

Utjecaj aerodinamike automobila na potrošnju goriva

Arrigoni, Leo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:447276>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**UTJECAJ AERODINAMIKE AUTOMOBILA NA POTROŠNJU
GORIVA**

Rijeka, rujan 2022.

Leo Arrigoni

0069086626

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**UTJECAJ AERODINAMIKE AUTOMOBILA NA POTROŠNJU
GORIVA**

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Komentor: doc. dr. sc. Ozren Bukovac

Rijeka, rujan 2022.

Leo Arrigoni

0069086626

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**
Predmet: **Mehanika fluida**
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Leo Arrigoni (0069086626)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Utjecaj aerodinamike automobila na potrošnju goriva / Effect of Aerodynamics On Car Fuel Economy**

Opis zadatka:

Opisati strujanje fluida oko automobila s obzirom na silu aerodinamičkog otpora s fizikalnog motrišta mehanike fluida. Izraditi geometriju profila i numerički simulirati optjecanje. Analizirati turbulentno strujanje zraka oko zadanog objekta automobila te povezati silu otpora strujanja s potrošnjom goriva. Analizirati energetska efikasnost automobila obzirom na vrstu motora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Leo Arrigoni

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Kyck

Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Bukovac

Doc. dr. sc. Ozren Bukovac (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

K

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Ja, Leo Arrigoni izjavljujem da sam ovaj završni rad napravio sam uz pomoć, korekciju i savjete od strane mentora prof. dr. sc. Lade Kranjčevića, asistenta dr. sc. Luke Grbčića i docenta dr. sc. Ozrena Bukovca.

Rijeka, rujan 2022.

Leo Arrigoni

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću, asistentu dr. sc. Luki Grbčiću i docentu dr. sc. Ozrenu Bukovcu koji su mi uvelike pomogli prilikom izrade ovog završnog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. AERODINAMIKA	2
2.1. Općenito o aerodinamici	2
2.2. Povijest aerodinamike	2
2.3. Povijest aerodinamike automobila	3
3. OPSTRUJAVANJE AUTOMOBILA	8
3.1. Sile	8
3.2. Granični sloj	10
3.3. Vrste strujanja	11
3.3.1. Laminarno strujanje	11
3.3.2. Turbulentno strujanje	12
3.4. Koeficijenti dinamičkog uzgona i otpora	12
4. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA - CFD	15
4.1. CFD	15
4.2. CFD u automobilskoj industriji	15
5. IZRADA SIMULACIJE	18
5.1. Izrada geometrije automobila	18
6. SIMULACIJA OPSTRUJAVANJA	22
6.1. Simulacija opstrujavanja automobila bez retrovizora	22
6.2. Simulacija opstrujavanja automobila sa retrovizorima	24
7. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA	25
7.1. Podaci dobiveni za automobil bez retrovizora	25
7.2. Podaci dobiveni za automobil s retrovizorima	26
8. IZRAČUN POTROŠNJE GORIVA	29
8.1. Izvod formule	29
8.2. Proračun	32
9. ZAKLJUČAK	34
10. LITERATURA	35
11. SAŽETAK	36
12. SUMMARY	37

1. UVOD

U ovom radu biti će opisan utjecaj opstrujavanja fluida oko jednostavne verzije automobila. Proizvođači automobila već desetljećima pokušavaju poboljšati aerodinamika automobila, svaka nova generacija je bolja nego prijašnja, automobili sve manje troše, sve su brži, udobniji i učinkovitiji. Aerodinamika je usko povezana s tim stvarima, vidljivo je kako su automobili u prošlosti bili visoki, kockastog oblika jer u to vrijeme proizvođači nisu imali dovoljno znanja o tehnologijama i aerodinamici. Kod današnjih automobila, pogotovo kod sportskih, jako velik dio pažnje se posvećuje aerodinamici. Ugrađuju se spojleri, razne rupe koje propuštaju zrak, oblik karoserije je pun zakrivljenja i utora kako bi lakše propuštali zrak i iskoristili ga u svoju korist. Cilj ovog rada je uočiti zavisnost aerodinamike automobila i potrošnje goriva, uočiti načine kako se potrošnja do sad smanjivala te kako bi se ona mogla u budućnosti mogla još više smanjiti. Prvi dio rada će se baviti općenitijim, teoretskim dijelom aerodinamike, kako se aerodinamika razvijala kroz povijest te kakav utjecaj je imala na industriju pogotovo automobilsku. Također biti će opisana i računalna dinamika fluida ili CFD te kako se on koristi u automobilskoj industriji. U glavnom dijelu rada biti će napravljene dvije pojednostavljene verzije automobila jedan sa retrovizorima i jedan bez, te će se obaviti po dvije simulacije na različitim brzinama za svaki model. Takva analiza će omogućiti uvid u to kako aerodinamika automobila utječe na potrošnju goriva pri različitim brzinama. Modeli automobila će biti modelirani u programu Autodesk Inventor, mreža automobila će biti napravljena u programu Hypermesh, dok će se simulacija optjecanja fluida napraviti u programu Virtual Wind Tunnel. Završni dio ovog rada baviti će se izračunom dobivenih podataka i njihovom analizom.

2. AERODINAMIKA

2.1. Općenito o aerodinamici

Aerodinamika je grana mehanike fluida zadužena za proučavanje kretanja zraka na tijela koja se gibaju kroz njega. Parametri koji se pri tome analiziraju su tlak, brzina, temperatura, gustoća i sila koji se mijenjaju u prostoru i vremenu. Znanost aerodinamike se dijeli na teorijsku i eksperimentalnu. Teorijska aerodinamika je usko vezana za dinamiku plinova i mehaniku fluida te koristi zakonitosti iz njih. Dok se eksperimentalna aerodinamika zasniva na ispitivanjima u istraživačkim centrima tj. u aerodinamičkim tunelima, gdje se provode ispitivanja u letu ili slobodnom padu, te računalnim simulacijama gdje se eksperimentalno ispituju i provjeravaju sile koje djeluju na modele. Aerodinamika u autoindustriji, a pogotovo na trkaćim stazama, ima ključnu ulogu u konstruiranju boljeg i bržeg automobila. U serijskoj autoindustriji se nastoji minimizirati otpor zraka automobila u pokretu zbog bolje učinkovitosti i manje potrošnje goriva. Kod trkaćih automobila je također jako bitan aerodinamički potisak, koji se u zadnje vrijeme pokušava poboljšati i kod svakodnevnih automobila. Aerodinamički potisak je sila koja se pritišće automobil na podlogu, njegovim pravilnim iskorištavanjem moguće su veće brzine u zavojima, a time i brži automobil. Aerodinamika je prisutna svuda oko nas od automobila, zrakoplova i jedrilica do insekata i životinja koji svoji aerodinamički oblik tijela koriste za let.

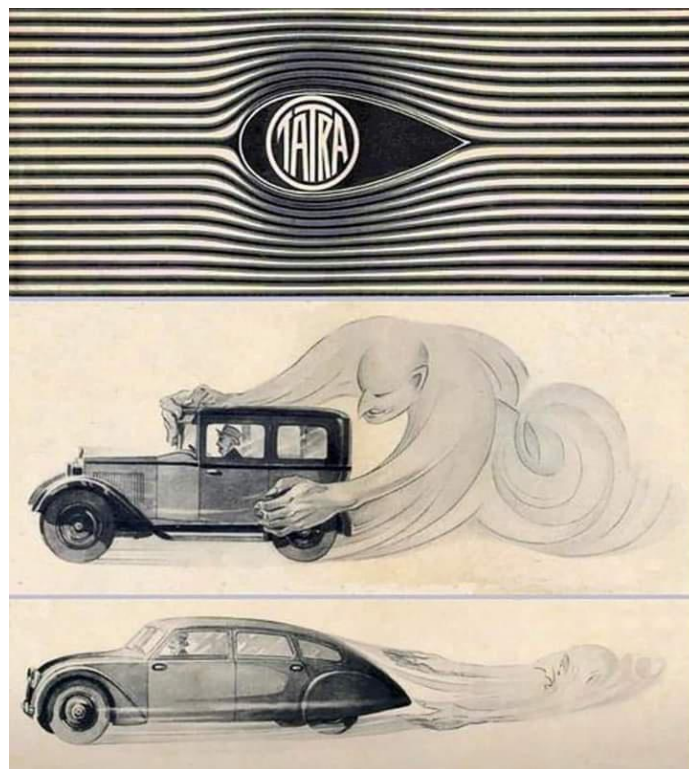
2.2. Povijest aerodinamike

Prve aerodinamičke ideje su imali su znanstvenici poput Aristotela, Galileo Galileja i Leonarda da Vinci, ali sa ne prevelikim uspjesima u razvoju aerodinamike. Aristotel je promatrao kako se tijela kreću kroz vodu i zrak, te je zaključio da otpor koji pruža fluid proporcionalan njegovoj gustoći. To znanje su iskoristili Rimljani i iskoristili ga za izgradnju vodovoda i brodova. Galileo Galilei je proučavao slobodni pad tijela te je zaključio da otpor zraka raste s povećanjem brzine tijela. U to vrijeme svi radovi o mehanici fluida i aerodinamici su se zasnivali na eksperimentima i promatranju pojava oko njih. Najveći napredak u aerodinamici je došao tek 1726., Isaac Newton je razvio prvu teoriju o otporu zraka. Prema Newtonu otpor zraka je ovisan o veličini tijela, njegovoj brzini i o gustoći fluida kroz koji se giba. Newton je uveo pojam fluida kao kontinuuma, pojam viskoziteta fluida i analizirao kretanje fluida pomoću principa količine gibanja. Francis Herbert Wenham je 1871. godine konstruirao prvi zračni tunel. Zračni tunel je bio velika prekretnica u daljnjem razvoju aerodinamike jer se moglo približe i u kontroliranim

uvjetima pratiti što se događa sa ispitivanim tijelom. Međutim u zračni tunel su se postavljali modeli koji su bili dosta manji nego u stvarnosti, pa je bio potreban kriterij koji će povezati ispitivanja na umanjenim modelima sa stvarnim objektima. Osborne Reynolds je napravio otkriće koje je nazvano po njemu, a to je Reynoldsov broj. Reynoldsov broj predstavlja bezdimenzionalnu veličinu koja će pomoći pri povezivanju ispitivanja na umanjenim modelima sa stvarnim objektima. Nedugo kasnije braća Wright započinju sa prvim testni letovima. Prikupili su dovoljno znanja o aerodinamici i uz pomoć istraživanja na njihovom zračnom tunelu, 1903. su letjeli prvom pogonskom letjelicom.

