

# Utjecaj elemenata karoserije automobila na potrošnju energije

---

Oremović, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:859373>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Oremović**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Utjecaj elemenata karoserije automobila na potrošnju energije

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Virag

Komentor:

Dr. sc. Ivan Korade

Student:

Ivan Oremović

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom školovanja i navedenu dodatnu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Zdravku Viragu i komentoru dr. sc. Ivanu Koradeu, te profesoru dr. sc. Severinu Krizmaniću na pomoći i uloženom trudu i vremenu pri izradi ovog rada.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Ivan Oremović

Mat. br.: 0035209432

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj elemenata karoserije automobila na potrošnju energije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of car body elements on energy consumption**

Opis zadatka:

Aerodinamički otpor pri vožnji cestovnih vozila, ovisno o režimu vožnje, ima veći ili manji udio u ukupnoj potrošnji energije. Kod vozila s klasičnim pogonom tipična količina energije koju sadrže spremnici goriva i tipična cestovna infrastruktura u suglasju su s navikama korisnika u pogledu dometa vozila. Električni pogon je relativno nova pojava u autoindustriji, gdje u ovoj ranoj fazi razvoja, električna vozila posjeduju bitno manje količine energije, s negativnim odrazom na njihovu zastupljenost u prometu. Ovi problemi se nastoje nadići razvojem boljih baterija i sustava za pohranu energije kočenjem, dok na strani aerodinamičkog otpora preostaje jedino njegovo smanjenje, gdje su često prepreka nesuglasje estetskih i aerodinamičkih zahtjeva na karoseriju vozila, te trenutno važeća sigurnosna pravila i prakse pri konstruiranju funkcionalnih dijelova karoserije.

U ovome radu potrebno je provesti računalne simulacije u cilju određivanja utjecaja retrovizora na povećanje sile otpora automobila, te obaviti proračun utjecaja na potrošnju energije i domet automobila.

U sklopu rada potrebno je:

- odabrati ili izraditi referentni geometrijski model karoserije automobila, te inačice s retrovizorima i prema potrebi uvesti pojednostavljenja;
- za odabrane geometrijske modele i rubne uvjete, obaviti sve postupke računalnog proračuna: diskretizaciju geometrijskih modela, podešavanje numeričkog postupka, post-procesiranje rješenja.
- odrediti ovisnost sile otpora o brzini, te izračunati utjecaj povećanja otpora na potrošnju energije i domet.

Rad treba sadržavati:

- uvod;
- opis problema i metoda primijenjenih za njihovo rješavanje;
- odgovarajuće prikaze dobivenih rezultata i osvrt na rezultate;
- zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Virag

Dr. sc. Ivan Korade, komentor

Ivan Korade

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

# SADRŽAJ

1	Uvod u aerodinamiku vozila .....	1
2	Teorijske osnove .....	3
2.1	Osnovni zakoni dinamike fluida.....	3
2.2	Laminarno i turbulentno strujanje .....	4
2.3	Modeli turbulencije.....	7
2.4	Modeliranje koeficijenta turbulentne viskoznosti .....	7
2.5	$k - \omega SST$ model turbulencije .....	8
2.6	Aerodinamičke sile .....	9
2.7	Aerodinamički koeficijenti .....	10
3	Računalna dinamika fluida.....	11
3.1	Metoda konačnih volumena.....	11
4	Priprema geometrije za proračun .....	15
4.1	Geometrija .....	15
4.2	Diskretizacija proračunskog područja .....	17
5	Postavljanje simulacije u OpenFOAM paketu.....	23
5.1	Postavljanje rubnih uvjeta .....	23
5.2	Postavljanje numeričkog rješavača.....	26
6	Rezultati numeričkog proračuna .....	29
6.1	Rezultati proračuna na geometriji sa retrovizorom .....	29
6.2	Rezultati proračuna na geometriji bez retrovizora.....	34
7	Utjecaj na potrošnju energije .....	36
7.1	Snaga aerodinamičke sile otpora .....	36
7.2	Snaga otpora kotrljanja.....	37
7.3	Iznosi snage za pripadajuće brzine .....	37
8	Zaključak.....	40

# POPIS SLIKA

Slika 1: Odnos utjecaja otpora kotrljanja i ukupnog otpora zraka+kotrljanja s obzirom na brzinu kretanja.....	1
Slika 2: Kretanje koeficijenta otpora zraka automobila ( $CD$ ) kroz povijest .....	2
Slika 3: Razvoj graničnog sloja na ravnoj ploči.....	5
Slika 4: Udio sile tlaka/trenja u ukupnoj aerodinamičkoj sili .....	9
Slika 5: Prikaz definiranja referentne površine automobila .....	10
Slika 6: Dio prostora diskretiziranog pravilnim šesterokutima.....	12
Slika 7: Geometrija automobila sa i bez retrovizoria .....	16
Slika 8: Geometrija automobila sa i bez retrovizora (prednji pogled) .....	17
Slika 9: Prikaz veličine područja proračuna i njegovih granica.....	18
Slika 10: Prikaz profinjene mreže u okolici luka prednjeg kotača.....	19
Slika 11: Prikaz profinjene mreže u okolici luka stražnjeg kotača .....	19
Slika 12: Prikaz profinjene mreže na kanalima difuzora .....	19
Slika 13: Prikaz profinjene mreže na složenim dijelovima geometrije prednjeg branika automobila.....	20
Slika 14: Prikaz profinjene mreže na površini retrovizora.....	20
Slika 15: Prikaz profinjene mreže na površini kotača.....	21
Slika 16: Prikaz profinjene regije područja proračuna .....	22
Slika 17: Brzina čestica fluida na površini automobila.....	25
Slika 18: Slikoviti prikaz neizbježnih pogrešaka numeričkih shema.....	27
Slika 19: Polje brzina na presjeku simetrije (udaljeno).....	30
Slika 20: Polje brzina na presjeku simetrije (približno) .....	30
Slika 21: Polje brzina na polovici kotača automobila .....	31
Slika 22: Polje brzina u ravnini presjeka retrovizora .....	31

Slika 23: Polje brzina u presjeku retrovizora (približno) .....	32
Slika 24: Polje tlaka u ravnini simetrije .....	32
Slika 25: Polje tlaka na presjeku retrovizora.....	33
Slika 26: Polje tlaka na površini automobila.....	33
Slika 27: Polje brzina na presjeku sa slike 22 (bez retrovizora) .....	34
Slika 28: Polje tlaka na površini automobila (bez retrovizora) .....	35
Slika 29: Dijagramski prikaz promjene pojedine snage s povećanjem brzine .....	38
Slika 30: Dijagramski prikaz smanjenja potrebne snage .....	38



# POPIS TABLICA

Tablica 1: Parametri usitnjavanja mreže .....	21
Tablica 2: Rubni uvjet brzine na granicama.....	24
Tablica 3: Rubni uvjeti tlaka i turbulentne kinetičke energije na granicama.....	25
Tablica 4: Rubni uvjeti specifične brzine disipacije i turbulentne kinematičke viskoznosti na granicama .....	26

# POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_{ref}$	[m <sup>2</sup> ]	referentna površina
$C_D$	[-]	aerodinamički koeficijent otpora
$C_L$	[-]	aerodinamički koeficijent uzgona
$D_n$	[kg/s]	jačina difuzije
$\Delta E_k$	[J]	promjena kinetičke energije
$\Delta E_p$	[J]	promjena potencijalne energije
$F_D$	[N]	sila otpora
$F_L$	[N]	sila uzgona
$F_n$	[kg/s]	jačina konvekcije
$f_i$	[N/kg]	komponente vektora specifične masene sile
$J_i$	[-]	vektor fluksa fizikalne veličine
$k$	[J/kg]	kinetička energija turbulencije
$M_a$	[-]	Machov broj
$P$	[W]	snaga
$p$	[N/m <sup>2</sup> ]	tlak
$\bar{p}$	[N/m <sup>2</sup> ]	statistički osrednjeno polje tlaka
$p_{kin}$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	kinematički tlak
$Re$	[-]	Reynoldsov broj
$S$	[m <sup>2</sup> ]	površina
$V$	[m <sup>3</sup> ]	volumen
$v_i$	[m/s]	komponente vektora brzine strujanja
$\bar{v}_i$	[m/s]	osrednjeni dio vektora brzine strujanja
$v_i'$	[m/s]	pulsirajući dio polja vektora brzine strujanja
$v_n$	[m/s]	projekcija vektora brzine u smjeru vanjske normale
$v_t$	[m/s]	karakteristična brzina turbulentnih pulsacija
$v_{zvuka}$	[m/s]	brzina zvuka
$W$	[J]	rad
$\delta_{ij}$	[-]	Kroneckerov simbol

$\Sigma_{ij}$	[N/m <sup>2</sup> ]	tenzor viskoznih naprezanja
$\varphi$	[-]	polje fizikalne veličine
$\Delta n$	[m]	udaljenost između čvorova konačnog volumena
$\Gamma$	[kg/ms]	koeficijent difuzije
$\mu$	[Pas]	dinamička viskoznost
$\mu_t$	[kg/ms]	turbulentna viskoznost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematička viskoznost
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	specifična brzina disipacije

## Sažetak

U zadnjih nekoliko desetljeća u automobilskoj industriji se sve više pažnje posvećuje učinkovitosti vozila u smislu njihove potrošnje energije. Motivi su kroz povijest bili različiti, poput rasta cijene nafte u 80-im godinama prošloga stoljeća, no danas se pojavom električnih vozila i rastom ekološke svijesti sve više resursa i vremena ulaže u optimizaciju učinkovitosti novih vozila. Područje čijom se optimizacijom može napraviti značajan pomak u učinkovitosti potrošnje energije vozila je aerodinamika. Također, razvojem sigurnosnih sustava i sustava autonomije u novim i budućim vozilima, ukida se potreba za retrovizorima koji se u tom slučaju mogu zamijeniti kamerama ugrađenim u karoseriju automobila u slučaju da vozilo nije u potpunosti autonomno.

Zadatak ovog rada bio je provesti numeričku simulaciju utjecaja retrovizora na ukupnu aerodinamičku silu koja djeluje na automobil. Geometrija je preuzeta sa interneta u STEP formatu i zatim prerađena u svrhu zadatka, pa su tako izrađena dva modela za potrebe numeričke simulacije. Jedan model predstavlja klasični električni automobil, dok su na drugom modelu uklonjeni retrovizori sa bočnih strana geometrije. Numerička simulacija provedena je u OpenFOAM-u, te su rezultati post-procesirani u Paraview-u. Prikazani su ključni presjeci geometrijske mreže i raspodjela fizikalnih polja brzina i tlakova na tim presjecima, isto kao i raspodjela tlaka na samoj površini automobila. Također je izračunat aerodinamički koeficijent otpora automobila za svaki od korištenih modela pomoću kojeg je prikazano poboljšanje u aerodinamičkoj učinkovitosti automobila bez retrovizora.

Nakon toga je proveden pojednostavljen proračun utjecaja takve promjene u geometriji na potrošnju energije automobila. Prikazani su dijagrami snage potrebne za svladavanje aerodinamičke sile koju stvara pojedini model pri kretanju konstantnom brzinom na konstantnoj nadmorskoj visini, te ukupni utjecaj tih promjena na snagu potrebnu za pokretanje takvog vozila. S obzirom na to da utjecaj aerodinamike postaje značajan tek pri većim brzinama, dijagrami su prikazani za brzine od 70 do 150 kilometara na sat.

## Summary

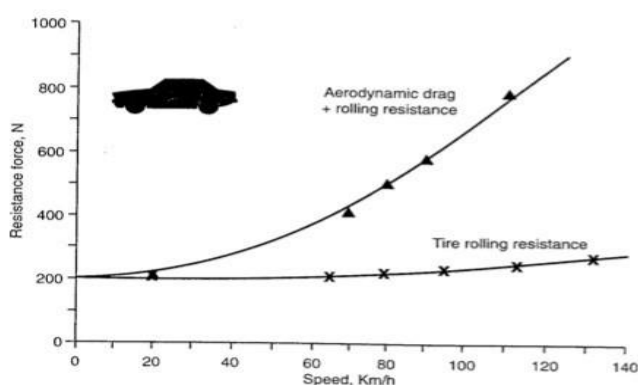
In the last few decades, the automotive industry has increasingly focused on the efficiency of vehicles in terms of their energy consumption. Motives have varied throughout history, such as the rise in the price of oil in the 1980s, but today the advent of electric vehicles and the rise of environmental awareness, more resources and time are being invested in optimizing efficiency of new vehicles. An area whose optimization can make a significant shift in vehicle energy efficiency is aerodynamics. Also, with the development of safety and autonomy systems in new and future vehicles, the need for rear-view mirrors is eliminated, because they can be replaced by cameras fitted to the car body if the car is not fully autonomous.

The task of this paper was to perform a numerical simulation of the influence of the rearview mirrors on the total aerodynamic force acting on the car. The geometry was downloaded in STEP format and then reworked for the purpose of the task, so two models were created for the purpose of numerical simulation. One model is a classic electric car, while the other model has no side mirrors. Numerical simulation was performed in OpenFOAM and the results were post-processed in Paraview. The key sections of the mesh and the distribution of the velocity and pressure fields at these sections are shown, as well as the pressure distribution at the very surface of the car. The aerodynamic drag coefficient of the car was also calculated for each of the models used, showing the improvement in the aerodynamic efficiency of the car without the rearview mirrors.

Subsequently, a simplified calculation of the effect of such a change in geometry on the energy consumption was carried out. The diagram of power required to overcome the aerodynamic force generated by an individual model at constant speed and altitude, and the diagram of the overall impact of these changes on the power required to drive such a vehicle are shown. As the impact of aerodynamics becomes significant only at higher speeds, diagrams are shown for speeds of 70 to 150 kilometers per hour.

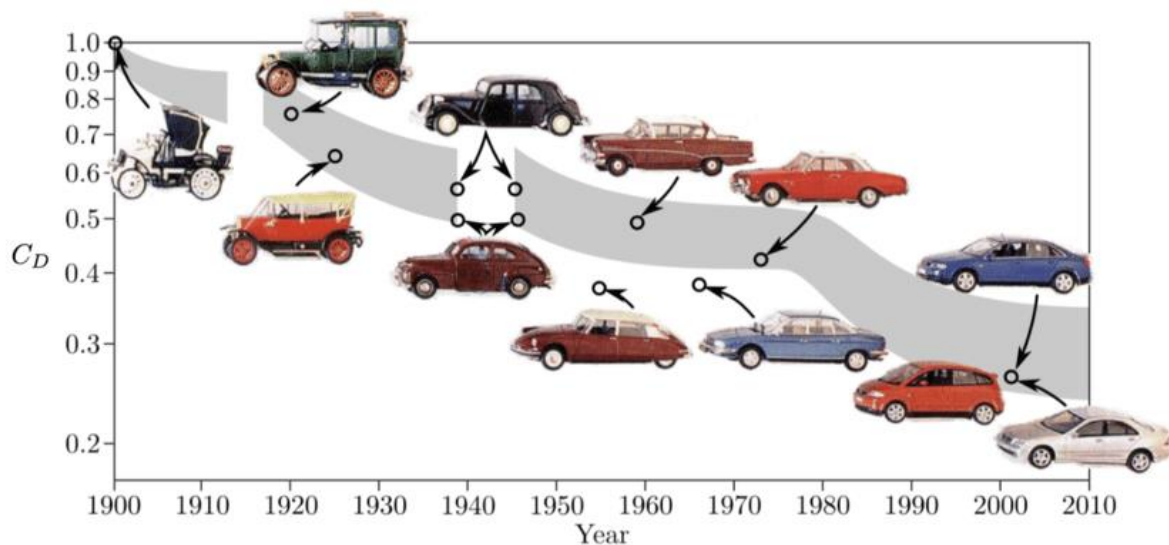
# 1 Uvod u aerodinamiku vozila

Aerodinamika općenito proučava utjecaj zraka na tijelo koje se giba u odnosu na zrak. Aerodinamika vozila bavi se područjem relativno niskih podzvučnih brzina kod kojih je Machov broj manji od 0,3. Strujanje zraka oko automobila može se smatrati nestlačivim turbulentnim strujanjem, što znači da otpor automobila ovisi isključivo o viskoznim svojstvima zraka. Otpor automobila se dijeli na otpor trenja, uzrokovan niskim brzinama strujanja u graničnom sloju, te inducirani otpor koji se javlja zbog oblika vozila. Na samom početku razvoja automobilske industrije, vozila su se kretala poprilično niskim brzinama, što je značilo da je i utjecaj aerodinamike takvih vozila gotovo pa zanemariv. No daljnjim razvojem i povećanjem brzine kretanja automobila, prvo trkaćih, a nakon toga i komercijalnih, aerodinamika u automobilskoj industriji poprima sve veći značaj. Danas je aerodinamika u svijetu trkaćih automobila jedna od najvažnijih komponenti koja utječe na performanse vozila. No ima značajnu ulogu i u svijetu komercijalnih vozila gdje se najviše pažnje daje smanjenju utjecaja otpora, pogotovo danas kada je razina ekološke svijesti na najvišoj razini, što znači da se potrošnja vozila želi znatno smanjiti. Te samom pojavom električnih automobila koji zbog relativno dugog punjenja baterija teže k što manjem otporu, kako bi dolet bio što veći. Sile koje najviše utječu na otpor kretanju automobila su sila otpora kotrljanja i sila otpora zraka. No s povećanjem brzine se znatno povećava utjecaj sile otpora zraka, dok otpor kotrljanja praktički linearno lagano raste.



