

Analiza strujanja oko različitih geometrija automobila

Gjukić, Roko

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:190:987354>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-21**



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 RAZLIČITIH GEOMETRIJA
MODELA AUTOMOBILA**

Rijeka, srpanj 2022.

Roko Gjukić
0069084707

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA OKO RAZLIČITIH GEOMETRIJA
MODELA AUTOMOBILA**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, srpanj 2022.

Roko Gjukić
0069084707

Rijeka, 15. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Roko Gjukić (0069084707)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza strujanja oko različitih geometrija modela automobila / Airflow analysis around different simplified car models**

Opis zadatka:

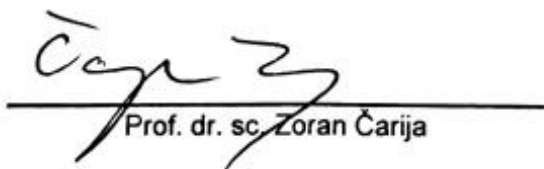
U okviru završnog rada potrebno je izraditi geometriju pojednostavljenog modela automobila. Geometriju je nužno adekvatno umrežiti poštujući općeprihvaćena pravila. Potrebno je provesti numeričku analizu za različite uvjete strujanja te je nužno prikazati turbulentni tok nekompresibilna fluida. Potrebno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

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



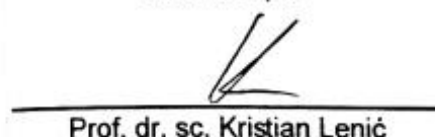
Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

kojom ja, Roko Gjukić, JMBAG: 0069084707 student Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, kao autor završnog rada s naslovom: Analiza strujanja oko različitih geometrija modela automobila.

1. Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Zoran Čarija, a pri izradi završnog rada pomagala mi je i asist. dr. sc. Ivana Lučin. U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u radu citirao sam i povezao s korištenim bibliografskim jedinicama sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Tehničkog fakulteta u Rijeci. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

2. Dajem odobrenje da se, bez naknade, trajno pohrani moj rad u javno dostupnom digitalnom repozitoriju ustanove i Sveučilišta te u javnoj internetskoj bazi radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu, sukladno obvezi iz odredbe članka 83. stavka 11. Zakona o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju (NN 123/03, 198/03, 105/04, 174/04, 02/07, 46/07, 45/09, 63/11, 94/13, 139/13, 101/14, 60/15).

Potvrđujem da je za pohranu dostavljena završna verzija obranjenog i dovršenog završnog rada. Ovom izjavom, kao autor dajem odobrenje i da se moj rad, bez naknade, trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim studentima i djelatnicima ustanove.

Student

Roko Gjukić

SADRŽAJ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. AERODINAMIKA | 2 |
| 2.1. Aerodinamika vozila..... | 2 |
| 2.2. Osnovni zakoni dinamike fluida..... | 2 |
| 2.3. Laminarno i turbulentno strujanje | 3 |
| 2.4. Aerodinamičke sile | 3 |
| 2.5. Aerodinamički koeficijenti | 4 |
| 3. RAČUNARSKA DINAMIKA FLUIDA (ENG. CFD - COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) | 6 |
| 3.1. Razvoj CFD-a..... | 7 |
| 3.2. Ansys fluent..... | 7 |
| 4. IZRADA SIMULACIJE | 10 |
| 4.1. Geometrija | 10 |
| 4.2. Pojednostavljenja..... | 11 |
| 4.3. Numerička mreža (eng. Mesh) | 12 |
| 4.4. Rubni uvjeti | 14 |
| 4.5. Izračun podataka..... | 15 |
| 5. REZULTATI..... | 16 |
| 5.1. Tlak zraka oko automobila | 16 |
| 5.2. Putanje vektora brzina zraka..... | 18 |
| 5.3. Vizualizacija tlaka i brzine na presječnoj ravnini X-Z automobila..... | 20 |
| 6. SILE DJELOVANJA OTPORA ZRAKA | 21 |
| 7. UVOĐENJE PROMJENE GEOMETRIJE | 22 |
| 7.1. Dodavanje otvorenog krovnog prozora | 22 |
| 7.2. Postavljanje nove numeričke mreže | 23 |
| 8. REZULTATI I INTERPRETACIJA NOVIH PODATAKA | 25 |

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| 8.1. Otpor zraka | 30 |
| 8.2. Sile otpora s otvorenim krovnim prozorom..... | 30 |
| 8.3. Gubitak energije po kilometru | 33 |
| 9. ZAKLJUČAK | 35 |
| 10. LITERATURA..... | 36 |
| SAŽETAK..... | 37 |
| SUMMARY | 37 |
| KLJUČNE RIJEČI..... | 37 |
| KEY WORDS | 37 |

1. UVOD

Aerodinamika je grana mehanike fluida koja se bavi proučavanjem djelovanja zraka u gibanju na predmete od interesa. U ovome radu fokus će biti na automobilskoj industriji. U slučaju vozila se proučava strujanje zraka oko vozila i utjecaj strujanja na performanse, ponašanje u vožnji i potrošnju. U vožnji, glavne sile otpora koje se javljaju su otpor kotrljanja i otpor zraka. Da bi se smanjila sila otpora kotrljanja potrebno je na odgovarajući način konstruirati pneumatiku i kotače. Otpor zraka, to jest aerodinamički otpor se smanjuje promjenama u oblikovanju vozila, upravo se aerodinamičkim koeficijentima uspoređuje „efikasnost“ predmeta. U automobilskoj industriji je cilj minimizirati koeficijent otpora kako bi se sa što manje nepotrebno utrošene energije prešao određeni put. Računarska dinamika fluida (eng. CFD - computational fluid dynamics) je grana mehanike fluida koja koristi numeričku analizu i strukture podataka za analizu i rješavanje problema koji uključuju protok fluida. Najčešće područje interesa je kako će se objekti ponašati u stvarnim uvjetima. Ciljevi CFD-a su mogućnost simuliranja interakcije fluida s objektima i tako točno predvidjeti ponašanje protoka fluida.

U ovom završnom radu radit će se simulacija opstrujavanja fluida (zraka) oko automobila kako bi se odgovorilo na pitanje kako otvoreni krovni prozor utječe na strujanje zraka, sile otpora, koeficijente otpora i slično, pri čemu će se koristiti CFD software kako bi se postavila geometrija i početni uvjeti te iterativno izračunale brzine, tlakovi i sile koje su uzrokovane interakcijom dvaju elemenata. U radu će se proći kroz nekoliko koraka kao što su postavljanje geometrije, gdje će se izraditi automobil s pojednostavljenjima, pa ga smjestiti u tunel. Tada će se izraditi numeričku mrežu između tunela i automobila koja predstavlja zrak. Tek nakon izrade numeričke mreže može se postaviti početne uvjete tlakova i brzina zraka za koje se želi saznati što se događa okolo automobila, te nakon postavljenih uvjeta provesti izračun. Dobivene podatke vizualizirat će se kroz niz prikaza i slika kako bi se поближе shvatila i lakše interpretirala gomila podataka i iz njih izvesti zaključak na početno pitanje.

2. AERODINAMIKA

Aerodinamikom se smatra grana mehanike fluida koja se bavi proučavanjem djelovanja zraka u gibanju na predmete od interesa. Najčešće se želi saznati koje sile ili momente zrak vrši na površine predmeta s kojima je u kontaktu ili kakvo je strujanje u blizini neke površine što spada u strujanja u otvorenim kanalima. U ovom radu bavit će se silama koje zrak vrši na površine automobila na putnoj brzini automobila od 35 m/s. Radi kompleksnosti problematike rješavanja numeričkih jednadžbi koristit će se programom za računarsku dinamiku fluida. [1,2]

2.1. Aerodinamika vozila

Aerodinamika vozila proučava strujanje zraka oko vozila i utjecaj strujanja na performanse, ponašanje u vožnji i potrošnju. U počecima razvoja automobilske industrije, aerodinamika nije imala značajan utjecaj u konstruiranju vozila, djelomično radi malih brzina koja su vozila postizala. Kada su vozila počela postizati veće brzine, aerodinamika je dobivala na važnosti u konstrukciji vozila. U 70-im i 80-im godinama prošlog stoljeća, još veća važnost se krenula pridavati aerodinamici radi porasta cijena naftnih derivata i pojave ekološke svijesti, u tome trenutku se krenulo razmišljati o smanjenju potrošnje goriva, u čemu je smanjenje otpora ključno. [3]

U vožnji, glavne sile otpora koje se javljaju su otpor kotrljanja i otpor zraka. Da bi se smanjila sila otpora kotrljanja potrebno je na odgovarajući način konstruirati pneumatiku i kotače. Otpor zraka, to jest aerodinamički otpor se smanjuje promjenama u oblikovanju vozila. [3]

2.2. Osnovni zakoni dinamike fluida

Dinamika fluida, temelji se na osnovnim zakonima klasične fizike, zakon očuvanja mase, zakon količine gibanja, zakon momenta količine gibanja, zakon očuvanja energije i drugi zakon termodinamike. Navedeni zakoni se definiraju za zatvoreni termodinamički sustav, a u mehanici fluida za materijalni volumen koji s vremenom mijenja svoj položaj, oblik i veličinu. [4]

Stoga se javljaju tri osnovna zakona dinamike fluida [4]:

- Zakon očuvanja mase: za materijalni volumen govori da je brzina promjene mase unutar materijalnog volumena jednaka nuli. Masa materijalnog volumena je konstantna.
- Zakon očuvanja količine gibanja: brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka zbroju vanjskih sila.
- Zakon očuvanja energije: dovođenje u vezu brzinu promjene zbroja unutarnje i kinetičke energije materijalnog volumena sa snagom vanjskih površinskih i masenih sila na materijalni volumen, te izmjenom topline materijalnog volumena i okoline.

Ostali zakoni na koje se veže dinamika fluida su Newtonov zakon viskoznosti i Fourierov zakon toplinske vodljivosti. [4]

2.3. Laminarno i turbulentno strujanje

Bitna podjela načina strujanja fluida dijeli se na laminarno i turbulentno strujanje, koji se razlikuju po tome da se pri laminarnom strujanju slojevi fluida ne miješaju, pa je takve jednadžbe moguće riješiti analitički. Kada je u pitanju turbulentno strujanje, slojevi fluida se miješaju i tako dolazi do turbulencije ili kovitlanja, te takvu vrstu strujanja praktički nije moguće riješiti analitički. Upravo zato koriste se CFD programi. [5]

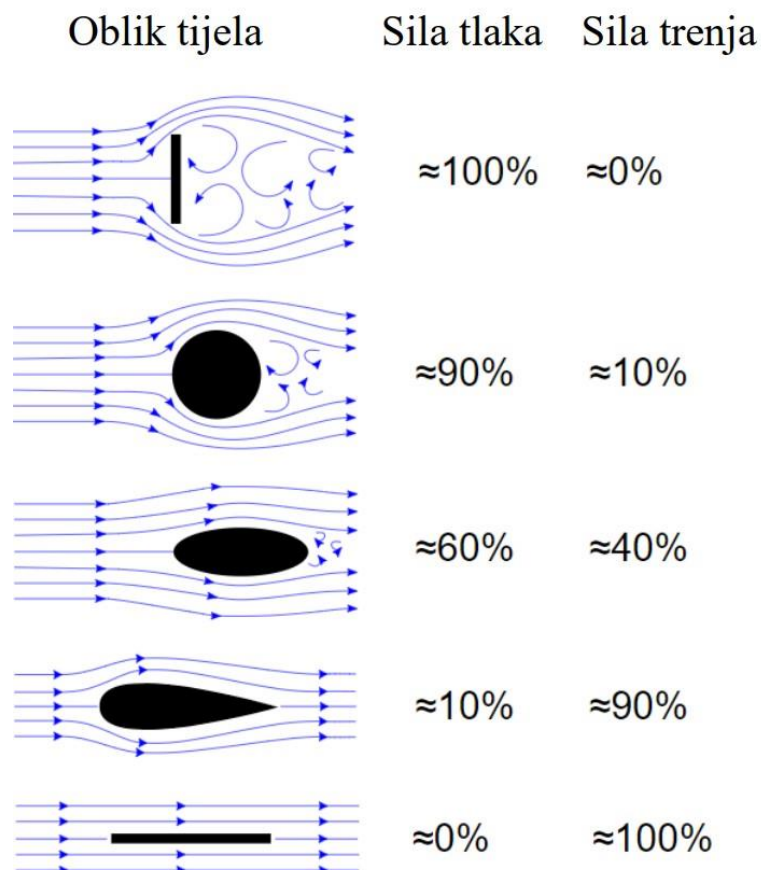
Ono što je karakteristično za turbulentno strujanje je [6]:

- Trodimenzionalnost
- Vrtloženje
- Nestacionarnost
- Nelinearnost
- Veliki koeficijent prijelaza topline
- Veliki koeficijent otpora trenja
- Separacija pri većim gradijentima tlaka

2.4. Aerodinamičke sile

Na bilo koje tijelo oko kojega opstrujava fluid djelovat će aerodinamičke sile u koje spadaju sila tlaka i sila trenja koja postoji radi viskoznosti fluida. Sila tlaka pojavljuje se kao posljedica razlike tlakova na različitim površinama, čak i ako nema toka fluida oko predmeta. Sila trenja posljedica

je viskoznog svojstva fluida, čestice fluida na površini tijela stoje (gibaju se s tijelom), a čestice udaljenije tijela postupno s povećanjem udaljenosti poprimaju sve veću brzinu do one brzine fluida izvan prijelaznog gradijenta strujanja, te takvo međudjelovanje čestica prenosi silu na površinu tijela. Udio sile trenja i sile tlaka ovisi o obliku tijela, što je predmet bolje aerodinamički oblikovan sile trenja će imati veći udio, a ako je predmet loše aerodinamički oblikovan sile tlaka imat će veći udio. [5]



