

# Analiza strujanja oko pojednostavljenog modela modernog automobila tip 6

---

**Kovač, Robin**

**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:190:464752>

*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**

Prediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG  
MODELA MODERNOG AUTOMOBILA TIP 6**

Rijeka, rujan 2022.

Robin Kovač  
0069080900

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG  
MODELA MODERNOG AUTOMOBILA TIP 6**

Mentor : prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka,rujan 2022.

Robin Kovač  
0069080900

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 12. ožujka 2021.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računarstvo  
Predmet: Hidraulički strojevi  
Grana: 2.15.04 mehanika fluida

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

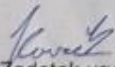
Pristupnik: **Robin Kovač (0069080900)**  
Studij: Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Zadatak: **Analiza strujanja oko pojednostavljenog modela modernog automobila tip 6  
/ Airflow analysis around a simplified modern car model type 6**


### Opis zadatka:

U okviru završnog rada potrebno je izraditi geometriju pojednostavljenog modela modernog automobila. Geometriju je nužno adekvatno umrežiti poštujući općeprihvaćena pravila. Potrebno je provesti numeričku analizu za različite uvjete strujanja te je nužno prikazati turbulentni tok nekompresibilna fluida. Za sve analizirane slučajeve potrebno je proračunate aerodinamičke karakteristike usporediti s dostupnim rezultatima iz literature.


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

  
Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:

  
Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Ja, Robin Kovač izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio pod punom odgovornošću, te izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada “Analiza strujanja oko pojednostavljenog modela modernog automobila tip 6“. Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno prilikom čega sam koristio navedenu literaturu i savjete od strane mentora prof. dr. sc. Zorana Čarije i asistentice Ivane Lučin, mag.ing.mech., te da u navedenom radu na nedozvoljeni način nisu korišteni dijelovi tuđih radova.

---

Robin Kovač

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Čariji i asistentici mag. ing. mech Ivani Lučin, koji su me savjetovali pri izradi ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojim prijateljima i prijateljicama te kolegama i kolegicama na potpori kroz cijelo školovanje, a posebno bi zahvalio Tonketu, Rinčotu, Moketu, Dobrom Starom i Mateici. Velika hvala mojim roditeljima koji su uvijek vjerovali u mene i moj uspjeh i kad ni sam nisam te što su me usmjerili u ovom pravcu u životu.

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. RAZVOJ AERODINAMIKE U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI .....                          | 2  |
| 2.1 Povijest razvoja aerodinamike automobila .....                               | 2  |
| 2.2 Primjena numeričkih simulacija .....   | 6  |
| 3. TEORIJSKE OSNOVE .....  | 10 |
| 3.1 Opis fluida.....   | 10 |
| 3.2 Tipovi strujanja .....   | 10 |
| 3.3 Podjela strujanja s obzirom na rubne uvjete strujanja .....                  | 12 |
| 3.4 Vanjsko strujanje oko automobila.....  | 12 |
| 3.5 Odvajanje struja .....   | 13 |
| 3.6 Modelsko ispitivanje i teorija sličnosti .....                               | 14 |
| 3.7 Ansys Fluent .....   | 15 |
| 4. ZADATAK–ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG MODELA AUTOMOBILA TIP 6 ..... | 17 |
| 4.1 Izrada geometrije automobila i domene.....                                   | 17 |
| 4.2 Izrada numeričke mreže .....   | 20 |
| 4.3 Definiranje rubnih uvjeta .....  | 21 |
| 4.4 Izrada simulacije .....  | 21 |
| 5. REZULTATI .....   | 26 |
| 5.1 Grafički prikaz rezultata.....   | 26 |
| 5.2 Koeficijent otpora zraka .....   | 29 |
| 6. USPOREDBA DOBIVENIH REZULTATA S PROMJENOM BRZINE .....                        | 30 |
| 6.1 Usporedba promjene kontura brzina s promjenom brzine .....                   | 30 |
| 6.2 Usporedba promjene vektora brzina s promjenom brzine .....                   | 32 |
| 6.3 Usporedba ovisnosti statičkog tlaka o promjeni brzine .....                  | 33 |
| 6.4 Usporedba ovisnosti dinamičkog tlaka o promjeni brzine .....                 | 34 |
| 6.5 Usporedba ovisnosti totalnog tlaka o promjeni brzine .....                   | 35 |
| 9. POPIS SLIKA.....  | 39 |
| 10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....   | 41 |

# 1. UVOD

Aerodinamika automobila je vrlo složeno područje koje se još uvijek razvija. To je uglavnom motivirano važnošću smanjenja otpora u odnosu na smanjenje poslovnih troškova, ali i s obzirom na optimizaciju konfiguracija cestovnih vozila kako bi se zadovoljili novi standardi sigurnosti. Počevši od nekih ranijih studija za učinkovitiji oblik za brže trkaće automobile, do potpuno optimizirane karoserije s vrlo niskom potrošnjom goriva, dizajn cestovnih vozila se neprestano razvijao, koristeći najmodernije matematičke modele i računalne opreme.

Radovi na optimizaciji i razvoju konceptnih automobila započeta je 20-ih godina 20. stoljeća. Koristeći osnovnu teoriju u dinamici fluida, ova vrsta analize stalno se unaprjeđivala, kako u fenomenološkim aspektima koji se uzimaju u obzir, tako i u mogućnosti uključivanja složenijih geometrija u proces simulacije. Postoje različita područja za interes s obzirom na njihov potencijal u globalnoj strukturi otpora za cestovna vozila. Ova vrsta analize otpora, pod utjecajem naprednijeg pristupa u aerodinamici, ističe glavni doprinos 3 globalne komponente: otpor oblika, otpor trenja i otpor vrtloga. Stoga alati koji će se koristiti za optimizaciju konfiguracije automobila moraju dokazati svoju sposobnost za ispravnu procjenu ove strukture, koristeći napredne modele uglavnom u turbulencijama i nestalnim fluidnim interakcijama.

Zadatak ovog završnog rada je izrada geometrije pojednostavljenog modela modernog automobila. Geometriju je potrebno provući kroz mrežu poštujući normirana pravila, te provesti numeričku analizu za različite uvjete strujanja. Potrebno je i prikazati turbulentni tok nekompresibilna fluida. Ovim radom se поближе prikazuje kako se te simulacije izrađuju i dobivaju rezultati. Završni rad je podijeljen na pet cjelina. U drugom poglavlju se upoznajemo s poviješću razvoja aerodinamike i primjene CFD-a u automobilskoj industriji. Zatim je opisana teorijska osnova fluida, a u četvrtom poglavlju je objašnjena izrada geometrije i numeričke mreže te izrada simulacije za pojednostavljeni model automobila u programu ANSYS. U posljednjem poglavlju donesen je smislen zaključak na temelju elaborata.



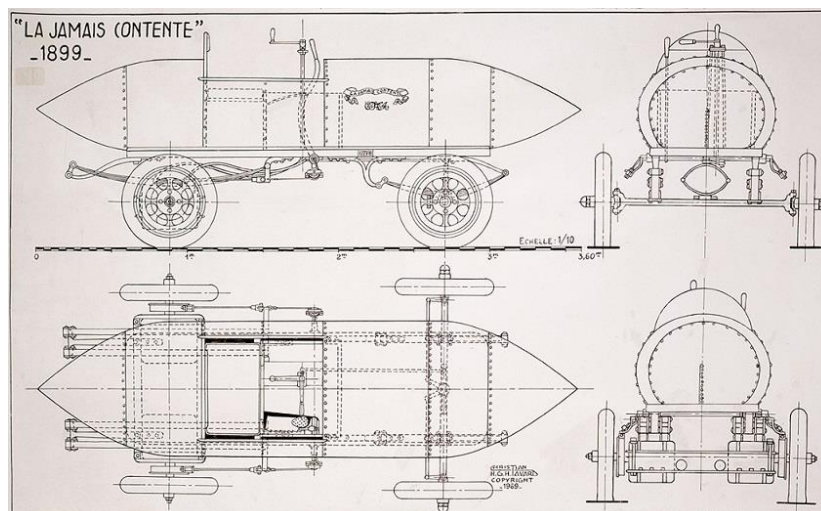
## 2. RAZVOJ AERODINAMIKE U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

### 2.1 Povijest razvoja aerodinamike automobila

Zrak je predstavljao najveću prepreku automobilskoj brzini i ekonomičnosti zbog savladavanja otpora zraka koji kao fluid on stvara. Bilo je potrebno povećati brzinu a smanjiti potrošnju goriva. Provođenje toga u praksi bila je sasvim druga priča. Sanjare, inženjere, trkače i poduzetnike privukao je potencijal za duboke dobitke koje nudi aerodinamika. Naponi da se to učini donijeli su neke od izvanrednijih automobila ikada napravljenih. Konačno smo stigli na mjesto gdje su visoko aerodinamični automobili normalna pojava, ali dolazak do tamo nije prošao bez značajnih promjena.

Porijeklo racionalizacije seže najmanje dvjesto godina unatrag. Sir George Cayley opisao je 1804. idealni aerodinamični oblik kao "vrlo duguljasti sferoid". A već 1865. Samuel Calthorpe patentirao je "vlak otporan na zrak", koji je izgledao daleko ispred svoga vremena.

Razvoj aerodinamike kao znanosti počinje negdje oko 1900. godine. Prvi automobil za koji se vjeruje da je napravljen pazeći na utjecaj aerodinamike je dizajnirao belgijski vozač utrka Camille Jenatzy 1899. godine. To je bio prvi automobil koji je probio brzinu od 100 km/h. *La Jamais Contente* („Nikad zadovoljan“ – slika 2.1 ). Camille je bio prvi čovjek koji je koristio načela aerodinamike. [1]



Slika 0.1 La Jamais Contene ( " Nikad zadovoljan " ) [1]

Sljedeći pothvat se dogodio u Talijanskoj tvornici automobila ALFA (kasnije Alfa Romeo) 1914. godine. Proizveden je prototip koji su nazvali „La Bomba“ koji je bio dizajniran u skladu s zakonima aerodinamike. Taj model je prikazan na slici 2.2 te je mogao razviti brzinu čak od 139 km/h. Model nažalost nije doživio tržišni uspjeh, što zbog prvog svjetskog rata i krize, što zbog neobičnog oblika samog automobila. [1]



*Slika 0.2 Alfa Romeo Castagna „La Bomba“ [1]*

Uspjeh u aerodinamičnom automobilu bio je njemački Rumpler “Tropfenwagen” (automobil-suza na slici 2.3) iz 1921. Za razliku od nepraktične i masovne Alfe Castagne, Rumpler je bio dramatično drugačiji zbog svog potpuno integriranog i originalnog dizajna i inženjeringa. Imao je W6 motor smješten u sredini i neovisni ovjes na četiri kotača koji je koristio zakretne osovine koje je Rumpler patentirao. Edmund Rumpler je među prvim ljudima koji se sjetio koristiti zračni tunel u svrhu ispitivanja aerodinamičnosti automobila. Zračni tunel je također bila ideja koja je nastala zbog toga što se prije bavio zrakoplovima, jer se do tada zračni tunel koristio samo u zrakoplovnoj industriji. Eksperiment je proveo na Tropfenwagenu i dobio iznenađujuće visoke rezultate. Tropfenwagen je testiran u VW-ovom zračnom tunelu 1979. i postigao je koeficijent otpora (Cd) od 0,28 što je otprilike tri puta manje od svih ostalih automobila toga vremena. Volkswagen je tek 1998. godine s Passatom uspio postići toliki stupanj (0,28). Današnji automobili imaju koeficijent otpora otprilike između 0.25 i 0.35. [2]

Koeficijent otpora se računa prema izrazu (2.1):

$$Cd = \frac{2F}{(\rho Av^2)} \quad (2.1)$$

gdje je:

- F sila otpora (N)
- $\rho$  gustoća fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- A površina poprečnog presjeka tijela (m<sup>2</sup>)
- v relativna brzina gibanja tijela u fluidu (m/s)



*Slika 0.3 Rumpler Tropfenwagen [2]*

Mađarski inženjer Paul Jaray je tijekom Prvog svjetskog rata dizajnirao poznati Zeppelin, a kasnije je primijenio svoje iskustvo i na autoindustriju. Razvio je mnoge modele koji su na raznim izložbama predstavljeni. Jaray je dizajnirao vlastite automobile počevši od Leya iz 1923., a potom je dizajnirao za Chrysler, Mercedes-Benz, Maybach, Apollo, Dixi, Audi, Adler, Jawa, Ford, Steyr i druge. [1]

Rani modeli su bili neobičnog dizajna, vrlo visoki i upitnih proporcija. Češka firma Tantra je 1921. godine počela proizvoditi automobil V570 (slika 2.4) i po uzoru na taj auto VW je

dizajnirao poznatu Bubu (slika 2.5). Proizvodila se od 1938. do 2003. u nekoliko generacija s izmjenama i gotovo 22 milijuna ih je izgrađeno u svijetu. Zalagao se za glatke linije (smooth lines) i prijelaze na automobilima. U svojem dizajnu je prakticirao da svjetla budu integrirana u automobil, koristio je zaobljena vjetrobranska stakla... Sve to su bili noviteti u dizajnu automobila koji se i danas koriste. [3 i 4]



*Slika 0.4 Tatra type 77 [3]*



*Slika 0.5 Volkswagen Bettle 1936. Prototype [4]*

Nakon toga je stagnirao razvoj aerodinamike. Nakon završetka II. svjetskog rata se razvoj aerodinamike skoro potpuno zaustavio. Goriva nije manjkalo, pa ako se i želio brži automobil jednostavno se ubacio motor s većom snagom. Jedina razlika u svijetu automobilizma što se tiče dizajna automobila bila je u tome što su se u Europi proizvodili mali, kockasti automobili zbog uskih ulica i problema s parkingom, dok su se u Americi proizvodili robusni i školjkasti automobili jer su im je glomaznost uvijek bila karakteristična. [1]

Kada je došlo do svjetske krize u opskrbi goriva, 70-ih godina 20.stoljeća, počela se ponovno razvijati. Počelo se više obraćati pažnju na to koliko automobili troše pa se nastojalo čim više smanjiti koeficijent otpora zraka. U toj fazi nije bilo nekih značajnih promjena, više se pazilo

na detalje. Mijenjali su oblike retrovizora, više ih prilagođavali automobilu i vozačima, dodavali su spojlere i difuzore, pa čak su mijenjali i dizajn kvaka i antena na automobilima. [1]