Slika 1: Odnos utjecaja otpora kotrljanja i ukupnog otpora zraka+kotrljanja s obzirom na brzinu kretanja [7]

Na slici 1 jasno je vidljivo da pri brzini koja se koristi prilikom vožnje autocestom, otpor zraka može imati i do dvije trećine utjecaja na ukupni otpor kretanju automobila, pa odgovarajućim konstruiranjem i oblikovanjem vozila možemo znatno smanjiti taj utjecaj. Na slici 2 vidimo kretanje koeficijenta otpora zraka ( $C_D$ ) i njegovo drastično smanjenje kroz povijest automobilske industrije. Drastičan pad možemo primijetiti nakon poskupljenja nafte u 80-im godinama prošloga stoljeća, pa tako danas imamo poprilično aerodinamički učinkovite automobile.



Slika 2: Kretanje koeficijenta otpora zraka automobila ( $C_D$ ) kroz povijest [6]

Koeficijent otpora zraka ( $C_D$ ) zovemo i koeficijentom otpora oblika, jer ovisi o obliku tijela odnosno vozila i svojstvima fluida. On predstavlja bez-dimenzijsku veličinu koja nam daje informaciju o utjecaju oblika tijela na aerodinamička svojstva tog tijela, ako promatramo tijela oko kojih struji isti fluid. Pa je tako postao sinonim aerodinamike automobila. Razvojem sigurnosnih sustava, kamera i sustava autonomije u automobilima, na budućim automobilima postati će moguće ukloniti retrovizor, što može dovesti do značajnog poboljšanja aerodinamičkih svojstava automobila. Često su dovoljne manje promjene u konstrukciji karoserije automobila odnosno njenom obliku, kako bi se dobio značajan utjecaj na aerodinamički koeficijent otpora zraka. Obično se radi na optimizaciji postojećih komponenti karoserije vozila, no ovim se radom želi pokazati kolika je promjena otpora ako se potpuno ukloni retrovizor, što se može smatrati optimizacijom čitave karoserije automobila u svrhu smanjenja koeficijenta otpora odnosno značajnog smanjenja potrošnje energije prilikom vožnje većom brzinom.

## 2 Teorijske osnove

Dinamiku fluida opisujemo osnovnim zakonima dinamike fluida, koji predstavljaju osnovne zakone fizike. U aerodinamici bitno razlikujemo stlačivo i nestlačivo strujanje. Kod nestlačivog strujanja pretpostavljamo da gustoća fluida ostaje nepromijenjena, što dovodi do toga da dinamiku takvog fluida opisujemo zakonom očuvanja mase i zakonom očuvanja momenta količine gibanja. Dok jednadžbu očuvanja energije u tom slučaju zapisujemo kao jednadžbu temperaturnog polja. Stlačivo i nestlačivo strujanje dijeli se prema vrijednosti Machovog broja, pa se tako strujanje smatra stlačivim pri vrijednosti Machovog broja iznad 0.3. Machov broj se općenito računa prema sljedećem izrazu:

$$M_a = \frac{v}{v_{zvuka}} \quad (2.1)$$

Kao što je već spomenuto, u ovom radu bavit ćemo se nestlačivim turbulentnim strujanjem zraka oko automobila. U tom slučaju temperatura ne utječe na strujanje te se izostavlja iz skupa osnovnih jednadžbi matematičkog modela nestlačivog strujanja.

### 2.1 Osnovni zakoni dinamike fluida

U mehanici se tijela prikazuju kao sustav materijalnih točaka, isto tako u termodinamici promatrani sustav opisujemo zatvorenim termodinamičkim sustavom. U dinamici fluida ekvivalent tim sustavima nazivamo materijalni volumen  $V_m(t)$ , pa zakone mehanike i termodinamike primjenjujemo na njega. Materijalni volumen s vremenom može mijenjati svoj položaj, oblik i veličinu. Osnovni zakoni dinamike fluida predstavljaju jednadžbe očuvanja i opisuju gibanje fluida i njegov prijenos topline. Tri su osnovna zakona dinamike fluida:

- Zakon očuvanja mase
- Zakon očuvanja količine gibanja
- Zakon očuvanja energije

Zakon očuvanja mase za materijalni volumen govori nam da je brzina promjene mase unutar materijalnog volumena jednaka nuli. Kada se taj zakon izrazi za česticu fluida dolazi se do jednadžbe:



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{x_j} = 0 \quad (2.2)$$

U danoj jednađžbi  $\rho$  predstavlja gustoću, a  $\mathbf{v}_j$  vektor brzine fluida. Pa ako jednađžbu primijenimo na naš slučaj nestlačivog strujanja, jednađžba 2.2 prelazi u oblik 2.3.:

$$\frac{\partial(\rho v_j)}{x_j} = 0 \quad (2.3)$$

Zakon očuvanja količine gibanja govori nam da je brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka sumi vanjskih sila. Vanjske sile se dijele na masene i površinske. On se opisuje Navier-Stokseovim jednađžbama (2.4.) izvedenim iz II. Newtonovog zakona:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-p \delta_{ji} + \Sigma_{ji}) + \rho f_i \quad (2.4)$$

U prethodnoj jednađžbi,  $\Sigma_{ji}$  predstavlja simetrični tenzor viskoznih naprezanja koji se zapisuje prema sljedećoj jednađžbi (prema Newtonovom zakonu viskoznosti):

$$\mu \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ji} = \Sigma_{ji} \quad (2.5)$$

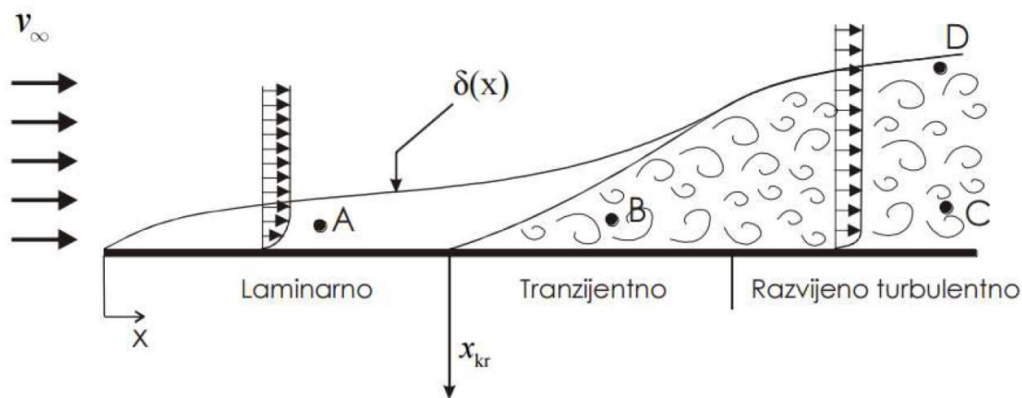
Zakon očuvanja energije dovodi u vezu brzinu promjene zbroja kinetičke i unutarnje energije materijalnog volumena sa snagom vanjskih površinskih i masenih sila na materijalni volumen, te izmjenom topline materijalnog volumena i okoline. Kada zakon očuvanja energije primijenimo na česticu:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j e)}{\partial x_j} = \rho f_i v_i + \frac{\partial(\sigma_{ji} v_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

## 2.2 Laminarno i turbulentno strujanje

Još jedna bitna podjela stujanja fluida jest na laminarno i turbulentno strujanje. Pri laminarnom strujanju, slojevi fluida se međusobno ne miješaju, pa se tako jednađžbe koje opisuju takvo strujanje u jednostavnim slučajevima daju riješiti i analitički. Dok se za složenije slučajeve koristi računalna dinamika fluida, o kojoj će se više govoriti u daljnjim poglavljima. Za razliku

od laminarnog, kod turbulentnog strujanja dolazi do međusobnog miješanja slojeva, te zbog toga dolazi do stvaranja vrtloga i kaotičnog strujanja fluida.



Slika 3: Razvoj graničnog sloja na ravnoj ploči [1]

Upravo je turbulentno strujanje najčešći način strujanja fluida u prirodi. U pravilu ga definira nepravilna promjena fizikalnih veličina u vremenu, a ovisi o iznosu već spomenutog Reynoldsova broja, koji je definiran kao omjer inercijskih i viskozni sila, prema sljedećoj jednadžbi:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (2.7)$$

Gdje  $\rho$  predstavlja gustoću,  $\mu$  dinamičku viskoznost,  $\nu$  kinematičku viskoznost,  $u$  brzinu strujanja i  $L$  karakterističnu duljinu. Turbulentno se strujanje javlja pri vrlo visokim vrijednostima Reynoldsovog broja. Strujanje oko vozila, pri kojem Reynoldsov broj poprima vrijednosti reda veličine od 1 do 10 milijuna obično je turbulentno. Kao što je vidljivo sa slike 3, brzina fluida na stijenci je jednaka nuli, te unutar vrlo malog područja koje nazivamo graničnim slojem ta brzina naraste do brzine slobodne struje fluida. Što znači da se unutar graničnog sloja javljaju veliki gradijenti brzine. Gradijenti brzine direktno utječu na viskozne sile, koje su u graničnom sloju također visoke. Kod laminarnog strujanja gradijenti su manji nego kod turbulentnog, budući da je u graničnom sloju turbulentnog strujanja profil brzine ravnomjerniji. Što dovodi do toga da će u tom slučaju i viskozne sile biti veće. Također turbulentno strujanje zbog samog miješanja slojeva strujanja fluida ima za posljedicu povećanje disipacije energije. Općenito možemo definirati kritični Reynoldsov broj ( $Re_{kr}$ ), koji je teško egzaktno odrediti, pa tako možemo odrediti raspon kritičnog Reynoldsova broja. Donja granica tog raspona predstavljala bi strujanje fluida pri kojem se za neki poseban oblik strujanja nije

pojavi turbulentni oblik strujanja. Dok gornja granica predstavlja granicu iznad koje strujanje postaje evidentno turbulentno, te se čak ni u laboratorijskim uvjetima ne može održati laminarno strujanje. Pa tako slika 3 koja prikazuje strujanje fluida po ravnoj ploči, možemo vidjeti da je strujanje laminarno sve dok se ne dosegne vrijednost  $Re_{kr}$ , kada u sustav postepeno ulaze nestabilnosti strujanja od granice  $x_r$  pa sve do kraja tranzijentnog područja u kojem je razvijeno turbulentno strujanje.

Prilikom prijelaza s laminarnog na turbulentno, strujanje je okarakterizirano širokim spektrom turbulentnih pulsacija, različitih amplituda i frekvencija. Pri takvom strujanju polja fizikalnih veličina pokazuju slučajne promjene, kako u vremenskoj tako i u prostornim koordinatama. Da bi se takav problem riješio numerički, potrebna je vrlo gusta diskretizacija prostora kako bi se uhvatile i najmanje amplitude u pulsacijama veličina, no isto tako je potreban i vrlo mali vremenski korak integracije kako bi se pokupile i najviše frekvencije takvih pulsacija. Kada bismo direktno riješili Navier-Stokseove jednadžbe za turbulentno strujanje, kao rezultat bi dobili vrijednosti polja fizikalnih veličina za veliki broj vremenskih trenutaka i prostornih točaka. Pošto nas kao inženjere najčešće zanimaju integralne veličine poput ukupne sile tlaka, koje također u ovom slučaju prikazuju slučajne promjene u vremenu, mi bismo te rezultate uprosječili po vremenu. Takav proces računanja je predug i prezahtjevan, pa se stoga koristi statističko opisivanje turbulencije, tako da se prije rješavanja Navier-Stokseovih jednadžbi, sve veličine u jednadžbama uprosječe, pa kao rješenje dobivamo uprosječene veličine koje nas i zanimaju, što olakšava numeričko rješavanje, jer kako prostorna diskretizacija, tako i vremenski korak integracije više ne moraju biti tako mali. Srednja vrijednost  $\bar{f}$  definira prema sljedećem izrazu:

$$\bar{f}(x_i t) = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(x_i, t - \tau) d\tau \quad (2.8)$$

Gdje je  $f$  neka veličina koju karakteriziraju turbulentne pulsacije, koju možemo prikazati kao zbroj prosječne vrijednosti  $\bar{f}$  i pulsirajućeg dijela  $f'$ .

### 2.3 Modeli turbulencije

Osrednjivanjem jednadžbi kontinuiteta spomenutih u prethodnom odlomku dobiva se skup jednadžbi koje nazivamo Reynoldsovim jednadžbama. Takve Reynoldsove jednadžbe sadrže više nepoznanica nego što ima jednadžbi, što znači da takav sustav nema jednoznačno rješenje. Osrednjenu jednadžbu kontinuiteta zapisujemo:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.9)$$

Isto tako osrednjavanjem jednadžbe količine gibanja dobivamo sljedeći izraz:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_i v'_j} \right] \quad (2.10)$$

U jednadžbi 2.10 pojavljuje se i član pulsirajućeg strujanja ( $-\rho \overline{v'_i v'_j}$ ), što znači da ne možemo promatrati isključivo osrednjeno strujanje. Općenito Reynoldsovim osrednjavanjem pokušavamo stohastičko turbulentno strujanje prikazati osrednjenim poljima brzine i tlaka, što bi bilo moguće kada bi poznavali beskonačan broj korelacija tlakova i brzina. No inženjersko iskustvo nam pokazuje da je u praksi dovoljno poznavati konačan broj korelacija da bi se proračunale karakteristike polja, te se upravo na tome temelje modeli turbulencije. Neki od zahtjeva modela turbulencije su univerzalnost, točnost, jednostavnost i ekonomičnost rješavanja. U praksi se uglavnom koristi Boussinesqova hipoteza, koja uvrštena u Reynoldsove jednadžbe daje sljedeći oblik jednadžbi količine gibanja:

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\bar{p} + \rho \frac{2}{3} \bar{k})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.11)$$

### 2.4 Modeliranje koeficijenta turbulentne viskoznosti

Modeliranjem turbulencije prema Boussinesqovoj hipotezi opisujemo vremenski osrednjeno turbulentno strujanje, što omogućava primjenu krupnije prostornih i vremenskih podjela, no donosi problem potrebe modeliranja turbulentne viskoznosti. Analogno sa Newtonovim zakonom viskoznosti, možemo zaključiti da je moguće povezati modeliranje molekularne i turbulentne viskoznosti. Prema kinetičkoj teoriji plinova viskoznost je razmjerna gustoći fluida,

slobodnoj putanji molekula i karakterističnoj brzini gibanja molekula, pa možemo definirati turbulentnu viskoznost prema sljedećem izrazu:

$$\mu_t = \rho l_t v_t \quad (2.12)$$

Gdje je kao što je već rečeno turbulentna viskoznost  $\mu_t$  proporcionalna gustoći  $\rho$ , duljini puta miješanja čestica fluida u turbulentnom strujanju  $l_t$  i karakterističnoj brzini turbulentnih pulsacija  $v_t$ . Vidimo da turbulentna viskoznost kod nestlačivog strujanja ovisi o dvjema veličinama koje su svojstvo strujanja, pa se tako modeli turbulentne viskoznosti razlikuju po načinu interpretiranja tih dviju veličina. Uobičajena praksa modeliranja turbulentne viskoznosti je pomoću jednadžbe za transport turbulentne kinetičke energije  $k$  i jednadžbe specifične disipacije kinetičke energije  $\omega$ . Jedan od najčešće korištenih modela viskoznosti u računalnoj dinamici fluida jest  $k - \omega SST$  model.