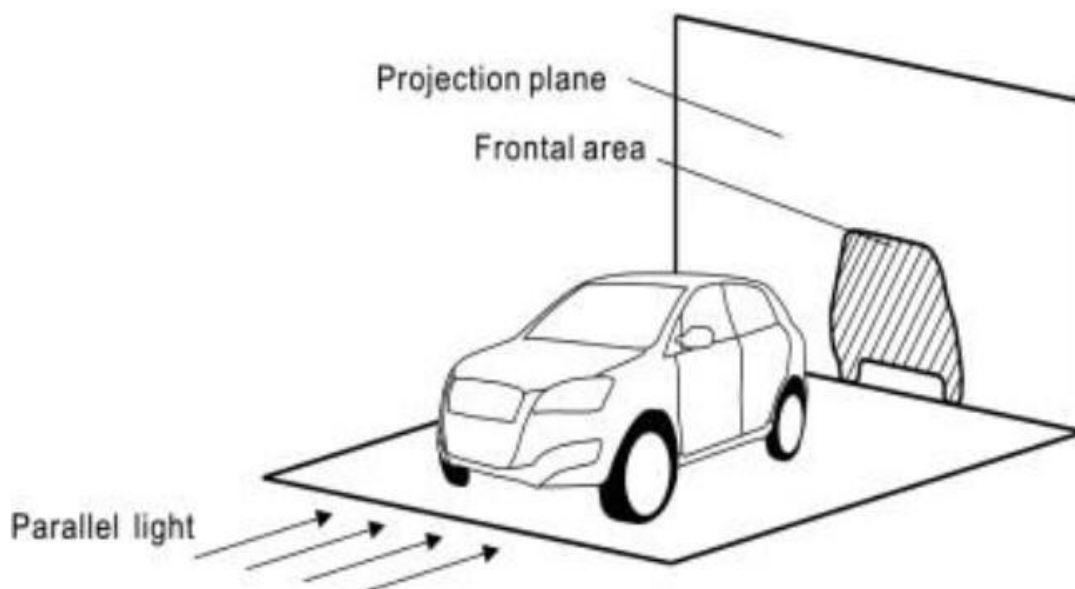
Slika 2.1. Omjeri sile tlaka i sile trenja

2.5. Aerodinamički koeficijenti

Aerodinamičkim koeficijentima uspoređuje se „efikasnost“ predmeta, što je značajno u automobilskoj industriji gdje je cilj minimizirati koeficijent otpora kako bi se sa što manje nepotrebno utrošene energije prešao određeni put. Koeficijent C_x označava koeficijent otpora u smjeru gibanja automobila što je X -os u postavljenom sustavu. O formuli i izračunu koeficijenta otpora bit će razrađeno detaljnije u kasnijim poglavljima. [5]

Također postoji i aerodinamički koeficijent uzgona za koji je formula identična s iznimkom da se ne upotrebljava sila izvršena u smjeru X-osi nego u smjeru Z-osi koja je okomita na smjer strujanja fluida. U ovom radu neće se baviti s koeficijentom uzgona. [5]

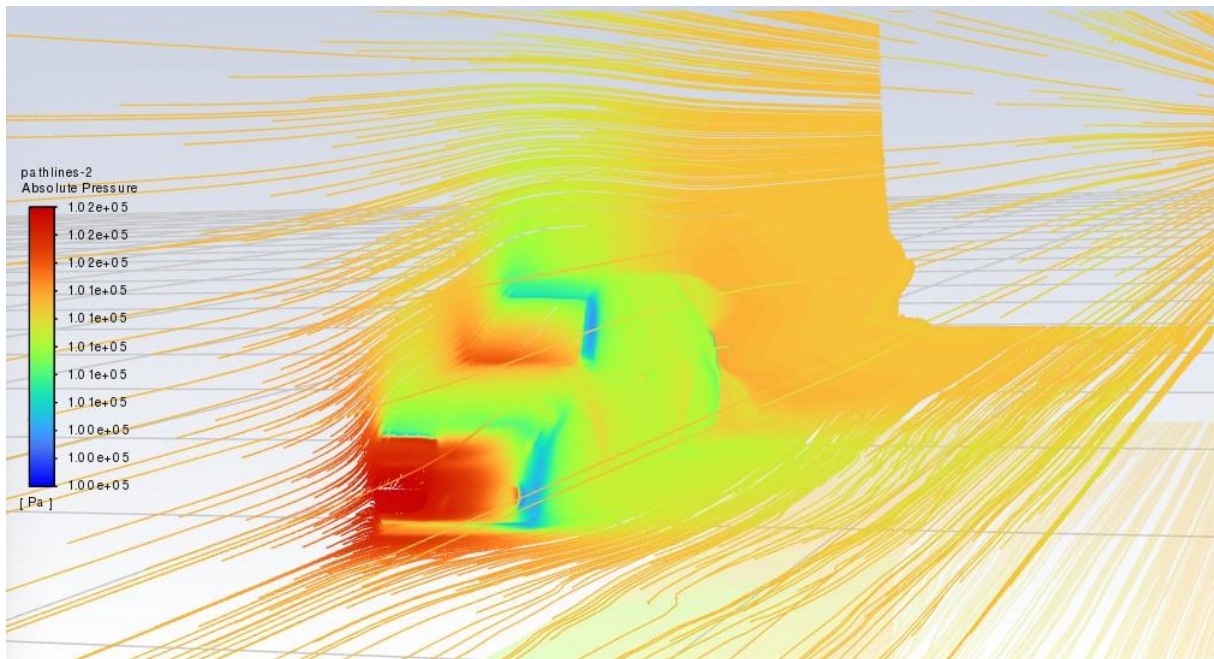
Referentna površina kod automobila koja se upotrebljava za računanje koeficijenata je projekcija na površinu čija je normala smjer strujanja fluida, odnosno smjer gibanja automobila. Tu površinu (eng. Frontal area) se može vizualizirati kao površinu koja se dobije obasjavanjem automobila s prednje strane iz beskonačno dalekog izvora svjetlosti kojemu su zrake paralelne (eng. Parallel light) na okomitu površinu (eng. Projection plane) iza automobila prikazano kao na slici ispod.



Slika 2.2. Projekcijska površina vozila

3. RAČUNARSKA DINAMIKA FLUIDA (ENG. CFD - COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Računarska dinamika fluida je grana mehanike fluida koja koristi numeričku analizu i strukture podataka za analizu i rješavanje problema koji uključuju protok fluida. Ono što je najčešće područje interesa je kako će se objekti ponašati u stvarnim uvjetima. Ciljevi CFD-a su mogućnost simuliranja interakcije fluida s objektima i tako točno predvidjeti ponašanje protoka fluida. Potreba za CFD analizom proizlazi iz velikih troškova testiranjem s principom izrade stvarnog modela te ispitivanja provedenim na tom modelu, prvenstveno radi uvjeta potrebnih za provođenje takvih ispitivanja, ali i za svaku promjenu na modelu potrebno je ponovno izraditi model što pridonosi velikim troškovima i velikim utroškom vremena. Prilikom izrade modela može se uočiti utjecaj promjena geometrije na rezultate te se tako može uočiti kako koja karakteristika utječe na rezultate strujanja. Najčešći slučaj je da se model koji je proračunat CFD programom izradi za potrebe testiranja u stvarnim uvjetima ako je to potrebno. Računala se koriste za izvođenje proračuna potrebnih za simulaciju slobodnog toka fluida i interakcije fluida s površinama definiranim rubnim uvjetima. S brzim superračunalima mogu se postići bolja rješenja koja su često potrebna za rješavanje najvećih i najsloženijih problema. Za izradu simulacija postoji mnogo rješavača, od onih otvorenog koda do komercijalnih. Za potrebe izračuna opstrujavanja zraka oko automobila koristit će se „Ansys fluent“, to je komercijalni rješavač pomoću kojeg će se izraditi simulacija i provesti proračun sve do konačnog rezultata. [2]



Slika 3.1. Primjer vizualizacije dobivene CFD programom

3.1. Razvoj CFD-a

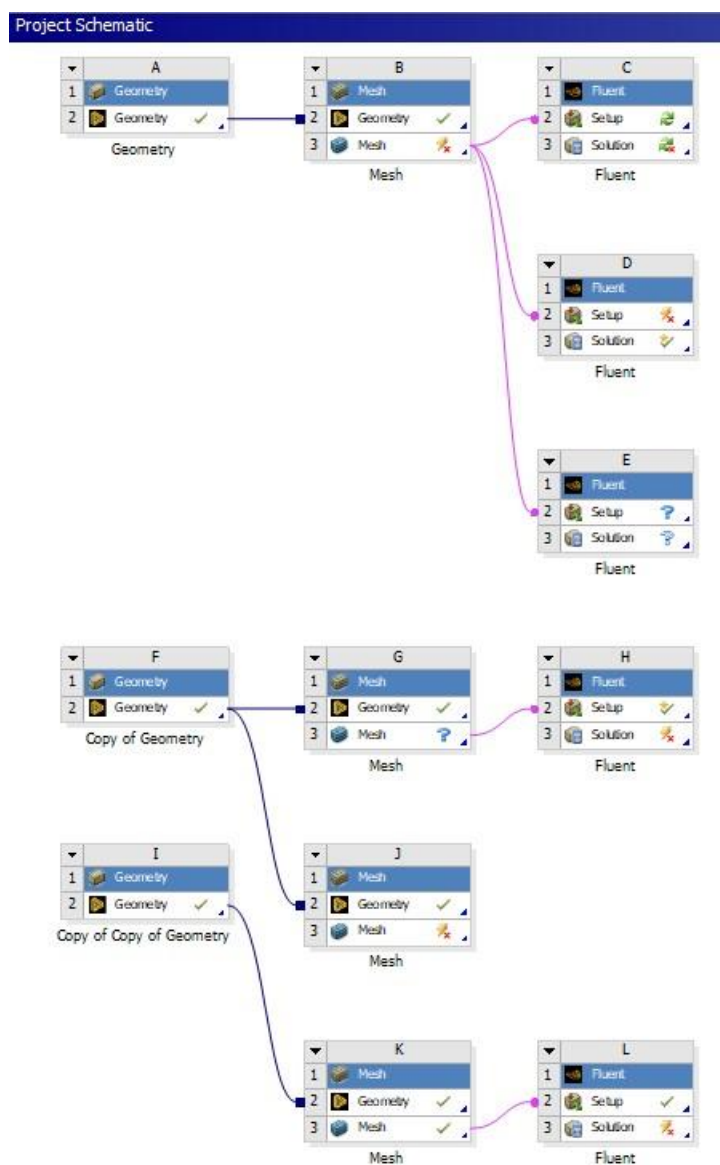
Uz razvitak računala, došlo je i do naglog razvoja računalne dinamike fluida i samog širenja područja primjene numeričkih metoda u rješavanju tehničkih zadataka.

Razvoj računalne dinamike krenuo je s metodom konačnih razlika i metodom konačnih volumena na pravokutnim mrežama. Prednost koja se donosi metodom konačnih elemenata je bila u fleksibilnosti diskretizacije područja proračuna složene geometrije. Navedena prednost se izgubila kada je došlo do razvoja metode konačnih volumena na nestrukturiranim mrežama. Metoda klasičnih volumena zadržala se u praksi te je većina komercijalnih računalnih CFD paketa temeljena na metodi klasičnih volumena, uglavnom radi jednostavnosti, ali i fizikalnosti i tradicije. [4]

3.2. Ansys fluent

Ansys softver namijenjen je simuliranju realnih uvjeta za strukturne, elektroničke ili mehaničke sklopove u svrhu analize čvrstoće, elastičnosti, viskoznosti, raspodjeli topline, elektromagnetizma i drugih svojstava. Korištenjem takvog softvera može se predvidjeti hoće li ili ne određeni proizvod funkcionirati u stvarnim uvjetima i kako se određeni dizajn može unaprijediti. U svrhu

izrade simulacije koristit će se nekoliko odvojenih programa. Za izradu geometrije koristit će se „Space claim“ u kojem su izvršene sve promjene na geometriji. U „Meshu“ će se napraviti numerička mreža potrebna za daljnji izračun koristeći postojeću geometriju. Na posljetku se pomoću „Fluenta“ provodi inicijalizacija i odabir rubnih uvjeta kako bi dobili rezultate koji se mogu vizualizirati. [7]



Slika 3.2. Ansys sučelje sa shemom programa

U prvoj vertikali nalaze se različite geometrije automobila korištene u simulaciji. Prva geometrija u vertikali je automobil bez krovnog prozora dok je zadnja geometrija u vertikali ona s krovnim prozorom. Druga vertikala sadrži program za izradu numeričke mreže koja uzima podatke od njoj

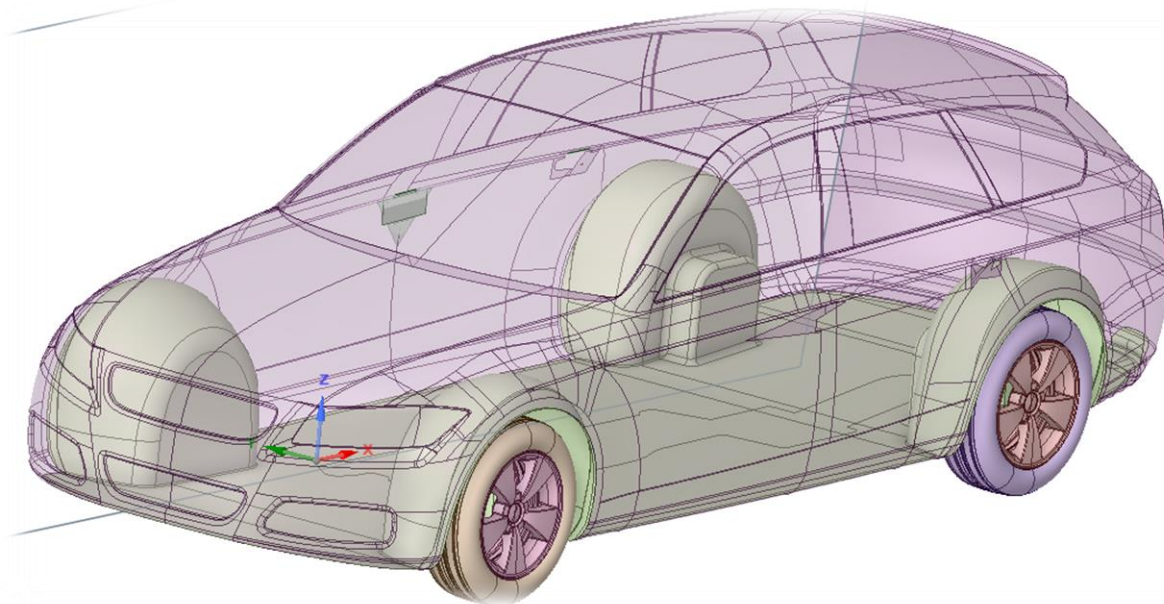
dodijeljene geometrije što se vidi povlačenjem linije između polja. U tom programu se izrađuje numerička mreža za područje geometrije za koje treba dobiti podatke o strujanju fluida. Tada te podatke prenosimo u „fluent“ povlačenjem linije prema novom polju koji se nalazi u posljednjoj vertikali. Uzimajući sve podatke iz prethodnih programa provodi se izračun i vizualizacija podataka o tlakovima, brzinama, protocima, toplotama i drugim fizikalnim svojstvima fluida u interakciji s geometrijom. Ovakav raspored je korišten za izradu ove simulacije te je potpuno podložan korisničkim potrebama.