*Slika 0.6 Audi 100 [5]*

Sitnim promjenama oblika inženjeri su postigli značajne rezultate, ali su vrlo brzo dostigli limit u smanjenju koeficijenta otpora zraka. Morali su opet krenuti u ozbiljnije promjene, a to se odnosilo na oblik. Najvažnija inovacija u to vrijeme je bila da su počeli spuštati automobile što se može vidjeti na slici 2.6. Njemački proizvođač Audi je bio prvi koji je to krenuo raditi. Audi je na svome modelu Audi 100 prvi koristio i stakla bez okvira. [1]

## **2.2 Primjena numeričkih simulacija**

Napretkom tehnologije napreduju i očekivanja i želje potrošača. Uz neprestani tehnološki razvoj, inženjeri sada izrađuju automobile koji bi prije 30 godina bili neizvodljivi. Sve je to moguće pomoću računalno potpomognutog inženjeringa (CAE-Computer Aided Engineering). Uključujući visoko učinkovitu tehniku računalne dinamike fluida ili CFD (Computational fluid dynamics). [11]

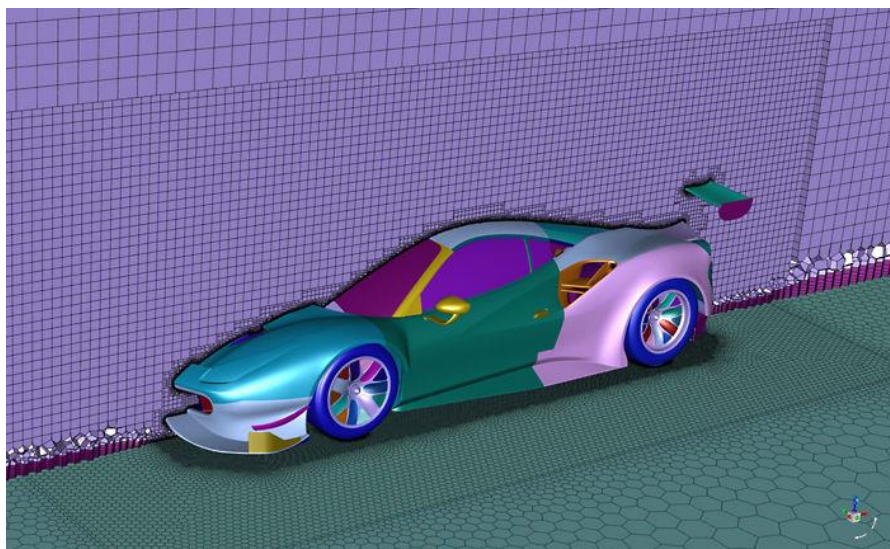
CFD se primjenjuje gdje god postoji potreba za simulaciju komponenata s plinom, tekućinom ili čak krutom tvari ili bilo kojom kombinacijom spomenutih agregatnih stanja. Korištenje metode CFD simulacije zaobilazimo potrebu za izvođenjem kompleksnih ručnih kalkulacija. Računalni program rješava problem pomoću svog algoritma i primjenjuje ih na bezbroj sićušnih elemenata jednake veličine. Svi ovi elementi međusobno su povezani složenim matematičkim jednadžbama. Navier-Stokesove jednadžbe, određene su parcijalne diferencijalne jednadžbe koje opisuju kretanje tvari viskoznih fluida, nazvane po francuskom inženjeru i fizičaru Claude-Louisu Navieru i anglo-irskom fizičaru i matematičaru Georgeu Gabrielu Stokesu. [11]



Daljnji razvoj i unapređivanje modernih automobila ne bi bilo moguće bez CFD tehnologije. CFD omogućuje predviđanja i olakšava istraživanja o protoku topline ili fluida koji okružuju komponentu. Sveobuhvatna primjena računalne tehnike dozvoljava stručnjacima : [11]

1. Optimizirati dizajn komponente ili spoja
2. Analizirati efekt okolnih uvjeta na bilo koju komponentu
3. Smanjiti troškove u proizvodnji automobila
4. Oblikovati izgled modela da smanji otpor i uzgon
5. Osigurati da se toplota ispuštena iz motora propisno regulira
6. Ispitivati protok fluida u raznim ventilima i usisnom razvodniku motora

Postoji bezbroj drugih CFD aplikacija koje su bitne pri modeliranju motornog vozila. Sposobnost izvođenja simulacija prije fizičke izrade štedi proizvođačima automobila novac na materijalima, dijelovima i vremenu razvojnog ciklusa. Na slici 2.7 prikazana je rešetkasta mreža površine vozila. Mreže, zajedno s mogućnostima matematičke analize, sredstvo su pomoću kojeg se CFD koristi za pružanje bitnih podataka koji se koriste za projektiranje automobilskih sustava za najbolje upravljanje njihovim okruženjem protoka zraka. [6]



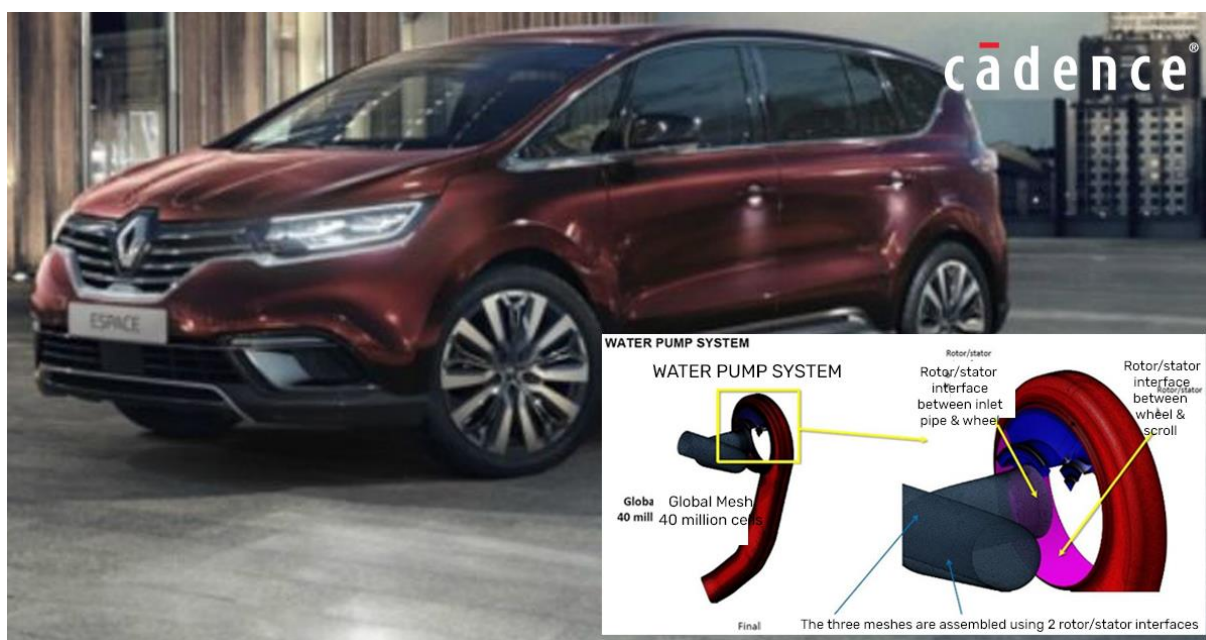
*Slika 0.7 Mozaična mreža Ferrari Competizioni GT [6]*

Kako smanjiti ugljični otisak automobilske industrije? Mobilnost dolazi s ogromnim emisijama CO<sub>2</sub>, a njihovo drastično smanjenje glavni je prioritet dizajnera današnjih vozila. Nije iznenađenje da simulacija može odigrati veliku ulogu u pronalaženju rješenja za ovaj važan izazov.

Simulacija može pružiti uvid, smanjiti vrijeme izlaska na tržište, poboljšati pouzdanost i smanjiti troškove inženjeringa za novi i optimizirani dizajn vozila. [9]

Renault je to jako dobro razumio. Kao odgovor na zahtjeve tržišta koji se brzo mijenjaju i pritiske na okoliš, oni guraju dizajn svake komponente svojih motora do maksimalne učinkovitosti i koriste računsku dinamiku fluida za optimizaciju pumpi, turbopunjača, ventilatora i više. Sve za postizanje maksimalne učinkovitosti, uz minimalnu potrošnju. [9]

„Alati za CFD simulaciju i optimizaciju trenutno su ključni igrači u Renaultu i automobilske industriji općenito. Odabrali smo Cadence CFD zbog njihovog dugog iskustva i stručnosti u CFD numeričkom polju, a posebno u rotirajućim strojevima. Odabrali smo ga zbog visoke kvalitete mreže i njihovih numeričkih rješenja koja daju vrlo precizne rezultate. Također jako cijenimo njihove alate za optimizaciju temeljene na parametriziranim CAD podacima,“ rekao je Alain Lefebvre, stručnjak za simulaciju fluidnih sustava u Renaultu. Primjer upotrebe CFD-a u Renaultu prikazan je na slici 2.8. [9]



Slika 0.8 Primjena CFD-a na vodenoj pumpi u Renault Escape [9]

Želite li kontrolirati protok tekućine? CFD djeluje u svim automobilske sektorima, od aerodinamike do obrade ispušnih plinova. Optimizacija i upravljanje stazama protoka u automobilu ključni su čimbenici za vozača i putnike. OEM i dobavljači već niz godina koriste

CFD kako bi podržali razvoj svojih proizvoda. Kontrola i razumijevanje procesa izgaranja u motorima daje mogućnost proizvođačima automobila da smanje potrošnju i poboljšaju učinkovitost. CFD podržava proizvođače motora u razvoju robusnog procesa simulacije koji izravno koriste projektni inženjeri. Ispušni vodovi integriraju sve složenije tehnologije (SCR, DPF...) Upravljanje toplinom, učinkovitost protoka (pad tlaka, ujednačenost protoka u filtrima...) i pozicioniranje komponenti (injektori, mikseri...) mogu se optimizirati zahvaljujući CFD simulacijama i stručnosti CFD-numerike. [13]

\*OEM – Original Equipment Manufacturer

\*SCR - Silicon Controlled Rectifier

\*DPF - Diesel Particulate Filter



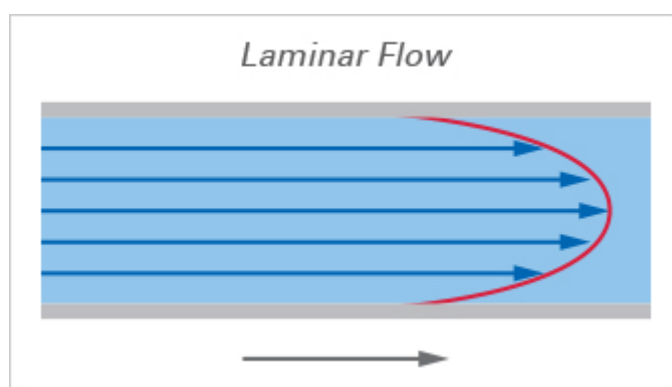
### 3. TEORIJSKE OSNOVE

#### 3.1 Opis fluida

Fluid je bilo koja tekućina ili plin ili općenito bilo koji materijal koji ne može podnijeti tangencijalnu silu ili silu smicanja kada miruje i koji prolazi kroz kontinuiranu promjenu oblika kada je podvrgnut takvom naprezanju. Ova kontinuirana i nepopravljiva promjena položaja jednog dijela materijala u odnosu na drugi dio kada je pod naprezanjem smicanja čini protok. Nasuprot tome, sile smicanja unutar elastičnog krutog tijela, koje se drži u uvijenom ili savijenom položaju, se održavaju; krutina ne prolazi kroz strujanje i može se vratiti u izvorni oblik. Komprimirane tekućine također se mogu vratiti u svoj izvorni oblik, ali dok se kompresija održava, sile unutar tekućine i između tekućine i spremnika nisu sile smicanja. Tekućina vrši vanjski pritisak, koji se naziva hidrostatski tlak, koji je posvuda okomit na površine spremnika. [7]

#### 3.2 Tipovi strujanja

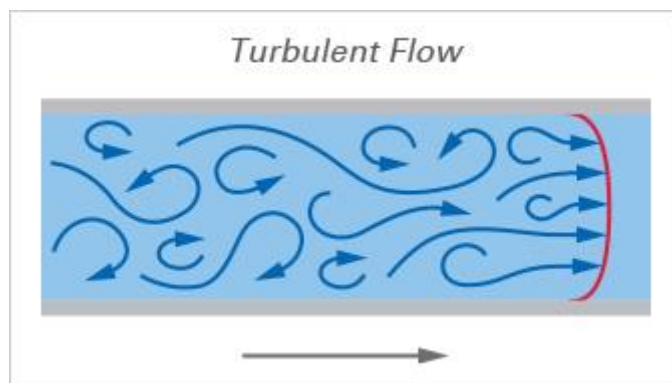
Kod analize aerodinamike automobila bitna su dva osnovna tipa strujanja: laminarno strujanje i turbulentno strujanje. Laminarno strujanje je vrsta protoka tekućine (plina ili tekućine) u kojoj tekućina putuje glatko ili pravilnim stazama. U laminarnom strujanju brzina, tlak i druga svojstva protoka u svakoj točki tekućine ostaju konstantna. Može se smatrati da se laminarni tok preko horizontalne površine sastoji od tankih slojeva ili lamina, koji su međusobno paralelni. Tekućina u kontaktu s horizontalnom površinom miruje, ali svi ostali slojevi klize jedan preko drugog. (slika 3.1). [7]



Slika 0.1 Laminarno strujanje [7]

Turbulentno strujanje je režim strujanja karakteriziran kaotičnim promjenama svojstava. To uključuje brzu promjenu tlaka i brzine protoka u prostoru i vremenu. Za razliku od laminarnog protoka, tekućina više ne putuje u slojevima i miješanje kroz cijev je vrlo učinkovito.

Kod analize realnih problema može se zaključiti da je većina strujanja turbulentna, ovakvo strujanje nije moguće odrediti analitički već se određuje numerički. (slika 3.2).



