

# ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG MODELA MODERNOG AUTOMOBILA TIP 5

---

Šćuric, Dario

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:190:322790>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG  
MODELA MODERNOG AUTOMOBILA TIP 5**

Rijeka, srpanj 2022.

Dario Šćuric

0069081245

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA OKO POJEDNOSTAVLJENOG  
MODELA MODERNOG AUTOMOBILA TIP 5**

Mentori: prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, srpanj, 2022.

Dario Šćuric

0069081245

## **IZJAVA**

*Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studiranja na Tehničkom fakultetu u Rijeci i pod stručnim vodstvom mentora prof. dr. sc. Zorana Čarije.*

---

U Rijeci, 12. srpnja 2022.

## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Čariji na prihvaćanju mentorstva ovog završnog rada.*

*Posebno se zahvaljujem asistentici Ivani Lučin, asistentici Marti Alvir te višem stručnom suradniku Domagoju Vrtovšnik na pomoći, savjetima i strpljenju.*

*Također, zahvaljujem se i svojim roditeljima na podršci tijekom školovanja.*

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
**POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE**

Rijeka, 12. ožujka 2021.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Dario Šćuric (0069081245)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza strujanja oko pojednostavljenog modela modernog automobila tip 5**  
**/ Airflow analysis around a simplified modern car model type 5**

### Opis zadatka:

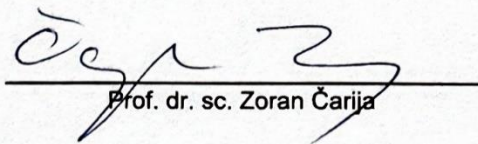
U okviru završnog rada potrebno je izraditi geometriju pojednostavljenog modela automobila. Geometriju je nužno adekvatno umrežiti poštujući općeprihvaćena pravila. Potrebno je provesti numeričku analizu za različite uvjete strujanja te je nužno prikazati turbulentni tok nekompresibilna fluida. Za sve 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.



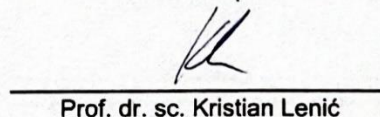
Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

# SADRŽAJ:

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. RAČUNARSKA DINAMIKA FLUIDA .....	3
3. CFD U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI.....	4
4. AHMEDOVO TIJELO.....	9
5. IZRADA SIMULACIJE.....	11
5.1 Geometrija.....	12
5.2 Numerička mreža .....	16
5.3 Rubni uvjeti .....	19
5.4 Simulacija.....	20
6. REZULTATI.....	21
6.1 Usporedba promjene kontura brzina s promjenom brzine .....	22
6.2 Usporedba rezultata statičkog tlaka.....	24
6.3 Usporedba rezultata dinamičkog tlaka .....	26
6.4. Usporedba totalnog tlaka.....	28
6.5 Usporedba vektora brzina.....	30
6.6 Usporedba koeficijenta otpora zraka .....	34
7. ZAKLJUČAK.....	35
8. POPIS LITERATURE .....	36
9. TABLICA SLIKA .....	37
10. SAŽETAK.....	39
11. SUMMARY .....	40

## 1. UVOD

Aerodinamika je znanost koja proučava gibanje fluida, te tijela kroz koje se fluid giba. Proučava parametre poput brzine, temperature, gustoće i tlaka. U počecima proizvodnje automobila o aerodinamici se nije znalo puno, pa su automobili bili kockastih oblika. Tijekom 40-ih godina prošlog stoljeća se počela obraćati pažnja na otpor zraka. S vremenom se pokazalo da aerodinamika utječe i na potrošnju goriva, kao i na buku koju automobil proizvodi tijekom vožnje. Kako se tehnologija razvijala, tako se i razvio novi način pristup promatranju fluida, pa se ona sve više odvija na računalima, a manji dio na fizičkim modelima u zračnim tunelima.

Zadatak ovog završnog rada je izrada geometrije pojednostavljenog modela automobila, te na njoj provesti numeričku analizu za različite uvjete strujanja, poštujući općeprihvaćena pravila.

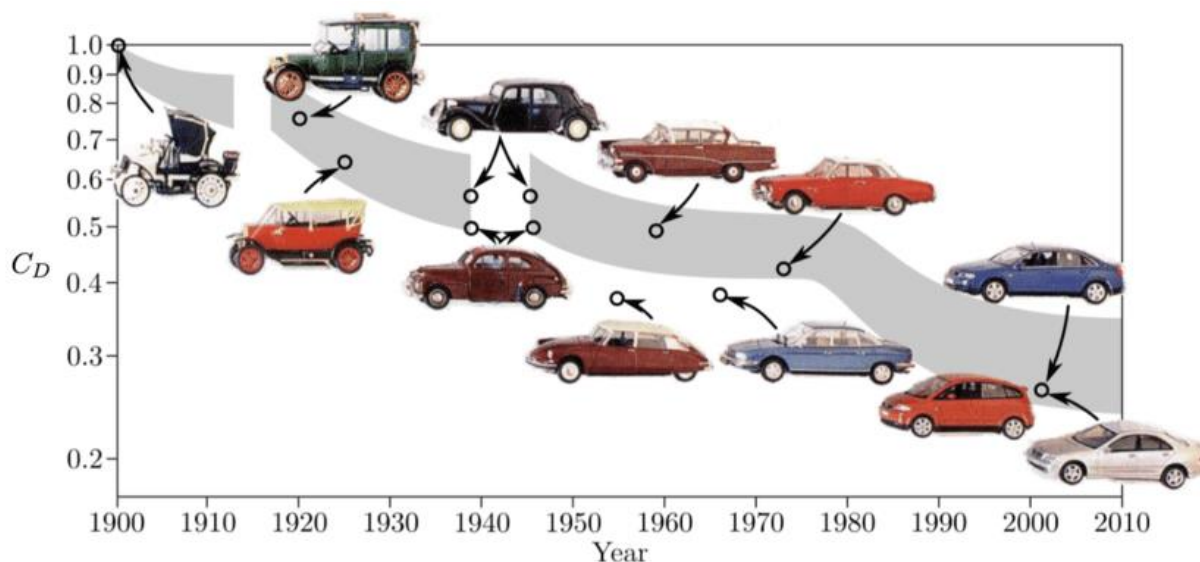
Rad je podijeljen u dva dijela. Prvi dio obuhvaća pojam CFD simulacije, njezine karakteristike, prednosti i mane, te njezinu primjenu u autoindustriji. Ukratko su opisane neke od njezinih primjena u današnjoj autoindustriji kao što je strujanje zraka oko automobila. Na temelju te simulacije se predviđaju ponašanje automobila pri određenim brzinama, te se mogu ispitati neki dodatci poput difuzora, spojlera i sličnih dijelova koji bitno utječu na strujanje zraka. Hidrodinamika kotača je također bitna jer se simuliraju različiti profili guma, u svrhu poboljšanja usmjeravanja zraka prilikom vrtnje gume. Također bitna stavka je strujanje fluida u kabini automobila, poželjno je što bolje strujanje kako bi putnicima bilo što ugodnije i što tiše. U današnje vrijeme sve više su popularni električni i hibridni automobili, koji nose neke određene dijelove koji se onda simuliraju. Primjer tih dijelova su elektromotor koji mora imati svoje hlađenje, isto kao i baterija.

Drugi dio rada obuhvaća izradu geometrije, numeričke mreže, te same CFD simulacije opstrujavanja fluida oko modela automobila. Ahmedovo tijelo je zapravo pojednostavljen model automobila koji sadrži neke njegove bitnije karakteristike. To tijelo se koristilo kako bi se usporedili rezultati dobiveni ispitivanjem fizičkog modela u zračnom tunelu sa modelom koji se simulirao na računalu. Slijedeći korak je izrada simulacije. Za izradu simulacije koristimo se paketima iz programa ANSYS. Spomenuti paketi su: Geometry, Mesh, Fluent i Results. Geometrija automobila je napravljena prema automobilu BMW serije 4 Grand Coupe. Model koji se koristi u simulacijama je pojednostavljen tako da su mu preoblikovane neki dijelovi ili značajke. Nakon izrađene geometrije mora se definirati i numeričku mrežu. To je područje oko automobila gdje je na pojedinim područjima radi bolje simulacije mreža gušća. Kada smo napravili geometriju i numeričku mrežu onda je na redu sama simulacija. Paket iz Ansysa u kojem se odvija simulacija



naziva se Fluent. Simulacija se izvodi iterativnim postupkom, u ovom slučaju 500 iteracija. Rezultati koje promatramo su statički tlak, dinamički tlak kao i brzine za različite brzine strujanja fluida kako vi se ispitalo ponašanje odabranog modela pri različitim radnim uvjetima.

Strujanje zraka u počecima autoindustrije nije bilo baš u fokusu pri dizajnu oblika, pa su automobili bili kockastih oblika. Kasnije su inženjeri zaključili da je bitan dizajn kako bi se smanjio otpor zraka, pri čemu bi se automobil lakše kretao kroz prostor i dijelovi poput agregata bi bio izložen manjim naporima. Na Slika 1.1. možemo vidjet kako se otpor zraka ( $C_D$ ) kroz povijest smanjivao, zahvaljujući drugačijem dizajnu samog automobila.



Slika 1.1: Razvoj oblika automobila (preuzeto sa Google slika)

## 2. RAČUNARSKA DINAMIKA FLUIDA

Računarska dinamika fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*) je znanost predviđanja toka fluida, odnosno analiza fluida koja koristi numeričke metode rješavanja. Koristeći CFD, moguće je analizirati kompleksne probleme koji uključuju fluid-fluid, fluid-kruto, fluid-plinovite interakcije. U inženjerstvu se najviše koristi na područjima aerodinamike i hidrodinamike, gdje se rješavanjem proučavaju veličine poput tlaka i brzine. Dinamika fluida je povezana sa zakonima fizike u obliku parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Sofisticirani programi pretvaraju te zakone u algebarske jednačbe, te ih rješavaju numerički. Za samo rješavanje jednačbi se koristi računalo ili više računala povezanih paralelno.

CFD analize imaju odličan potencijal za uštedu vremena u procesu dizajniranja. Najbitnija stavka je ušteda novaca i vremena u usporedbi sa normalnim testiranjima na primjer realnog modela u zračnom tunelu. U stvarnim testiranjima smo ograničeni količinom podataka koje možemo proučavati od jednom, dok u CFD analizama možemo proučavati sve željene podatke od jednom, pri tome možemo koristiti veću "rezoluciju" podataka u prostoru i vremenu.

CFD analize su aproksimacije realnih rješenja, to znači da CFD ne može u potpunosti zamijeniti fizička testiranja modela, pa se iz tog razloga CFD mora provjeriti na fizičkim testiranjima, kako bi se validirali-dobiveni rezultati. [1]

### 3. CFD U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Svake godine automobili postaju sve snažniji, luksuzniji, kompliciranijeg dizajna, te štedljiviji na gorivu. Za takve inovacije su potrebni sati i sati dizajna, razvijanja prototipova, razvoja i testiranja. U svakoj od tih faza, CFD ima ključnu ulogu u smislu efikasnijeg testiranja neke nove značajke. Neke od važnijih značajki koje se analiziraju su:

Opstajanje zraka na današnjim automobilima se razlikuje od automobila do automobila. Na današnjem tržištu ima puno modela, od malih gradskih automobila, do velikih terenskih vozila. Svako od tih vozila ima neko svoje svojstvo u pogledu aerodinamike u odnosu na drugo vozilo.

CFD analize utječu na aerodinamiku na nekoliko načina. Otpor zraka je horizontalna sila koja se javlja kada se automobil kreće unaprijed, te ona utječe na brzinu vozila, i na potrošnju goriva. Sila uzgona je vertikalna sila koja u dizajnu automobila rezultira gubitkom kontakta sa na primjer cestom, te može doći do prometne nesreće.

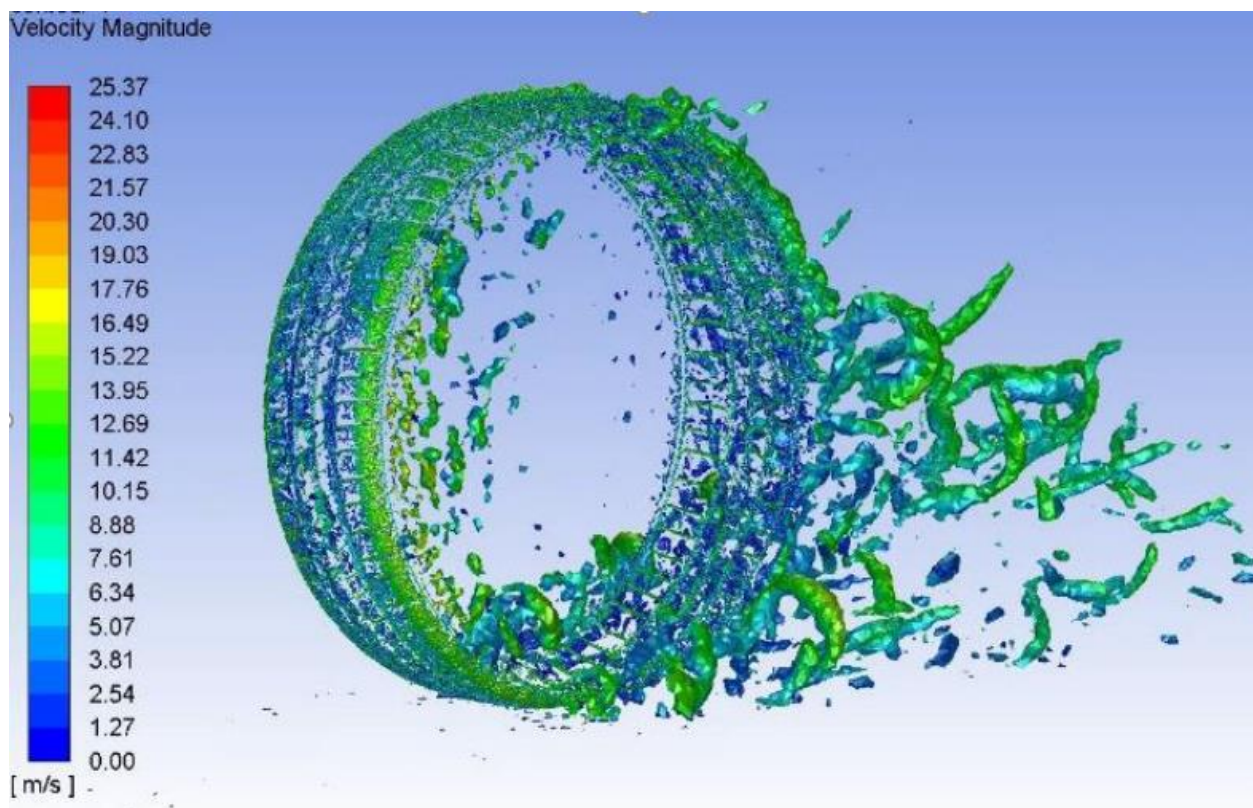
CFD dozvoljava proizvođačima da testiraju promjene na aerodinamici automobila, tako da inženjeri mogu procijeniti da li te promjene utječu na performanse automobila. [2]



*Slika 3.1: Strujanje zraka oko Porsche-a 911 Turbo [3]*

Jedina dodirna površina automobila sa cestom su kotači, odnosno gume. Taj dio je ključan za performanse i vozne karakteristike samog automobila. CFD omogućuje testiranje različitih materijala guma, te dizajn njihovih profila. Simuliraju se uvjeti poput vrućeg i hladnog vremena, pa se dobiju rezultati poput koliko trenja može guma podnijeti, također može se i pretpostaviti koliko će se guma trošiti.