4. IZRADA SIMULACIJE

Prvi korak pri dolasku do odgovora na postavljeno pitanje bit će izrada geometrije kako bi se stvorila baza na kojoj će se nadograđivati daljnji koraci. U autoindustriji se puno ulaže u rad na optimizaciji aerodinamičkih sila koje djeluju na automobile. Razlog tomu je što se smanjenjem aerodinamičkog otpora može značajno smanjiti potrošnja energije. [5]

4.1. Geometrija

Prvi korak pri izradi simulacije je crtanje geometrije kojom se opisuje fluid (područje rješavanja). To je u Ansys-u moguće napraviti pomoću „DesignModeler-a“ ili pomoću „SpaceClaim-a“. Za potrebe izrade geometrije koristit će se posljednji radi jednostavnijeg i poznatijeg sučelja. Prilikom crtanja geometrije zapravo se definira fluid oko modela, a ne sami model. Za izradu simulacije koristit će se gotovi model automobila preuzet s web stranice Tehničkog fakulteta u Münchenu. [8]



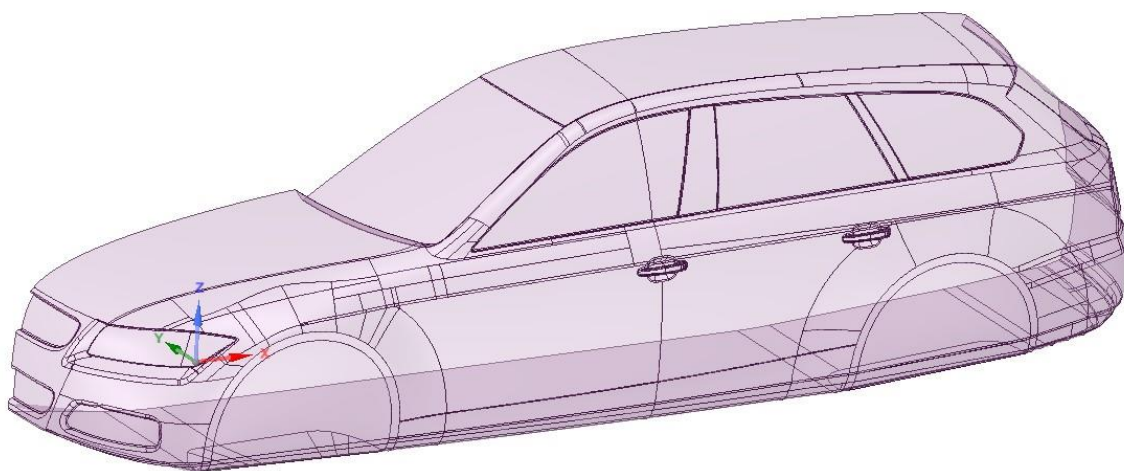
Slika 4.1. Početna geometrija automobila

4.2. Pojednostavljenja

Kada se nacrt model potrebno je provesti pojednostavljenja geometrije. Pojednostavljanjem se uvelike smanjuje zahtjevnost i količina proračunskih elemenata bez značajnog utjecaja na točnost proračuna. U nekim slučajevima je nužno napraviti pojednostavljenja jer suviše detaljna geometrija može dovesti do problema prilikom izrade numeričke mreže. Primjeri za takve detalje su pukotine između dijelova, nepotrebna zaobljenja i slično.

U ovome slučaju pojednostavljenja koja su se napravila su:

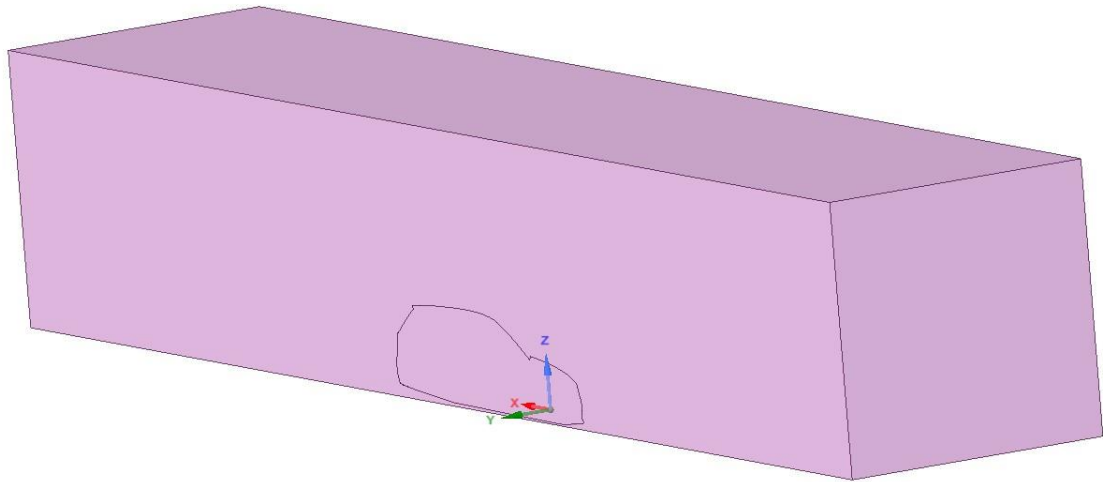
- Ravna podnica
- Zatvoreni otvori umjesto kotača
- Zatvoreni otvori za usis zraka
- Nema brisača, antena, retrovizora



Slika 4.2. Pojednostavljena geometrija automobila

Potrebno je obratiti pozornost na smjernice za izradu tunela za testiranje kojima su predložene dimenzije tunela kako bi dobiveni rezultati bili što realniji. Te smjernice dobivene su iskustvenim postupkom te nema točne formule kolike dimenzije tunela moraju biti. [9]

Za potrebe ovoga rada, ukupna dužina tunela iznosi 20,50 m, širina 3,75 m, a visina 3,59 m.



Slika 4.3. Tunel korišten za testiranja

4.3. Numerička mreža (eng. Mesh)

Sljedeći korak je za napravljenu geometriju napraviti numeričku mrežu koja predstavlja diskretizaciju prostora s konačnim elementima, definiranjem područja u kojem se rješavaju jednačbe koje opisuju temperature, brzine ili tlakove strujanja. Metoda konačnog volumena uobičajen je pristup koji se koristi u CFD programima, jer ima pogodna svojstva u korištenju memorije i brzini rješenja, posebno za velike probleme te turbulentne tokove s visokim Reynoldsovim brojem.

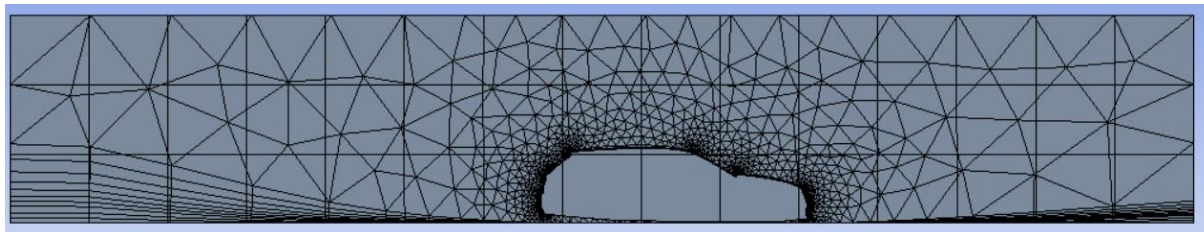
Reynoldsov broj predstavlja bez dimenzijsku veličinu kojom se opisuje omjer laminarnog i turbulentnog strujanja fluida, što je Reynoldsov broj veći, strujanje je turbulentnije. Očekivano strujanje oko vozila je turbulentno.

Pri simulacijama dvodimenzijaskog strujanja može se koristiti nestrukturirana mreža, strukturirana i hibridna mreža.

Nestrukturirana mreža se sastoji od elemenata trokutastog oblika. Mreža se relativno jednostavno izrađuje, složeni oblici se lako opisuju, radi toga je izrada automatizirana. Nedostatak ovakve mreže je ne mogućnost preciznih rješenja kao kod četverokutnih elemenata. [3]

Strukturirana mreža se sastoji od četverokutnih elemenata, a oni daju točnije rezultate radi svojstava. Najčešće je potrebna poluautomatska izrada.

Hibridna mreža koristi pozitivne karakteristike obje mreže. Na mjestima gdje su potrebni točniji rezultati postavlja se strukturirana mreža, a u ostatku domene strujanja zraka postavlja se nestrukturirana mreža. [3]



Slika 4.4. Presjek numeričke mreže

Princip izrade sastoji se od označavanja površina od interesa, u zonama blizu kojih se očekuje strujanje, te se odaberu uvjeti numeričke mreže kao što su maksimalna udaljenost prvog sloja od označene plohe, koliko slojeva ima, koja je stopa rasta volumena mreže i još mnogi ostali uvjeti koji u ovome slučaju nisu nužni.

| Defaults | |
|-------------------------------------------------|------------------------|
| Physics Preference | CFD |
| Solver Preference | Fluent |
| Element Order | Linear |
| <input type="checkbox"/> Element Size | 1,4 m |
| Export Format | Standard |
| Export Preview Surface Mesh | No |
| Sizing | |
| Use Adaptive Sizing | No |
| Use Uniform Size Function ... | No |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,28 |
| <input type="checkbox"/> Max Size | 3, m |
| Mesh Defeaturing | Yes |
| <input type="checkbox"/> Defeature Size | Default (7,e-003 m) |
| Capture Curvature | Yes |
| <input type="checkbox"/> Curvature Min Size | Default (1,4e-002 m) |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18,°) |
| Capture Proximity | No |
| Bounding Box Diagonal | 21,146 m |
| Average Surface Area | 0,45696 m ² |
| Minimum Edge Length | 6,1519e-005 m |
| Quality | |
| Check Mesh Quality | Yes, Errors |
| <input type="checkbox"/> Target Skewness | Default (0.900000) |
| Smoothing | Medium |
| Mesh Metric | None |

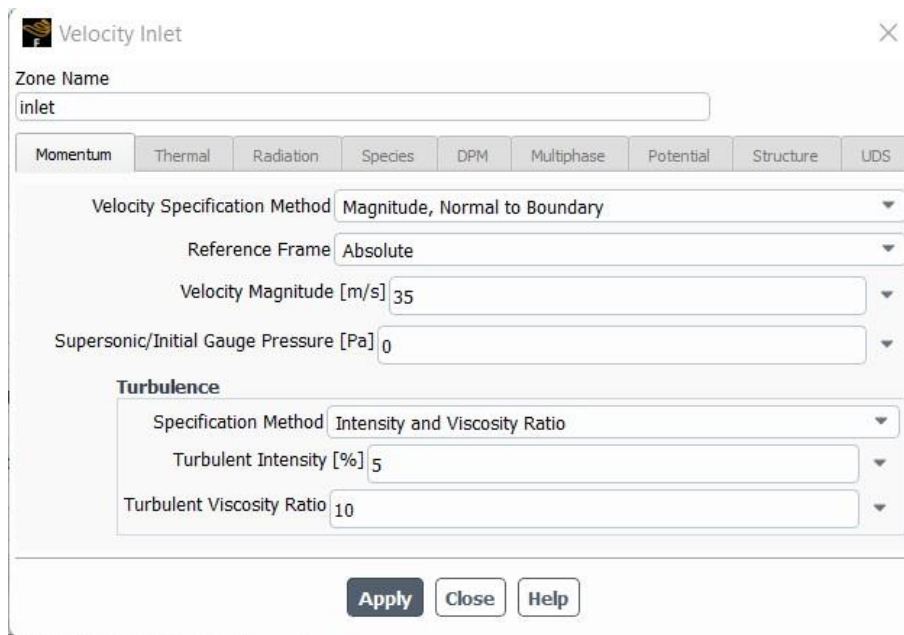
| Inflation | |
|---------------------------------------------|-----------------------|
| Use Automatic Inflation | None |
| Inflation Option | First Layer Thickness |
| <input type="checkbox"/> First Layer Height | 0,15 m |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers | 5 |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,5 |
| Inflation Algorithm | Pre |
| View Advanced Options | No |
| Batch Connections | |
| Advanced | |
| Statistics | |
| <input type="checkbox"/> Nodes | 146186 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 496733 |

Slika 4.5. Postavke oblikovanja numeričke mreže

U simulaciji je korištena mreža stvorena kombinacijom tetraedara i kvadrata, te se sastoji od preko 496 000 elemenata. Iz tablice se može vidjeti opsežni izbor postavki za oblikovanje mreže, od kojih je većina podešena unaprijed. U tablici „inflation“ može se vidjeti podatak za visinu prvog sloja uz odabrane površine koja je podešena na 0,15 m, što nije idealno, cilj je da ta visina bude približno 0,001 m međutim studentska licenca ne dozvoljava više od 500 000 elemenata tako da će u slučaju smanjivanja veličine prvog sloja biti potrebno uvesti još pojednostavljenja.

4.4. Rubni uvjeti

Kako bi se simulirali stvarni uvjeti potrebno je zadati parametre u kojima se događa simulacija. Nakon toga je potrebno definirati rubne uvjete kao što su ulazna brzina, izlazna brzina ili protok te rubovi CFD tunela. Također, zidovi uz koje je brzina strujanja jednaka nuli (eng. no-slip wall), moraju biti definirani. To su primjerice pod tunela i rubovi modela oko kojeg promatramo strujanje. Da bi se ubrzao proces računanja iteracija može se računati s polovicom simetričnog modela. Tako je moguće simetrične objekte modelirati, pripremiti za proračun i provesti iteracije brže, lakše i s manje utrošenih računalnih resursa. Nakon toga definiranjem ravnine simetrije (eng. symmetry plane) omogućava programu da pretpostavi simetrične tokove fluida sa suprotne strane simetrije pa se također umanjuje potreba za korištenjem računalnih resursa. Tada se postavljaju zidovi tunela kojima brzina strujanja nije nula, dakle predstavljaju provođenje testiranja u realnim uvjetima otvorenog prostora. Na stijenke automobila postavljen je tip granice zid (eng. Wall), jer je to površina na kojoj se događa strujanje s otporom kao i na cesti ispod automobila.