Slika 0.2 Turbulentno strujanje [7]

Reynoldsov broj je bezdimenzijska značajka koja služi kao kriterij prema kojemu se može utvrditi hoće li u danim okolnostima nastupiti laminarno ili turbulentno strujanje fluida. Ako Reynoldsov broj ne prelazi 2 300, onda je strujanje laminarno dok za vrijednosti veće od 40 000 strujanje će biti skroz turbulentno.

Reynoldsov broj se računa prema izrazu (3.1):

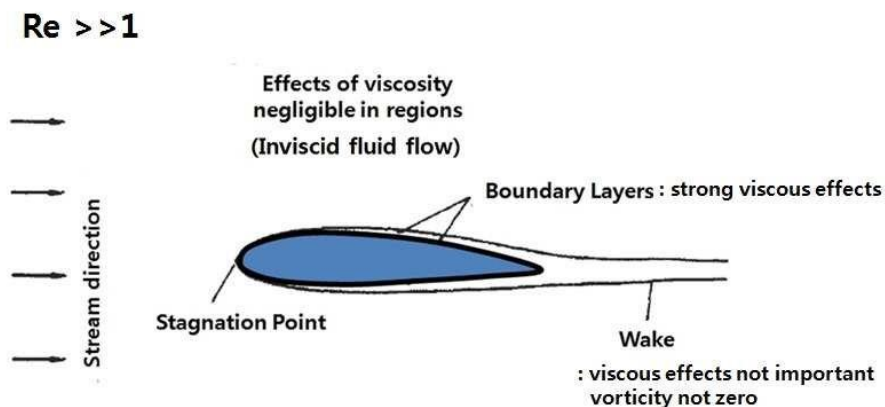
$$Re = (\rho v l)/\eta = (v l)/u \quad (3.1)$$

gdje je :

- $\rho$       gustoća fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- $u$       kinematička viskoznost fluida (m<sup>2</sup>/s)
- $l$       odabrana duljina (m)
- $v$       najveća brzina strujanja (m/s)

### 3.3 Podjela strujanja s obzirom na rubne uvjete strujanja

Vrste strujanja se dijele s obzirom na rubne uvjete strujanja pa tako postoje vanjska strujanja i unutarnja strujanja. Vanjsko strujanje je kada fluid optječe oko stijenke pri čemu je jedan od rubova stjenka. Unutarnje strujanje je protjecanje fluida cijevima ili kanalima gdje su dva ruba područja strujanja stijenke.



Slika 0.3 Optjecanje tijela

Kod optjecanja tijela strujanje fluida dijeli se u dva glavna sloja:

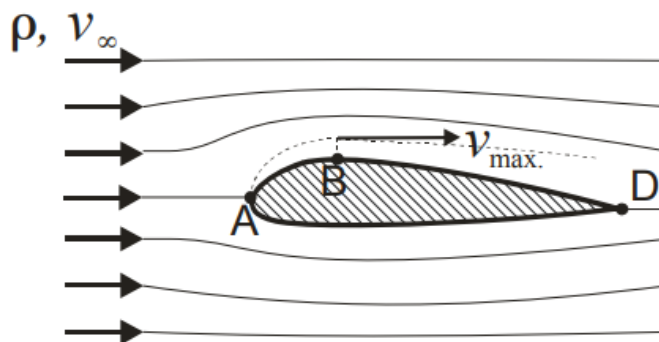
1. Granični sloj – područje koje se nalazi blizu stijenki i gdje su posmični utjecaji bitni
2. Vanjski sloj – područje u kojem je utjecaj trenja stijenki nebitan

### 3.4 Vanjsko strujanje oko automobila

Na automobil koji se kreće određenom brzinom kroz zrak utječu posmični faktori u graničnom sloju koji se nalazi u području uz samu stijenku. Udaljavanjem od stijenki efekt postepeno otpada sve dok se potpuno zanemari. Reynoldsov broj ovisi o duljini automobila, kinematičkoj viskoznosti fluida i brzini vozila te nam govori o vrsti strujanja

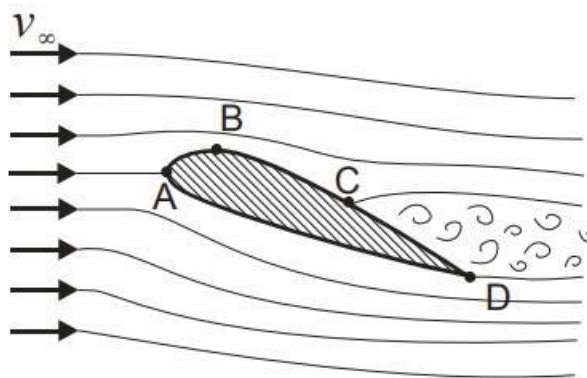
### 3.5 Odvajanje struja

Odvajanje struja je trenutak u kojem strujnice zraka više ne prate oblik stijenke. U točki A je brzina gibanja jednaka nuli, a u točki B brzina strujanja je maksimalna. Gradacijski od točke A do točke B dolazi do povećanja brzine strujanja dok se tlak smanjuje (slika 3.4.)



Slika 0.4 Nastrujavanje uz profil lopatice

Povećanjem ulaznog kuta profila dolazi do odvajanja struja pri čemu se smanjuje kinetička energija čestica fluida jer se i brzina strujanja smanjuje. Sila tlaka između točaka B i D je u suprotna smjeru gibanja. Od točke C u kojoj se pojavljuje odstrujavanje pa sve do točke D tlak je niži pa sila otpora oblika veća (slika 3.5.)



Slika 0.5 Odstujavanje nakon profila

Na stražnjem dijelu automobila dolazi do pojave odstrujavanja zraka. Upravo zbog pojave niskog tlaka koji djeluje na velikoj površini i turbulentnog strujanja dolazi do pojave otpora kretanja automobila (eng. *Drag*). Da bi se izbjeglo odvajanje struja na stražnjem dijelu automobila potrebno zagladiti prijelaz krova automobila prema prtljažniku da bude što glađi moguće. Tipično

odstrujavanje se vidi na slici 3.6. Općenito bi prijelazi između različitih površina automobilske karoserije trebali biti što uglađeniji kako bi se smanjio efekt pojave odvajanja struja. Otpor kretanja automobila koči performanse vozila, povećava potrošnju goriva, pojavu buke, smanjuje njegovu stabilnost, ali i stabilnost vozila koji se nalaze jedan iza drugoga.



*Slika 0.6 Područje odstrujavanje kod automobila [12]*

### **3.6 Modelsko ispitivanje i teorija sličnosti**

Modelska ispitivanja se koriste zbog složenosti komponenti koje se žele ispitivati. Modeli automobila, turbostrojeva i pogona mogu biti umanjeni ili uvećani. Koncept kao na slici 3.7 je proporcionalan stvarnoj izvedbi. Zahvaljujući teoriji sličnosti moguće je rezultate primijeniti na stvarnoj izvedbi kad bi se postigla mehanička sličnost. [8]

Prednosti modelskih ispitivanja su sljedeće:

1. Vršenje testiranja prije prave izvedbe
2. Jeftinije je napraviti model i sva testiranja na njemu
3. Baza podataka o ponašanju modela pri različitim uvjetima
4. Uočavanje nepravilnosti koje nisu bile planirane u stvarnoj izvedbi



*Slika 0.7 Ispitivanje modela u zračnom tunelu [8]*

### **3.7 Ansys Fluent**

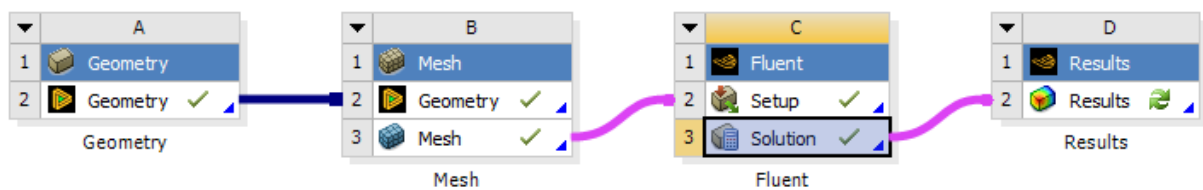
Ansys razvija i prodaje računalni program za simulaciju proizvoda kroz razne različite uvjete. To je softver za analizu konačnih elemenata koji se koriste za simulaciju računalnih modela, elektronike i/ili komponenti stroja za analizu, tvrdoće, žilavosti, elastičnosti, utjecaj temperature, elektromagnetizma, protoka fluida i drugih faktora. Ansys se koristi za utvrđivanje kako će proizvod funkcionirati s različitim specifikacijama i to sve na 3D modelu bez potrebe proizvodnje realnog proizvoda. [15]

Ansys Workbench (slika 3.8) je jedan od najčešće korištenih sustava, koji je ujedno i jedan od glavnih proizvoda tvrtke. Korisnicima Ansysa je omogućeno sastavljati veće strukture od malih komponenti od kojih se svaka pojedinačno modelira te zatim testira. Korisnik može započeti od definiranja geometrije, a zatim dodavanjem varijabli kao što su tlak, temperatura, masa i druga fizikalna svojstva. Glavna zadaća softvera Ansys je da simulira i analizira kretanja, zamore materijala, lomove, protok tekućine, raspodjelu temperature, elektromagnetsku učinkovitost i druge utjecaje kroz neki vremenski period.

Ansys također razvija softver za upravljanje podacima i backup, akademsko istraživanje i nastavu. Softver Ansys prodaje se na temelju godišnje pretplate Ansys sadrži alat za dinamiku fluida, a s njim u paketu dolaze alati za modeliranje i simulaciju:

1. Elektromagnetike – simulacija radiofrekvencija izmjene topline
2. Poluvodiča
3. Optike – dizajniranje leća i laserskih uređaja
4. Strukturna analiza
5. Modeliranje sustava

Ansys Fluent je vodeći softver za simulaciju fluida u industriji poznat po svojim naprednim mogućnostima fizičkog modeliranja i vodećoj točnosti u industriji. Ansys Fluent daje vam više vremena za inovacije i optimizaciju performansi proizvoda. Vjerujte svojim rezultatima simulacije pomoću softvera koji je opsežno provjeren u širokom rasponu aplikacija. S Ansys Fluentom možete kreirati napredne fizičke modele i analizirati razne fenomene tekućina, sve to u prilagodljivom i intuitivnom prostoru.



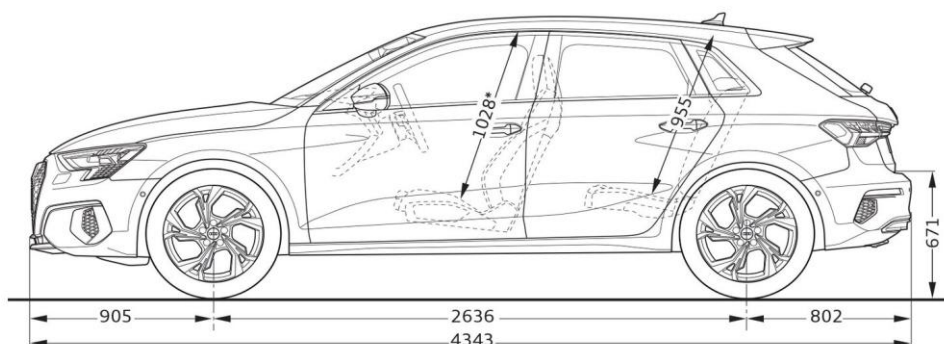
*Slika 0.8 Ansys Workbench*

## 4. ZADATAK–ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG MODELA AUTOMOBILA TIP 6

### 4.1 Izrada geometrije automobila i domene

U programu Ansys Fluent napravljena je simulacija strujanja oko pojednostavljenog modela automobila. Koristili smo se studentskom verzijom navedenog programa koja je limitirana na 512 000 elemenata, ali to nije ometalo izradu ovog završnog rada.

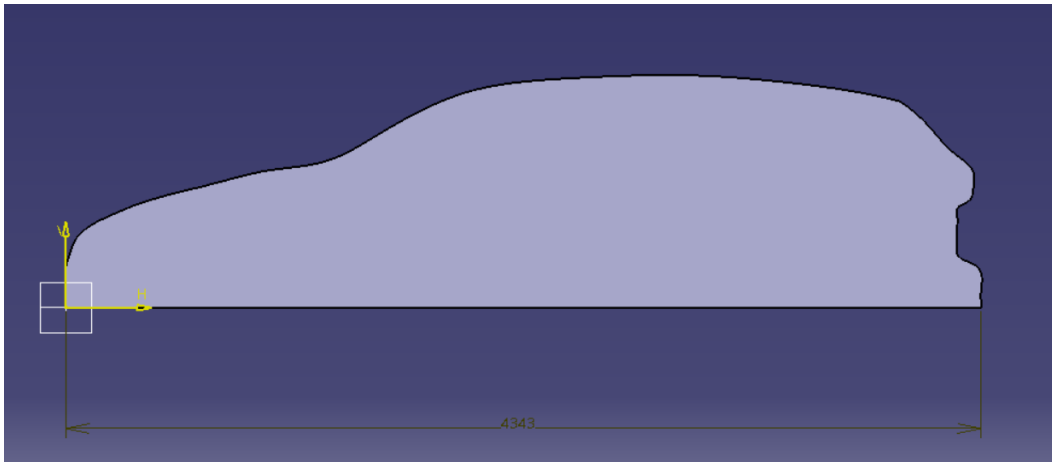
Izradu simulacije započinjemo modeliranjem geometrije pojednostavljenog modela automobila koji je napravljen u programu Catia V5 te je nakon toga umetnuta u Ansys. Geometriju automobila smo mogli proizvoljno odabrati. Kao smjernica za gabarite automobila korišten je jedan Audi A3 Sportback iz 2020.godine.