2.3. Povijest aerodinamike automobila

Razvoj aerodinamike kao znanosti započinje oko 1900. godine kada se vjeruje da je napravljen prvi automobil pazeći na utjecaj aerodinamike. Taj automobil je dizajnirao belgijski vozač utrka Camille Jenatzy, to je bio prvi automobile koji je probio brzinu od 100 km/h. Međutim u to vrijeme kada se pojavljuju prvi automobili te kada je krenula masovna proizvodnja, o aerodinamici se nitko nije brinuo. Zbog velike količine dostupne nafte tražio sa samo što jači motor, ali je to dovelo do jako neugodne vožnje jer bi se pri većim brzinama javljao jak šum koji je vožnju čini neugodnim iskustvom. Iz tog razloga inženjeri autoindustrije su zakoračili u područje aerodinamike. Proizvođač automobila Tatra ovako (slika 2.1.) objašnjava aerodinamiku (1934) na jednostavan način da svatko može razumjeti.



Slika 2.1. Proizvođač automobila Tatra na jednostavan način obješjava aerodinamiku [1]

U to vrijeme se jako razvija i zrakoplovna industrija koja je također radila na problemima aerodinamike. Stoga su automobilski stručnjaci koristili dostignućima iz zrakoplovne industrije. Prvi koji je napravio veliki iskorak je švedski Saab koji je 1947. godine predstavio modela Saab 92 (slika 2.2.).



Slika 2.2. Saab 92 [2]

Ovaj model Saaba imao je jajasti oblik i otpor zraka mu je bio 0.30, što je nevjerojatno jer današnji auti imaju otpor zraka između 0.25 i 0.35. Ovaj automobil je mogao voziti mnogo brže i dulje uz manju potrošnju goriva, a da ujedno u njega nije ugrađen snažniji motor. Nakon ovog otkrića uz pomoć zračnih tunela, svi ostali su počeli ispitivati svoje aute u zračnim tunelima, što je i normalna praksa dan danas. Još jedan zapaženi dizajner i inženjer automobila je bio i Paul Jaray. On se zalagao za glatke linije i prijelaze na automobilima, da blatobrani budu u sklopu automobila, a ne odvojeni. Također je koristio zaobljena vjetrobranska stakla kao i to da svjetla ne strše van automobila, to su sve karakteristike koje se i danas koriste. Jedan od prvih automobila koji se proizveo prema Jarayevim principima je Volkswagen buba (slika 2.3.), koje je proizvedena u više od 22 milijuna primjeraka od 1938. do 2003. godine, te je bila apsolutni hit u svijetu.



Slika 2.3. Volkswagen buba iz 1983. [3]

Tijekom 70-ih godina 20. stoljeća, kada je nastupila svjetska kriza u opskrbi gorivom, počelo se još više obraćati pažnju na to koliko automobil troši, nastojalo se smanjiti koeficijent otpora zraka. Inženjeri nisu preveliku pažnju davali detaljima već su mijenjali oblike retrovizora, više ih prilagođavali automobilu, mijenjali su oblike kvaka čak i dodavali spojlere. Time se smanjio koeficijent otpora zraka, međutim dosegli su limit te su morali pronaći rješenja u promjeni oblika automobila. U tom području je prednjačio Audi, koji je prvi spustio automobil te je time poboljšao njegov gravitacijski centar i omogućio vozaču i putnicima udobniju vožnju. Audi je te inovacije predstavio na modelu Audi 100 (slika 2.4.).



Slika 2.4. Audi 100 [4]

Nije bilo previše promjena tijekom sljedećih godina, svaki proizvođač automobila i dalje pokušava smanjiti koeficijent otpora zraka. U posljednjih 30-ak godina prosječni automobili imaju te brojeve između 0.25 i 0.35, s time da se teži da bude 0.20 i ispod. Prvi komercijalni masovno proizvedeni automobil sa koeficijentom otpora 0.20 je električni Mercedes EQS (slika 2.5.).



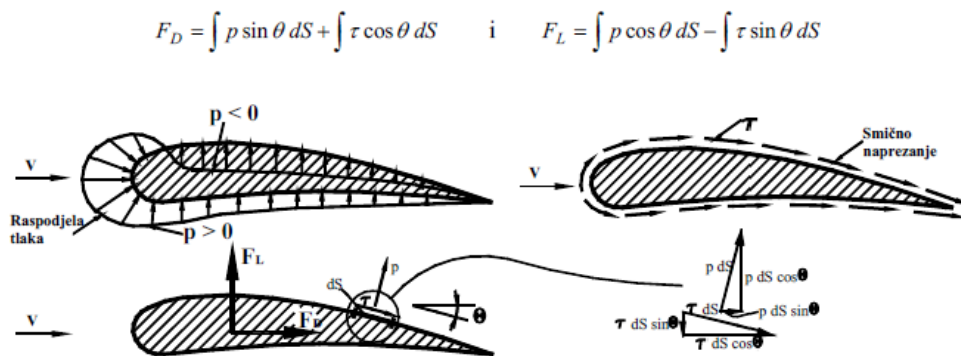
Slika 2.5. Mercedes EQS [5]

3. OPSTRUJAVANJE AUTOMOBILA

U ovom poglavlju govorit će se o aerodinamici vozila, tj. kako strujanje zraka oko vozila utječe na njegove performanse (ubrzanje i brzinu), ponašanje automobila u vožnji, te potrošnju goriva.

3.1. Sile

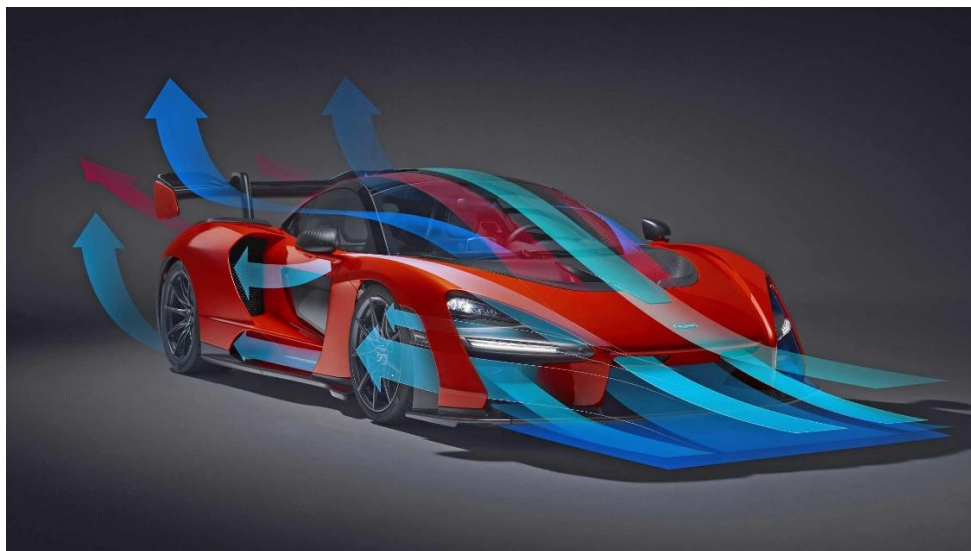
Ukupno dobivena sila fluida koja djeluje na tijelo se može podijeliti na dvije međusobno okomite komponente, silu otpora F_D (eng. *drag*) i dinamički uzgon F_L (eng. *lift*). Sila otpora F_D je paralelna komponenta na gibajuće tijelo s relativnom brzinom v kojom se fluid približava tijelu, ona stvara aerodinamični otpor. Dinamički uzgon F_L je okomita komponenta sile fluida na relativnu brzinu približavanja fluida v . Smična i normalna naprezanja učestvuju u sili dinamičkog uzgona i otpora.



Slika 3.1. Viskozne i tlačne sile na avionsko krilo [6]

Slike 3.2. i 3.3. prikazuju kako sile djeluju na automobil, sila dinamičkog uzgona (eng. *lift*) najizraženija je na haubi, vjetrobranu, krovu i na stražnjem dijelu automobila gdje se nalazi spojler. Sila otpora (eng. *drag*) ima najveći utjecaj na prednjem i stražnjem dijelu automobila, međutim taj otpor se nastoji smanjiti brojnim otvorima na automobilu koji služe za što optimalniji protok zraka kroz karoseriju i strujanje oko nje.

Slike 3.2. i 3.3. prikazuju kako sile djeluju na automobil, sila dinamičkog uzgona (eng. *lift*) najizraženija je na haubi, vjetrobranu, krovu i na stražnjem dijelu automobila gdje se nalazi spojler. Sila otpora (eng. *drag*) ima najveći utjecaj na prednjem i stražnjem dijelu automobila, međutim taj otpor se nastoji smanjiti brojnim otvorima na automobilu koji služe za što optimalniji protok zraka kroz karoseriju i strujanju oko nje.



