

# Analiza otpora zraka i njegov utjecaj na potrošnju goriva kod pojednostavljene geometrije autobusa

---

**Bošković, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*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:235:855689>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Matej Bošković**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Matej Bošković

Zagreb, 2025.

*„Evo, ja sam s vama u sve dane do svršetka svijeta. Amen.“*

*Mt 28, 20b*

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem Izv. prof. dr. sc. Momiru Sjeriću na savjetima i pomoći prilikom izrade rada.*

*Hvala svim prijateljima i kolegama koji su me pratili i bili podrška tijekom cijelog školovanja.*

*Posebnu zahvalnost upućujem svojoj obitelji i svojoj djevojci, koji su mi bili najveća snaga, potpora i oslonac kroz sve ove godine. Vaša ljubav, razumijevanje i vjera u mene neizmjereno su mi značili i motivirali me da ustrajem i ostvarim svoje ciljeve. Hvala vam iz dubine srca!*

*Na kraju, najveća hvala dragom Bogu na svim divnim ljudima koje je stavio u moj život, kao i na svim milostima i blagoslovima kojima me obdario. Bez Njegova vodstva, ljubavi i milosrđa, ništa od ovoga ne bi bilo moguće.*

*Matej Bošković*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispите  
Povjerenstvo za diplomске ispите studija strojarstva za smјerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matej Bošković** JMBAG: 0035220550

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza otpora zraka i njegov utjecaj na potrošnju goriva kod pojednostavljene geometrije autobusa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of air drag and its influence on the fuel consumption for the simplified bus geometry**

Opis zadatka:

Aerodinamika cestovnih vozila utječe na ukupne otpore vožnje i potrošnju goriva. Faktor otpora zraka je parametar kojim se za različite brzine kretanja vozila može izračunati sila otpora zraka. U svrhu analize faktora otpora zraka gospodarskog vozila moguće je primjenom računalne dinamike fluida izračunati aerodinamičke značajke vozila. Kako bi se smanjili zahtjevi na računalne resurse u okviru rada će se analizirati pojednostavljeni 2D i 3D modeli gospodarskog vozila te će se analizirati utjecaj pojedinih segmenata vozila na ukupan otpor zraka. Za raspon izračunatih vrijednosti faktora otpora zraka će se provesti izračun potrošnje goriva za nekoliko različitih voznih ciklusa primjenom simulacijskog modela za dinamiku vozila.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Definirati pojednostavljenu konturu koja predstavlja poprečni presjek autobusa po središnjoj uzdužnoj osi vozila.
- Primjenom programskog paketa Ansys Student™ izračunati koeficijent otpora zraka za polaznu 2D geometriju vozila te ispitati konvergenciju mreže konačnih volumena.
- Provesti varijaciju zaobljenja prednjeg ruba vozila i zanemarenja kotača za 2D model te izračunate rezultate faktora otpora zraka usporediti s dostupnim podacima iz literature.
- Proširiti analizu strujanja i izračun faktora otpora zraka za 3D model vozila.
- Analizirati dijelove vozila koji najviše doprinose otporu zraka.
- Izračunati potrošnju goriva razmatranog vozila primjenom simulacijskog paketa za analizu dinamike vozila za nekoliko voznih ciklusa.
- Usporediti rezultate 2D i 3D modela za faktore otpora zraka i potrošnje goriva.
- Izvesti zaključke.

Broj 2D i 3D modela će biti dogovoreni s mentorom tijekom izrade rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

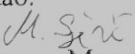
Predvideni datumi obrane:

28. studeni 2024.

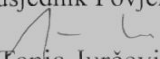
30. siječnja 2025.

6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. IZRADA GEOMETRIJSKIH MODELA VOZILA I SIMULACIJA RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA .....	3
2.1. 2D model.....	8
2.1.1. Geometrija(Geometry) .....	8
2.1.2. Gustoća mreže (Mesh) .....	13
2.1.3. Postav .....	18
2.2. 3D model.....	26
2.2.1. Geometrija (Geometry).....	26
2.2.2. Gustoća mreže (Mesh) .....	29
3. OPIS I POSTUPAK IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA ZA ANALIZU DINAMIKE VOZILA .....	30
4. REZULTATI .....	39
4.1. Računalna dinamika fluida.....	39
4.1.1. 2D model.....	39
4.1.2. 3D model.....	40
4.1.3. Prikaz i opis strujanja.....	42
4.1.3.1. Strujnice .....	42
4.1.3.2. Polje brzine .....	45
4.1.3.3. Polje tlaka.....	48
4.1.4. Raspodjela faktora tlaka.....	51
4.2. Dinamika vozila .....	55
4.2.1. Analiza potrošnje goriva .....	55
5. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	63

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Promjena faktora otpora zraka kroz povijest[2] .....	1
Slika 2.	Različiti faktori otpora zraka pri različitom obliku autobusa[2] .....	2
Slika 3.	Ovisnost faktora otpora zraka o uštedi goriva[2] .....	2
Slika 4.	Vrste strujanja fluida[5].....	6
Slika 5.	Karakteristična površina za tupa tijela[1].....	8
Slika 6.	Izgled modela vozila .....	9
Slika 7.	Odabir opcije <i>Geometry</i> .....	9
Slika 8.	Učitavanje modela .....	10
Slika 9.	Opcija <i>Mid-Surface</i> .....	10
Slika 10.	Proces izrade okolišnog prostora.....	11
Slika 11.	Izgled okolišnog prostora .....	12
Slika 12.	Izgled nakon opcije <i>Boolean</i> .....	12
Slika 13.	Konačni izgled.....	13
Slika 14.	Opcija <i>Mesh</i> .....	13
Slika 15.	Povezivanje <i>Geometrije</i> .....	14
Slika 16.	Izgled modela nakon početnog <i>Mesha</i> .....	15
Slika 17.	Izbor metode <i>Mesha</i> .....	15
Slika 18.	Opcija <i>Sizing</i> .....	16
Slika 19.	Uključivanje opcije <i>Inflation</i> .....	17
Slika 20.	Izgled mreže nakon opcije <i>Inflation</i> .....	18
Slika 21.	Opcija <i>Fluent</i> .....	18
Slika 22.	Povezivanje opcija <i>Mesh</i> i <i>Fluent</i> .....	19
Slika 23.	Skočni prozor opcije <i>Fluent</i> .....	19
Slika 24.	Skočni prozor opcije <i>Fluent2</i> .....	20
Slika 25.	Alatna traka opcije <i>Fluent</i> .....	20
Slika 26.	Izbor fluida .....	21
Slika 27.	Definiranje rubnih uvjeta.....	22
Slika 28.	Prozor <i>Pressure Far Fielda</i> .....	22
Slika 29.	Opcija <i>Reference Values</i> .....	23
Slika 30.	Stavka <i>Solution Methods</i> .....	24
Slika 31.	Opcija <i>Drag Coefficient</i> .....	24
Slika 32.	Izbor varijabli za <i>Drag Coefficient</i> .....	25
Slika 33.	Izbor <i>SpaceClaim Geometry</i> .....	26
Slika 34.	Početni zaslon <i>SpaceClaima</i> .....	27
Slika 35.	Dimenzije trapeza.....	27
Slika 36.	Opcija <i>Pull</i> .....	28
Slika 37.	Opcija <i>Suppress from Physics</i> .....	28
Slika 38.	Opcija <i>Enclosure</i> .....	29
Slika 39.	Opcija <i>Body Sizing</i> .....	29
Slika 40.	Početni zaslon <i>CarSima</i> .....	31
Slika 41.	Nova baza podataka ( <i>Datasets</i> ).....	31
Slika 42.	Izbor vozila.....	32
Slika 43.	Kopiranje vozila .....	32
Slika 44.	Kopija <i>Autobus_Sprung Mass</i> .....	33
Slika 45.	Prilagodba dimenzija autobusu .....	33
Slika 46.	Mercedes-Benz Intouro K[8].....	34
Slika 47.	Kopija <i>Autobus_Scaleable Example Aero Properties</i> .....	35
Slika 48.	Aerodinamičke postavke .....	35

Slika 49.	Prozor <i>Procedure</i> .....	36
Slika 50.	<i>Fuel Consumed</i> .....	37
Slika 51.	Lista procedura .....	38
Slika 52.	Izbor optimalnog broja konačnih volumena za 2D slučaj .....	39
Slika 53.	Usporedba podataka iz simulacije i priručnika[2].....	40
Slika 54.	Izbor optimalnog broja konačnih volumena za 3D slučaj .....	41
Slika 55.	Usporedba podataka iz 2D i 3D simulacija te priručnika[2] .....	42
Slika 56.	Polje strujnica brzine s radijusom 0mm .....	43
Slika 57.	Polje strujnica brzine s radijusom 50mm .....	43
Slika 58.	Polje strujnica brzine s radijusom 100mm .....	44
Slika 59.	Polje strujnica brzine s radijusom 150mm .....	44
Slika 60.	Polje strujnica brzine s radijusom 200mm .....	45
Slika 61.	Polje strujnica brzine s radijusom 250mm .....	45
Slika 62.	Polje brzine s radijusom 0mm .....	46
Slika 63.	Polje brzine s radijusom 50mm .....	46
Slika 64.	Polje brzine s radijusom 100mm .....	47
Slika 65.	Polje brzine s radijusom 150mm .....	47
Slika 66.	Polje brzine s radijusom 200mm .....	48
Slika 67.	Polje brzine s radijusom 250mm .....	48
Slika 68.	Polje tlaka s radijusom 0mm .....	49
Slika 69.	Polje tlaka s radijusom 50mm .....	49
Slika 70.	Polje tlaka s radijusom 100mm .....	50
Slika 71.	Polje tlaka s radijusom 150mm .....	50
Slika 72.	Polje tlaka s radijusom 200mm .....	51
Slika 73.	Polje tlaka s radijusom 250mm .....	51
Slika 74.	Prikaz faktora tlaka po donjem dijelu vozila za 2D slučaj .....	52
Slika 75.	Prikaz faktora tlaka po gornjem dijelu vozila za 2D slučaj.....	53
Slika 76.	Prikaz faktora tlaka po donjem dijelu vozila za 3D slučaj .....	53
Slika 77.	Prikaz faktora tlaka po gornjem dijelu vozila za 3D slučaj.....	54
Slika 78.	Ispitni vožni ciklus <i>Autocesta</i> [9] .....	55
Slika 79.	Ispitni vožni ciklus <i>Prigradska</i> [9] .....	56
Slika 80.	Ispitni vožni ciklus <i>Gradska</i> [9] .....	56
Slika 81.	Dijagram potrošnje goriva na 100 km za 2D .....	57
Slika 82.	Dijagram potrošnje goriva na 100 km za 3D .....	57
Slika 83.	Dijagram uštede goriva u ovisnosti o relativnoj promjeni $C_D$ za 2D slučaj.....	58
Slika 84.	Dijagram uštede goriva u ovisnosti o relativnoj promjeni $C_D$ za 3D slučaj.....	59
Slika 85.	Dijagram ovisnosti emisije $CO_2$ o radijusu zaobljenja za 2D slučaj .....	60
Slika 86.	Dijagram ovisnosti emisije $CO_2$ o radijusu zaobljenja za 3D slučaj .....	60



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Rezultati faktora otpora zraka za različite radijuse u 2D-u .....	40
Tablica 2. Rezultati faktora otpora zraka za različite radijuse u 3D-u .....	42

## SAŽETAK

U ovom radu objašnjen je detaljan postupak izrade modela i postavljanja simulacije za pregled ovisnosti faktora otpora zraka o radijusu zaobljenja prednjega gornjeg ruba autobusa u programskom paketu ANSYS te njegov utjecaj na potrošnju goriva u programskom paketu CarSim. Uvodni je dio povijesni pregled kako se mijenjao oblik vozila te i sam faktor otpora zraka te što utječe na potrošnju goriva. Zatim se objašnjava izrada geometrijskih 2D i 3D modela vozila i kako se postavlja računalna simulacija dinamike fluida. Potom se opisuje i objašnjava postupak izrade simulacijskog modela za analizu dinamike vozila. Poslije toga prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja. Analizom rezultata se pokazalo kako pojedini dijelovi utječu na otpor zraka, kako je raspoređen faktor tlaka po konturi vozila, tj. kako i koliko pojedini dio na vozilu utječe na otpor zraka i kako različite vrijednosti faktora otpora zraka utječu na potrošnju goriva i emisiju  $CO_2$ . Na kraju rada je naveden zaključak u kojem je vidljivo da već malom promjenom zaobljenja prednjeg gornjeg brida dolazi do znatne promjene faktora otpora zraka te kako povećanje zaobljenja i faktor otpora zraka nisu proporcionalni. tj. kako se sve većim povećanjem zaobljenja ne smanjuje sve više faktor otpora zraka. Također se uočilo kako je i s ograničenim resursima studentske verzije moguće dobiti približne vrijednosti kao i u realnim uvjetima. Dokazalo se kako povećanje faktora otpora zraka znatno utječe kod vožnje autocestom, tj. vožnje većim brzinama, a da kod gradskog i međugradskog režima, tj. kod vožnje manjim brzinama, ne utječe znatno.

Ključne riječi: aerodinamika autobusa, potrošnja goriva, faktor otpora zraka, vozni ciklus

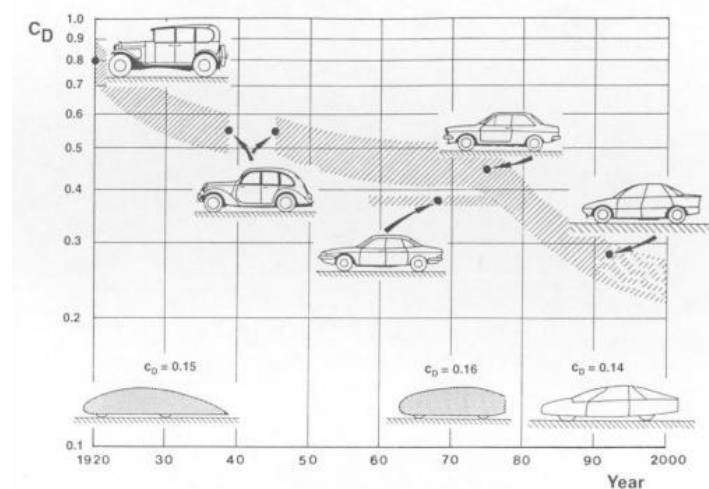
## SUMMARY

This paper describes the comprehensive process for building a model and configuring a simulation to investigate how the air resistance factor depends on the bus's front upper edge's radius of curvature in the *ANSYS* software package and how it affects fuel consumption in the *CarSim* software package. The introduction provides a historical review of the changes in the vehicle's design and the air resistance factor itself, as well as the factors that influence fuel consumption. The construction of geometric 2D and 3D vehicle models is then described, along with the setup of a computer simulation of fluid dynamics. The process of developing a simulation model for fluid dynamics analysis is then discussed and described. After that, the steps involved in developing a simulation model for vehicle dynamics study are outlined and clarified. Following that, the test results are shown and examined. The results of the analysis demonstrated how the pressure factor is distributed along the vehicle contour, how and to what degree individual parts of the vehicle affect air resistance, and how fuel consumption and emissions are affected by varying air resistance factor values. The paper concludes by demonstrating that even a slight alteration in the front upper edge's curvature results in a notable change in the air resistance factor and that the two variables are not proportionate, meaning that decreasing curvature does not result in a decrease in air resistance factor. Additionally, it was noted that approximation values from real-world conditions could be obtained even with the student version's limited resources. Driving on highways, or at greater speeds, is significantly impacted by an increase in the air resistance factor, whereas driving in cities and between cities, or at lower speeds, is not much impacted.

Key words: bus aerodynamics, fuel consumption, air resistance factor, driving cycle

## 1. UVOD

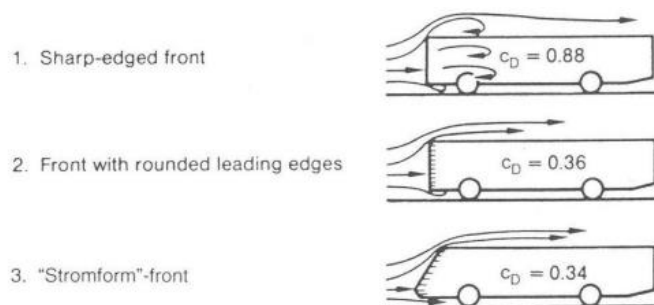
Aerodinamika je znanost koja proučava utjecaj zraka na tijela oko kojih zrak struji. Gibanje zraka oko vozila prilikom vožnje značajno utječe na njegove performanse i ponašanje u vožnji. U početku razvoja automobilske industrije brzine kretanja motornih vozila bile su male te aerodinamika nije imala značajan utjecaj na konstrukciju vozila, ali kako su kroz povijest automobili dostizali sve veće brzine, tako je aerodinamika dobivala sve veću važnost, jer s većom brzinom postaju veće i sile na vozilo koje su posljedica gibanja zraka oko vozila. Unatoč relativno sporom prihvaćanju ideja, već u počecima automobilske industrije aerodinamičari su ponudili razna rješenja vezana uz oblikovanje vozila, koja su poboljšavala performanse[1]. Na Slici 1. može se vidjeti kako su u određenim razdobljima u povijesti automobilske industrije zabilježena smanjenja faktora otpora zraka ( $C_D$ ) kod komercijalnih vozila u Europi. Na slici se također vide i faktori otpora zraka pojedinih prototipova koji su postojali u tome vremenu (prikazani su u dnu slike) te je jasno da aerodinamika nudi oblike s malim faktorom otpora od početka automobilske industrije. Najveća promjena faktora u serijskim automobilima uslijedila je nakon naftne krize, tj. poskupljenja pogonskih goriva[1][3].



**Slika 1. Promjena faktora otpora zraka kroz povijest[2]**

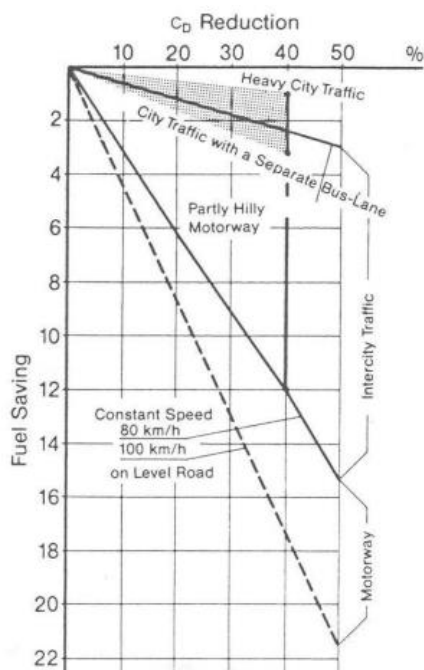
Kako bi se bolje shvatila važnost zaobljenja bridova, potrebno je vozilo (u ovome radu autobus) sagledati na sljedeći način. Autobus je vozilo namijenjeno za prijevoz putnika. Poželjno je da autobus može prevesti što više putnika, kako bi iskoristivost vozila bila veća, a time i prijevoz putnika jeftiniji. To je jedno konstrukcijsko ograničenje. Drugo konstrukcijsko ograničenje jesu maksimalne dimenzije autobusa, koje moraju biti u propisanim granicama (duljina, visina, širina) kako bi autobus zadovoljavao homologacijske propise. S ta dva ograničenja nameće se kutijasti oblik autobusa, koji za propisane maksimalne dimenzije nudi najviše prostora za

putnike. Međutim, takav oblik često daje nepovoljne aerodinamičke osobine kao što se može vidjeti na Slici 2. Što je faktora otpora veći, to je veća i potrošnja goriva, a time i cijena prijevoza i cijena zagađenja okoliša. Cilj je kod oblikovanja autobusa, naravno, smanjiti faktor otpora zraka, ali istovremeno ne zaboraviti na spomenuta ograničenja u vidu oblika. Upravo je zaobljenje bridova vrlo bitan detalj za faktor otpora zraka, jer se već vrlo malim zaobljenjem postiže drastično smanjenje otpora zraka[3] kao što je vidljivo na Slici 2. Jedini je problem što se preoblikovanjem cijelog prednjeg dijela autobusa ne dobiva znatna promjena faktora otpora zraka, već mala razlika koja je opravdana npr. kod međugradskih autobusa.



**Slika 2. Različiti faktori otpora zraka pri različitom obliku autobusa[2]**

Pri manjim brzinama vožnje i čestim promjenama režima rada, tj. u gradskoj vožnji na samu potrošnju goriva faktor otpora zraka ne utječe znatno, dok pri većim brzinama vožnje i konstantnom režimu rada otpor zraka znatno utječe na potrošnju kao što se može vidjeti na Slici 3. koja pokazuje ovisnost faktora otpora zraka o uštedi goriva.



**Slika 3. Ovisnost faktora otpora zraka o uštedi goriva[2]**

## 2. IZRADA GEOMETRIJSKIH MODELA VOZILA I SIMULACIJA RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA

Zakoni koji se koriste u dinamici fluida su osnovni zakoni fizike:

- zakon očuvanja mase
- zakon očuvanja momenta količine gibanja
- zakon očuvanja energije

Osnovne jednačbe koje se koriste pri računalnoj simulaciji dinamike fluida su:

- Navier-Stokesove jednačbe
- Jednačba očuvanja energije
- Transportne jednačbe
- Turbulentni modeli
- Jednačbe za specifične efekte

Navier-Stokesova jednačba za očuvanje količine gibanja opisuje kako se mijenja brzina fluida pod utjecajem sile, njen izraz glasi:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \quad (1)$$

gdje je

$\rho$  - gustoća fluida

$u$  - vektorsko polje brzine

$p$  - tlak

$\mu$  - viskoznost

$F$  - vanjske sile

Navier-Stokesova jednačba očuvanja mase osigurava da se masa fluida očuva i izraz po kojem se računa glasi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

Za nestlačive fluide (gdje je  $\rho = \text{konstanta}$ )

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

Jednadžba očuvanja energije se koristi za opisivanje prijenosa topline i energije u fluidu i njen izraz glasi:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (4)$$

gdje je

$h$  - entalpija

$k$  - toplinska vodljivost

$T$  - temperatura

$\Phi$  - disipacija energije zbog viskoznih efekata

Transportne jednadžbe se koriste kod simuliranja prijenosa tvari (npr. kemijskih spojeva, nečistoća), a njen izraz glasi:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + S \quad (5)$$

gdje je

$\phi$  - koncentracija skalara (npr. tvari)

$D$  - difuzivnost

$S$  - izvor ili ponor tvari

Turbulentni modeli koji se koriste kod turbulentnog strujanja su *RANS* (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) i *LES* (*Large Eddy Simulation*). *RANS* (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) modeli temelje se na vremenskom ili prostornom prosjeku *Navier-Stokesovih jednadžbi* kako bi se odvojili prosječne komponente toka od turbulentnih fluktuacija. Ovi modeli omogućuju da se kompleksno turbulentno strujanje riješi s manjim brojem resursa. Izraz za *RANS* (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) modele glasi:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} \right) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}' \quad (6)$$

gdje je

$\bar{\mathbf{u}}$  - prosječna brzina

$\bar{\boldsymbol{\tau}}' = \overline{\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'}$  - Reynoldsov stres

$\mathbf{u}'$  - fluktuacijska komponenta

Prednosti su što je brz i pogodan za simulacije velikih domena i dugoročnih procesa, a nedostaci su što nije precizan u simulacijama, posebno kod složenih geometrija i promjenjivih tokova.

*LES (Large Eddy Simulation)* simuliraju velike vrtloge koji nose najveće dio energije u turbulentnom toku, a male vrtloge modeliraju pomoću posebnih pod mrežnih modela. Izraz koji se upotrebljava u *LES (Large Eddy Simulation)* glasi:

$$\rho \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \tilde{u} \cdot \nabla \tilde{u} \right) = -\nabla \tilde{p} + \mu \nabla^2 \tilde{u} - \nabla \cdot \tau_{SGS} \quad (7)$$

gdje je

$\tau_{SGS}$  - pod mrežni tenzor naprezanja

Prednosti su što preciznije simulira turbulentne strukture, posebno velike vrtloge, a nedostaci su što zahtjeva značajno više računalnih resursa nego *RANS*.

Jednadžbe za specifične efekte se koriste ako je simulacija kompleksnija pa se mogu dodati jednadžbe za prijenos mase (npr. isparavanje, miješanje), jednadžbe za magnetnohidrodinamiku (MHD) za strujanje pod utjecajem elektromagnetskih polja, jednadžbe za kompresibilne fluide (npr. zvučni valovi)

Postoje dvije vrste strujanja, stlačivo i nestlačivo strujanje. U stlačivom strujanju se gustoća fluida mijenja, dok je u nestlačivom strujanju gustoća fluida konstantna u vremenu i prostoru, tj. u cijeloj domeni strujanja. U nestlačivom strujanju jednadžba očuvanja energije postaje jednadžba temperaturnog polja koje je konstantno, te se gibanje fluida opisuje samo zakonom očuvanja mase i zakonom očuvanja momenta količine gibanja.

U aerodinamici se stlačiva i nestlačiva strujanja određuju prema Machovom broju, koji pokazuje odnos stvarne brzine zraka i brzine zvuka u tom istom zraku. Sva strujanja zraka u kojima je Machov broj manji od 0.3 mogu se promatrati kao nestlačiva, jer je spomenuto temperaturno polje u jednadžbi očuvanja energije približno konstantno. Iz tog razloga se u strujanjima vrlo malih Machovih brojeva jednadžba očuvanja energije gotovo nikad ne koristi[1]. Kako je brzina u ovome radu niža od brzine zvuka tj. 100 km/h strujanje će se promatrati kao nestlačivo strujanje.



$$M = \frac{v}{v_{zvuka}} \quad (8)$$

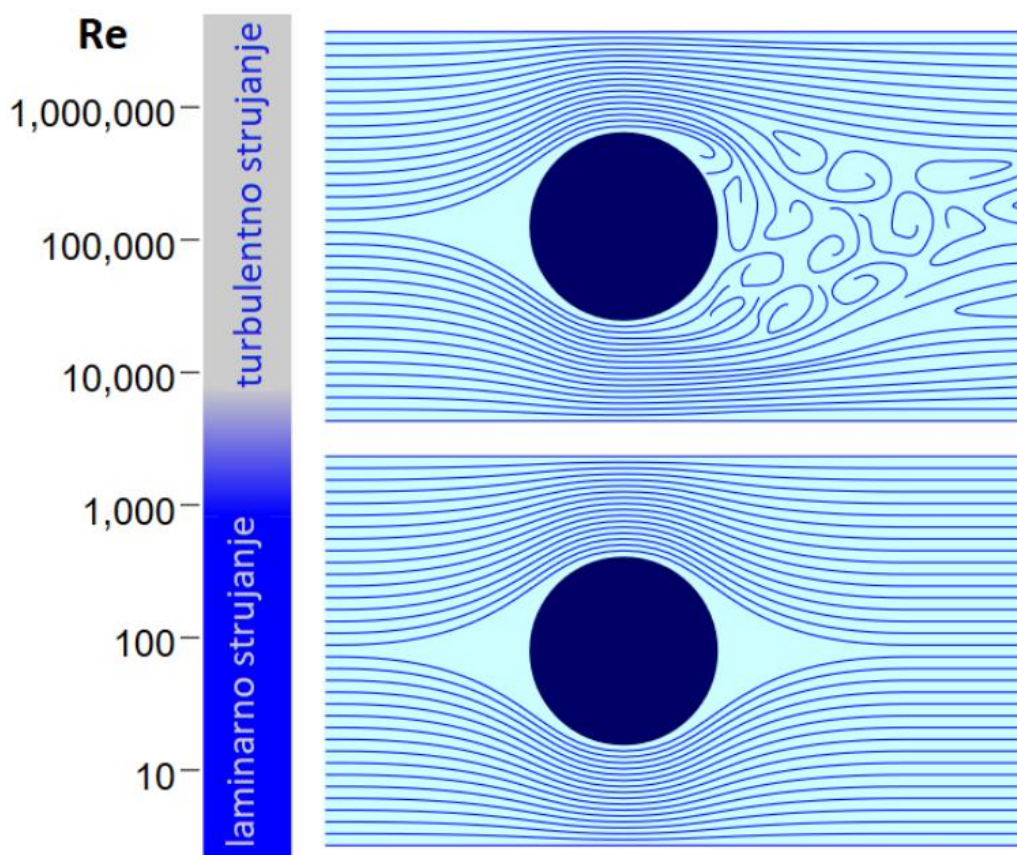
gdje je

$v$  - brzina vozila

$v_{zvuka}$  - brzina zvuka

Gledajući stanje graničnog sloja, strujanje fluida se može podijeliti na laminarno i turbulentno strujanje. Pri manjim brzinama realni fluid struji u slojevima. Strujanje fluida pri kojem se slojevi fluida međusobno ne miješaju nazivamo laminarno. U takvom strujanju nema kretanja okomitog na slojeve fluida, niti bilo kakvog miješanja. Laminarno strujanje je specifično za male brzine i Reynoldsov broj ispod kritične vrijednosti. Uzrok laminarnog strujanja je premoć viskoznih sila u odnosu na inercijske.

Drugi tip strujanja je turbulentan ili vrtložan - strujanje u kojem se čestice gibaju kaotično i vrtložno. Takvo strujanje je vrlo nepravilno i nepredvidivo. Slojevi fluida se miješaju, čestice prelaze iz jednog sloja u drugi i nastaju vrtlozi. Do turbulentnog strujanja dolazi kad inercijske sile prevladavaju nad viskoznim tj. pri Reynoldsovom broju iznad kritične točke[4].



Slika 4. Vrste strujanja fluida[5]

SST k-omega model turbulencije, koji je korišten u ovome radu, može se upotrebljavati kao model niskih Re brojeva turbulencije bez dodatnih funkcija prigušivanja. SST formulacija također prelazi na k-ε ponašanje u slobodnom toku i time izbjegava uobičajeni problem k-ω modela, a to je prevelika osjetljivost na svojstva turbulencije slobodnog toka na ulazu. Autori koji se koriste SST k-ω modelom često ga hvale zbog njegova dobrog ponašanja u nepovoljnim gradijentima tlaka i odvajanju strujanja. SST k-ω model zaista proizvodi nešto veće razine turbulencije u područjima s velikim normalnim deformacijama, poput stagnacijskih područja i područja sa snažnim ubrzanjima. Međutim, ta sklonost puno je manje izražena nego kod normalnog k-ε modela[6].