## 2.5 $k - \omega SST$ model turbulencije

Prilikom provođenja simulacije u OpenFoam-u, korišten je upravo  $k - \omega SST$  model turbulencije. Prilikom proračuna pomoću ovog modela turbulencije, rješavaju se jednadžba transporta turbulentne kinetičke energije  $k$  i jednadžba specifične disipacijske energije  $\omega$ . Ovaj model predstavlja optimalnu kombinaciju  $k - \omega$  i  $k - \varepsilon$  modela turbulencije. Općenito je  $k - \omega$  model osjetljiv na turbulencije u slobodnoj struji, pa se on koristi unutar graničnog sloja, dok se  $k - \varepsilon$  koristi u području odmaknutom od stijenke odnosno u području slobodne struje pomoću prijelaznih funkcija. To također omogućuje proračune za niske vrijednosti Reynoldsova broja ( $y^+ < 1$ ). Veličina  $y^+$  definirana je kao bezdimenzijska normalizirana udaljenost od zida. Kao što je već rečeno, model je opisan s dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe. Prva jednadžba definira transport turbulentne kinetičke energije i glasi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.14)$$

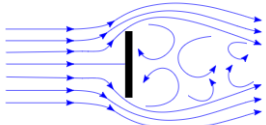
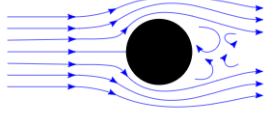
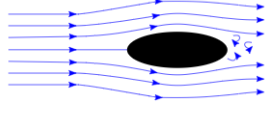
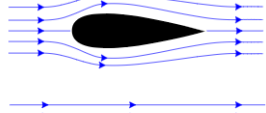

A druga jednadžba definira specifičnu brzinu disipacije i glasi:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

Koeficijenti prethodnih dviju jednadžbi računaju se prema [8]

## 2.6 Aerodinamičke sile

Svako tijelo oko kojega struji fluid, osjetiti će da na njega fluid djeluje ukupnim iznosom aerodinamičke sile koju dijelimo na silu tlaka i silu koja se javlja zbog viskoznosti fluida (sila trenja). Sila tlaka javlja se na površini svih tijela oko kojih se nalazi fluid, kretao se taj fluid u odnosu na tijelo ili ne, a javlja se kao posljedica razlike tlakova na pojedinim dijelovima te površine. Iznos te sile naravno ovisi o tlaku fluida uz površinu tijela koje promatramo. Sila trenja se javlja kao posljedica već spomenutog gradijenta brzine u graničnom sloju strujanja. Pa tako čestice fluida koje se nalaze na samoj površini tijela miruju u odnosu na to tijelo, dok se čestice dalje od površine gibaju. Zbog toga te čestice djeluju jedna na drugu viskoznom silama koje se prenose na površinu tijela. Strujanjem oko geometrije automobila većinu ukupne sile fluida koja djeluje na površinu čini sila tlaka. Dok je kod bolje aerodinamički oblikovanih tijela situacija suprotna. Na slici 4 su prikazana jednostavna tijela i međusobni udio sile trenja i viskoznih sila koje djeluju na to tijelo.

Oblik tijela	Sila tlaka	Sila trenja
	≈100%	≈0%
	≈90%	≈10%
	≈60%	≈40%
	≈10%	≈90%
	≈0%	≈100%

Slika 4: Udio sile tlaka/trenja u ukupnoj aerodinamičkoj sili [13]

Isto tako, možemo primijetiti da retrovizor, čiji se utjecaj promatra u ovom radu, također zbog svog oblika ima veći udio sile tlaka u ukupnoj aerodinamičkoj sili koja djeluje na njega, jer je obično oblikovan tako da se stvaraju vrtlozi na njegovoj stražnjoj strani (strana sa zrcalom) u odnosu na strujanje.

## 2.7 Aerodinamički koeficijenti

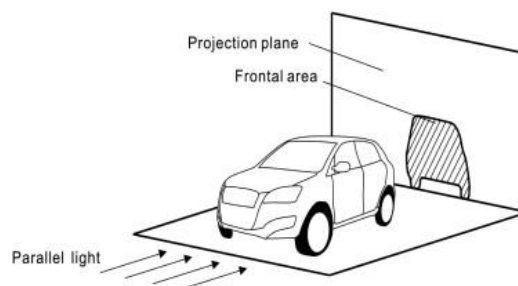
Aerodinamički koeficijenti služe nam za usporedbu „efikasnosti“ različitih tijela. Pa tako i u automobilskoj industriji gdje se pokušava što više smanjiti aerodinamički koeficijent otpora  $C_D$  čiji nas utjecaj najviše zanima u ovom radu, te se ovisno o potrebi pokušava pronaći optimalan aerodinamički koeficijent uzgona  $C_L$ . Aerodinamički koeficijent otpora računa se prema sljedećem izrazu:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} v^2} \quad (2.16)$$

Gdje je  $F_D$  ukupna aerodinamička sila koja djeluje na tijelo u smjeru osi strujanja (djeluje paralelno sa strujnicama slobodne struje fluida), član  $1/2\rho v^2$  u kojem  $v$  predstavlja brzinu strujanja slobodne struje i  $\rho$  gustoću fluida, predstavlja dinamički tlak slobodne struje. Te  $A_{ref}$  predstavlja referentnu površinu za računanje koeficijenata. Isto to vrijedi i za aerodinamički koeficijent uzgona osim što se on računa sa silom uzgona  $F_L$ , koja djeluje okomito na smjer strujanja fluida slobodne struje:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} v^2} \quad (2.17)$$

Referentna površina za računanje koeficijenta kod automobila jest projekcija tijela na površinu kojoj normala gleda u smjeru strujanja.



Slika 5: Prikaz definiranja referentne površine automobila [14]

### 3 Računalna dinamika fluida

Kao što je već spomenuto, većina problema vezana za strujanje fluida opisuje se nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačbama koje nemaju opće analitičko rješenje. Iz tog razloga se u prošlosti polazilo za eksperimentalnim metodama, koje ponavljanjem eksperimenata sa različitim geometrijama ili drugim parametrima mogu dati uvid u općenitu sliku neke pojave prilikom strujanja. No, razvojem računala stvoreni su uvjeti za numeričko rješavanje matematičkih modela koji opisuju strujanje fluida, pa je tako stvorena računalna dinamika fluida kao nova grana mehanike fluida. Diskretizacija prevodi parcijalne diferencijalne jednačbe u sustav linearnih algebarskih jednačbi.

#### 3.1 Metoda konačnih volumena

Prilikom numeričkog rješavanja jednačbi dinamike fluida, nakon postavljanja matematičkog modela, potrebno je napraviti diskretizaciju područja proračuna. Diskretizacijom prostora dobivamo geometrijsku mrežu na koju je potrebno diskretizirati parcijalne diferencijalne jednačbe matematičkog modela, uz zadane rubne uvjete, te tako diskretizirane parcijalne diferencijalne jednačbe prelaze u linearne algebarske. Diskretizacija jednačbi se provodi nekom od metoda od kojih su najpoznatije: metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata i metoda konačnih razlika. Pošto se bavimo strujanjem, metoda koja nas najviše zanima i koja je najzastupljenija u problemima kakve rješavamo je metoda konačnih volumena. Metoda konačnih volumena dijeli područje proračuna na velik broj konačnih volumena, koji ne smiju ulaziti jedan u drugoga, te moraju ispunjavati čitavo područje, kako bi geometrijska mreža nastala takvom diskretizacijom bila ispravna. Proračun ovom metodom se provodi integriranjem konzervativnog oblika transportnih jednačbi. Polazimo od općeg oblika konvekcijsko difuzijske jednačbe koja glasi:

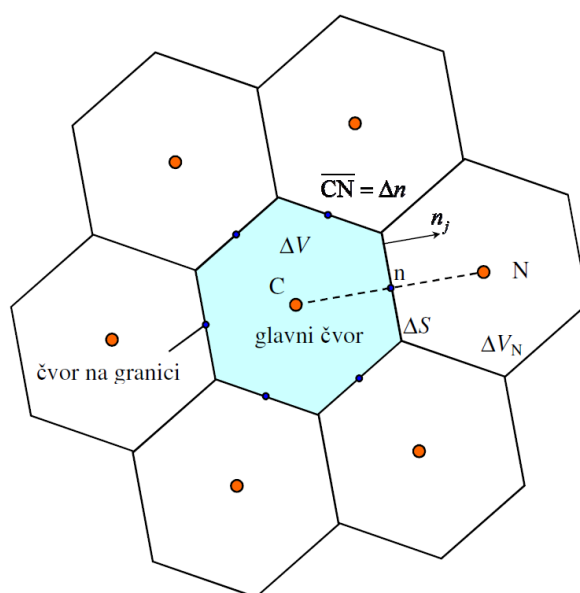
$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j \varphi}{\partial x_j} - \Gamma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_j} = \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = S_\varphi \quad (3.1)$$



Gdje je  $\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t}$  član lokalne promjene,  $\frac{\partial \rho v_j \varphi}{\partial x_j}$  konvekcijski član,  $\Gamma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_j}$  difuzijski član, te  $S_\varphi$  predstavlja izvorski član. U metodi konačnih volumena, gornja jednažba 3.1 primjenjuje se u integralnom obliku:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} \left( \rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (3.2)$$

Gdje član sa lijeve strane zagrada predstavlja brzinu promjene sadržaja nekog fizikalnog svojstva  $\varphi$  u volumenu  $\Delta V$ , prvi član sa desne strane zagrada predstavlja zbroj konvekcijskog i difuzijskog protoka fizikalnog svojstva  $\varphi$  kroz sve kontrolne površine konačnog volumena  $\Sigma \Delta S$ , te posljednji član sa desne strane zagrada predstavlja izvor fizikalnog svojstva  $\varphi$ . Iz jednažbe (3.2) jasno vidimo da je brzina promjene sadržaja fizikalnog svojstva jednaka brzini protoka istog kroz granicu konačnog volumena kojega promatramo i brzini nastajanja/nestajanja tog fizikalnog svojstva u konačnom volumenu putem izvora/ponora.



Slika 6: Dio prostora diskretiziranog pravilnim šesterokutima (iz [1])

Sukladno spomenutim osrednjivanjem jednažbi, volumenski i površinski integrali se aproksimiraju prema integralnom teoremu o srednjoj vrijednosti. Pa tako u slučaju nestlačivog strujanja pri kojem je  $\rho = \text{konst.}$  integralni član lokalne promjene možemo zapisati kao:

$$\int_{\Delta V} \varphi dV = \bar{\varphi}_{\Delta V} \Delta V \quad (3.3)$$

Gdje veličina  $\bar{\varphi}$  predstavlja srednju vrijednost fizikalnog svojstva  $\varphi$  unutar konačnog volumena. Uz pretpostavku da je konačni volumen vrlo malen, može se reći da unutar konačnog volumena vlada linearna raspodjela fizikalnog svojstva. Pa se izraz (3.3) može raspisati kao:

$$\bar{\varphi}_{\Delta V} \Delta V = \int_{\Delta V} \varphi dV = \int_{\Delta V} \left( \varphi_C + \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Big|_C (x_j - x_j^C) \right) dV = \left[ \varphi_C + \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Big|_C (x_j^T - x_j^C) \right] \Delta V \quad (3.4)$$

Ukoliko je težište volumena upravo točka C, desni član jednadžbe (3.4) otpada, pa možemo zapisati da je  $\bar{\varphi} = \varphi_C$ . Analogno tome vrijedi i za integral izvorskog člana, pa možemo odmah zapisati:

$$\int_{\Delta V} S_{\varphi} dV = S_C \Delta V \quad (3.5)$$

Gdje je  $S_C$  srednja vrijednost izvorskog člana unutar konačnog volumena. Kada smo aproksimirali srednje vrijednosti volumenskih integrala izvorskog člana i člana lokalne promjene, preostaje nam aproksimacija površinskog integrala. Prvi korak je zbrajanje dvaju vektora konvekcijskog  $\rho v_j \varphi$  i difuzijskog  $\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}$  člana koji u općenitom slučaju nisu kolinearni.

Njihovo zbrajanje daje novi vektor  $J_j$ . Općenito protoku neke veličine kroz zadanu površinu doprinosi samo normalna komponenta vektora  $J_j n_j$ . Tako raspisana promjena te veličine nakon integriranja glasi:

$$\Delta J_n = \left[ \overline{\rho (v_n \varphi)}_n - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_n \right] \Delta S \quad (3.6)$$

Gdje je  $\overline{(v_n \varphi)}_n$  srednja vrijednost brzine u smjeru normale na površinu  $\Delta S$ , a  $\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_n$  srednja vrijednost gradijenta polja fizikalnog svojstva projiciranog u smjeru normale na površinu  $\Delta S$ . Daljnjim sređivanjem i aproksimacijama, dolazi se do linearne algebarske jednadžbe za jedan volumen. Zapisivanjem tih jednadžbi za sve volumene unutar proračunskog područja za koje radimo proračun dobivamo sustav linearnih algebarskih jednadžbi u kojima nepoznanicu predstavlja čvorna vrijednost fizikalnog svojstva koje računamo. Raspisana linearna algebarska jednadžba za jedan volumen zapisana pomoću koeficijenata glasi:

$$a_c \varphi_c = \sum_{nb=1}^{N_{nb}} [a_N^{nb} \varphi_N^{nb}] + b \quad (3.7)$$

Taj se sustav može zapisati i simbolički u matričnom obliku kao:

$$[A_{ji}][\varphi_i] = [b_j] \quad (3.8)$$

Gdje matrica  $[A_{ji}]$  sadrži vrijednosti centralnih koeficijenata  $a_c$  po dijagonali i vrijednosti koeficijenata  $a_N^{nb}$ . Kao što je već rečeno polje  $\varphi$  predstavlja nepoznanicu u takvom sustavu jednadžbi pa je  $[\varphi_i]$  vektor nepoznanica, dok vektor  $[b_j]$  sadrži sve poznate veličine.