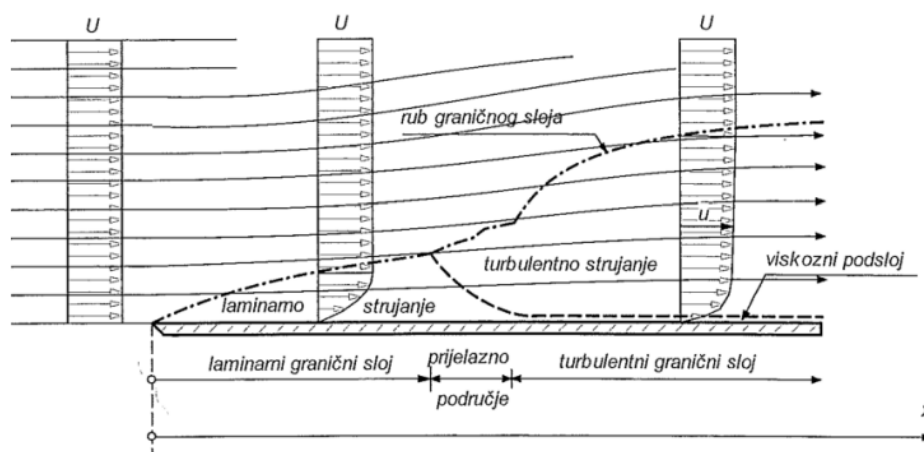
Slika 3.2. Prikaz strujanja zraka oko automobila [7]



Slika 3.3. Prikaz strujanja zraka oko automobila [7]

3.2. Granični sloj

Granični sloj je dio struje fluida pod utjecajem smičnih sila. Granični sloj i njegove karakteristike te način opstrujavanja tijela, kontroliraju intenzitete sile dinamičkog uzgona i otpora. Na slici je prikazan rast graničnog sloja za opstrujavanje ravne ploče, gdje u laminarnom sloju strujna vlakna se ne miješaju, kao da sloj kliže nad slojem. U prijelaznom stanju ono se sve više deblja i dolazi do nestabilnosti, te na kraju do turbulentnog sloja. Neovisno o jačini turbulencije tekućine prije nailaska na ploču, na početku ploče će se uvijek razvijati laminarni granični sloj. Budući da je strujanje jednoliko, doći će do postepenog odmicanja strujnica od ploče, odnosno, uslijed smanjenja brzine poremećni to će se početi širiti. Kad Reynoldsov broj Re dostigne kritičnu vrijednost, tj. kada se sloj proširi, laminarni tok postaje sve uži i počinje se razvijati turbulencija.



Slika 3.4. Rast graničnog sloja. Optjecanje ravne ploče [6]

Reynoldsov broj predstavlja mjeru turbulencije i računa se prema izrazu (3.1):

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} \quad (3.1)$$

Gdje je:

Re - Reynoldsov broj

ρ - gustoća fluida (kg/m^3)

v - najveća brzina strujanja fluida (m/s)

l - odabrana duljina, npr. duljina cijevi (m)

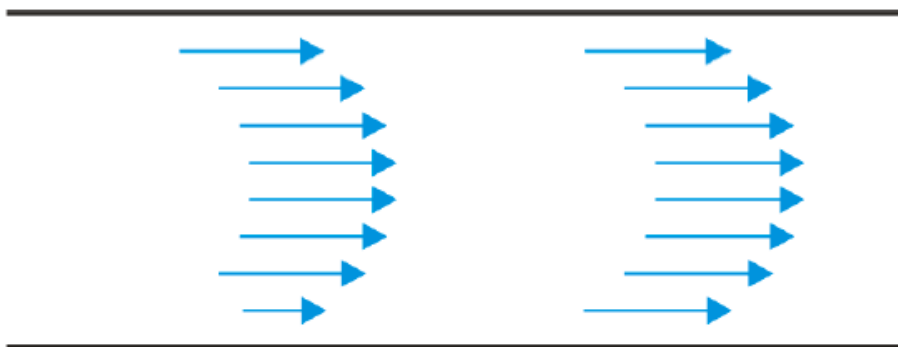
η – dinamička viskoznost fluida ($Pa \cdot s$ ili $N \cdot \frac{s}{m^2}$ ili $kg/(m \cdot s)$)

Laminarno strujanje vrijedi za $Re \leq 2300$, a za vrijednosti $Re \geq 4000$ strujanje je turbulentno. Za vrijednosti između 2300-4000 pretpostavlja se prijelazno strujanje.

3.3. Vrste strujanja

3.3.1. Laminarno strujanje

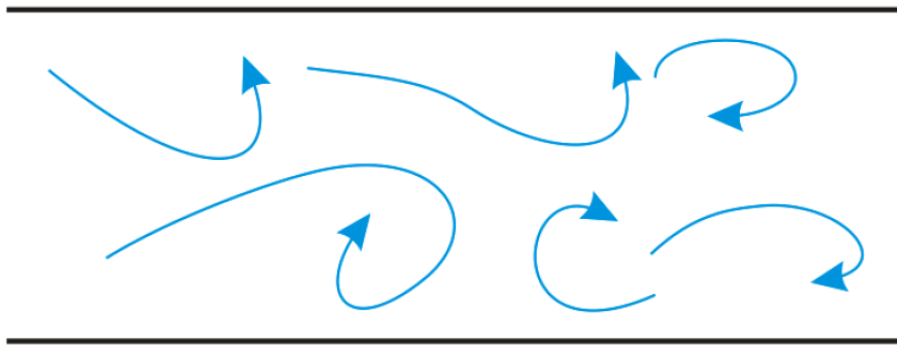
Čestice fluida gibaju se po glatkim putanjama u infinitezimalno tankim laminama (slojevima), koji klize mirno jedan po drugom. Laminarno strujanje je mirno, jednolično strujanje fluida u paralelnim slojevima s malim miješanjem među njima, bez turbulencija.



Slika 3.5. Laminarno strujanje [8]

3.3.2. Turbulentno strujanje

Turbulentno strujanje karakterizira nepravilno kaotično gibanje čestica fluida s jakim fluktacijama brzine u svim točkama strujnog polja. Pri velikim brzinama strujanja fluida dolazi do miješanja među slojevima.



Slika 3.6. Turbulentno strujanje [8]

3.4. Koeficijenti dinamičkog uzgona i otpora

Da bi se mogla izračunati sila otpora F_D i dinamičkog uzgona F_L potrebna su dva bezdimenzijska parametra, koeficijent sile otpora C_D i koeficijent dinamičkog uzgona C_L .

Koeficijent otpora (eng. *drag coefficient* C_D), jedan je od bitnijih parametara za opisivanje aerodinamičnosti automobila. Koeficijent otpora ovisi o sili otpora, karakterističnoj površini, brzini nastrojavanja i gustoći fluida.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho v^2}{2} A} \quad (3.2)$$

Gdje je:

C_D - koeficijent sile otpora

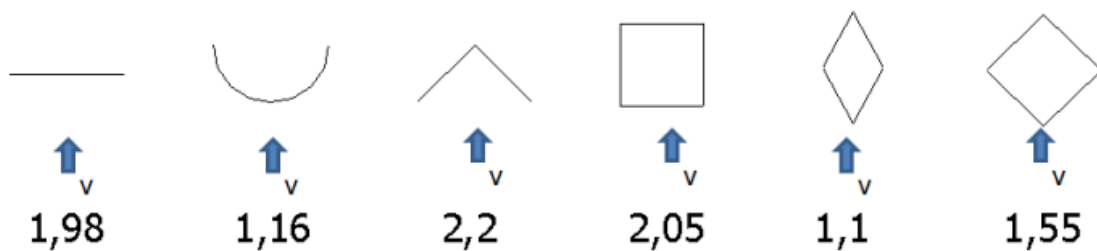
F_D - sila otpora (N)

ρ - gustoća fluida (kg/m^3)

v - brzina nstrujavanja (m/s)

A - karakteristična površina (m^2)

Jednadžba prikazuje da što je manja vrijednost koeficijenta, manji je i otpor automobila tj. potrebno je manje snage za pokretanje automobila što rezultira manjom potrošnjom goriva. Da bi se postigao što manji koeficijent otpora inženjeri rade razne aerodinamičke dorade na karoseriji automobila, poput snižavanja podnice, smanjivanje kuta nagiba rešetke prednje maske i raznim prorezima i rupama u karoseriji.



Slika 3.7. Slika prikazuje kako različiti oblici utječu na koeficijent otpora [9]

Koeficijent dinamičkog uzgona (eng. *lift coefficient* C_L), je bezdimenzijska veličina koja predstavlja silu koja djeluje u okomitom smjeru. Kod sportskih automobila njena vrijednost je negativna, tzv. aerodinamički potisak (eng. *downforce*). Aerodinamički potisak je sila koja pritišće automobil prema dolje te tako povećava prianjanje gume o podlogu i omogućava brže prolasku kroz zavoje.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho v^2}{2} A} \quad (3.3)$$

Gdje je:

C_L - koeficijent dinamičkog uzgona

F_L - sila uzgona (N)

ρ - gustoća fluida (kg/m^3)

v - brzina nastrujavanja (m/s)

A - karakteristična površina (m^2)

4. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA - CFD

4.1. CFD

CFD (eng. *Computational fluid dynamics*) ili računalna dinamika fluida je veza između mehaničkog i računalnog inženjeringa koja omogućava primjenu znanja i iskustava s područja mehanike fluida koristeći izradu modela i simulacija. CFD ima široko područje primjene u industrijskim područjima, ali sve češće i izvan tog područja. Neki primjeri gdje se primjenjuje CFD:

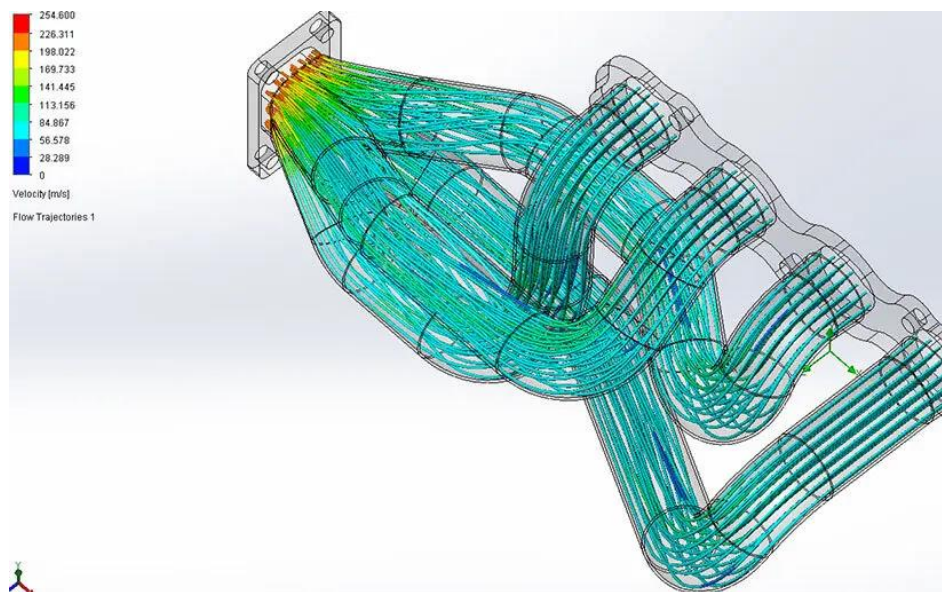
- Aerodinamika automobila i zrakoplova
- Hidrodinamika brodova
- Biomedicinsko inženjerstvo - protok krvi kroz vene i arterije
- Hidrologija i oceanografija
- Kemijsko inženjerstvo

Od sredine dvadesetog stoljeća koristi se u zrakoplovnoj industriji pri proizvodnji i optimizaciji zrakoplovnih i mlaznih motora, kasnije se primjenjuje pri dizajniranju motora s unutarnjim izgaranjem i komora izgaranja, a danas se koristi u aerodinamici automobila kako bi se predvidjele sile otpora, protok zraka i ostali bitni faktori. Današnji cilj je uspostaviti što bolju povezanost i kompatibilnost između CFD-a i CAE-a (eng. *Computer-aided engineering*).