Reynoldsov broj se računa prema sljedećem izrazu:

$$R_e = \frac{\rho v l}{\eta} \quad (9)$$

gdje je

$\rho$  - gustoća fluida

$l$  - odabrana duljina promatranja

$\eta$  - dinamička viskoznost fluida

Na fluid djeluju dvije međusobno okomite komponente sila otpora  $F_D$  i sila uzgona  $F_L$ . Sila otpora je paralelna komponenta sa smjerom gibanja tijala koje se giba relativnom brzinom  $v$  te ona stvara aerodinamički otpor. Sila uzgona je komponenta koja je okomita na smjer gibanja fluida te ima utjecaj na faktor dinamičkog uzgona koji se računa pomoću sljedećeg izraza:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{v^2}{2} \rho A} \quad (10)$$

gdje je

$F_L$  - sila uzgona

$v$  - brzina nastrojavanja

$\rho$  - gustoća fluida

$A$  - karakteristična površina

Faktor dinamičkog uzgona je bezdimenzijska veličina koja predstavlja silu koja djeluje u okomitom smjeru. Njena vrijednost je npr. kod sportskih automobila negativna što prouzročuje, tzv. aerodinamički potisak. Aerodinamički potisak je sila koja pritišće automobil prema dolje te tako povećava prijanjanje gume o podlogu i omogućava brže prolaskе kroz zavoje.

S druge strane sila otpora ima utjecaja na faktor otpora te je jedan od najbitnijih parametara za opisivanje aerodinamike vozila. Faktor otpora se računa prema sljedećem izrazu:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho v^2}{2} A} \quad (11)$$

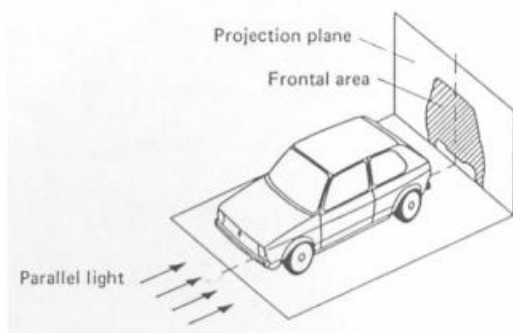
gdje je

$F_D$  - sila otpora

$v$  - brzina nestrujavanja

$A$  - karakteristična površina

Karakteristična površina koja utječe na faktor otpora zraka je ustvari projekcija tijela u smjeru strujanja, ona se uzima kod aerodinamički neoblikovanih tijela tzv. tupih tijela kao što se može vidjeti na Slici 5.



eng. *Parallel light* – paralelni snop svjetlosti

eng. *Projection plane* – ravnina projekcije

eng. *Frontal area* – referentna površina

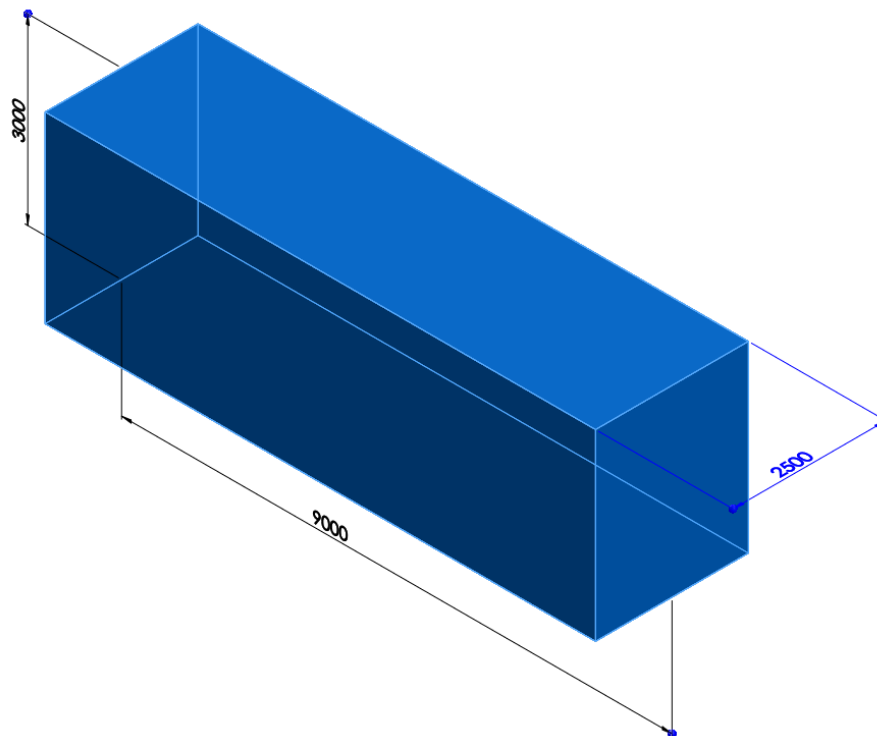
**Slika 5. Karakteristična površina za tupija tijela[1]**

Što je faktor otpora manji to je i manji otpor na vozilo tj. potrebno je manje snage za svladavanje otpora zraka što rezultira manjom potrošnjom goriva.

## 2.1. 2D model

### 2.1.1. Geometrija(Geometry)

Potrebno je izraditi model u programskom paketu CAD. U radu je izabran programski paket Solidworks za izradu modela vozila. Izgled samog modela vozila s dimenzijama prikazan je na Slici 6.



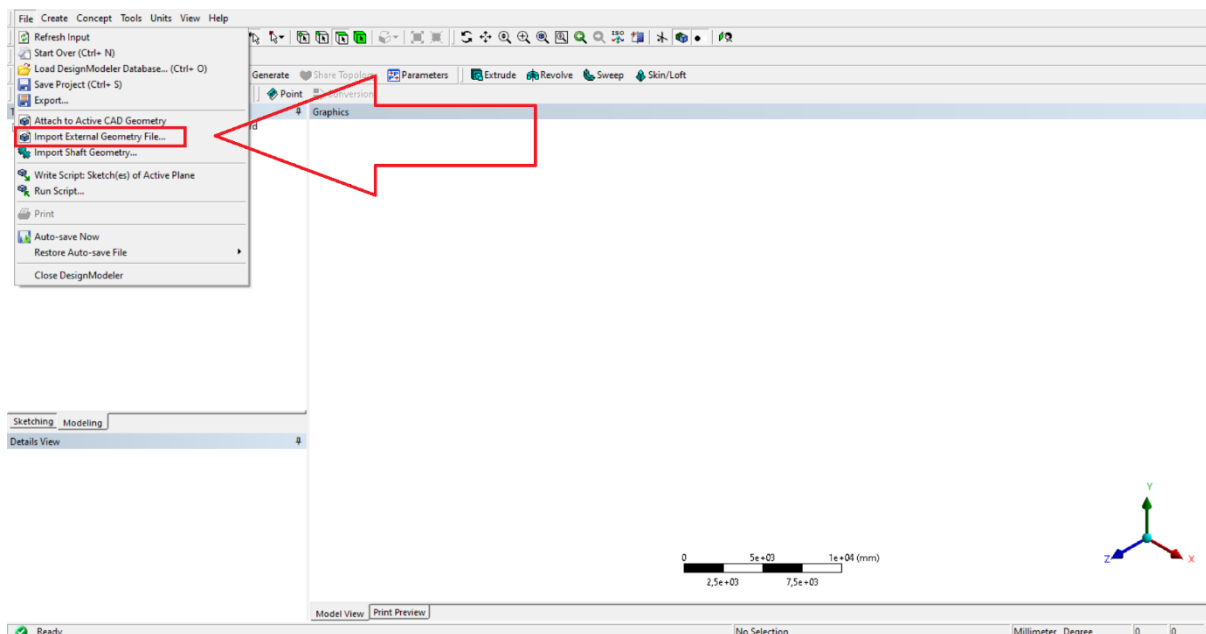
Slika 6. Izgled modela vozila

Dimenzije vozila okvirne su dimenzije autobusa. Nakon izrade modela potrebno je spremiti model u obliku Parasolid datoteke koja ima nastavak *.x\_t* kako bi se mogao učitati u programskom paketu ANSYS. Potrebno je na početnoj stranici u programskom paketu ANSYS *Workbench* iz izbornika *Toolbox-a* opciju *Geometry* kao što je prikazano na Slici 7.



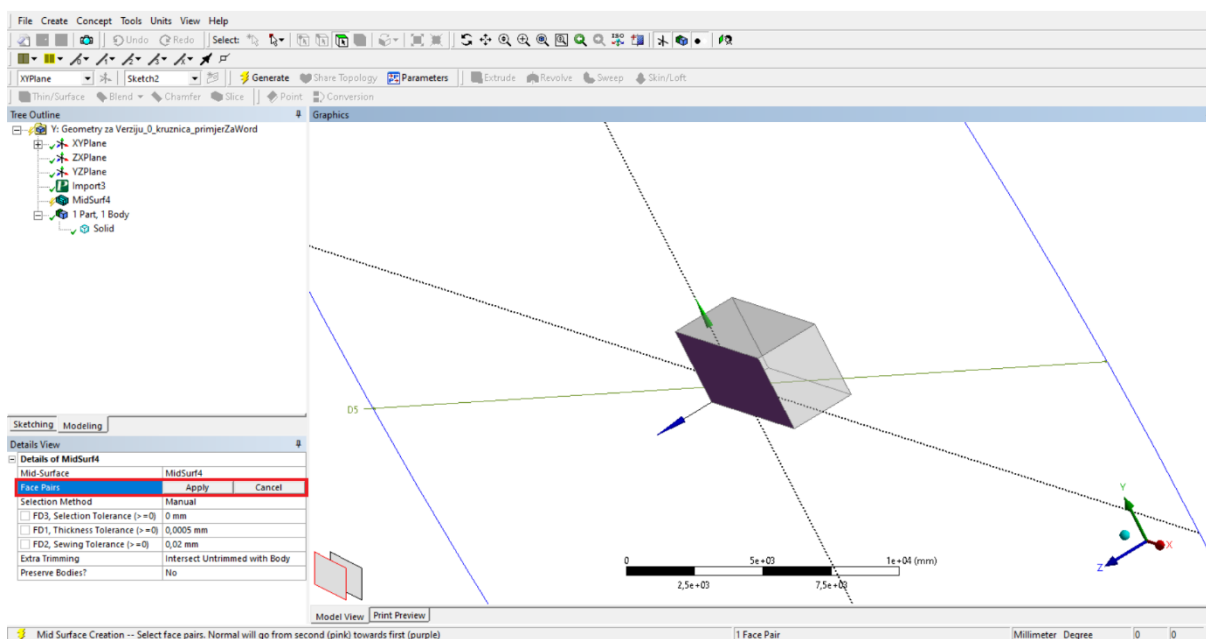
Slika 7. Odabir opcije *Geometry*

Nakon otvaranja opcije *Geometry* potrebno je učitati model. Model se učitava odabirom *Import: External Geometry File* iz padajućeg izbornika *File* kao što je prikazano na Slici 8.



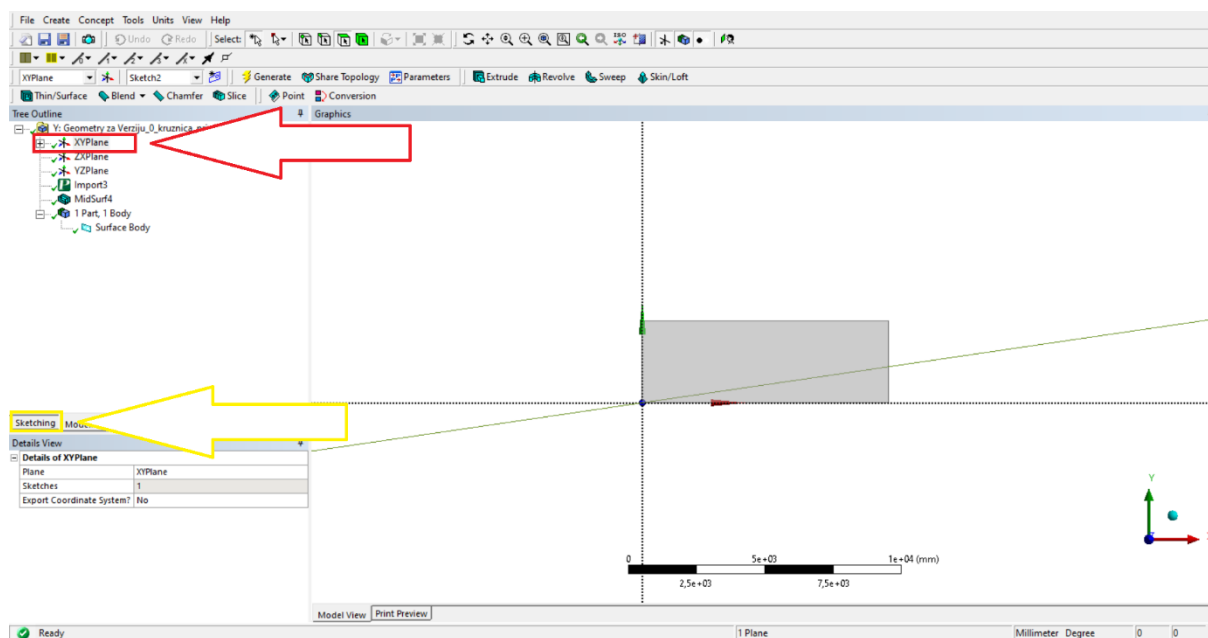
Slika 8. Učitavanje modela

Nakon svake promjene u sustavu potrebno je pritisnuti opciju *Generate* pa tako i nakon učitavanja modela. S obzirom na to da će se simulirati ponašanje modela u 2D, a model je izrađen u 3D potrebno je iz padajućeg izbornika *Tools* izabrati opciju *Mid-Surface*. Potrebno je izabrati dvije bočne plohe modela kao što je prikazano na Slici 9. te potvrditi pritiskom *Apply* u prozorčiću dolje lijevo pod opcijom *Face Pairs* (uokviren crvenom bojom na Slici 9.).



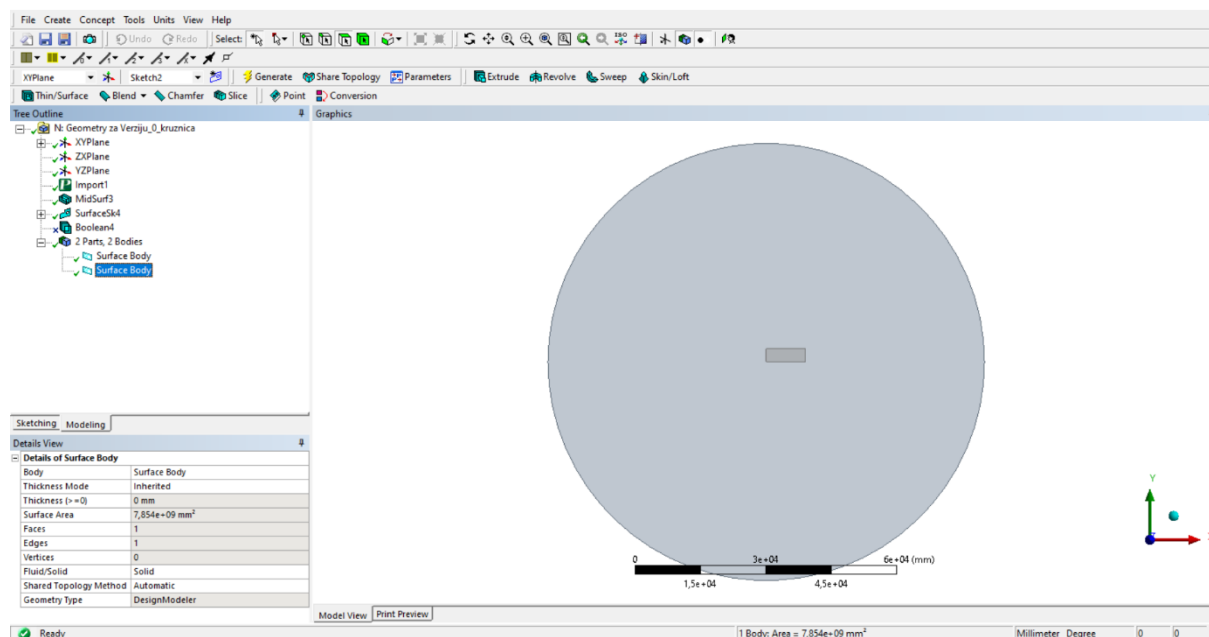
Slika 9. Opcija *Mid-Surface*

Sljedeći je korak izraditi okolišni prostor u kojem se vozilo nalazi. Zbog toga što se vozilo nalazi u X-Y ravnini, i okolišni će se prostor nalaziti također u istoj ravnini. Potrebno je odabrati *XYPlane* u stablu modela (crveno uokvireno na Slici 10.) te izraditi pod opcijom *Sketching* (žuto uokvireno na Slici 10.) kružnicu dovoljno veliku kako njezini parametri ne bi utjecali na krajnji rezultat.



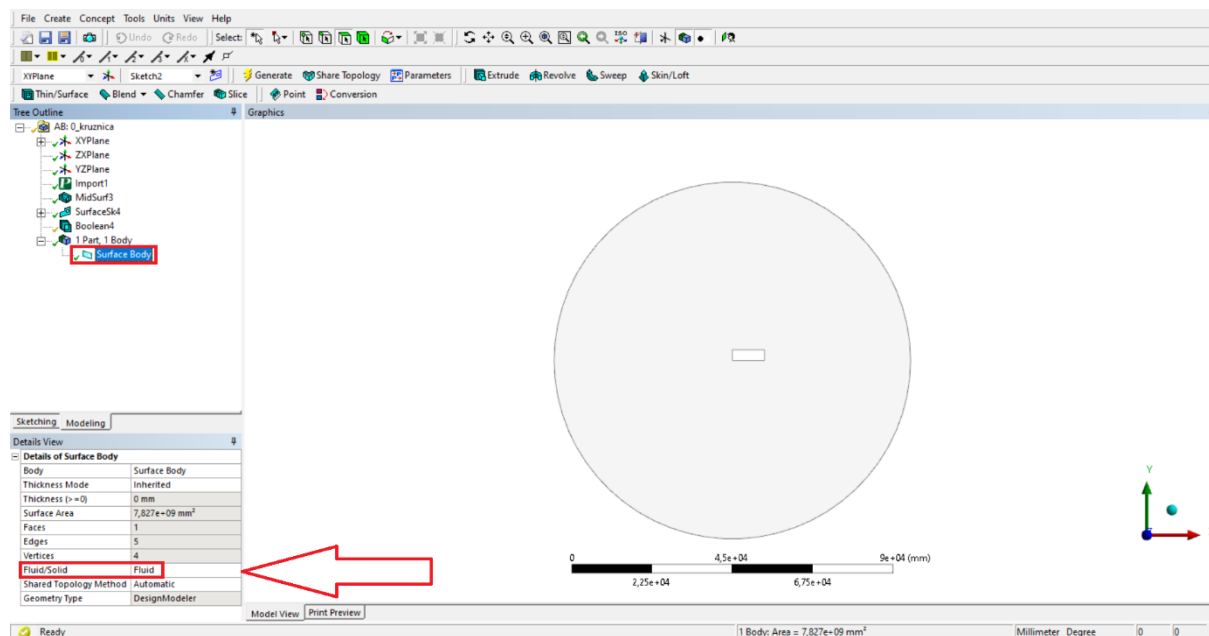
**Slika 10. Proces izrade okolišnog prostora**

Dimenzije i sam izgled kružnice vidljiv je na Slici 11. Nakon definiranja dimenzija i položaja u odnosu na model vozila potrebno je iz padajućeg izbornika *Concept* odabrati opciju *Surfaces From Sketches*, kako bi se napravila površina od definiranog oblika. Sljedeći je korak označiti jedan brid definiranog oblika i potvrditi ga naredbom *Apply* pod opcijom *Base Objects*. Također je potrebno pod opcijom *Operation* iz padajućeg izbornika izabrati *Add Frozen* kako bi se okoliš fiksirao.



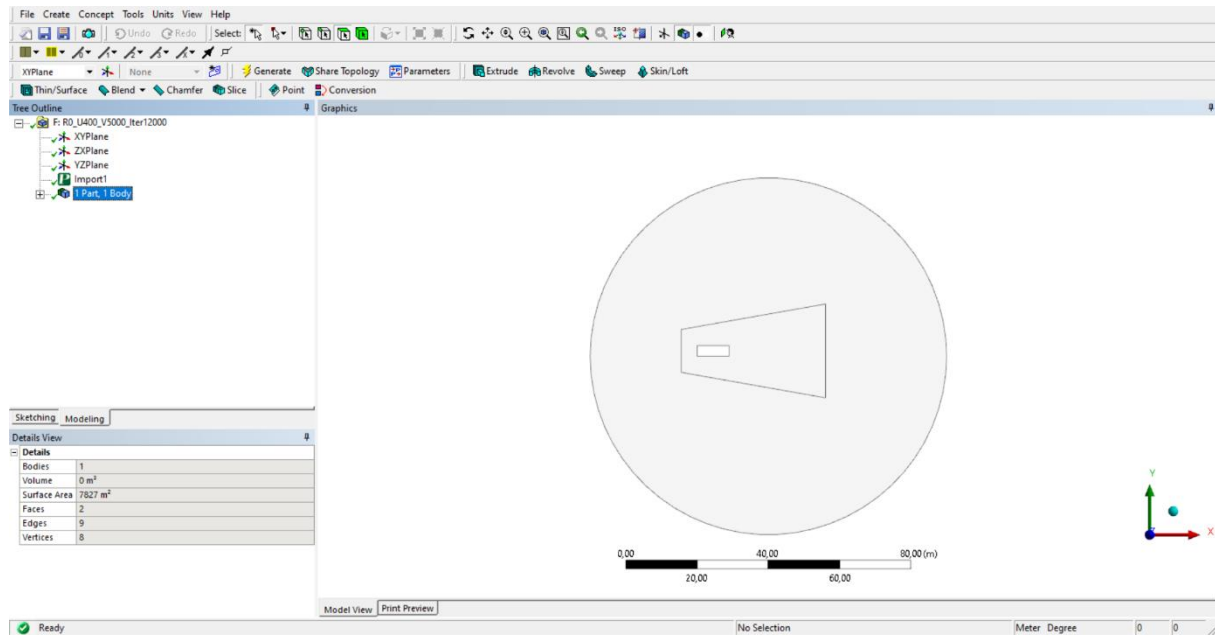
Slika 11. Izgled okolišnog prostora

Kako bi se okoliš prilagodio izgledu vozila, potrebno je iz padajućeg izbornika *Create* odabrati opciju *Boolean*. Potom je potrebno iz izbornika, koji se otvorio u donjem lijevom kutu, izabrati pod stavkom *Operation* opciju *Subtract* kako bi se iz okolišnog prostora (*Tool Bodies*) oduzela površina vozila (*Target Bodies*) kao što se može vidjeti na Slici 12. Također je potrebno odabrati *Surface Body* (označeno crveno na Slici 12.) te iz izbornika izabrati *Fluid* pod opcijom *Fluid/Solid* kako bi prostor oko autobusa bio fluid, a ne kruti element, kako i jest u stvarnosti.

Slika 12. Izgled nakon opcije *Boolean*

Kako bi se dobile što preciznije vrijednosti faktora otpora zraka, potrebno je napraviti oko konture vozila trapez kao što je vidljivo na Slici 13. Trapez se radi tako što se izabere *xy plane*

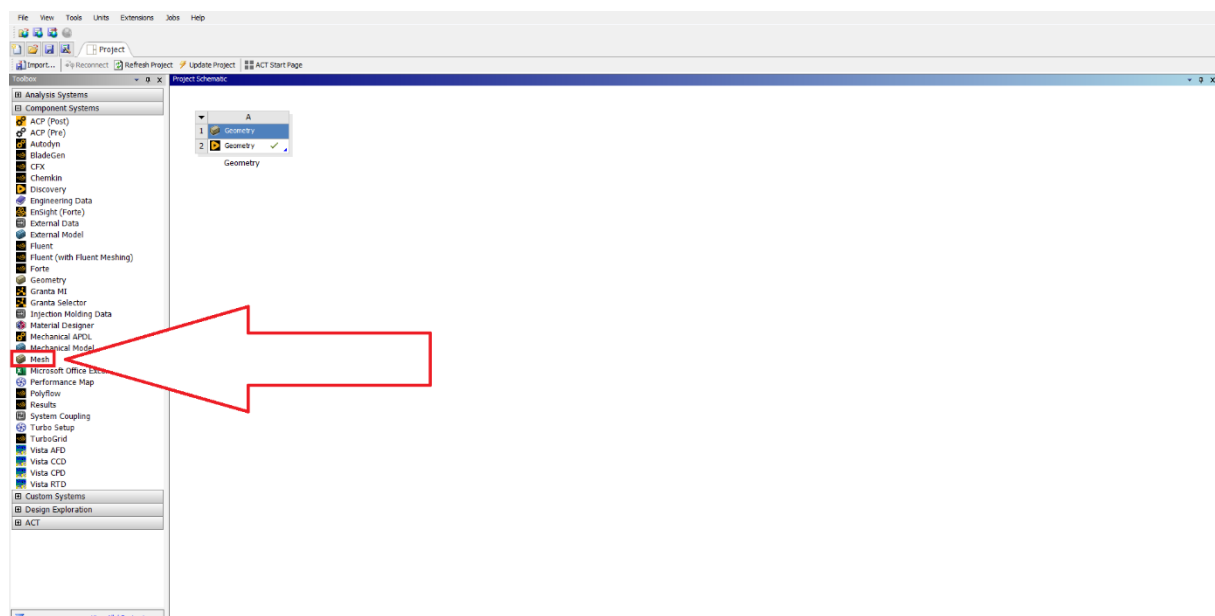
te novi *Sketch* u kojem se uz pomoć linija nacрта željeni oblik. Konačni izgled trapeza prikazan je na Slici 13.



Slika 13. Konačni izgled

### 2.1.2. Gustoća mreže (Mesh)

Nakon definiranja geometrije potrebno je u ANSYS *Workbenchu* odabrati iz *Toolboxa* opciju *Mesh* kao što je prikazano na Slici 14.

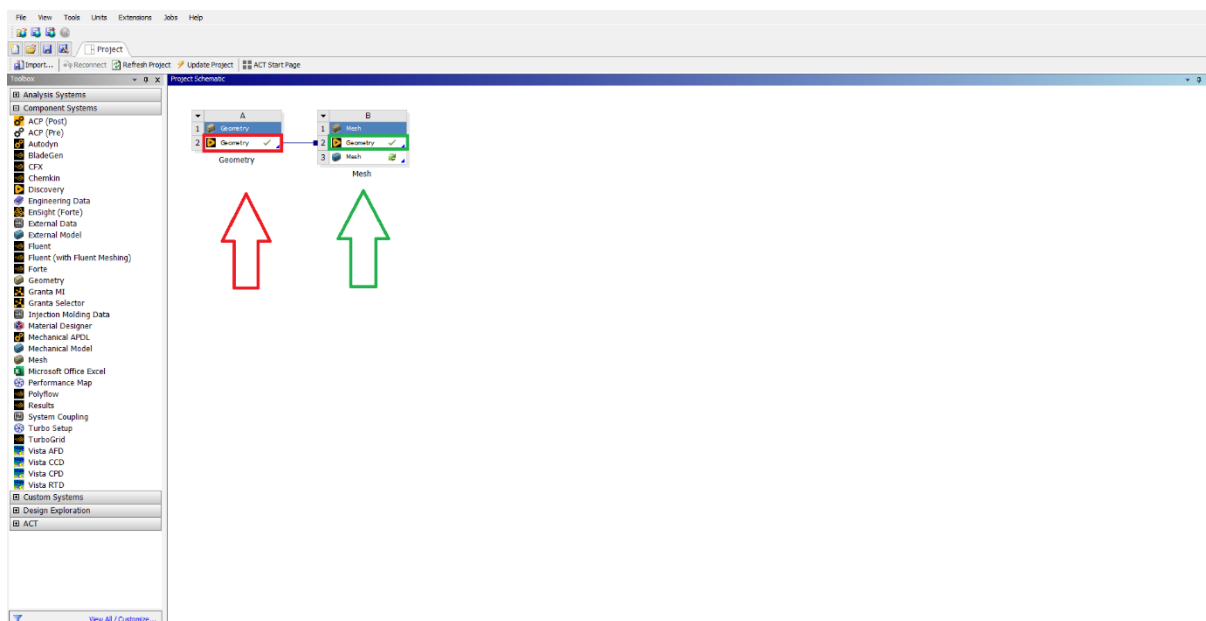


Slika 14. Opcija *Mesh*

Kako bi simulacija bila što preciznija, vrlo je važna opcija *Mesh*. Samo meshiranje proces je pretvaranja amorfni oblika u elemente koji su prepoznatljivijeg volumena. Nepravilni oblici

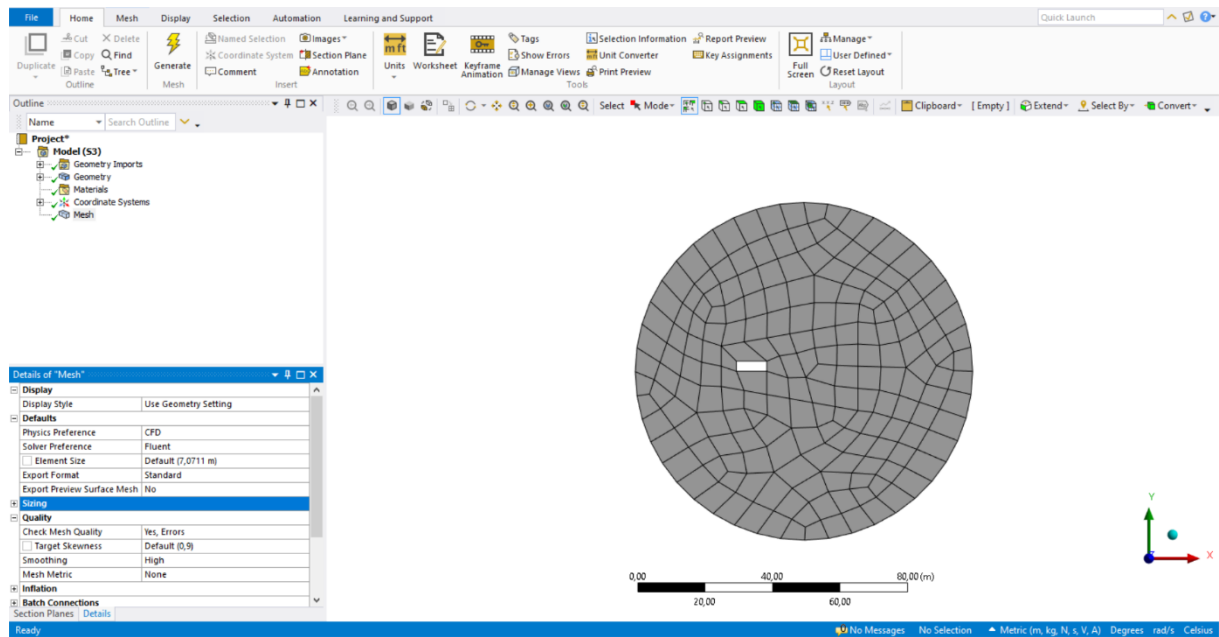


teški su za rješavanje dok, tipični oblici poput kvadrata i trokuta olakšavaju proces. Niz elemenata stvara mrežu, a svaki element ima čvorove, tj. koordinate u prostoru koji se mogu mijenjati ovisno o vrsti elementa, a svaki element simbolizira geometriju oblika. Također je potrebno povezati opcije *Geometry* i *Mesh* kako bi sustav bio definiran. Povezivanje se obavlja povlačenjem ikone *Geometry* (crveno označeno na Slici 15.) iz prozorčića A prema ikoni *Geometry* (zeleno označeno na Slici 15.) iz prozorčića B.

