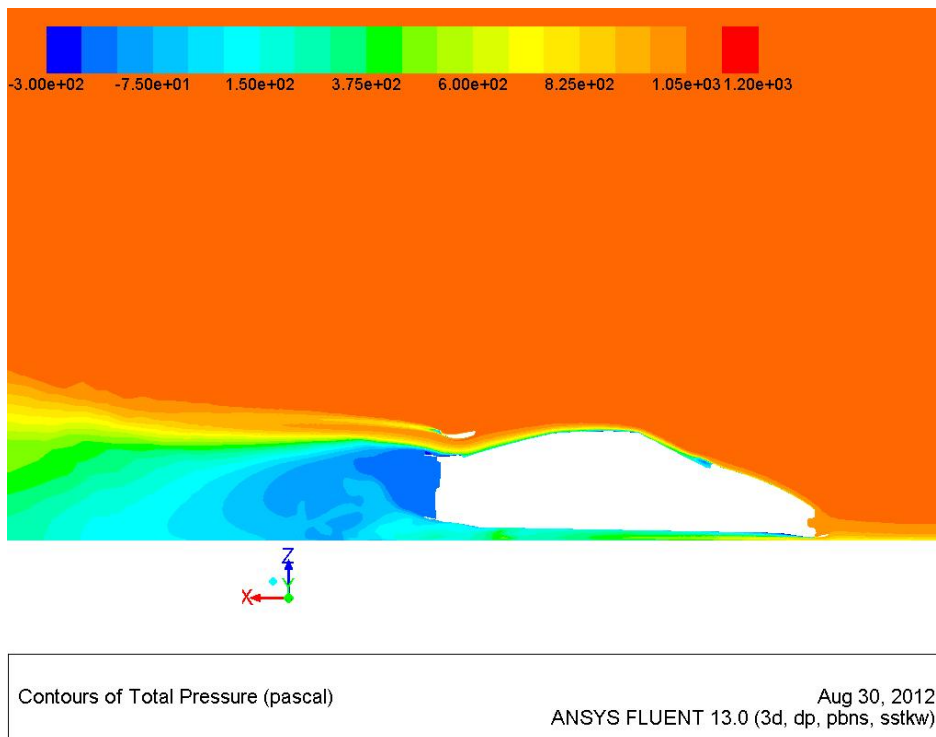


Figura 5.35 – Conturul presiunii totale la Y0 (mijlocul automobilului pe Y) în fluid.

⁴⁸ Simon McBeath, 2011, Competition Car Aerodynamics a Practical Handbook Second Edition.

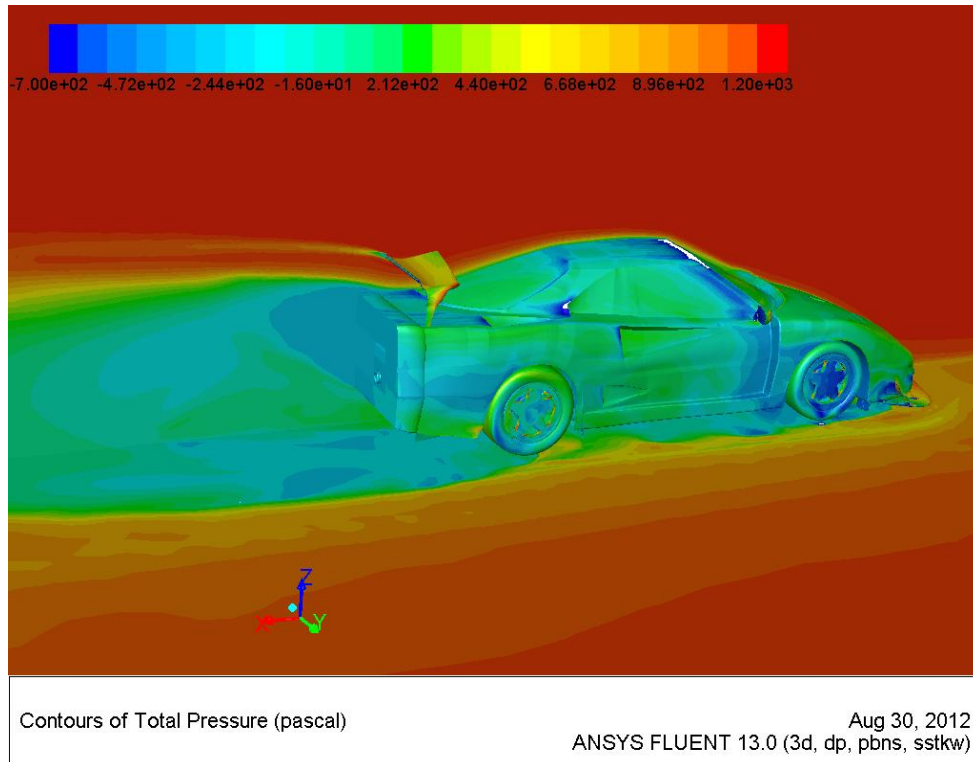


Figura 5.36 – Conturul presiunii totale la Y0 și pe suprafața automobilului sport complex.