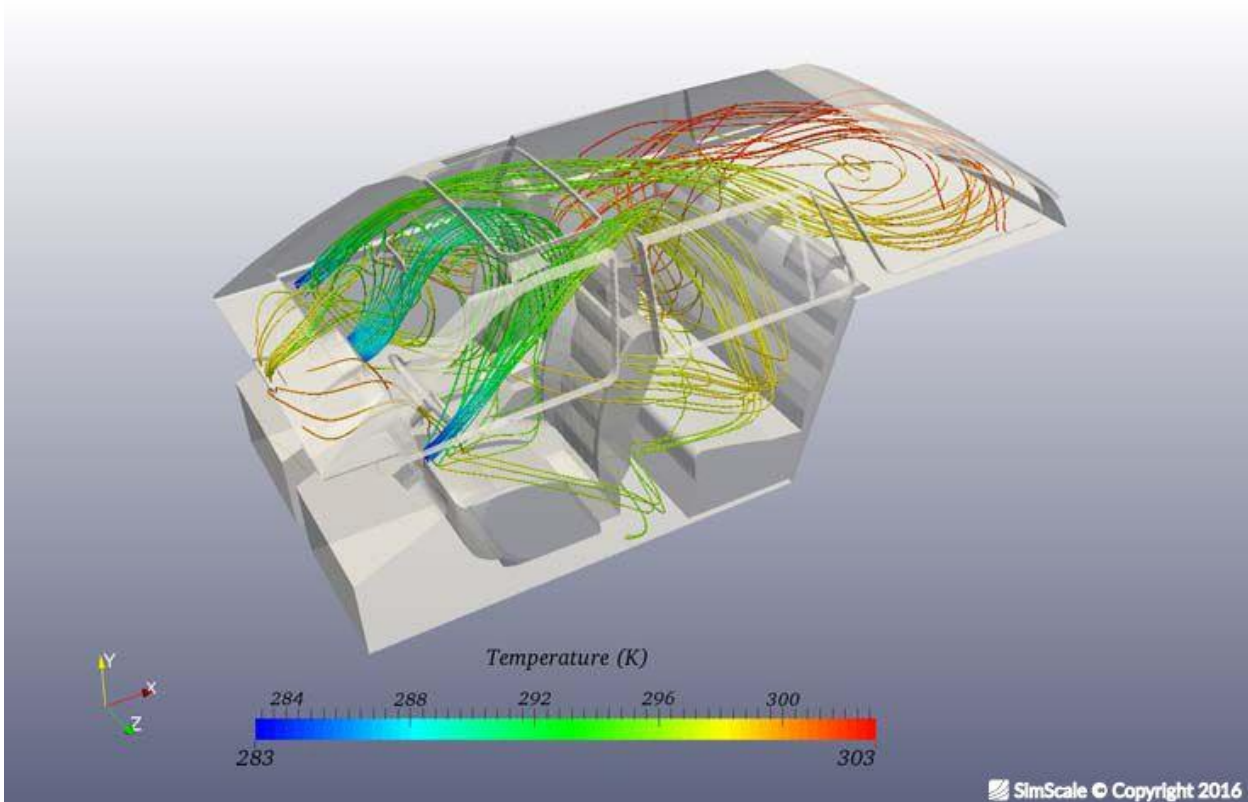
Hidrodinamika je područje u kojem se pručava kako zrak cirkulira kroz profil tj. "ripne". Kroz dizajn profila, može se utjecat na smjer gibanja fluida. Simulacijom gibanja vode, može se predvidjeti ponašanje gume na kišnim uvjetima, u svrhu smanjenja rizika od akvaplaninga, te postizanje maksimalnog trenja kako ne bi došlo do proklizavanja vozila. [2]



Slika 3.2: Gibanje vode na površini gume automobila [4]

Strujanje zraka oko automobila, uvelike utječe na udobnost putnika u kabini. Kako bi osigurali da zrak cirkulira kroz kabinu u željenim smjerovima, da imamo efikasno strujanje zraka uz što manje buke, nailazimo na problem. Naime, hladan i topli zrak se ponašaju totalno drugačije. Kako bi se postigao nekakav optimum puno se vremena ulaže u dizajn samih ventilacija, točnije cijevi koje završavaju sa ventilacijom sa percima za zatvaranje. Također, ventilacija utječe na sigurnost vozača jer je zadužena da čisti prednje staklo od magle i leda.

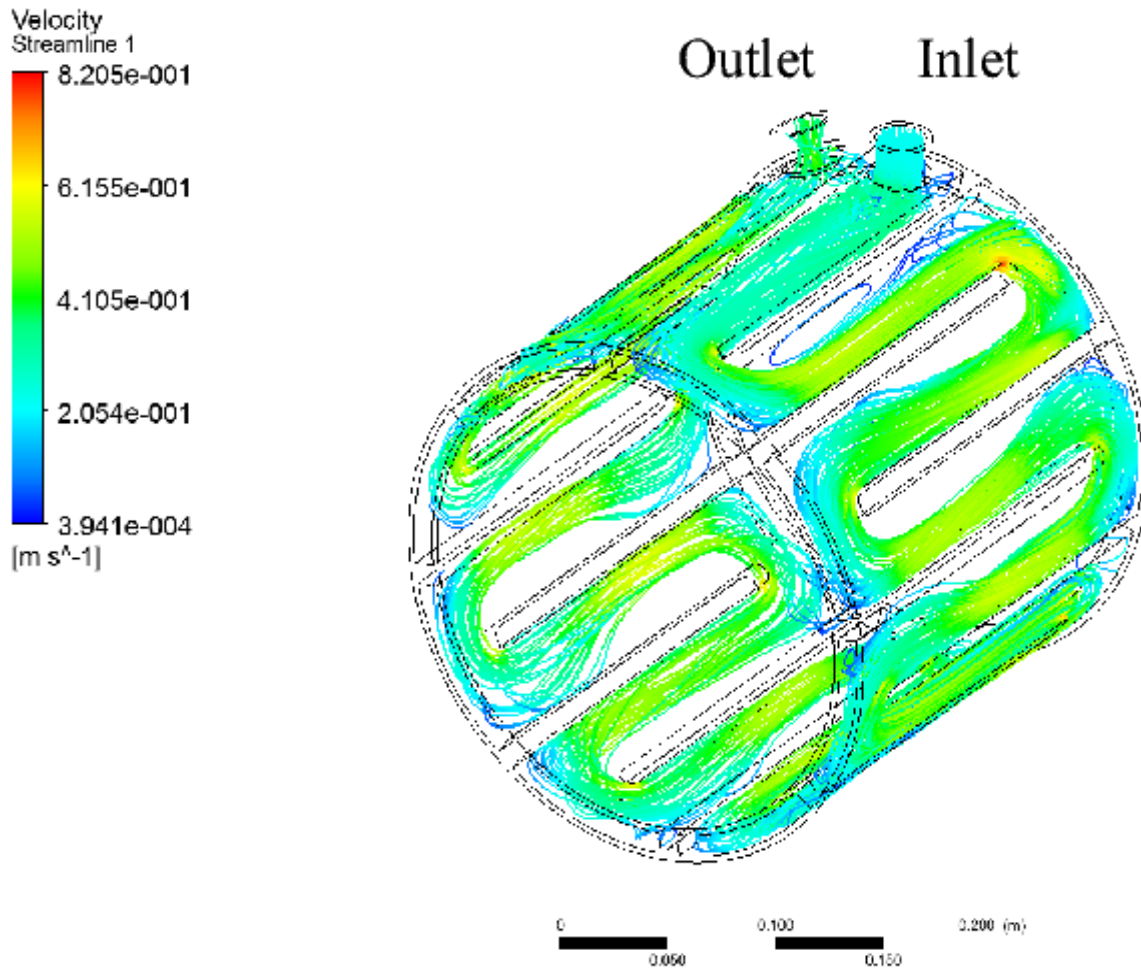
Završno uglađivanje tih ventilacija bilo bi puno kompliciranije da se one provode kroz prototipe u stvarnome svijetu. CFD simulacija može testirati u jako kratkom vremenu, što omogućuje inženjerima da eksperimentiraju sa raznim oblicima i položajima, pri čemu se štede ogromne količine novaca.



Slika 3.3: Strujanje zraka u kabini automobila [5]

U današnje vrijeme električni automobili su sve više zastupljeni na tržištu. Što iz ekoloških razloga, što zbog same popularnosti i prednosti nad konvencionalnim automobilima koji imaju motore sa unutrašnjim izgaranjem. CFD je postao jako bitan u ovoj grani jer se promatra podmazivanje mjenjačke kutije elektromotora, prijenos topline, ponašanje rashladnih tekućina.

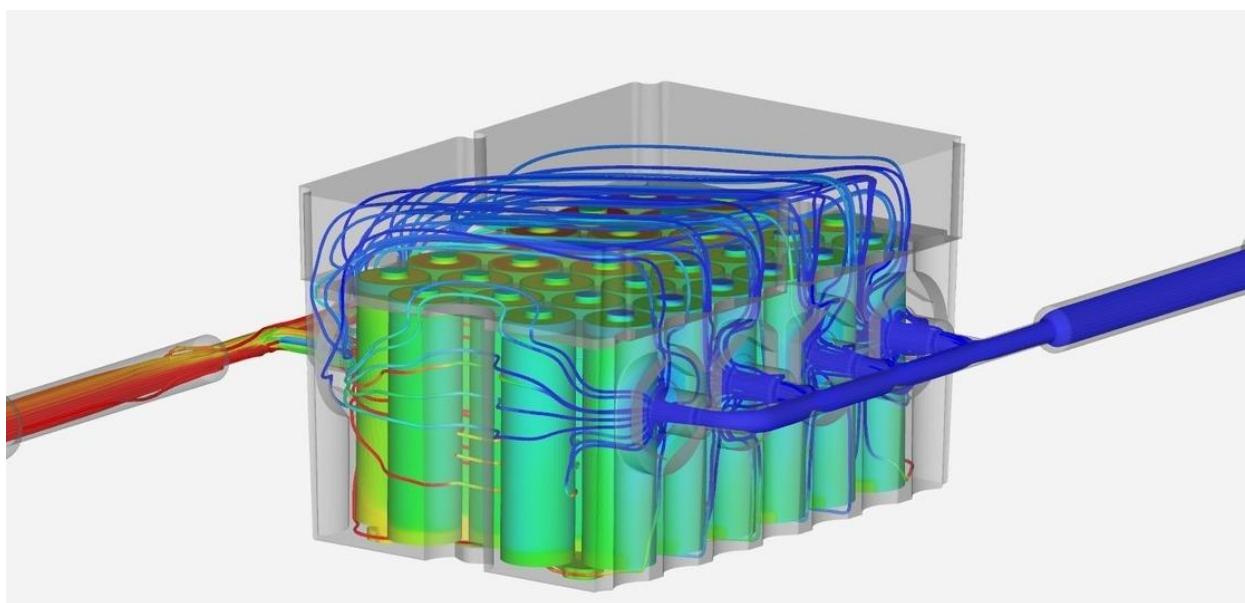
CFD simulacijom može se dobiti okvirno ponašanje zvuka komponenti mjenjačke kutije, u cilju da budu što tiše.



Slika 3.4: Cirkulacija fluida u elektromotoru [6]

Kako je prije napomenuto, električni automobili su sve više zastupljeniji, te uz hlađenje elektromotora, veliku ulogu ima i hlađenje baterija. Hlađenje baterija može imati velik utjecaj na dizajn samog automobila, što pak utječe na performanse automobila kao i na njegovu cijenu.

Strujanje napona u baterijama prouzrokuje toplinu unutar ćelija baterija, a toplina utječe na performanse baterije. Adekvatno odvođenje topline iz baterija ima veliki utjecaj na njihovo ponašanje, te produžuje radni vijek same baterije. CFD simulacije nam prikazuju kako se baterije griju tijekom normalnog korištenja, ali se također mogu i simulirati različiti vremenski uvjeti poput hladnoće ili vrućeg ljetnog dana.



*Slika 3.5: Hlađenje baterija električnog automobila [7]*

## 4. AHMEDOVO TIJELO

Aerodinamika u automobilskoj industriji se ponajviše bavi poboljšanjem opstrujavanja zraka. Neki od glavnih ciljeva su smanjenje otpora zraka i buke, poboljšanja potrošnje goriva i stabilnost automobila na cesti pri većim brzinama. Otpor se javlja zbog razlike u tlakovima između prednjeg i zadnjeg dijela automobila. On se smanjuje tako da se mijenja dizajn vozila koji onda mijenja tok zraka oko samog vozila. Pri brzinama oko 90 kilometara na sat, čak 50% mehaničke energije se troši kako bi se nadjačala sila otpora zraka. U nekim slučajevima kao što su trkači automobili, poželjan je otpor zraka, kako bi trkaće vozilo imalo bolje trenje na podlogu, ali povećanjem otpora se smanjuje krajnja brzina, pa timovi uvijek balansiraju između ta dva područja.

Ahmedovo tijelo je pojednostavljen model koji je izabran za mjerilo po kojem su se uspoređivali rezultati simulacija, u svrhu proučavanja parametra koji utječu na aerodinamiku. Oblik tijela je predložio S. R. Ahmed 1984. godine. Tijelo je imalo dovoljno jednostavni oblik koji je dozvoljavao precizno opstrujavanje zraka i sadržavalo je bitna svojstva koja imaju tijela automobila. Zadnji dio Ahmedovog tijela je ukošen, te se taj nagib može mijenjat pa se može manipulirat izračunatim koeficijentima otpora i uzgona. [8]