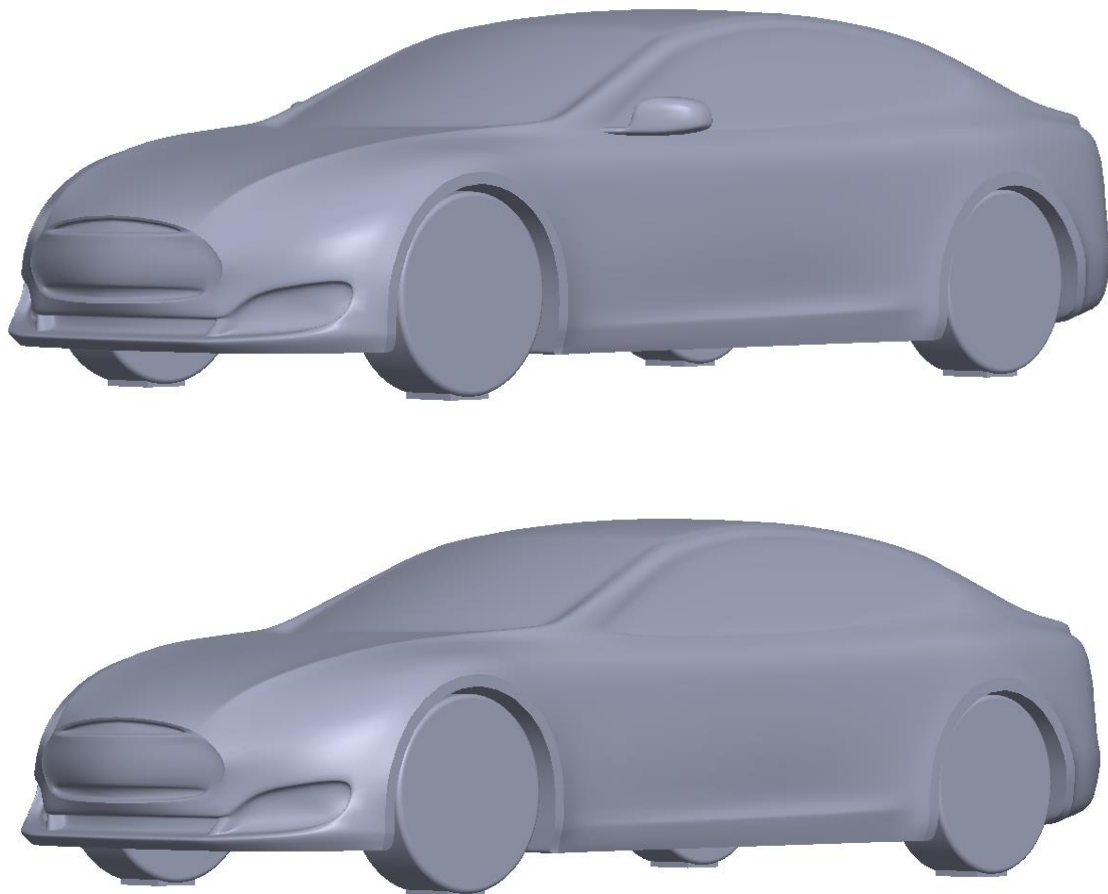
## 4 Priprema geometrije za proračun

U autoindustriji već se duži niz godina puno ulaže i radi na optimizaciji aerodinamičkih sila koje djeluju na automobile, no u posljednjem desetljeću se rastom te industrije u smjeru električnih automobila, povećala motivacija za smanjenjem sile otpora u smjeru kretanja automobila, odnosno smanjenjem aerodinamičkog koeficijenta otpora ( $C_D$ ). Razlog tomu je još uvijek nedovoljno razvijena tehnologija baterija, kako njihovog kapaciteta u odnosu na veličinu (težinu), tako i brzine punjenja, pa se na sve moguće načine teži k što većem dometu takvih automobila. Kao što je već spomenuto u uvodu u aerodinamiku vozila, prilikom vožnje automobila najznačajniji gubitci odnosno potrošači energije su otpor kotrljanju i aerodinamički otpor, koji značajno raste s povećanjem brzine. Tako se nameće zaključak da smanjenjem aerodinamičkog otpora možemo značajno smanjiti potrošnju energije, naročito prilikom kretanja većim brzinama kao prilikom vožnje autocestom. Električni automobili su vrlo zahvalni prilikom gradske vožnje zbog toga što dobar dio energije vraćaju u baterije prilikom kočenja. No ovisno o korisniku, vožnja po brznoj cesti ili autocesti može činiti značajan udio u ukupnom korištenju automobila. Cilj ovog rada je pokazati ideju kako bi se u budućnosti dodatno mogao smanjiti aerodinamički otpor, korištenjem kamera umjesto retrovizora na bočnoj strani automobila, pa je tako odabrana modificirana geometrija automobila Tesla, model S za svrhu ovoga zadatka. Geometrija je izrađena uz pojednostavljenja i bez detalja na karoseriji i ostalim komponentama zbog uštede na radnoj memoriji. Odabrana je upravo ta geometrija jer predstavlja možda i najpoznatiji model električnog automobila na trenutnom tržištu automobila, te već sada ima jako dobra aerodinamička svojstva i jedan je od nekoliko automobila te klase s najmanjim aerodinamičkim koeficijentom otpora.

### 4.1 Geometrija

Geometrija karoserije automobila preuzeta je s internetske stranice Grabcad, na kojoj konstruktori i dizajneri amateri objavljuju svoje radove i daju ih drugima na korištenje. Nakon toga je modificirana, te u programskom paketu Salome pripremljena za izradu geometrijske mreže. Napravljene su dvije varijante geometrije, jedna sa retrovizorima, te jedna bez, kako bi se izravno mogle pokazati razlike u aerodinamičkoj sili odnosno koeficijentu otpora koji djeluje

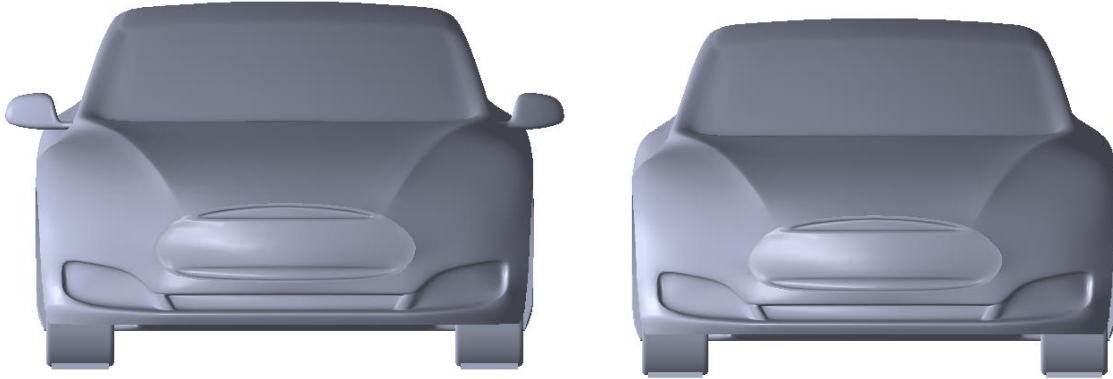
na automobil. Geometrija karoserije preuzeta je u STEP obliku te je nakon toga učitana u programski paket Salome gdje su modelirani kotači, te napravljene modifikacije poput uklanjanja retrovizora i popravljivanja površine na kojoj je uklonjen retrovizor. Geometrija kotača je napravljena tako da na spoju ceste s kotačima dodirna površina bude pravokutnog oblika, kako prilikom diskretizacije ne bi došlo do stvaranja neortogonalnih kontrolnih volumena koje mogu stvarati probleme u proračunu. Izrada ovakvog automobila, dovela bi do pojednostavljenja karoserije i dolazi do uštede na materijalu i elektronici potrebnoj za izradu klasičnog retrovizora, no isto tako dolazi do novih troškova, uslijed potrebe za kamerama i dva ekrana u kabini automobila. U budućnosti se ovo neće smatrati dodatnim troškovima jer će u autonomnim vozilima glavne kamere preuzeti njihovu ulogu. Na slikama 7 i 8, prikazana je geometrija koja je korištena prilikom proračuna.



*Slika 7: Geometrija automobila sa i bez retrovizora*

Kao što je vidljivo sa slike 7, geometrija je modelirana točno u svrhu provođenja analize pomoću računalne dinamike fluida, bez nepotrebnih detalja, zbog kojih bi mreža morala biti

gušća, odnosno konačni volumeni na tim dijelovima moraju biti vrlo maleni, što dovodi do sporijeg vremena računanja i mogućih problema prilikom provođenja simulacije uz samo 8 GB radne memorije.

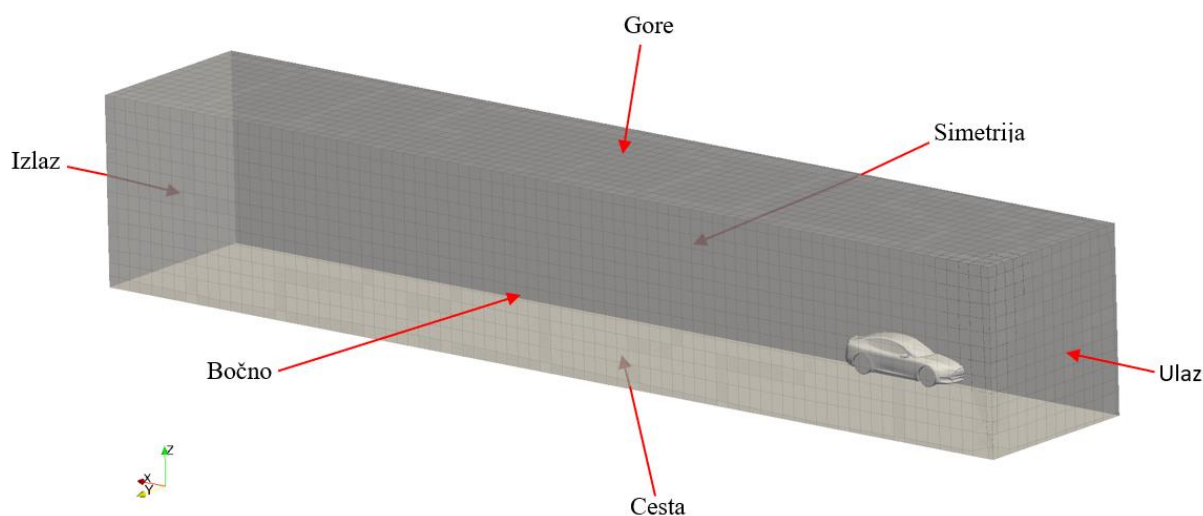


*Slika 8: Geometrija automobila sa i bez retrovizora (prednji pogled)*

## 4.2 Diskretizacija proračunskog područja

Kako bi proveli proračun računalnom dinamikom fluida, prvo je potrebno odrediti veličinu područja proračuna. Za strujanje oko automobila možemo pretpostaviti da je simetrično po ravnini simetrije samog automobila. Pa je tako jedna od granica područja proračuna upravo ravnina simetrije automobila, te se proračun provodi na polovici automobila, a kasnije se iznos sile tlaka može pomnožiti sa dva da bi se dobile stvarne vrijednosti, što bitno pojednostavljuje i ubrzava provedbu proračuna. Kod računanja strujanja fluida oko nekog tijela, bitno je postaviti granice proračunskog područja tako da budu dovoljno udaljene od tog tijela, kako ne bi došlo do interakcije između površina koje predstavljaju granice proračunskog područja i vrtložnog traga fluida. Takav uvjet se u našem slučaju postavlja na granicu ulaza koja bi trebala biti barem oko dvije duljine automobila udaljena od njoj najbliže točke automobila, pa je tako ona u našem slučaju udaljena osam metara od početka automobila. Isto vrijedi i za granicu izlaza struje, a pošto se nakon strujanja preko automobila struja fluida značajno poremeti, ta granica mora biti udaljena od stražnje strane automobila barem šest duljina automobila, pa je tako u našem slučaju ta granica udaljena za trideset metara od stražnje strane automobila. Iz istih je razloga bočna granica udaljena od ravnine simetrije za osam metara, te je gornja granica od ravnine koja predstavlja cestu, također udaljena za osam metara. Nakon provođenja proračuna,

pokazalo se da je tako postavljeno proračunsko područje ispravno te da nema tragova vrtložnog strujanja na granicama sustava na koje se postavljaju takvi uvjeti.

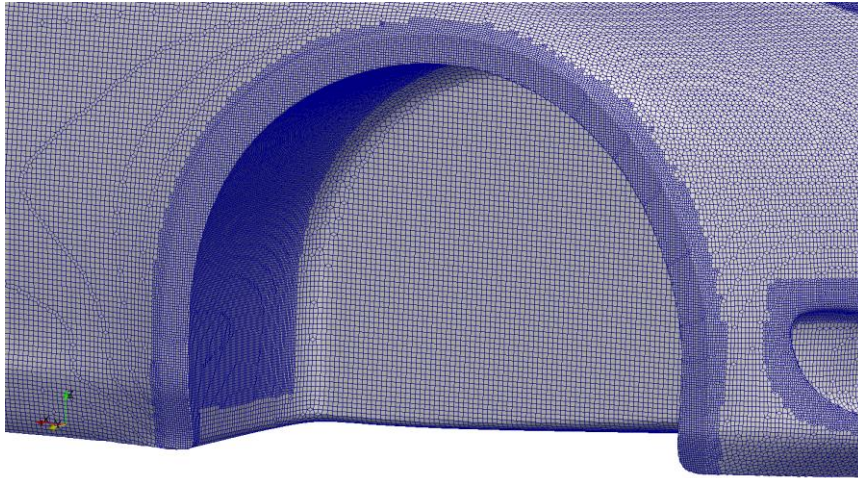


Slika 9: Prikaz veličine područja proračuna i njegovih granica (osim granica automobila)

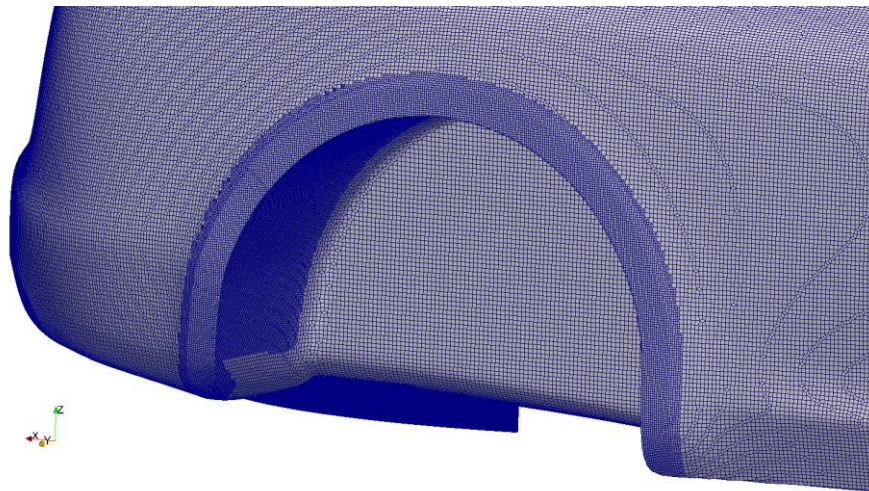
Nakon određivanja dimenzija područja proračuna, potrebno je oduzeti geometriju polovice automobila od kutije koja predstavlja područje proračuna, što nam ostavlja zatvoren prostor unutar kojeg je potrebno izraditi geometrijsku mrežu. Granice sustava je potrebno imenovati te spremi u STL obliku, te spojiti granice sustava u jedan dokument u fms formatu. Za izradu geometrijske mreže korištena je gotova biblioteka za automatsku izradu mreže implementirana u OpenFoam, pod nazivom cfMesh. Prilikom izrade geometrijske mreže, treba posebno pripaziti na oštre rubove na geometriji ili bilo kakve složene prijelaze između pojedinih površina. Mrežu je potrebno potpuno prilagoditi proračunu, te paziti da broj konačnih volumena bude što manji, no u isto vrijeme paziti da bilo kakve nepravilnosti u mreži ne utječu na krajnji rezultat. Pa se tako obično koriste iskustvene vrijednosti za postavljanje generalnih profinjenja mreže. Maksimalna veličina globalnih konačnog volumena postavljena je na  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  metara. Dok su na površine automobila i kotača postavljena lokalna površinska profinjenja koja stranicu maksimalnog konačnog volumena umanjuje na polovicu njene duljine ovisno o parametru, pa tako parametar 6, postavljen u našem slučaju na karoseriju, umanjuje konačne volumene na površini šest puta na polovicu njihovih duljina i daje stranicu konačnog volumena od 7.8125 milimetara. Dok je na kotače postavljen lokalni parametar površinskog profinjenja u iznosu 5, koji daje konačnog volumena čija je maksimalna duljina stranice 15.625 milimetara. Nakon tako izrađene mreže, uočeni su dijelovi površina koji zahtijevaju dodatna profinjenja,



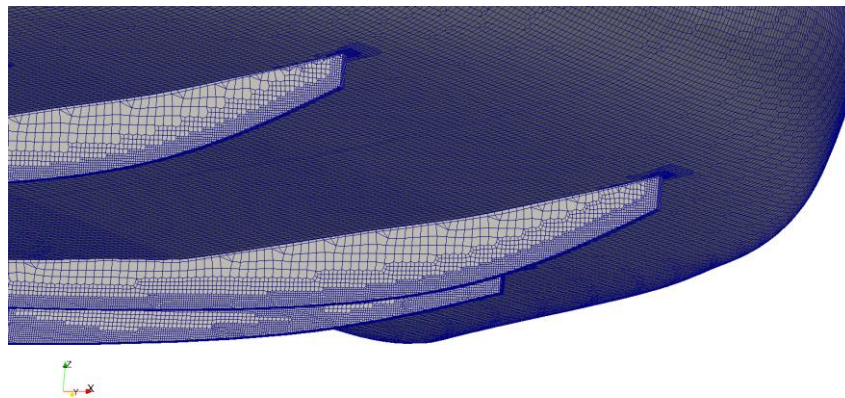
kako ne bi stvarali loše ili neortogonalne konačne volumene. Ti dijelovi prikazani su sljedećim slikama, na kojima je jasno vidljivo područje na kojem je mreža usitnjena.