4.2. CFD u automobilskoj industriji

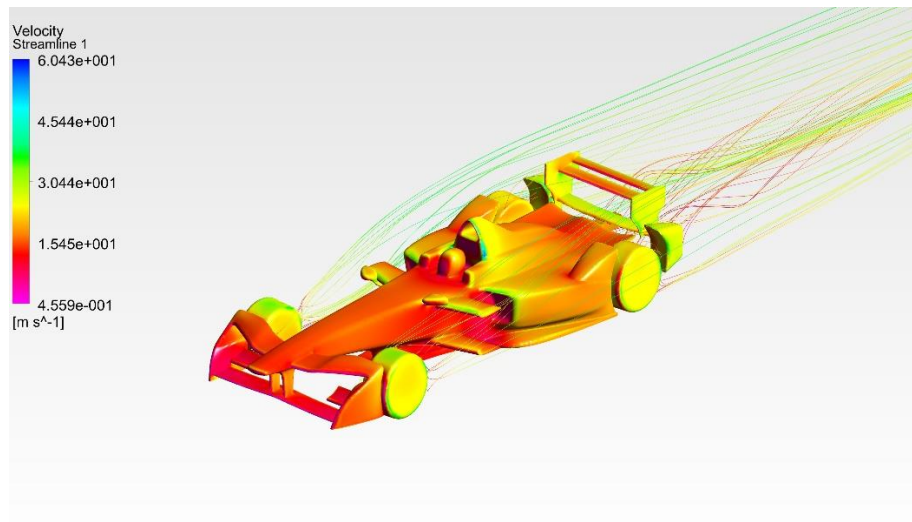
S napretkom tehnologije očekivanja potrošača i inženjera kod automobila vrtoglavu rastu. Uz neprestani tehnološki razvoj, inženjeri konstruiraju automobile koji su unatrag 20 godina bili neizvedivi. Sve se to postiže računalno podržanim inženjerstvom (CAE) i tehnikom računalne dinamike fluida (CFD-a). CFD igra značajnu ulogu u napretku i razvoju modernih automobila. Ova računarska tehnika omogućuje inženjerima i stručnjacima predviđanje i istraživanje protoka topline ili fluida oko komponenti. CFD se koristi svugdje gdje neka automobilska komponenta ima međusobne interakcije s fluidom, plinom, nekim krutim tijelom ili

kombinacijom nekih od tih elemenata. CFD ima vrlo važnu ulogu u razvoju i unapređenju modernih automobila. On omogućava da stručnjaci mogu predvidjeti kako će se toplina ili fluid kretati oko komponente. To sve olakšava procese dizajniranja i sklapanja komponenti. CFD se koristi u više grana autoindustrije, a neke od primjena su: aerodinamika, ispitivanja kompresije na cilindrima, sustav hlađenja motora, grijanje i hlađenje unutrašnjosti vozila, ispušni sustav, testiranje sigurnosti putnika (crash testovi) i mnogi drugi slučajevi. Korištenje CFD sustava nezaobilazno je u području aerodinamike jer se zahtijevaju visoki zahtjevi za dizajnom automobila radi boljeg aerodinamičkog odziva, boljim performansama i čim boljom upravljivošću automobila. U prošlosti inženjeri su se oslanjali isključivo na iskustvo i na zračne tunele, takav način rada je bio jako skup, dugotrajan i kompliciran proces. Danas za CFD simulaciju trebaju samo računalo i softver, te pomoću toga se može napraviti analiza bolja nego sa eksperimentalnim testiranjem. CFD je veoma koristan i za ostale dijelove automobila, kao što prikazuje slika 4.1 većina dijelova motora s unutarnjim izgaranjem je izrađena uz pomoć CFD-a.



Slika 4.1. Slika prikazuje kako se pomoću CFD-a mogu simulirati uvjeti u različitim dijelovima motora [10]

Jedan od razloga zašto su CFD simulacije zamijenile uporabu zračnih tunela je i veoma laka i bezbolna promjena parametara s kojima se ispituje aerodinamika. Moguće je mijenjati oblik vozila, brzinu vozila, smjer strujanja zraka, kvalitetu zraka i slično. Izravan primjer toga je i slika 4.2 gdje bi u stvarnosti bilo jako teško podvrgnuti formulu stotinama različitih eksperimenata, pomoću CFD simulacija se to može vrlo lako i bezbolno učiniti.



Slika 4.2. Prikaz CFD simulacije na formuli [11]

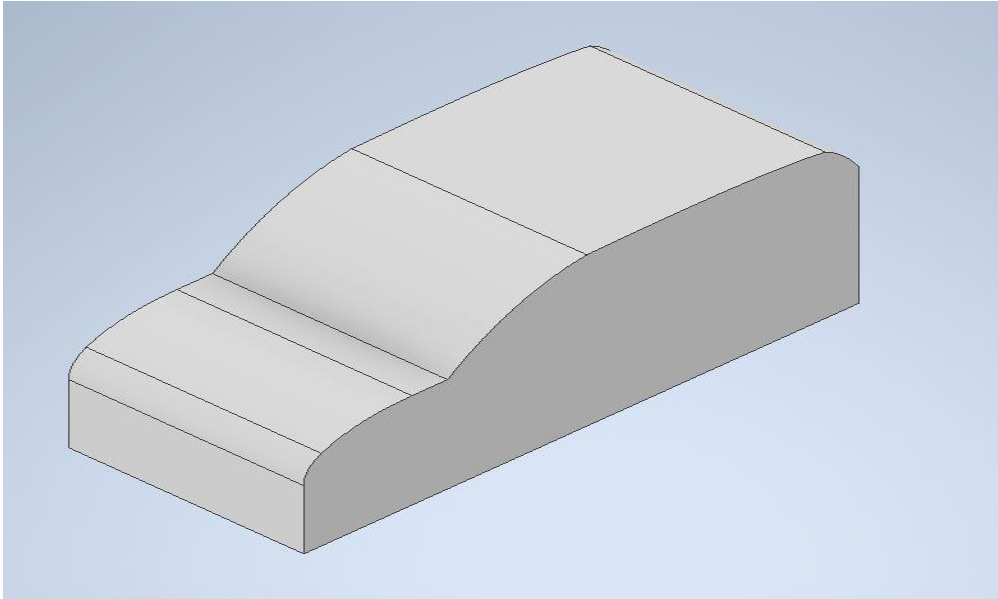
5. IZRADA SIMULACIJE

5.1. Izrada geometrije automobila

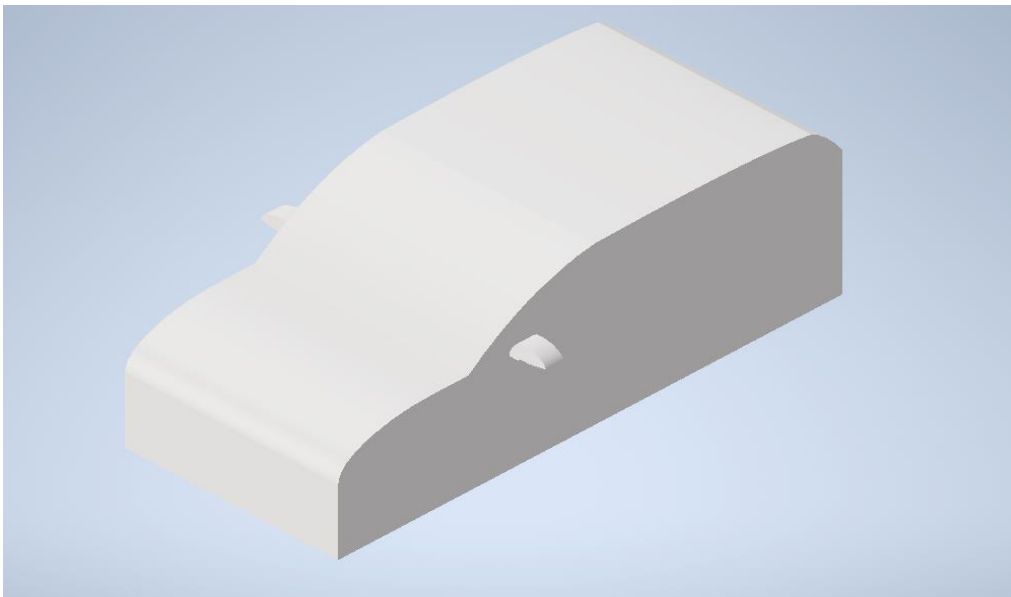
Cilj ovog dijela zadatka je bio izrada pojednostavljenih modela automobila. U programu Autodesk Inventor Professional 2021 izrađuje se čim više pojednostavljena verzija stvarnog automobila, u ovom slučaju je to Golf 7, jedan model će biti bez retrovizora, a drugi će biti s retrovizorima tako da se kraju mogu usporediti rezultati ispitivanja.