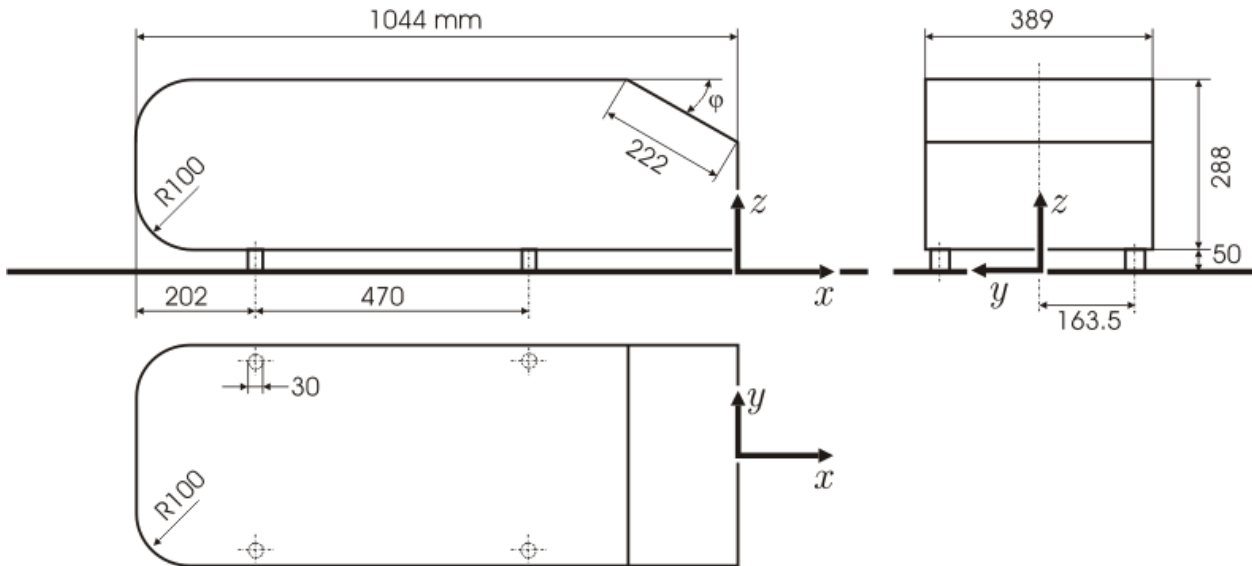


*Slika 4.1 Prikaz fizičkog modela Ahmedovog tijela (preuzeto sa Google slika)*

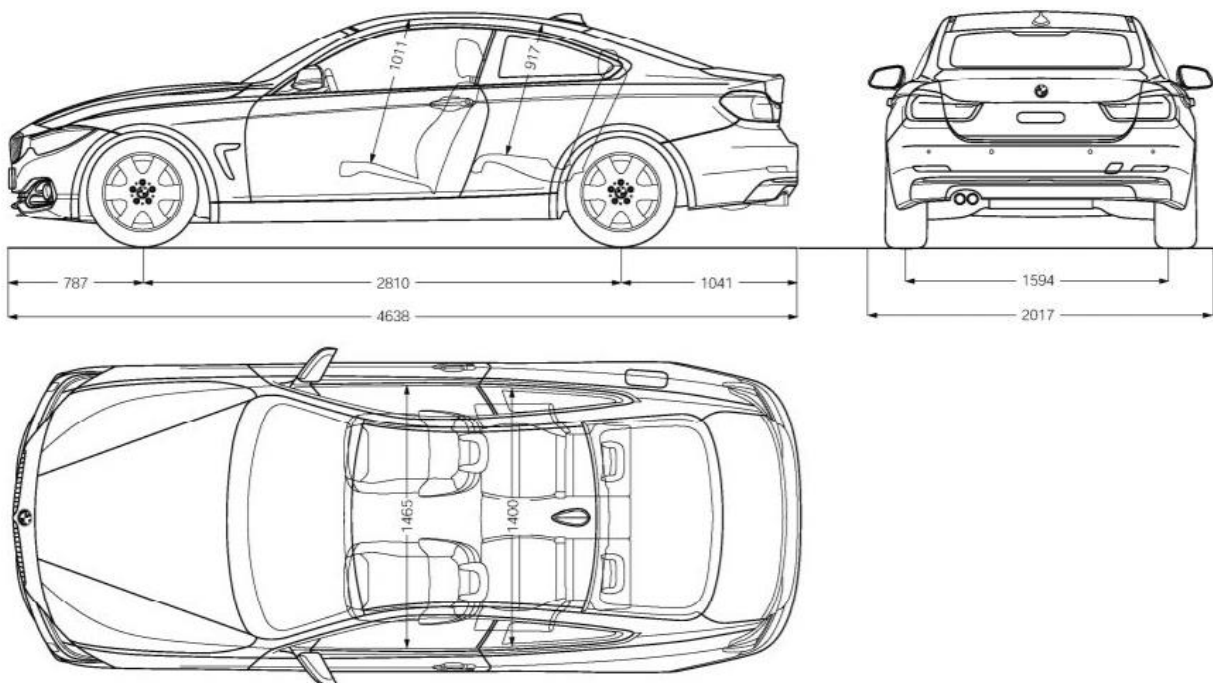
Slika 1.1 prikazuje fizički model Ahmedovog tijela u zračnom tunelu. Može se jasno vidjeti kako zrak struji oko modela.



Tijelo ima točno definirane dimenzije koje su prikazane na Slika 4.2. Na nakošenom zadnjem dijelu tijela, naglo se mijenjaju koeficijenti otpora i uzgona kod nagiba  $\phi=30^\circ$ . Taj nagib se također naziva i kritičan nagib. Usporedba sa modelom kojeg simuliramo prikazano je na slici 4.3.



Slika 4.2. Dimenzije Ahmedovog tijela [8]

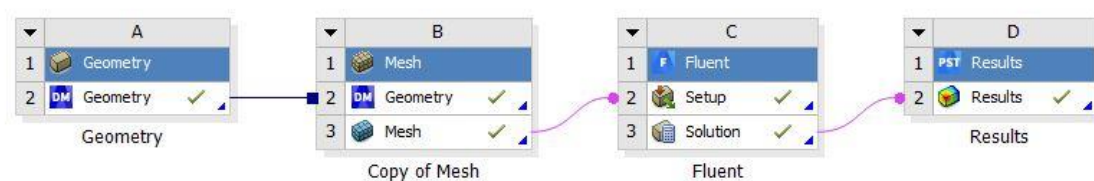


Slika 4.3. Dimenzije BMW Serije 4 Grand Coupe [10]

## 5. IZRADA SIMULACIJE

Program koji se koristi za simulaciju naziva se Ansys. To je softverski paket čija namjena je analiza konačnih elemenata koji se koristi za simulaciju inženjerskih problema. Simuliraju se interakcije raznih fizikalnih pojava kao što su statička analiza, elastična, plastična, termalna naprezanja, dinamička analiza i slično. Ansys je vrlo efikasan u predviđanju mogućih problema, za to koristi 3D simulaciju u virtualnom okruženju. Upravo zbog svoje efikasnosti, vrlo je popularan u raznim industrijama, neke od njih su zrakoplovna, industrija za poluvodiče, automobilska industrija. Jedan od glavnih proizvoda tvrtke je softver Ansys Workbench. Pomoću tog programa se veće strukture raščlanjuju na manje komponente, te se svaka od njih pojedinačno modelira i testira.

Ansys Workbench podijeljen je u 4 faze, a to su redom: Geometry, Mesh, Fluent i Results.



Slika 5.1. Tok rada u Ansys Workbench-u

## 5.1 Geometrija

Ansys nudi programe kao što su DesignModeler i Space Claim u kojima se može izraditi 3D model, ali u praksi se ti modeli češće izrađuju u nekim poznatijim programima za 3D modeliranje. Za potrebe ovog završnog rada 3D model je bio izrađen u programu Solidworks, koje se kasnije prebacio u program SpaceClaim.

K-epsilon ( $k-\epsilon$ ) model koji je jedan od najčešće korištenih modela za CFD simulacije. Sastoji se od dvije jednačbe koje opisuju turbulenciju, te se dobivaju rezultati za turbulentnu kinetičku energiju ( $k$ ) i disipaciju turbulentne kinetičke energije ( $\epsilon$ ).

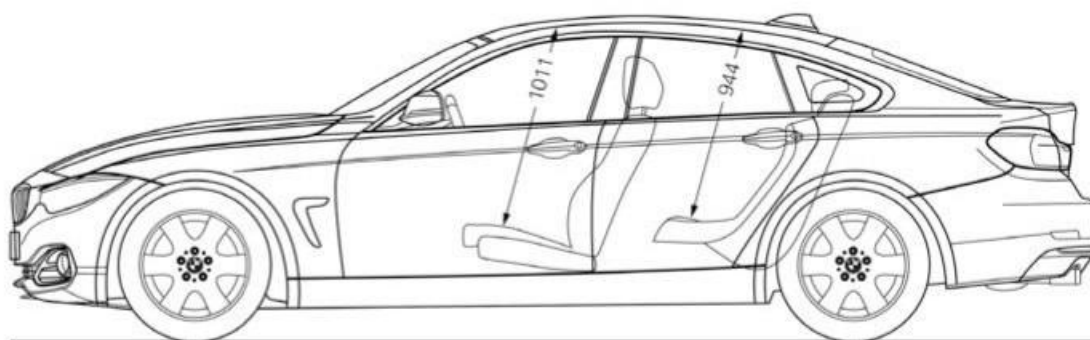
Još neki od turbulentnih modela su: k-omega ( $k-\omega$ ) model te Spalart-Allmaras model. Prvim modelom se dobivaju rješenja za turbulentnu kinetičku energiju ( $k$ ) i specifičnu brzinu disipacije ( $\omega$ ), dok se drugi model posebno razvio za primjene u zrakoplovstvu, njime se dobivaju rješenja jedne jednačbe za modificiranu vrtložnu viskoznost. [9]

Automobil koji se analizira trebao je prema uputama imat oblik tijela koji se zove Fastback. Odabrana je geometrija automobila BMW serije 4 Grand Coupe (2018.), čiji nacrti su bili preuzeti sa službenih stranica [10]. Slika 5.2 nam prikazuje automobil koji za jednostavniju analizu, mora biti pojednostavljen. Usporedimo li Sliku 5.3 i 5.4 možemo vidjeti pojednostavljenja. Preoblikovani ili uklonjeni su neki dijelovi poput bočnih retrovizora, kotača, prednji i zadnji odbojnik. Linija prednjeg dijela, krova i zadnjeg je ostala ista, ali su zaobljeni prijelazi, tj. sve izgleda kao da je napravljeno iz jednog komada.



*Slika 5.2. BMW serija 4 Grand Coupe (2018.) [11]*

Usporedba modela može se vidjeti na Slika 5.3. i Slika 5.4.



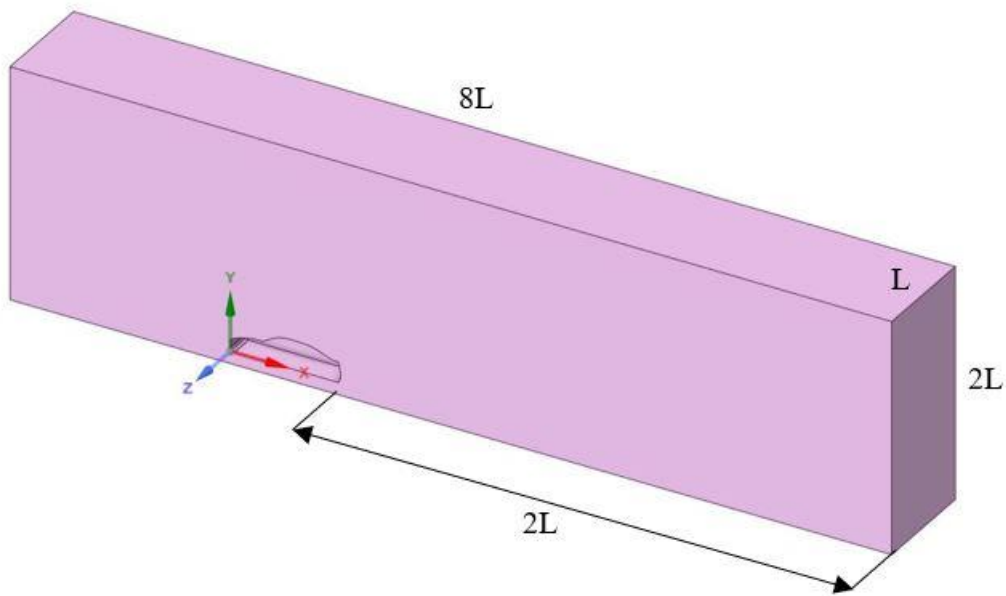
*Slika 5.3. Bočni prikaz realnog automobila [10]*



*Slika 5.4. Bočni prikaz pojednostavljenog 3D modela*

Za potrebe simulacije, prema uputama model se postavlja u prostor koji ima točno definirane dimenzije. Taj prostor se naziva domena, koja se definira u programu SpaceClaim.

Na Slici 5.5. prikazan je prostor, pri čemu se  $L$  odnosi na duljinu automobila. U ovom slučaju duljina automobila iznosi 4,5 metara, iz čega slijedi da je ukupna duljina prostora 36 metara, visina prostora 9 metara, te širina 4,5 metara. Kako se radi o simetričnom problemu, da bi se smanjilo vrijeme trajanja simulacije, koristilo se samo pola domene.

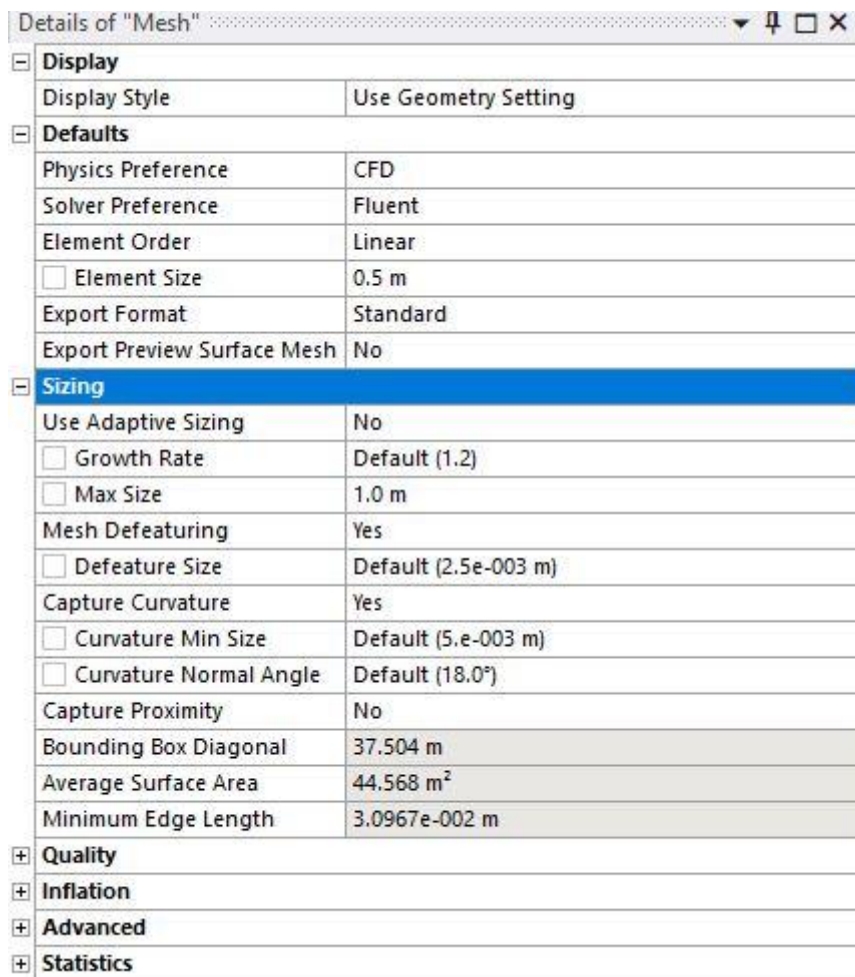


Slika 5.5. Prikaz domene u programu SpaceClaim

## 5.2 Numerička mreža

Slijedeći korak CFD analize je izrada numeričke mreže. Ovaj vrlo važan korak je ključan za dobivanje valjanih rezultata. Mreža se sastoji od raznih malih ćelija, one su 3D volumenipovršine u kojima se izračunavaju varijable poput tlaka i brzine. Kako bi ova analiza bila uspješnija i kvalitetnija, u programu DesignModeler dodaje se još jedno tijelo pravokutnog oblika, zbog boljeg ugušćenja na stražnjem dijelu automobila gdje se očekuje najkompleksnije strujanje. Nakon toga otvaramo program Meshing, u kojem smo izmijenili neke parametre. Morali smo voditi računa o tome da model mora imati manje od 500 000 elemenata, jer je taj broj ograničen našom studentskom verzijom programa Fluent, kojeg koristimo kasnije za simulacije.

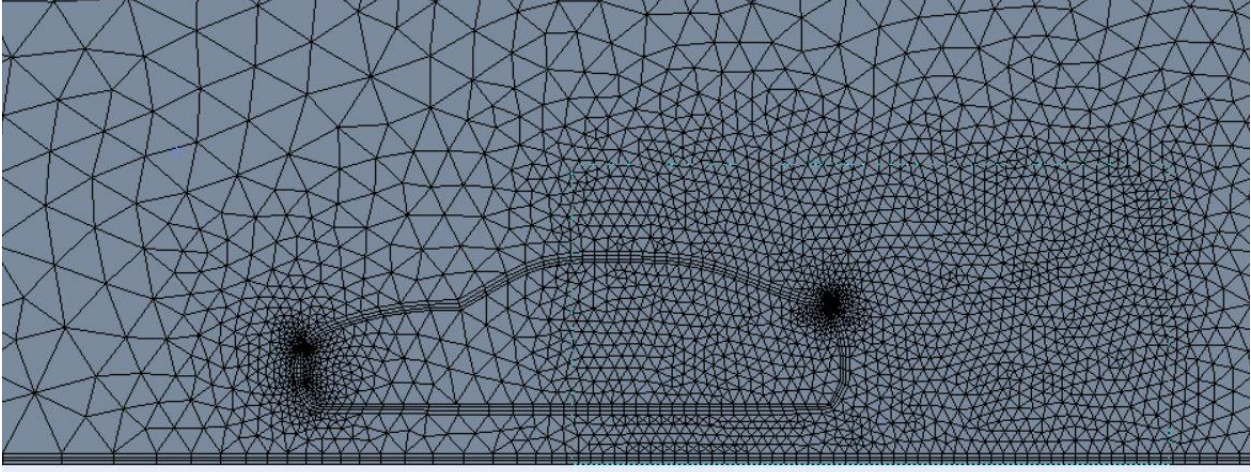
Kako bi zadovoljili navedeni uvjet, postavili smo Element size na 0.5 m, te Max size na 1 m. Prije spomenuto tijelo pravokutnog oblika, označujemo kao body of influence.