Slika 0.1 Audi A3 Sportback 2020 [14]

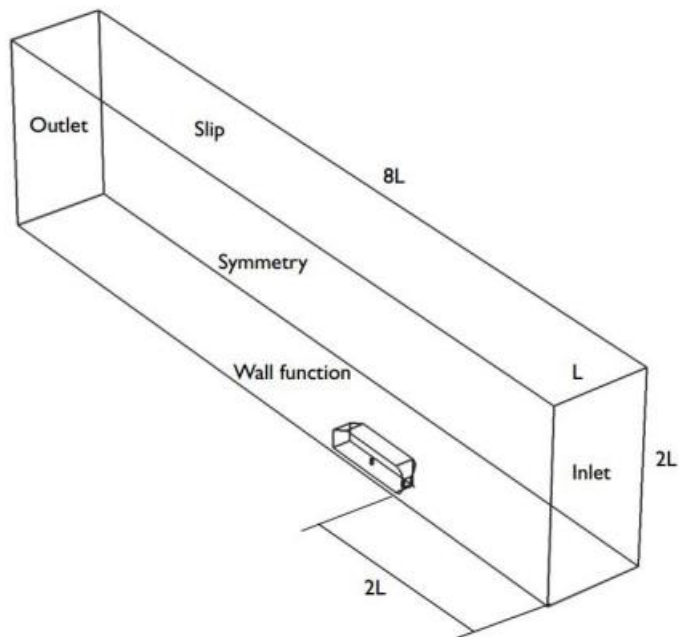
Na slici 4.1 je prikazan predložak stvarnog automobila prema kojem je izrađena pojednostavljena geometrija automobila, a na slici 4.2 je prikazana pojednostavljena geometrija automobila. Pojednostavljeni model prati samo liniju i dimenzije stvarnog bez kotača, bočnih retrovizora, spojlera, antene.





Slika 0.2 Pojednostavljeni model automobila u Catia V5

Možemo vidjeti da pojednostavljeni model izgleda kao da je napravljen iz jednoga komada pošto uopće nema prijelaza između elemenata. Zadnji dio automobila je minimaliziran iako tu ima više prijelaza ( branik, svjetla, spojler...). Prednji dio automobila je također minimaliziran. Nakon što smo oblikovali pojednostavljeni model slijedi izrada domene koja predstavlja područje u koje smještamo automobil i prostor u kojem ćemo pratiti kako kretanje automobila utječe. Domenu izrađujemo prema slici 4.3:

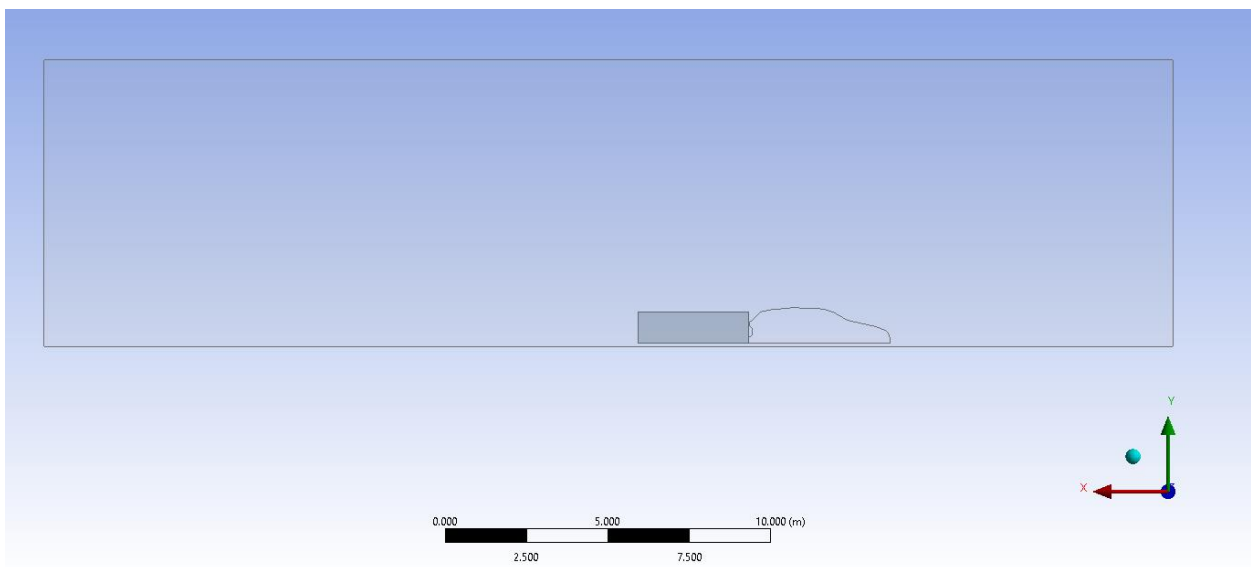


Slika 0.3 Smjernica za izradu domene

Domena je pravokutnog oblika sa duljinom koja je jednaka 8 duljina vozila (slika 4.4). Ispred automobila domena ima domet dvije duljine automobila a iza vozila je područje domene gdje se zbiva više promjena pa se uzima pet duljina automobila.

Nakon što smo ubacili model u program i smjestili ga u domenu pomoću naredbe Boolean oduzimamo automobil od domene.

Potom napravimo područje koje će nam utjecati na rezultate simulacije jer je to područje u kojem će biti najviše turbulencija. To područje smjestimo iza automobila u dimenzijama skoro jednakim modelu.



Slika 0.4 Domena automobila u Design Modeleru

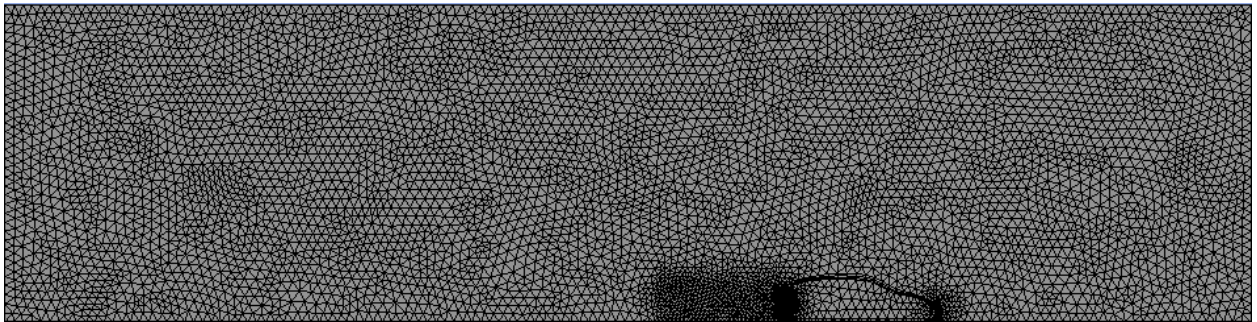
U Design Modeleru preostaje jedino još za novo kreirano područje pod Operation staviti Add Frozen (slika 4.5 ).

| Details View                             |               |
|--|---------------|
| [-] Details of Extrude6                  |               |
| Extrude                                  | Extrude6      |
| Geometry                                 | Sketch2       |
| Operation                                | Add Frozen    |
| Direction Vector                         | None (Normal) |
| Direction                                | Normal        |
| Extent Type                              | Fixed         |
| <input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0) | 0.89 m        |
| As Thin/Surface?                         | No            |
| Merge Topology?                          | Yes           |
| [-] Geometry Selection: 1                |               |
| Sketch                                   | Sketch2       |

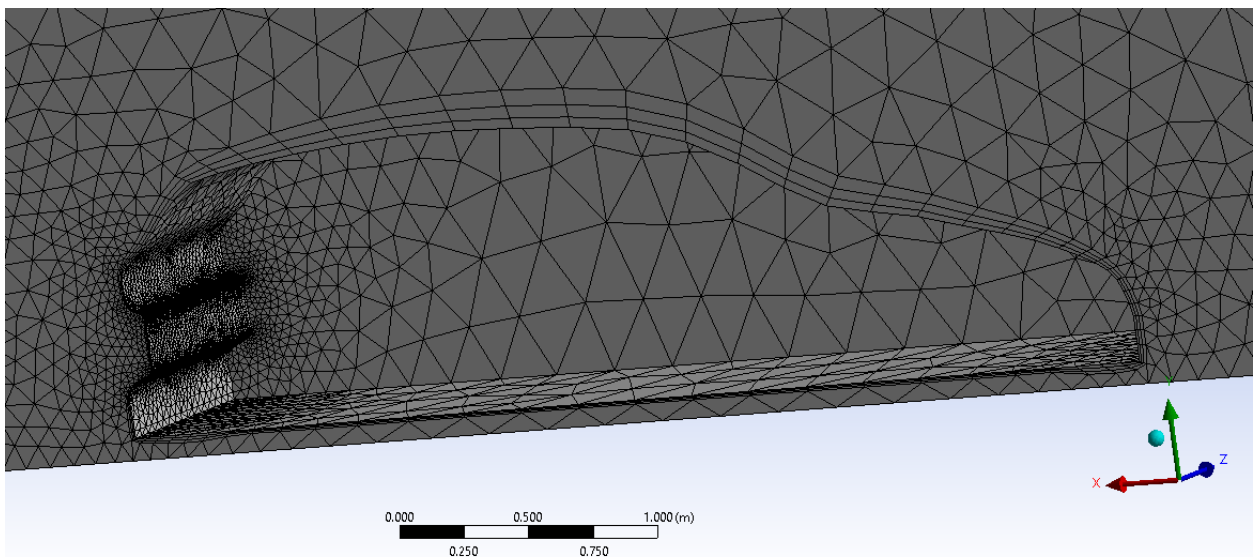
Slika 0.5 Naredba Add Frozen

## 4.2 Izrada numeričke mreže

Ansys pruža automatizirani, inteligentni softver za opću namjenu visokih performansi koji proizvodi najprikladniju mrežu za točna, učinkovita multifizička rješenja — od jednostavnog, automatskog umrežavanja do visoko izrađene mreže. Pametne zadane postavke ugrađene su u softver kako bi spajanje postalo bezbolan i intuitivan zadatak, isporučujući potrebnu rezoluciju za ispravno hvatanje gradijenata rješenja za pouzdane rezultate. Za rezultate su nam bitna prikazana ugušćenja ispred automobila i iza automobila gdje dolazi do vrtloženja struja zraka. Slika 4.6 prikazuje numeričku mrežu cijele domene, a na slici 4.7 se vide detalji zgušćenja numeričke mreže.



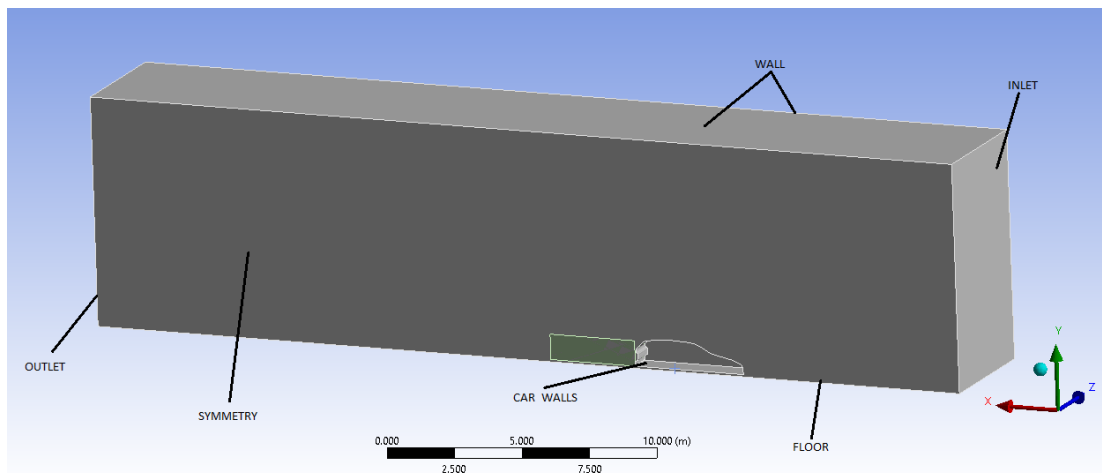
*Slika 0.6 Prikaz numeričke mreže cijele domene*



*Slika 0.7 Područje zgušćenja numeričke mreže*

### 4.3 Definiranje rubnih uvjeta

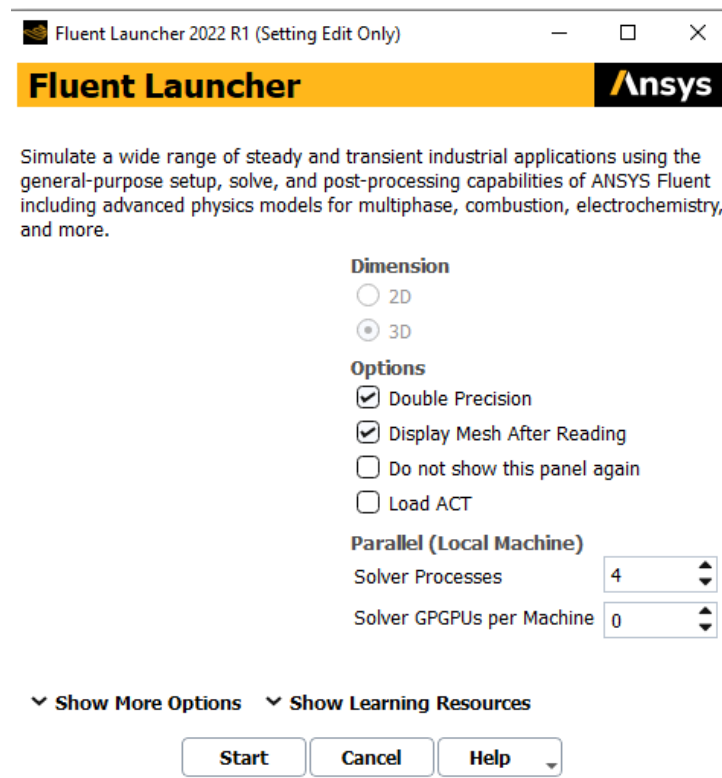
Nakon izrade numeričke mreže potrebno je definirati rubne uvjete. Rubni uvjet pod nazivom Inlet je definiran na prednjoj plohi što možemo vidjeti sa slike 4.8. Na Inletu je definirana brzina nastrujanja. Nakon toga potrebno je postaviti i izlaz fluida iz domene pod nazivom Outlet. Izlaz fluida definiramo da sustav bude u ravnožeži tj. mora biti zadovoljen uvjet zakona očuvanja mase. Na toj izlaznoj stražnjoj plohi može se definirati tlak koji je jednak atmosferskom tlaku. Korištena je polovica automobila zbog pojednostavljenja pa je na označenu plohu postavljen rubni uvjet Symmetry. Na plohe automobila i na donju plohu postavljen no slip uvjet, a na bočnu i gornju plohu slip uvjet.