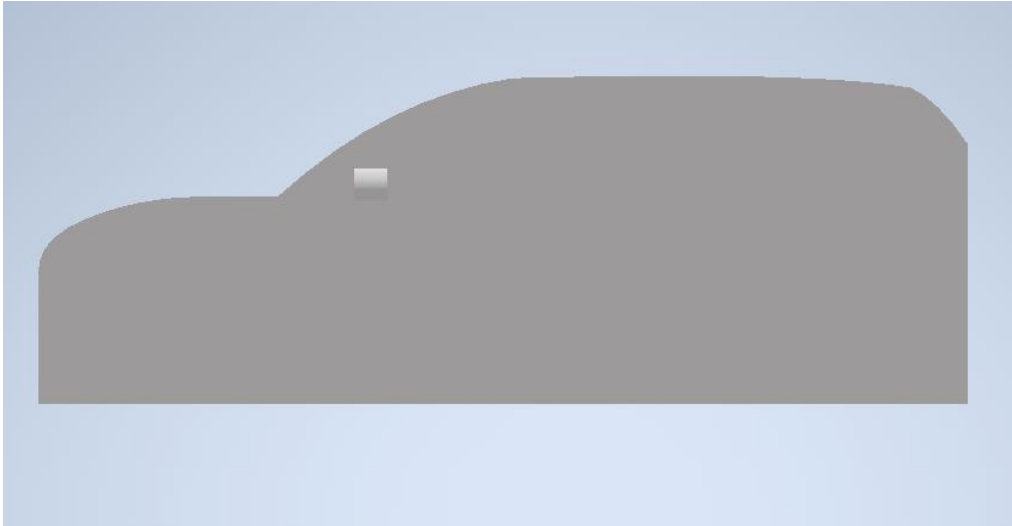
Slika 5.1. Golf 7 prema kojem je rađen model [12]



Slika 5.2. Prikaz modela automobila bez retrovizora u Autodesk Inventoru



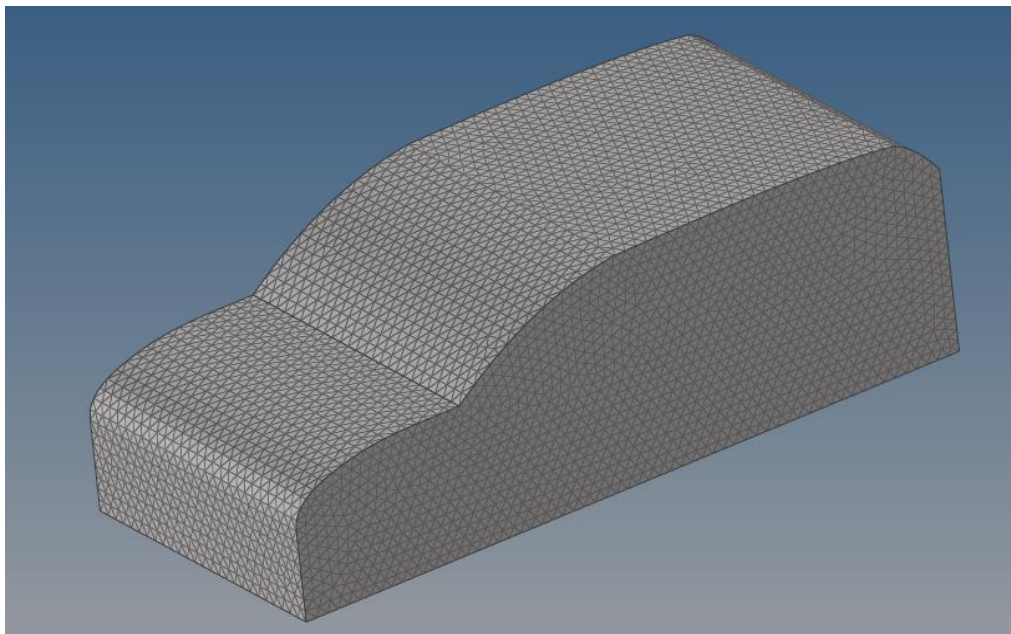
Slika 5.3. Prikaz automobila sa retrovizorima u Autodesk Inventoru



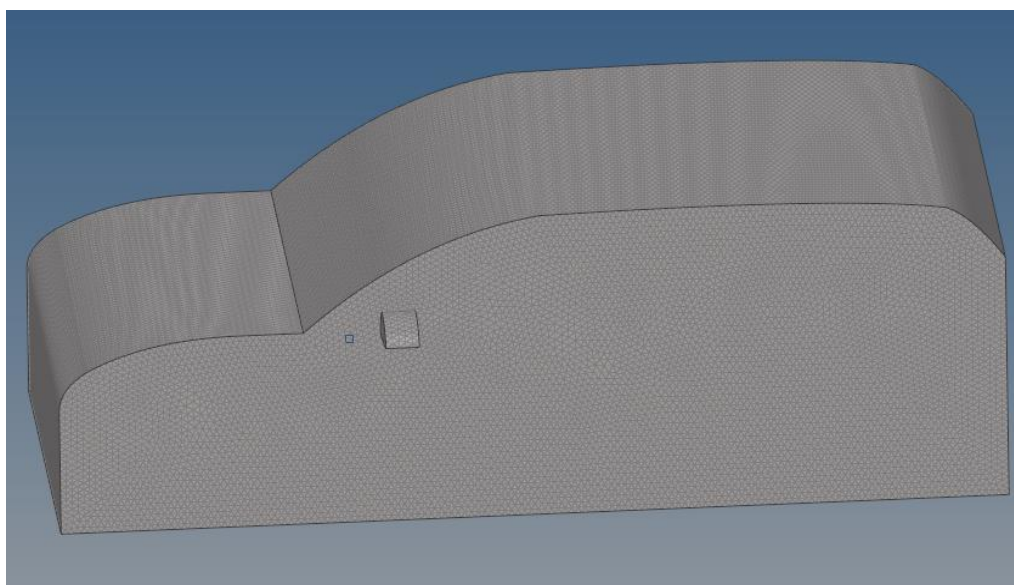
Slika 5.4. Prikaz profila automobila s retrovizorima u Autodesku Inventoru

Na slici 5.1. je prikazan predložak stvarnog automobila prema kojem je izrađena pojednostavljena verzija automobila, slike 5.2. i 5.3. prikazuju pojednostavljene verzije automobila sa i bez retrovizora, slika 5.4. prikazuje model automobila sa retrovizorima iz profila. Pojednostavljeni modeli prikazuju samo osnovne konture automobila vidljivo je da fali mnogo osnovnih dijelova automobila poput kotača, vrata, spojlera i drugih detalja. Također modeli su napravljeni iz jednog komada osim retrovizora koji su posebno napravljeni tako da nema prijelaza koji postoje na realnom automobilu. Dimenzije modela automobila su jednake stvarnom automobilu, a to je dužina 4.255 m, visina 1.5 m i širina 1.8m.

Ovi modeli se spremaju u .stp formatu te se ubacuju u programu Hypermesh, gdje se izrađuje mreža na temelju napravljenih modela, koja će trebati za kasnije.



Slika 5.5. Mreža automobila bez retrovizora u programu Hypermesh



Slika 5.6. Mreža automobila s retrovizorima u programu Hypermesh

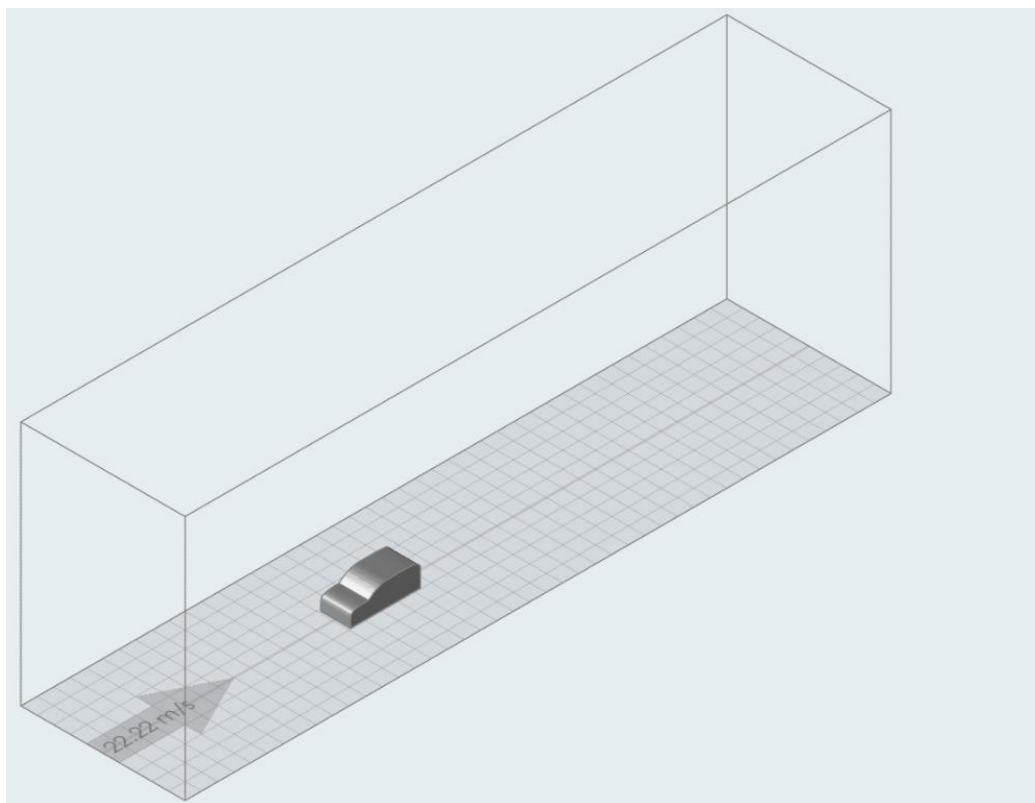
Slike 5.5. i 5.6. predstavljaju mreže napravljenih modela automobila, dobivene mreže su sa dobrim razinama nesavršenosti sa oko 0.2% što je prihvatljivo te zadržavamo mreže.