În figura 5.37 este prezentat conturul presiunii totale la Y0 și pe suprafața automobilului sport complex cu zoom pe aripa inversată trapezoidală, răsucită, cu blended winglet și flaps Gurney.

Figura 5.37 evidențiază modul eficient de reducere a rezistenței la înaintare prin perforarea flapsului Gurney în lungul anvergurii pe distanțe mai mari decât au fost precedent încercate. Aripa inversată trapezoidală cu blended winglet a fost răsplătită cu rezultatele cele mai bune pentru winglet lung din punct de vedere al -Cl.

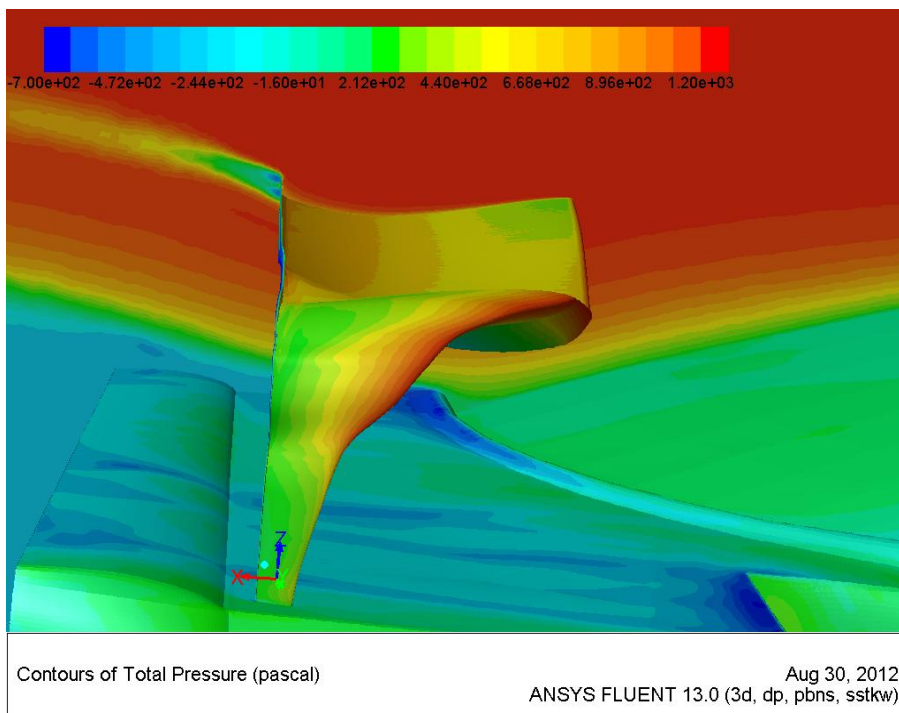


Figura 5.37 – Conturul presiunii totale la Y0 și pe suprafața automobilului sport complex cu focalizare pe aripa inversată trapezoidală, răsucită, cu blended winglet și flaps Gurney.

Am atins în acest capitol scopul de a evalua și de a cuantifica influența sistemului (automobilul) asupra performanței aerodinamice a aripii inversate montată pe spate. Am ales două cazuri: unghiul dintre lunetă și axa X nepotrivit în raport cu cerințele de aerodinamică, în favoarea ergonomiei $\varphi=25.8^\circ$ (automobilul ANSA) și cazul opus $\varphi=15^\circ$ (automobilul sport complex inspirat de F40).

6.1. CONCLUZII

Toate concluziile și contribuțiile personale își au originea în cele 1177 evaluări cu metoda panourilor și cele 509 simulări CFD efectuate pe durata de trei ani a doctoratului.

CONTRIBUȚII PERSONALE

Evaluarea stadiului tehnicii pentru profile aerodinamice specializate pentru FIA GT1 și GT2 și analiza numerică pe care am realizat-o mi-au permis să definesc două obiective specifice de depășit, una pentru eficiența aerodinamică și una pentru forța de apăsare maximă. În urma evaluărilor numerice cvasi-exhaustive pe care le-am realizat, am creat și optimizat două noi profile de aripi inversate: c4.1Detuned și c25 optimizat.