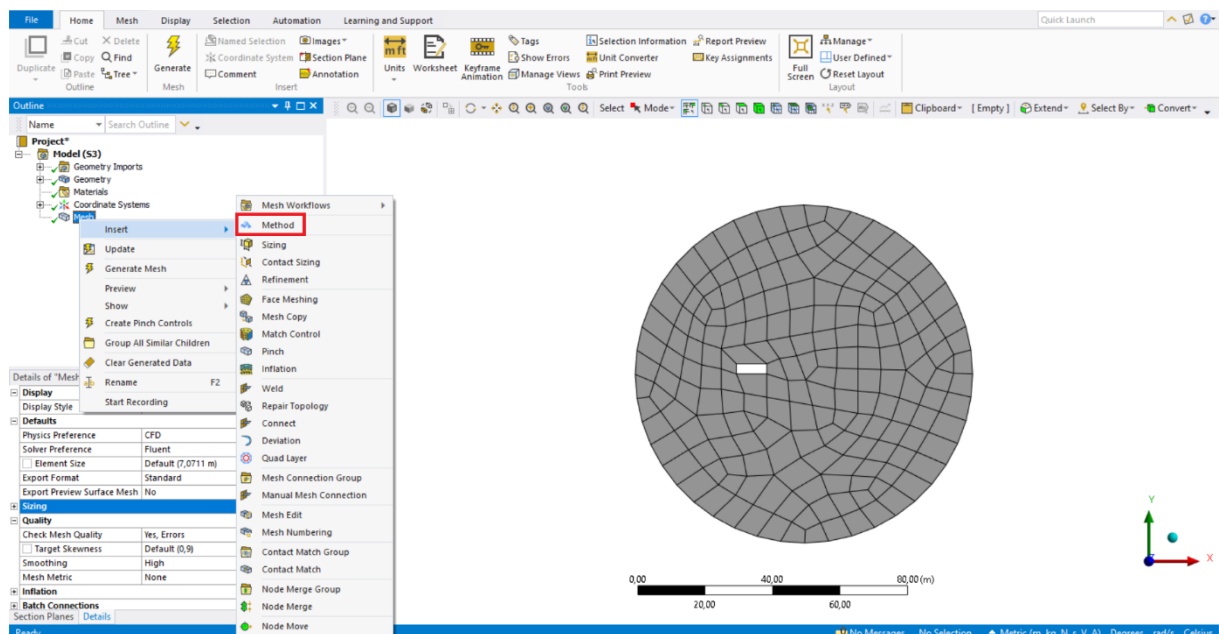


Slika 15. Povezivanje *Geometrije*

Pokretanjem prozora *Mesh* potrebno je prilagoditi ulazne parametre simulacije. Kako je riječ o CFD analizi, potrebno je pod stavkom *Physics Preference*, u donjem lijevom prozoru, odabrati iz padajućeg izbornika opciju *CFD*. Pod stavkom *Sizing* -> *Use Adaptive Sizing* potrebno je odabrati iz padajućeg izbornika opciju *Yes* te kako bi se poboljšao prijelaz s elementa na element, potrebno je podesiti koliko će uglađen biti prijelaz između elemenata, a to se radi tako što se pod stavkom *Quality* -> *Smoothing* odabere iz padajućeg izbornika *High* kako bi prijelaz bio što bolji. Nakon generiranja model izgleda kao na Slici 16.

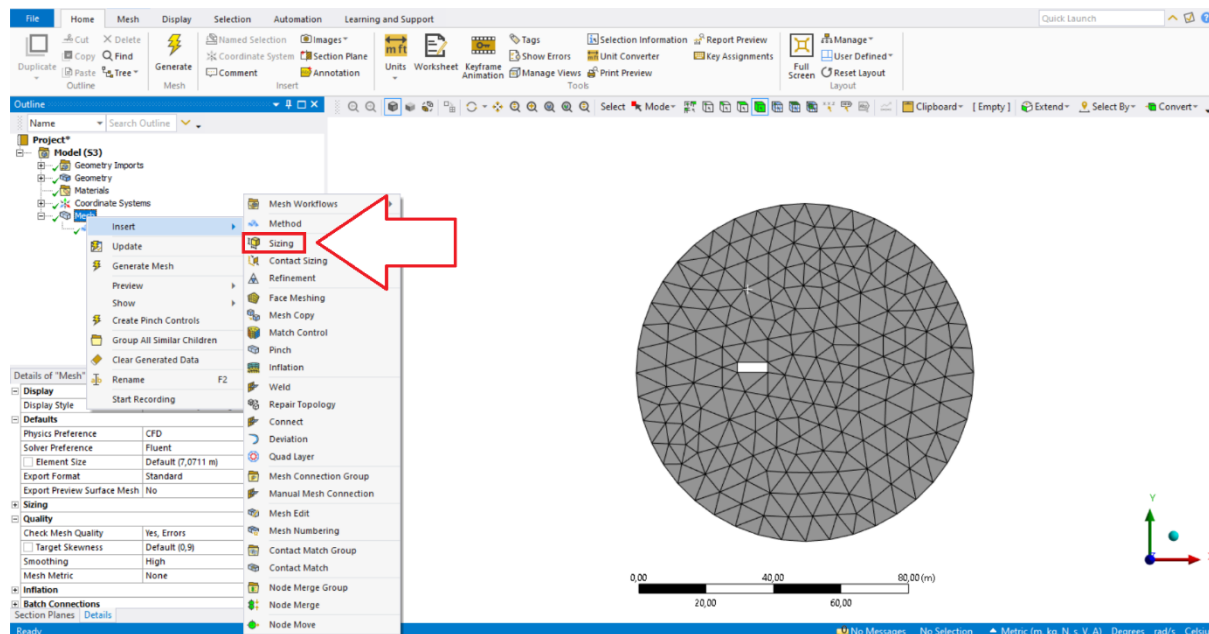
Slika 16. Izgled modela nakon početnog *Mesha*

Kako bi se smanjilo vrijeme simulacije i kako simulacija nije vrlo složena, dovoljni su trokutasti elementi s pomoću kojih će se izraditi *Mesh*. Za izbor metode *Mesha* potrebno je izabrati *Method* kao što je prikazano na Slici 17. Potom će se otvoriti novi prozor u donjem lijevom kutu u kojem je potrebno u opciji *Geometry* kliknuti na model. Pod stavkom *Method* potrebno je iz padajućeg izbornika odabrati *Triangles* te generirati sustav.

Slika 17. Izbor metode *Mesha*

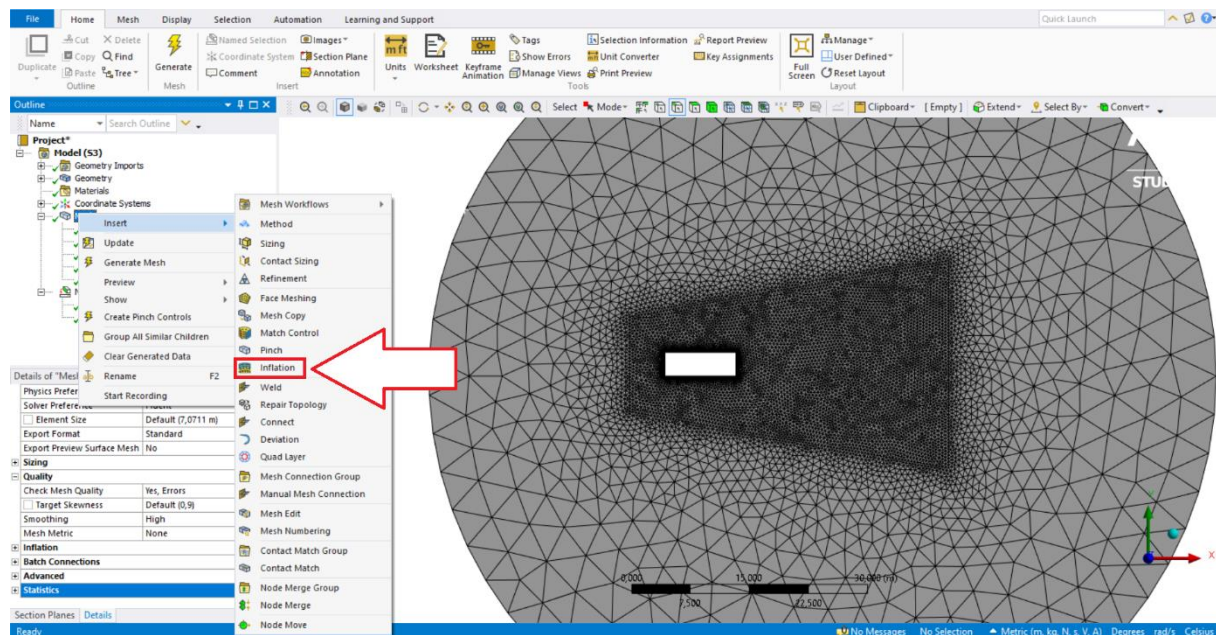
Potrebno je definirati koje sve linije predstavljaju vozilo, a koje okoliš. Dodjeljivanje naziva, tj. definiranje pojedinih linija obavlja se tako što se odabere linija i opcijom *Named Selection*

(desni klik miša na liniju) dodijeli naziv. Nakon definiranja potrebno je generirati model te desnim klikom na *Mesh* u stablu funkcija izabrati opciju *Sizing* kao što je prikazano na slici 18.



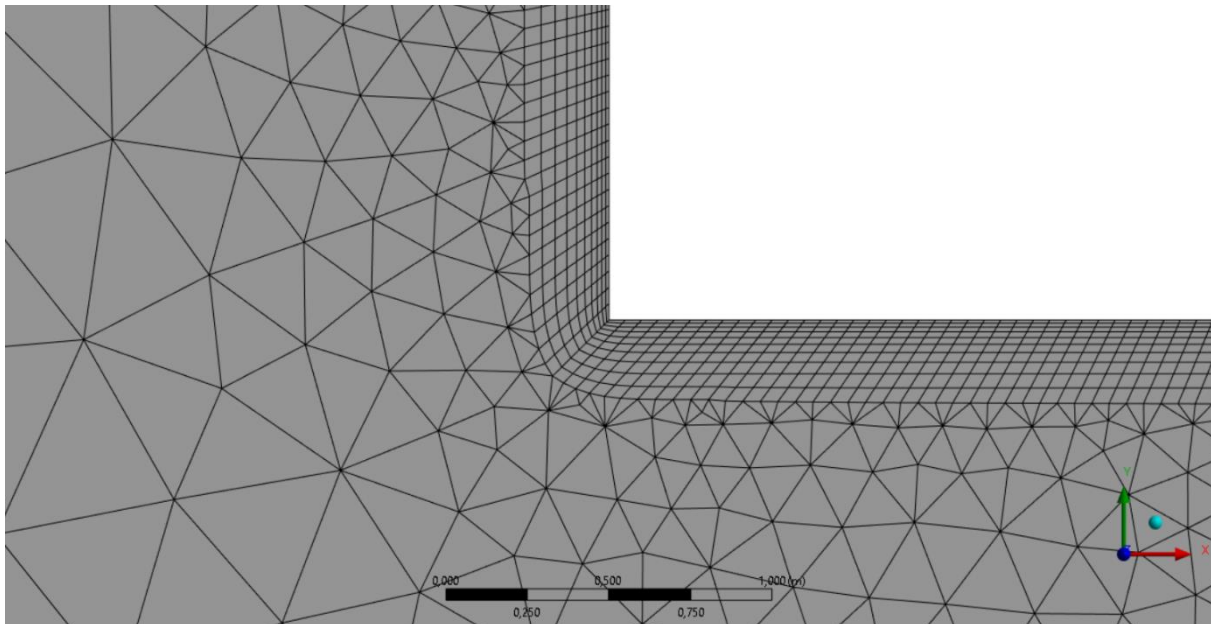
Slika 18. Opcija *Sizing*

Kako bi se dobile što točnije vrijednosti simulacije, potrebno je progustiti mrežu oko samog vozila, a to se radi opcijom *Sizing*. Nakon odabira opcije *Sizing* potrebno je u novootvorenom prozoru u donjem lijevom kutu izabrati pod stavkom *Scoping Method* -> *Named Selection* kako bi se mogla izabrati definirana kontura vozila. Definirana kontura vozila izabire se pod stavkom *Named Selection* -> *Carbody* te je također potrebno definirati koliko će gusta biti mreža. U ovome radu izabrana je gustoća od 0,1 m koju je potrebno upisati pod stavku *Element Size*. Ako se želi da program strogo prati definirane vrijednosti, kao što je slučaj u ovome radu, onda se pod stavkom *Behavior* odabire opcija *hard*. Također je potrebno definirati gustoću mreže unutar trapeza na način da se izabire opcija *Sizing*. Potom se otvara prozor te se u donjem lijevom kutu pod opcijom *Geometry* izabire površina unutar trapeza, a za veličinu elemenata izabire se 0,4 m. Kako gustoća mreže nije toliko bitna, što se više udaljavamo od konture vozila, tako će i mreža biti sve rjeđa. Takvo definiranje iziskuje ponavljanje identičnog postupka kao i za konturu vozila, različito je jedino to da se u *Named Selection* izabire *Inlet* i što je vrijednost gustoće 9 m pod stavkom *Element Size*. Kako bi se profinio *Mesh*, tj. kako bi se dodatno progustila mreža u području od interesa, potrebno je uključiti opciju *Inflation* koja je označena crvenom bojom na Slici 19.



Slika 19. Uključivanje opcije *Inflation*

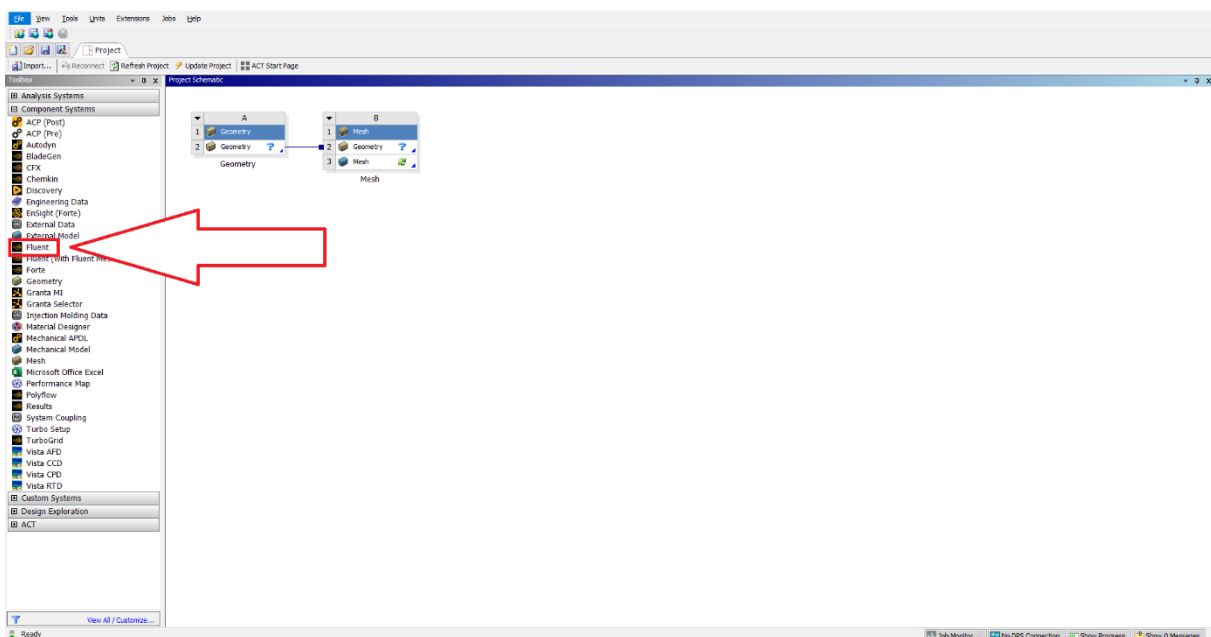
Nakon odabira opcije *Inflation* otvara se prozorčić u donjem lijevom kutu te je potrebno definirati na koju će se geometriju odnositi opcija. Klikom na prozorčić pored stavke *Geometry* nudi se mogućnost izbora geometrije te se tako izabire prostor okoliša (prostor unutar kružnice i izvan konture vozila). Zbog toga što je prostor konture vozila najbitniji, potrebno je pod stavkom *Boundary Scoping Method* izabrati *Named Selection*, a pod stavkom *Boundary* -> *Carbody* te u stavci ispod *Inflation Option* izabrati *First Layer Thickness*. Izborom opcije *First Layer Thickness* potrebno je definirati početnu veličinu elementa (*First Layer Height*) najbližu konturi vozila. Izabrana je vrijednost od 0,01 metra te da će biti deset slojeva pod stavkom *Maximum Layers*. Izgled mreže nakon korištenja opcije *Inflation* može se vidjeti na Slici 20.



Slika 20. Izgled mreže nakon opcije *Inflation*

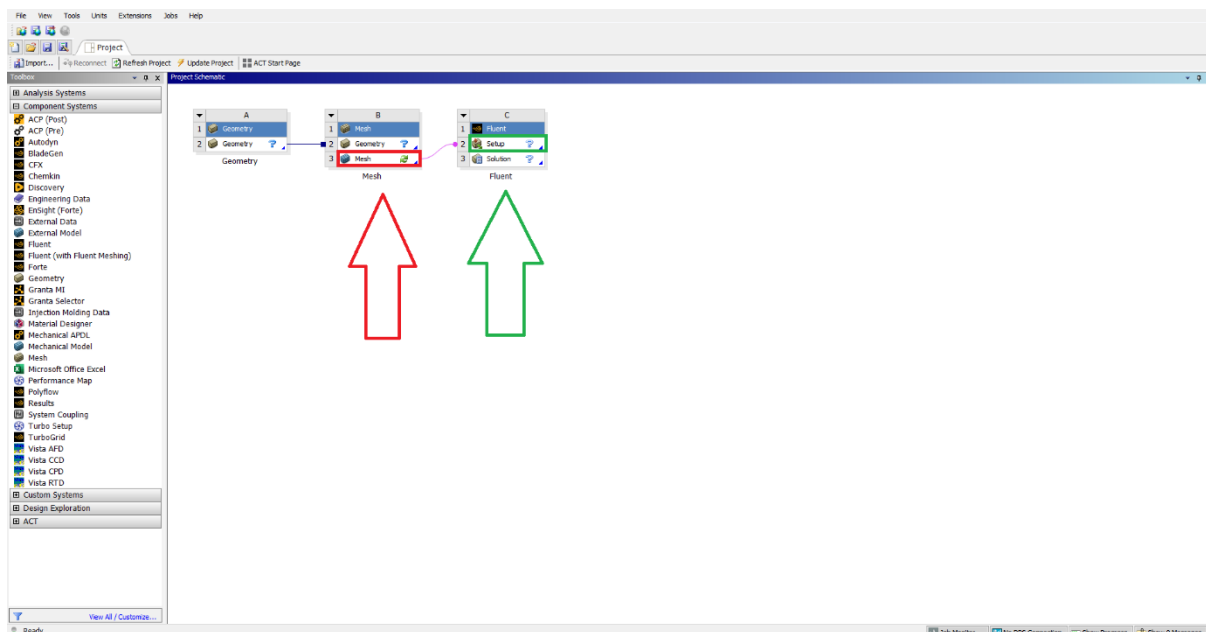
### 2.1.3. Postav

Nakon završetka procesa meshiranja potrebno je u ANSYS *Workbenchu* odabrati iz *Toolboxa* opciju *Fluent* kao što je prikazano na Slici 21.



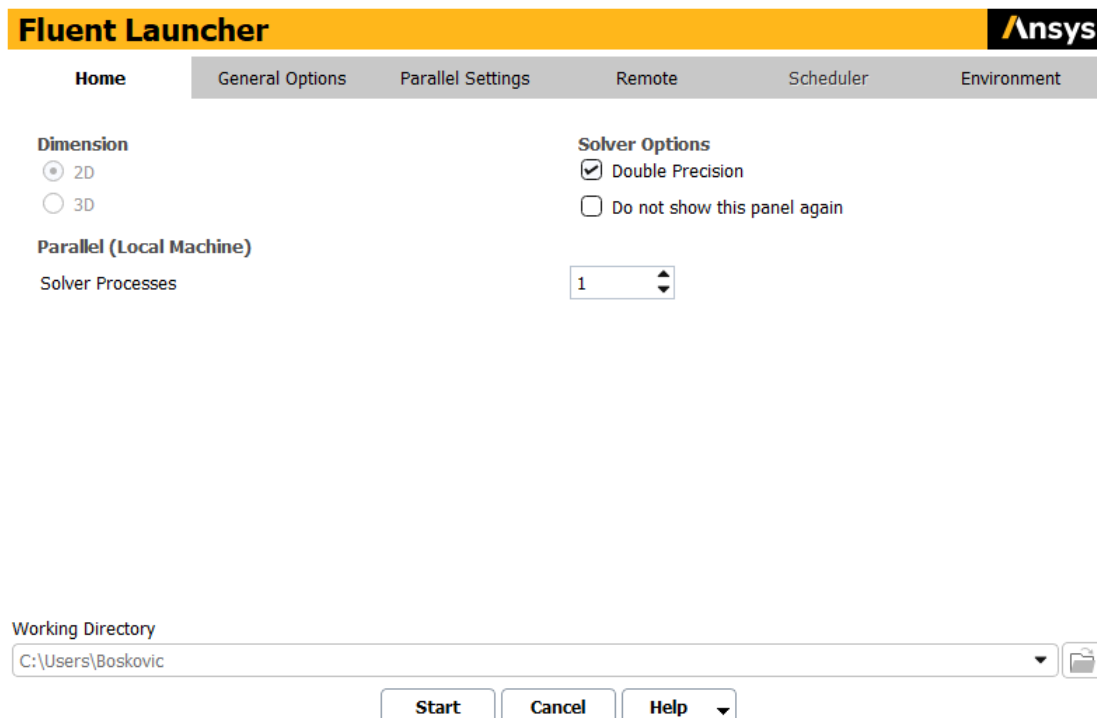
Slika 21. Opcija *Fluent*

Opcija *Fluent* simulira dinamiku fluida uz prethodno definirani *Mesh* te prikazuje krajnje rezultate simulacije. Potrebno je povezati *Mesh* i *Setup* tj. kliknuti na opciju *Mesh* (crveno označeno na Slici 22.) i povući ga na *Setup* (zeleno označeno na Slici 22.) kako bi se povezale opcije. Prije samog pokretanja opcije *Setup* potrebno je desnim klikom miša na opciju *Mesh* ažurirati program.

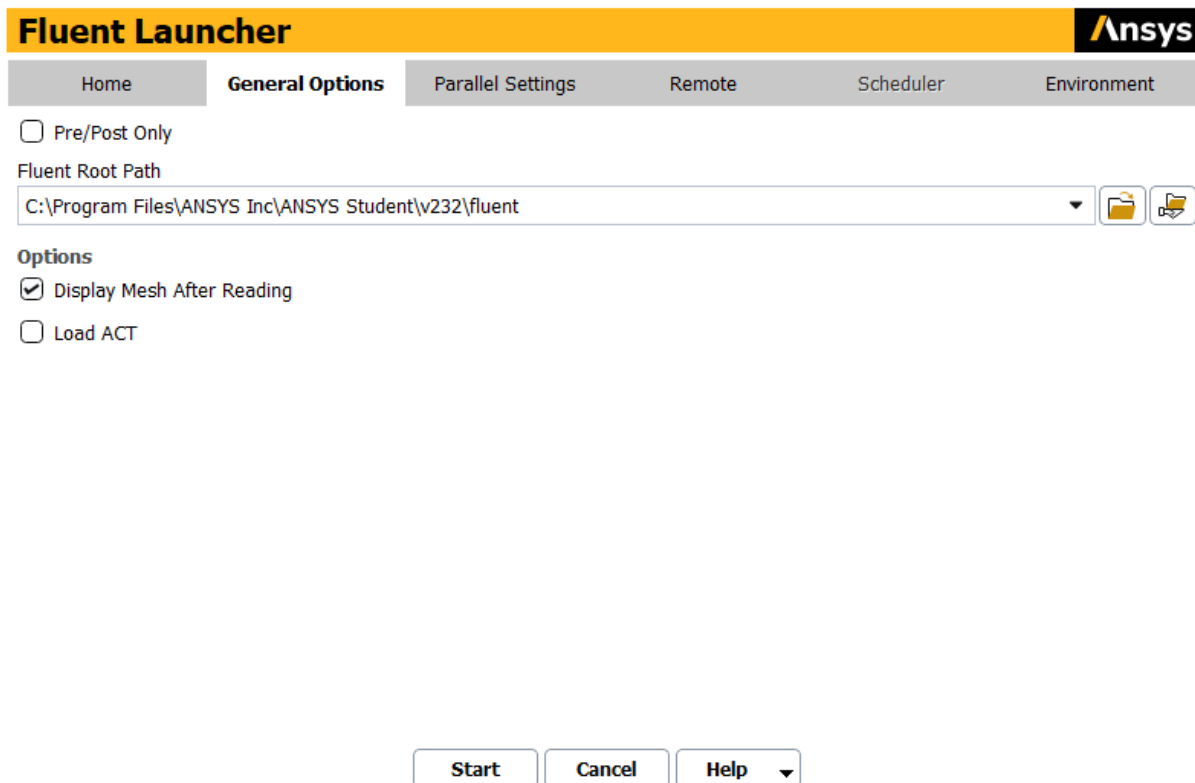


Slika 22. Povezivanje opcija *Mesh* i *Fluent*

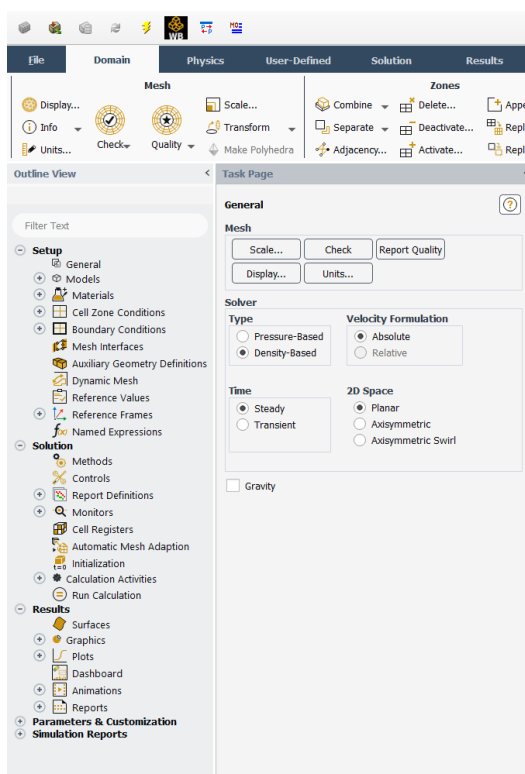
Nakon pritiska na opciju *Setup* pojavljuje se skočni prozor u kojem je potrebno definirati početne pojedinosti simulacije. Dvije vrijednosti koje treba promijeniti, tj. dodati u odnosu na tvornički definirane pojedinosti jesu *Double Precision* pod stavkom *Home* (prikazano na Slici 23.) te *Display Mesh After Reading* pod stavkom *General Options* (prikazano na Slici 24.). Također je potrebno pripaziti na izbor broja jezgri računalna korisnika kako simulacija ne bi preopteretila računalo te „srušila“ simulaciju.