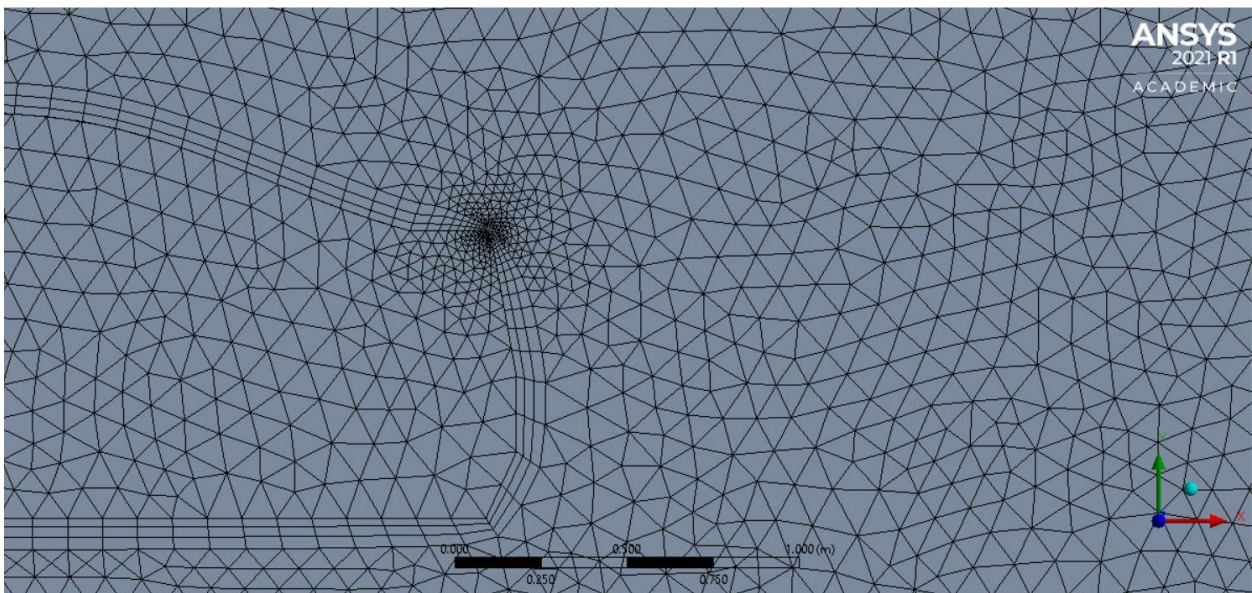
Details of "Mesh"	
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	0.5 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
<input type="checkbox"/> Max Size	1.0 m
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (2.5e-003 m)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (5.e-003 m)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	37.504 m
Average Surface Area	44.568 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	3.0967e-002 m
<b>Quality</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	

Slika 5.6. Postavke u programu Meshing

Kada smo izmijenili navedene parametre, dobili smo model koji sadrži 466 573 elemenata, te ga možemo bez poteškoća otvoriti u programu Fluent. Model nakon izmjena izgleda kao na Slici 5.7., gdje jasno možemo vidjeti ćelije, i ugušćenje izazvano dodatnim tijelom.



*Slika 5.7. Ugušćenje mreže*



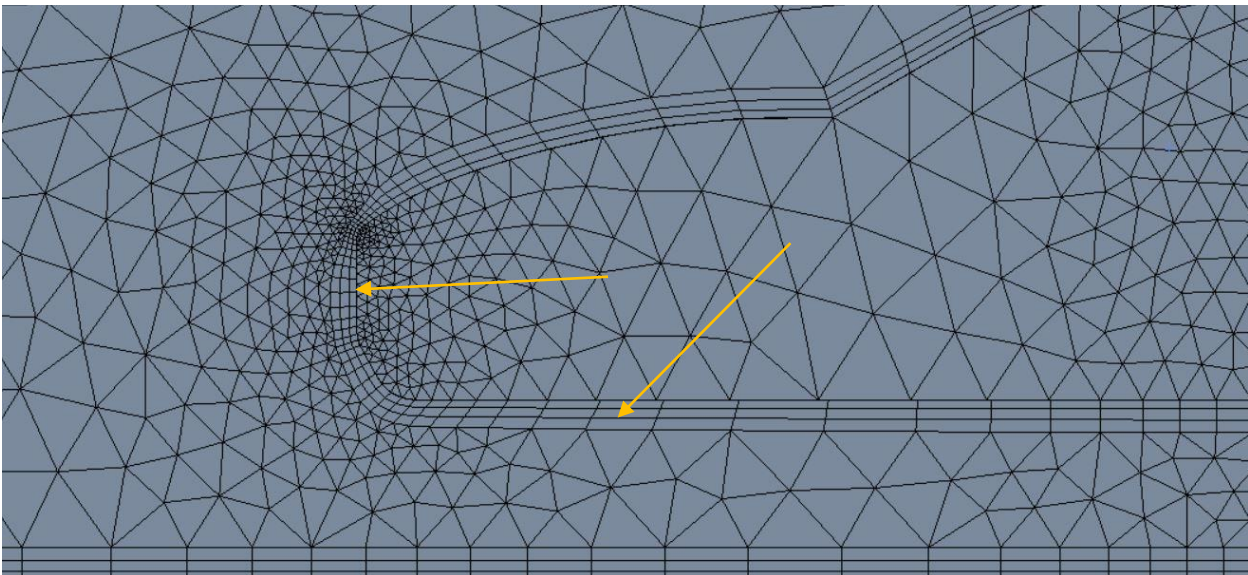
*Slika 5.8. Detalj gušće mreže*



Kako bi bolje opisali nagle promjene koje se događaju uz površinu automobila, definiramo granični sloj (*eng. Boundary layer*). On se postavlja na površine koje opisuju geometriju automobila. Uz stijenku automobila sada se nalaze 3 nova sloja numeričke mreže koja prate oblik automobila. Debljinu prvog sloja možemo vidjeti na slici 5.10. i ona iznosi 0,025 m, dok na slici 5.10. možemo uočiti 3 nova sloja.

Details of "Inflation" - Inflation	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	15 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
<input checked="" type="checkbox"/> First Layer Height	2.5e-002 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	3
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre

Slika 5.9. Postavke graničnih slojeva



Slika 5.10. Granični slojevi

### 5.3 Rubni uvjeti

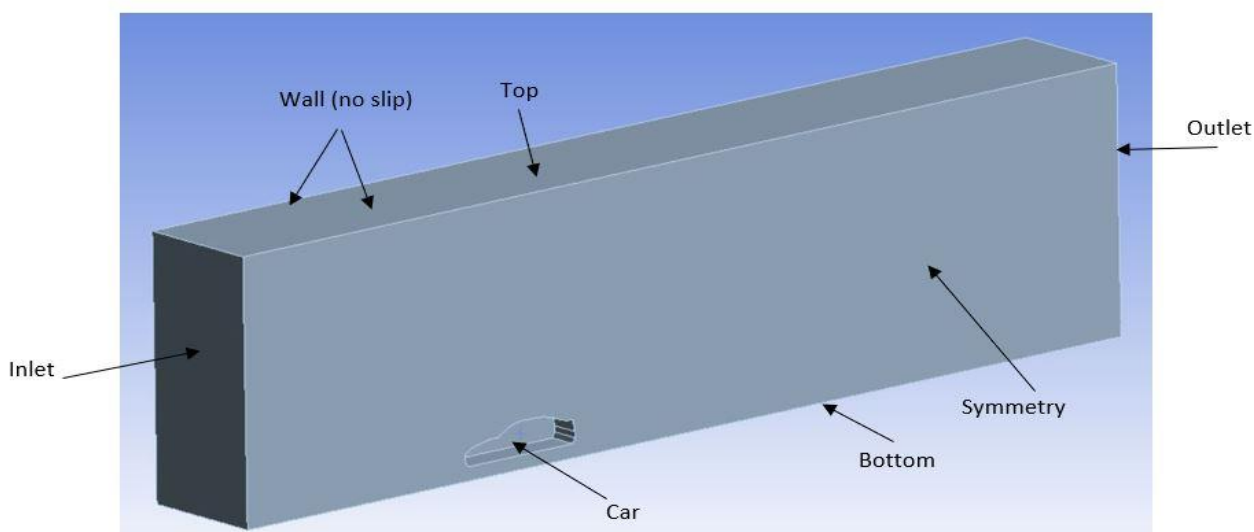
Prije same CFD analize, potrebno je definirati rubne uvjete. Oni su dio jednadžbi koje izračunava sam program, te bez njih nije moguće dobiti valjanu simulaciju. Rubne uvjete koji se koriste na prostoru u kojem smo smjestili pojednostavljen model BMW-a serije 4, prikazani su na Slici 5.5., a to su:

Wall – granica fluida i krutog područja (koristi se no-slip uvjeti, ali korisnik može promijeniti tangencionalnu brzinu komponente ili može odabrati slip uvjete)

Symmetry – zrcalni sistem, pojednostavljuje simulaciju u slučaju kada su domena i model simetrični (slučaj u ovom radu).

Inlet – opisuje ulazak fluida u domenu, može biti velocity inlet za brzinu ili pressure inlet za određeni tlak. Definiraju se vektori i skalarne veličine, odnosno njihove postavke.

Outlet- opisuje izlazak fluida iz domene, također može biti za brzinu ili za određeni tlak. Definira se statički tlak na izlazu.



Slika 5.11. Rubni uvjeti

<u>NAZIV POVRŠINE</u>	<u>RUBNI UVIJET</u>
bočne stranice	Symmetry
donja stranica	Wall
prednja stranica	Velocity inlet
zadnja stranica	Pressure outlet
površina automobila	Wall

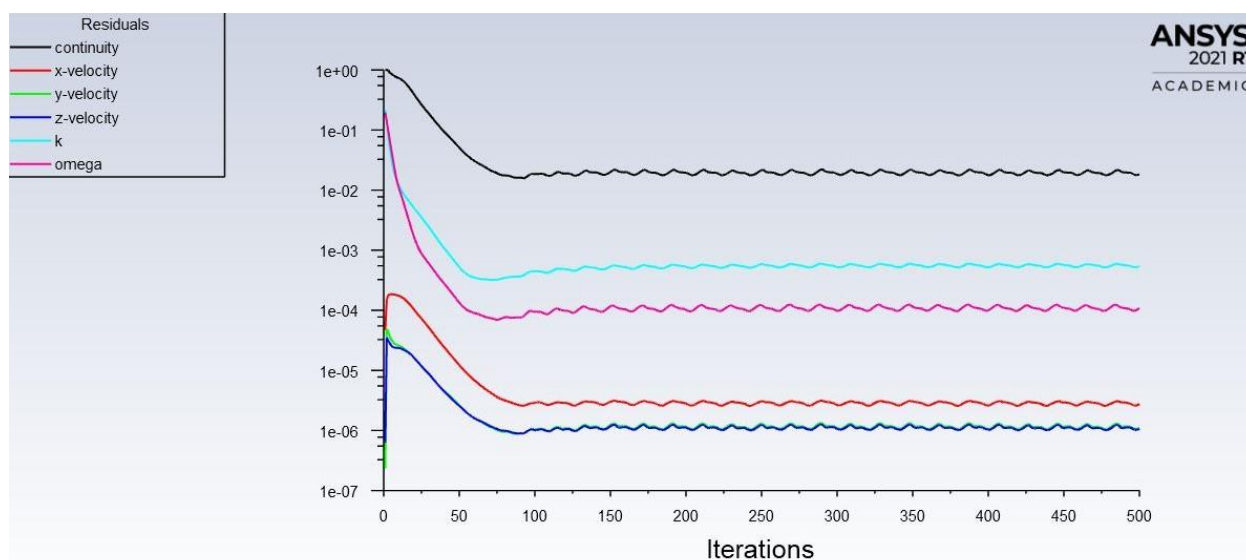
*Slika 5.12. Tablica rubnih uvjeta*

## 5.4 Simulacija

Simulacija prethodnog modela za koji smo definirali geometriju te njegovu numeričku mrežu, odvija se u programu Fluent, koji je dio paketa programa Ansys. Prilikom otvaranja biramo opciju poput Solver processa koji radi studentske verzije možemo staviti na 4, odnosno računalo će za simulaciju koristiti maksimalno 4 jezgre procesora računala. Također, za točnija rješenja biramo i opciju double precision koja nam omogućava točnija rješenja. U Fluent-u se mogu odabrati razni parametri poput modela strujanja ( $k-\epsilon$  model,  $k-\omega$ , itd.), ulazna brzina, uvjet ulazne brzine i slično. Odabire se model  $k-\omega$ , te fluid zrak, a Fluent samostalno prepoznaje rubne uvjete. Mijenjamo parametre na inletu, postavljamo željenu ulaznu brzinu koja je u ovom slučaju 10m/s odnosno 36 km/h. Na outletu podesimo da je na tom mjestu atmosferski tlak, dok kod ostalih rubnih uvjeta postavljamo trenje ako ga ono postoji. Rubni uvjet koji ima trenje je automobil, jer je on prepreka fluidu, dok područje iza automobila nema trenja. Nakon definiranih uvjeta, potrebno je napraviti inicijalizaciju. U postavkama inicijalizacije odabiremo standardnu inicijalizaciju, te da se podaci preuzimaju s inleta. Brzina na inletu nam je 10 m/s, te se ona nalazi na x osi. Nakon inicijalizacije pokrenemo postupak iteracije, kojim dobivamo približno rješenje. Što je broj iteracija veći, to je rješenje točnije.

## 6. REZULTATI

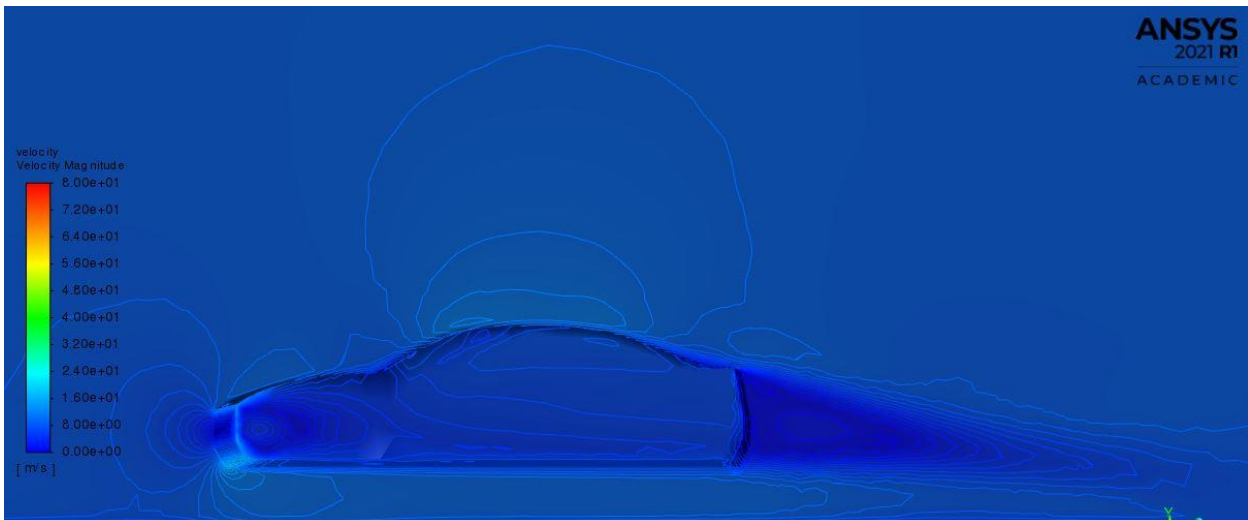
Obilježja koja promatramo u ovim simulacijama su konture brzine, vektora brzine, dinamičkog tlaka, totalnog tlaka i statičkog tlaka, pri odabranim brzinama od 10, 20, 35 i 50 m/s. Navedene brzine u km/h su otprilike redom 36, 72, 126 i 180. Fluid kojim simuliramo je zrak, a rubni uvjeti su prepoznati iz ranijeg programa gdje smo ih definirali. Simulaciju smo pustili kroz 500 iteracija, što se može vidjeti na Slici 6.1.