Slika 4.6. Primjer rubnih uvjeta na ulazu u tunel

4.5. Izračun podataka

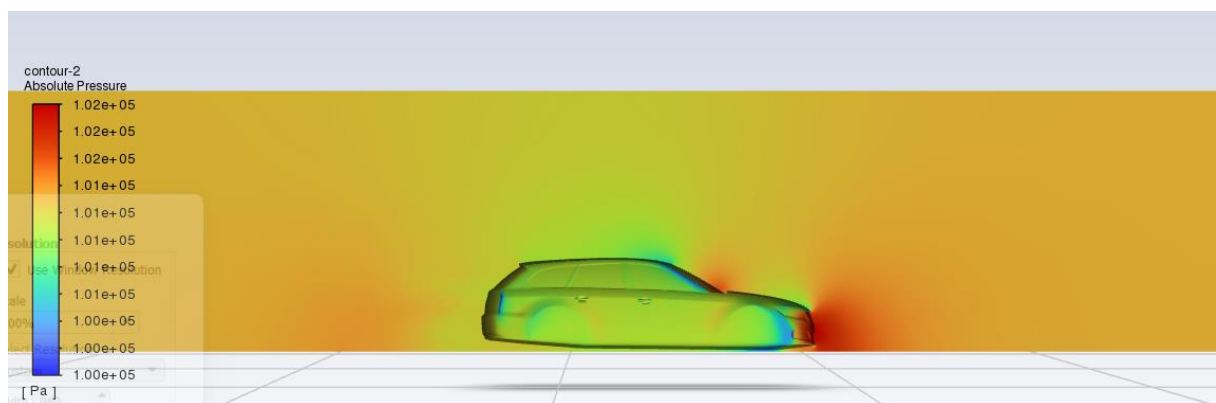
Iterativno rješavanje Navier-Stokesovih jednadžbi provodi se nakon završenih prethodnih koraka. Navier–Stokesove jednadžbe matematički izražavaju očuvanje količine gibanja i očuvanje mase za fluide. Ponekad su popraćeni jednadžbom stanja koja se odnosi na tlak, temperaturu i gustoću. Pomoću definiranih postavki poput ulaznih brzina, tlakova ili temperatura i definiranih rubnih uvjeta iterativnim rješavanjem jednadžbi dolazi se do rješenja koje treba vizualizirati za bolje razumijevanje postignutih rezultata. To sve je moguće napraviti u „Fluentu“ koji osim izračuna služi i za vizualizaciju dobivenih podataka. [2]

5. REZULTATI

Vizualizacija konačnih rezultata izuzetno je korisna kako bi se uvidjela moguća poboljšanja ili greške nastale tijekom izrade modela ili postavljanja uvjeta. Vizualizacija toka u dinamici fluida koristi se kako bi se vektori toka učinili vidljivima. Glavna korist vizualizacije je u mapiranju podataka u intuitivan i učinkovit vizualni oblik tako da korisnik može steći brže i dublje razumijevanje podataka. Štoviše, vizualizacija omogućuje vidjeti geometrijske strukture i uzorke koje je teško razaznati iz goleme zbirke neobrađenih podataka. Za ulazne podatke simulacije odabrana je brzina na ulazu (eng. Inlet) od 35 m/s ili 126 km/h, što predstavlja putnu brzinu na kojoj su otpori strujanja značajni. Za vrijednost na izlazu (eng. Outlet) tunela odabran je atmosferski tlak jer se simuliraju realni uvjeti.

5.1. Tlak zraka oko automobila

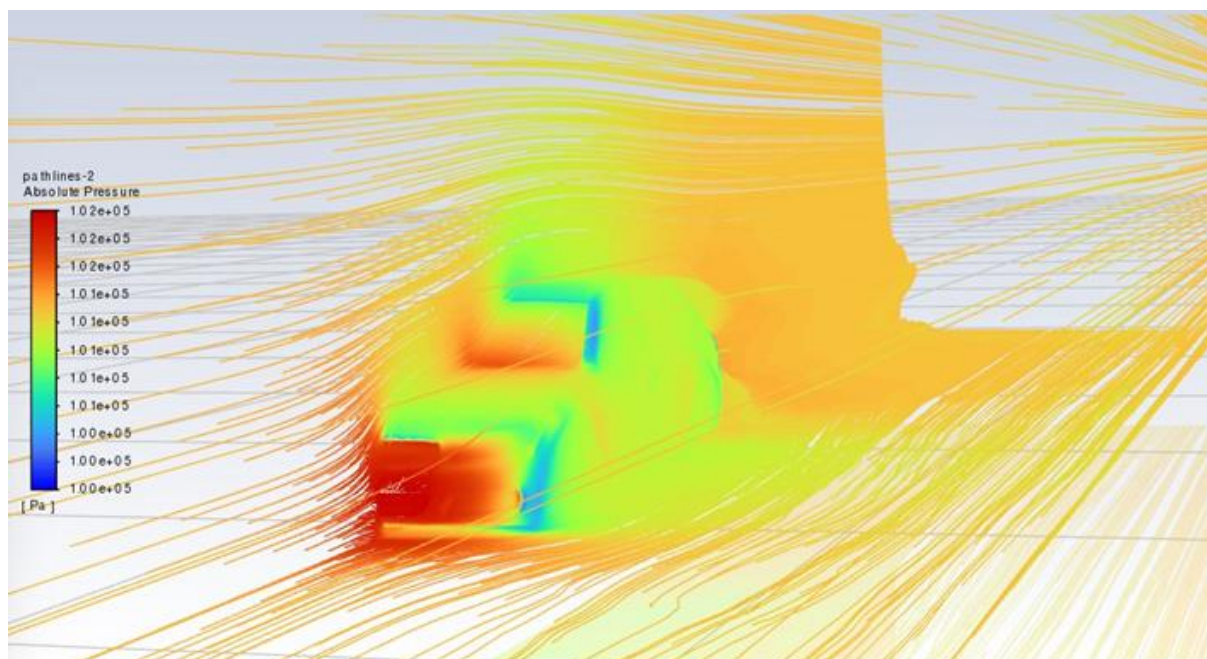
Na slici 5.1. prikazuju se konture tlaka u već spomenutoj plohi koja siječe polovicu automobila uzdužno. Zanimljiva je jer se zbog okomitog oblika prednjeg kraja automobila na tok zraka stvara zona povišenog tlaka. U realnom svijetu prednji kraj automobila nije zabrtvljen kao u ovom modelu, pa treba uzeti u obzir da će zrak u gibanju lakše napustiti područje ispred automobila djelomičnim prolaskom kroz motorni prostor.



Slika 5.1. Konture apsolutnog tlaka zraka na presječnoj ravnini

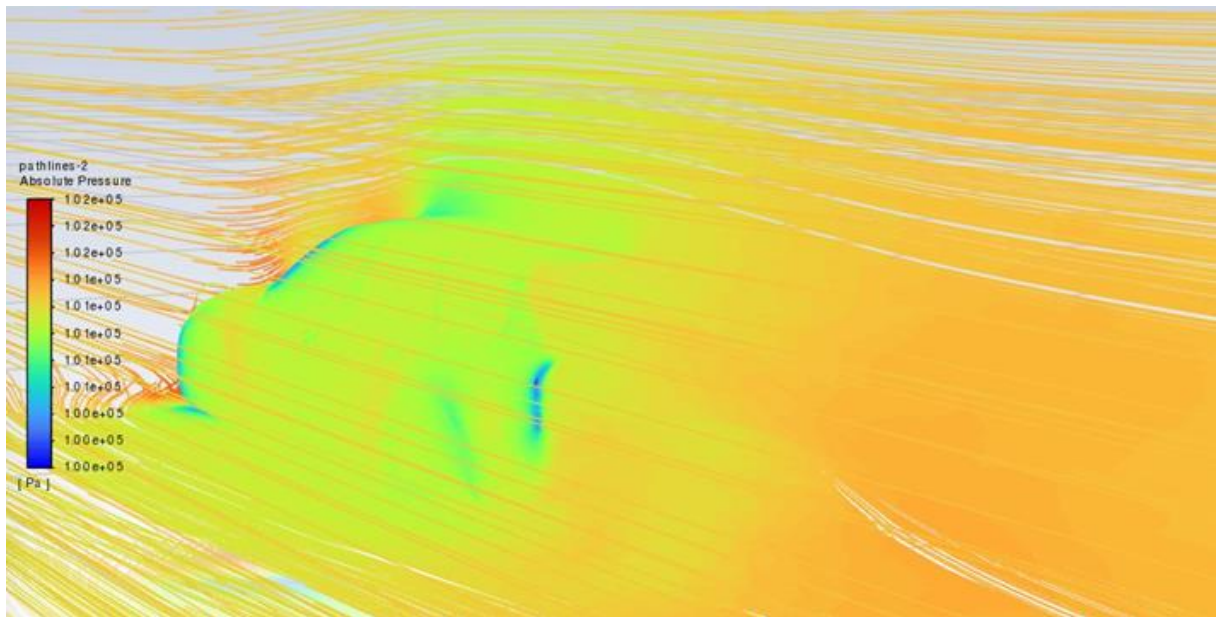
Sljedeći podatak koji je zanimljiv za razumijevanje ponašanja zraka u interakciji s automobilom je razlika u tlakovima na različitim mjestima. Na priloženoj slici može se očitati tlakove od

maksimalne vrijednosti od 102042,1 Pa do 100040,9 Pa što čini razliku tlakova od 2001,2 Pa. Područje prikazano zelenom bojom odgovara atmosferskom tlaku od otprilike 101325 Pa.



Slika 5.2. Strujnice apsolutnog tlaka.s prednje strane automobila

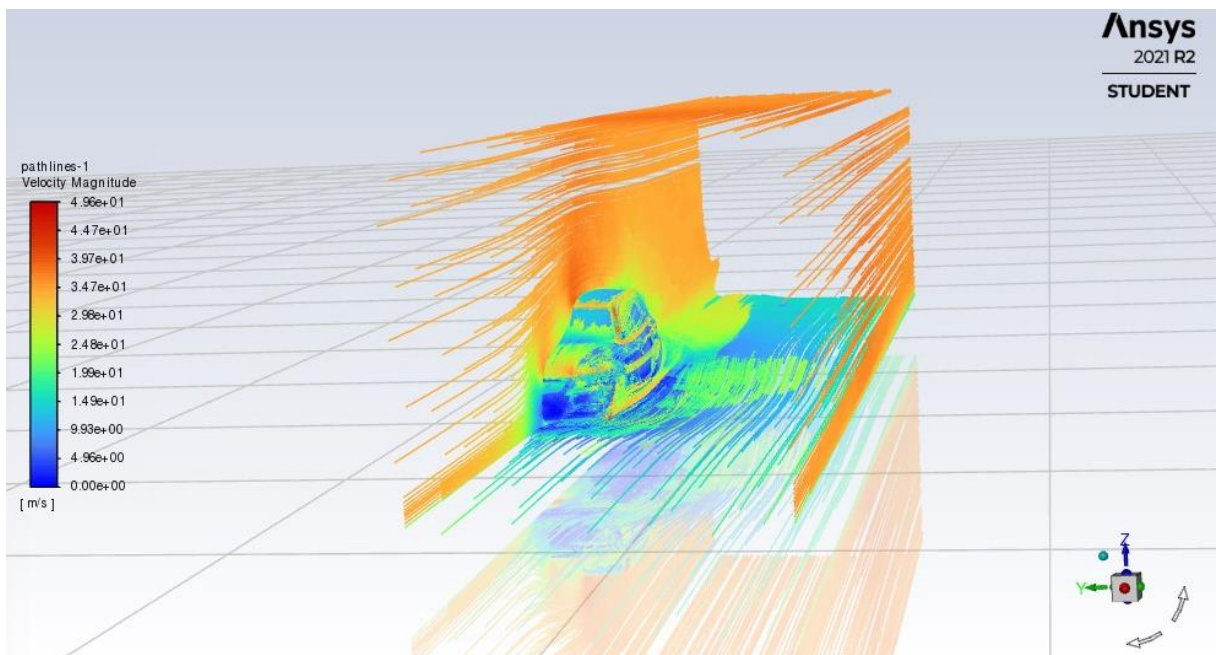
Na slici 5.3. je prikaz bočne i zadnje strane automobila i fluida oko njega, s kojeg se može očitati niske i srednje razine tlakova.