Slika 0.8 Rubni uvjet

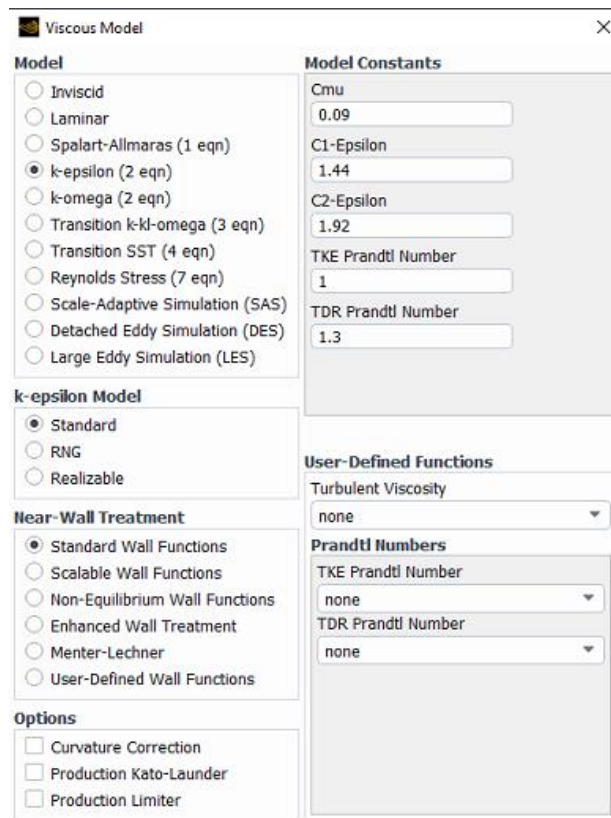
### 4.4 Izrada simulacije

Simulaciju pokrećemo trećim korakom u programu zvanom Fluent. Prilikom otvaranja Fluent-a moramo postaviti opcije za pokretanje simulacije u Fluent Launcheru (slika 4.9). Uključujemo Double Precision kako bi dobili što točnija rješenja. Solver Processes određuje s koliko jezgri će raditi. Kod studentske verzije su 4 jezgre maksimum, a u ovom radu će se koristiti sve 4 jezgre. Pokreće se Fluent i sada namještamo daljne postavke za simulaciju.



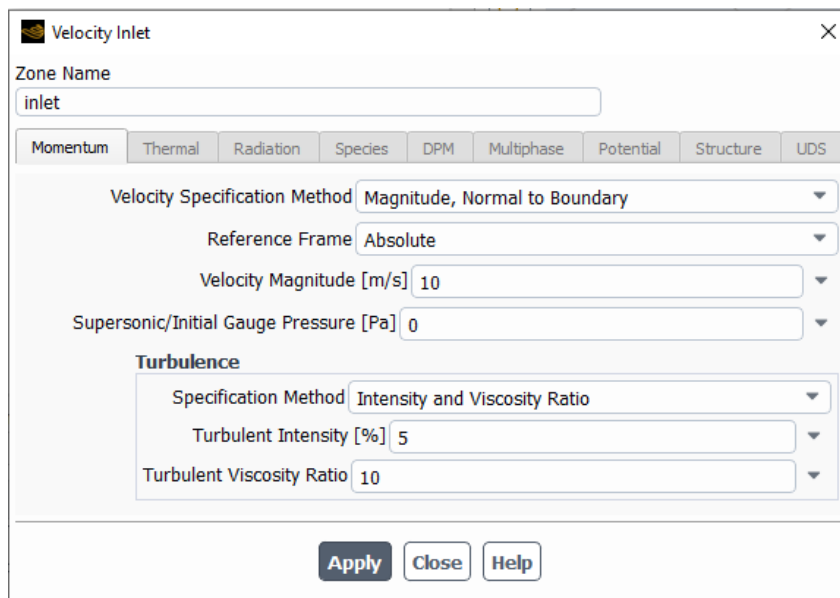
Slika 0.9 Iskočni prozor pri pokretanju Fluent

Prvo treba podesiti rješavač s kojim želimo raditi. U ovom slučaju odabran je k-epsilon rješavač koji je nešto jednostavniji od k-omega jer zahtjeva manje kvalitetniju numeričku mrežu, ali daje približno precizne rezultate (slika 4.10).



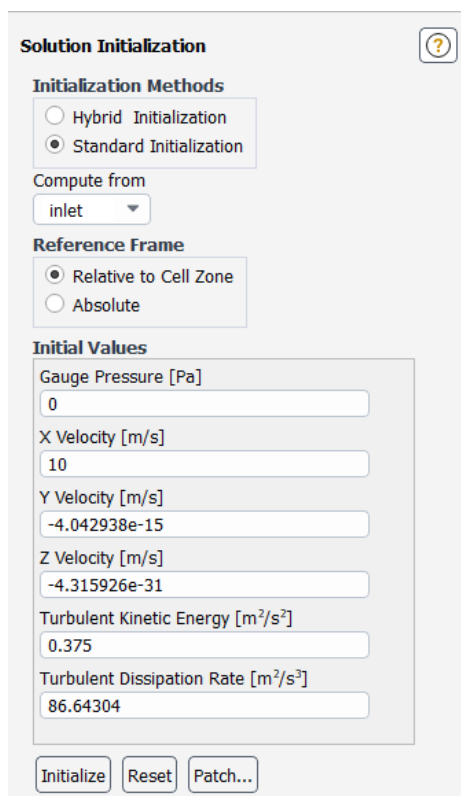
Slika 0.10 Izbor modela rješavača

Nakon toga treba podesiti da je fluid zrak i treba prilagoditi parametre na rubnim uvjetima. Fluent je automatski prepoznao rubne uvjete koje smo zadali i sada mijenjamo brzine strujanja. Na Inletu postavimo ulaznu brzinu (slika 4.11), koja je u ovom slučaju postavljena na 10 m/s, što je jednako 36 km/h. Na Outletu ne trebamo ništa mijenjati jer na izlazu iz domene ne trebamo ništa postavljati, samo provjeriti ako je definiran atmosferski tlak na tome mjestu. Kod ostalih rubnih uvjeta trebamo samo paziti gdje na kojem području imamo trenje, a na kojem ne. Tako na rubnom uvjetu Car koji predstavlja automobil i na rubnom uvjetu koji predstavlja podlogu Floor po kojoj se automobil kreće imaju trenje, to znači da predstavljaju prepreku gibanju fluida, a rubni uvjet koji predstavlja područje iznad automobila nema trenja. Kada su postavljeni rubni uvjeti slijedi inicijalizacija.



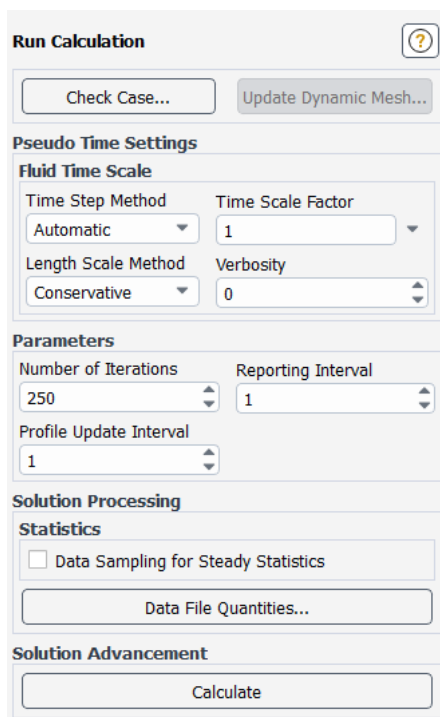
Slika 0.11 Rubni uvjeti za Inlet

Pod Solution Initialization odabiremo standardnu inicijalizaciju i postavljamo da se podaci preuzimaju s inleta. Na slici 4.12 možemo vidjeti da nam je brzina po Y osi jednaka 20 m/s, kao što smo stavili kada smo defnirali rubne uvjete. Ostale podatke nam Fluent sam izračuna.



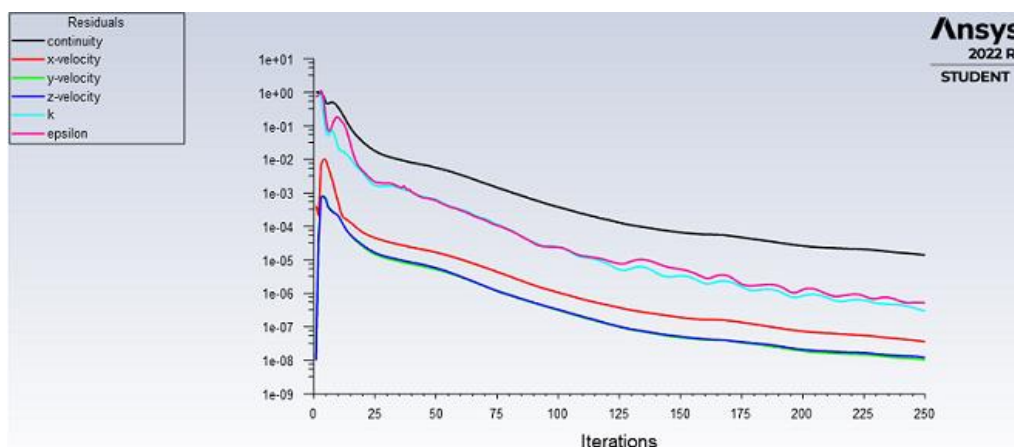
Slika 0.12 Postavke inicijalizacije

Nakon što smo postavili rubne uvjete moramo provesti iteracije da dobijemo čim točnije rješenje. Što više iteracija odaberemo, rješenje će biti točnije. Na slici 4.13 je vidljivo da je korišteno 250 iteracija. To bi trebalo prikazati rezultate s dovoljnom točnošću za potrebe ovog završnog rada.



Slika 0.13 Postavke kalkulacije

Na slici 4.14 je prikazan graf iteracija koji nam pokazuje kako se s svakom iteracijom približavamo točnijem rješenju. Bitno je da graf padajući, tj. da se približava x osi.



Slika 0.14 Graf iteracija



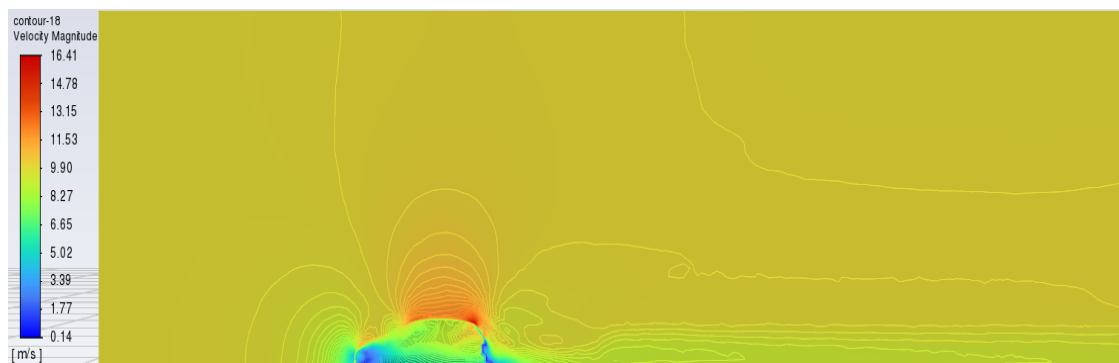
## 5. REZULTATI

### 5.1 Grafički prikaz rezultata

Rezultate smo prikazali pomoću kontura i linija koje predstavljaju područja različitih brzina i tlakova. Iz grafičkog prikaza možemo pomoću boja odrediti vrijednosti dobivenih rezultata.

Na slici 5.1 možemo primjetiti koliki je iznos brzine na svakom pojedinom dijelu automobila. Najveća brzina je na prednjem dijelu haube automobila i uz čitavu površinu krova automobila, a najmanja brzina je na području uz prednji branik automobila i na području iza automobila, gdje je brzina skoro 0 m/s. Zanimljivo je primijetiti da za ulaznu brzinu od 10 m/s na automobilu dobijemo brzine preko 12 m/s. Nakon iznosa brzina, proučiti ćemo vektore brzina i tlakove u domeni automobila. Najčešće promatramo statički, dinamički i totalni tlak.

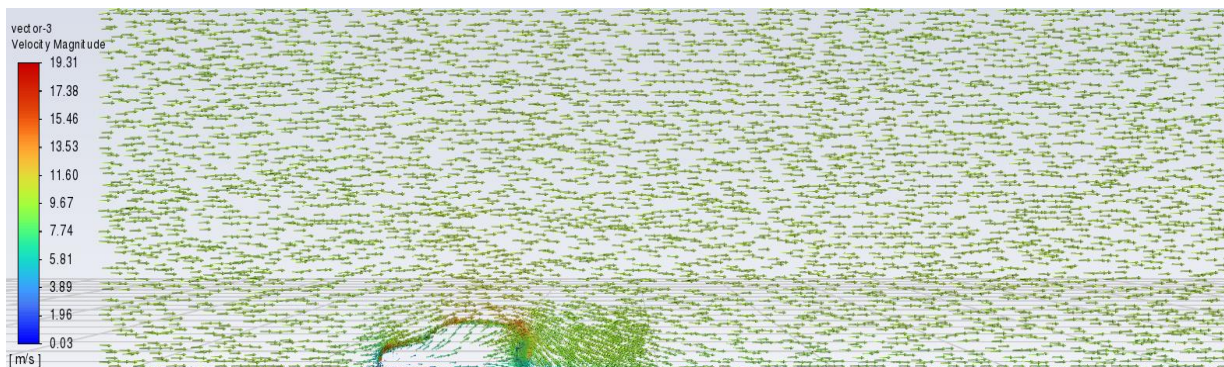
Kontura brzine za ulaznu brzinu  $v = 10$  m/s



Slika 0.1 Kontura brzina za ulaznu brzinu  $v = 10$  m/s

Slika 5.2 nam prikazuje vektore brzine koji nam daju uvid u to kako se zrak kreće u odnosu na automobil. Zgusnuta područja su područja gdje ulazni zrak dolazi na prepreku slobodnom strujanju. Zbog razlike u tlakovima tu su i najčešće najveće brzine.