*Slika 10: Prikaz profinjene mreže u okolini luka prednjeg kotača*



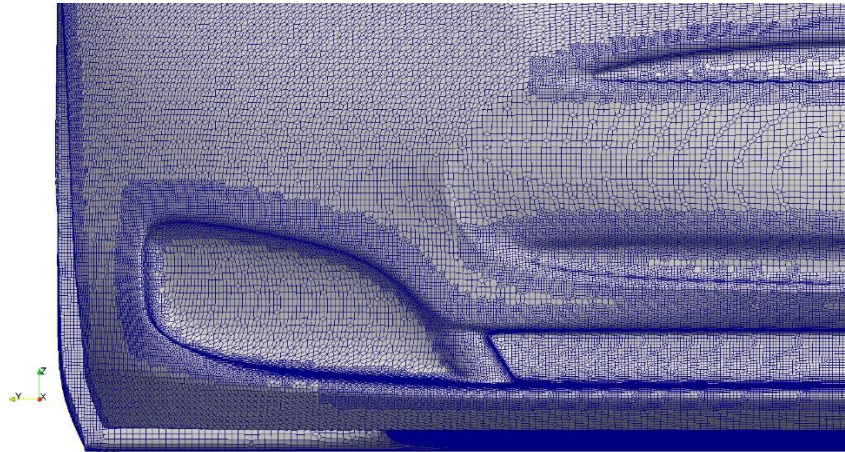
*Slika 11: Prikaz profinjene mreže u okolini luka stražnjeg kotača*



*Slika 12: Prikaz profinjene mreže na kanalima difuzora*

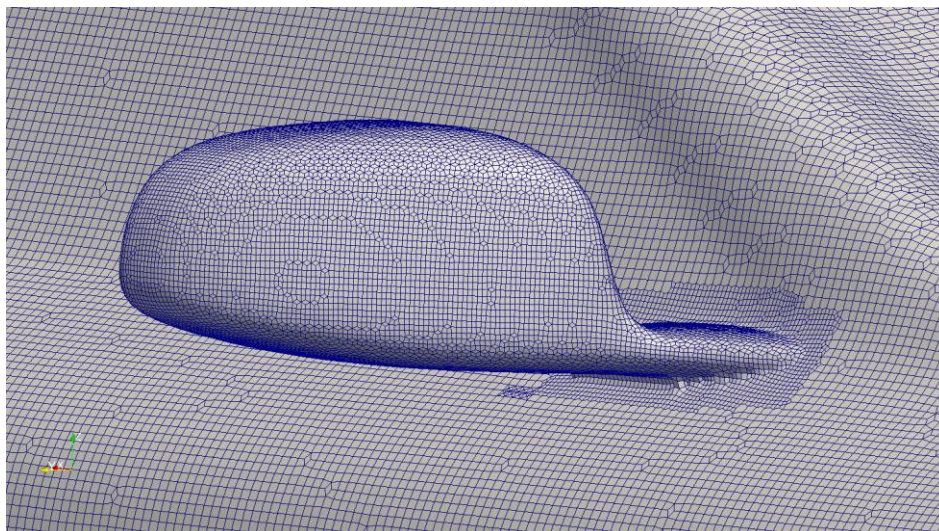


Kao i rubovi lukova za kotače na karoseriji, tako i rub difuzora sadrži kuteve od 90 i više stupnjeva koji mogu dovesti do loših i neortogonalnih konačnih volumena, pa se upravo na tim dijelovima mora koristiti poprilično usitnjena mreža. Pogotovo na kanalima difuzora zbog relativno tanke geometrije s kutevima od 90 stupnjeva.

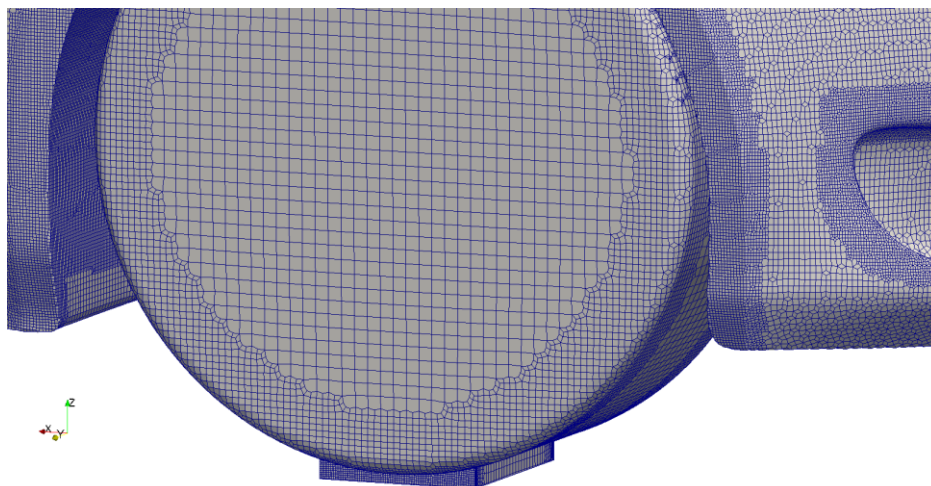


*Slika 13: Prikaz profinjene mreže na složenim dijelovima geometrije prednjeg branika automobila*

Prednji dio karoserije je poprilično geometrijski složen, pa je veličina konačnog volumena na tim mjestima stvarala geometriju koja se razlikovala od stvarne uz stvaranje loših konačnih volumena koje kasnije mogu utjecati na rezultate. Na tim dijelovima korištena je usitnjena mreža vidljiva na slici 12. Isto tako i na retrovizoru, koji je jedan od bitnijih dijelova proračuna ovog završnog rada. Do sada spomenuta lokalna površinska profinjenja geometrijske mreže, korištena su na obje verzije geometrije za proračun. No naravno na geometriji bez retrovizora nije korišteno profinjenje mreže na površini retrovizora pošto je na toj verziji uklonjen.



*Slika 14: Prikaz profinjene mreže na površini retrovizora*



Slika 15: Prikaz profinjene mreže na površini kotača

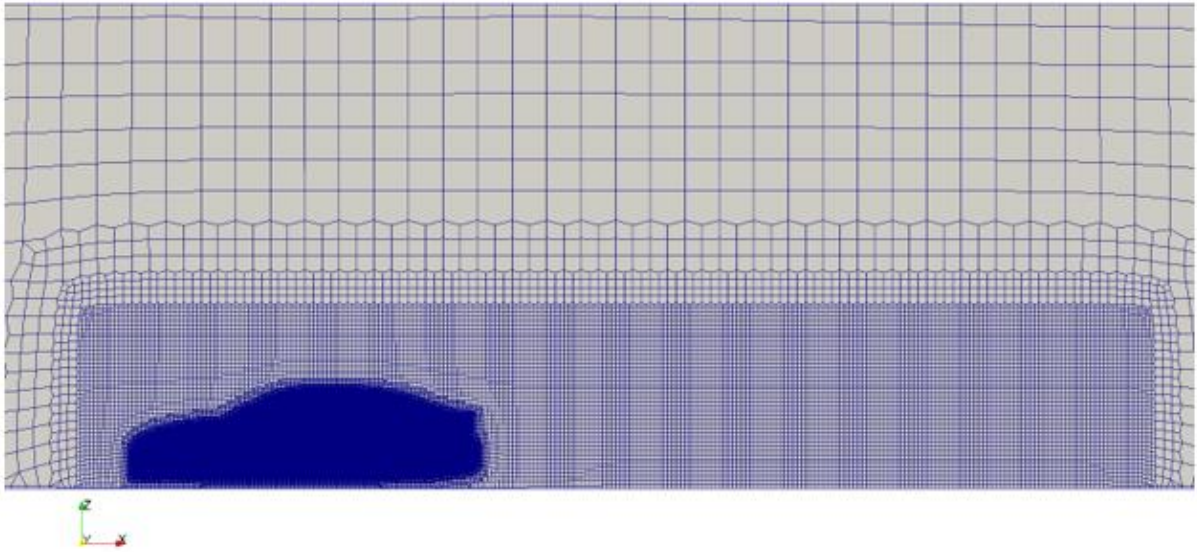
Na geometriji prednjeg kotača, kao što je vidljivo sa slike 15, korišteno je više parametara profinjenja zbog toga što je na samom spoju s cestom u uzdužnom smjeru poprilično mali razmak između ceste i stvarne geometrije kotača, pa je na tim površinama geometrijska mreža zahtijevala dodatne finije usitnjene konačne volumene. Isto vrijedi i za geometriju stražnjeg kotača. Također je problem prilikom izrade mreže stvarao mali razmak između geometrije luka kotača i samog kotača, pa ukoliko mreža ne bi bila usitnjena kao što je prikazano na slikama 10 i 11, došlo bi do spajanja geometrijske mreže odnosno površina unutrašnjosti luka kotača i samog kotača. Vrijednosti pojedinih parametara korištenih za usitnjavanje mreže na prikazanim površinama dani su u sljedećoj tablici:

Tablica 1: Parametri usitnjavanja mreže

	Parametar	Maksimalna duljinska dimenzija konačnog volumena [mm]
Luk prednjeg/stražnjeg kotača (karoserija)	7	3.90625
Kanali difuzora	8	1.953125
Prednji branik automobila	7	3.90625
Retrovizor	7	3.90625
Prednji/stražnji kotač	7	3.90625
Spoj prednjeg/stražnjeg kotača sa cestom	9	0.9765625

Također je potrebno napraviti i profinjenje regije u obliku kutije oko automobila, čija se veličina i koordinate zadaju direktno u ulaznoj datoteci programa cfMesh. Profinjenje regije u području

okolice automobila usitnjava konačne volumene geometrijske mreže kako bi rezultat numeričke simulacije bio što bliže stvarnoj pojavi strujanja oko automobila.



*Slika 16: Prikaz profinjene regije područja proračuna*

## 5 Postavljanje simulacije u OpenFOAM paketu

OpenFOAM je softverski paket razvijen na C++ programskom jeziku, namijenjen za razvoj numeričkih rješavača za rješavanje problema u mehanici kontinuuma, uključujući dinamiku fluida. Softver je distribuiran kao slobodan i besplatan, otvorenog koda što omogućava korisnicima jednostavnu prilagodbu i primjenjivanje vlastitog koda u rješavanju problema. Danas upravo zbog fleksibilnosti i ušteda, brojne tvrtke i inženjeri pri svom radu koriste ovaj računalni paket. Jedna od mana rada u OpenFOAM-u jest to što softver nema razvijeno grafičko sučelje, te korisnik postavke mijenja direktno u direktorijima u kojima se nalaze skripte sa kodovima. Nakon provedbe diskretizacije pomoću cfMesh-a, također dijela OpenFOAM biblioteke, potrebno je odrediti rubne uvjete, odrediti numeričke sheme koje će se koristiti, definirati numerički rješavač i tolerancije pojedinih veličina koje računamo.

### 5.1 Postavljanje rubnih uvjeta

Prilikom modeliranja ovakvog problema jako je bitno dobro postaviti rubne uvjete, kako bi rješenja simulacije odgovarala stvarnom strujanju. Rubni uvjeti i početne pretpostavke o rješenju postavljaju se tako da se inicijaliziraju vrijednosti čitavog polja geometrijske mreže (engl. `internalField`) nekom vrijednošću, te se posebno zadaju specifični rubni uvjeti na rubne plohe. Definiiraju se za veličine brzine  $U$ , tlaka  $p$ , turbulentnu kinetičku energiju  $k$ , disipacije kinetičke energije  $\omega$  i kinemtičku turbulentnu viskoznost  $\nu$ , prema već spomenutom  $k - \omega SST$  modelu turbulencije. Na ulaznu i izlaznu granicu definira se „patch“ vrsta granice koja definira uvjet bez geometrijskih ili topoloških informacija o geometrijskoj mreži i najčešće se definira na ulaznoj/izlaznoj granici. Za granicu simetrije je korištena granica „symmetry“ kojom rješavač smatra da je strujanje simetrično s obzirom na granicu na koju je postavljen uvjet, ista granica je korištena i za granice gore i bočno, pošto smo proračunsko područje definirali dovoljno velikom kako ne bi strujanje mogli smatrati strujanjem slobodne struje, koje je simetrično s obzirom na te dvije ravnine. Na karoseriju je postavljen tip granice „wall“ jer upravo to i predstavlja, pošto zrak koji struji u našem proračunskom području mora strujati oko automobila. Isto vrijedi i za kotače te cestu, na koje će kasnije u postavljanju rubnih uvjeta pojedinih veličina, brzina biti drugačije zadana što će se vidjeti u tablici. Tako prilagođeni tipovi

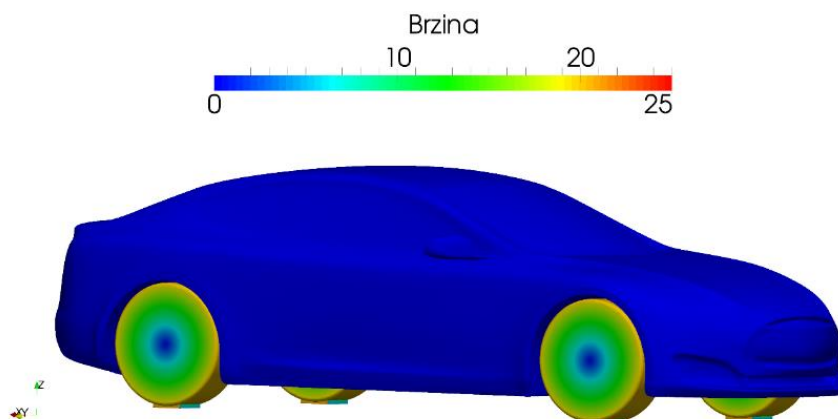


granica nam omogućuju postavljanje potrebnih zahtjeva na svaku od spomenutih fizikalnih veličina koje moramo definirati, kako bi problem modelirali tako da što više nalikuje stvarnom strujanju oko automobila prilikom njegovog pravocrtnog kretanja konstantnom brzinom.

Tablica 2: Rubni uvjet brzine na granicama

Naziv granice	Brzina $U$	
	Tip rubnog uvjeta	Iznos
Ulaz	fixedValue	uniform (20 0 0)
Izlaz	zeroGradient	-
Simetrija	symmetry	-
Gore	symmetry	-
Bočno	symmetry	-
Cesta	fixedValue	uniform (20 0 0)
Karoserija	fixedValue	uniform (0 0 0)
Prednji kotač	rotatingWallVelocity	-55.646754403
Stražnji kotač	rotatingWallVelocity	-55.646754403

Potrebno je dodati da se na kotačima koristio ovakav uvjet jer pri kretanju automobila oni nisu stacionarni niti ih tako možemo promatrati, pa im preko ovako postavljenog uvjeta zadajemo kutnu brzinu za koju je bilo potrebno definirati poziciju i orijentaciju vektora rotacije. Može se prikazati polje brzine na samoj površini automobila. Kao što vidimo sa slike 17, za karoseriju automobila kroz čitavo vrijeme proračuna vrijedi uvjet mirovanja čestica fluida na samoj površini, kao i na kotačima, no pošto se kotači kreću zadanom kutnom brzinom, brzina tih čestica u odnosu na karoseriju automobila koja „miruje“ ovisi o udaljenosti tih čestica od osi rotacije kotača.



Slika 17: Brzina čestica fluida na površini automobila

Kako bi se olakšao proračun na samom početku, unutrašnjost područja proračuna se inicijalizira sa malom vrijednošću brzine u smjeru strujanja ( $10^{-10}m/s$ ).