6. SIMULACIJA OPSTRUJAVANJA

Napravljene mreže se prebacuju u NASTRAN oblik što omogućuje da se ubace u program Virtual Wind Tunnel u kojem će se provoditi ispitivanja simulacije strujanja zraka oko automobila, te će se s dobivenim rezultatima donesti zaključak. Provoditi će se po dvije simulacije za svaki model automobila na dvije različite brzine. Na oba modela će se simulirati gibanje zraka na brzini od 22.22 m/s (80 km/h) i na 50 m/s (180 km/h) te će se na temelju toga moći vidjeti kako se koeficijent otpora ponaša na različitim brzinama.

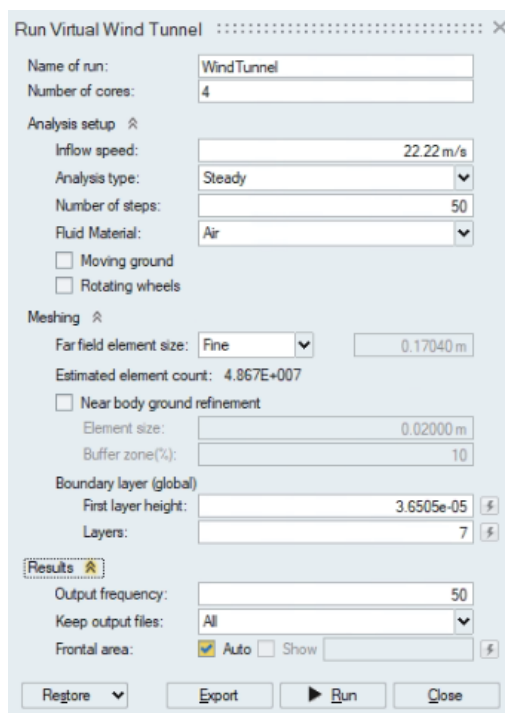
6.1. Simulacija opstrujavanja automobila bez retrovizora

U Virtual Wind Tunnel uvozi se datoteka mreže napravljena u prijašnjem koraku. Ovdje se odabire prostor virtualnog tunela, tunela mora biti dovoljno velik da bi se mogle razviti strujanja te pravilno očitati, u ovom slučaju tunel je dužine 43m, visine 15m i širine 10m. Model automobila se postavlja u sredinu tunela i 10 metara od početka tunela te je postavljeno da je smjer strujanja zraka dolazi na prednju stranu automobila. Automobil je postavljen kao na slici 6.1..



Slika 6.1. Prikaz automobila bez retrovizora u tunelu

Nakon toga određuju se parametri za simulaciju. Oabrana je brzina od 22.22 m/s i broj iteracija je 50 (slika 6.2.).

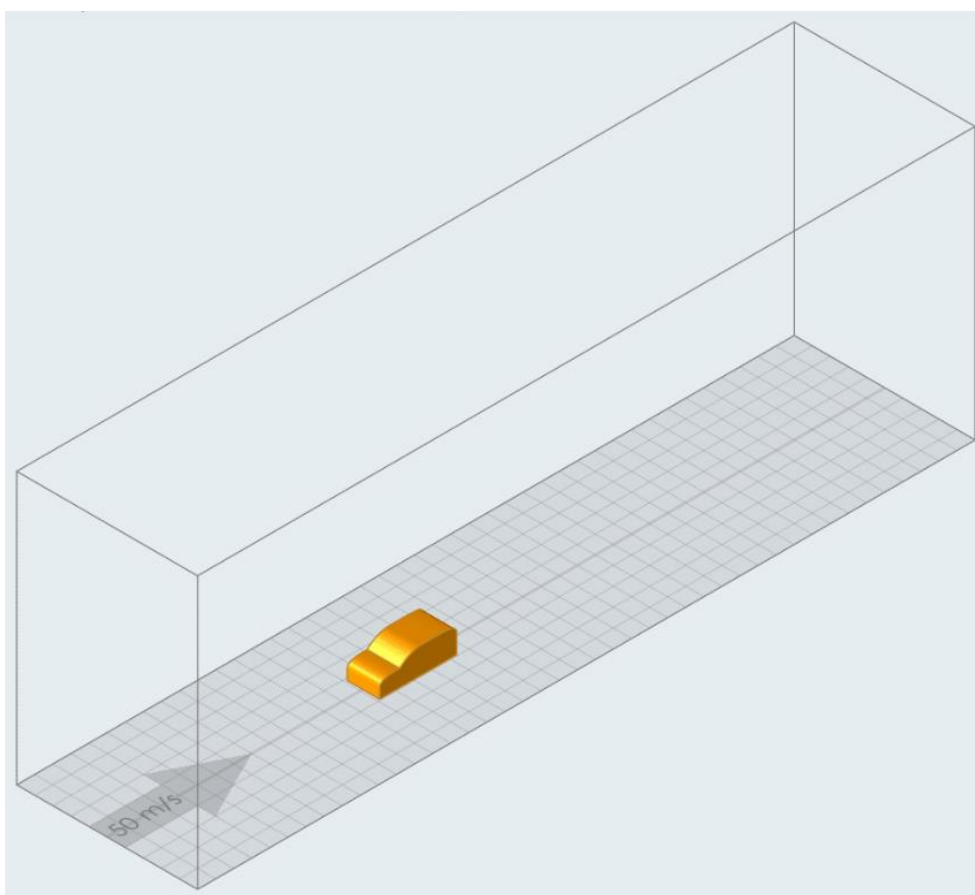


Slika 6.2. Postavke simulacije

Po završetku simulacije program napravi izvješće sa slikama i raznim podacima poput koeficijenta otpora i potiska koji su bitni u ovom slučaju. Nakon toga se provodi simulacija za brzinu od 50 m/s, sve postavke sa slike 6.2. su iste samo se brzina mijenja.

6.2. Simulacija opstrujavanja automobila sa retrovizorima

Postupak je isti kao i u prijašnjem primjeru, u virtualni tunel istih dimenzija se ubacuje model automobila sa retrovizorima (slika 6.3.).



Slika 6.3. Prikaz automobila s retrovizorima u tunelu

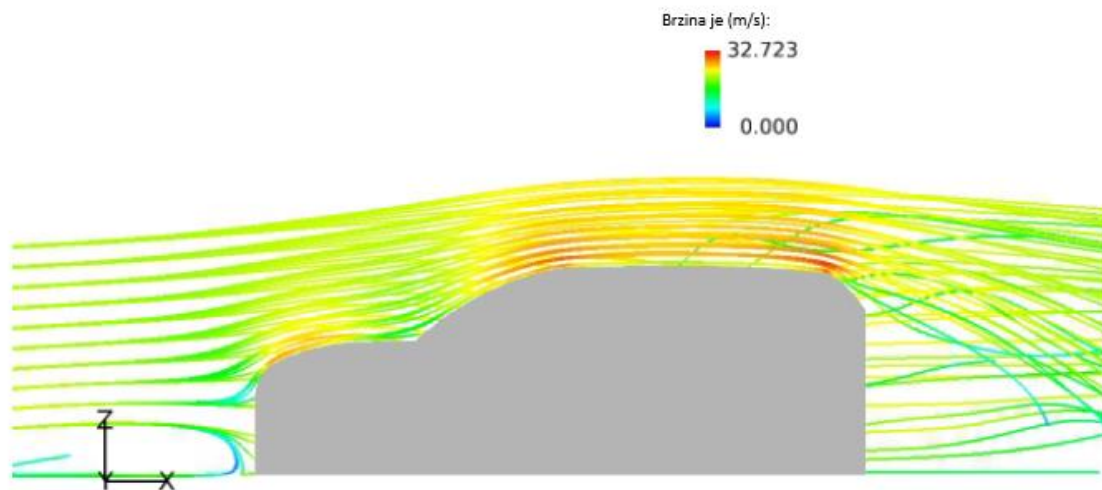
Parametri simulacije su isti kao i u prijašnjem slučaju (slika 6.2.). Ponovno se provode dvije simulacije jedna na brzini strujanja zraka od 22 m/s i druga na 50 m/s, ostali parametri poput broja iteracija se ne mijenjaju već ostaju 50 kao u prijašnjem slučaju (slika 6.2.).

7. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

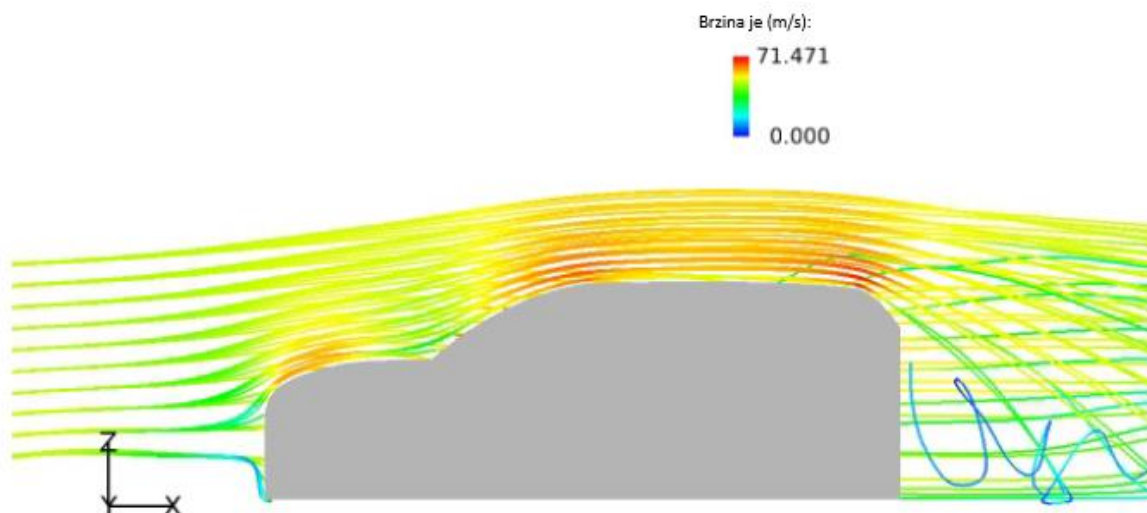
7.1. Podaci dobiveni za automobil bez retrovizora

Tablica 7.1. prikazuje podatke dobivene za automobil bez retrovizora

	Brzina automobila od 22 m/s (80 km/h)	Brzina automobila od 50 m/s (180 km/h)
Koeficijent otpora C_D	0.57265	0.53443
Koeficijent uzgona C_L	0.56027	0.35033