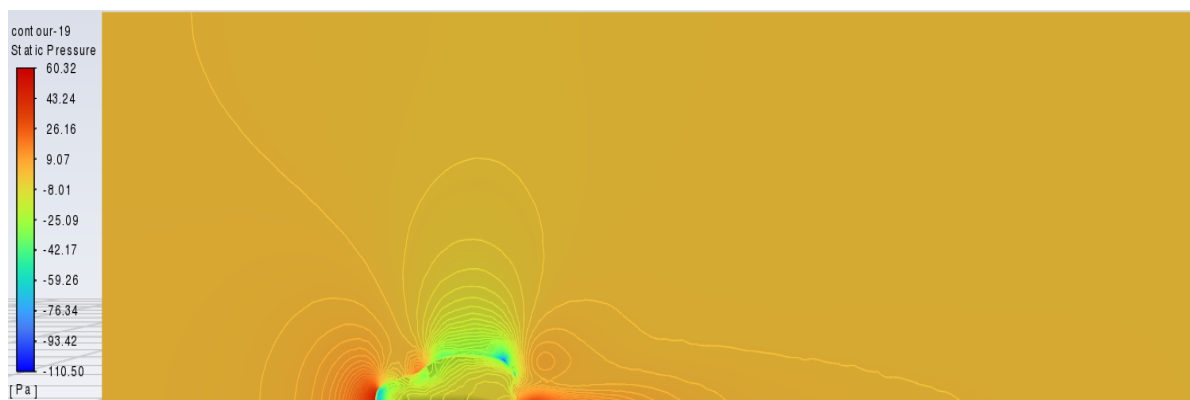
## Vektori brzine za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s



Slika 0.2 Vektori brzina za ulaznu brzinu  $v = 10$  m/s

Kod prikaza statičkog tlaka na slici 5.3 vidimo da je statički tlak najveći ispred automobila i iza automobila, a najmanjeg intenziteta duž krova automobila i unutar prednjeg dijela automobila.

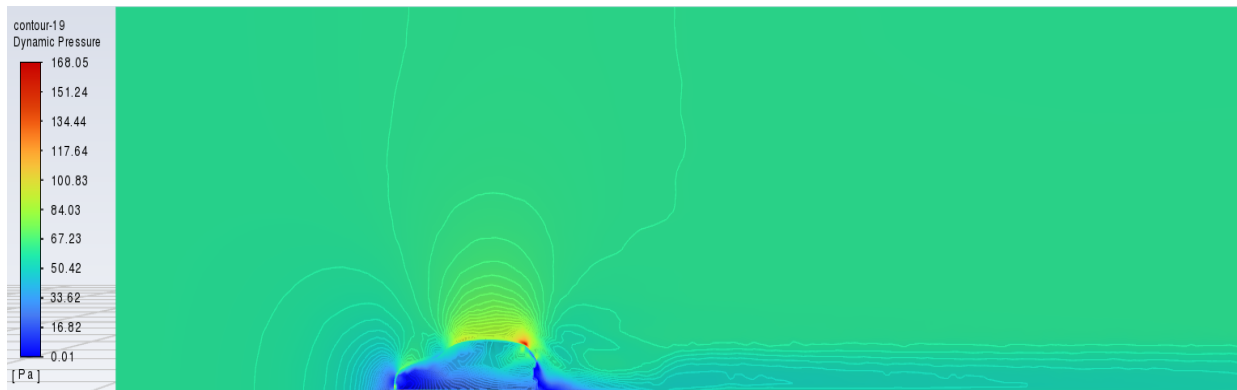
## Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s



Slika 0.3 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 10$  m/s

Na slici 5.4 kod prikaza dinamičkog tlaka primjećujemo da je dinamički tlak na prednjem dijelu unutar automobila gotovo nula, isto je i ispred automobila i iza automobila. Najviše vrijednosti tlaka su na području gdje je i brzina najveća, a to je na prednjoj haubi automobila i na površini krova automobila.

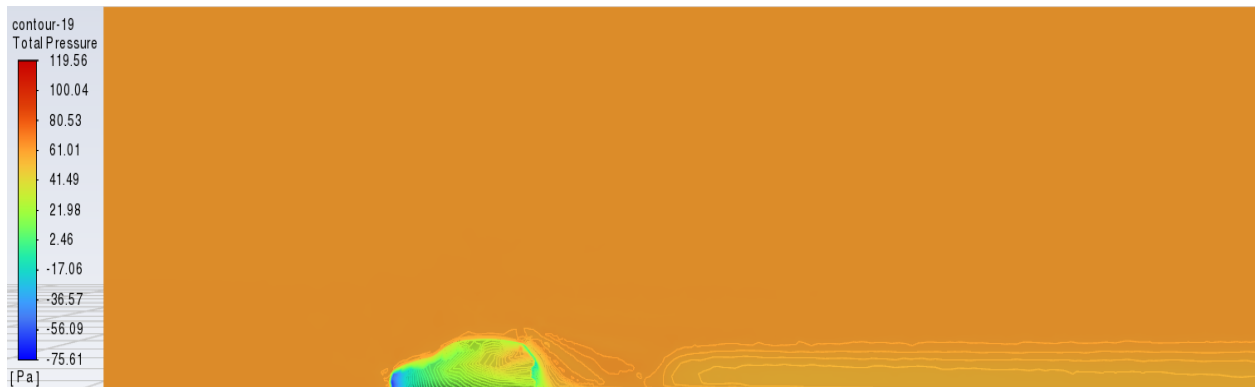
### Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s



Slika 0.4 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 10$  m/s

Totalni tlak je zbroj statičkog tlaka i dinamičkog tlaka. Povećava se skupa s brzinom isto kao i statički i dinamički tlak. Totalni tlak je negativan ili vrlo mali unutar automobila i iza automobila, a izvan automobila na cijeloj promatranoj domeni iznosi skoro jednako tj, oko 70 Pa. (slika 5.5)

### Kontura totalnog tlaka za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s

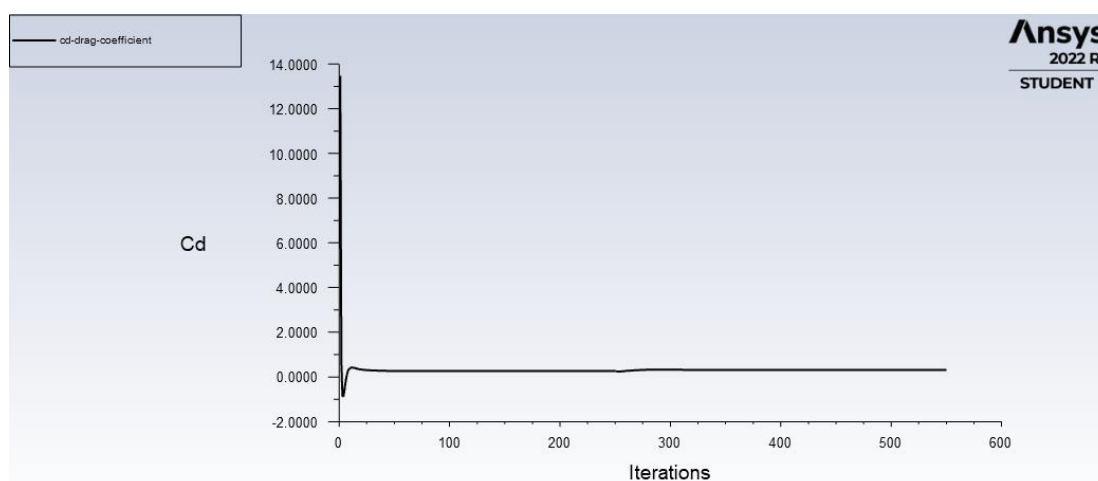


Slika 0.5 Kontura totalnog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 10$  m/s

## 5.2 Koeficijent otpora zraka

Nakon izrade simulacije izračunali smo koeficijent otpora zraka prema parametrima za pojednostavljeni model automobila. Dobiven koeficijent otpora usporedili smo sa stvarnim koeficijentom otpora od realnog modela automobila. Koeficijent nam je bio od posebne važnosti da se vidi usporedba rješenja sa realnim primjerom i da se uvjerimo u točnost programske simulacije.

Prema potrebnim vrijednostima koje su prikazane na slici 5.6 dobiva se koeficijent otpora zraka  $C_d=0,318$  što je više od  $C_d$ -a za Audi A3 Sportback 2020. koji iznosi 0,283. Dobiven rezultat je različit radi toga jer je rađeno na pojednostavljenom modelu koji ne uključuje dijelove automobila koji bi napravili razliku u koeficijentu otpora zraka npr. retrovizori. Razlika je i u tome što se numerička mreža radila s ograničenim brojem elemenata ( $< 512\ 000$ ). Simulacija i koeficijent otpora je moguće unaprijediti kad bi se koristio detaljniji model koji se sastoji od više dijelova. Poboljšanje se može dobiti i s povećanjem broja elemenata i čvorova u numeričkoj mreži, te da se koristi složeniji turbulentni model.



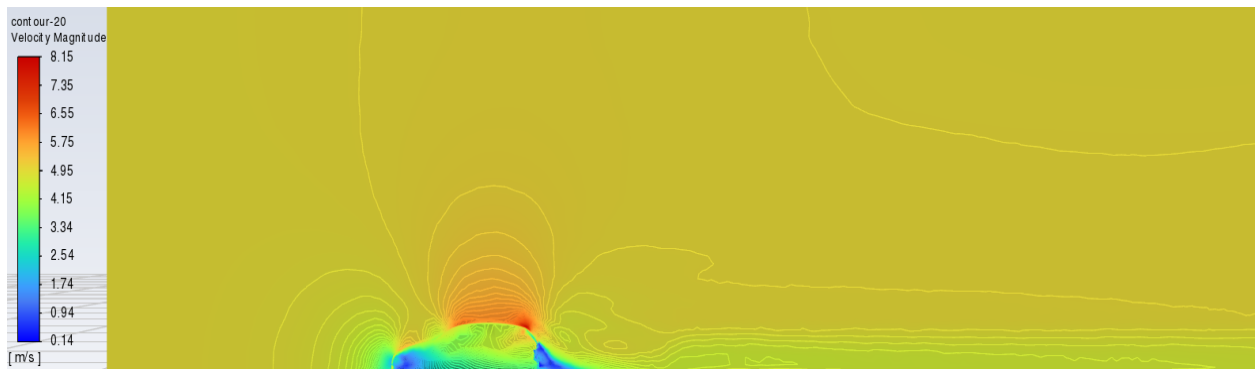
Slika 0.6 Koeficijent otpora zraka

## 6. USPOREDBA DOBIVENIH REZULTATA S PROMJENOM BRZINE

Kod postupka izrade simulacije već su prikazani rezultati za ulaznu brzinu od 10 m/s. U simulaciju ćemo dodati brzine od 5 m/s, 15 m/s i 35m/s i vidjeti ćemo kakve su posljedice mijenjanja ulazne brzine zraka.

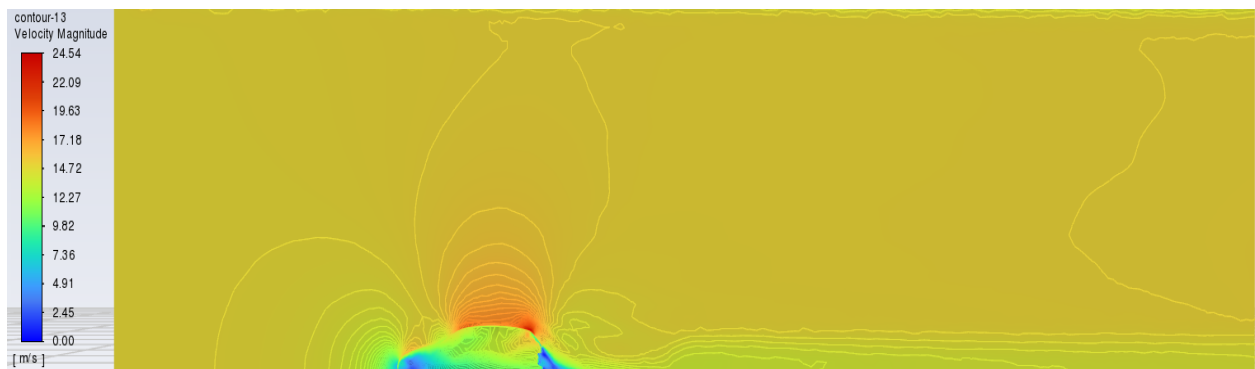
### 6.1 Usporedba promjene kontura brzina s promjenom brzine

Ulazna brzina  $v = 5$  m/s



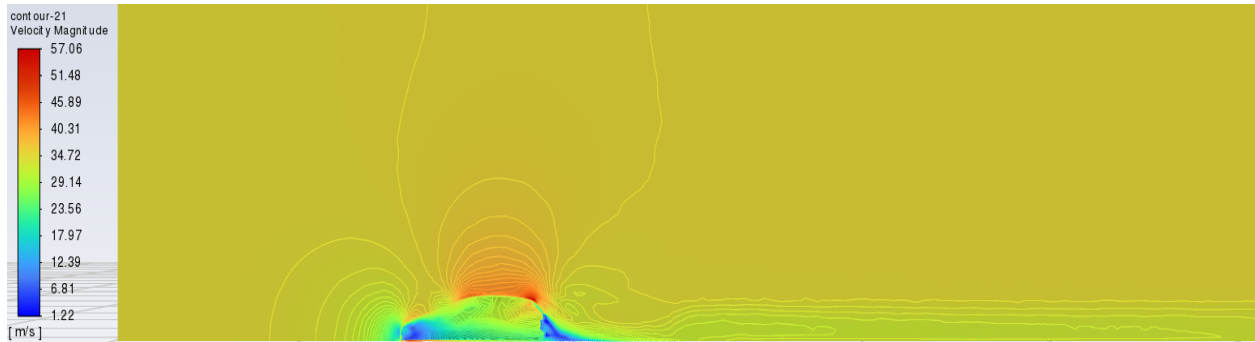
Slika 0.1 Kontura brzina za ulaznu brzinu  $v = 5$  m/s

Ulazna brzina  $v = 15$  m/s



Slika 0.2 Kontura brzina za ulaznu brzinu  $v = 15$  m/s

Ulazna brzina  $v = 35$  m/s



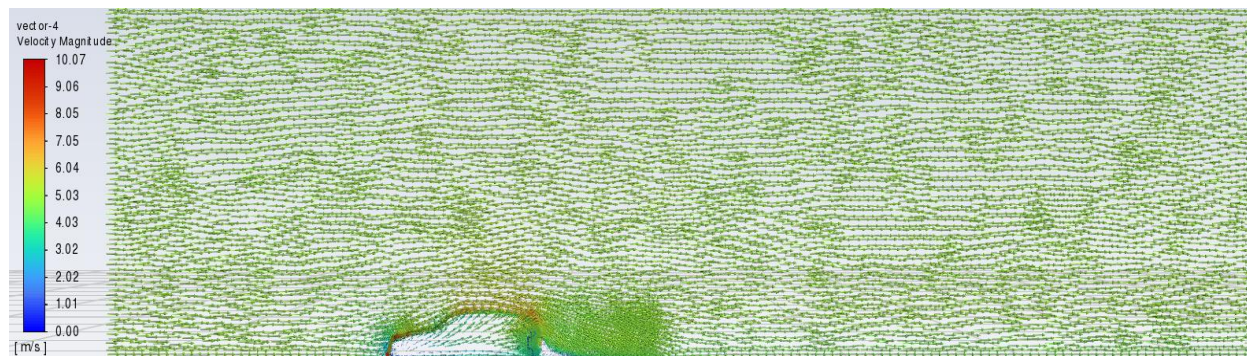
*Slika 0.3 Kontura brzina za ulaznu brzinu  $v = 35$  m/s*

Na slikama je prikazano kako na automobil utječe ulazna brzina zraka. Na slici koja nam pokazuje ulaznu brzinu 5 m/s možemo vidjeti da se područje gibanja zraka uvelike razlikuje u odnosu na sliku gdje je ulazna brzina 35 m/s. Pa tako treba primijetiti da je na slici 6.1 s ulaznom brzinom od 5 m/s područje strujanja puno niže u odnosu na ostale slike. S povećanjem ulazne brzine se povećava i područje strujanja zraka uzrokovano kretanjem automobila.