Slika 6.1 Graf konvergencije

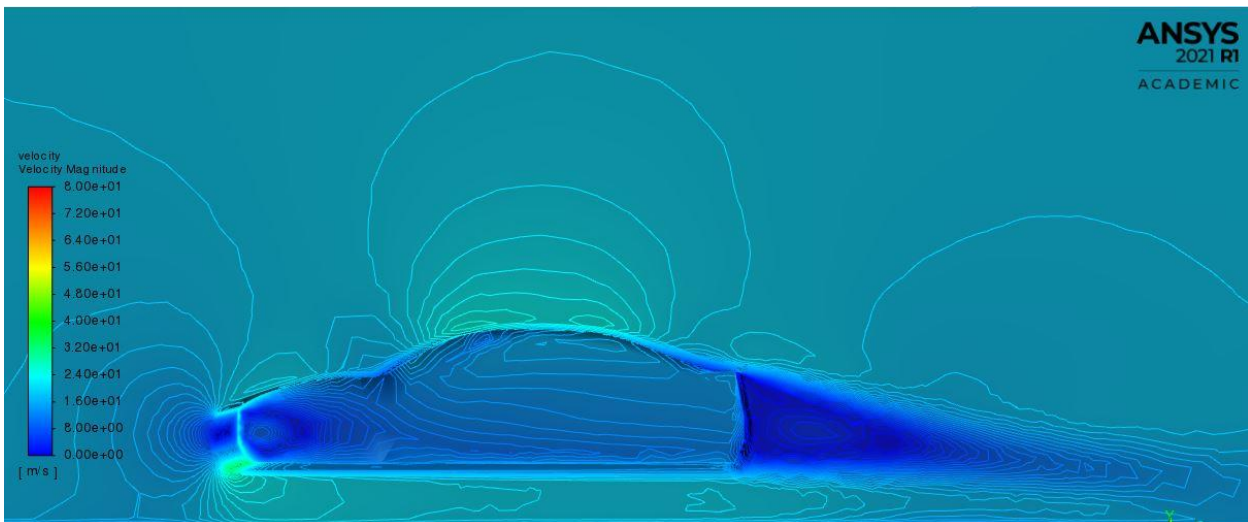
## 6.1 Usporedba promjene kontura brzina s promjenom brzine

Brzina 10 m/s



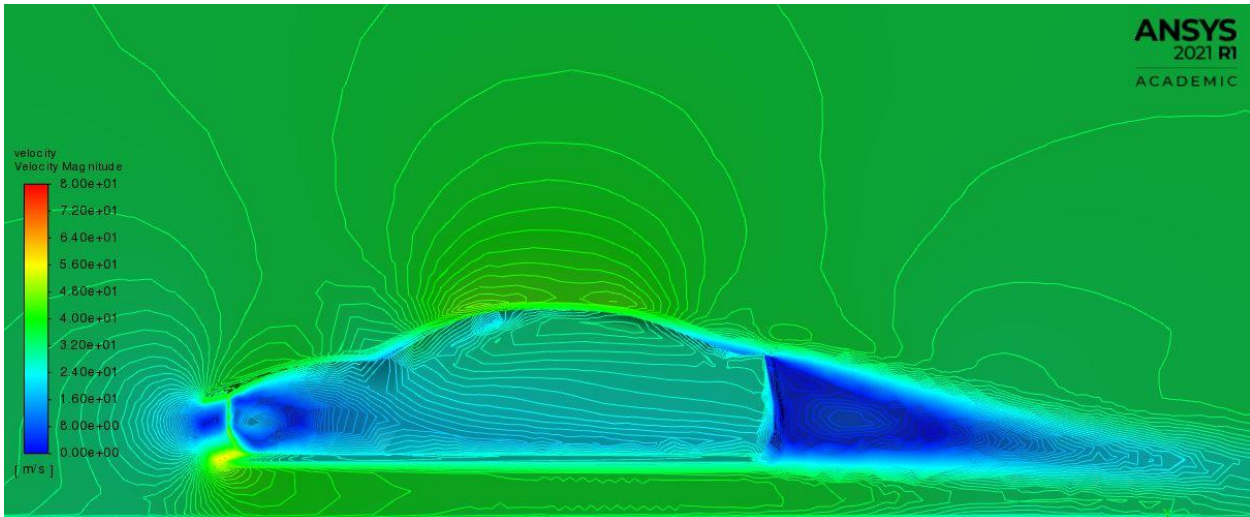
Slika 6.2. Kontura brzina za 10 m/s

Brzina 20 m/s



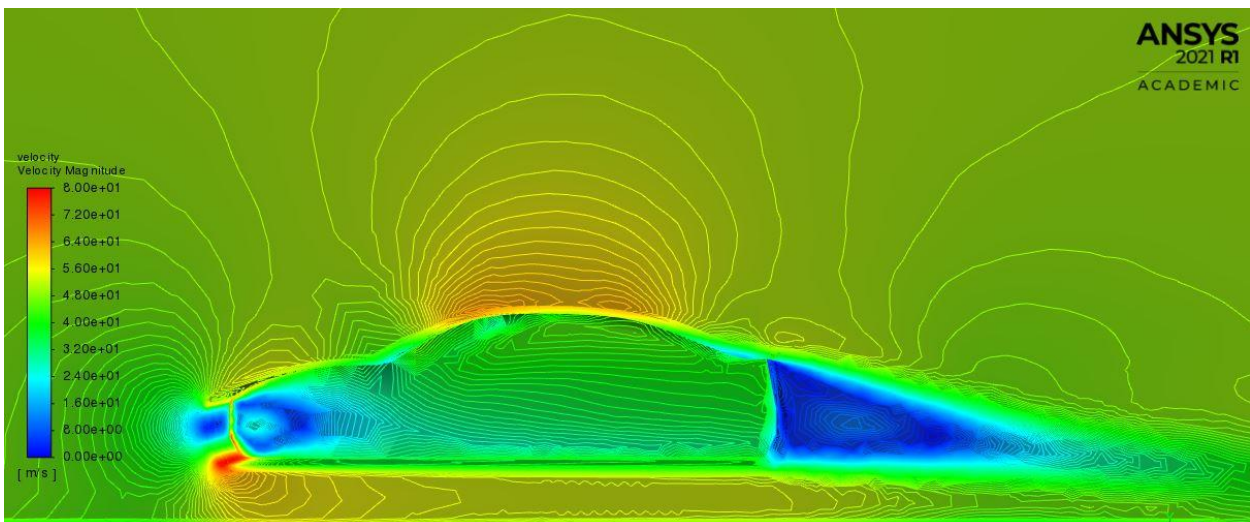
Slika 6.3. Kontura brzina za 20 m/s

Brzina 35 m/s



Slika 6.4. Kontura brzina za 35 m/s

Brzina 50 m/s

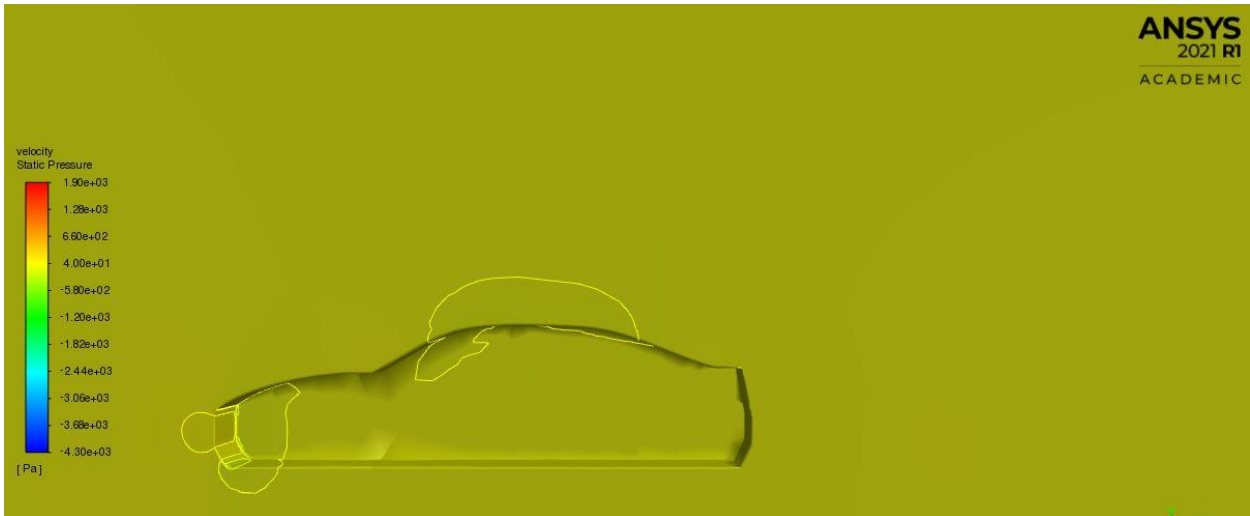


Slika 6.5. Kontura brzina za 50 m/s

Za sve slike postavili smo zadano područje od 0 m/s do 80 m/s, kako bi dobili različite boje ovisno o brzinama. Usporedimo li sliku 6.2 i sliku 6.5, odnosno brzinu od 10 m/s i 50 m/s, možemo uočiti razliku u boji. Ta razlika nam govori da je strujanje na brzini od 50 m/s dosta više, odnosno kako smo povećavali brzinu tako se povećalo i strujanje zraka oko automobila.

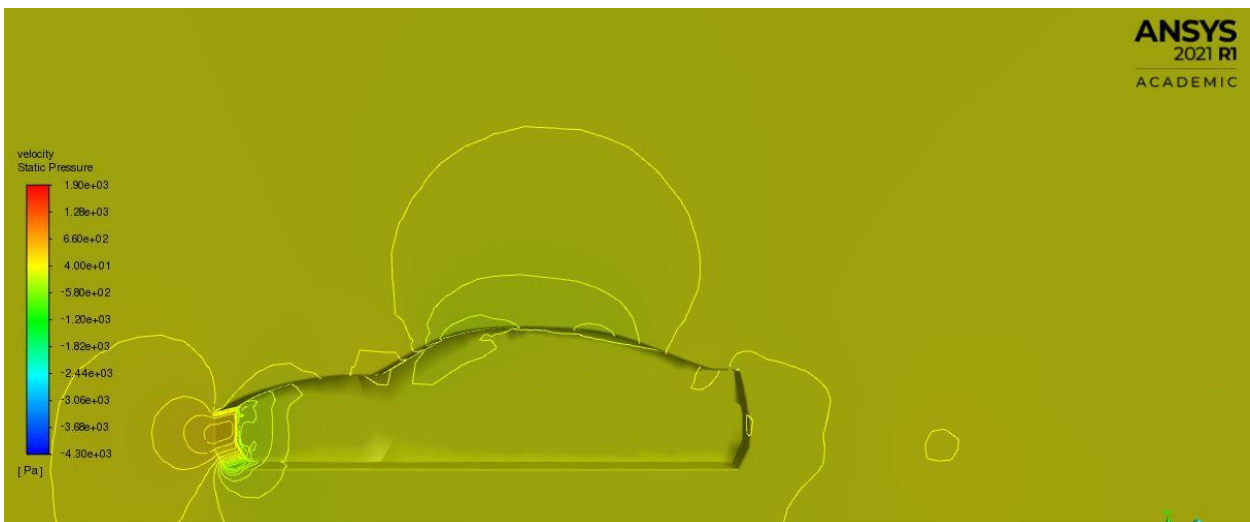
## 6.2 Usporedba rezultata statičkog tlaka s promjenom brzine

Brzina 10 m/s



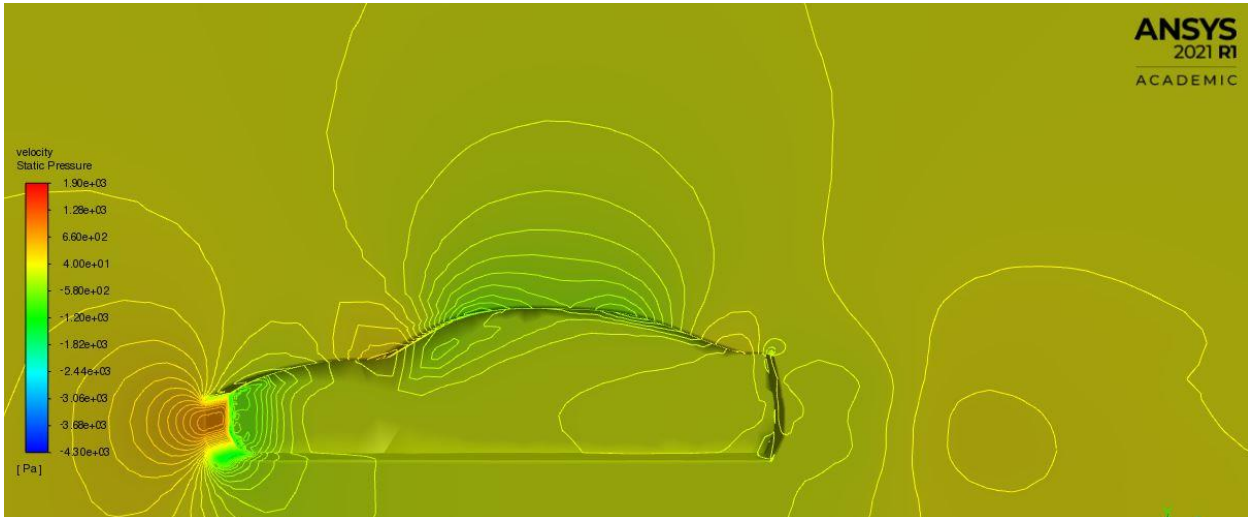
*Slika 6.6 Kontura statičkog tlaka za brzinu 10 m/s*

Brzina 20 m/s



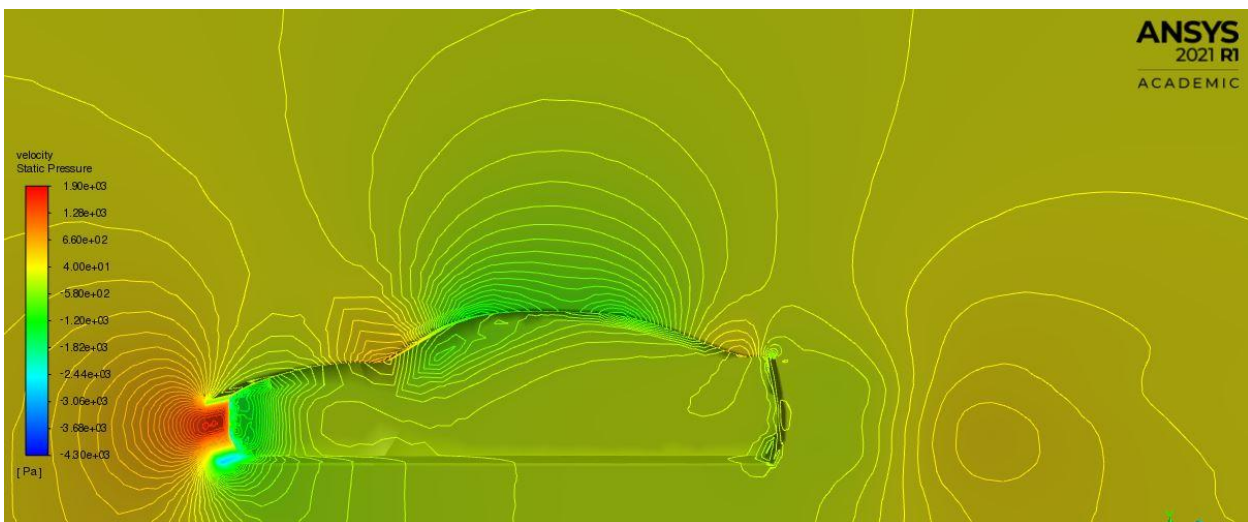
*Slika 6.7 Kontura statičkog tlaka za brzinu 20 m/s*