Slika 7.1. Prikaz strujnica zraka na automobilu bez retrovizora pri brzini od 22.22 m/s



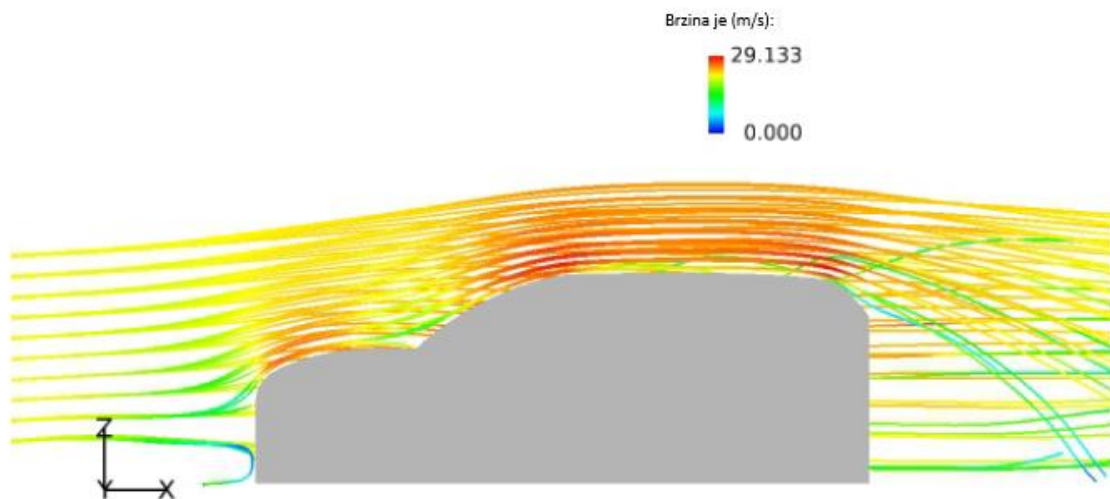
Slika 7.2. Prikaz strujnica zraka na automobilu bez retrovizora pri brzini od 50 m/s

Iz dobivenih rezultata i prikazanih slika 7.1. i 7.2. jasno je vidljivo da su koeficijenti otpora i uzgona pali na većoj brzini. Posebno se to odnosi na koeficijent uzgona koji je sa 0.56 pao na 0.35.. Također može se primijetiti koliko više turbulencija nastaje iza automobila pri brzini od 50 m/s u usporedbi sa strujnicama zraka na brzini od 22.22 m/s.

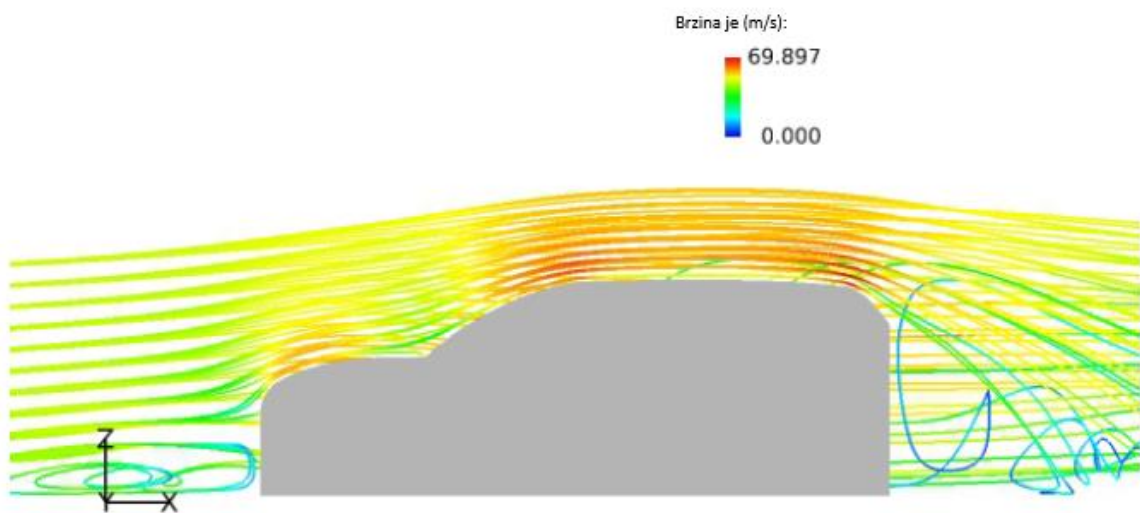
7.2. Podaci dobiveni za automobil s retrovizorima

Tablica 7.2. prikazuje podatke dobivene za automobil s retrovizorima

	Brzina automobila od 22 m/s (80 km/h)	Brzina automobila od 50 m/s (180 km/h)
Koeficijent otpora C_D	0.47446	0.53988
Koeficijent uzgona C_L	0.62337	0.85629

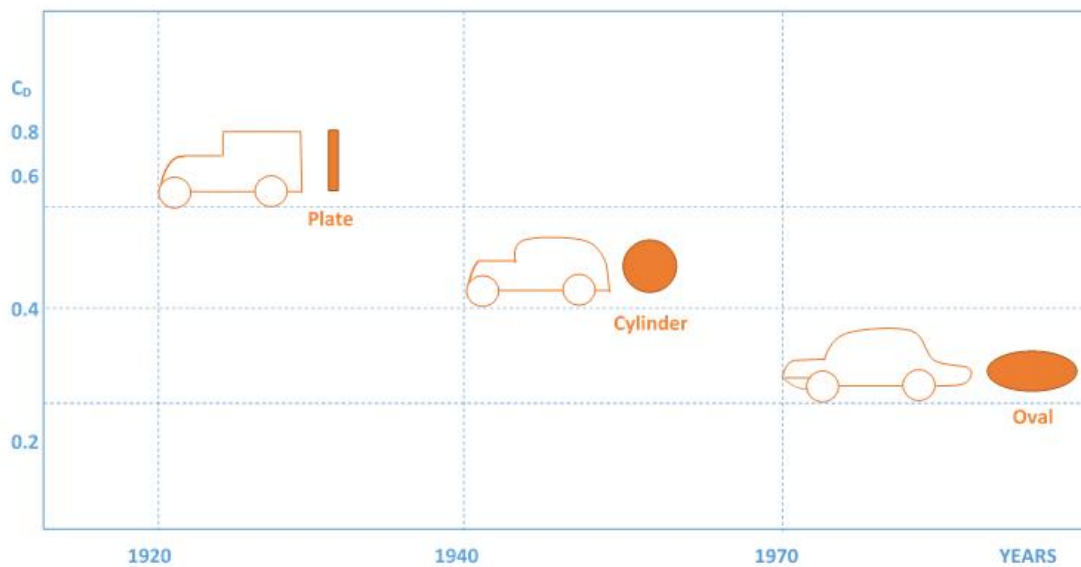


Slika 7.3. Prikaz strujnica zraka kod automobila s retrovizorima pri brzini od 22.22 m/s



Slika 7.4. Prikaz strujnica zraka kod automobila s retrovizorima pri brzini od 50 m/s

Analizom dobivenih podataka vidi se da je pri nižoj brzini koeficijent otpora kod automobila s retrovizorima manji nego kod automobila bez retrovizora, dok je za veće brzine približno jednak. Koeficijent uzgona i kod manje brzine i kod veće brzine je veći kod automobila s retrovizorima nego kod automobila bez.



Slika 7.5. Prikaz razvitka koeficijenta otpora u ovisnosti o obliku automobila [13]

Usporedbom modela automobila cilindričnog oblika sa slike 7.5 koji je u ovom slučaju najsličniji modelu automobila u ovom radu vidi se da koeficijent otpora ulazi u granice (0.4 – 0.6) koje su prikazane i na slici.

8. IZRAČUN POTROŠNJE GORIVA

Razlika u potrošnji goriva može se izračunati razlikom u potrebnoj efektivnoj snazi koja se troši za savladavanje dinamičkog otpora.

8.1. Izvod formule

Izvod započinje definiranjem formule snage (8.1):

$$P_e = Q_{\text{dov}} \cdot \eta_{\text{ef}} \quad (8.1)$$

P_e – snaga

Q_{dov} – dovedena toplina

η_{ef} – efektivna iskoristivost

U ovom slučaju efektivne iskoristivosti automobila sa retrovizorima i bez je približno jednaka pa se može zanemariti (8.2).

$$(\eta_{\text{ef}})_{\text{sa ret.}} \approx (\eta_{\text{ef}})_{\text{bez ret.}} \quad (8.2)$$

Postavlja se formula za dovedenu toplinu (8.3):

$$Q_{\text{dov}} = \dot{m}_g \cdot H_d \quad (8.3)$$

\dot{m}_g – maseni protok goriva

H_d – donja ogrjevna moć

Za donju ogrjevnju moć se uzima gorivo u ovisnosti s automobilom koji se koristi u ovom radu, u ovom slučaju radi se o dizelu. Također i za efektivnu iskoristivost se mora paziti dali je benzinskog ili diesel tipa.