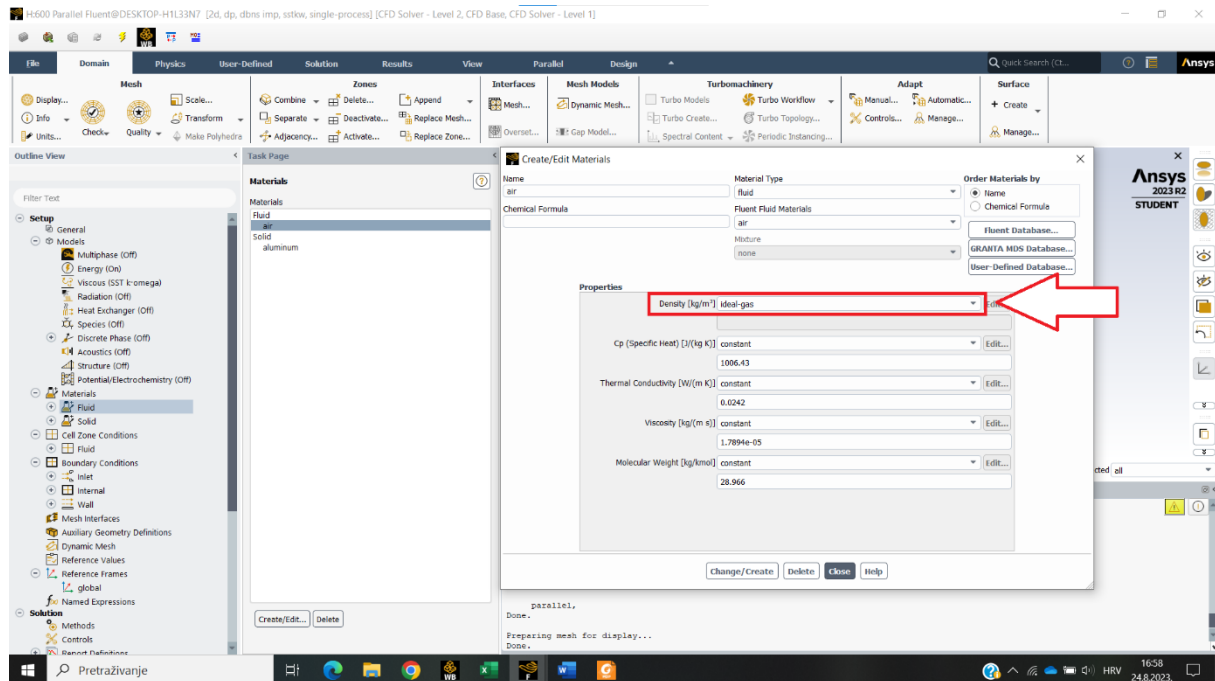
Slika 23. Skočni prozor opcije *Fluent*

Slika 24. Skočni prozor opcije *Fluent2*

Nakon otvaranja opcije *Fluent* s lijeve je strane smještena alatna traka, kao što se može vidjeti na Slici 25. koja je podjeljena na pet kategorija: *Setup*, *Solution*, *Results*, *Parameters & Customization*, *Simulation Reports*.

Slika 25. Alatna traka opcije *Fluent*

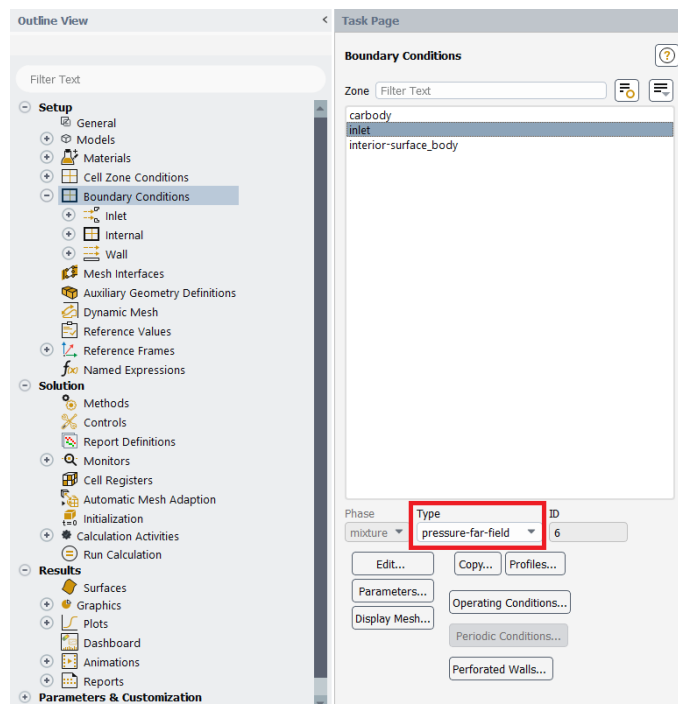
Najbitnija je kategorija *Setup* u kojoj se određuje vrsta fluida, brzina fluida, granični uvjeti... U stavci *Models* potrebno je definirati pod stavkom *Viscous* model SST k-omega. Sljedeći je korak definirati fluid koji će strujati oko vozila, a to se radi tako što se pod opcijom *Materials* -> *Fluid* -> *air* izabere pod stavkom *Density* (crveno uokvireno na Slici 26.) iz padajućeg izbornika *ideal-gas*.



Slika 26. Izbor fluida

Nakon izbora fluida potrebno je definirati rubne uvjete modela koji se nalaze pod stavkom *Boundary Conditions*. Kontura vozila promatrat će se kao zid, tj. *Wall*, dok će se *Inlet*, tj. kružnica koja simbolizira krajnji rub okoliša definirati kao *Pressure Far Field* pod stavkom *Type* (crveno uokvireno na Slici 27.).



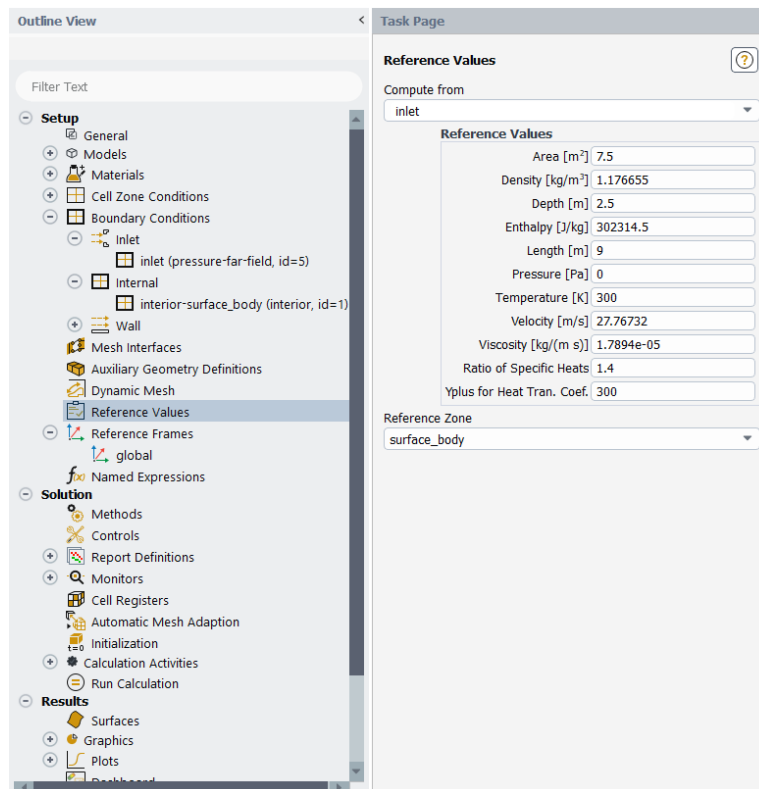


Slika 27. Definiranje rubnih uvjeta

Potom se otvara skočni prozor u kojem je potrebno unijeti vrijednost brzine strujanja fluida. U ovome radu uzeta je brzina nastrojavanja od 0,08 maha što je približno 100 km/h te da fluid nastrojava samo u smjeru x (oznaka „1“ u *X-Component Of Flow Direction*) kao što je prikazano na Slici 28. Pod stavkom *Thermal* definirana je okolišna temperatura od 300 K.

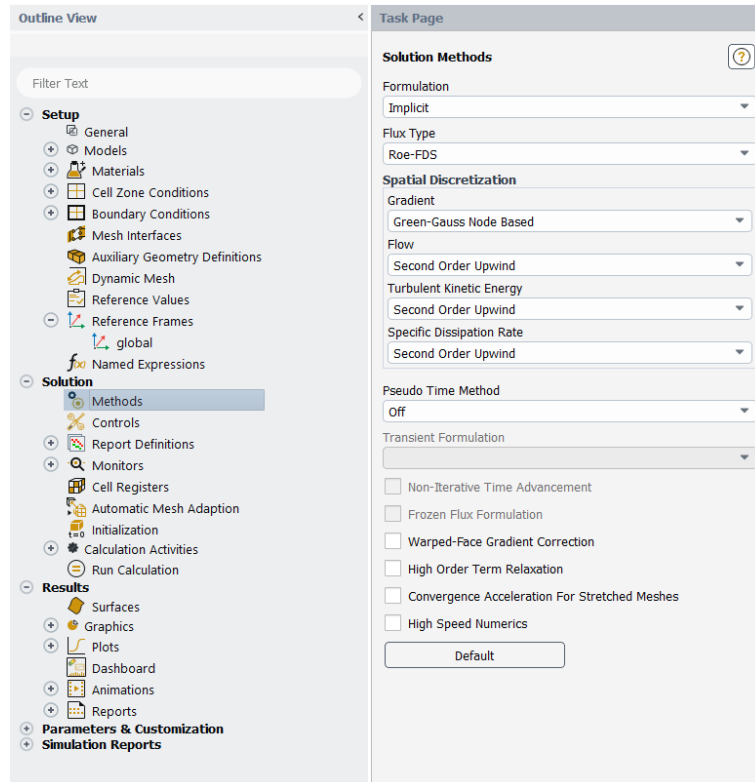
Slika 28. Prozor *Pressure Far Fielda*

Također je potrebno definirati referentne vrijednosti vozila pod stavkom *Reference Values*. Nakon otvaranja stavke pojavljuje se prozorčić, kao na Slici 29., u kojem je definirana čeona površina vozila, tj. poprečni presjek vozila (*Area*), koja iznosi  $7,5 \text{ m}^2$ , širina vozila (*Depth*) koja iznosi 2,5 metra, entalpija  $302\,314,5 \text{ J/kg}$ , duljina (*Length*) iznosi 9 m, a brzina (*Velocity*)  $27,76732 \text{ m/s}$  što je približno  $100 \text{ km/h}$ .

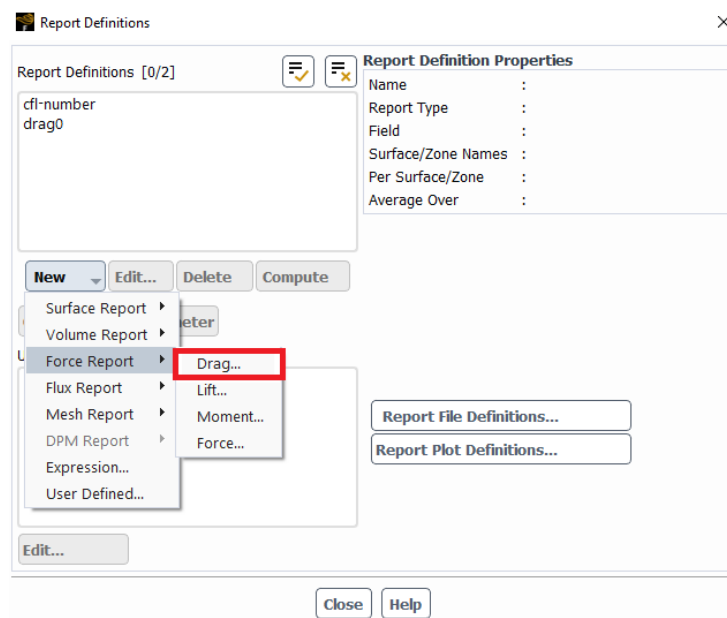


Slika 29. Opcija *Reference Values*

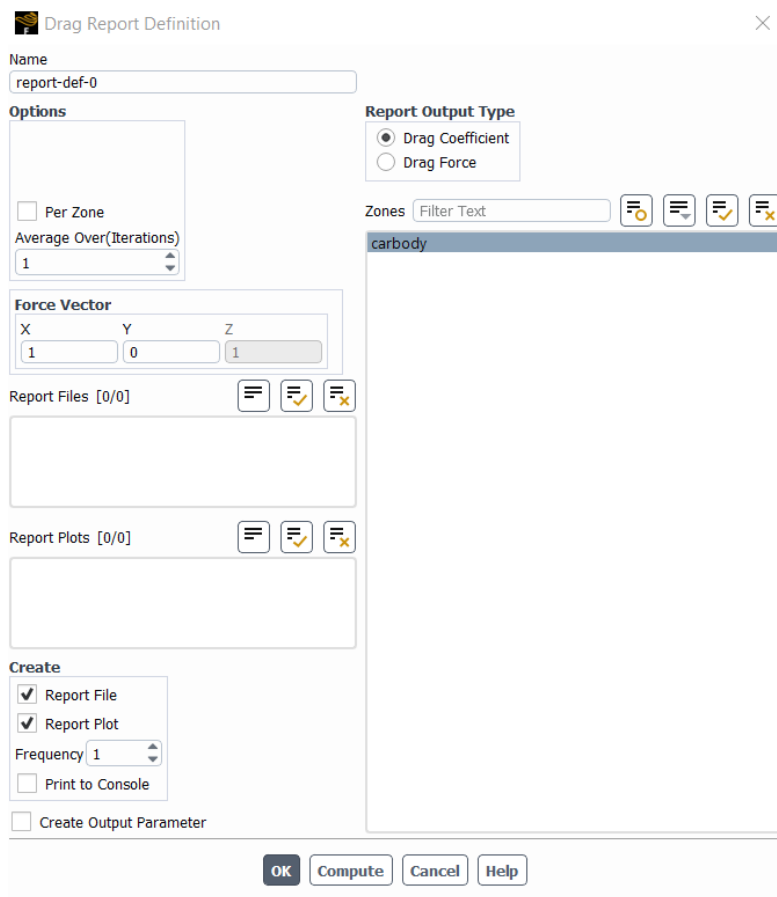
Pod stavkom *Methods* potrebno je izabrati opciju *Implicit* koja upotrebljava informacije iz susjednog elementa u trenutnom vremenskom koraku te tako pronalazi rješenje. Pod stavkom *Prostorne diskretizacije (Spatial Discretization)* potrebno je izabrati pod *Gradient* -> *Green-Gauss Node Based*, a pod *Flow, Turbulent Kinetic Energy* i *Specific Dissipation Rate* -> *Second Order Upwind* kao što je prikazano na Slici 30.

Slika 30. Stavka *Solution Methods*

Kako bi se mogao očitati dijagram faktora otpora, potrebno je to u sustavu i definirati. Potrebno je pod stavkom *Report Definitions* napraviti novi dijagram, a on se radi na ovaj način: *New* -> *Force Report* -> *Drag* kao što je prikazano na Slici 31.

Slika 31. Opcija *Drag Coefficient*

Nakon izbora opcije *Drag* otvara se novi prozor kao što je prikazano na Slici 32. u kojem se odabire opcija *Drag Coefficient* ili *Drag Force* u ovisnosti kakav se dijagram želi dobiti. U ovome radu rađena su oba kao što će se moći vidjeti u sljedećem poglavlju.



**Slika 32. Izbor varijabli za *Drag Coefficient***

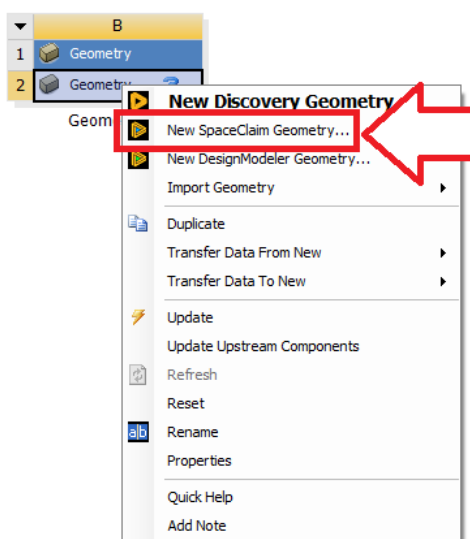
Na kraju prije svakog pokretanja simulacije potrebno je pokrenuti inicijalizaciju (*Initialization*) koja dodjeljuje svakoj računalnoj ćeliji vrijednost koja je početna pretpostavka za daljnji tijek simulacije. Inicijalizacija je bitan korak u simulaciji računalne dinamike (*CFD*) jer što je početna pretpostavka bliža konačnom rješenju, to je brža konvergencija [7]. Također je potrebno definirati broj iteracija prije samog pokretanja simulacije pod stavkom *Run Calculation*.

## 2.2. 3D model

U radu je također obrađen slučaj kada se promatra ponašanje autobusa u prostoru. Sličan postupak provodi se za 3D kao i za 2D uz minimalne razlike koje će biti navedene po podnaslovima.

### 2.2.1. Geometrija (Geometry)

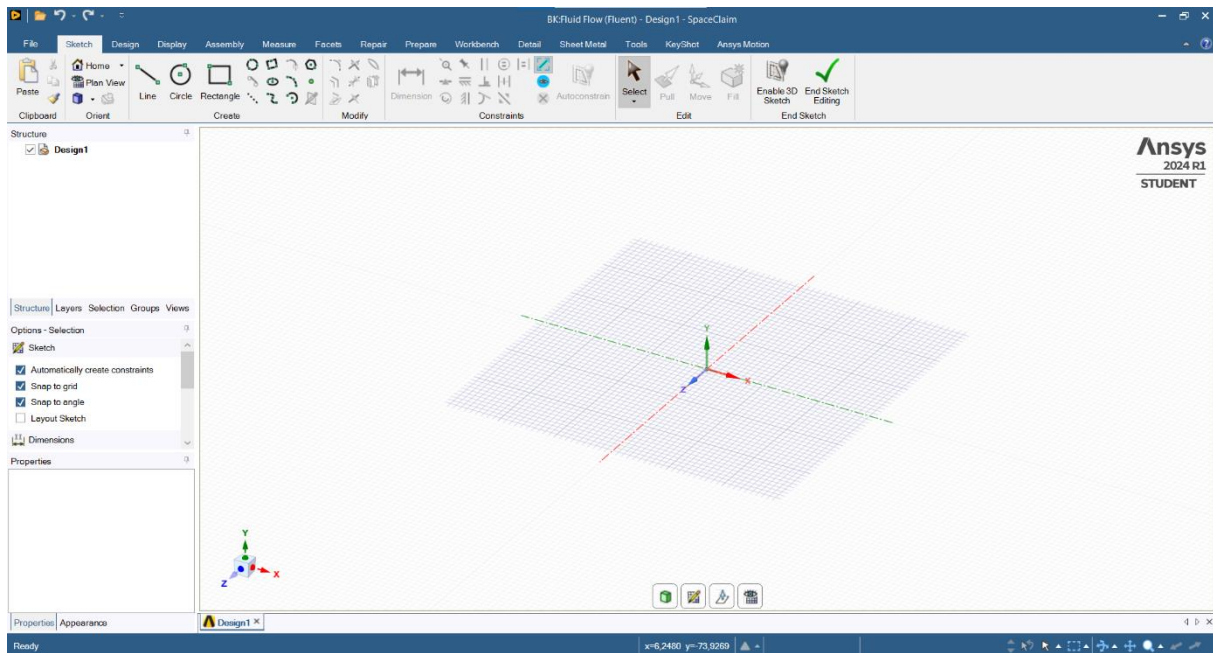
Proces započinje tako što se desnim klikom miša na opciju Geometry odabere New SpaceClaim Geometry kao što je prikazano na Slici 33.



Slika 33. Izbor *SpaceClaim Geometry*

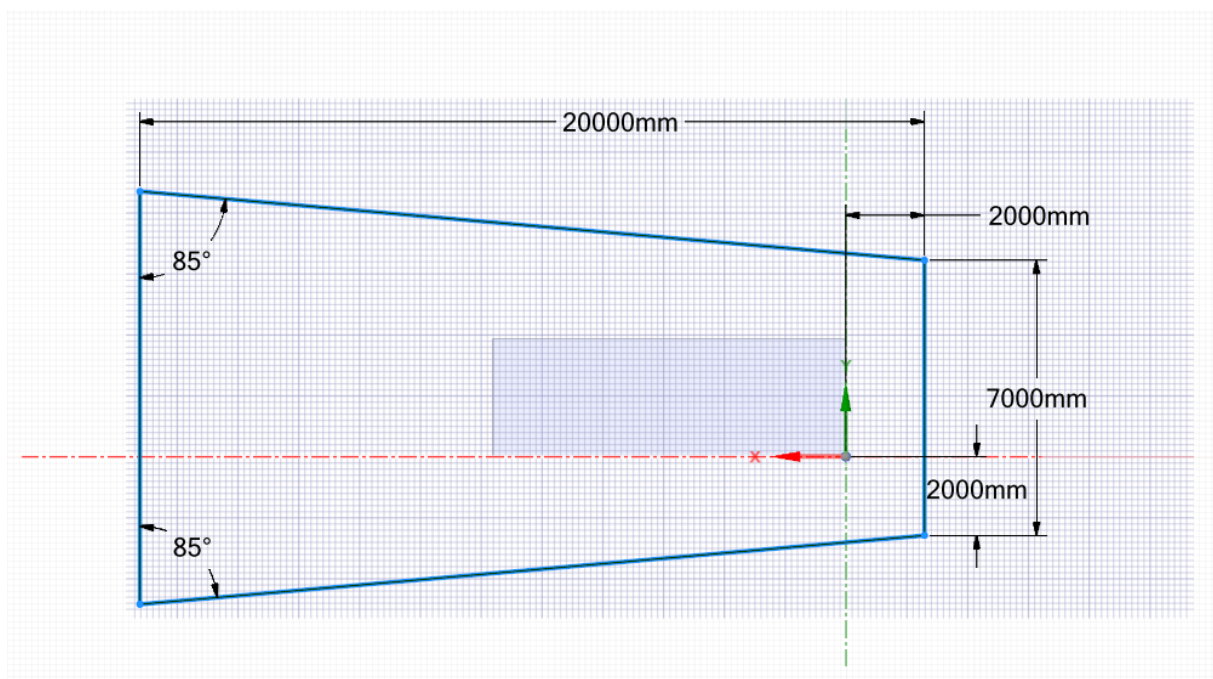
SpaceClaim je softver za modeliranje koji se koristi za brzo i jednostavno kreiranje, uređivanje i optimiranje 3D modela. Osnovna je prednost njegov intuitivan izgled koji omogućava korisniku da brzo i efikasno manipulira 3D geometrijom čak iako nema veliko tehničko znanje o CAD sustavima.

Izgled sučelja *SpaceClaima* prikazan je na Slici 34.



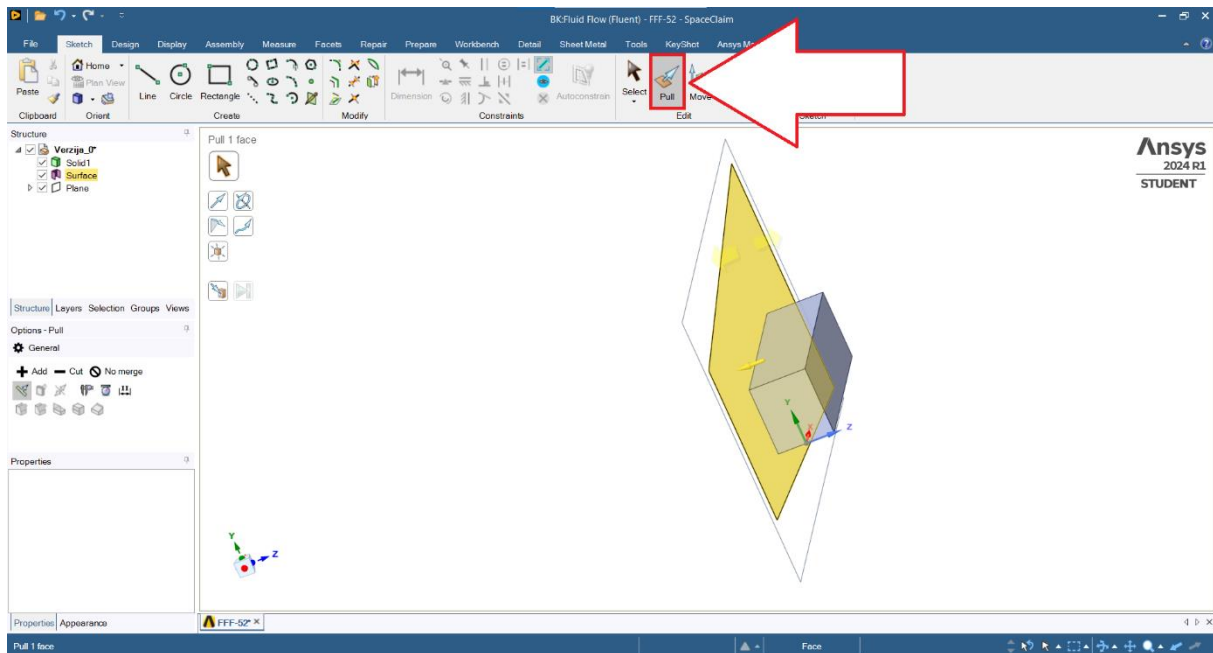
Slika 34. Početni zaslon *SpaceClaima*

Potrebno je učitati 3D model vozila te izraditi ravninu koja je paralelna s xy-osi na udaljenosti od 2 m. U novonastaloj ravnini potrebno je nacrtati trapez s dimenzijama kao na Slici 35.

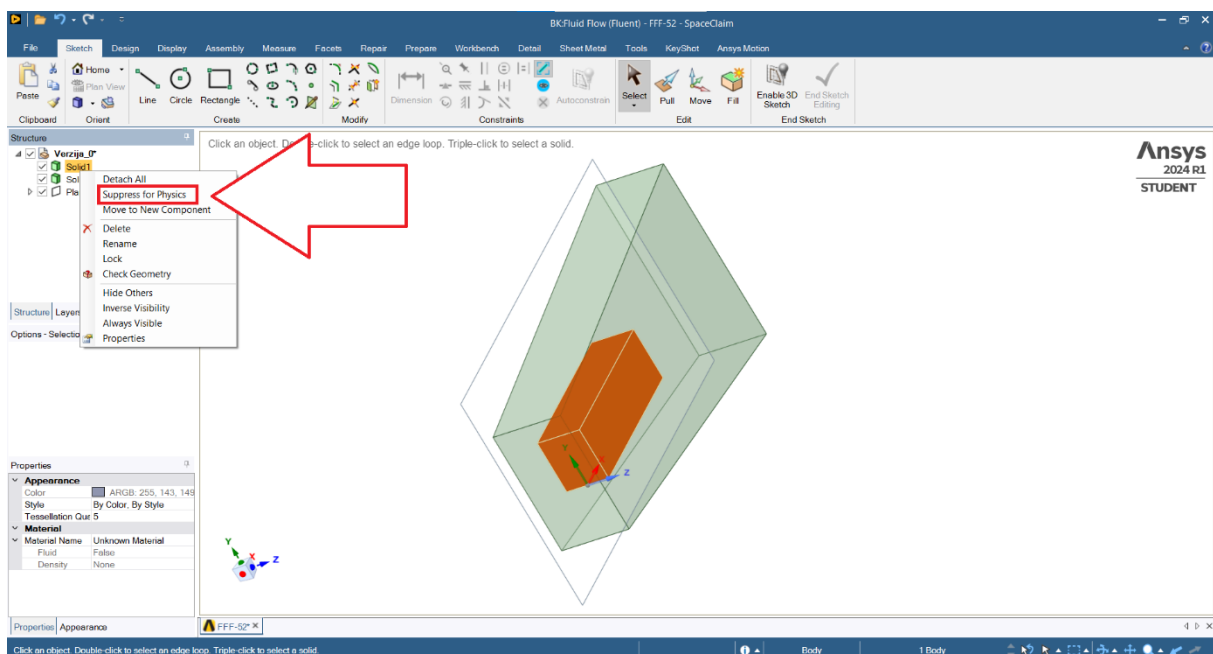


Slika 35. Dimenzije trapeza

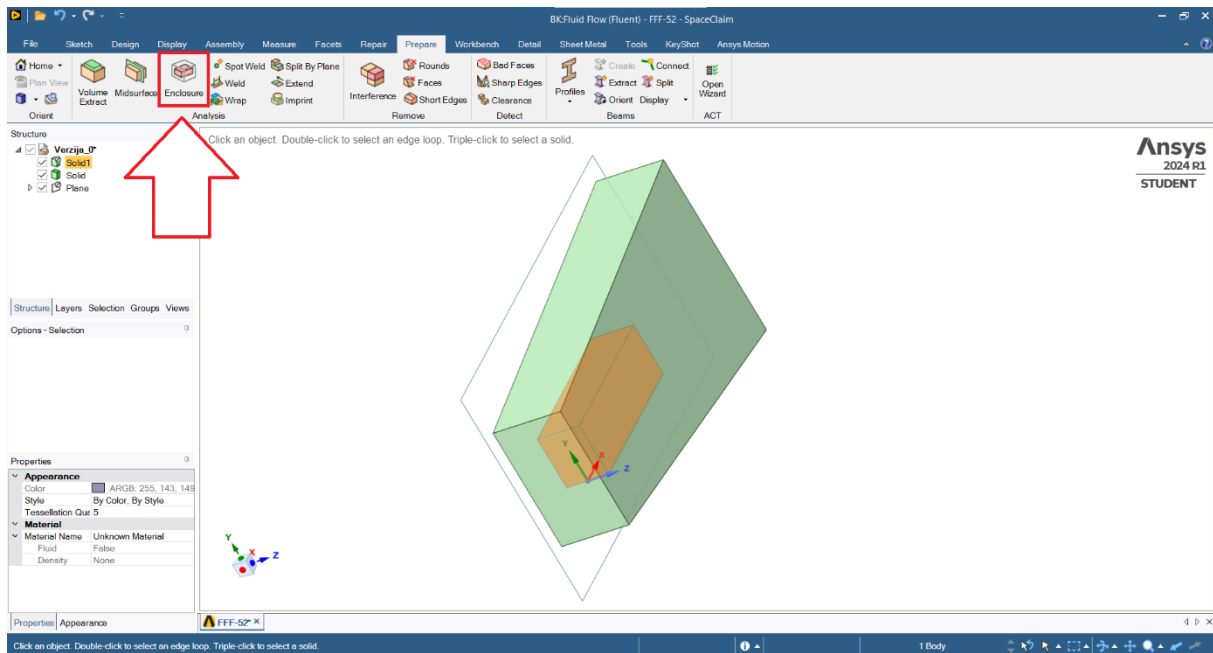
Potrebno je definirati i treću dimenziju na način da se iz padajućeg izbornika *Sketch* s pomoću opcije *Pull* (crveno označeno na Slici 36.) doda širina trapeza (u ovome radu širina od 4 m).