Slika 5.3. Strujnice apsolutnog tlaka sa zadnje strane automobila

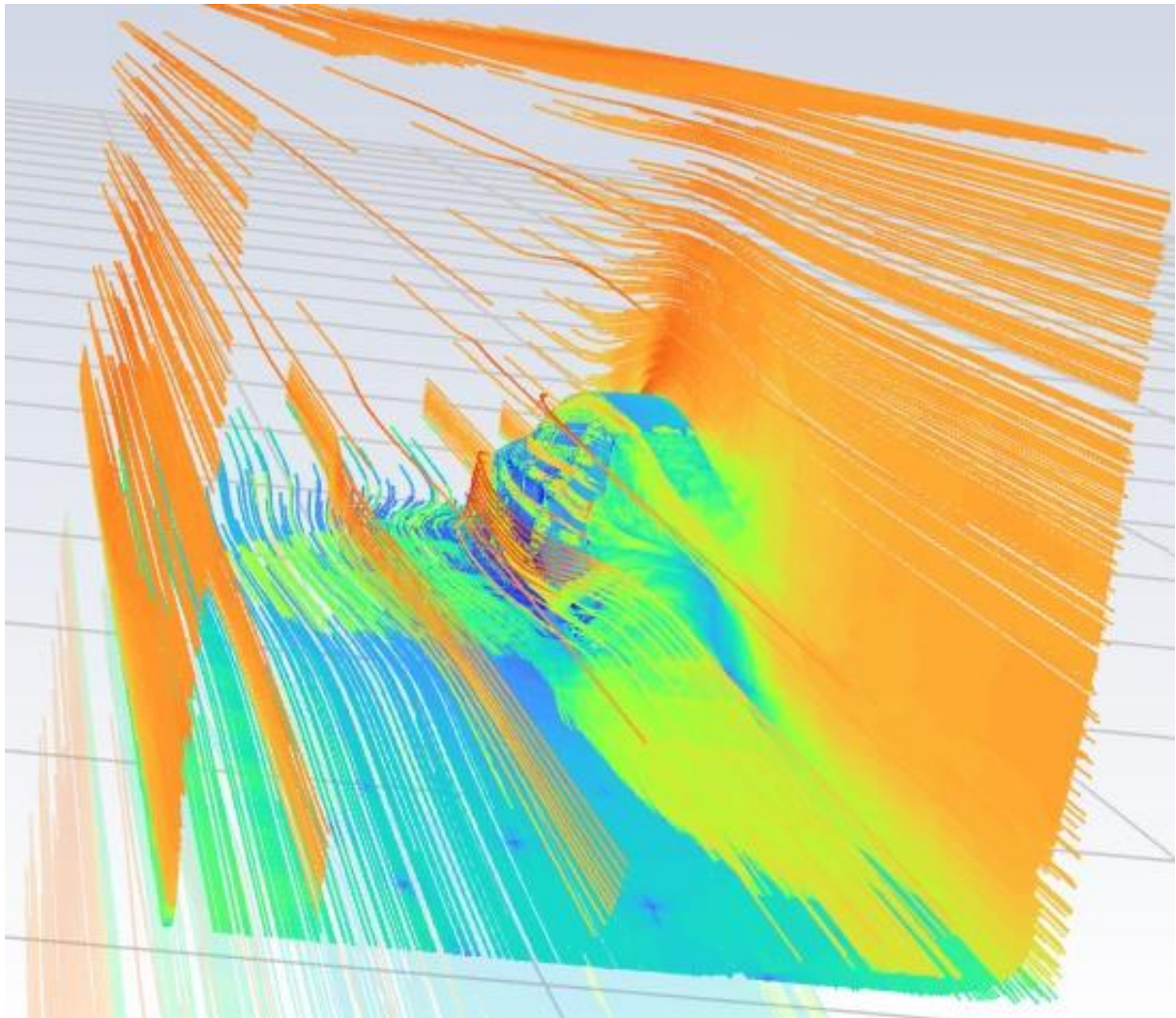
5.2. Putanje vektora brzina zraka

Prva vizualizacija koja je intuitivna za razumijevanje je kretanje zraka oko automobila, čiji se prikaz može vidjeti na slici 5.4..



Slika 5.4. Putanje vektora brzina zraka ispred automobila

Na priloženoj slici mogu se vidjeti krivulje koje predstavljaju putanje vektora brzina i kreću se od „inleta“ prema „outletu“, to jest od ulaza u tunel prema izlazu. Najtamnije plave nijanse predstavljaju najsporije gibanje čestica zraka, koje počinju od 0 m/s, pa sve do tamno crvene za koju možemo očitati brzinu od 49,6 m/s što je jednako 178,56 km/h. Iz toga se može zaključiti da je strujanjem oko geometrije zrak na pojedinim mjestima brži od okolnoga zraka za 14,6 m/s ili 52,56 km/h. Treba imati na umu da u realnoj situaciji je geometrija ta koja se giba kroz prostor dok je zrak stacionaran, tako da se u realnom slučaju ne događaju brzine zraka brže od automobila, nego mogu biti samo sporije ili jednake (na dodirnim površinama gdje je brzina 0 m/s). Drugo područje od interesa jest ono iza automobila gdje se javljaju vrtloženja zraka uzrokujući dodatani otpor pri gibanju.

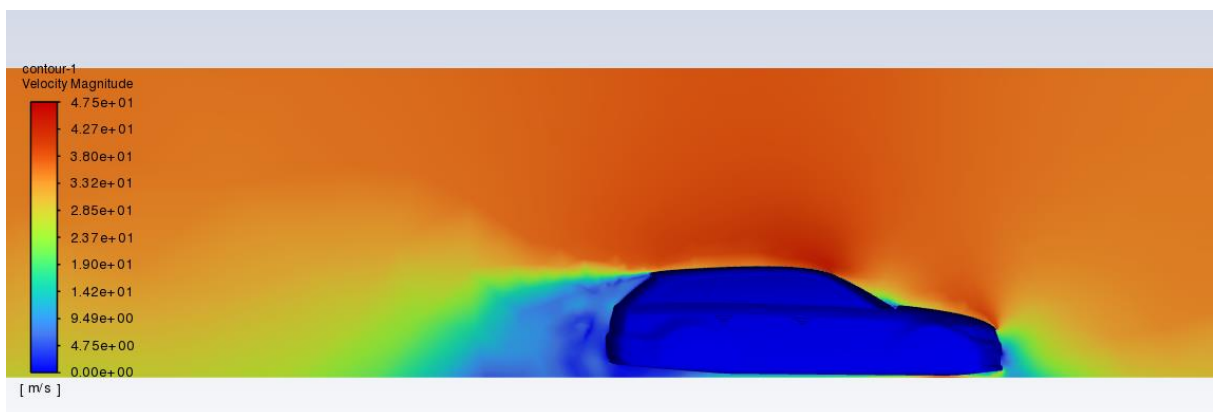


Slika 5.5. Putanje vektora brzina zraka iza automobila

Iza stražnjeg kraja automobila može se uočiti znatno sporije gibanje zraka u odnosu na brzinu gibanja automobila, u rasponu od otprilike 3-30 m/s, što je jedan od glavnih razloga velikog otpora koji automobil mora savladati na toj brzini.

5.3. Vizualizacija tlaka i brzine na presječnoj ravnini X-Z automobila

Također, korisno je i promotriti međudjelovanje fluida i automobila na plohi presjeka polovice automobila, prikazano ispod (Slika 5.6.), iz koje se može saznati što se točno događa oko tog presjeka automobila i fluida oko njega.



Slika 5.6. Konture brzina zraka na presječnoj ravnini

Na slici je prikazana kontura brzine strujanja zraka, iz koje se vidi vrlo sporo gibanje ispred same maske automobila kao i u blizini zadnjeg djela automobila. Brzine veće od brzine početnog uvjeta su obojene tamno crvenom bojom, npr. iznad poklopca motora i iznad krova automobila.

6. SILE DJELOVANJA OTPORA ZRAKA

Pri iščitavanju podataka treba imati na umu usmjerenje vektora koordinatnog sustava, os X je usmjerena u smjeru protoka zraka, dok je os Z postavljena okomito na podlogu s pozitivnim smjerom prema gore. Os Y nije bitna u ovom slučaju jer je automobil simetričan pa se sile međusobno suprotnih predznaka ponište. Sila otpora zraka ovisi o gustoći fluida, relativnoj razlici brzina kretanja fluida i objekta, koeficijentu otpora objekta, i površini poprečnog presjeka objekta na tok fluida.

| Forces - Direction Vector (1 0 0) | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------|
| | Forces [N] | | |
| Zone | Pressure | Viscous | Total |
| wall-geom-3_geom-3_solid | 157.09666 | 24.315681 | 181.41235 |
| ----- | | | |
| Net | 157.09666 | 24.315681 | 181.41235 |

Slika 6.1. Rezultat izračuna horizontalne komponente sile otpora zraka

Budući da je za simulaciju odabrana samo polovica automobila dobivenu silu treba udvostručiti, kako za X tako i za Z komponentu sile. Po dobivenom izračunu komponenta sile u X smjeru uzrokovana strujanjem zraka pri brzini od 35 m/s iznosi približno 362,83 N.

Druga bitna sila je ona suprotnog smjera Z osi pa će u izračunu poprimiti negativan predznak. Ta sila također je posljedica interakcije fluida i automobila te mu povećava silu koju ostvaruje s podlogom. Ta pritisna sila (eng. Downforce) poboljšava stabilnost vozila na većim brzinama. [10]

| Forces - Direction Vector (0 0 1) | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|------------|
| | Forces [N] | | |
| Zone | Pressure | Viscous | Total |
| wall-geom-3_geom-3_solid | -207.08357 | 1.5053257 | -205.57825 |
| ----- | | | |
| Net | -207.08357 | 1.5053257 | -205.57825 |

Slika 6.2. Rezultat izračuna vertikalne komponente sile otpora zraka

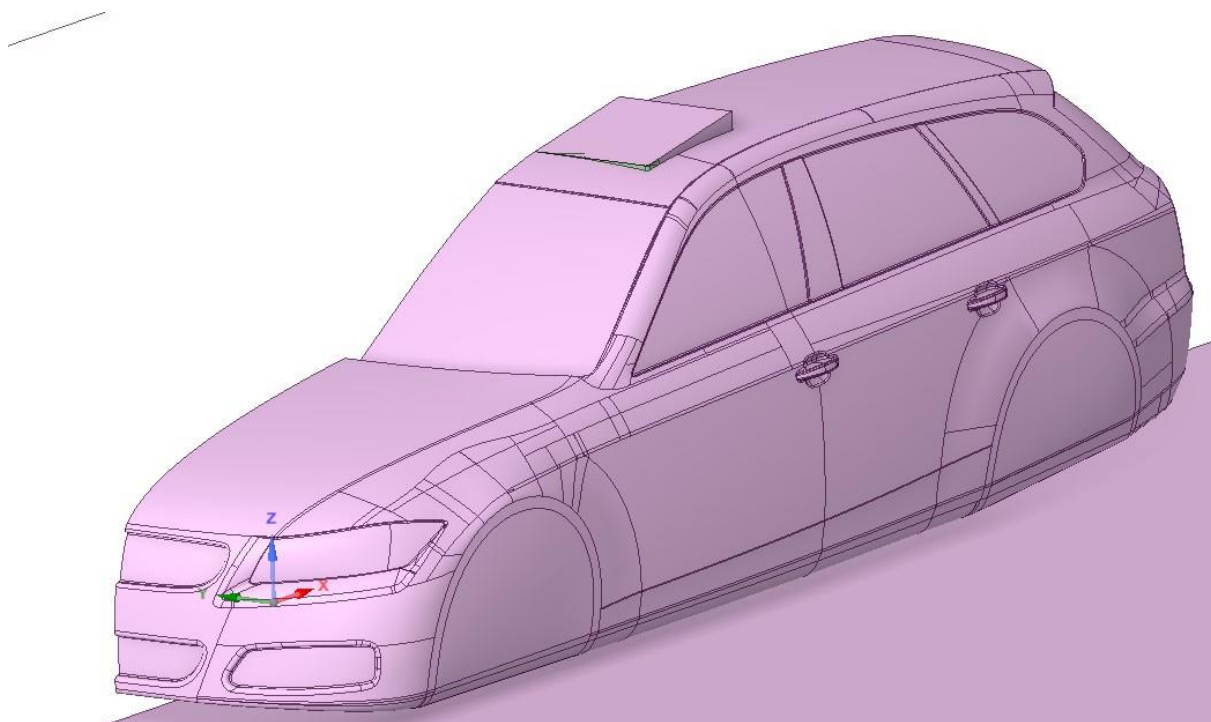
Ta sila iznosi približno 205,58 N za polovicu automobila, odnosno 411,16 N radi već prethodno obrazloženog razloga.

7. UVOĐENJE PROMJENE GEOMETRIJE

Na početno korištenu geometriju automobila dodat će se pojednostavljen krovni prozor kako bi ispitali strujanje zraka oko automobila s otvorenim krovnim prozorom.

7.1. Dodavanje otvorenog krovnog prozora

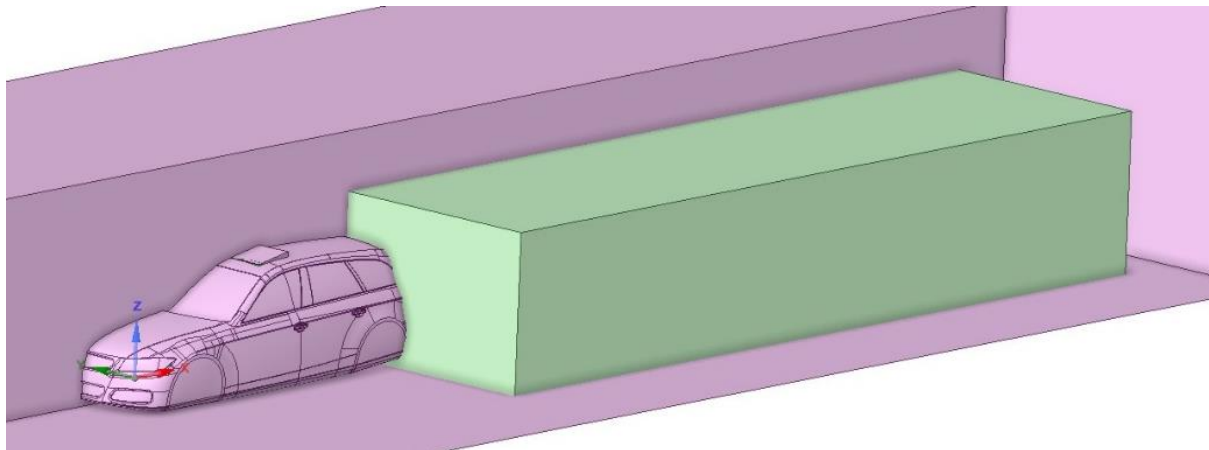
Kako bi se saznalo kakva svojstva na putnoj brzini ima tok zraka oko automobila potrebno je prvo uvesti promjene na geometriji. To će se kao i prije učiniti pomoću Space claim-a, dodavanjem pojednostavljenog oblika koji predstavlja krovni prozor u otvorenom položaju ostvarenom podizanjem zadnjeg djela prozora prikazano na slici niže.