Brzina 35 m/s



*Slika 6.8 Kontura statičkog tlaka za brzinu 35 m/s*

Brzina 50 m/s



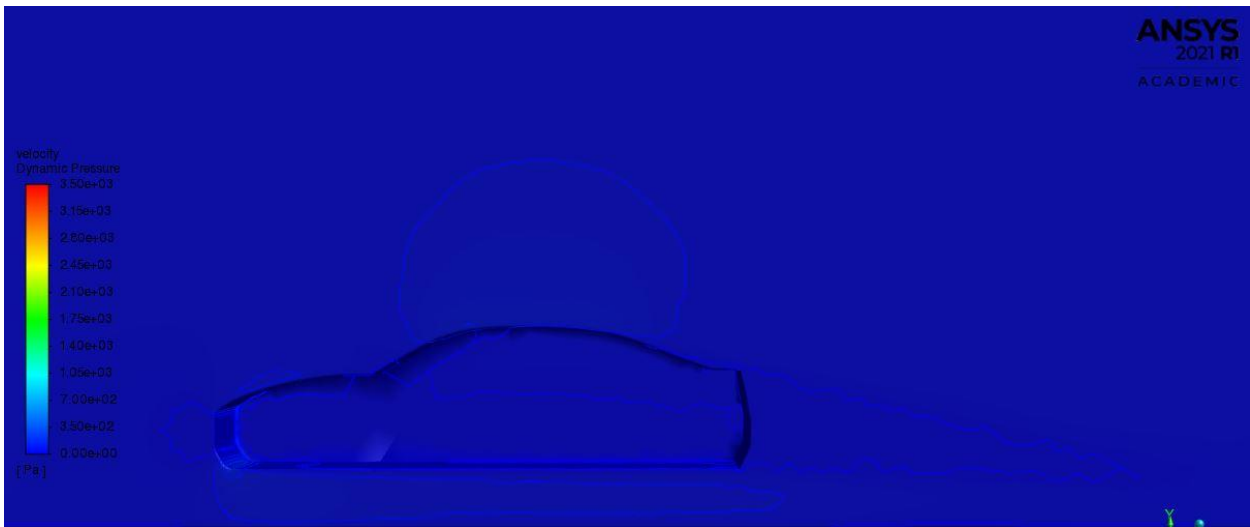
*Slika 6.9 Kontura statičkog tlaka za brzinu 50 m/s*

Pogledamo li sliku 6.9, možemo uočiti da je veliki intenzitet statičkog tlaka. On je vezan na ulaznu brzinu, pa tako njenom promjenom se mijenja i intenzitet tlaka. Ukratko, povećanjem brzine, povećava se i statički tlak, te njegovo područje oko automobila.



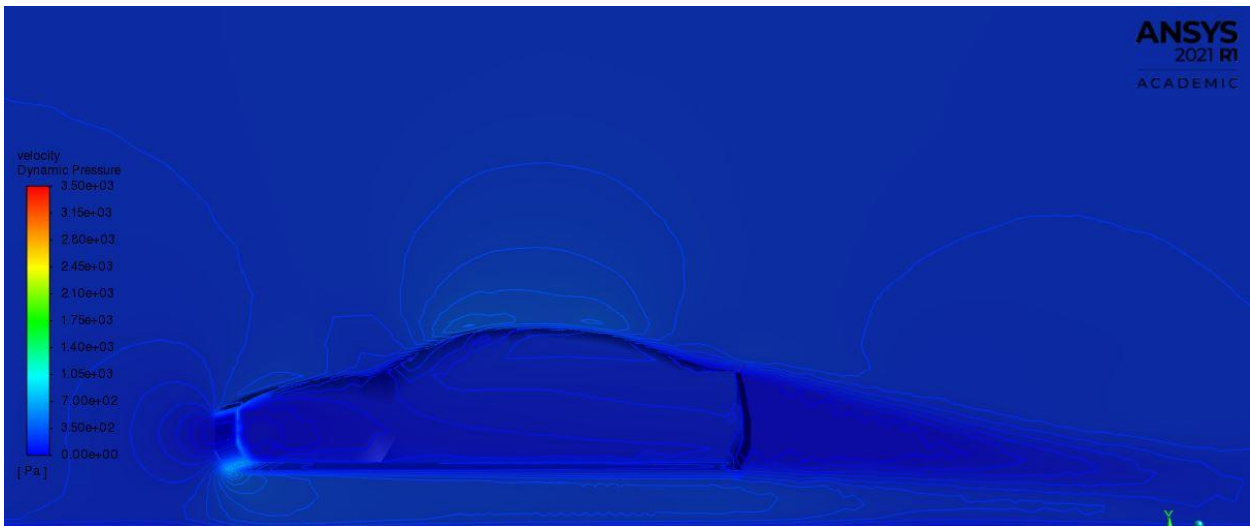
### 6.3 Usporedba rezultata dinamičkog tlaka s promjenom brzine

Brzina 10 m/s



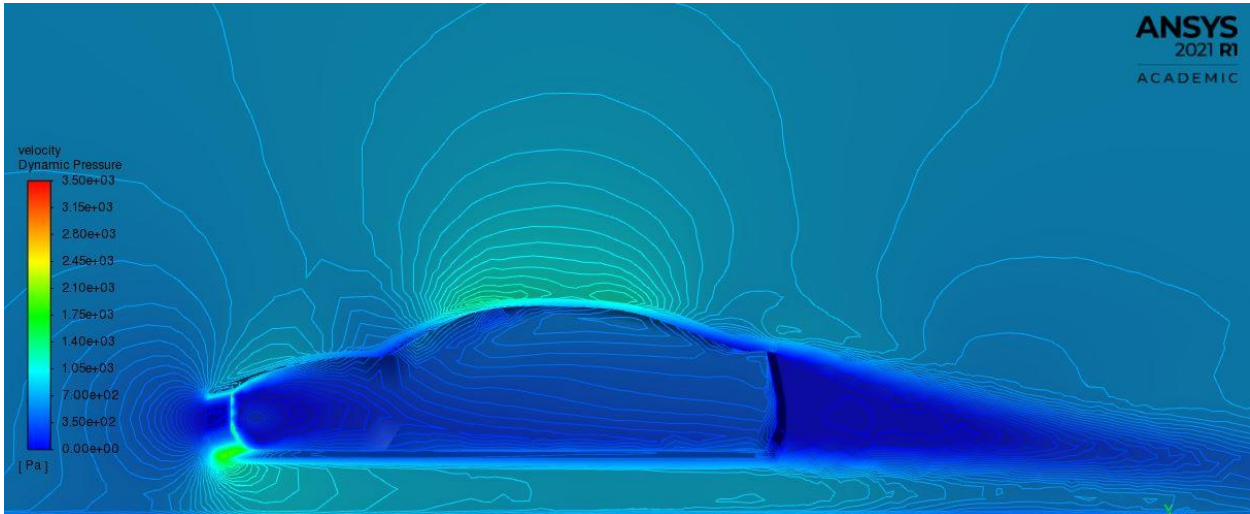
*Slika 6.10 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 10 m/s*

Brzina 20 m/s



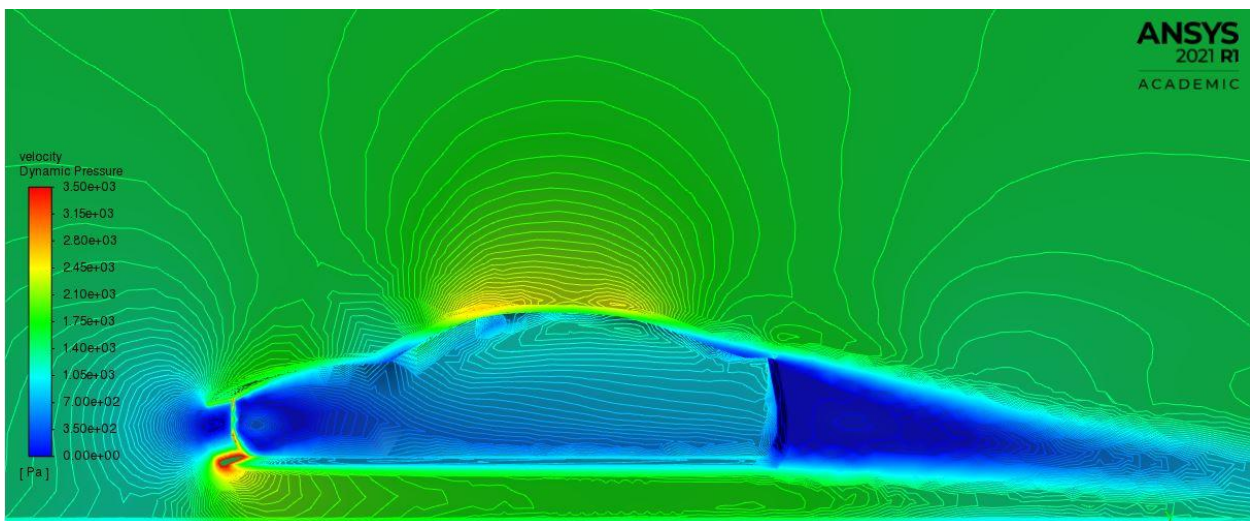
*Slika 6.11 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 20 m/s*

Brzina 35 m/s



*Slika 6.12 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 35 m/s*

Brzina 50 m/s

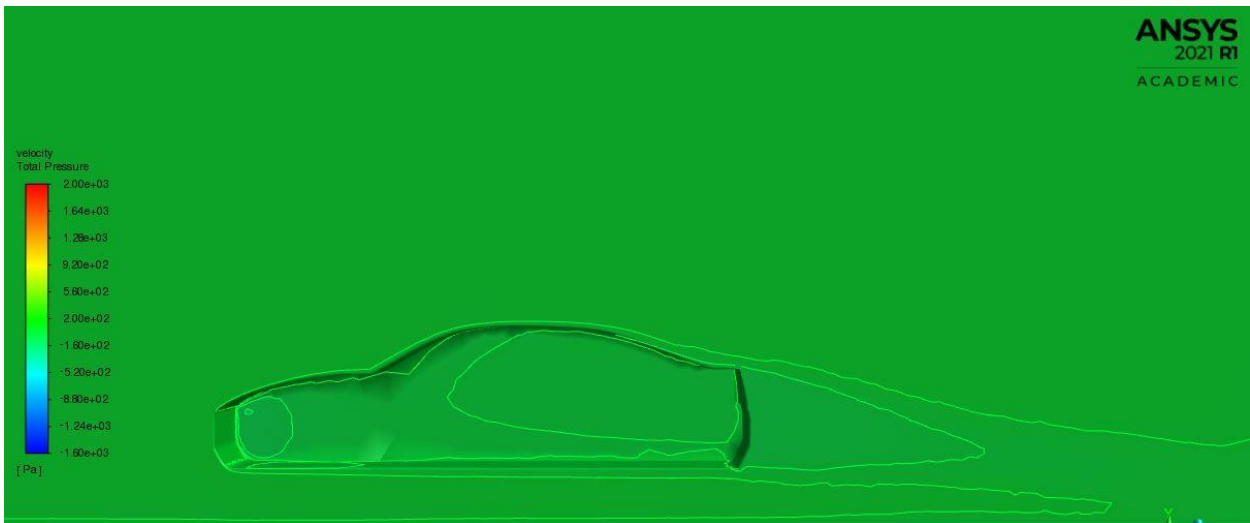


*Slika 6.13 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 50 m/s*

Možemo povući poveznicu sa obilježjem statičkog tlaka, drugim riječima dinamički tlak se povećava sa brzinom, zajedno sa područjem oko automobila na kojem on djeluje.

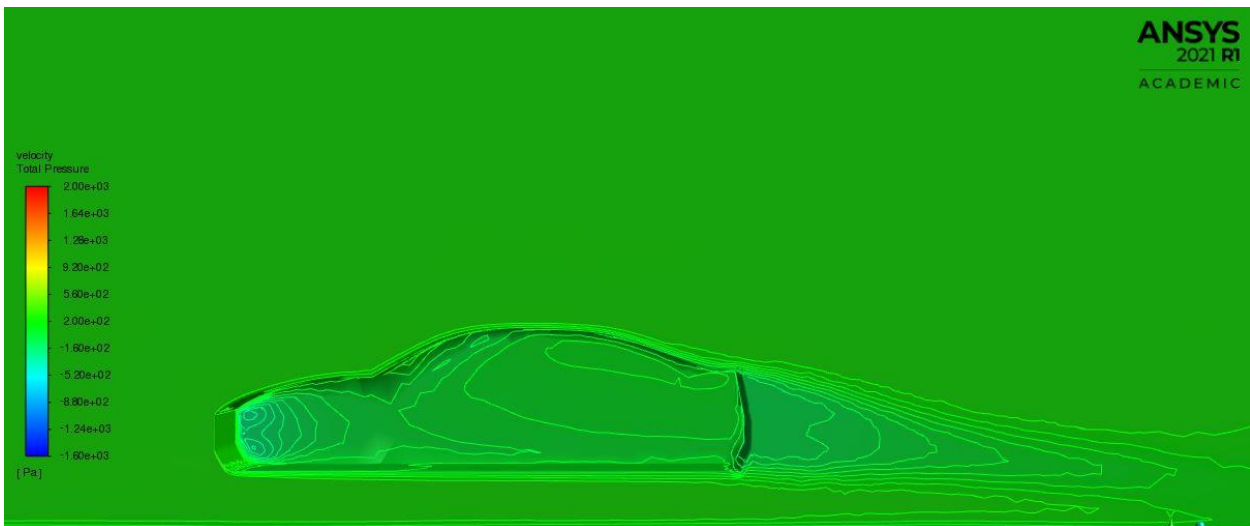
## 6.4. Usporedba totalnog tlaka s promjenom brzine

Brzina 10 m/s



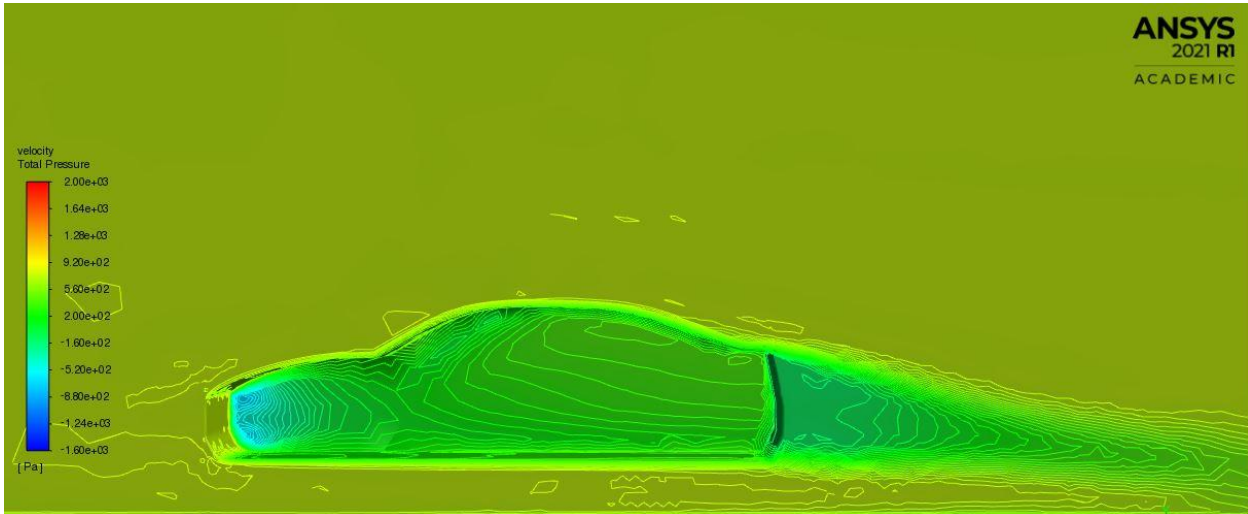
*Slika 6.14 Kontura totalnog tlaka za brzinu 10 m/s*