Am demonstrat că aripa (conceptul) c4.1Detuned poate fi considerată cea mai bună din clasa sa pentru finețe maximă pentru aplicații FIA GT1, GT2 sau Open GT. De asemenea, aripa (conceptul) c25 optimizat la jalonul 3 depășește rezultatele din literatura de specialitate pentru forța maximă de apăsare pentru aplicații FIA GT1, GT2 sau Open GT.

Am evaluat dispozitivele aerodinamice pentru capătul aripii de înaltă tehnologie și am ajuns la următoarele concluzii: cel mai potrivit pentru forța maximă de apăsare este bordura marginală cu adâncime maximă cu flaps Gurney, iar pentru eficiență este winglet-ul cu aripa inversată plasată la înălțimea maximă admisă de reguli.

Am optimizat înălțimea aripii inversate, alungirea și distribuția răsucirii pentru a atinge obiectivele de eficiență și forță de apăsare maximă.

Am realizat, de asemenea, cu succes, prima corelare cantitativă a dispozitivelor de capăt de aripă dintre CFD și tunel în special pentru WING-GRID. Am corelat cu succes și din punct de vedere calitativ, rezultatele obținute pentru WING-GRID.

Ca urmare a faptului că am demonstrat că brevetul nr. 123456 a fost îmbunătățit semnificativ și, în urma cercetărilor pe care le-am efectuat, au rezultat cele 3 profile aerodinamice noi (c4.1, c4.1 Detuned și c25OptM3), acestea vor face obiectul unor noi cereri de brevet de invenție.

Am efectuat, pentru prima oară în literatura de specialitate, o analiză comparativă și o evaluare detaliată, completă și obiectivă a acurateții modelelor de turbulență actuale utilizate în programele de modelare numerică existente - Fluent, CFX, PowerFLOW, OpenFOAM. Această analiză a ușurat considerabil o decizie foarte dificilă: alegerea modelului de turbulență cel mai potrivit pentru aerodinamica externă a automobilelor.

Am demonstrat numeric și am prezentat prima explicație a principiului și motivului pentru care dispozitivele foarte curbate pentru controlul curgerii față ("zidurile" din fața roților), de sub automobilul electric Nissan Leaf funcționează așa de eficient precum o fac.

Am prezentat prima explicație a principiului de funcționare a conceptului inventat de echipa de Formula 1 McLaren: basking shark.

Planul de viitor implică integrarea și testarea cu prototipe/machete fizice în tunelul aerodinamic și pe pistă, după rularea simulărilor de dinamica mașinii pe un circuit ales, cu matricile aerodinamice determinate deja.

Viitorii cercetători care vor dori să preia ștafeta nu vor pleca de la 0 ci vor avea posibilitatea să folosească modelul numeric al automobilului sport complex cu kit aerodinamic pe care sa-l îmbogățească și sa-l optimizeze în continuare.

REALIZĂRI PERSONALE

BREVETUL DE INVENȚIE

Număr Brevet 123456, BOPI nr 6 /2012, DISPOZITIV AERODINAMIC PENTRU MĂRIREA ADERENȚEI AUTOMOBILELOR.

LUCRĂRI PUBLICATE

Stefan BORDEI, Ioan TELEAGĂ, George ANDREI, UNSTEADY AERODYNAMIC SIMULATION OF A RENAULT TWINGO VEHICLE, METIME 2009, 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE on THERMAL ENGINES and ENVIRONMENTAL ENGINEERING JUNE 4-6 2009.

Ștefan Bordei, Florin Popescu, Optimizarea proiectării sistemelor de ventilație, încălzire și climatizare cu ajutorul modelărilor numerice, Revista construcțiilor, anul VI, nr.60, iunie 2010, pag. 90-92, ISSN1841-1290.

Ștefan Bordei, Florin Popescu, BEST PRACTICES FOR THE MODELING AND SIMULATION OF FLUID FLOW AROUND MOTOR SPORT VEHICLES USING HARPOON AND ANSYS FLUENT, Proceedings conferința „Eficiență și Inovație prin Simulare Numerică”, ANSYS FLOWMASTER, Sinaia, 17-18 iunie 2010, Editura Printech. ISBN 978-606-521-528-3.

Stefan Bordei, Florin Popescu, Optimising a HVAC System through numerical modelling in Ansys Airpak and Ansys CFD, COMAT 2010 – The 3rd International Conference on Advanced Composite materials Engineering, Brașov, oct. 2010, pag. 9-14, Proceedings conf internaționala, COMAT 2010, Brasov, ISSN 1844-9336.

Stefan Bordei, Florin Popescu, AERODYNAMIC RESULTS FOR A NOTCHBACK RACE CAR, 2011, The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Volume II, pp.159-178, ISSN 1221-4566.