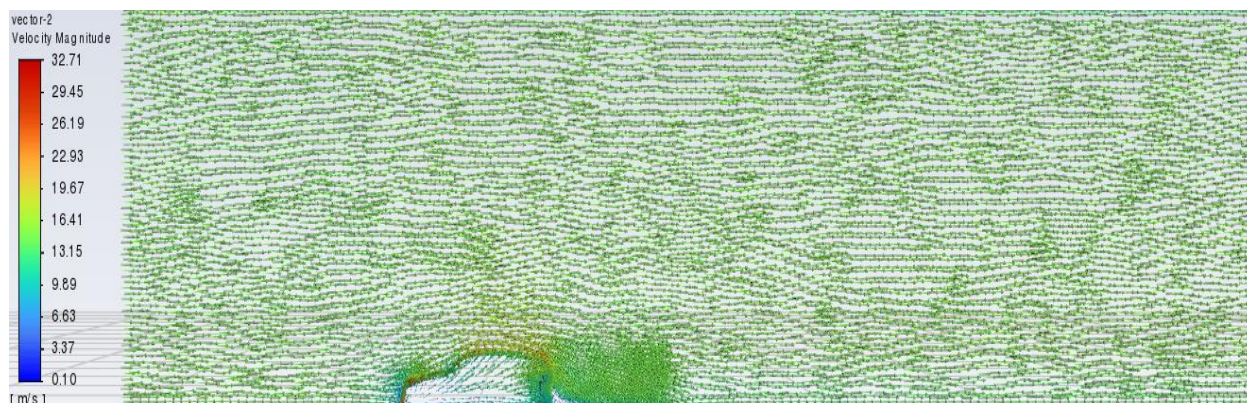
## 6.2 Usporedba promjene vektora brzina s promjenom brzine

Ulazna brzina  $v = 5 \text{ m/s}$



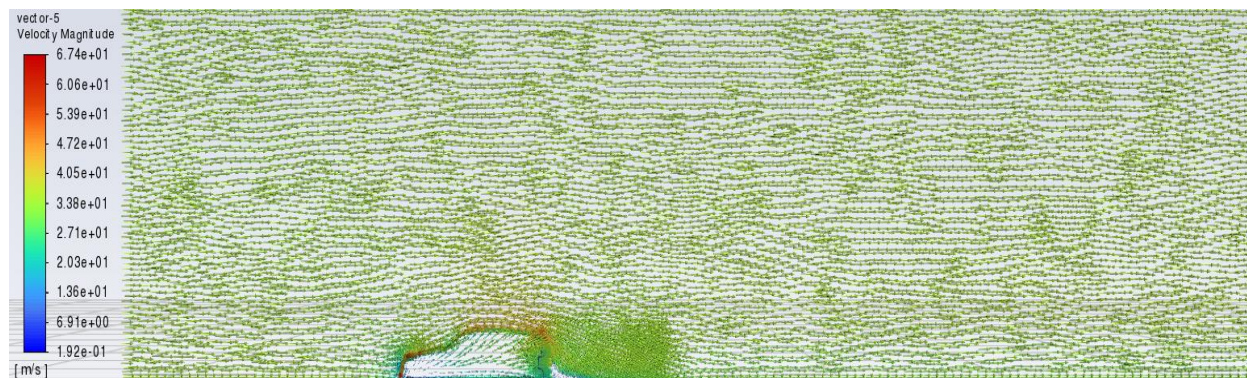
Slika 0.4 Vektori brzina za ulaznu brzinu  $v = 5 \text{ m/s}$

Ulazna brzina  $v = 15 \text{ m/s}$



Slika 0.5 Vektori brzina za ulaznu brzinu  $v = 15 \text{ m/s}$

Ulazna brzina  $v = 35 \text{ m/s}$

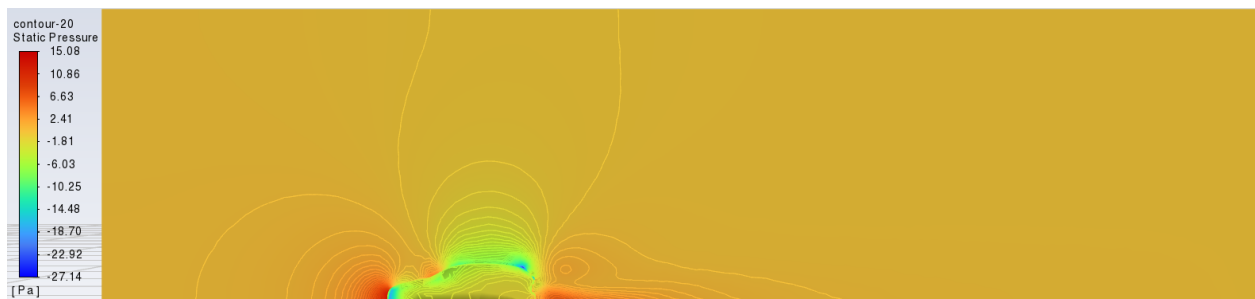


Slika 0.6 Vektori brzina za ulaznu brzinu  $v = 35 \text{ m/s}$

Promjena ulazne brzine zraka ne utječe pretjerano na područja zgušćenja vektora tj. promjenom ulazne brzine područja zgušćenja su ostala ista. Promijenila se samo brzina kojom ti vektori dolaze na prepreku, tj. automobil.

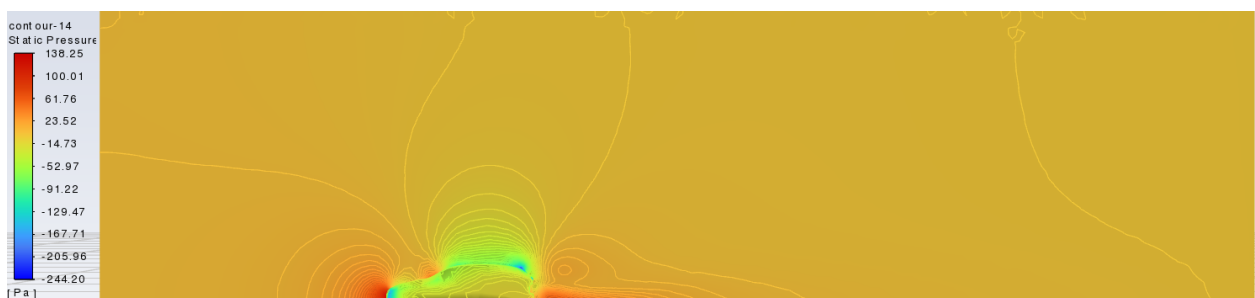
### 6.3 Usporedba ovisnosti statičkog tlaka o promjeni brzine

Ulazna brzina  $v = 5 \text{ m/s}$



Slika 0.7 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 5 \text{ m/s}$

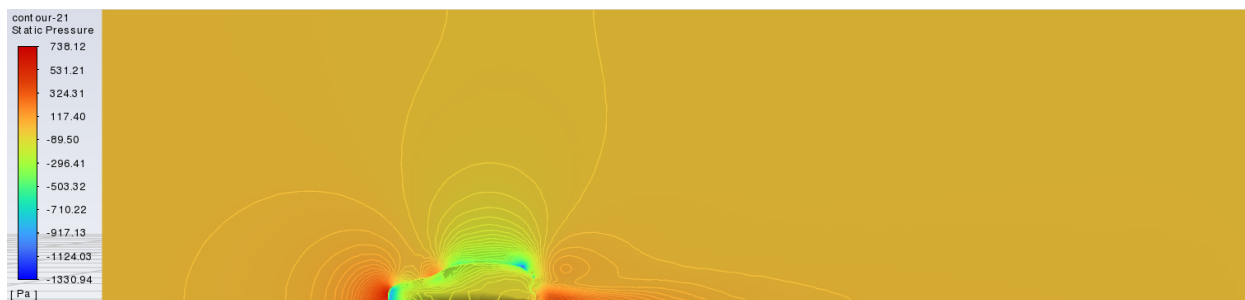
Ulazna brzina  $v = 15 \text{ m/s}$



Slika 0.8 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 15 \text{ m/s}$



Ulazna brzina  $v = 35$  m/s

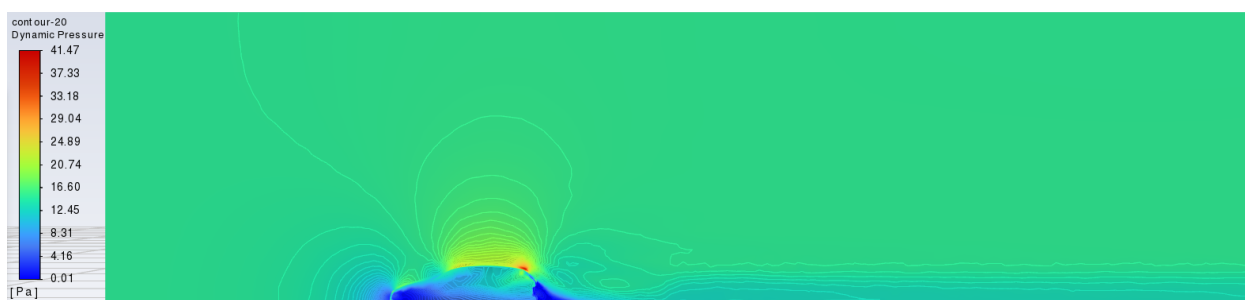


Slika 0.9 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 35$  m/s

Na slikama je vidljivo da se s promjenom ulazne brzine, mijenja i intenzitet statičkog tlaka. Tlak je proporcionalan ulaznoj brzini zraka. Povećanjem brzine povećava se i područje djelovanja statičkog tlaka. Konturne linije nam prikazuju to područje.

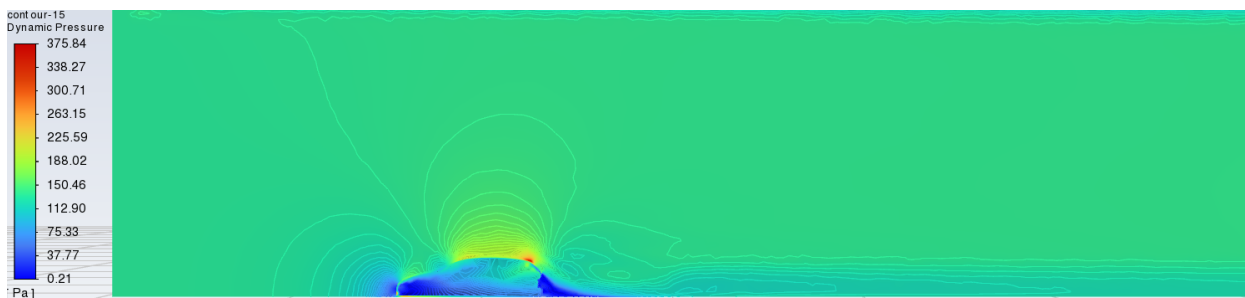
#### 6.4 Usporedba ovisnosti dinamičkog tlaka o promjeni brzine

Ulazna brzina  $v = 5$  m/s



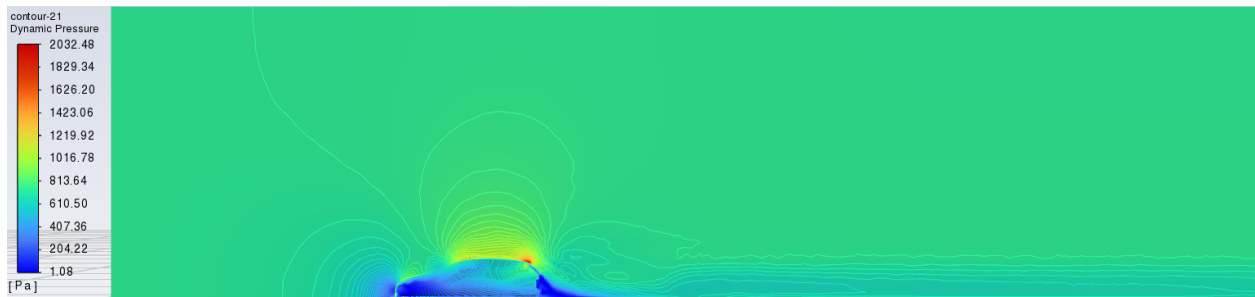
Slika 0.10 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 5$  m/s

Ulazna brzina  $v = 15$  m/s



Slika 0.11 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 15$  m/s

Ulazna brzina  $v = 35$  m/s

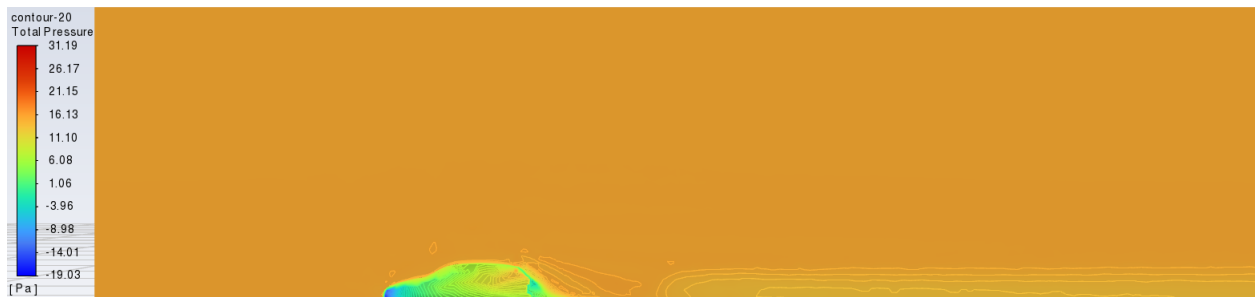


Slika 0.12 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 35$  m/s

Dinamički tlak se ponaša isto kao i statički s obzirom na ulaznu brzinu zraka. Na slikama možemo vidjeti da se s povećanjem ulazne brzine zraka povećava i dinamički tlak. Isto tako se povećava i područje na kojem dinamički tlak djeluje.