Brzina 20 m/s



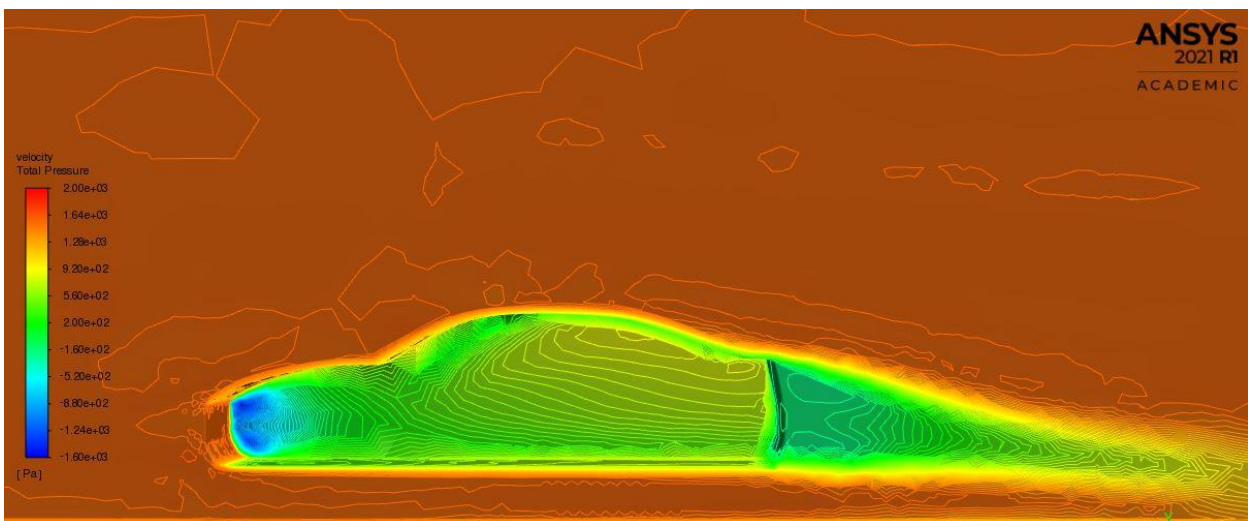
*Slika 6.15 Kontura totalnog tlaka za brzinu 20 m/s*

Brzina 35 m/s



*Slika 6.16 Kontura totalnog tlaka za brzinu 35 m/s*

Brzina 50 m/s

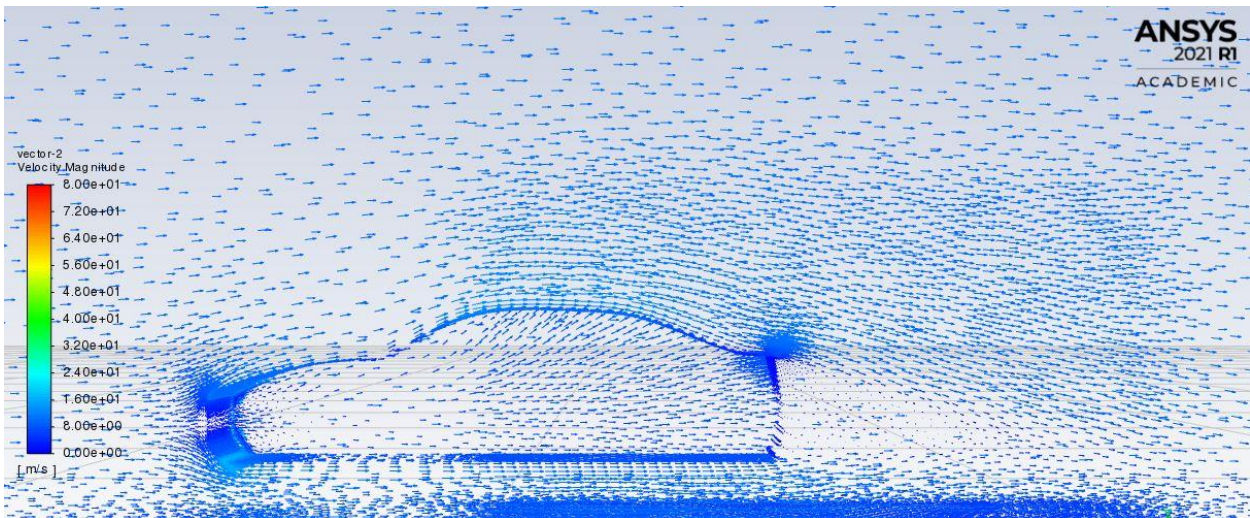


*Slika 6.17 Kontura totalnog tlaka za brzinu 50 m/s*

Totalni tlak je zbroj dinamičkog i statičkog. Tlak se također kao kod dinamičkog i statičkog tlaka povećava sa povećanjem ulazne brzine. Razlika je u tome što totalni tlak može poprimiti i negativnu vrijednost, negativan tlak. Takav tlak je manji od atmosferskog i možemo ga uočiti na prednjem dijelu automobila, u plavim nijansama.

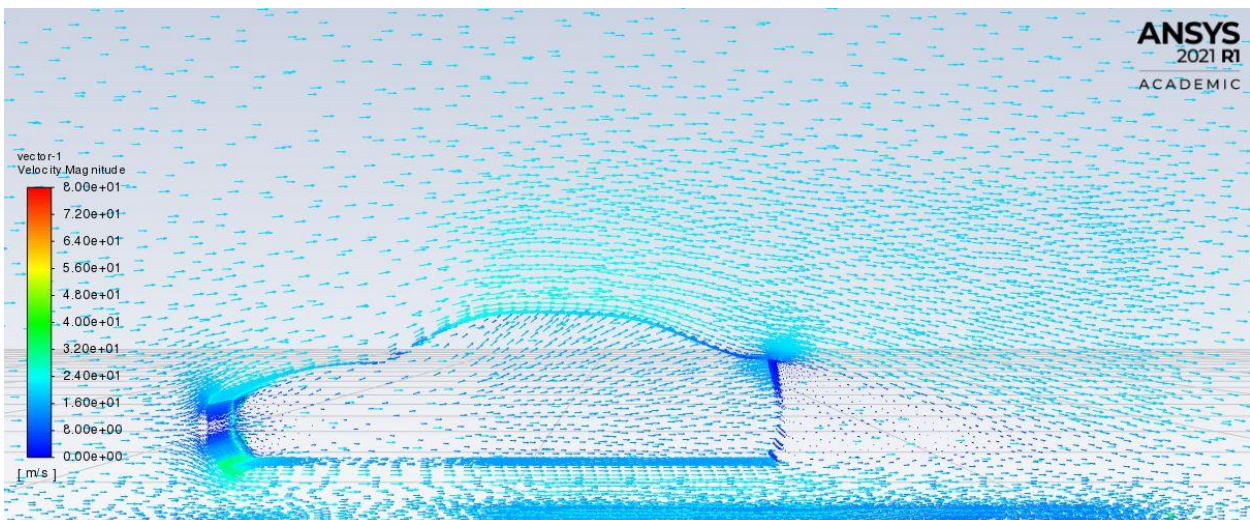
## 6.5 Usporedba vektora brzina s promjenom brzine