Slika 7.1. Dodavanje krovnog prozora na postojeću geometriju

Analizu će se provesti pod pretpostavkom da nema miješanja fluida unutar i izvan automobila, kao u slučaju kada je zatvorena pregrada za sunce i buku s unutrašnje strane prozora. Sada kada je geometrija dovršena potrebno je ponovno napraviti numeričku mrežu nove geometrije u Mesh-u. Uz to dodat će se dodatna pravila o postavkama numeričke mreže iza stražnje strane automobila

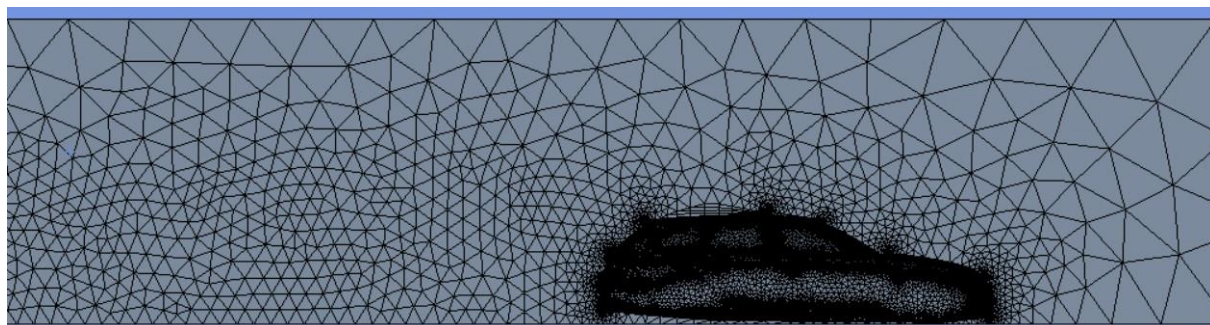
kako bi se dobili precizniji rezultati, a posljedično i bolja vizualizacija. To će se postići korištenjem postavke nazvane „Body of influence“. Prije postavljanja numeričke mreže potrebno je u Space claim-u napraviti polje od interesa koje će se moći označiti prilikom izrade numeričke mreže.



Slika 7.2. Priprema geometrije za upotrebu "Body of influence" u "Meshu"

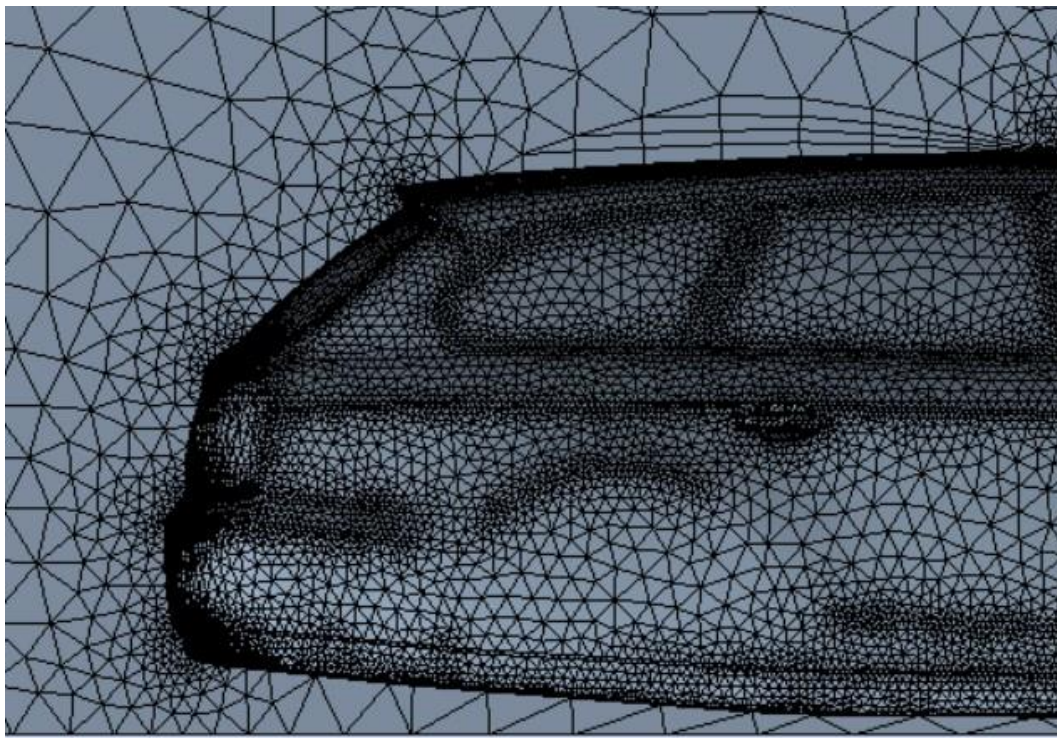
7.2. Postavljanje nove numeričke mreže

Sada se na to područje interesa mogu staviti dodatna ograničenja u smislu početnih uvjeta numeričke mreže, faktora brzine rasta i slično. Nakon postavljanja uvjeta i proračunavanja, mreža je preciznija na područjima interesa, oko i iza automobila, to jest, na jednakom volumenu postoji više manjih polja numeričke mreže.



Slika 7.3. Ugušćena mreža iza automobila

Dodano je i ugušćenje mreže oko i iza krovnog prozora kako bi dobili točnije podatke o strujanju zraka, tlakovima i slično, jer su to područja u kojima očekujemo recirkulaciju kao i turbulentno ponašanje zraka.



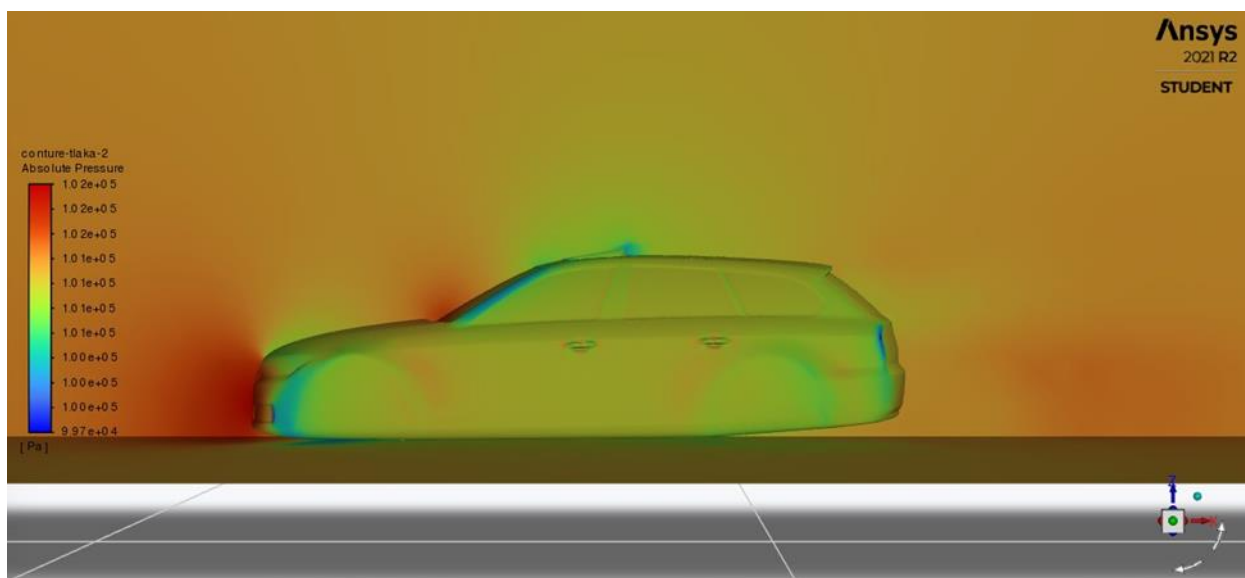
Slika 7.4. Detalj ugušćene mreže na automobilu

Po završetku izrade numeričke mreže koja nema velikih razlika u veličini susjednih polja može se napraviti izračun i vizualizacija podataka u „Fluentu“.

8. REZULTATI I INTERPRETACIJA NOVIH PODATAKA

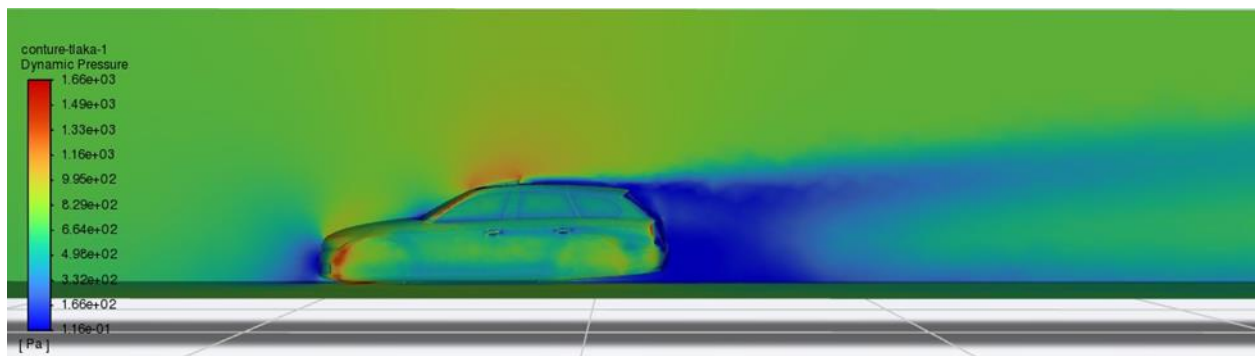
Kada je numerička mreža proračunata bez grešaka se može nastaviti vizualizacija i analiza podataka u „Fluentu“. Nakon postavljanja početnih uvjeta jednakih prethodnima ponovno provodimo izračun, te dobivene rezultate vizualiziramo.

Kao i prije početak će se s konturama tlakova oko automobila. Na slici ispod možemo vidjeti vrlo slična područja jednakih tlakova kao što je to bio slučaj i sa zatvorenim prozorom. Razlika je naravno upravo iznad i iza otvorenog krovnog prozora. U prvom slučaju područje nižeg tlaka pojavilo se odmah nakon prolaska zraka po vjetrobranskom staklu, dok kod otvorenog prozora to područje ostaje pri srednjem tlaku blizu atmosferskog tlaka. Najveća razlika upravo se nalazi iza otvorenog prozora gdje je područje vrlo niskog tlaka.



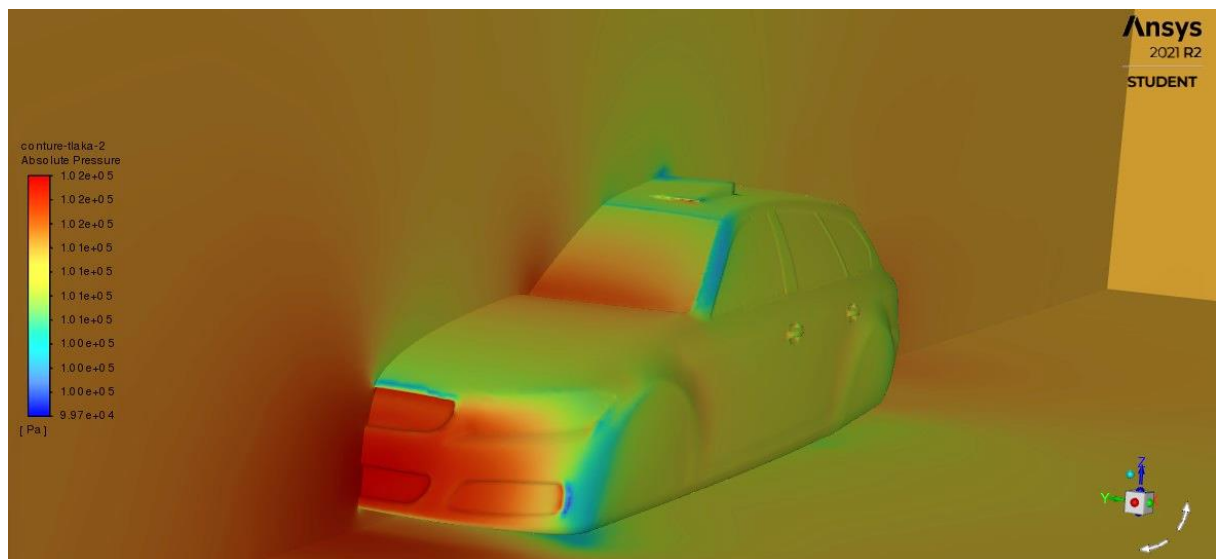
Slika 8.1. Konture apsolutnog tlaka u X-Z ravnini

Područje niskog tlaka iza automobila bolje je prikazati na konturi dinamičkog tlaka zraka, gdje se jasno vidi područje turbulencije i recirkulacije zraka iza automobila.



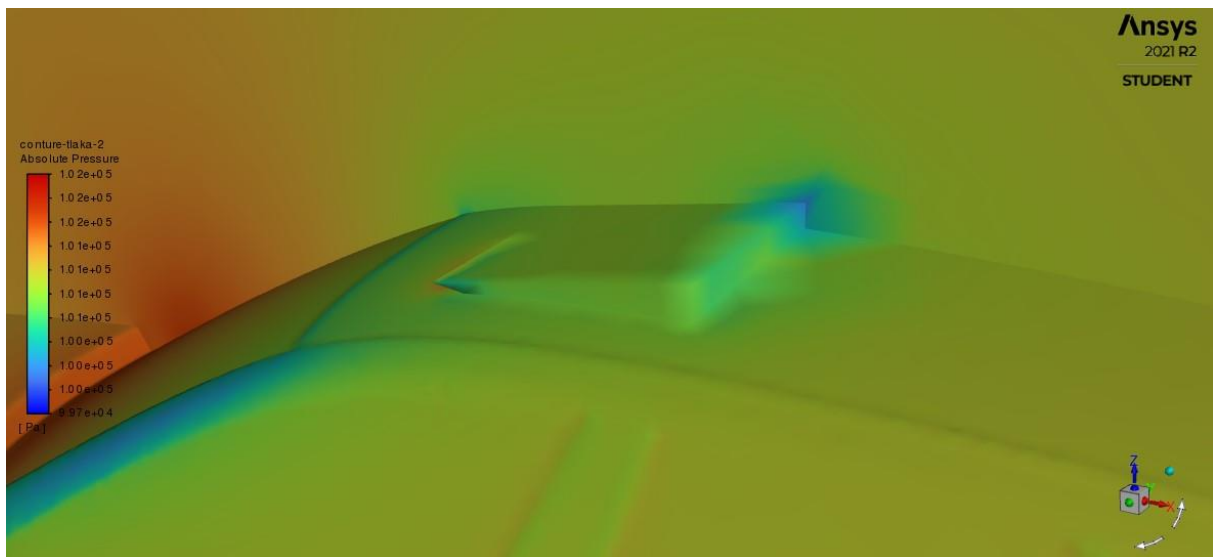
Slika 8.2. Konture dinamičkog tlaka u X-Z ravnini

Sa slike 8.3. može se iščitati područja u kojima se tlak značajno razlikuje od atmosferskog tlaka, kao na primjer maska automobila poput rezultata u prvom slučaju.