Tablica 3: Rubni uvjeti tlaka i turbulentne kinetičke energije na granicama

Naziv granice	Tip rubnog uvjeta	
	Tlak $p$	Turbulentna kin. energija $k$
Ulaz	zeroGradient	fixedValue
Izlaz	zeroGradient	zeroGradient
Simetrija	symmetry	symmetry
Gore	symmetry	symmetry
Bočno	symmetry	symmetry
Cesta	zeroGradient	kqRWallFunction
Karoserija	zeroGradient	kqRWallFunction
Prednji kotač	zeroGradient	kqRWallFunction
Stražnji kotač	zeroGradient	kqRWallFunction

Strujanje zraka smatramo viskoznim, što znači da će čestice fluida na zidnim granicama imati brzinu 0 s obzirom na tu površinu. Početne vrijednosti turbulentne kinetičke energije na svim granicama osim granica sa zadanim uvjetom simetrije i izlaza, zadaju se jednako kao i u ostatku područja. Dok se inicijalizacije polja unutrašnjosti područja proračuna, odnosno geometrijske mreže provodi tako da se zada početna vrijednost tlaka 0, a za kinetičku energiju turbulencije se taj iznos računa prema sljedećem izrazu:

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (4.1)$$

Gdje  $U$  označava brzinu slobodne struje zraka, odnosno brzinu kretanja automobila u našem slučaju, a  $I$  označava intenzitet turbulencije za koji je pretpostavljena vrijednost od 5%. Pa je početni iznos  $k = 1.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Tablica 4: Rubni uvjeti specifične brzine disipacije i turbulentne kinematičke viskoznosti na granicama

Naziv granice	Tip rubnog uvjeta	
	Specifična brzina disipacije $\omega$	Turbulentna kinematička viskoznost $\nu$
Ulaz	fixedValue	calculated
Izlaz	zeroGradient	zeroGradient
Simetrija	symmetry	symmetry
Gore	symmetry	symmetry
Bočno	symmetry	symmetry
Cesta	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Karoserija	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Prednji kotač	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Stražnji kotač	omegaWallFunction	nutkWallFunction

A vrijednost specifične brzine disipacije kinetičke energije korištena za inicijalizaciju unutrašnjosti područja proračuna, računa se prema sljedećem izrazu:

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{C_{\mu}^{0.25} 0.07L} \quad (4.2)$$

Gdje  $k$  predstavlja već izračunatu kinetičku energiju turbulencije,  $C_{\mu}$  konstantu modela turbulencije koja iznosi 0.09. Te  $0.07L$  predstavlja karakterističnu duljinu turbulencije, gdje je  $L$  duljina izvora poremećaja. Kao duljinu izvora poremećaja korišten je iznos od četiri metra, pa je tako dobivena specifična brzina disipacije  $\omega = 7.986 \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

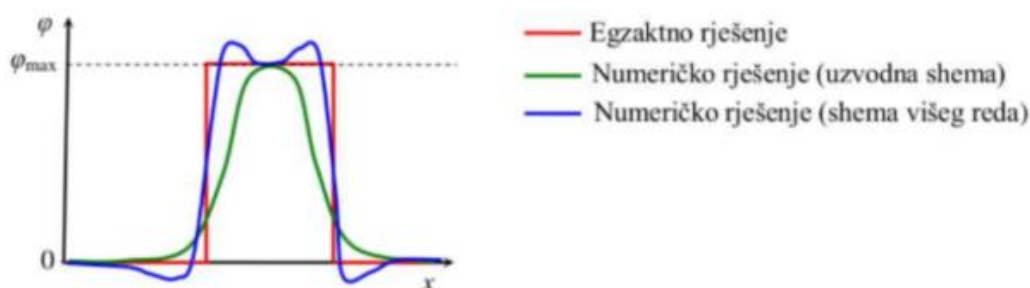
## 5.2 Postavljanje numeričkog rješavača

Prilikom rješavanja problema sličnih ovome, strujanje zraka oko slične geometrije automobila, motora ili aeroprofila u području nestlačivog strujanja, najčešće se koristi numerički rješavač

pod nazivom simpleFoam. Numerički rješavač simpleFoam daje nam rezultate za proračun stacionarnog nestlačivog turbulentnog strujanja. SIMPLE (engl. Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) je algoritam koji rješava vezu između polja brzine i tlaka. Rješavač za sve veličine koje karakteriziraju sustav (brzina, tlak i veličine vezane za turbulenciju) rješava uzastopno, te rješenje prethodnih jednadžbi ubacuje u sljedeću. Divergencije brzine, definirali smo pomoću Gauss linearUpwind funkcije koja pretstavlja linearnu uzvodnu shemu drugog reda točnosti. Prilikom računanja linearnom uzvodnom shemom drugog reda točnosti, algoritam vrijednost fizikalnog svojstva  $\varphi_n$  na površini konačnog volumena, računa linearnom ekstrapolacijom iz uzvodnih čvorova. Divergencije specifične kinetičke energije turbulencije i specifične disipacije definirani su pomoću Gauss upwind funkcije, koja predstavlja običnu uzvodnu shemu prvog reda točnosti. Formula (4.3), predstavlja zbroj konvekcije i difuzije, no u gotovo svim shemama se međudjelovanje ta dva transporta zanemaruje. Pa za difuzijski transport govorimo da je simetričan i definiramo ga prema sljedećem izrazu:

$$-D \left. \frac{\partial \varphi}{\partial \tilde{n}} \right|_n = -D(\varphi_c - \varphi_N) \quad (4.3)$$

Nedostatak ove sheme jest da unosi lažnu difuziju u numeričko rješenje, no dobra strana takve sheme jest da su koeficijenti uvijek pozitivni što znači da nikada ne daje ne fizikalna oscilatorna rješenja, niti stvara probleme u konvergenciji numeričkog postupka. Dok kod sheme drugog ili višeg reda može doći do problema neomeđenosti, što znači da mogu generirati nove maksimume i minimume u izvorskom članu, odnosno u blizini diskontinuiteta dolazi do ne fizikalnog oscilirajućeg rješenja, no zato unose manje numeričke difuzije u rješenje.



Slika 18: Slikoviti prikaz neizbježnih pogrešaka numeričkih shema [1]

Također su definirane i tolerancije pojedinih veličina te relaksacijski faktori. Relaksacijski faktori služe za održavanje stabilnosti numeričkog rješavanja, većinom korišteni prilikom proračuna stacionarnih strujanja. Rade tako da ograničavaju iznos za koji se neko fizikalno svojstvo koje računamo mijenja od iteracije do iteracije, izmjenom matrice prije rješavanja



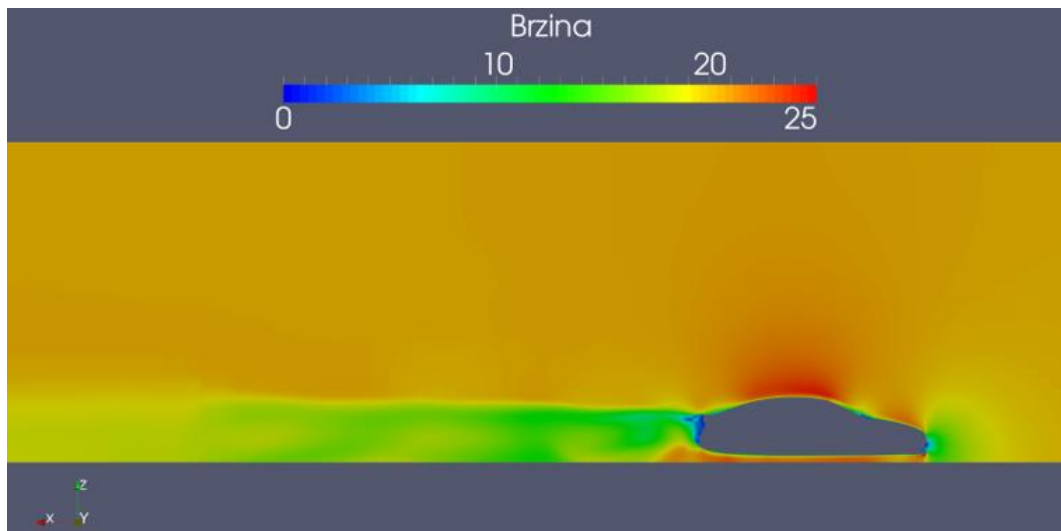
jednadžbi ili izravnom izmjenom polja nakon dobivenog rješenja. Općenito se vrijednost relaksacijskih faktora kreće od 0 do 1. Relaksacijski faktor korišten za polje tlaka iznosi 0.3, dok su za jednadžbe brzine, specifične turbulentne kinetičke energije i specifične disipacije energije korištene vrijednosti faktora od 0.7. Ukupno su izrađene dvije konačne geometrijske mreže, te je za svaku proveden numerički proračun, pri kojem je bilježen iznos koeficijenta otpora ( $C_D$ ) koji predstavlja glavni parametar koji nas zanima u ovome radu. Obje simulacije provedene su u ukupno 2500 iteracija. Pošto geometrijska mreža bez retrovizora sadrži oko 2200000 konačnih volumena, a ona sa retrovizorima oko 3000000, jasno je da stvarno vrijeme koje je potrebno za provedbu takve simulacije može trajati duže od 12 sati. OpenFOAM ima mogućnost dijeljenja područja proračuna skupa sa fizikalnim poljima koja računa, na više zasebnih dijelova. Takva procedura se provodi na računalima sa procesorima koji sadrže više fizičkih jezgri. Današnja računala obično imaju minimalno dvije, a obično četvero-jezgrene procesore na kakvom je proveden ovaj proračun. Nakon što je područje proračuna podijeljeno na četiri dijela, prilikom provedbe simulacije OpenFOAM paralelno računa vrijednosti fizikalnih polja u svakom od četiri dijela područja proračuna istovremeno, što znatno skraćuje proces računanja. Time je završen drugi korak provođenja numeričke simulacije pomoću računalne dinamike fluida, odnosno procesiranje, te nam sada preostaje post-procesiranje dobivenih rezultata.

## 6 Rezultati numeričkog proračuna

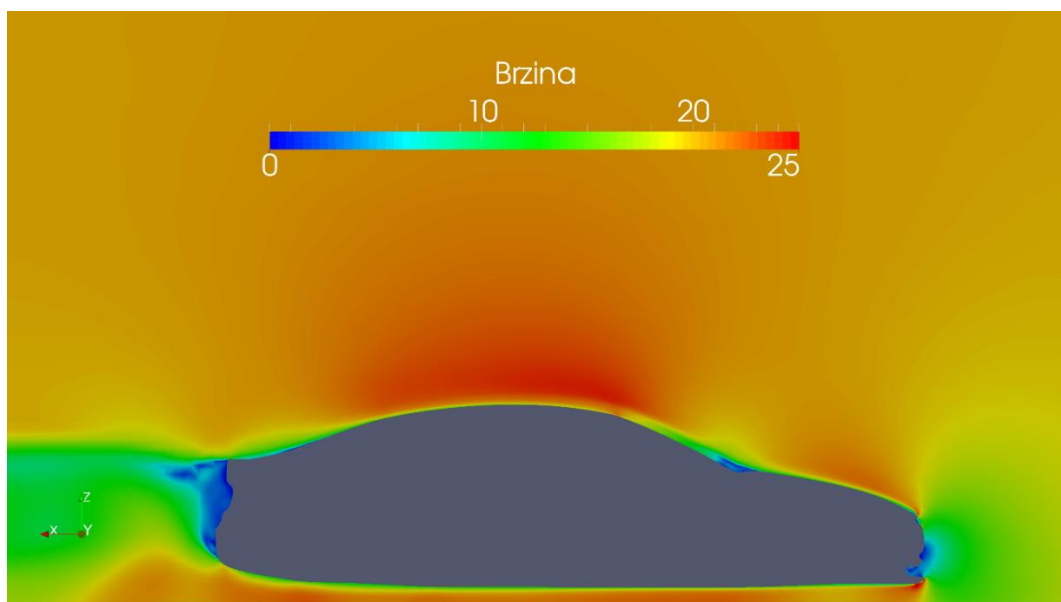
Za post-procesiranje je korišten Paraview, softver koji je također slobodno dostupan i otvorenog koda. Ovo je jedan od najčešće korištenih softvera za post-procesiranje rezultata numeričkih proračuna u računalnoj dinamici fluida, pogotovo ako je proračun proveden u OpenFOAM-u. Rezultati proračuna komentirati će se u sljedeća dva poglavlja. U rezultatima numeričke simulacije, prikazujemo polja tlaka i brzine na površinama koje nas zanimaju. Prilikom prikazivanja brzine, zanimaju nas isključivo presjeci unutrašnjosti geometrijske mreže, pošto je raspodjela brzina na površini karoserije automobila i njegovih kotača definirana rubnim uvjetima. Raspodjela brzina na presjecima može nam dati uvid u dijelove strujanja na kojima se pojavljuju vrtlozi koji povećavaju i aerodinamičke sile otpora. Raspodjela tlaka po površini itekako nas zanima, skupa sa raspodjelom polja tlaka na presjecima unutrašnjosti geometrijske mreže. Upravo nam raspodjela polja tlaka daje uvid u silu otpora koja djeluje na automobil, jer kao što je rečeno u poglavlju 2.6, sila otpora koja djeluje na automobil najvećim djelom je posljedica razlike u sili tlaka.

### 6.1 Rezultati proračuna na geometriji sa retrovizorom

Prvo ćemo prikazati polje brzine unutrašnje mreže na ravnini simetrije, odnosno točno na polovici automobila. Taj će prikaz biti praktički jednak u slučaju sa i bez retrovizora, pa će se prikazati samo u ovom poglavlju. Taj će se presjek prikazati na slikama 19 i 20. Na slici 19 se može primijetiti duljina vrtložnog traga koji automobil ostavlja iza sebe. Možemo primijetiti da automobil može imati značajan utjecaj na aerodinamičke sile koje bi djelovale na bilo kakvo tijelo koje se kreće neposredno iza automobila jednakom brzinom, jer vrtložni trag zahvaća veći dio područja proračuna koje je korišteno iza automobila. Na slici 20 će se pokazati isti taj prikaz samo uvećan da bi se bolje mogli vidjeti utjecaji pojedinih dijelova presjeka na kretanje fluida uz automobil.



Slika 19: Polje brzine na presjeku simetrije (udaljeno)

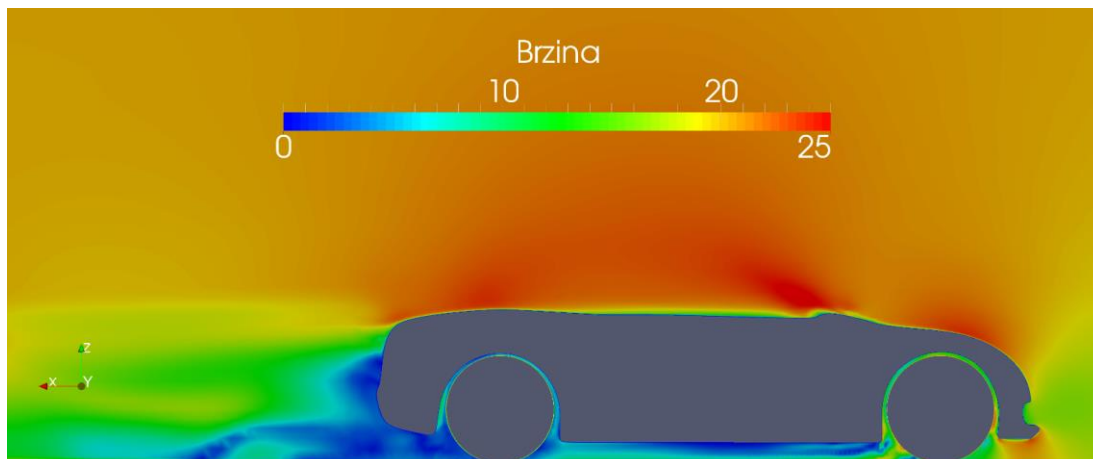


Slika 20: Polje brzine na presjeku simetrije (približno)

Sa slike 20 je vidimo da do značajnog pada brzine dolazi u okolici prednjeg branika automobila koji predstavlja polje zastoja neporemećene struje koja dolazi od granice ulaza i prvo udara upravo u taj dio automobila. Također se može primijetiti područje niske brzine na zadnjoj strani automobila, gdje dolazi do stvaranja vrtloga u strujanju zbog tako uvjetovane geometrije stražnjeg dijela automobila.