Slika 36. Opcija *Pull*

Sljedeće, potrebno je izuzeti iz fizikalnih procesa vozilo i ravninu u kojoj je napravljen trapez, tj. međusloj. Izuzimanje se obavlja tako što se pritisne desni klik miša na objekt koji se želi izuzeti te se odabere *Suppress from Physics* kao što je crvenom bojom prikazano na Slici 37.

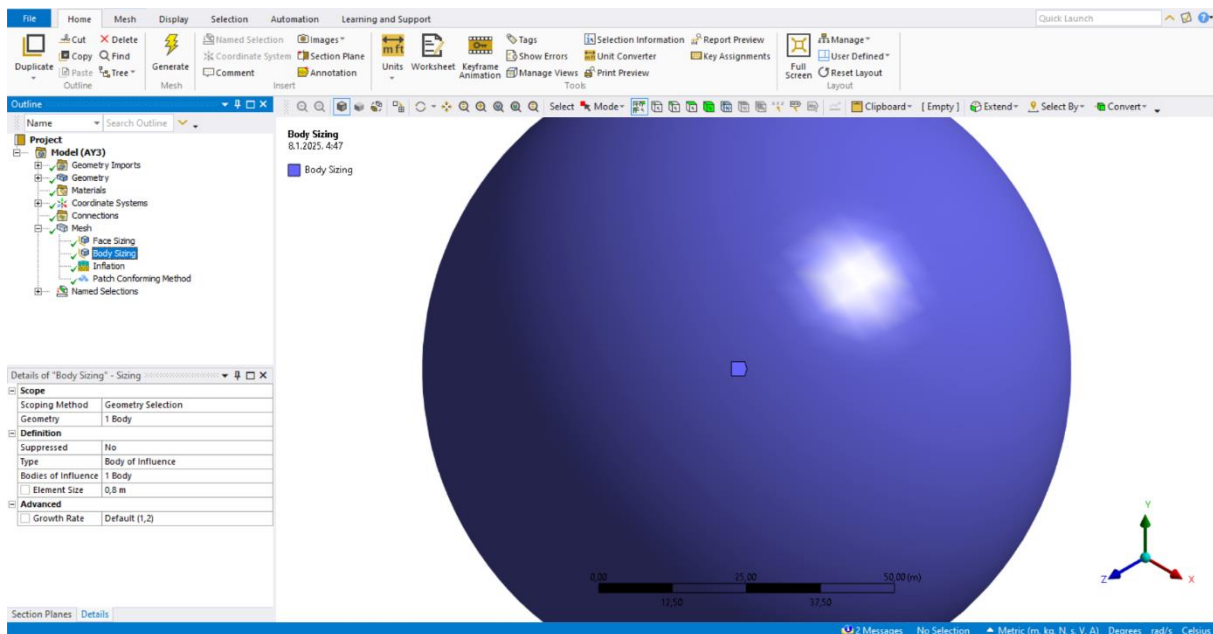
Slika 37. Opcija *Suppress from Physics*

Također je potrebno napraviti okoliš u kojem će se nalaziti vozilo. U radu je okoliš definiran kao sfera radijusa 30 m. Kako bi se sfera napravila, potrebno je označiti vozilo te iz padajućeg izbornika *Prepare* izabrati opciju *Enclosure* (crveno označeno na Slici 38.) te izabrati oblik i dimenzije.

Slika 38. Opcija *Enclosure*

### 2.2.2. Gustoća mreže (Mesh)

Opcija *Mesh* kod 3D slučaja jako je slična kao i kod 2D slučaja. Razlika je u tome što se elementi u međusloju definiraju tako da se odabere opcija *Size* te pod opcijom *Geometry* izabire sfera. Potom je potrebno pod opcijom *Type* izabirati *Body of Influence* te zatim tijelo trapeza s veličinom elemenata od 0,8 metara kao što je prikazano na Slici 39.

Slika 39. Opcija *Body Sizing*

Zatim još treba generirati slučaj i anžurirati kako bi se moglo prijeći na sljedeći korak, a to je postavljanje Postava (*Setup*) koji se definira identično kao i kod 2D.



### 3. OPIS I POSTUPAK IZRADE SIMULACIJSKOG MODELA ZA ANALIZU DINAMIKE VOZILA

Za izračun potrošnje goriva koristio se program *CarSim* u kojem se simulira dinamika vozila.

Izraz za izračun potrošnje goriva glasi:

$$r_{qvt} \left[ \frac{L}{100km} \right] \epsilon \frac{M_{gorivo} \cdot 100}{\rho \cdot s_{cikl}} \quad (12)$$

gdje je:

$M_{gorivo}$  - masa goriva koja se potroši tokom voznog ciklusa [kg],

$s_{cikl}$  - duljina voznog ciklusa [km],

$\rho = 0,84 \frac{kg}{L}$  - gustoća goriva[10].

Masa goriva koja se potroši tokom voznog ciklusa, tj. ispitne procedure dobit će se simulacijom na dijagramima te će se morati očitati. Za svaku pojedinu ispitnu proceduru ima navedena njena duljina o čemu će biti kasnije više riječi. Kada postoje podatci za potrošnju goriva može se jednostavno dobiti i emisija  $CO_2$  koja se proizvede u svakoj od pojedinih ispitnih procedura.

Izraz za izračun emisije  $CO_2$  glasi:

$$CO_2 \left[ \frac{g}{km} \right] = \frac{M_{gorivo} \cdot 1000 \cdot m_{CO_2}}{\rho \cdot s_{cikl}} \quad (13)$$

gdje je:

$M_{gorivo}$  - masa goriva koja se potroši tokom voznog ciklusa [kg],

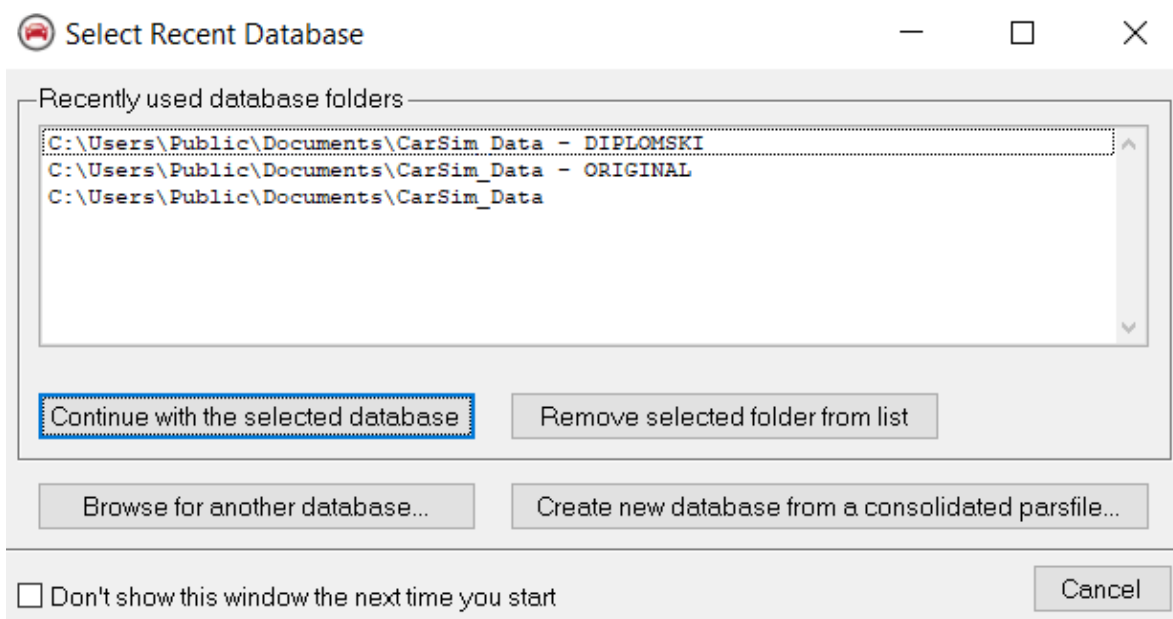
$s_{cikl}$  - duljina voznog ciklusa [km],

$\rho = 0,84 \frac{kg}{L}$  - gustoća goriva[10],

$m_{CO_2} = 2,62 \frac{kg}{L}$  - masa  $CO_2$  po litri goriva nakon idealnog izgaranja[11].

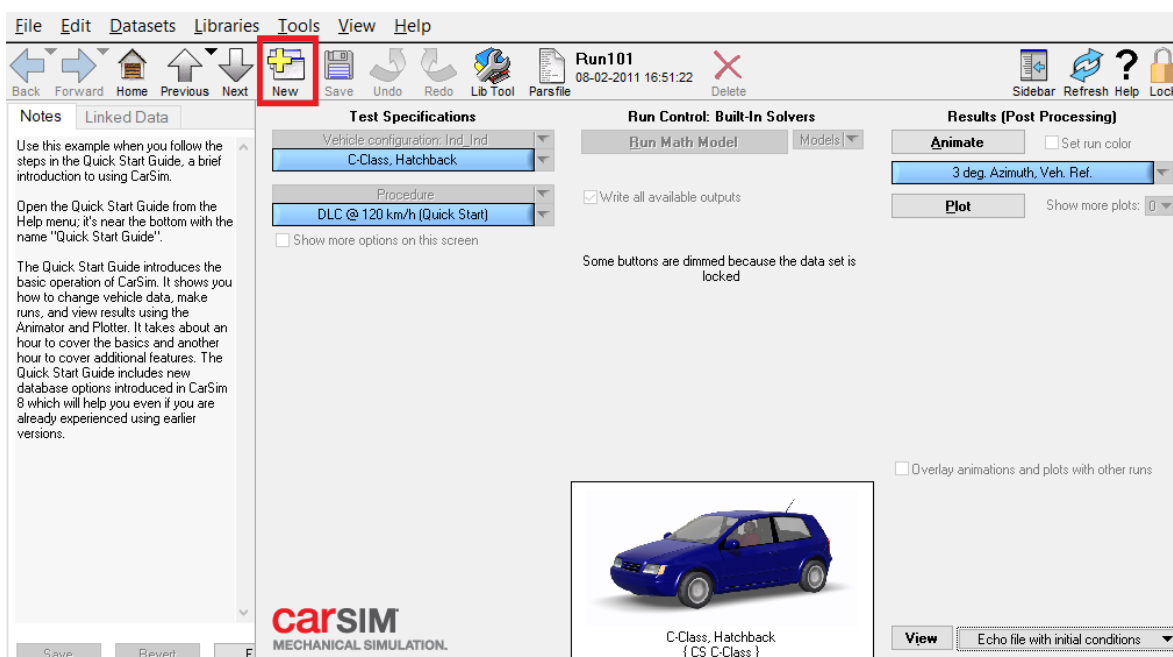
Proces izrade simulacije započinje tako što je potrebno prilikom pokretanja *CarSima* napraviti kopiju cijele mape podataka (*Database*). Mapa podataka nalazi se u X:\Users\Public\Documents pod nazivom *CarSim\_Data*. U ovome diplomskom mapa podataka nazvana je *CarSim\_Data – DIPLOMSKI*. Razlog zbog čega se treba napraviti kopija jest zbog toga što se svaka promjena u programu zapisuje u mapu podataka što stvara problem za sve

buduće programe koji nisu vezani međusobno. Pokretanjem programa *CarSim* pojavljuje se prozor kao što je prikazano na Slici 40.



Slika 40. Početni zaslon *CarSima*

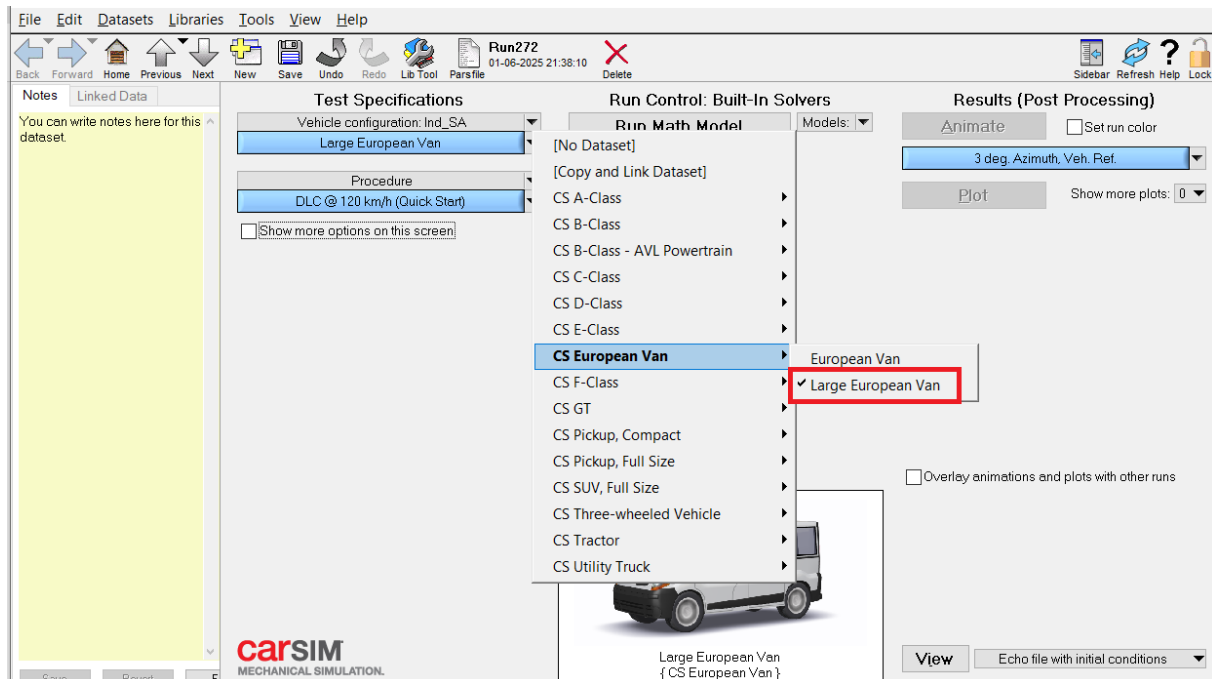
Klikom na novonapravljenu mapu podataka pokreće se rad programa *CarSim* gdje je prvi korak izrada novog skupa podataka (*Datasets*) s opcijom *New* (crveno uokvireno), kao što je prikazano na Slici 41., u kojem će se mijenjati parametri.



Slika 41. Nova baza podataka (*Datasets*)

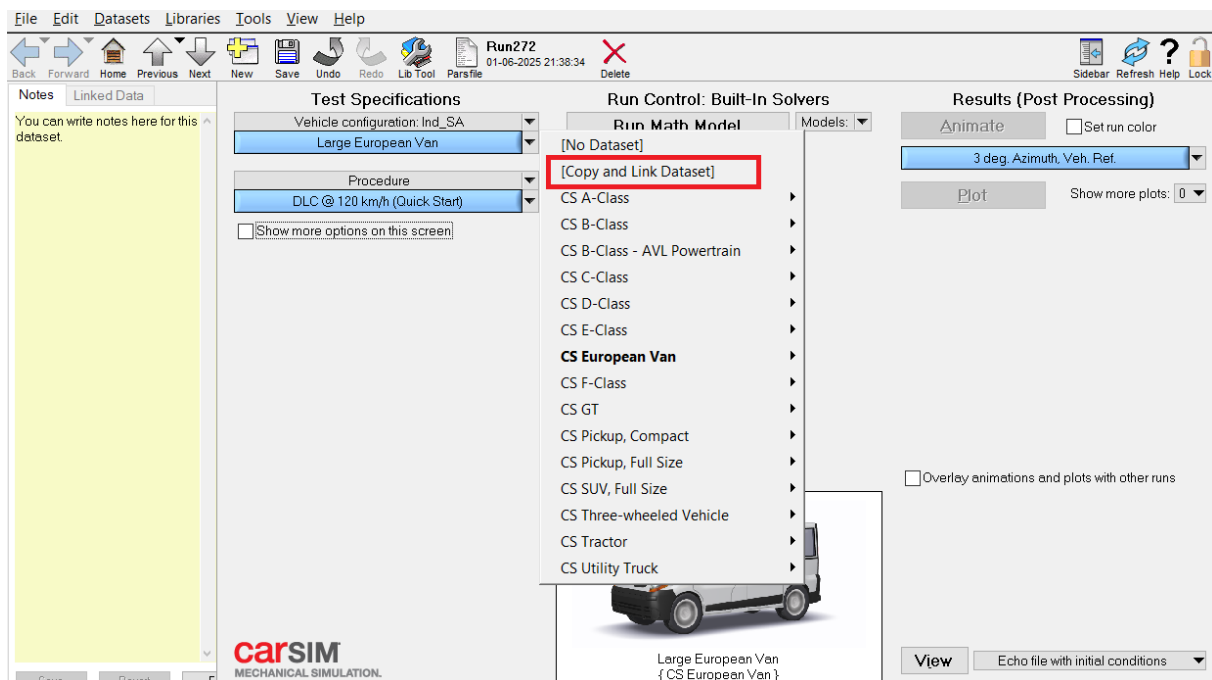
Potrebno je izabrati vozilo s kojim će se provesti simulacija. U ovome radu izabrano je vozilo *Large European Van* (kao što je prikazano na Slici 42.) jer *CarSim* nije predviđen za simulaciju

dinamike kod autobusa. Zbog toga će se izabrano vozilo modificirati kako bi dimenzijski bilo što sličnije autobusu.



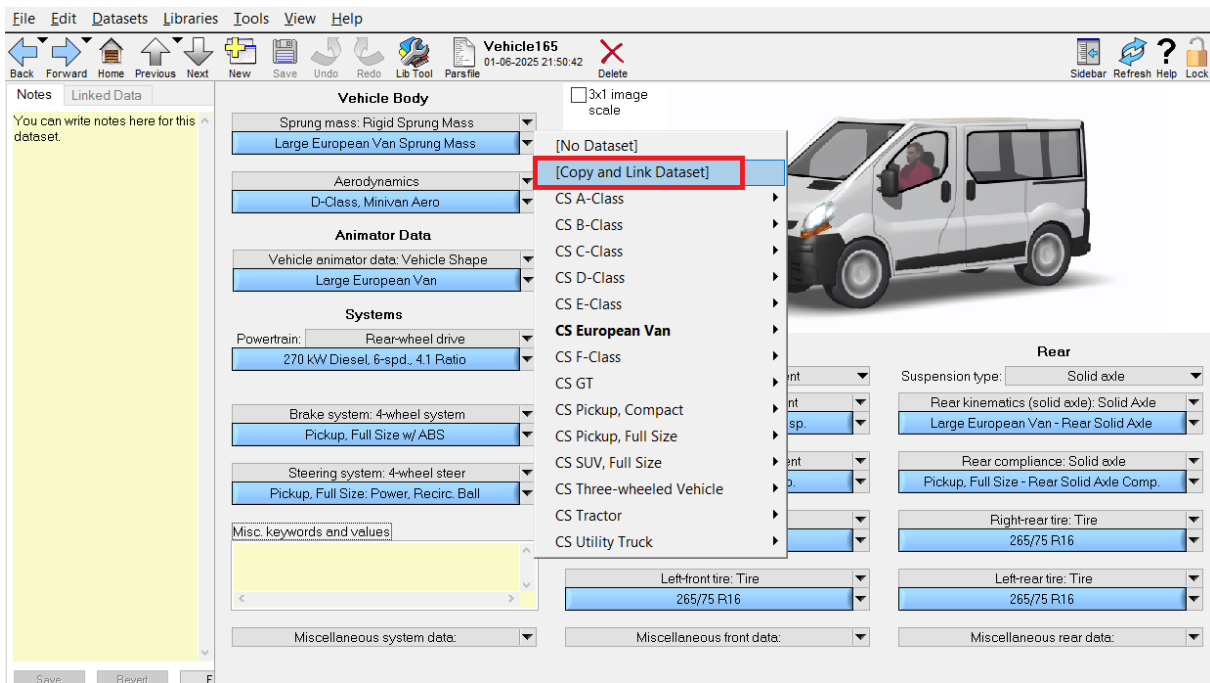
Slika 42. Izbor vozila

Nakon izbora vozila potrebno je napraviti kopiju vozila te ga nazvati *Autobus* kao što je prikazano na Slici 43.



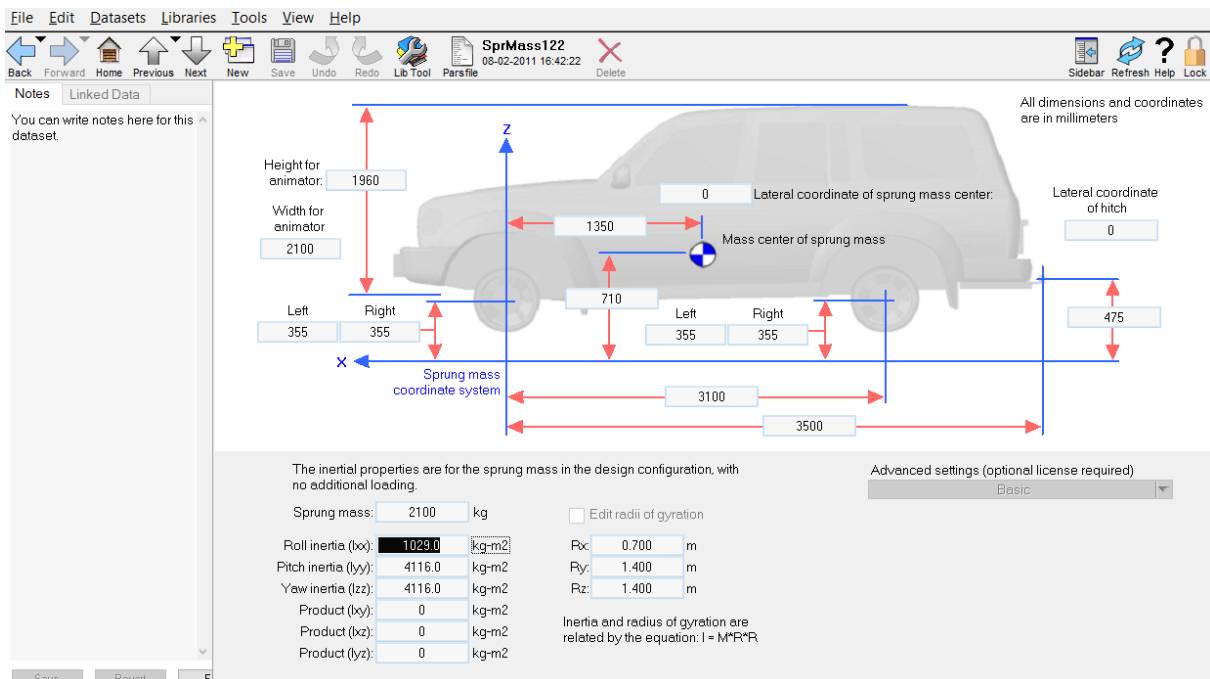
Slika 43. Kopiranje vozila

Klikom na novostvoreno vozilo otvara se novi prozor u kojem na isti način treba napraviti kopiju *Sprung mass: Rigid Sprung Mass* koja će se nazvati *Autobus\_Sprung Mass* kao što je prikazano na Slici 44.



Slika 44. Kopija *Autobus\_Sprung Mass*

Odabirom *Autobus\_Sprung Mass* otvara se novi prozor, kao što je prikazano na Slici 45., u kojem je potrebno autobusu prilagoditi vrijednosti.



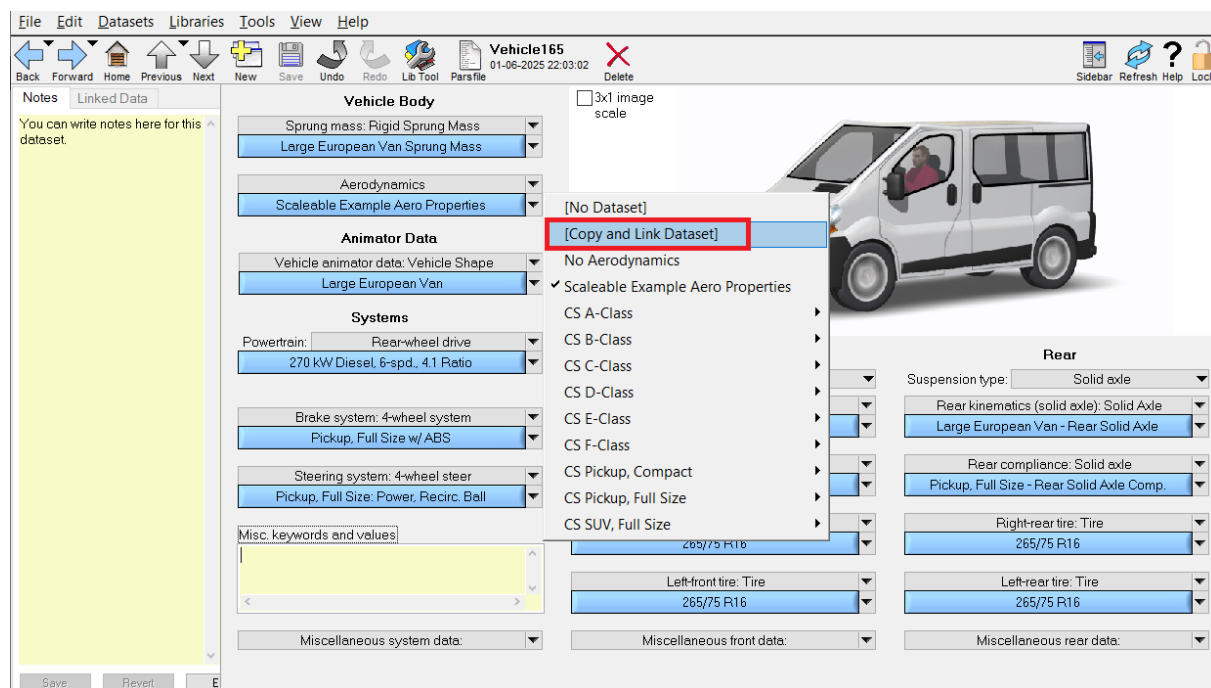
Slika 45. Prilagodba dimenzija autobusu

Dimenzije stvarnog autobusa koje se koriste za ovu simulaciju jesu dimenzije autobusa Mercedes-Benz Intouro K[8] koji je svojim gabaritima sličan modelu iz ANSYS-a i koji je prikazan na Slici 46.



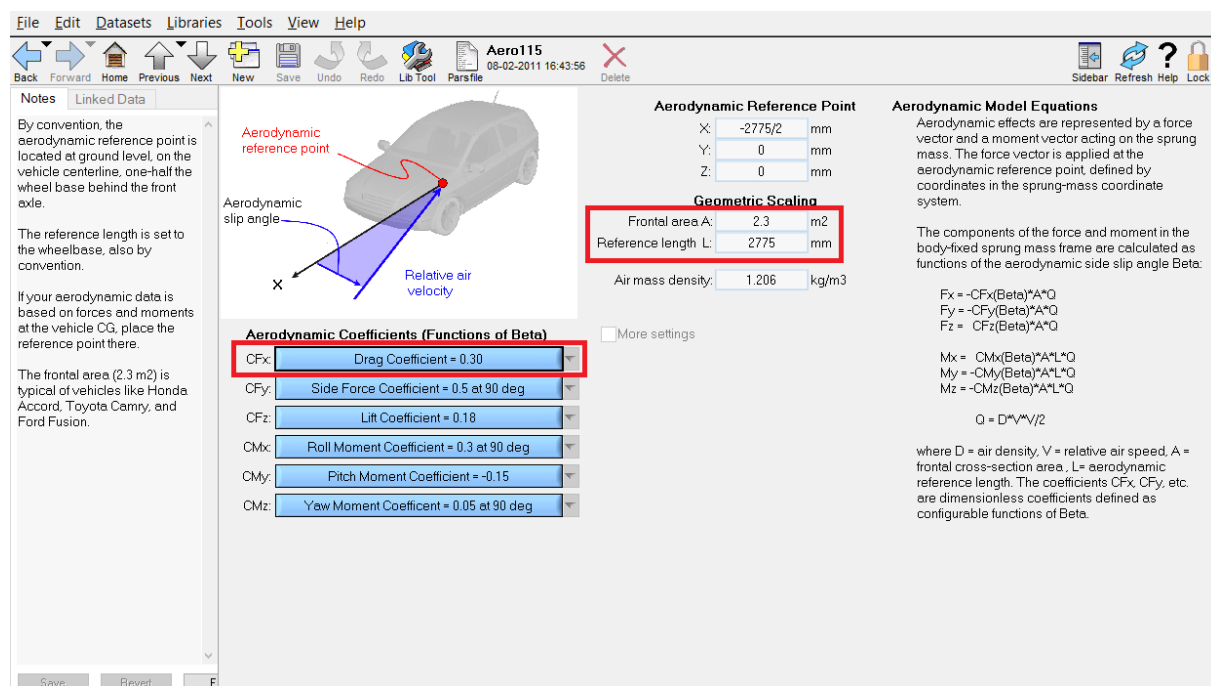
**Slika 46. Mercedes-Benz Intouro K[8]**

Sljedeća stavka koju je potrebno kopirati nalazi se pod stavkom *Aerodynamics* gdje je potrebno napraviti kopiju opcije *Scaleable Example Aero Properties*, kao što je prikazano na Slici 45., koja će se nazvati *Autobus\_Scaleable Example Aero Properties*.



Slika 47. Kopija *Autobus\_Scaleable Example Aero Properties*

Odabirom novonastale opcije otvara se novi prozor, kao što je prikazano na Slici 48., u kojem je potrebno promijeniti stavke *Frontal area A*, *Reference length L* koje se trebaju prilagoditi stvarnim vrijednostima vozila te treba promijeniti *CFx* koji prema simulacijama aerodinamike ide od 0,5 do 1,5.