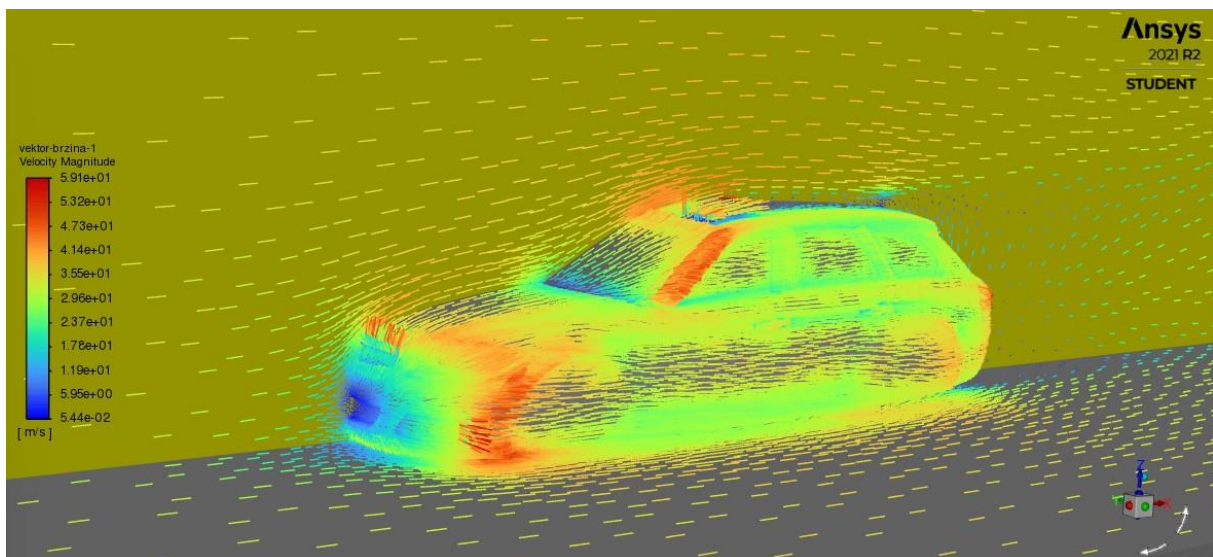
Slika 8.3. Konture apsolutnog tlaka s prednje strane automobila

Sada je potrebno obratiti pažnju na prikaz tlakova oko otvorenog krovnog prozora gdje se situacija može usporediti s onom sa stražnje strane automobila. Odmah po završetku prozora javlja se područje nižeg tlaka zraka, jer to područje prolaskom automobila kroz zrak ostavlja taj „prazan“ prostor koji zrak naglo mora ispuniti.



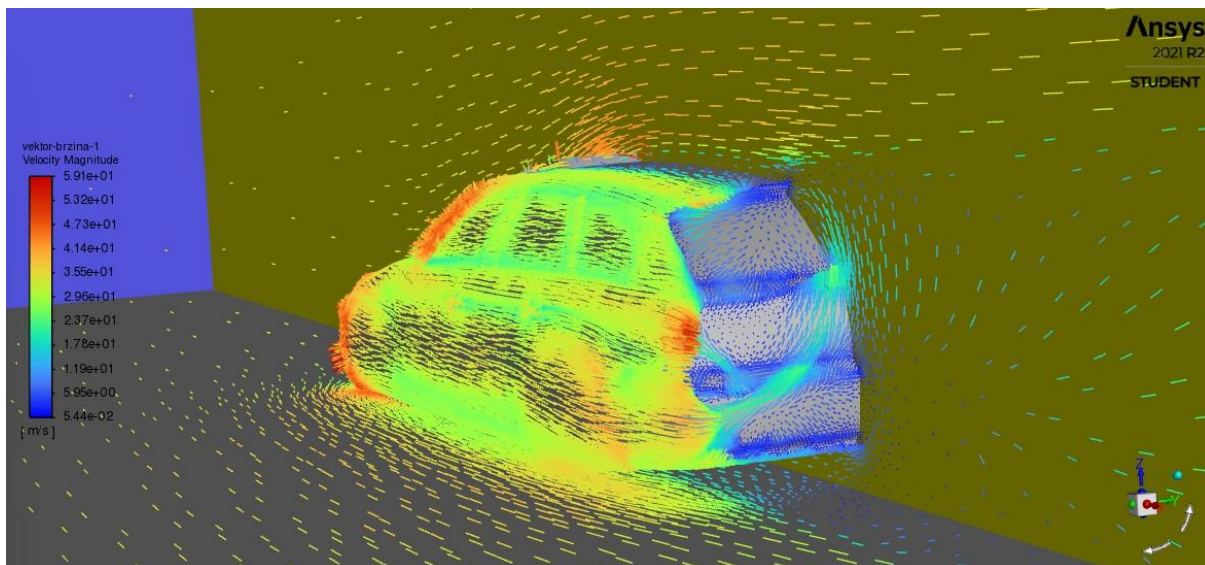
Slika 8.4. Detalj konture apsolutnog tlaka kod krovnog prozora

Brzine zraka oko automobila prikazat će se vektorima brzina iz kojih se može uvidjeti korelacija između područja visokih tlakova i niskih brzina zraka, poput prednje maske automobila i niskih tlakova i velikih brzina kao na području „A stupa“ automobila.



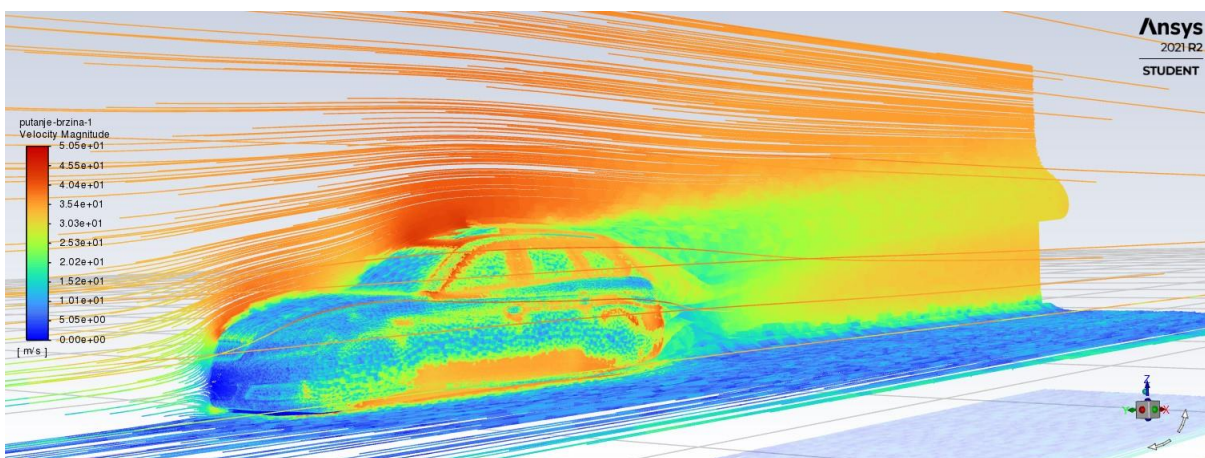
Slika 8.5. Vektori brzina s prednje strane automobila

Prikaz vektora brzina sa stražnje strane automobila može pobliže prikazati recirkulaciju i kovitlanje zraka koja se događa radi naglog popunjavanja prostora iza automobila na putnoj brzini. Na recirkulaciju zraka iza vozila utiče oblik automobila, gustoća zraka, brzina kretanja i slično.



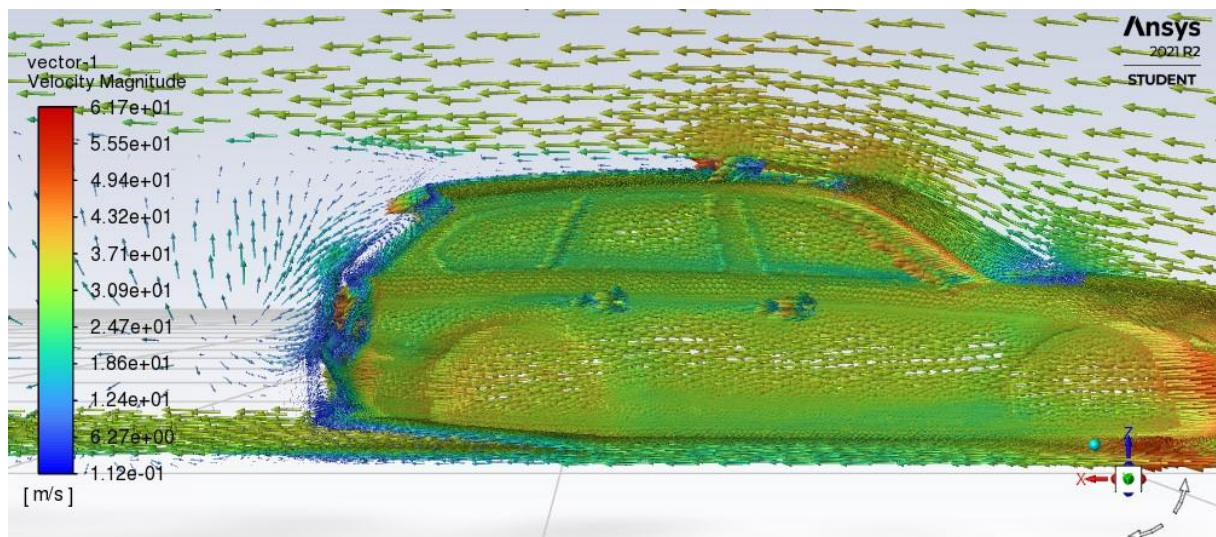
Slika 8.6. Vektori brzina sa stražnje strane automobila

Na slici ispod su prikazane putanje strujnica brzina iz kojih se kao prvi podatak može očitati minimum i maksimum brzina koje iznose 0 m/s i 50,5 m/s što je 181,8 km/h. Maksimalna brzina je 15,5 m/s veća od brzine gibanja fluida, te za 0,9 m/s ili 3,24 km/h veća od maksimalne brzine gibanja fluida kod geometrije bez krovno prozora koja je iznosila 49,6 m/s ili 178,56 km/h. Kao i prije potrebno je uočiti da se prilikom simulacije giba jedino zrak dok automobil stoji, iz čega proizlazi da u realnom slučaju gibanja automobila kroz stacionaran zrak on ne bi premašivao maksimalnu brzinu automobila, nego bi brzina bila jednaka razlici maksimalne brzine fluida u simulaciji i brzini gibanja automobila.



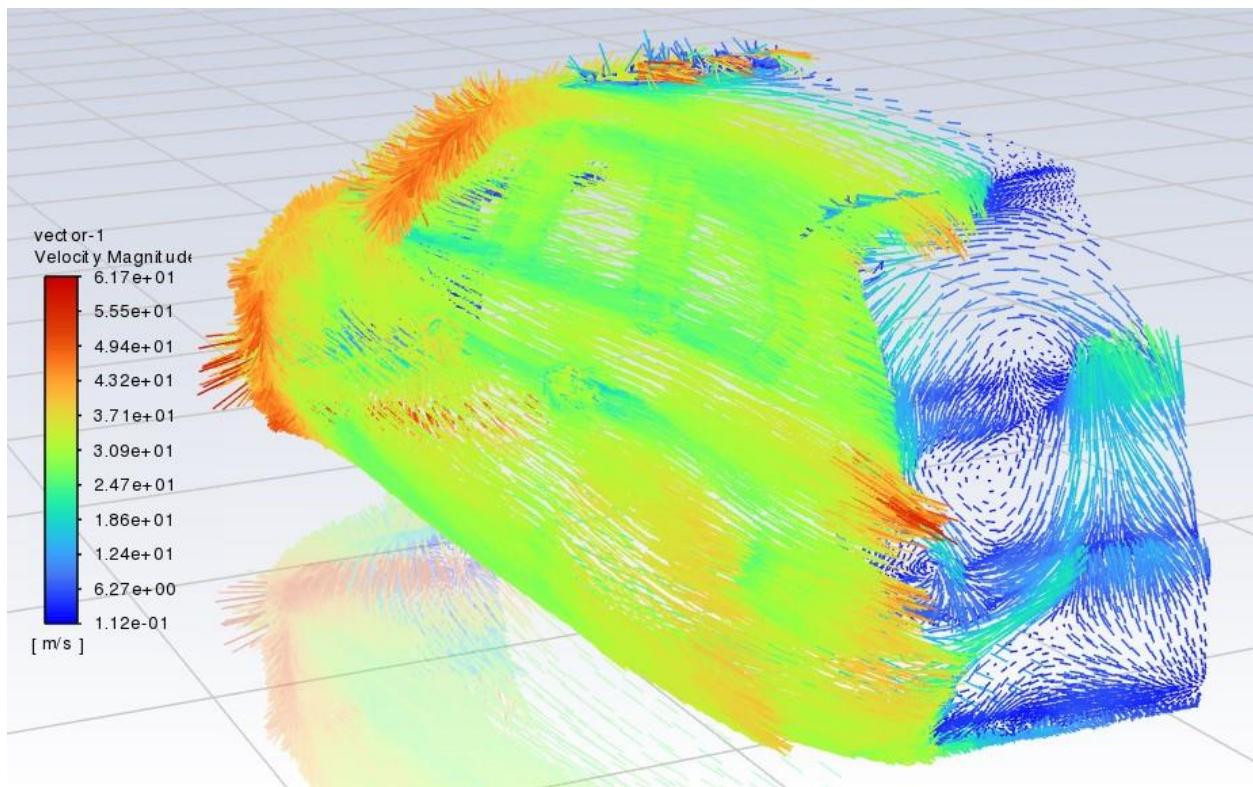
Slika 8.7. Putanje brzina zraka s otvorenim krovnim prozorom

U presjeku automobila vidi se zona recirkulacije iza automobila iz koje se može iščitati putanja gibanja zraka koji popunjava prostor iza automobila, a to je velikim djelom zrak koji se nalazi ispod automobila. Također veliki dio zraka koji popunjava prazninu dolazi s boka automobila što je vidljivo na slici 8.8., a najmanji dio zraka će popuniti prostor s gornje strane, s područja krova automobila.



Slika 8.8. Vektori brzina na X-Z ravnini automobila

Recirkulaciju iza automobila dobro opisuje slika 8.9. na kojoj se iz prikaza brzine vektorima može vidjeti kovitlanje zraka.