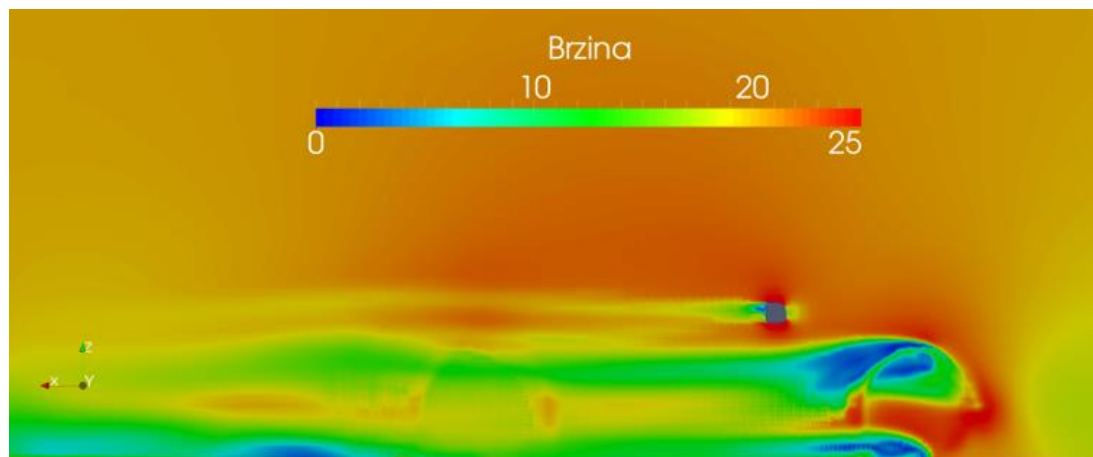
Okretanje kotača je također značajan izvor vrtloga, što je također dobro prikazati na polju brzina u presjeku na polovici kotača. Turbulencije nastale uslijed okretanja kotača (engl. tyre wake), odnosno poremećeni zrak zbog okretanja kotača, ima popriličan utjecaj na aerodinamičke sile,

kako na silu otpora, tako i na silu uzgona. Najveći utjecaj tog fenomena vidi se u F1 i sličnim moto sportovima gdje kotači nisu zaštićeni karoserijom, pa se upravo u tim disciplinama najviše pažnje pridaje reduciranju lošeg utjecaja na aerodinamičke sile tog fenomena. Kod automobila je ipak njihov utjecaj manji jer su kotači zaštićeni i uvučeni u karoseriju automobila.



*Slika 21: Polje brzine na polovici kotača automobila*

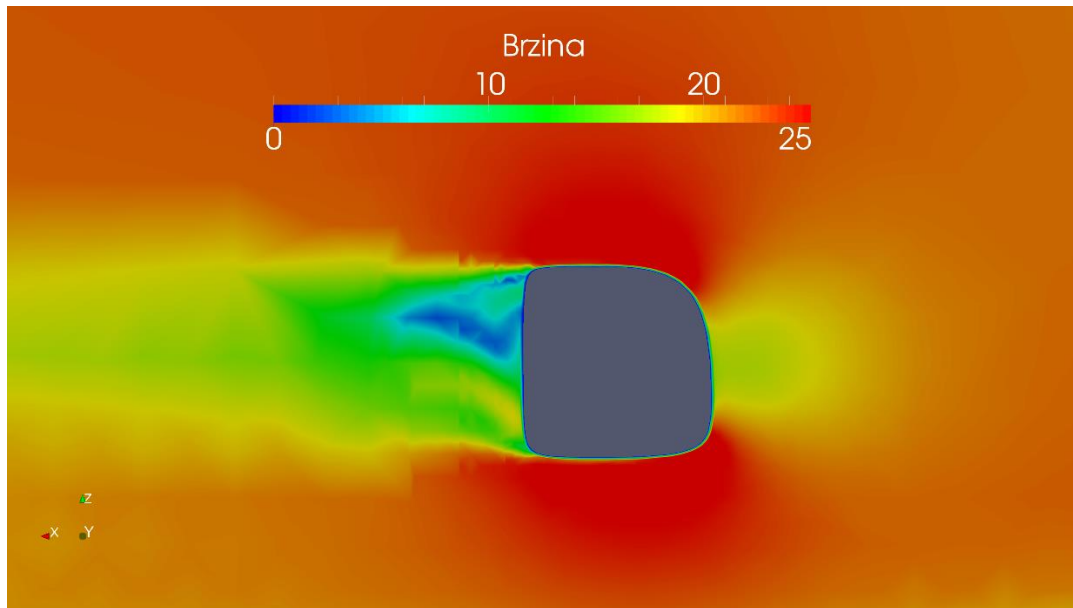
No područje koje nas zanima u ovom radu jest retrovizor i što se događa sa poljem brzina oko njega. Zato ćemo prikazati polje brzine u okolici retrovizora.



*Slika 22: Polje brzine u ravnini presjeka retrovizora*

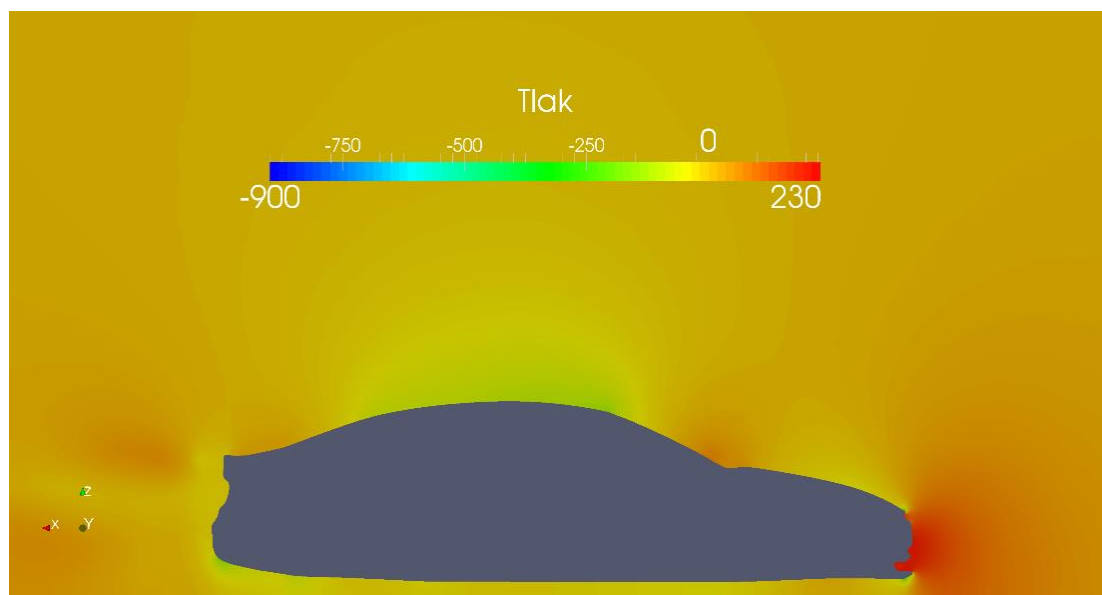
Kao što vidimo sa slike 22, retrovizor ostavlja značajan vrtložni trag iza sebe, iz čega možemo zaključiti da stvara i značajan utjecaj na aerodinamičku silu otpora koja djeluje na automobil. Vrtložni trag retrovizora se proteže cijelom duljinom automobila, sve dok se ne spoji sa vrtlozima stvorenim na stražnjoj strani automobila, te onima uzrokovanim kretanjem kotača. Vrtloge uzrokovane kretanjem kotača možemo jasno vidjeti i u ovom presjeku koji je oko deset

centimetara udaljen od vanjskog ruba kotača. Na slici 23 je prikazan uvećani prikaz kretanja zraka oko retrovizora.



Slika 23: Polje brzine u presjeku retrovizora (približno)

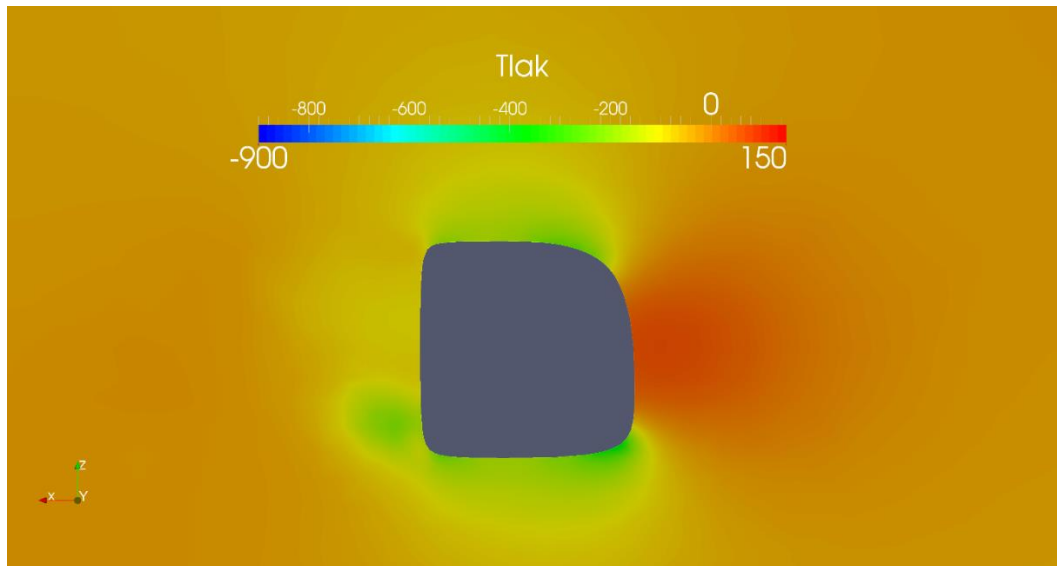
Nakon prikazanih polja brzina možemo prikazati polje tlaka na istom presjeku na kojem je prikazano polje brzine na slici 20, odnosno u ravnini simetrije.



Slika 24: Polje tlaka u ravnini simetrije

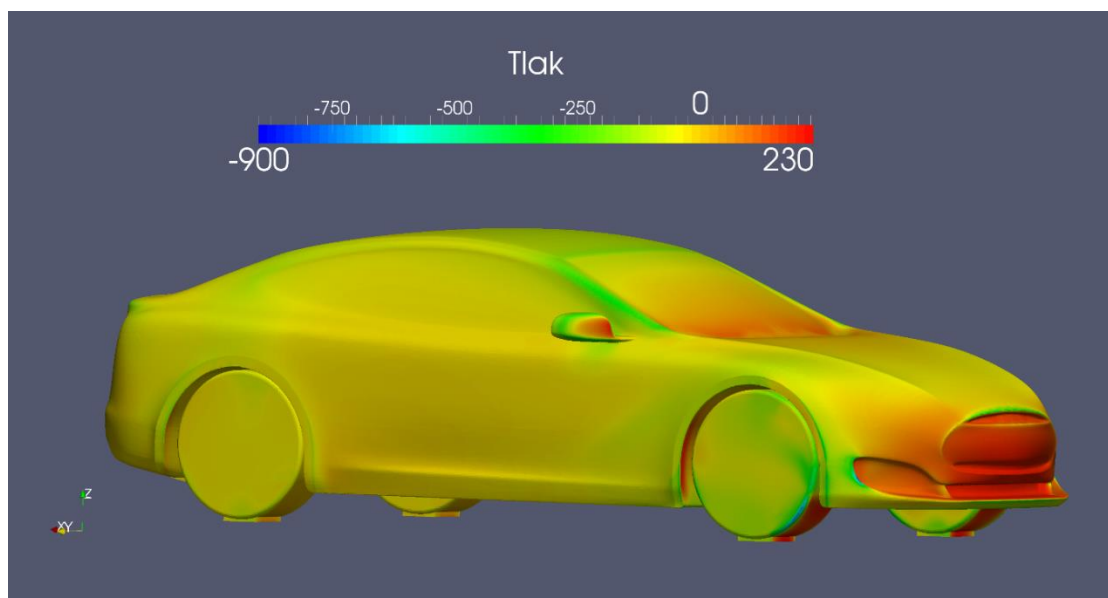
Sa slike je vidljivo da je na prednjoj strani automobila tlak znatno veći nego na stražnjoj, upravo od te razlike tlakova dolazi najveći udio u aerodinamičkoj sili otpora, kao što je već spomenuto u poglavlju 2.6.

Također, kao što smo prikazali polje brzine u presjeku područja okolice retrovizora, tako ćemo prikazati i polje tlaka iz kojeg je jasno vidljivo da retrovizor pridonosi aerodinamičkoj sili koja djeluje na automobil.



*Slika 25: Polje tlaka na presjeku retrovizora*

Kao što je već rečeno, polje tlaka možemo prikazati i na samoj površini automobila, što nam daje uvid u aerodinamičke sile koje djeluju na automobil.



*Slika 26: Polje tlaka na površini automobila*

Vidimo da je tlak najveći upravo na prednjoj površini automobila (crveno područje) gdje je najveće područje pretlaka. Također značajan dio sile pretlaka javlja se na prednjem prijelazu sa

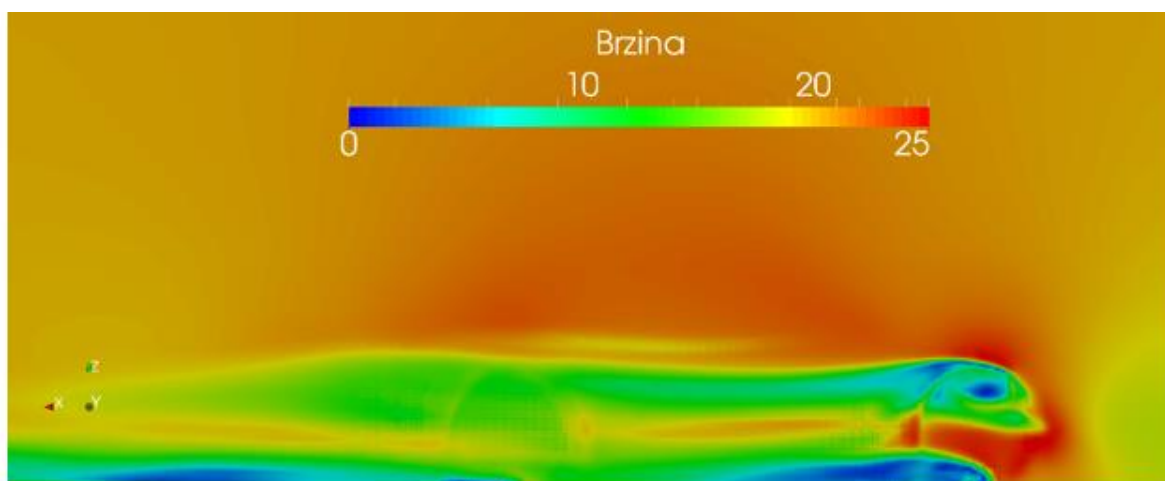
haube automobila na vjetrobransko staklo, te na dijelu prednjih kotača automobila u koje udara struja praktički neporemećenog strujanja. Naravno, područje pretlaka je vidljivo i na retrovizorima automobila, što ukazuje na to da upravo ta komponenta ima značajan utjecaj na ukupnu aerodinamičku silu, uzevši u obzir veličinu te komponente.