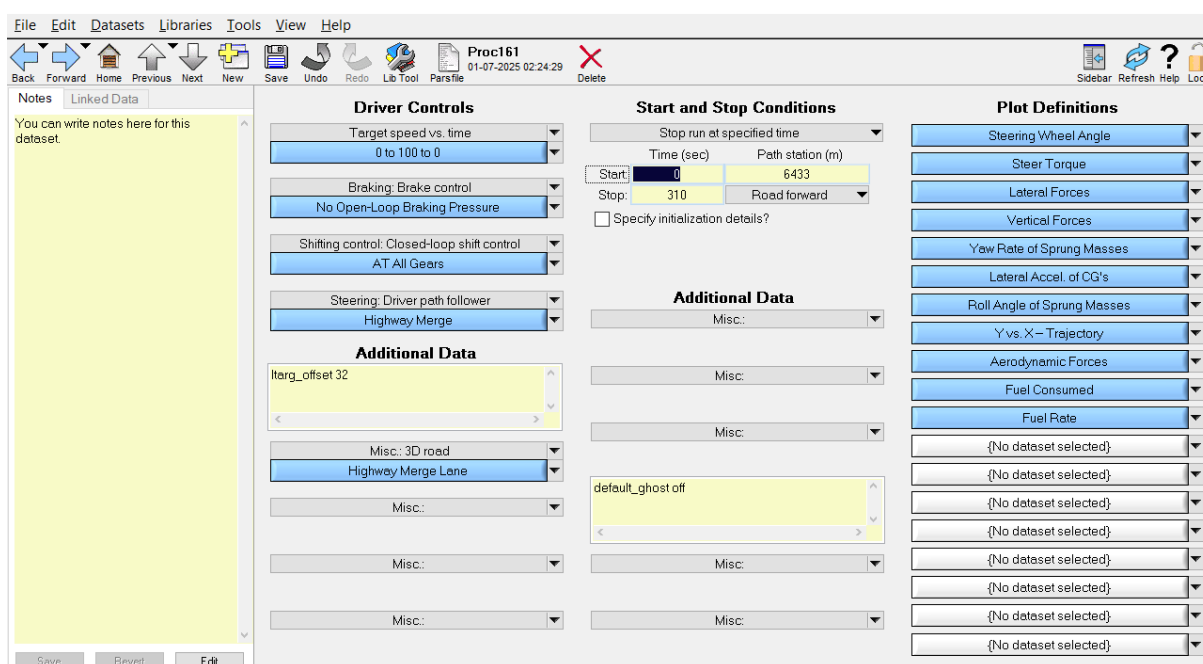
Slika 48. Aerodinamičke postavke

Sljedeće, potrebno je izabrati pod stavkom *Powertrain* motor 300 kW, 6-spd., 2.87 Ratio koji je najbliži motoru autobusa.

Potrebno je vratiti se na početni ekran i pod opcijom *Procedure* izabrati stavku *Highway Merge* te stvoriti tri kopije koje će nositi nazive *Autocesta*, *Prigradska* i *Gradska* jer će se u ovome radu promatrati potrošnja na tri različita režima vožnje:

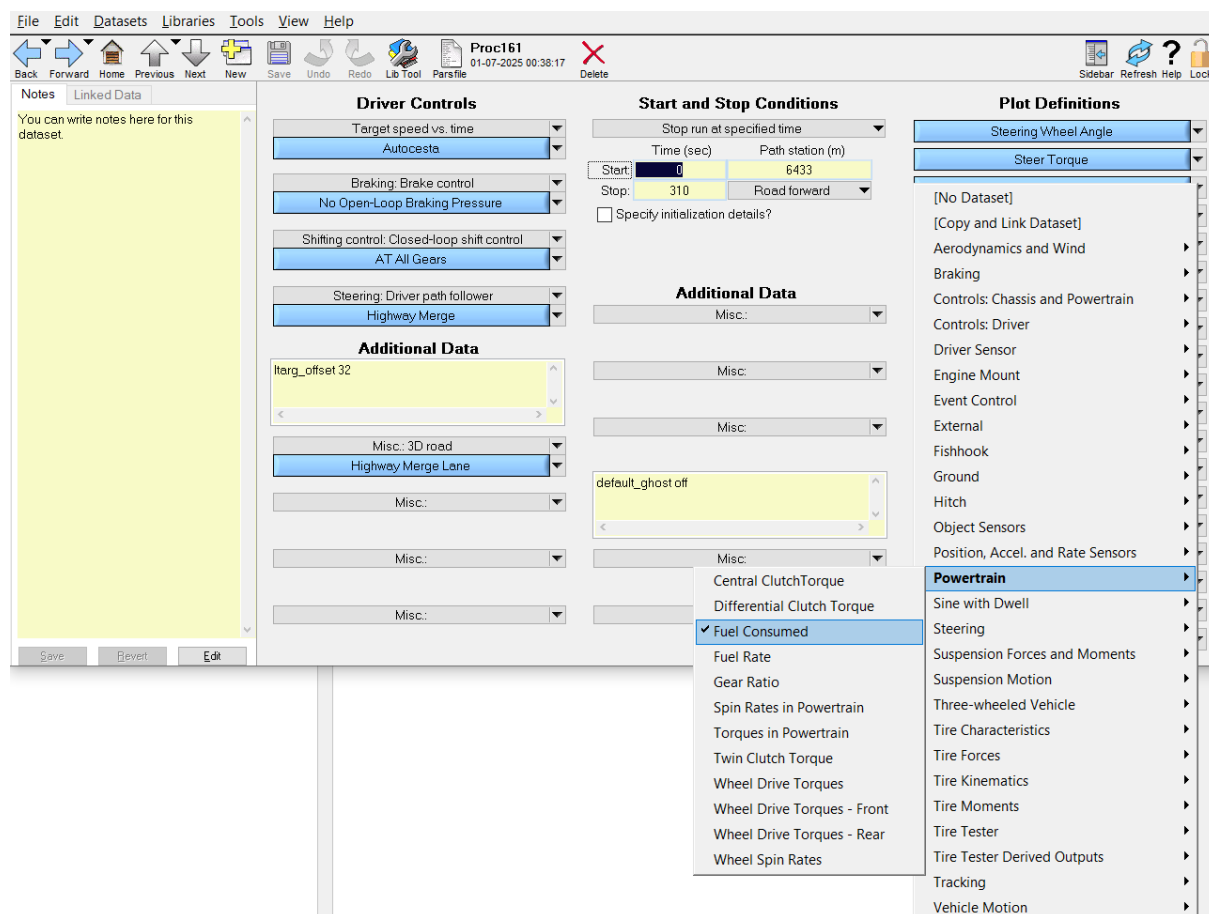
- vožnja po autocesti (*Transit Coach Operating Duty Cycle*[9])
- prigradska vožnja (*UG214 bus 04: bus-lane*[9])
- gradska vožnja (*Braunschweig City Driving Cycle*[9])

Lijevim klikom na novonastalu opciju otvara se novi prozor, kao što je prikazano na Slici 49.



**Slika 49. Prozor Procedure**

Pod opcijom *Driver Controls* potrebno je izabrati *Target speed vs time* te *0 to 100 to 0* od koje je potrebno napraviti kopiju koja će nositi nazive *Autocesta*, *Prigradska* i *Gradska*. Otvaranjem novonastale kopije potrebno je unijeti izgled dijagrama za svaku pojedinu proceduru i pod stavkom *Start and Stop Conditions* unijeti odgovarajuće vrijednosti[9]. Također je potrebno pod stavkom *Plot Definitions* dodati dijagram *Fuel Consumed* kao što je prikazano na Slici 50.

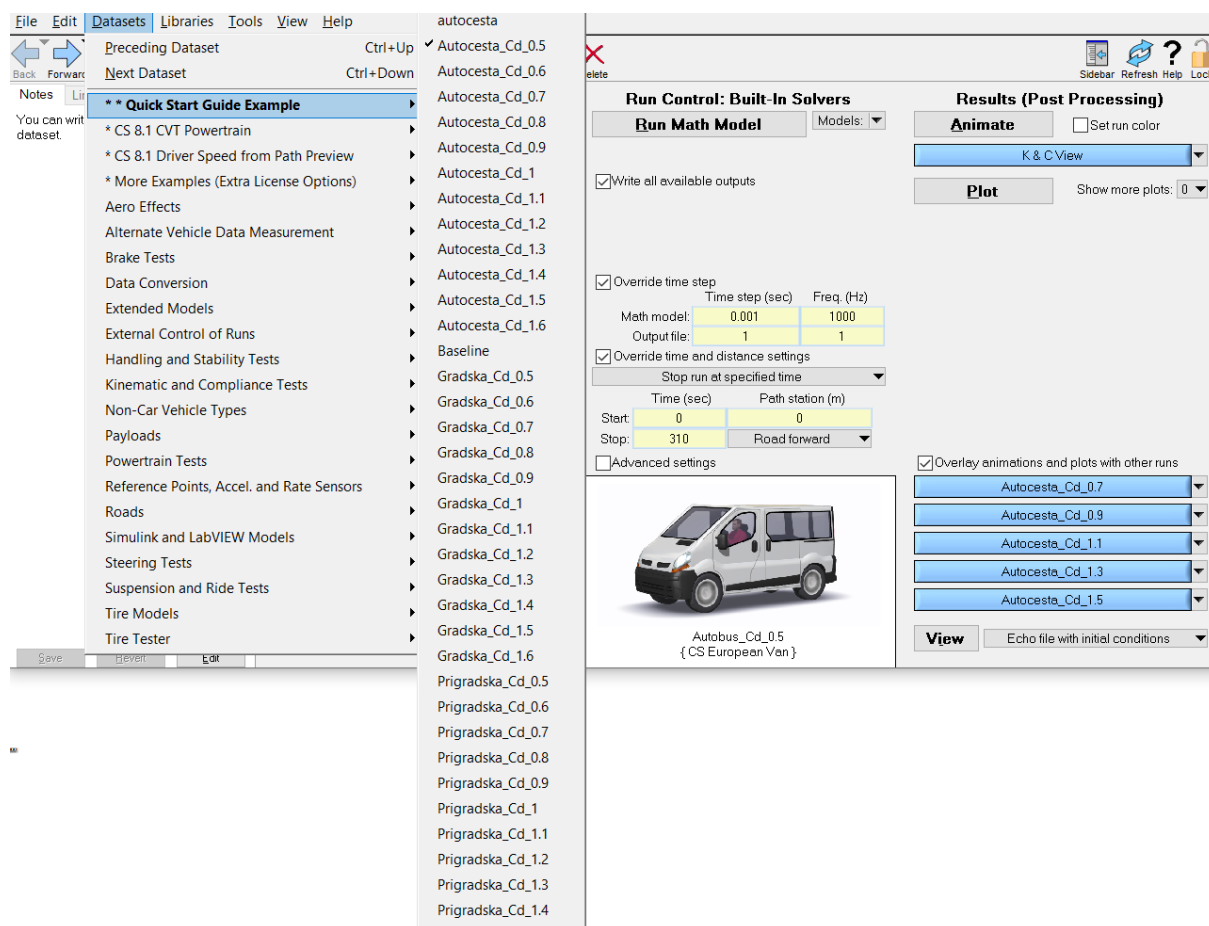


Slika 50. Fuel Consumed

Sljedeći je korak označiti kvačicom u kućici opcije *Show more options on this screen, Override driver controls, Override time step* i *Override time and distance settings*. Iz padajućeg izbornika potrebno je izabrati *Speed control* à *Target speed vs time* te izabrati prethodno napravljenu *Autocesta/Prigradska/Gradska*, pod opcijom *Braking* à *Control: Braking (Open Loop)* à *No Open – Loop Braking Pressure*, pod opcijom *Shifting control* à *Control: Shifting (Open Loop)* à *1-2-3-4-5-6 Spd. Up. – Clutch Open – loop* od kojeg treba napraviti tri kopije te ih nazvati *Mjenjac\_autocesta*, *Mjenjac\_prigradska* i *Mjenjac\_gradska* u kojima je također potrebno na osnovi brzina koje se postižu u određenom vremenu i specifikacija izabranoga stvarnog autobusa postaviti kada će vozilo biti u kojem prijenosnom omjeru te je naposljetku potrebno iz padajućeg izbornika pod opcijom *Steering* izabrati *Control: Steering by the Closed – loop Driver Model* à *Highway Merge* à *Highway Merge* od kojega je potrebno napraviti kopije, nazvati ih *Volan\_ravno\_autocesta*, *Volan\_ravno\_prigradska*, *Volan\_ravno\_gradska* te prilagoditi duljinu proceduri. Potrebno je odabrati pod opcijom *Override time step* u tablici *Output file* à *Time step = 1*, *Freq. = 1* kako bi vrijednosti iz dijagrama imale smisla te također pod opcijom *Override time and distance settings* à *Stop run at specified time* te uskladiti s



vrijednostima iz procedure. Kako simulacije iz *ANSYS-a* prikazuju da faktor otpora zraka  $C_d$  varira od vrijednosti 0,5 do 1,5 napravljeno je za svaku vrijednost identično vozilo uz jedinu razliku, a to je da je promijenjen faktor otpora zraka te je tako napravljen niz vozila koji su nazvani *Autobus\_Cd\_0.5*, *Autobus\_Cd\_0.6*, *Autobus\_Cd\_0.7*, ... , *Autobus\_Cd\_1.5* te se tako pojednostavio proces izrade simulacija. Naposljetku je izrađena baza podataka (*Datasets*) za sve tri procedure i za sve faktore otpora zraka kao što se može vidjeti na Slici 51.



Slika 51. Lista procedura

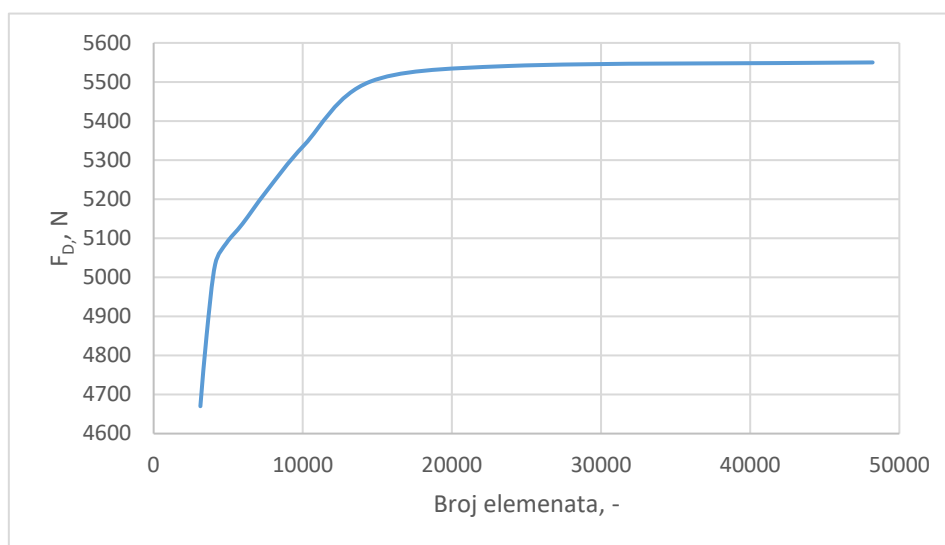
Nakon definiranja svake procedure potrebno je pokrenuti simulaciju tako što će se odabrati opcija *Run Math Model*. Sustav omogućava veći broj mogućih paralelnih ispisivanja baza podataka što se upotrijebilo u ovome radu te se tako pokrenuo maksimalan broj mogućih baza podataka. Dobivene vrijednosti interpolirat će se u ovisnosti o specifičnom faktoru otpora zraka za svaki specifični slučaj. Ispis podataka vrši se s pomoću opcije *Plot*.

## 4. REZULTATI

### 4.1. Računalna dinamika fluida

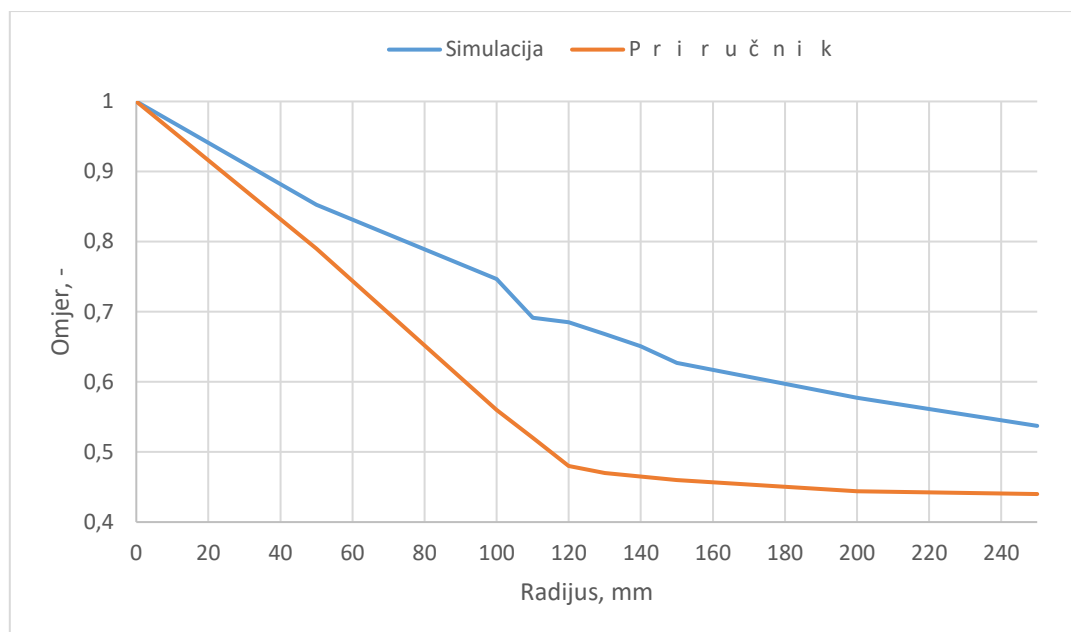
#### 4.1.1. 2D model

Potrebno je izabrati optimalni broj elemenata koji je potreban za 2D simulaciju. Kako se može vidjeti na Slici 52., optimalni je broj elemenata 14 521 te je s tim brojem elemenata pokretana simulacija u daljnjim koracima i pri 6 000 iteracija. Dijagram na Slici 52. prikazuje ovisnost sile otpora zraka u ovisnosti o broju elemenata.



**Slika 52. Izbor optimalnog broja konačnih volumena za 2D slučaj**

Nakon definiranja optimalnog broja elemenata, koji je dobiven iterativnim putem, može se pristupiti simulaciji u kojoj će se dobiti faktori otpora zraka za različite radijuse zakrivljenja vozila. Dijagram na Slici 53. prikazuje omjer trenutnog faktora otpora zraka i faktora otpora zraka pri radijusu 0 mm u ovisnosti o radijusu zaobljenja vozila. U dijagramu je narančasta krivulja iz priručnika dok je plava krivulja dobivena simulacijom s parametrima koji su definirani u ovome radu. Krivulja iz priručnika rađena je na autobusu u kojem su bili uključeni kotači i podvozje, a u ovome radu pojednostavljena je kontura vozila pa postoji razlika u vrijednostima. Kako se može vidjeti u dijagramu, krivulja simulacije i sa skromnim resursima studentske verzije ANSYS-a približila se vrijednostima iz priručnika.



**Slika 53. Usporedba podataka iz simulacije i priručnika[2]**

U Tablici 1. prikazani su faktori otpora zraka i relativna promjena faktora otpora zraka, na osnovu faktora otpora zraka pri 0 mm, za različite radijuse zakrivljenja prednjeg gornjeg ruba vozila u 2D slučaju.

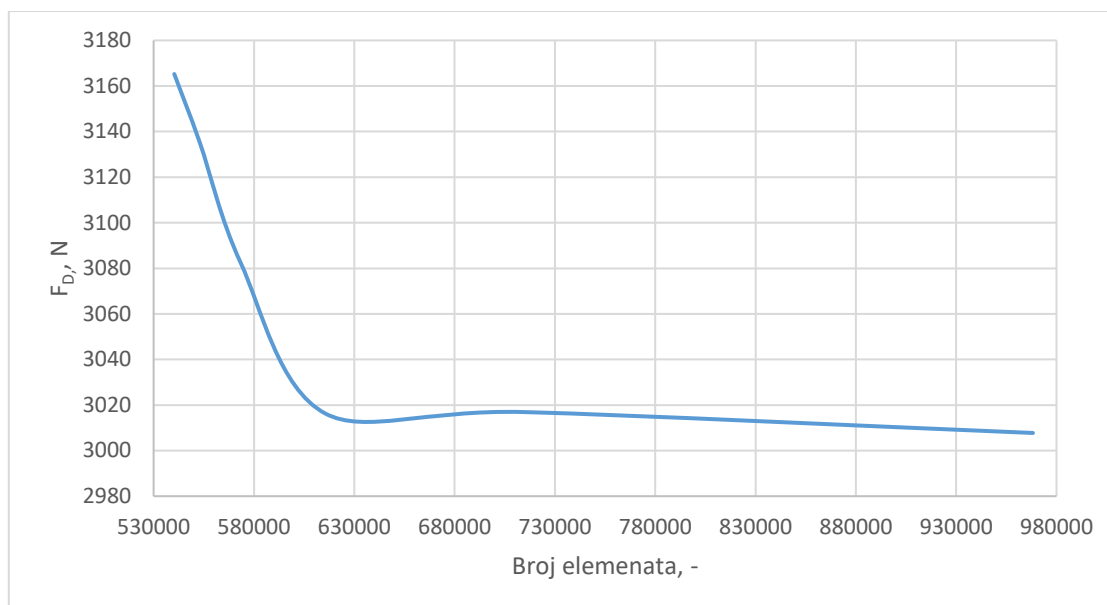
**Tablica 1. Rezultati faktora otpora zraka za različite radijuse u 2D-u**

Radijus[mm]	0	50	100	110	120	130	140	150	200	250
Cd[-]	1,558	1,329	1,163	1,077	1,067	1,041	1,014	0,977	0,899	0,837
Relativna promjena Cd [%]	0	22,9	39,5	48,1	49,1	51,7	54,4	58,1	65,9	72,1

Prema [3] faktor otpora zraka za pravokutnik u ravnini iznosi približno 1, čemu se simulacija u ovome radu uspjela približiti.

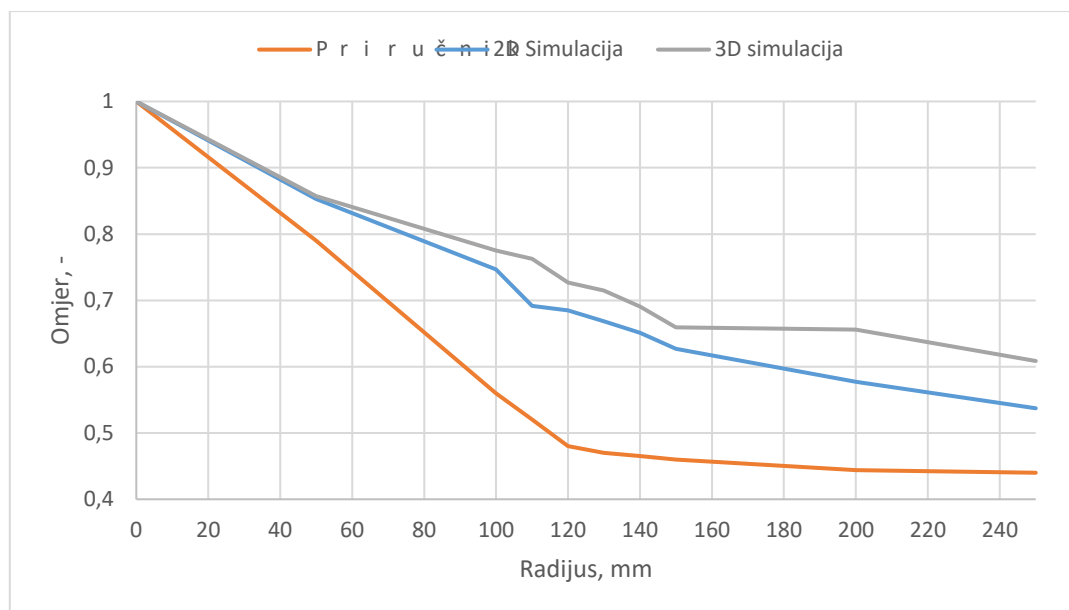
#### 4.1.2. 3D model

Sljedeći je korak izabrati optimalni broj elemenata koji je potreban za 3D simulaciju. Kako se može vidjeti na Slici 54., optimalni je broj elemenata 615 624 te je s tim brojem elemenata pokretana simulacija u daljnjim koracima i pri 2 000 iteracija. Dijagram na Slici 54. prikazuje ovisnost sile otpora zraka u ovisnosti o broju elemenata.



**Slika 54. Izbor optimalnog broja konačnih volumena za 3D slučaj**

Nakon definiranja optimalnog broja elemenata, koji je dobiven iterativnim putem, može se pristupiti simulaciji u kojoj će se dobiti faktori otpora zraka za različite radijuse zakrivljenja vozila. Dijagram na Slici 55. prikazuje omjer trenutnog faktora otpora zraka i faktora otpora zraka pri radijusu 0 mm u ovisnosti o radijusu zaobljenja vozila. U dijagramu je narančasta krivulja iz priručnika dok je plava krivulja dobivena simulacijom s parametrima koji su definirani u ovome radu za 2D, a sivom bojom za 3D slučaj. Krivulja iz priručnika rađena je na autobusu u kojem su bili uključeni kotači i podvozje, a u ovome radu pojednostavljena je kontura vozila pa postoji razlika u vrijednostima. Kako se može vidjeti u dijagramu, krivulja simulacije i sa skromnim resursima studentske verzije ANSYS-a približila se vrijednostima iz priručnika.



**Slika 55. Usporedba podataka iz 2D i 3D simulacija te priručnika[2]**

U Tablici 2. prikazani su faktori otpora zraka i relativna promjena faktora otpora zraka, na osnovu faktora otpora zraka pri 0 mm, za različite radijuse zakrivljenja prednjeg gornjeg ruba vozila u 3D slučaju.

**Tablica 2. Rezultati faktora otpora zraka za različite radijuse u 3D-u**

Radijus[mm]	0	50	100	110	120	130	140	150	200	250
Cd[-]	0,987	0,846	0,765	0,752	0,717	0,705	0,681	0,651	0,647	0,600
Relativna promjena Cd [%]	0	14,1	22,2	23,5	27	28,2	30,6	33,6	34	38,7

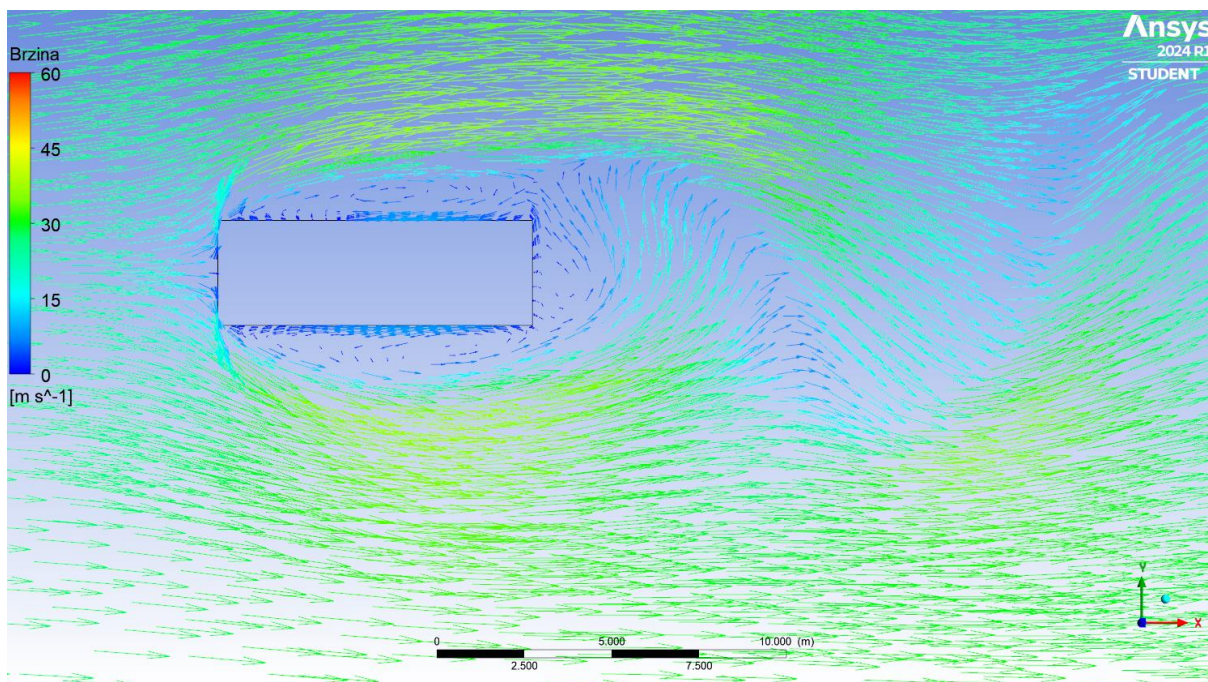
Kao što se može vidjeti, postoji razlika u rezultatima simulacija kod 2D i 3D slučaja. To je zbog toga što kod 2D slučaja ANSYS smatra da je kontura vozila beskonačno široka u trećoj dimenziji zbog čega nema utjecaja bočnog strujanja oko vozila pa je faktor otpora zraka veći nego u 3D slučaju kod kojeg su stvarne dimenzije vozila u prostoru. Prema [2] faktor otpora zraka za vozilo pravokutnog oblika iznosi približno 0,9 dok se simulacijom dobilo približno 1.