Slika 8.9. Turbulencija iza automobila prikazana vektorima brzine

8.1. Otpor zraka

Na otpor zraka utjecaj ima mnogo čimbenika, od kojih su neki: koeficijent sile otpora fluida koji ovisi veličini i obliku predmeta, brzini gibanja predmeta i fluida, te kutu toka fluida u odnosu na predmet, kao i o masi, viskozitetu i kompresibilnosti fluida. Na neke se može utjecati promjenama u obliku geometrije ili brzini i kutu gibanja, dok su neki čimbenici nepromjenjivi, pa je prema njima potrebno prilagoditi sve ostale faktore. Faktor koji također ima veliki udio jest struji li fluid laminarno ili turbulentno.

8.2. Sile otpora s otvorenim krovnom prozorom

Zaključujući iz dobivenih podataka uviđa se da će otpor zraka biti veći s otvorenim krovnom prozorom jer je potrebna veća količina uložene energije za dodatno ubrzati zrak u odnosu na automobil bez krovnog prozora. Otvaranjem krovnog prozora povećava se površina presjeka automobila okomita na gibanje fluida i samim time se povećava otpor tijela koje se giba kroz fluid, što se vidi iz formule. [5]

$$F_{otp} = \frac{C_x * A * \rho * v^2}{2} \quad (8.1.)$$

- F_{otp} - ukupna sila otpora [N]
- C_x - koeficijent sile otpora tijela dobiven istraživanjem
- A - poprečni presjek automobila u smjeru gibanja [m²]
- ρ - gustoća fluida [kg/m³]
- v - brzina kretanja tijela [m/s]

Silu otpora u slučaju bez prozora definirat će se F_{otp1} , dok će se silu u drugom slučaju s otvorenim prozorom nazvati F_{otp2} . Iznose tih sila može se dobiti iz „fluenta“, te one iznose:

$$F_{otp1} = 362,83 \text{ N}$$

$$F_{otp2} = 401,42 \text{ N}$$

| Forces - Direction Vector (1 0 0) | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------|
| | Forces [N] | | |
| Zone | Pressure | Viscous | Total |
| wall-geom-6_geom-3_solid | 174.5844 | 26.123484 | 200.70788 |
| ----- | | | |
| Net | 174.5844 | 26.123484 | 200.70788 |

Slika 8.11. Sila izvršena na automobil u smjeru gibanja zraka u odnosu na automobil

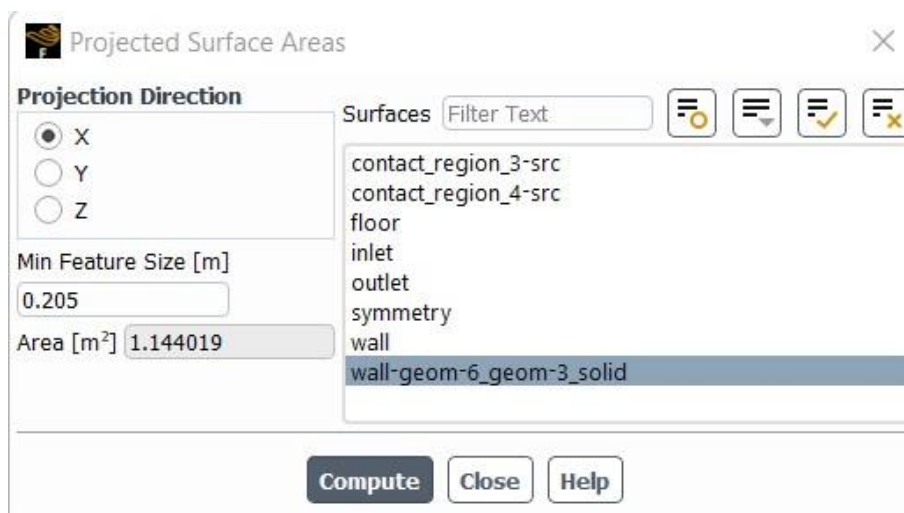
| Forces - Direction Vector (0 0 1) | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|------------|
| | Forces [N] | | |
| Zone | Pressure | Viscous | Total |
| wall-geom-6_geom-3_solid | -445.97675 | 1.0690726 | -444.90767 |
| ----- | | | |
| Net | -445.97675 | 1.0690726 | -444.90767 |

Slika 8.12. Sila izvršena na automobil prema podlozi

Treba uzeti u obzir da su prikazani rezultati izračunati za simetričnu polovicu automobila pa ih je potrebno udvostručiti. Sada se može uvidjeti da su varijable koje se mijenjaju C_x i A , te se zna da se površina poprečnog presjeka povećala sa 2,031 m² na 2,288 m².

| | |
|-----------|----------------------------|
| Area | 1015254,786mm ² |
| Perimeter | 3985,4272mm |

Slika 8.13. Površina prije otvaranja krovnog prozora



Slika 8.14. Površina nakon otvaranja krovnog prozora

Iz toga se mogu dobiti koeficijenti sila otpora za oba slučaja. Nepoznanica C_{x1} za slučaj bez prozora iznosi :

$$C_{x1} = \frac{2 * F_{otp1}}{A_1 * \rho * v^2}$$

$$C_{x1} = \frac{2 * 362,83}{2,031 * 1,22521 * 35^2}$$

$$C_{x1} = 0,2381$$

Koeficijent sila otpora za slučaj s otvorenim prozorom iznosi:

$$C_{x2} = \frac{2 * F_{otp2}}{A_2 * \rho * v^2}$$

$$C_{x2} = \frac{2 * 401,42}{2,288 * 1,22521 * 35^2}$$

$$C_{x2} = 0,2338$$

Iz analize dobivenih koeficijenata dolazi se do zaključka da otvaranjem krovnog prozora koeficijent sile otpora opada, ali radi povećanja površine poprečnog presjeka će ukupna sila otpora izvršena na vozilo u smjeru suprotnom od smjera gibanja biti veća. S tim zaključkom odgovara se na početno pitanje isplati li se voziti s otvorenim krovnim prozorom pri putnoj brzini od 126 km/h, te se sada zna da će se u tom slučaju utrošiti više energije.

8.3. Gubitak energije po kilometru

Najjednostavnija formula za rad je [11]:

$$W = F * s \quad (8.2.)$$

gdje je: F – sila u smjeru putanje

s – put koji je prešao automobil

W - rad

gdje se pretpostavlja da je vektor sile kolinearan s putanjom automobila. Kao silu koristit će se razlika sila dobivenih vožnjom s otvorenim i sa zatvorenim prozorom. Budući da je sila suprotna od smjera gibanja automobila rad koji će se dobiti bit će negativnog predznaka te će iznositi:

$$W = F_r * s$$

$$W = -38.59 \text{ N} * 1000 \text{ m}$$

$$W = -38590 \text{ J}$$

Kako bi se bolje prikazalo koliki je to zapravo gubitak energije pokušat će se tu energiju izraziti u količini goriva po kilometru. Donja ogrjevna moć dizela je približno 42,71 MJ/kg ili 42710000 J/kg [12]. Iz toga proizlazi:

$$\frac{0,03859 \text{ MJ/km}}{42,71 \text{ MJ/kg}} = 0,000904 \text{ kg/km}$$

To znači da će se trošiti 0,000861 kg goriva više po prijeđenom kilometru u slučaju otvorenog prozora. Na putu od 1000 km što odgovara prosječnoj autonomiji dizelskog vozila s punim spremnikom goriva količina potrošenog goriva iznosi:

$$0,000904 \text{ kg/km} * 1000 \text{ km} = 0,904 \text{ kg}$$

Prosječna gustoća dizelskog goriva otprilike iznosi $\rho=830 \text{ kg/m}^3$ [13] pa volumen goriva koje je dodatno utrošeno na 1000 km iznosi:

$$V = \frac{0,904 \text{ kg}}{830 \text{ kg/m}^3} = 0,0010891 \text{ m}^3 = 1,0891 \text{ l}$$

Prosječna potrošnja dizelskog vozila na putnoj brzini može se procijeniti na $C = 8 \text{ l/100km}$ ili $C = 0,08 \text{ l/km}$ što je na konzervativnijoj strani kako bi rezultat bio realniji. U tom slučaju put s koji se dodatno može proći nakon 1000 km iznosi:

$$s = \frac{V}{C} = \frac{1,0891 \text{ l}}{0,08 \text{ l/km}} = 13,615 \text{ km}$$

Na kraju ukupan put koji će prijeći automobil sa zatvorenim prozorom iznosi 1013,615 km, što je 1,014% više u odnosu na automobil s otvorenim krovim prozorom.

Za potvrdu dobivenih podataka potrebna je daljnja kalibracija numeričke mreže i simulacije, što nije moguće sa studentskom licencom programa radi ograničenog broja elemenata numeričke mreže. Također bilo bi potrebno izračun staviti u korelaciju s drugim radovima kako bi se potvrdila istinitost izračuna.

9. ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju fokus je bio na postavljanju proračuna i na tumačenju dobivenih informacija po završetku proračuna. Vizualizacija se smatra ključni dio učinkovite analize podataka na velikim i složenim skupovima podataka kao što su CFD podaci koji su se koristili u ovom radu. Kvalitetnim prikazom gomile podataka dobivenim numeričkim izračunom može se lakše i brže iščitati i razumjeti što se u stvarnosti događa s bilo kojim područjem od interesa na modelu, što dovodi do poboljšanja u dizajnu i manjim gubitcima optimizacijom geometrije. U ovom radu prikazano je kako pomoću CFD programa riješiti određeni problem ili optimizaciju u realnom svijetu, te ostvariti željene rezultate primjenjive u stvarnom životu. Aerodinamika ima velik utjecaj na sile izvršene na automobil u gibanju, te je stoga potrebno posebnu pažnju posvetiti upravo utjecaju fluida u kojemu se predmet kreće, bio to automobil i zrak ili brod i voda. Ovakvom analizom moguće je napraviti velike uštede u ekonomskom razmatranju problema, jer se optimizacijom geometrije ili promjenom optimalne putne brzine za određenu geometriju može osigurati optimalno rješenje kako bi troškovi prilikom korištenja bili svedeni na minimum.

U ovome slučaju uspoređivala su se dva modela automobila kojima je razlika bila otvoreni i zatvoreni krovni prozor. Rezultati su pokazali da se prilikom vožnje s otvorenim krovnim prozorom koeficijent sile otpora smanjuje, ali radi povećanja površine poprečnog presjeka, ukupna sila otpora izvršena na vozilo u suprotnom smjeru od smjera gibanja vozila bit će veća. S tim zaključkom odgovara se na početno pitanje isplati li se voziti s otvorenim krovnim prozorom pri putnoj brzini od 126 km/h, te se sada zna da će se u tom slučaju utrošiti više energije. Za detaljnije podatke o uštedi potrebna su daljnja kalibriranja numeričke mreže i simulacije, što nije moguće sa studentskom licencom programa koja je ograničena brojem elemenata mreže i računalnom kapacitetu računala na kojem je simulacija izrađena.

10.LITERATURA

- [1] Franjković, D.; Krajček, K.: „Teorija leta I“, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
- [2] Žic, E.; Pilat, M.: „Računalna dinamika fluida i metode vizualizacije strujanja fluida“, Rijeka, 2021.
- [3] Puljić, D.: „Analiza nestacionarnog strujanja zraka oko 2-D generičkog oblika autobusa u horizontalnoj ravnini“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [4] Džijan, I.: „Numerička metoda za analizu strujanja fluida na nestrukturiranoj mreži“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [5] Oremović, I.: „Utjecaj elemenata karoserije automobila na potrošnju energije“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [6] Delić, F.: „Validacija modela turbulencije na primjerima strujanja na aeroprofilima i krilima s prijelazom iz laminarnog u turbulentni režim“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [7] Ansys: „Pennsylvania Technology Directory“, Pennsylvania, 1999.
- [8] Technical University of Munich, „DrivAer Model“, s interneta, <https://www.epc.ed.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/geometry/>, 23.6.2022.
- [9] Al-Saadi, A.; Hassanpour, A.: „Simulations of Aerodynamic Behaviour of a Super Utility Vehicle Using Computational Fluid Dynamics“, s Interneta, https://www.researchgate.net/publication/303291789_Simulations_of_Aerodynamic_Behaviour_of_a_Super_Utility_Vehicle_Using_Computational_Fluid_Dynamics, 23.6.2022.
- [10] Roy, S.K., Sharma, A.M.: „Effects of Aerodynamic downforce on Vehicle Control and Stability“, s Interneta, https://www.researchgate.net/publication/355971300_Effects_of_Aerodynamic_downforce_on_Vehicle_Control_and_Stability, 23.6.2022.
- [11] Krpan, M. i dr.: „Dinamika teorija i primjena“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2001.
- [12] Ministarstvo gospodarstva RH: „Energija u Hrvatskoj“, Zagreb, 2014.
- [13] INA-Industrija nafte, d.d.: „Sigurnosno tehnički list“, Zagreb, 2018.

SAŽETAK

Primjenom računalne dinamike fluida i analizom dobivenih numeričkih i vizualnih rješenja odgovorilo se na pitanje kako otvoreni krovni prozor utječe na strujanje zraka, sile otpora, koeficijente otpora i druge fizikalne veličine. Nakon analize može se zaključiti da će otvaranje krovnog prozora smanjiti koeficijent otpora zraka za automobil što je povoljno, ali će radi povećanja poprečnog presjeka u ravnini koja je okomita na gibanje automobila ukupna sila izvršena na automobil u suprotnom smjeru od njegova gibanja biti veća s otvorenim prozorom. Saznalo se i da je put koji će automobil sa zatvorenim prozorom prijeći biti veći za istu količinu goriva pri putnoj brzini od 35 m/s (126 km/h), za ispitanu geometriju automobila.

SUMMARY

By applying computer fluid dynamics and analyzing the obtained numerical and visual solutions, the question of how an open sunroof affects air flow, resistance forces, resistance coefficients and other physical quantities was answered. After the analysis, it can be concluded that opening the sunroof will reduce the air resistance coefficient of the car, which is favorable, but due to the increase in the cross-section in the plane perpendicular to the car's motion the total force exerted on the car in the opposite direction to its movement will be greater with the window open. It was also found that the distance traveled by the car with the window closed is greater for the same amount of fuel at a road speed of 35 m/s (126 km/h), for the tested geometry of the car.

KLJUČNE RIJEČI

Aerodinamika, računarska dinamika fluida, vizualizacija, simulacija, numerička mreža, sile otpora fluida, automobil

KEY WORDS

Aerodynamics, computational fluid dynamics (CFD), visualization, simulation, numerical mesh, fluid resistance forces, car