Također, veličina pomoću koje ćemo uspoređivati aerodinamičku efikasnost varijante geometrije s retrovizorima i bez retrovizora, koja se računa prema izrazu (2.16) je koeficijent aerodinamičkog otpora, koji za ovako izvedenu varijantu vozila iznosi:

$$C_D = 0.24353 \quad (6.1)$$

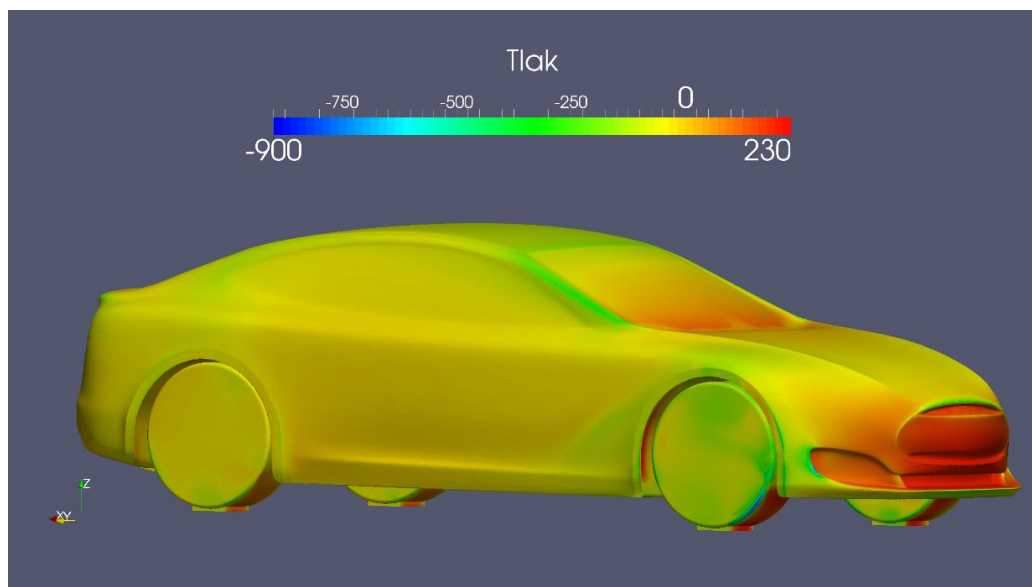
## 6.2 Rezultati proračuna na geometriji bez retrovizora

Naravno, već prije provedbe ove simulacije očekivali smo smanjenje aerodinamičke sile otpora na ovakvoj geometriji. Vidljivo je iz prikaza raspodjele tlaka na površini geometrije sa retrovizorom da retrovizor mora generirati neku količinu aerodinamičkog otpora, što ćemo potkrijepiti sljedećim rezultatima. Kao što je već rečeno, u ravnini simetrije će polje brzine i tlaka biti praktički jednako jer na strujanje u toj ravnini retrovizor ima izuzetno mali utjecaj. No možemo prikazati ravninu kojom smo u prethodnom poglavlju prikazali vrtloge, kako bi vidjeli da umjesto vrtložnog straga na visini retrovizora prikazanog u prethodnom poglavlju, sada na ovom presjeku imamo praktički neporemećeno strujanje zraka.



Slika 27: Polje brzine na presjeku sa slike 22 (bez retrovizora)

Također je dobro prikazati raspodjelu tlaka po površini automobila bez retrovizora. Gdje je raspodjela po površini automobila praktički jednaka, no pošto nema retrovizora, udio područja visokog tlaka se smanjuje, isto kao i vrtložni trag koji su na prijašnjoj verziji geometrije stvarali retrovizori.



Slika 28: Polje tlaka na površini automobila (bez retrovizora)

Na samom kraju izračunat je glavni traženi podatak ovoga završnog rada, koeficijent aerodinamičkog otpora automobila bez retrovizora. Prije samog početka izrade završnog rada, naišao sam tek na nekoliko radova na ovu temu, koji nisu poprilično stručno odrađeni već su to obično bili neprovjereni članci na nepouzdanim stranicama. No prema tim izvorima obično se navodilo poboljšanje, odnosno smanjenje aerodinamičkog koeficijenta otpora od oko 5 % na varijanti automobila bez retrovizora. Aerodinamički koeficijent otpora dobiven u ovom numeričkom proračunu iznosi:

$$C'_D = 0.2292 \quad (6.2)$$

Pa ako usporedimo aerodinamički koeficijente dobivene na varijanti sa retrovizorima i onoj bez retrovizora, zaključujemo da uklanjanjem retrovizora, koeficijent aerodinamičkog otpora pada za oko 6 %, što je značajan utjecaj s obzirom na veličinu te komponente karoserije automobila. Time ovaj automobil definitivno ulazi u top 5 modela ove klase (naravno sa većim obujmom prodaje), po učinkovitosti vezanoj za aerodinamički otpor.



## 7 Utjecaj na potrošnju energije

Na kraju ovog rada provest ćemo pojednostavljen proračun utjecaja smanjenja aerodinamičkog koeficijenta otpora na potrošnju energije, putem proračuna vučne snage potrebne za kretanje automobila određenom brzinom. Općenito se snaga vuče  $P_t$  (engl. traction power) računa prema sljedećem izrazu:

$$P_t = \frac{\Delta E_p + \Delta E_k + W_{aero} + W_{kotrljanja}}{\Delta t} \quad (7.1)$$

Gdje član  $\Delta E_p + \Delta E_k$  predstavlja promjenu potencijalne i kinetičke energije vozila, koju ćemo za naše potrebe izjednačiti s nulom, što znači da računamo snagu potrebnu za kretanje automobila konstantnom brzinom na konstantnoj nadmorskoj visini. Član  $W_{aero}$  predstavlja rad aerodinamičke sile otpora na automobil i  $W_{kotrljanja}$  predstavlja rad otpora kotrljanju. Svi radovi se odnose na vremenski period  $\Delta t$ .

### 7.1 Snaga aerodinamičke sile otpora

Prema poglavlju 2.5, odnosno jednadžbi 2.12 računamo aerodinamičku silu otpora za pripadajuću brzinu. Prilikom stvarnog kretanja treba uzeti u obzir smjer i jačinu vjetrova, pa su tako prikazane vrijednosti brzina zapravo relativne vrijednosti brzine zraka u odnosu na automobil u smjeru njegova kretanja.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 A_{ref} \quad (7.2)$$

Pa možemo izračunati snagu putem općeg izraza za izračun snage, pošto su iznos sile i brzine konstantni:

$$P_{aero} = F_D v \quad (7.3)$$

Kasnije će se vrijednosti snage aerodinamičke sile prikazati u dijagramskim prikazom u ovisnosti o brzini kretanja vozila.

## 7.2 Snaga otpora kotrljanja

Snaga otpora kotrljanja ovisi o koeficijentu otpora kotrljanju  $C_r$  (engl. rolling resistance coefficient), koji ovisi o tri glavna parametra: tlaku guma, karakteristikama podloge i vremenskim uvjetima. Obično se kao koeficijent otpora kotrljanju kod automobila pri dobrim vremenskim uvjetima (bez kiše) uzima vrijednost 0.01, pa je upravo ta vrijednost korištena u ovom proračunu. Sila također ovisi o masi automobila  $m$  i ubrzanju zemljine sile teže  $g$ . Masa automobila na električni pogon je obično veća od onih sa motorom s unutrašnjim izgaranjem pa je tako i snaga potrebna za kretanje takvog automobila veća. U proračunu je korištena približna masa modela automobila čija je geometrija korištena u iznosu od 1950 kilograma. Pa se sila računa prema sljedećem izrazu:

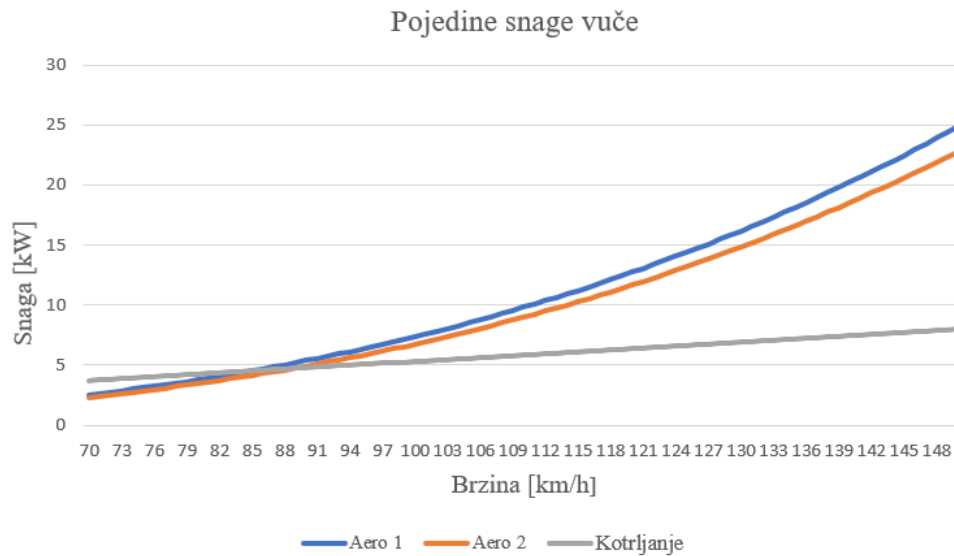
$$F_{kotr\lj\anja} = C_r m g \quad (7.4)$$

Dok snagu sile otpora kotrljanju također računamo umnoškom sile sa brzinom kretanja vozila kao i kod snage aerodinamičkog otpora:

$$P_{kotr\lj\anja} = F_{kotr\lj\anja} u \quad (7.5)$$

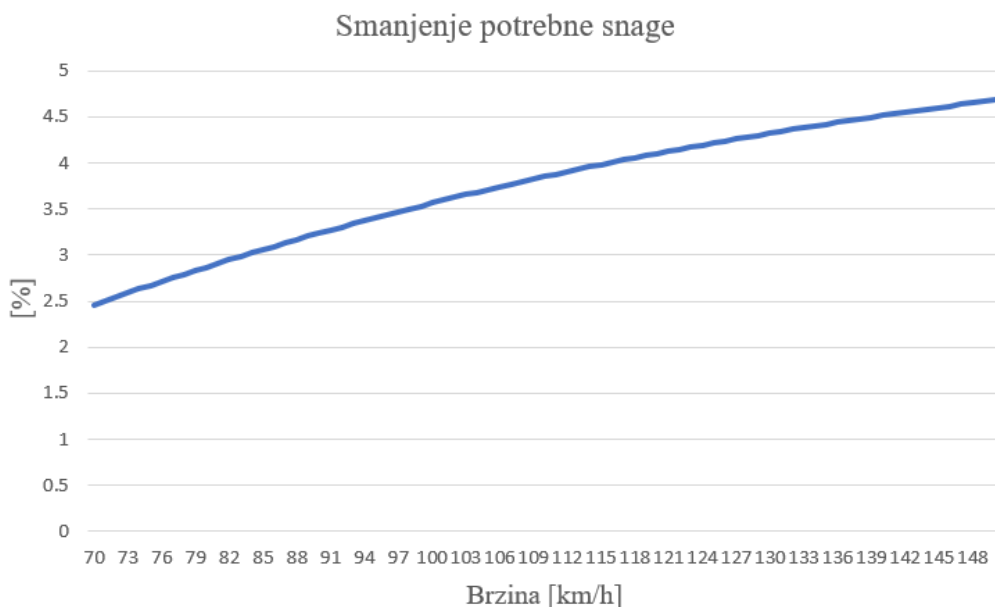
## 7.3 Iznosi snage za pripadajuće brzine

Prethodno izračunate vrijednosti, prikazati ćemo dijagramski. Prvi dijagram (slika 29) prikazivati će odnos pojedinih snaga aerodinamičkih sila za geometriju sa i bez retrovizora, te snage sile otpora kotrljanju o brzini kretanja automobila, gdje ćemo promatrati brzine od 70 do 150 kilometara na sat kakve se koriste na brzim cestama ili na autocestama. Na slici 29 Aero 1 linija prikazuje snagu potrebnu za svladavanje sile koju proizvodi geometrija automobila sa retrovizorima, dok Aero 2 prikazuje istu snagu samo na geometriji bez retrovizora.



Slika 29: Dijagramski prikaz promjene pojedine snage s povećanjem brzine

Vidimo dijagram sličan onome iz prvog poglavlja na slici 1, utjecaj kotrljanja prema korištenim formulama raste linearno s promjenom brzine. Dok se utjecaj aerodinamičkih sila znatno mijenja s povećanjem brzine. Na sljedećem dijagramu prikazati ćemo ukupan utjecaj uklanjanja retrovizora na potrebnu snagu vuče koju automobil zahtjeva.



Slika 30: Dijagramski prikaz smanjenja potrebne snage

Kao što vidimo, uklanjanjem retrovizora se potrebna snaga za vuču automobila smanjuje za od otprilike 2.5 pa sve do gotovo 5 % prilikom kretanja brzinama od 70 do 150 kilometara na sat. Naravno ovakav proračun ne uzima u obzir mehaničke gubitke i gubitke pretvorbe energije, no kod električnih automobila su ti gubici relativno mali. Pa možemo zaključiti da utjecaj retrovizora na potrošnju automobila prilikom kretanja brzom cestom ili autocestom iznosi oko 4 %.

## 8 Zaključak

Cilj ovog rada bio je pokazati utjecaj retrovizora na ukupni aerodinamički otpor automobila pri različitim režimima vožnje, pošto uz današnju tehnologiju postoje načini da se oni uklone tako da to ne smanjuje preglednost i ne utječe na sigurnost vožnje. Retrovizori zbog svog oblika stvaraju vrtložni trag koji ima značajan udio u ukupnom vrtložnom tragu koji automobil stvara svojim kretanjem pri većim brzinama, pa zasigurno imaju značajnu ulogu u ukupnom aerodinamičkom otporu.

Analiza rezultata numeričke simulacije pokazala je značajne promjene u poljima brzine i tlaka kako na površini automobila, tako i na unutrašnjosti geometrijske mreže u okolici površine automobila. Također je za obje varijante izračunat koeficijent aerodinamičkog otpora koji je glavni pokazatelj utjecaja izmjena u geometriji na potrošnju energije prilikom vožnje. Pa je tako pokazano da se uklanjanjem retrovizora s automobila aerodinamički koeficijent otpora smanjuje za oko 6 %. Ako pratimo smanjenje aerodinamičkog koeficijenta otpora na komercijalnim automobilima kroz povijest, možemo primijetiti da bi danas ovakav pad predstavljao značajan korak u optimizaciji koeficijenta.

Tako izračunatim koeficijentom aerodinamičkog otpora možemo dobiti aerodinamičku silu koja djeluje na automobil za bilo koju brzinu vožnje, pa je tako napravljen pojednostavljen proračun utjecaja smanjenja koeficijenta otpora na potrošnju energije. Najveći dio potrošnje energije odlazi na rad kotrljanja vozila na kotačima, te na rad aerodinamičkih sila prilikom vožnje većim brzinama, pa su iz tog razloga samo ta dva utjecaja korištena u proračunu. Dijagramski je prikazan udio pojedinog rada za obje varijante geometrije, pri čemu rad kotrljanja ostaje nepromijenjen. Na samom je kraju, dijagramski prikazano za koliko se smanjuje ukupna potrebna snaga za kretanje automobila ukoliko se uklone retrovizori. Pokazano je da se za brzine kretanja od 70 do 150 kilometara na sat, energija potrebna za kretanje automobila smanji za od 2.5 pa sve do oko 4.7 %.

## Literatura

- [1] Virag, Z., Džijan, I.: Računalna dinamika fluida, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [2] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I.: Mehanika fluida I predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I.: Mehanika fluida II predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [4] Kesić, P.: Osnove aerodinamike, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [5] Joseph Katz: Race Car Aerodynamics: Designing for speed, 2nd Edition
- [6] Wolf-Heinrich Hucho: Aerodynamics of Road Vehicles, 1998.
- [7] Lennart Lofdahl: A Brief History of Road Vehicle Aerodynamics (RVAD), Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- [8] Menter, F. R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application, AIAA Journal, August 1994.
- [9] H. Versteeg: An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)
- [10] Christopher J. Greenshields: OpenFOAM User Guide, version 7, 2019.
- [11] OpenFOAM, [http://openfoamwiki.net/index.php/Main\\_Page](http://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page)
- [12] Kaveh Sarrafan, Danny Sutanto, Kashem M. Muttaqi, Graham Town: Accurate range estimation for an electric vehicle including changing environmental conditions and traction system efficiency, University of Wollongong, 2017.
- [13] Drag and skin friction ratio, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Form-drag-and-skin-friction-ratio.svg>
- [14] Binshan Lin: Expert System with Applications, An International Journal, May 2011.