#### 4.1.3. Prikaz i opis strujanja

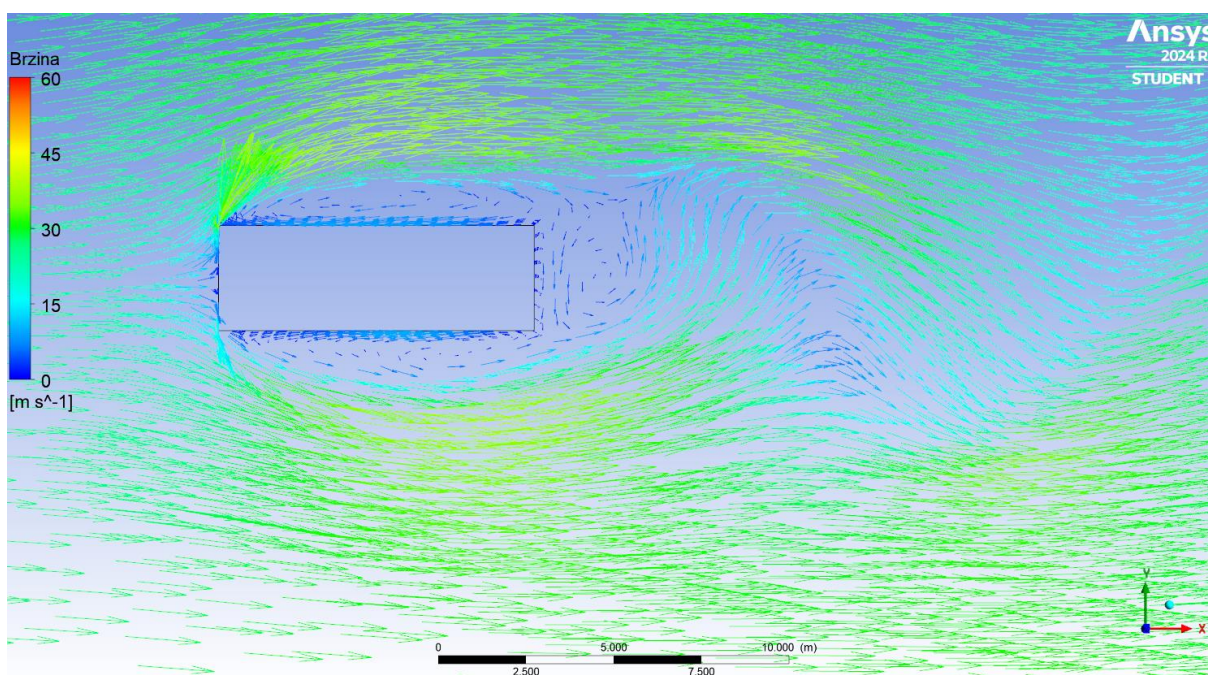
##### 4.1.3.1. Strujnice

Za različite radijuse zaobljenja prednjega gornjeg ruba na slikama od 56. do 61. mogu se vidjeti strujnice za trenutnu sliku strujanja. Bojama je prikazano polje brzina u smjeru x od 0 m/s do 60 m/s kako bi se slike mogle međusobno uspoređivati pri različitim radijusima. Može se vidjeti da pri radijusu 0 mm, kao što prikazuje Slika 56., dolazi do vrtloženja na stražnjem, gornjem i

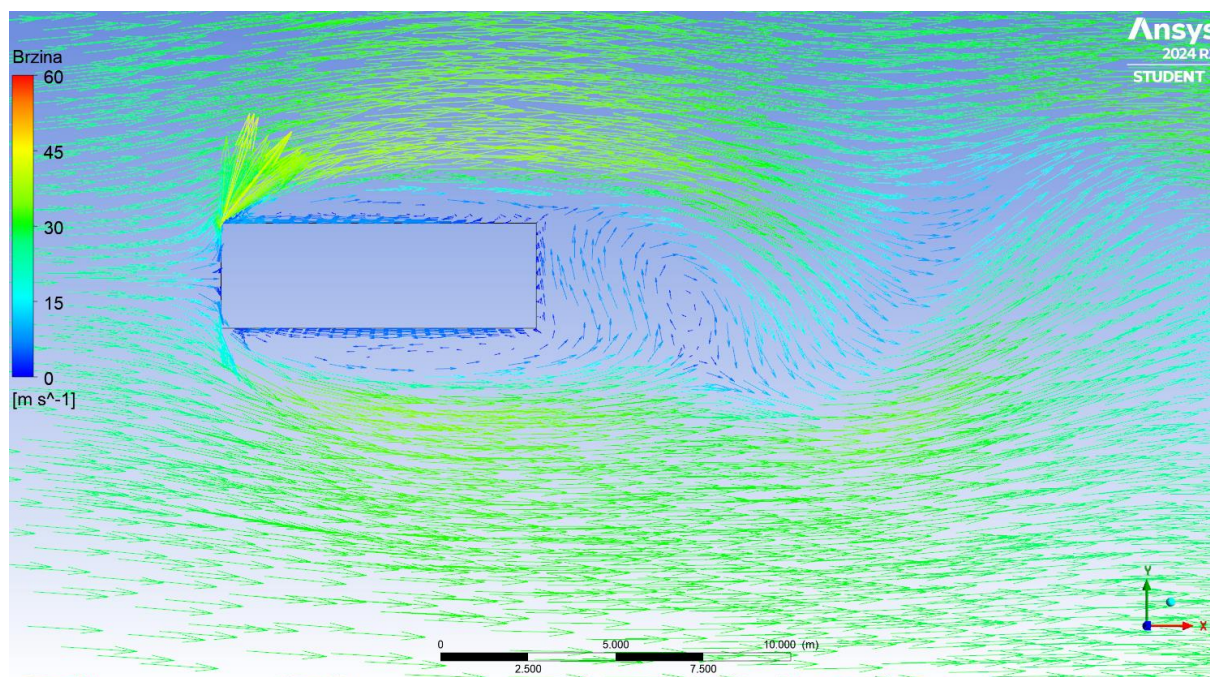
donjem bridu. Granični sloj nije u mogućnosti pratiti nagle promjene geometrije pa tako gdje se nalazi oštar brid, na tome mjestu dolazi do vrtloženja. Vrtlog struje na gornjem bridu giba se u smjeru kazaljke na satu dok na donjem bridu u suprotnom smjeru od kazaljke na satu, tj. suprotno strujanju. Kako se može vidjeti na slikama, pri povećanju radijusa dolazi do smanjenja vrloženja na gornjem bridu dok na donjem ostaje nepromijenjeno te se također s povećanjem radijusa povećava i brzina gibanja strujnica.



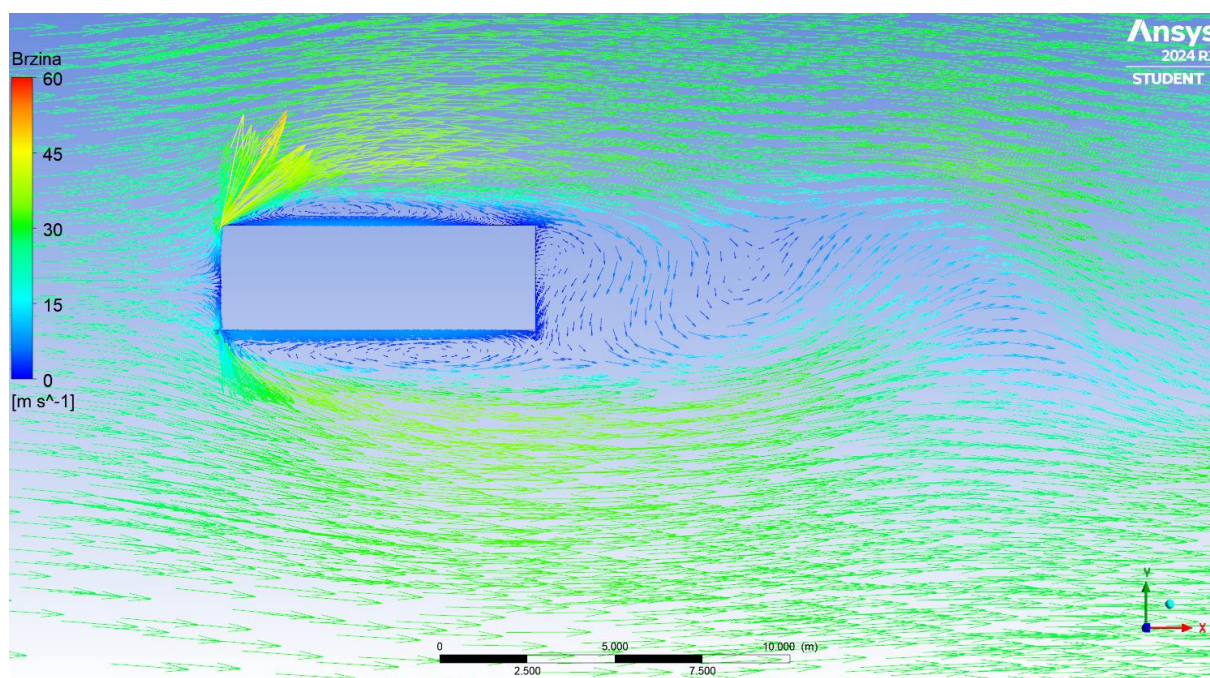
Slika 56. Polje strujnica brzine s radijusom 0mm



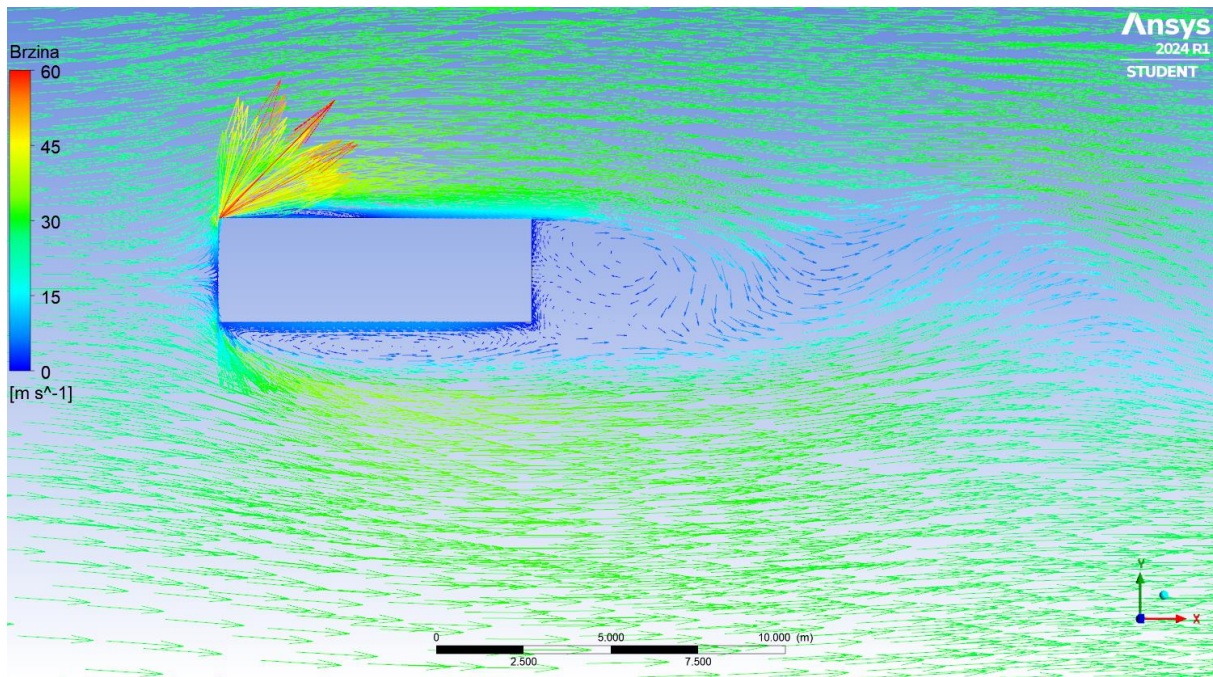
Slika 57. Polje strujnica brzine s radijusom 50mm



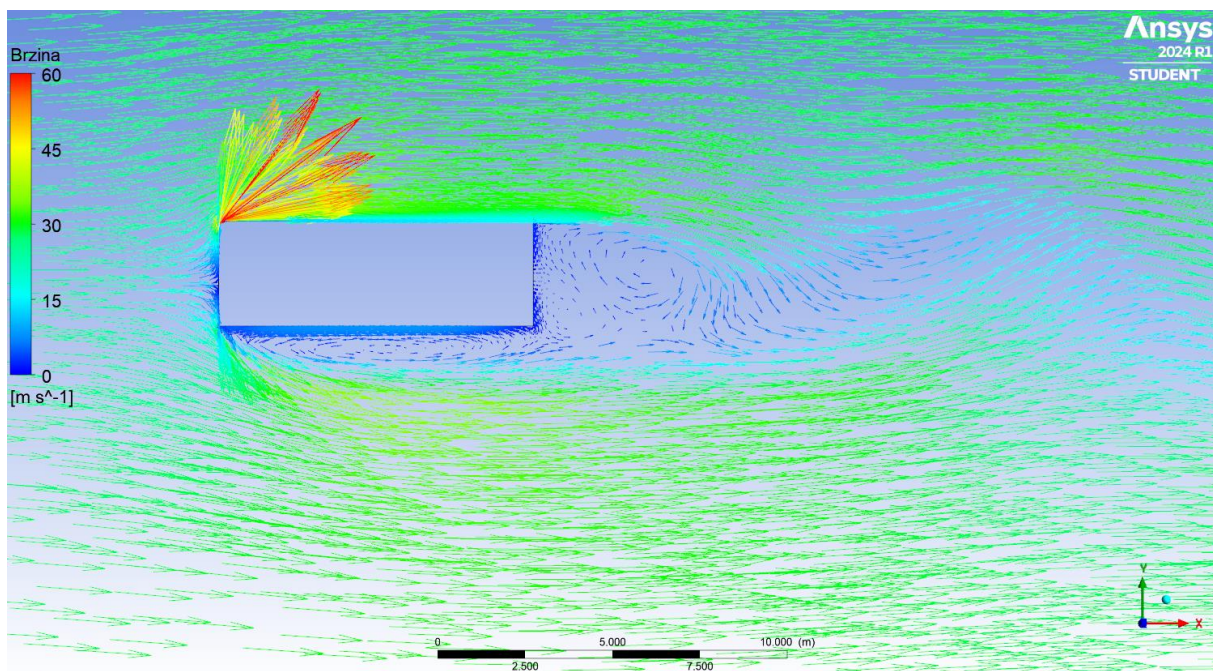
Slika 58. Polje strujnica brzine s radijusom 100mm



Slika 59. Polje strujnica brzine s radijusom 150mm



Slika 60. Polje strujnica brzine s radijusom 200mm



Slika 61. Polje strujnica brzine s radijusom 250mm

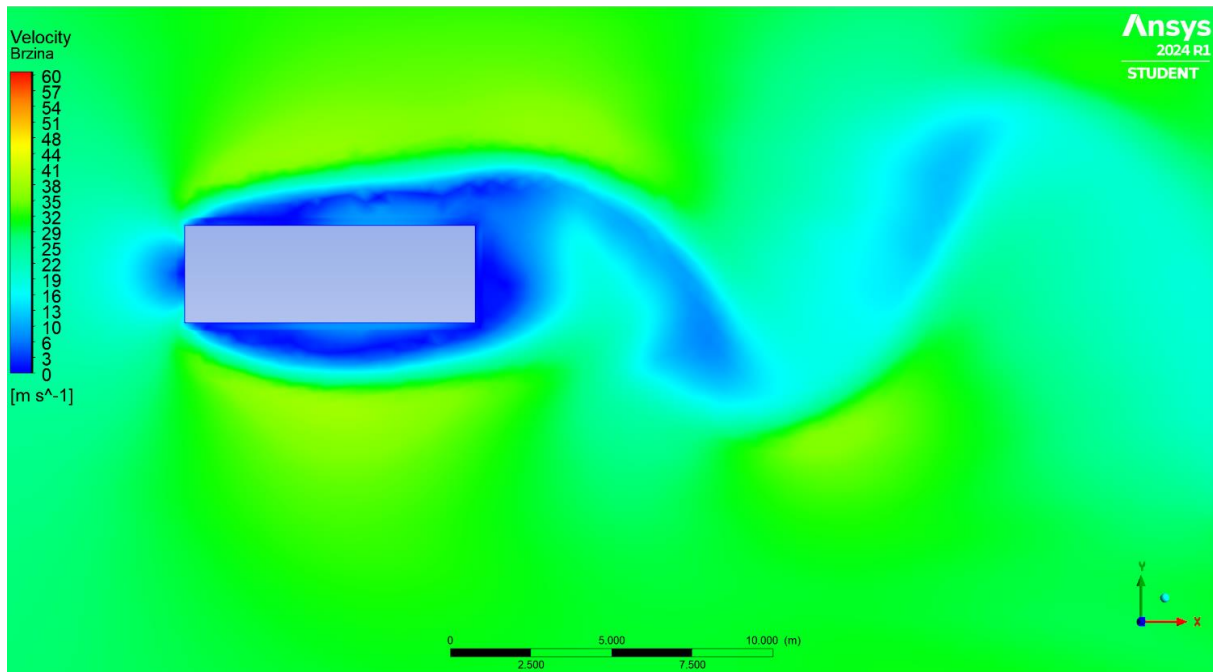
#### 4.1.3.2. Polje brzine

Na slikama od 62. do 67. prikazana su polja brzina za različite radijuse zakrivljenja prednjega gornjeg ruba, od radijusa 0 mm do radijusa 250 mm. Može se vidjeti da se povećanjem radijusa smanjuje veličina vrtložnog traga na gornjem dijelu vozila na kojem se nalazi radijus, a da se ne povećava veličina vrtložnog traga na dijelu vozila s donje i stražnje strane. Što je manja

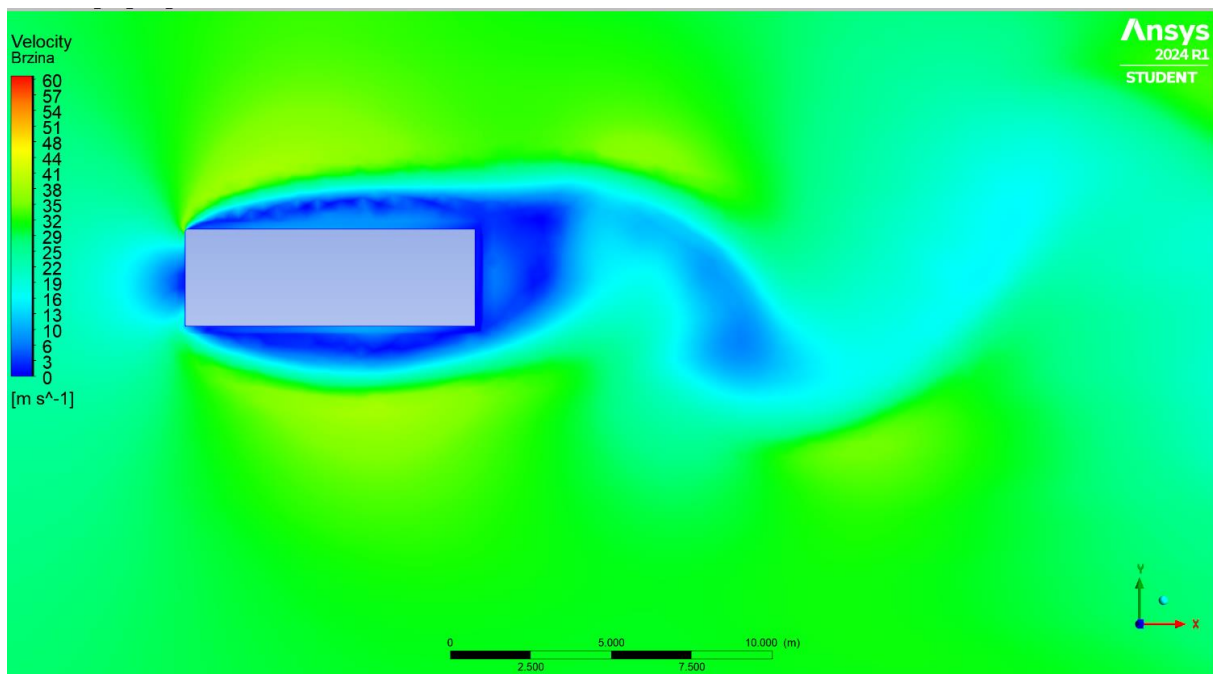


veličina vrtložnog traga, to je manji utjecaj toga dijela vozila na strujanje. Manjim utjecajem vozila na strujanje manja je sila aerodinamičkog otpora pa tako i manji faktor otpora zraka.

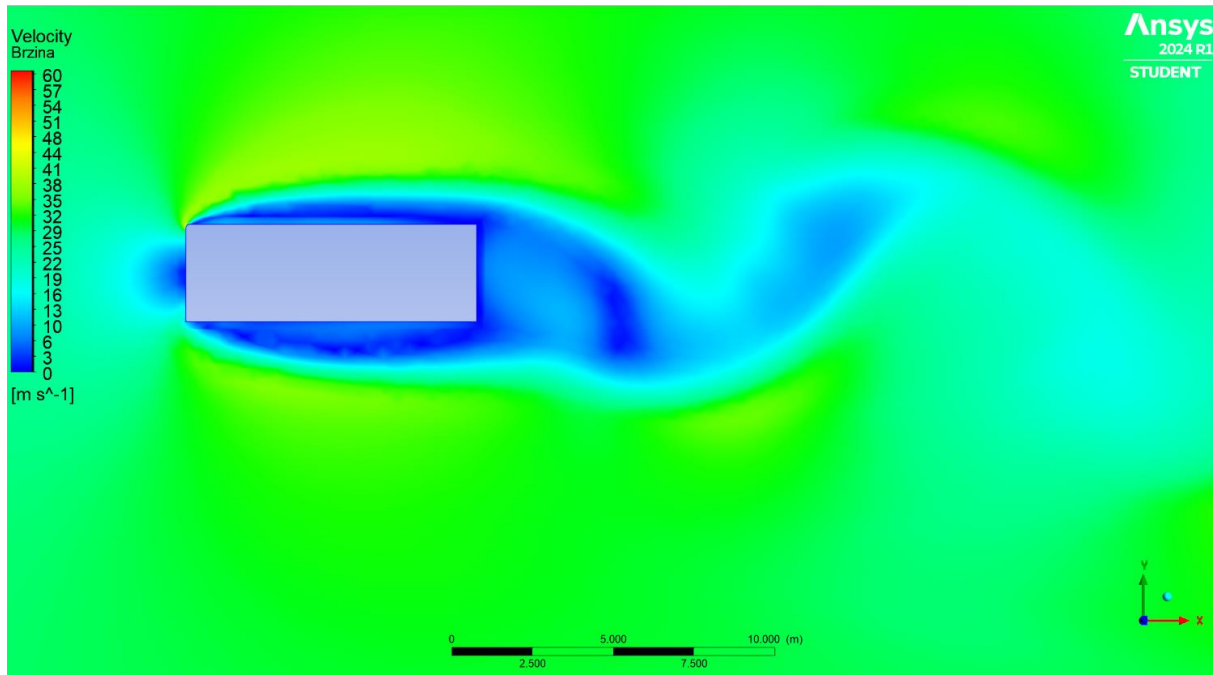
Sile otpora zraka kod tupih tijela najčešće su posljedica sila tlaka pa je zbog toga vrlo važno analizirati raspodjelu polja tlaka po površinama objekta.



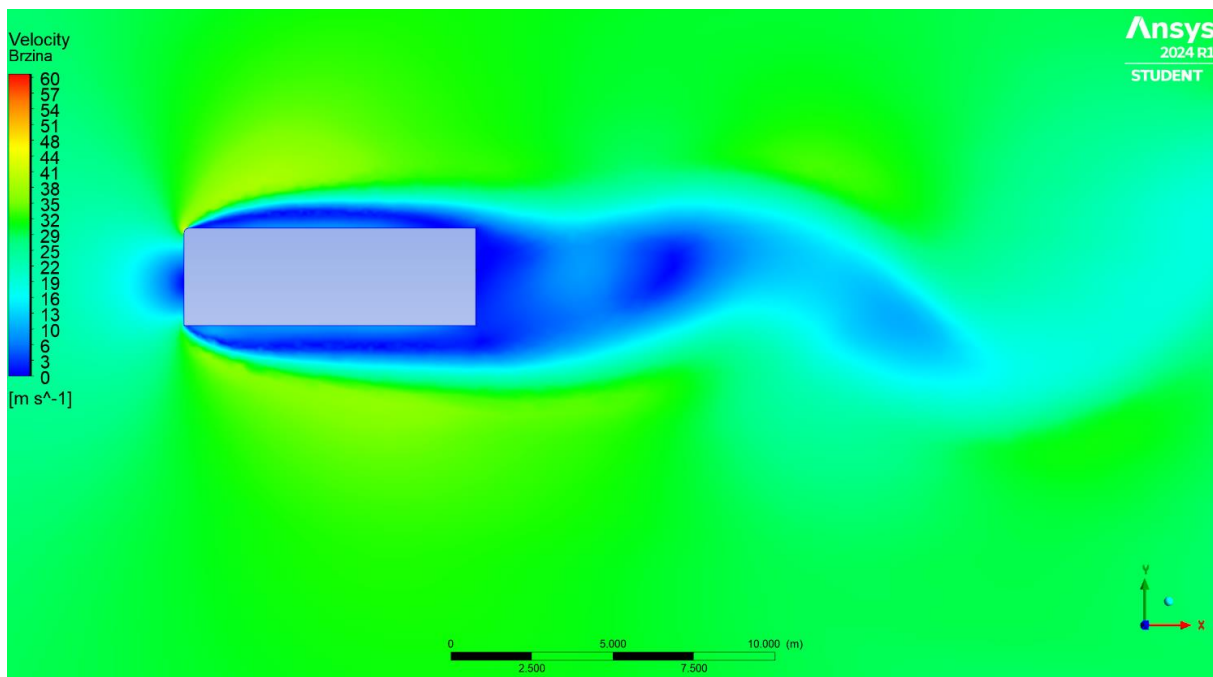
Slika 62. Polje brzine s radijusom 0mm



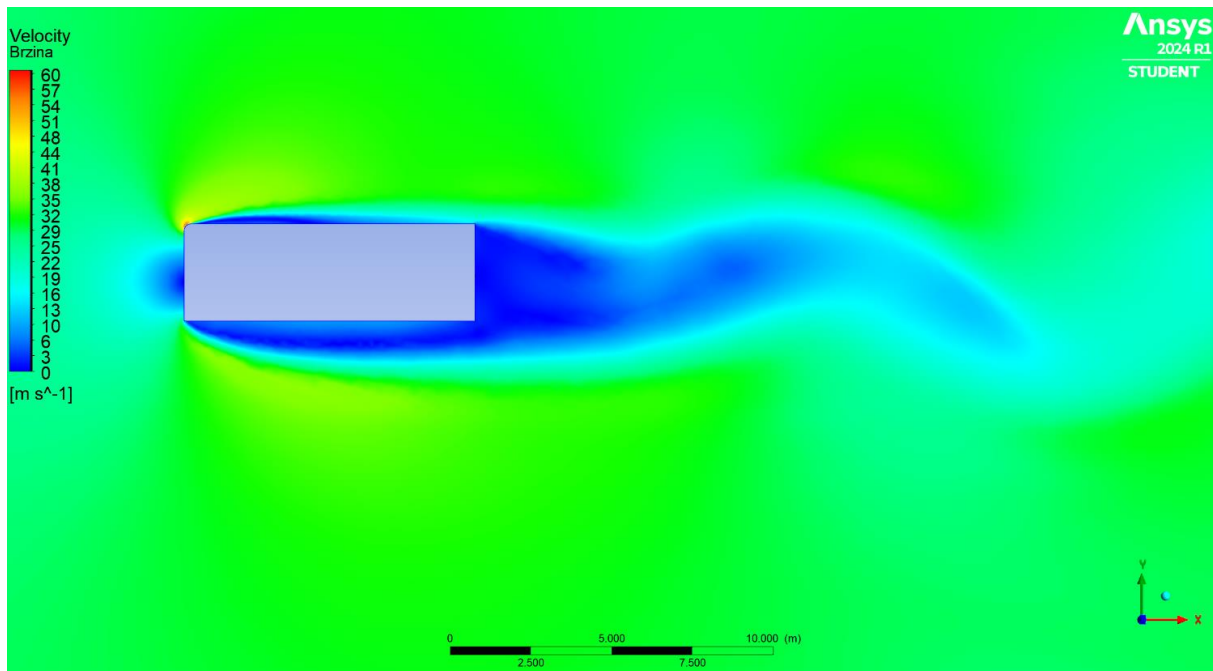
Slika 63. Polje brzine s radijusom 50mm



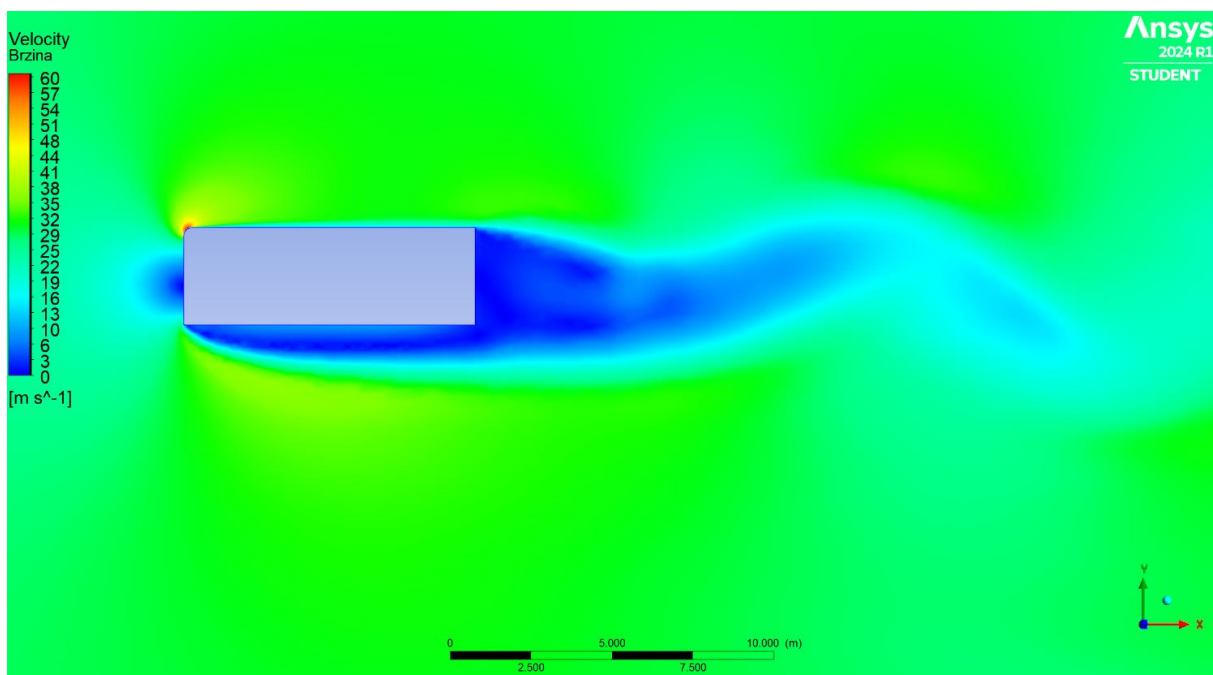
Slika 64. Polje brzine s radijusom 100mm