Uvrštavanje formule za dovedenu toplinu u formulu za snagu (8.4):

$$P_e = \dot{m}_g \cdot H_d \cdot \eta_{ef} \quad (8.4)$$

Iz dobivene formule moguće je izračunati maseni protok goriva (8.5):

$$\dot{m}_g = \frac{P_e}{H_d \cdot \eta_{ef}} \quad (8.5)$$

Sada se može postaviti formula za razliku protoka (8.6):

$$\Delta \dot{m}_g = (\dot{m}_g)_{sa.ret.} - (\dot{m}_g)_{bez.ret.} \quad (8.6)$$

$(\dot{m}_g)_{sa.ret.}$ - protok goriva automobila sa retrovizorima

$(\dot{m}_g)_{bez.ret.}$ - protok goriva automobila bez retrovizora

Ubacivanjem formule za maseni protok goriva (8.5) u formulu za razliku protoka (8.6) dolazi formula (8.7):

$$\Delta \dot{m}_g = \left(\frac{P_e}{H_d \cdot \eta_{ef}} \right)_{sa ret.} - \left(\frac{P_e}{H_d \cdot \eta_{ef}} \right)_{bez ret.} \quad (8.7)$$

Daljnjim uređivanjem (8.8):

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{H_d \cdot \eta_{ef}} \cdot ((P_e)_{sa ret.} - (P_e)_{bez ret.}) \quad (8.8)$$

Snaga otpora se može izračunati preko formule (8.9):

$$P_e \approx P_{otpora} = F_{otpora} \cdot v \quad (8.9)$$

P_{otpora} – snaga otpora

F_{otpora} – sila otpora

v - brzina

Ostala snaga je približno jednaka kod automobila sa retrovizorima i bez tako da se može skratiti (8.10).

$$(P_{\text{ostalo}})_{\text{sa ret.}} \approx (P_{\text{ostalo}})_{\text{bez ret.}} \quad (8.10)$$

P_{ostalo} – ostala snaga

Daljnijim razvijanjem formule (8.8) se dobiva (8.11):

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{H_d \cdot \eta_{\text{ef}}} \cdot [(P_{\text{otpora}} + P_{\text{ostalo}})_{\text{sa ret.}} - (P_{\text{otpora}} + P_{\text{ostalo}})_{\text{bez ret.}}] \quad (8.11)$$

Ostala snaga P_{ostalo} se skraćuje u ovom slučaju, te ostaje formula (8.12):

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{H_d \cdot \eta_{\text{ef}}} \cdot [(P_{\text{otpora}})_{\text{sa ret.}} - (P_{\text{otpora}})_{\text{bez ret.}}] \quad (8.12)$$

Uvrštavanjem formule za snagu otpora (8.9) u formulu (8.12) dobiva se (8.13):

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{v}{H_d \cdot \eta_{\text{ef}}} \cdot [(F_{\text{otpora}})_{\text{sa ret.}} - (F_{\text{otpora}})_{\text{bez ret.}}] \quad (8.13)$$

Formula za silu otpora je (8.14):

$$F_{\text{otpora}} = \frac{C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad (8.14)$$

F_{otpora} – sila otpora

A – površina poprečnog presjeka

ρ – gustoća fluida

v – brzina

Uvrštavanjem formule za silu otpora (8.14) u formulu (8.13) dobiva se konačna formula za izračun razlike u masenoj potrošnji goriva (8.15):

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{H_d \cdot \eta_{ef}} \cdot [(C_D \cdot A)_{\text{sa ret.}} - (C_D \cdot A)_{\text{bez ret.}}] \quad (8.15)$$

8.2. Proračun

U formulu za izračun razlike u masenoj potrošnji goriva (8.15) pri brzini od 22.22 m/s (80km/h) uvrštavaju se podaci iz tablice 8.1.

Tablica 8.1. Prikazuje podatke koji služe za izračun razlike u masenoj potrošnji goriva

ρ	1.22 kg/m ³ (za zrak)
v	22.22 m/s
H_d	$42710 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 42710 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ (za dizel)
η_{ef}	35% = 0.35 (za dizelske motore)
$C_{D\text{sa ret.}}$	0.47446
$C_{D\text{bez ret.}}$	0.57265
a	1.8m (širina automobila)
b	1.6m (visina automobila)

Prvo je potrebno izračunati površinu automobila bez retrovizora (8.16):

$$A_1 = a \cdot b = 1.8 \text{ m} \cdot 1.6 \text{ m} = 2.7 \text{ m}^2 \quad (8.16)$$

Da bi se izračunala površina automobila sa retrovizorima potrebno je još zbrojiti površine retrovizora.

$$A_2 = A_1 + 2 \cdot (0.1 \text{ m} \cdot 0.064 \text{ m}) = 2.7 \text{ m}^2 + 0.0128 \text{ m}^2 = 2.7128 \text{ m}^2$$

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{H_d \cdot \eta_{ef}} \cdot [(C_D \cdot A_2)_{sa \text{ ret.}} - (C_D \cdot A_1)_{bez \text{ ret.}}]$$

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{1.22 \cdot 22.22^3}{42710 \cdot 10^3 \cdot 0.35} \cdot [(0.47446 \cdot 2.7128)_{sa \text{ ret.}} - (0.57265 \cdot 2.7)_{bez \text{ ret.}}]$$

$$\Delta \dot{m}_g = -1.16 \text{ kg/s}$$

Da bi se izračunala razlika masene potrošnje goriva za brzinu od 50 m/s (180 km/h) koristi se ista formula i podaci osim brzine i koeficijenta otpora.

$$v = 50 \text{ m/s}$$

$$C_{D_{sa \text{ ret.}}} = 0.53988$$

$$C_{D_{bez \text{ ret.}}} = 0.53443$$

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{H_d \cdot \eta_{ef}} \cdot [(C_D \cdot A_2)_{sa \text{ ret.}} - (C_D \cdot A_1)_{bez \text{ ret.}}]$$

$$\Delta \dot{m}_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{1.22 \cdot 50^3}{42710 \cdot 10^3 \cdot 0.35} \cdot [(0.53988 \cdot 2.7128)_{sa \text{ ret.}} - (0.53443 \cdot 2.7)_{bez \text{ ret.}}]$$

$$\Delta \dot{m}_g = 1.1 \text{ kg/s}$$

9. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se bavi utjecajem aerodinamike na potrošnju goriva u automobilu. Da bi došli do tog zaključka, prvo je potrebno zapitati se što je aerodinamika, koji su bitni elementi koji utječu na promjenu aerodinamike i kako se može izračunati. Obradene su i CFD simulacije koje služe za izračun i prikaz dinamike fluida, CFD simulacije su na kraju i iskorištene u ovom radu. Glavni dio ovog rada odnosio se na izradu modela automobila u programu Autodesk Inventor, izrade mreže u programu Hypermesh te u konačnici simulacija u programu Virtual Wind Tunnel. U ovom dijelu rada provedena je numerička simulacija na dva različita pojednostavljena modela automobila na različitim brzinama strujanja zraka. Provedene su po dvije simulacije za oba automobila, simulirani su uvjeti strujanja zraka od 22 m/s i 50 m/s, program je napravio 50 iteracija iz kojih je kasnije ispisao rezultate. Program ispiše mnogo raznih podataka i slika koje govore kako aerodinamika utječe na automobil, u ovom slučaju najveća pažnja je posvećena koeficijentu otpora jer je on ključan za daljnji izračun. Završni dio rada se bavi izvedenom formula koje su potrebne za izračun masene potrošnje goriva te konačno izračunom pomoću podataka dobivenih iz programa Virtual Wind Tunnel. Dobiveni rezultati kažu da pri brzini od 22 m/s automobil sa retrovizorima troši manje goriva nego automobil bez retrovizora, dok su stvari pri brzini od 50 m/s potpuno drugačije, gdje automobil bez retrovizora troši manje goriva od automobila sa retrovizorima. Rezultati su prilično male razlike, jako mala gustoća zraka i male površine retrovizora sigurno idu u korist tim rezultatima. Što se tiče toga da je potrošnja goriva manja kod automobila sa retrovizorima na manjoj brzini, može se povezati i jednim dijelom s nautikom gdje često tako male sitnice utječu na veliku promjenu u potrošnji goriva.

10.LITERATURA

- [1] <https://www.facebook.com/HistoricPhotographs/photos/a.220359594804465/2031598640347209/>
- [2] <https://autoportal.hr/tehnika/inovativni-automobili/saab-92-1949-prvi-automobil-sa-sigurnosnom-karoserijom/>
- [3] <https://radiosarajevo.ba/auto-moto/auto-moto-zanimljivosti/zbogom-vw-buba-prestala-proizvodnja-najpoznatijeg-automobila-u-hist>
- [4] https://hr.wikipedia.org/wiki/Audi_100/200/5000
- [5] <https://www.cnet.com/roadshow/news/2022-mercedes-benz-eqs-ev-most-aerodynamic-car/>
- [6] Luka Sopta, Lado Kranjčević, „Mehanika fluida kratka skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci“, Rijeka, 2003.
- [7] <https://ams.hr/aerodinamika-supersportskih-automobila/>
- [8] <https://pdfcoffee.com/laminarno-i-turbulentno-strujanje-protok-pdf-free.html>
- [9] https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/PRAKTIKUMI_1/PRAKTIKUMI/v15_-_otpori_oblika.pdf
- [10] <https://www.imaginationeering.com/applications-of-cfd-in-automotive-industries/>
- [11] <https://fetchcfd.com/view-project/1533->
- [12] <https://www.autoscout24.at/auto/vw/vw-golf/vw-golf-7/>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient#/media/File:Aerodynamic_Drag_of_Car.jpg

11. SAŽETAK

Tema ovog rada je utjecaj aerodinamike automobila na potrošnju goriva. Završni rad je podijeljen na teorijski dio i na praktični dio. Teorijski dio prati razvoj aerodinamike i automobila od samih početaka te kako su se oni zajedno razvijali kroz godine. Također dio rada se bavi CFD numeričkim simulacijama. Praktični dio se sastoji od izratka dva različita pojednostavljena modela automobila u programu Autodesk Inventor, izrade mreže u programu Hypermesh i simulacija u programu Virtual Wind Tunnel. Simulacije različitih modela automobila u različitim uvjetima dale su zanimljive rezultate. Koeficijent otpora smo kraju iskoristili i pomoću formula za potrošnju goriva izračunali razliku masene potrošnje goriva.

Ključne riječi: računalna dinamika fluida, aerodinamika automobila, numeričke simulacije, potrošnja goriva

12. SUMMARY

The topic of this paper is the „Effect of aerodynamics on car fuel economy“. The final paper is divided into theoretical part and practical part. Theoretical part follows development of aerodynamics and cars from the very beginning and their joint advancing through years. The second part of paper is focused on CFD numerical simulations. Practical part consists of two different simplified car models made in Autodesk Inventor, meshing in program Hypermesh and lastly simulations in program Virtual Wind Tunnel. Simulations of car models in different conditions gave interesting results. Results such as drag coefficient were used through formulas for fuel economics which gave us s difference between mass gas consumption.

Keywords: computer fluid dynamics, car aerodynamics, numerical simulation, gas consumption