Brzina 10 m/s



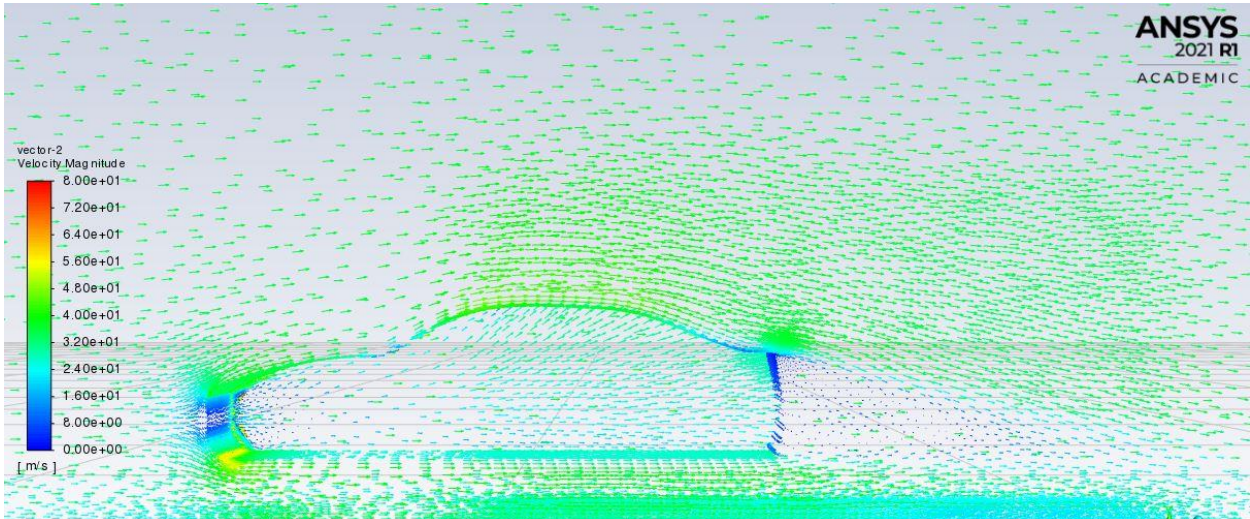
Slika 6.18 Vektori brzine za 10 m/s

Brzina 20 m/s



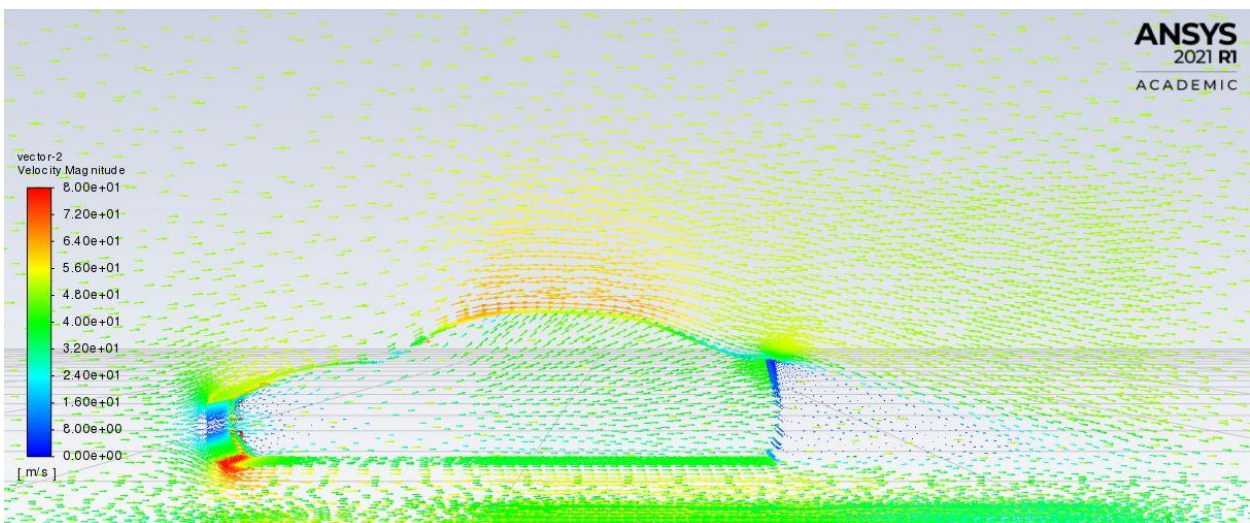
Slika 6.19 Vektori brzine za 20 m/s

Brzina 35 m/s



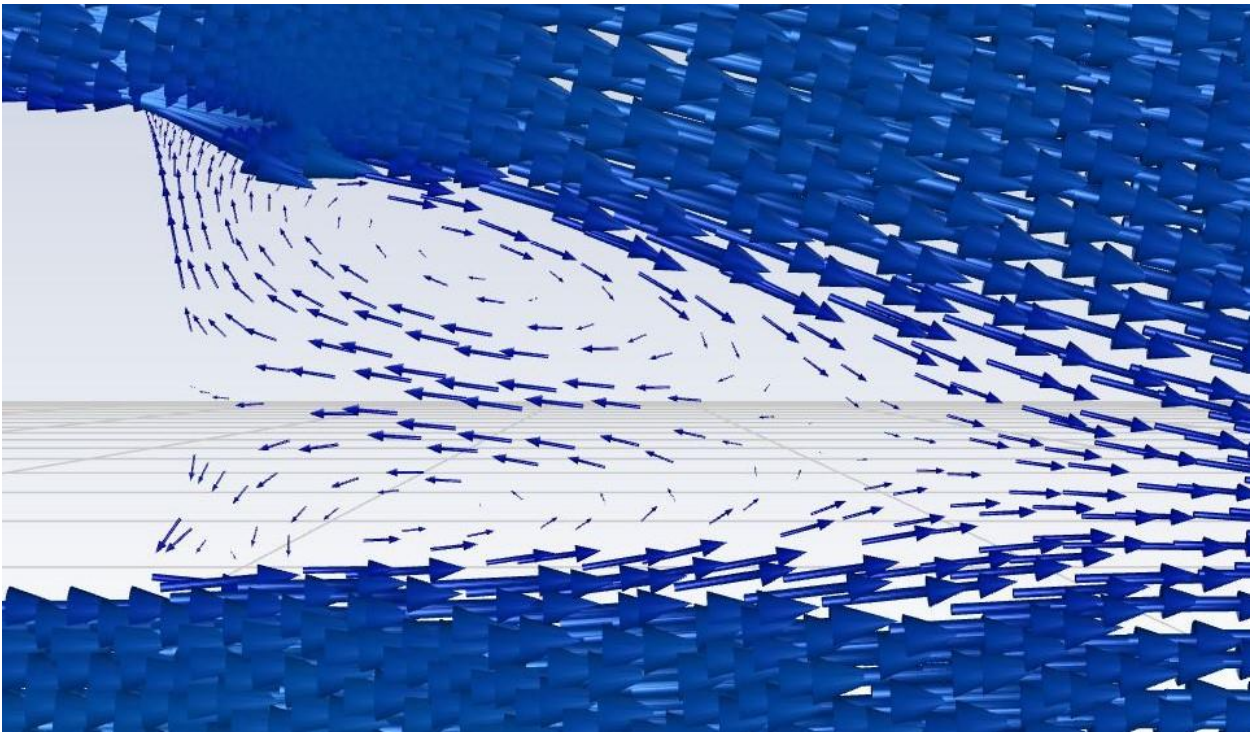
Slika 6.20 Vektori brzine za 35 m/s

Brzina 50 m/s

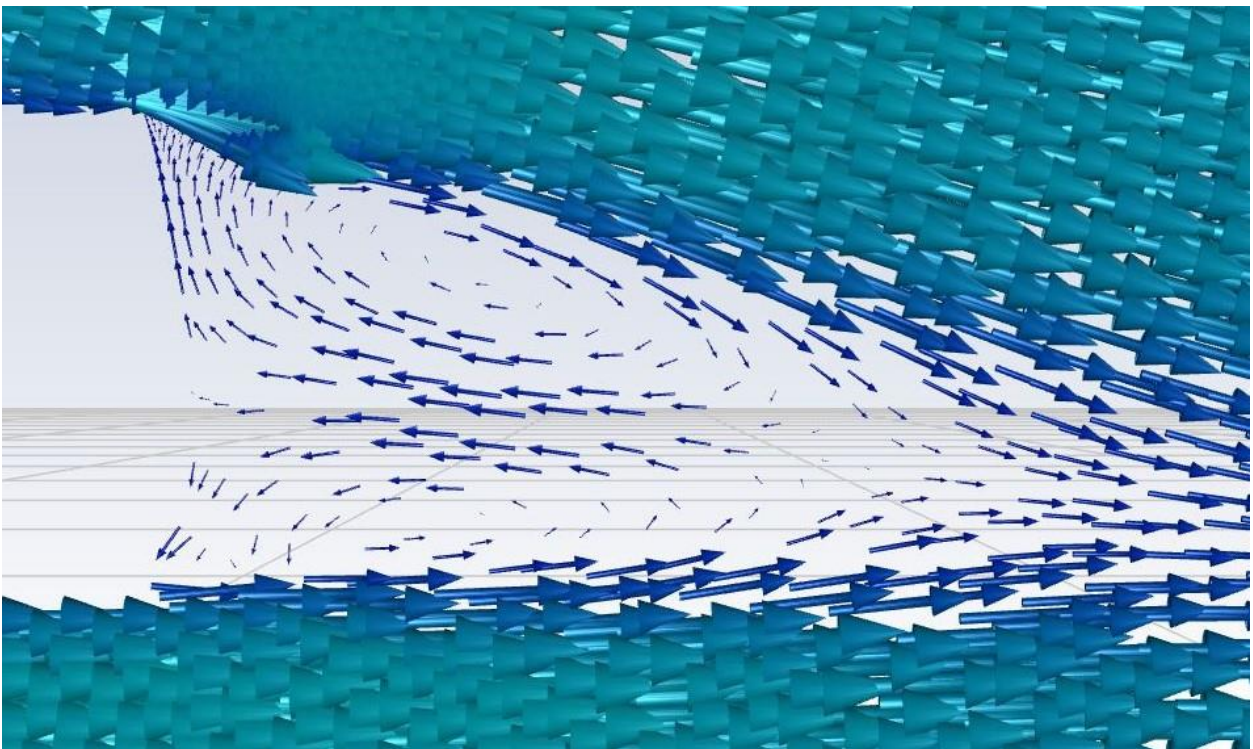


Slika 6.21 Vektori brzine za 50 m/s

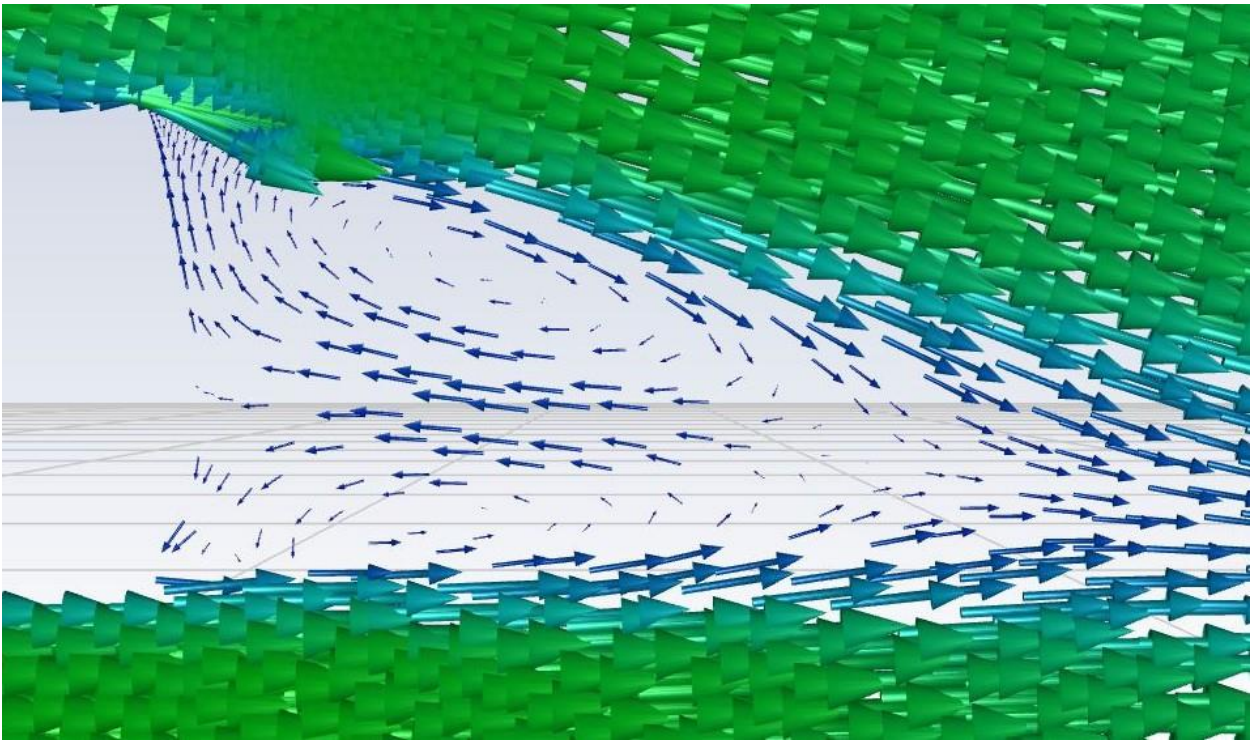
Strujanje zraka nam je prikazano u obliku vektora i vidimo kako se mijenja, odnosno poprima oblik automobila. Za sve brzine imamo zgušnjenja na istim dijelovima oko automobila, samo se mijenja brzina vektora ovisno o ulaznoj brzini. Na sljedećim slikama prikazani su detalji kako vektori izgledaju u recirkulacijskoj zoni.



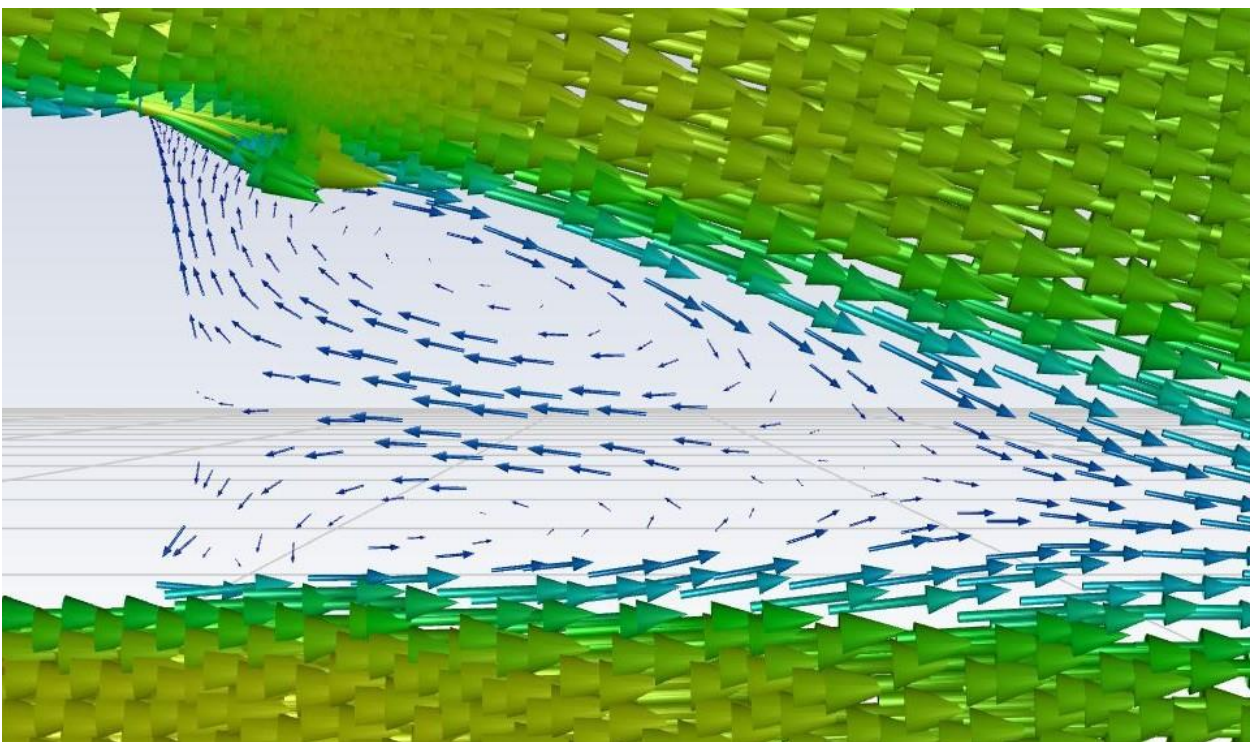
*Slika 6.22 Vektori brzine za 10 m/s (detalj)*



*Slika 6.23 Vektori brzine za 20 m/s (detalj)*



*Slika 6.24 Vektori brzine za 35 m/s (detalj)*



*Slika 6.25 Vektori brzine za 50 m/s (detalj)*



## 6.6 Usporedba koeficijenta otpora zraka

Prema simulaciji našeg pojednostavljenog modela, rezultat otpora zraka  $C_d$  iznosi približno 0.39. U specifikacijama proizvođača automobila BMW, za model koji smo simulirali, njihov službeni izmjereni  $C_d$  iznos 0.28. U našoj simulaciji zbog pojednostavljenja maknuli smo neka ključna svojstva i konture koje realni auto ima. Također treba uzeti u obzir da je opstrujavanje oko automobila složen proces, koji zahtjeva bolje postavke numeričke mreže i korištenje turbuletnih modela koji bi bolje opisali promatrano strujanje. Rezultat toga je veći  $C_d$ .

Cd	
car	0.3998556

Slika 6.26 Koeficijent otpora zraka

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu bio je zadatak napraviti CFD analizu pojednostavljenog modela automobila. Odabrani model za pojednostavljivanje bio je BMW serije 4. Za CFD analizu trebali smo odrediti domenu, numeričku mrežu i rubne uvjete. Programom Ansys dobili smo grafičke prikaze za statički, dinamički i totalni tlak, brzina, te vektore brzina. Rezultate smo usporedili na 4 proizvoljno odabrane brzine koje su bile 10, 20, 35 i 50 m/s. Isto tako smo izračunali i koeficijent otpora zraka, te smo ga usporedili sa koeficijentom realnog automobila. Razlika koeficijenata je bila značajna, jer smo pojednostavljivanjem uklonili neke linije automobila, te je automobil sa bočnih strana bio ravan, dok je u stvarnome svijetu 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] <https://www.femto.eu/stories/what-is-cfd/> , travanj 2017.
- [2] <https://www.cati.com/blog/2020/03/5-cfd-applications-for-automotive-simulations/> , ožujak 2020.
- [3] <https://newsroom.porsche.com/en/2020/technology/porsche-active-aerodynamics-911-turbo-s-20497.html> , travanj 2020.
- [4] <https://www.ozeninc.com/industry-solutions/tire-simulation/> , svibanj 2021.
- [5] [https://www.simscale.com/projects/Ali\\_Arafat/car\\_cabin\\_air\\_flow\\_analysis/](https://www.simscale.com/projects/Ali_Arafat/car_cabin_air_flow_analysis/) , prosinac 2015.
- [6] <https://ieeexplore.ieee.org/document/6397424> , siječanj 2013.
- [7] <https://www.electrichybridvehicletechnology.com/news/testing/battery-test-simulation-solves-thermal-challenges-of-electric-vehicle-fast-charging.html> , siječanj 2021.
- [8] [https://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed\\_body](https://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed_body)
- [9]“CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body“  
<https://www.iosrjournals.org/>
- [10] <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0142634EN/256334>
- [11] <http://autoratorz.blogspot.com/2018/06/2018-bmw-440i-gran-coupe.html> , lipanj 2018.

## 9. TABLICA SLIKA

Slika 3.1: Strujanje zraka oko Porsche-a 911 Turbo [3] .....	4
Slika 3.2: Gibanje vode na površini gume automobila [4] .....	5
Slika 3.3: Strujanje zraka u kabini automobila [5].....	6
Slika 3.4: Cirkulacija fluida u elektromotoru [6].....	7
Slika 3.5: Hlađenje baterija električnog automobila [7] .....	8
Slika 4.1 Prikaz fizičkog modela Ahmedovog tijela (preuzeto sa Google slika) .....	9
Slika 4.2. Dimenzije Ahmedovog tijela [8] .....	10
Slika 4.3. Dimenzije BMW Serije 4 Grand Coupe [10] .....	10
Slika 5.1. Tok rada u Ansys Workbench-u .....	11
Slika 5.2. BMW serija 4 Grand Coupe (2018.) [11] .....	13
Slika 5.3. Bočni prikaz realnog automobila [10] .....	14
Slika 5.4. Bočni prikaz pojednostavljenog 3D modela .....	14
Slika 5.5. Prikaz domene u programu SpaceClaim.....	15
Slika 5.6. Postavke u programu Meshing .....	16
Slika 5.7. Ugušćenje mreže.....	17
Slika 5.8. Detalj gušće mreže.....	17
Slika 5.9. Postavke graničnih slojeva.....	18
Slika 5.10. Granični slojevi.....	18
Slika 5.11. Rubni uvjeti.....	19
Slika 5.12. Tablica rubnih uvjeta .....	20
Slika 6.1 Graf konvergencije .....	21
Slika 6.2. Kontura brzina za 10 m/s .....	22
Slika 6.3. Kontura brzina za 20 m/s .....	22
Slika 6.4. Kontura brzina za 35 m/s .....	23
Slika 6.5. Kontura brzina za 50 m/s .....	23
Slika 6.6 Kontura statičkog tlaka za brzinu 10 m/s.....	24
Slika 6.7 Kontura statičkog tlaka za brzinu 20 m/s.....	24
Slika 6.8 Kontura statičkog tlaka za brzinu 35 m/s.....	25
Slika 6.9 Kontura statičkog tlaka za brzinu 50 m/s.....	25
Slika 6.10 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 10 m/s .....	26
Slika 6.11 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 20 m/s .....	26
Slika 6.12 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 35 m/s .....	27
Slika 6.13 Kontura dinamičkog tlaka za brzinu 50 m/s .....	27

Slika 6.14 Kontura totalnog tlaka za brzinu 10 m/s.....	28
Slika 6.15 Kontura totalnog tlaka za brzinu 20 m/s.....	28
Slika 6.16 Kontura totalnog tlaka za brzinu 35 m/s.....	29
Slika 6.17 Kontura totalnog tlaka za brzinu 50 m/s.....	29
Slika 6.18 Vektori brzine za 10 m/s.....	30
Slika 6.19 Vektori brzine za 20 m/s.....	30
Slika 6.20 Vektori brzine za 35 m/s.....	31
Slika 6.21 Vektori brzine za 50 m/s.....	31
Slika 6.22 Vektori brzine za 10 m/s (detalj).....	32
Slika 6.23 Vektori brzine za 20 m/s (detalj).....	32
Slika 6.24 Vektori brzine za 35 m/s (detalj).....	33
Slika 6.25 Vektori brzine za 50 m/s (detalj).....	33
Slika 6.26 Koeficijent otpora zraka.....	34

## 10. SAŽETAK

Tema ovog rada je izrada simulacije opstrujavanja zraka na modelu automobila. Za potrebe završnog rada model automobila je bio pojednostavljen. Na početku rada su opisani primjeri simulacija koje se danas koriste u autoindustriji. U središnjem dijelu opisan je sam postupak izrade geometrije, numeričke mreže i odabir parametara koji definiraju simulaciju. Simulacija se provela za nekoliko različitih brzina kod kojih su se promatrala konture i vektori brzina, kao i konture statičkog, dinamičkog i totalnog tlaka. Na kraju su prikazana rješenja te grafički prikazi simulacija.

Ključne riječi: CFD, simulacija, ANSYS, opstrujavanje zraka, koeficijent otpora zraka

## **11. SUMMARY**

The topic of this paper is the development of a simulation of air flow on a car model. For the needs of the final work, the car model was simplified. At the beginning of the paper are examples of simulations used in the automotive industry today. The central part describes the process of creating geometry, numerical grid and selection of parameters that define the simulation. The simulation took place at several different speeds at which certain properties were observed. On the end of paper are shown solutions and graphical representations of simulations.

Key words: CFD, simulation, ANSYS, air flow, air resistance coefficient