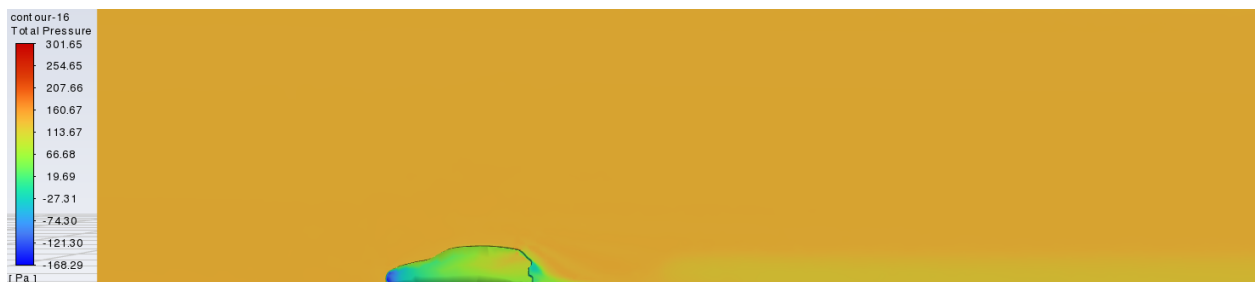
## 6.5 Usporedba ovisnosti totalnog tlaka o promjeni brzine

Ulazna brzina  $v = 5$  m/s



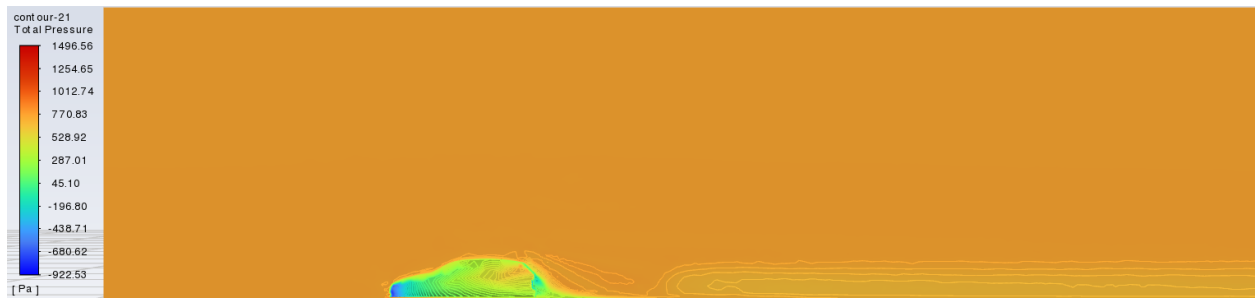
Slika 0.13 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 5$  m/s

Ulazna brzina  $v = 15$  m/s



Slika 0.14 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 15$  m/s

Ulazna brzina  $v = 35 \text{ m/s}$



*Slika 0.15 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu  $v = 35 \text{ m/s}$*

Kao i kod statičkog i dinamičkog tlaka, totalni tlak se povećanjem ulazne brzine zraka isto povećava. Raspon totalnog tlaka je od -450 Pascala do 600 Pascala. Područja gdje imamo negativan tlak pokazuju područja gdje je totalni tlak manji od atmosferskog. To se događa jer se brzina fluida dovoljno poveća, a s njome i dinamički tlak, pa se zbog konstantnosti zbroja statičkog i dinamičkog tlaka statički tlak spusti ispod nule, a kako je totalni tlak zbroj statičkog i dinamičkog tlaka područja gdje je negativan statički tlak su i područja gdje je negativan i totalni tlak.

## 7. ZAKLJUČAK

Zadatak u ovom radu je bio napraviti CFD analizu pojednostavljenog modela automobila. Proizvoljno odabrani model za pojednostavljanje je Audi A3 Sportback 2020. Za CFD analizu smo koristili program Ansys uz pomoć kojeg smo trebali odrediti domenu, numeričku mrežu i rubne uvjete. Programom Ansys za rezultate smo dobili grafičke prikaze za statički, dinamički i totalni tlak, brzina, te vektore brzina. Rezultate smo usporedili s 3 proizvoljno odabrane brzine koje su bile 5, 15 i 35 m/s. Isto tako smo izračunali i koeficijent otpora zraka, te smo ga usporedili sa koeficijentom realnog automobila. Razlika koeficijenata je primjetljiva i očekivana zbog pojednostavljivanja linije automobila. Uz to automobil je sa bočnih strana bio ravna ploha, dok je zapravo zaobljen. Navedeno odstupanje je očekivano i zbog korištenja malenog broja elemenata zbog ograničenja studentske licence, gdje bi za bolje rezultate bilo potrebno koristiti složeniju simulaciju s većim brojem elemenata koja bi bolje opisala turbulentno strujanje koje nastaje opstrujavanjem oko automobila.

## 8. POPIS LITERATURE

- [1] Niedermeyer, P. „An Illustrated history of automotive aerodynamics in three parts“ : <https://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-1-1899-1939/> , veljača 2010.
- [2] <https://ww2gravestone.com/people/rumpler-edmund/> , srpanj 2012.
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tatra\\_77](https://en.wikipedia.org/wiki/Tatra_77) , srpanj 2022.
- [4] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-volkswagen-beetle-a-success-story-2341>
- [5] <https://www.autoevolution.com/audi/100-200/> , srpanj 2022.
- [6] <https://www.ansys.com/it-it/blog/ferrari-competicioni-gt-produces-simulations-3x-faster-cfd-workflow>
- [7] The Editors of Encyclopaedia Britannica: <https://www.britannica.com/science> , kolovoz 2022.
- [8] On the apex: „4 Reasons why wind tunnel testing is so important to race car aerodynamic development“, <https://www.carthrottle.com/post/n43v9xq/> , travanj 2016.
- [9] Schelkens,A : „Reducing Fuel Consumption By Optimizing Engine Parts With CFD“ <https://semiengineering.com/reducing-fuel-consumption-by-optimizing-engine-parts-with-cfd/> , lipanj 2022.
- [10] <https://www.audi.hr/a3/a3-sportback-2020/dimenzije>
- [11] Dhaubhadel,M.N : „CFD Applications in the Automotive Industry“ <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-abstract/118/4/647/427583/Review-CFD-Applications-in-the-Automotive-Industry> , prosinac 1996.
- [12] <https://www.imaginationeering.com/applications-of-cfd-in-automotive-industries/> , listopad 2020.
- [13] Dumas,S : „Optimization and computational fluid dynamics“ [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72153-6\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72153-6_7) , veljača 2008.
- [14] <https://www.audi-mediacycenter.com/en/more-dynamic-than-ever-before-the-new-audi-a3-sportback-and-the-new-a3-sedan-12974/space-concept-and-body-12980>
- [15] <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>

## 9. POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1 La Jamais Contene("Nikad zadovoljan") .....                  | 2  |
| Slika 2.2 Alfa Romeo Castagna „La Bomba“ .....                         | 3  |
| Slika 2.3 Rumppler Tropfenwagen .....                                  | 4  |
| Slika 2.4 Tatra type 77 .....  | 5  |
| Slika 2.5 Volkswagen Beetle 1936.Prototype.....                        | 5  |
| Slika 2.6 Audi 100.....  | 6  |
| Slika 2.7 Mozaična mreža Ferrari Competizioni GT .....                 | 7  |
| Slika 2.8 Primjena CFD-a na vodenoj pumpi u Renault Escape.....        | 8  |
| Slika 3.1 Laminarno strujanje .....                                    | 10 |
| Slika 3.2 Turbulentno strujanje .....                                  | 11 |
| Slika 3.3 Optjecanje tijela .....                                      | 12 |
| Slika 3.4 Nastrujavanje uz profil lopatice .....                       | 13 |
| Slika 3.5 Odstujavanje nakon profila .....                             | 13 |
| Slika 3.6 Područje odstrujavanje kod automobila.....                   | 14 |
| Slika 3.7 Ispitivanje modela u zračnom tunelu .....                    | 15 |
| Slika 3.8 Ansys Workbench .....  | 16 |
| Slika 4.1 Audi A3 Sportback 2020.....                                  | 17 |
| Slika 4.2.....   | 18 |
| Slika 4.3 Smjernica za izradu domene .....                             | 18 |
| Slika 4.4 Domena automobila u Design Modeleru .....                    | 19 |
| Slika 4.5 Naredba Add Frozen .....                                     | 19 |
| Slika 4.6 Prikaz numeričke mreže cijele domene .....                   | 20 |
| Slika 4.7 Područje zgušćenja numeričke mreže .....                     | 20 |
| Slika 4.8 Rubni uvjet.....   | 21 |
| Slika 4.9 Iskočni prozor pri pokretanju Fluentu.....                   | 22 |
| Slika 4.10 Izbor modela rješavača.....                                 | 23 |
| Slika 4.11 Rubni uvjeti za Inlet.....                                  | 24 |
| Slika 4.12 Postavke inicijalizacije.....                               | 24 |
| Slika 4.13 Postavke kalkulacije.....                                   | 25 |
| Slika 4.14 Graf iteracija .....  | 25 |
| Slika 5.1 Kontura brzina za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s .....           | 26 |
| Slika 5.2 Vektori brzina za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s.....            | 27 |
| Slika 5.3 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s.....   | 27 |
| Slika 5.4 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s ..... | 28 |
| Slika 5.5 Kontura totalnog tlaka za ulaznu brzinu $v = 10$ m/s .....   | 28 |
| Slika 6.1 Kontura brzina za ulaznu brzinu $v = 5$ m/s .....            | 30 |
| Slika 6.2 Kontura brzina za ulaznu brzinu $v = 15$ m/s .....           | 30 |
| Slika 6.3 Kontura brzina za ulaznu brzinu $v = 35$ m/s .....           | 31 |
| Slika 6.4 Vektori brzina za ulaznu brzinu $v = 5$ m/s.....             | 32 |
| Slika 6.5 Vektori brzina za ulaznu brzinu $v = 15$ m/s.....            | 32 |
| Slika 6.6 Vektori brzina za ulaznu brzinu $v = 35$ m/s.....            | 32 |
| Slika 6.7 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 5$ m/s.....    | 33 |
| Slika 6.8 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 15$ m/s.....   | 33 |
| Slika 6.9 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 35$ m/s.....   | 34 |
| Slika 6.10 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 5$ m/s ..... | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 6.11 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 15$ m/s ..... | 34 |
| Slika 6.12 Kontura dinamičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 35$ m/s ..... | 35 |
| Slika 6.13 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 5$ m/s.....    | 35 |
| Slika 6.14 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 15$ m/s.....   | 35 |
| Slika 6.15 Kontura statičkog tlaka za ulaznu brzinu $v = 35$ m/s.....   | 36 |



## 10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Tema ovog završnog rada je analiza strujanja oko pojednostavljenog modela modernog automobila tip 6. Završni rad se sastoji od dva dijela, teorijski dio i praktični dio. U teorijskom dijelu opisana je kronologija razvoja aerodinamike u automobilskoj industriji i teorija o aerodinamici automobila, te primjena računalne dinamike fluida (CFD). U praktičnom dijelu izrađeno je pojednostavljenje geometrije modela automobila, izrađena je numerička mreža te su definirani rubni uvjeti potrebni za izradu simulacije koja se temelji na iterativnom rješenju Navier-Stokes jednadžbi u programu Ansys Fluent. Mijenjajući ulaznu brzinu prikazali smo rezultate promjena kontura i vektora brzina, te konture statičkog, dinamičkog i totalnog tlaka. Na kraju su ti rezultati prikazani grafičkim putem.

Ključne riječi: Aerodinamika automobila, Računalna dinamika fluida(CFD), Automobilaska industrija, Koeficijent otpora zraka, Ansys, Turbulencija, Računalne simulacije

## **Summary and keywords**

The topic of this final paper is the analysis of the flow around a simplified model of a modern car type 6. The final paper consists of two parts, a theoretical part and a practical part. The theoretical part describes the chronology of the development of aerodynamics in the automotive industry and the theory of car aerodynamics, as well as the application of computational fluid dynamics (CFD). In the practical part, a simplification of the geometry of the car model was made, a numerical grid was created and the boundary conditions necessary for creating a simulation based on the iterative solution of the Navier-Stokes equations in the Ansys Fluent program were defined. By changing the input speed, we presented the results of changes in contours and velocity vectors, as well as contours of static, dynamic and total pressure. Finally, these results were presented graphically.

Keywords: Car aerodynamics, Computational fluid dynamics (CFD), Automotive industry, Air drag coefficient, Ansys, Turbulence, Computer simulations