Slika 65. Polje brzine s radijusom 150mm



Slika 66. Polje brzine s radijusom 200mm

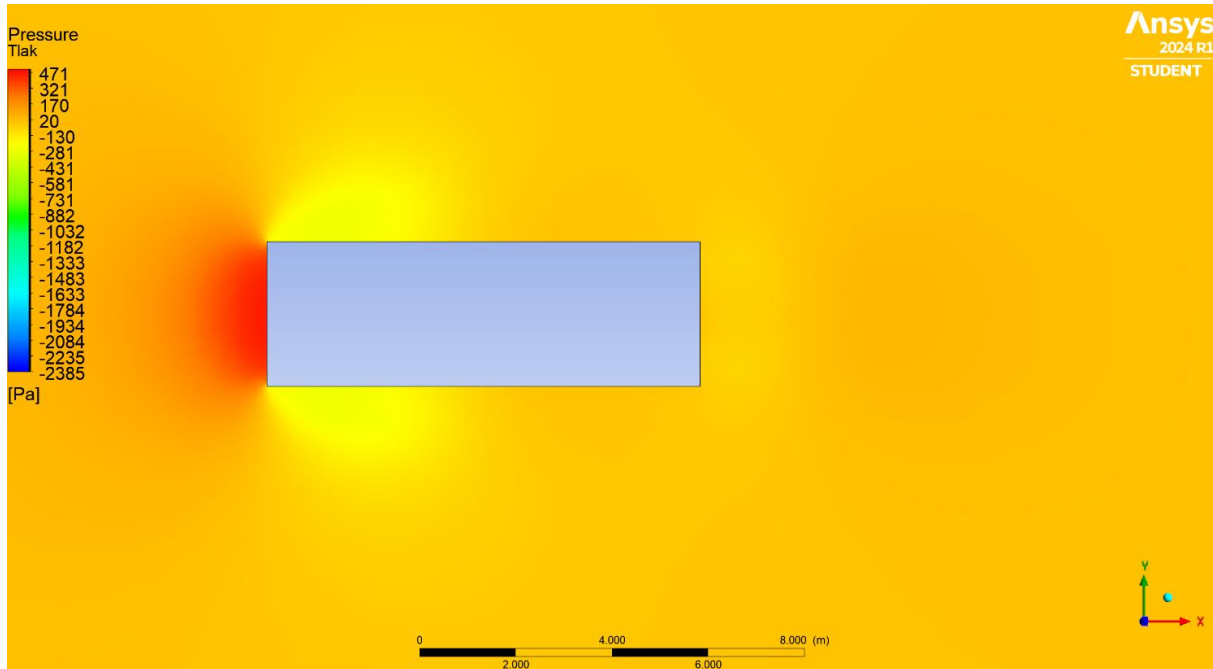


Slika 67. Polje brzine s radijusom 250mm

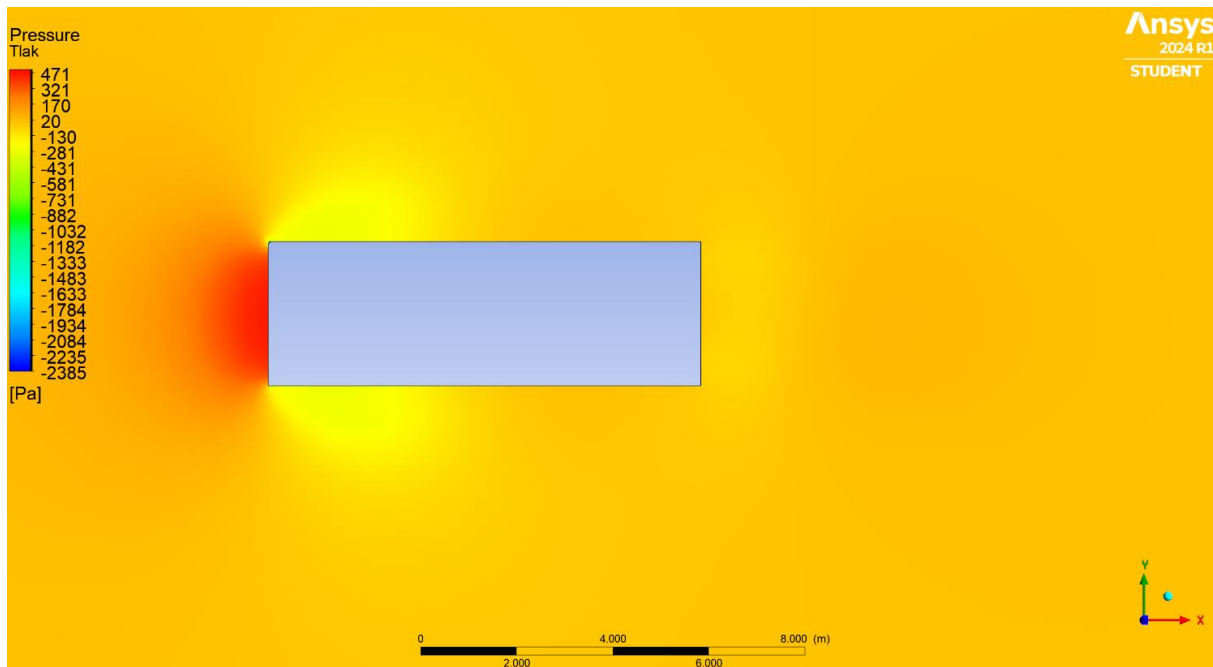
#### 4.1.3.3. Polje tlaka

Sile otpora zraka kod tupih tijela najčešće su posljedica sila tlaka pa je zbog toga vrlo važno analizirati polje tlaka. Crvena boja predstavlja područje pod pretlakom koja stvara pozitivnu silu na površinu. Kako se može vidjeti na slikama od 68. do 73., na prednjem je bridu zbog zaustavljanja zraka koji nastrojava, porastao tlak te je nastao aerodinamički otpor, dok je na gornjem, donjem i stražnjem dijelu vidljiva žuta boja, kao što se može vidjeti na Slici 68., koja

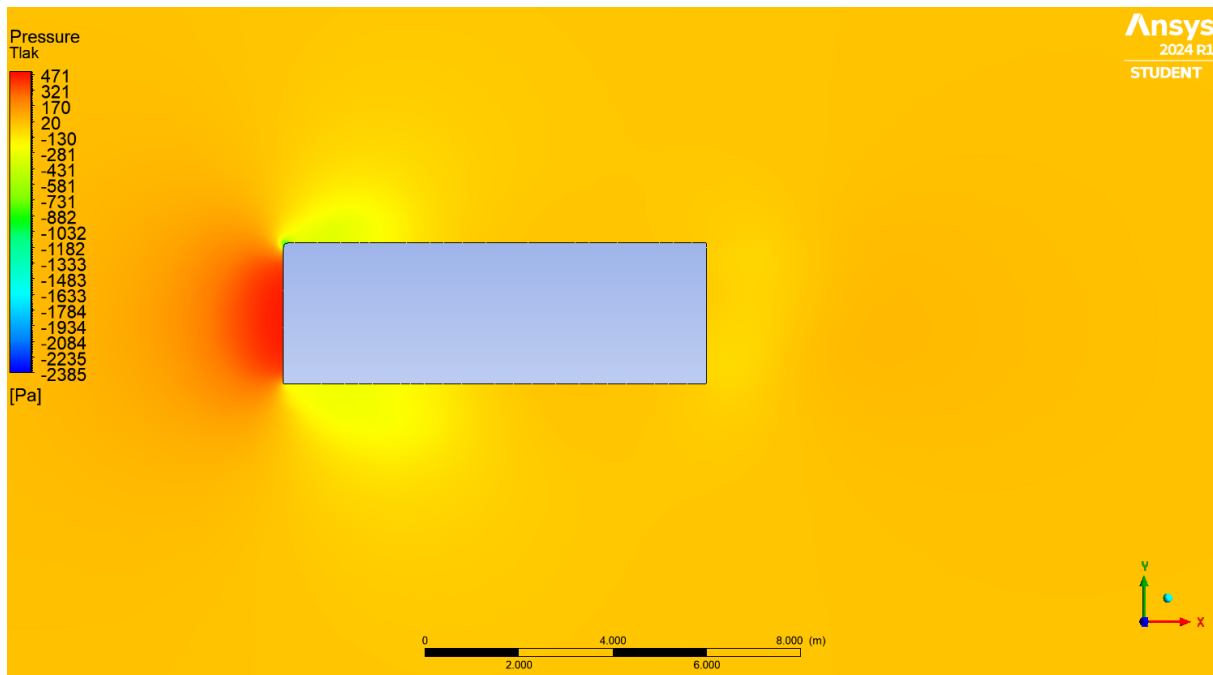
predstavlja potlak koji djeluje negativnom silom na površinu. Može se vidjeti da se povećanjem radijusa prednjega gornjeg ruba smanjuje potlak na gornjoj plohi, a da se potlak na donjoj i stražnjoj strani znatno ne mijenjaju.



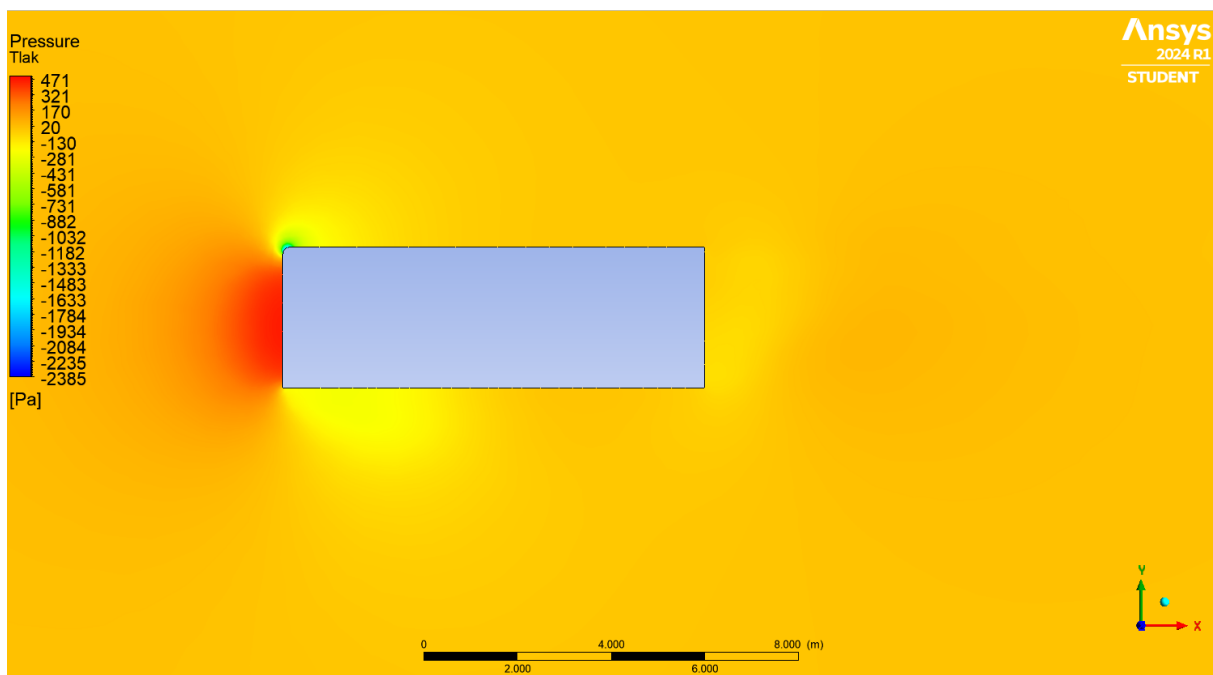
Slika 68. Polje tlaka s radijusom 0mm



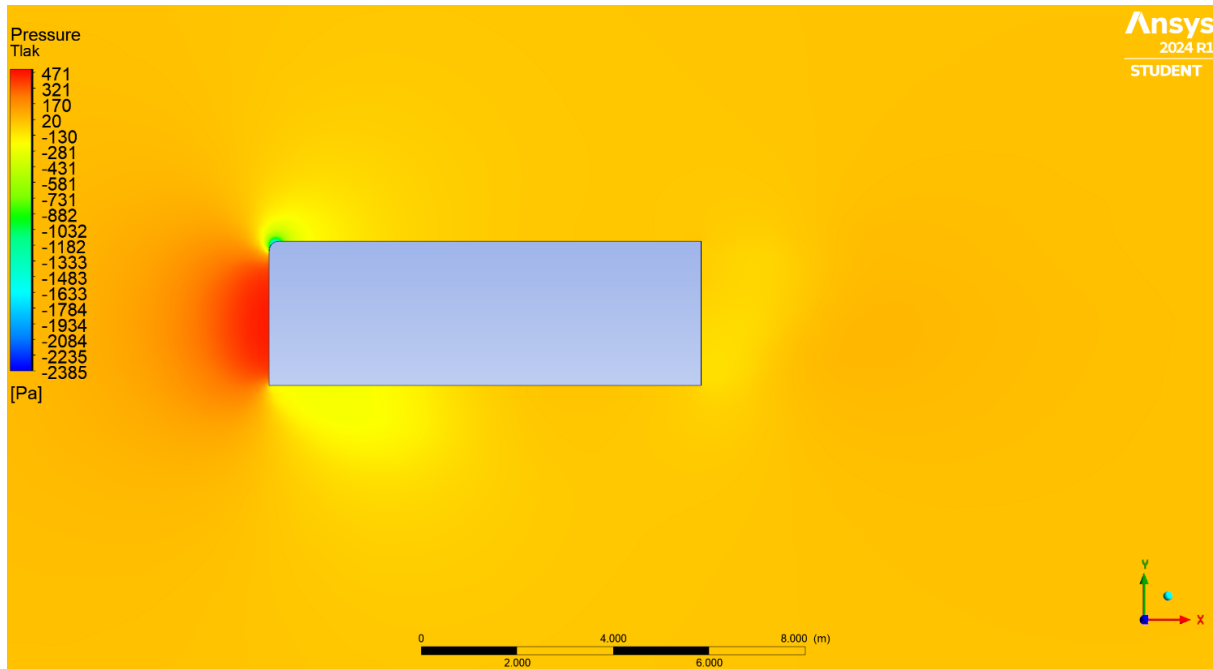
Slika 69. Polje tlaka s radijusom 50mm



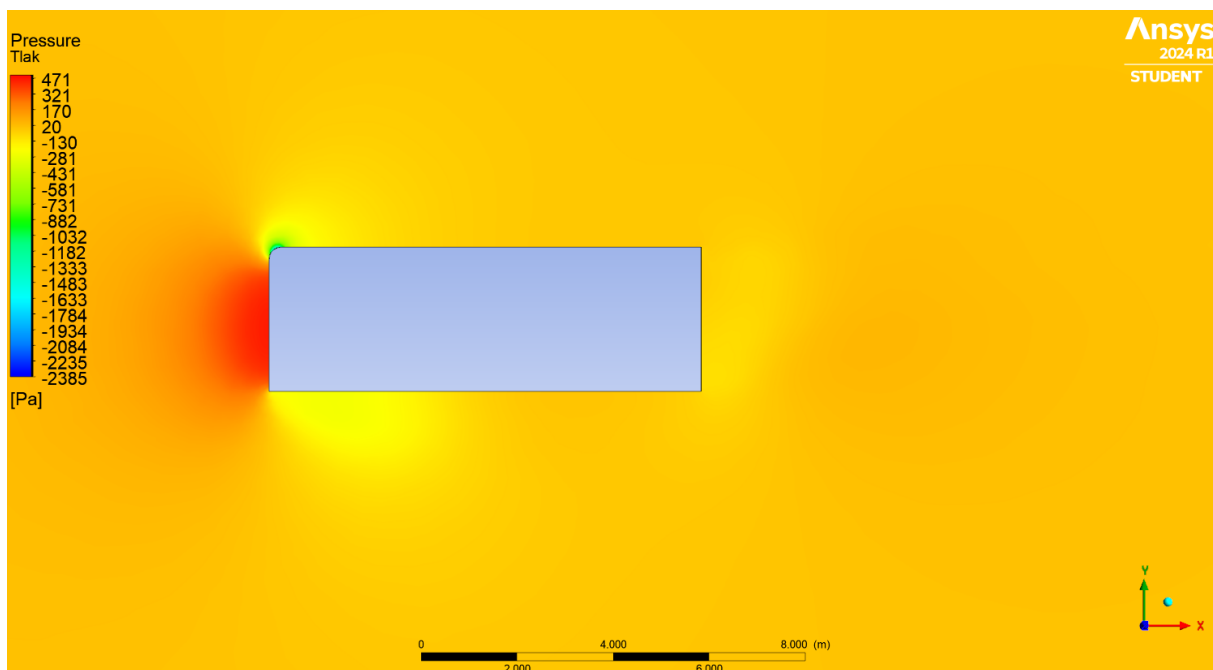
Slika 70. Polje tlaka s radijusom 100mm



Slika 71. Polje tlaka s radijusom 150mm



Slika 72. Polje tlaka s radijusom 200mm



Slika 73. Polje tlaka s radijusom 250mm

#### 4.1.4. Raspodjela faktora tlaka

Kako bi se vidjelo koji dijelovi vozila i kako utječu na otpor zraka, uveden je faktor tlaka  $C_p$ . Faktor tlaka  $C_p$  bezdimenzijska je mjera koja pokazuje promjenu tlaka u odnosu na promjenu brzine fluida ili uvjete toka, tj. pokazuje kako tlak varira duž površine objekta.

Jednadžba po kojoj se računa faktor tlaka glasi:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (14)$$

gdje je:

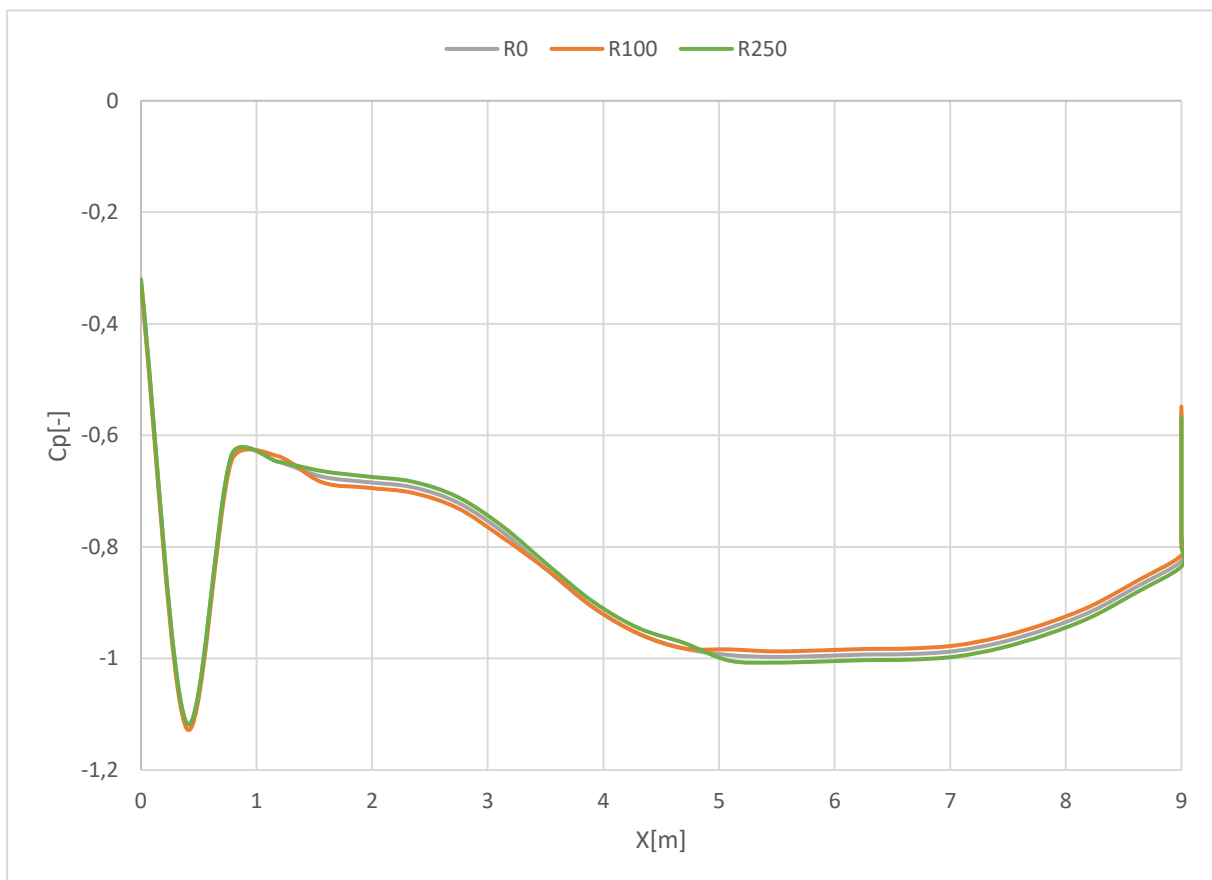
$p$  - tlak na površini objekta,

$p_\infty$  - slobodni tlak fluida daleko od objekta,

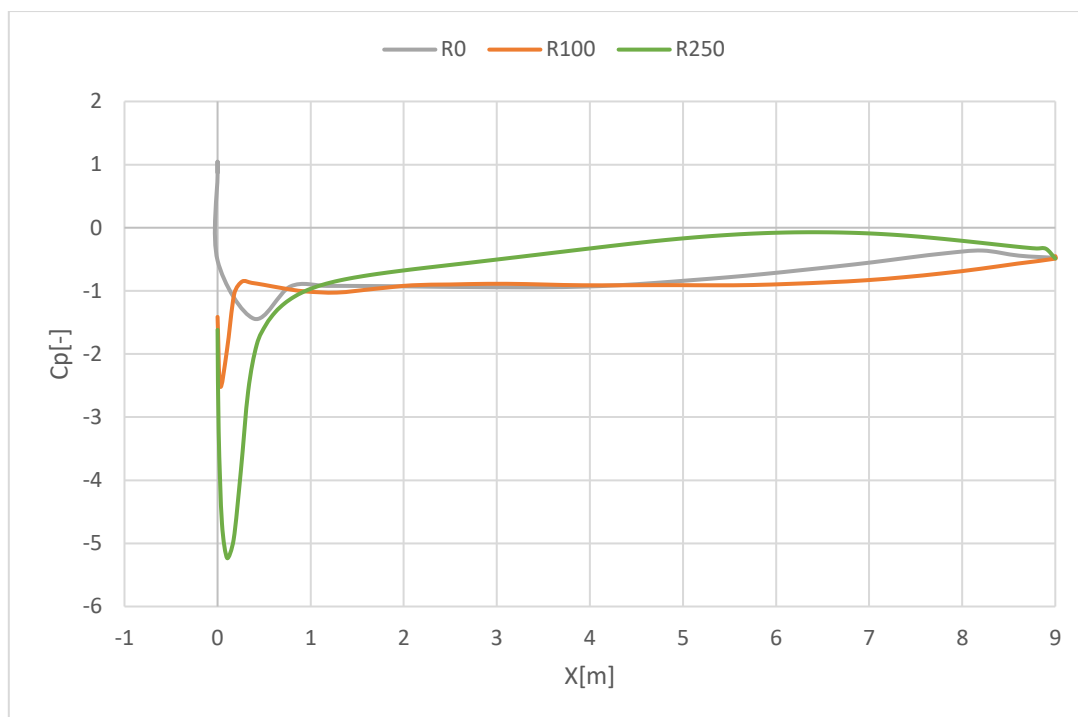
$\rho$  - gustoća fluida,

$v$  - brzina fluida u odnosu na objekt

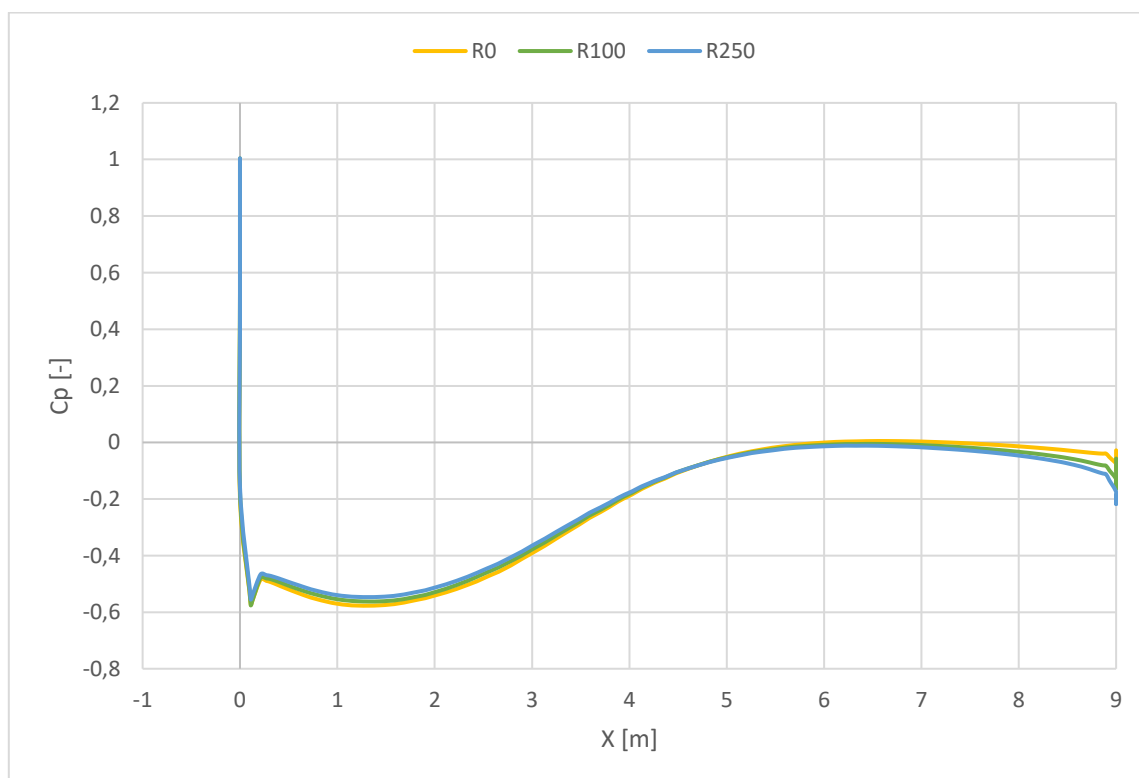
Vrijednost faktora tlaka koja je blizu jedan znači da je u toj točki vrlo visok u odnosu na slobodni tlak koji se javlja na prednjem dijelu objekta kao što se može vidjeti na dijagramima koji su prikazani na Slici 74., Slici 75., Slici 76. i Slici 77. Faktor tlaka koji je negativan ili blizu -1 znači da je tlak nizak u odnosu na slobodni tlak što je karakteristično za područja gdje fluid brzo struji, a to je, kao što se može vidjeti, područje ostatka vozila.



**Slika 74. Prikaz faktora tlaka po donjem dijelu vozila za 2D slučaj**

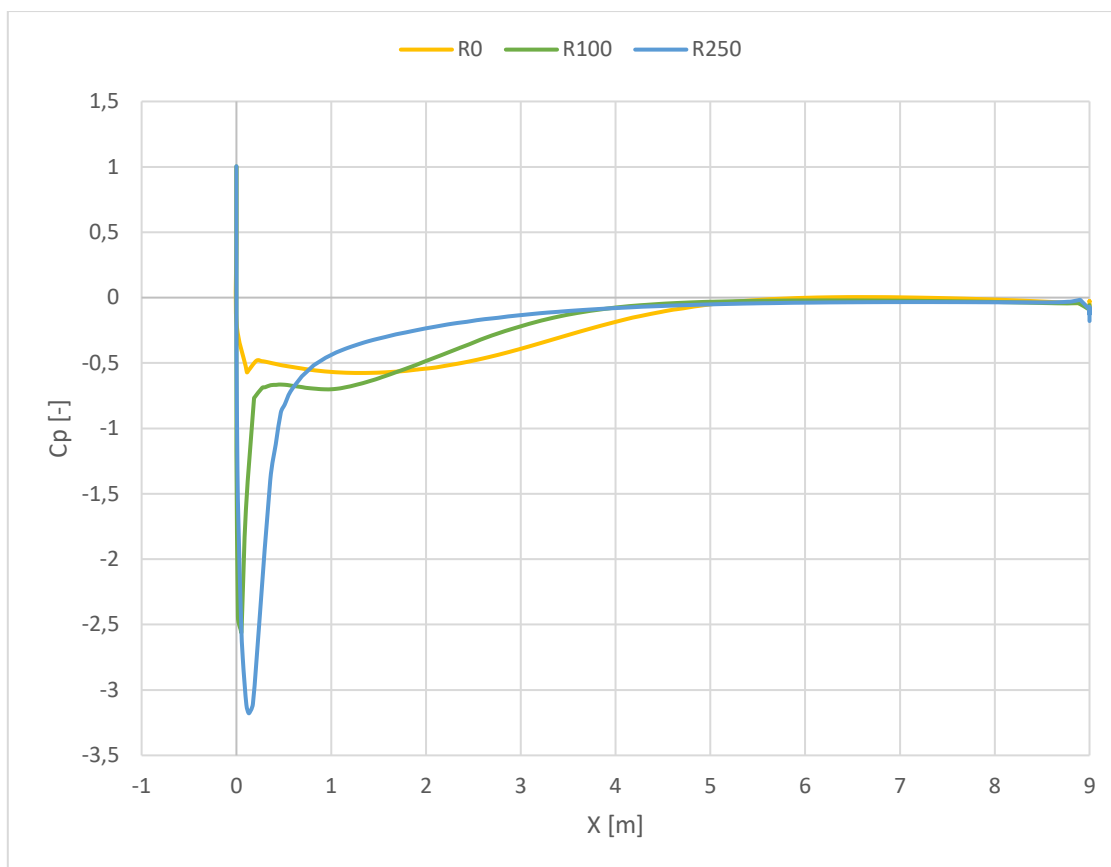


Slika 75. Prikaz faktora tlaka po gornjem dijelu vozila za 2D slučaj



Slika 76. Prikaz faktora tlaka po donjem dijelu vozila za 3D slučaj





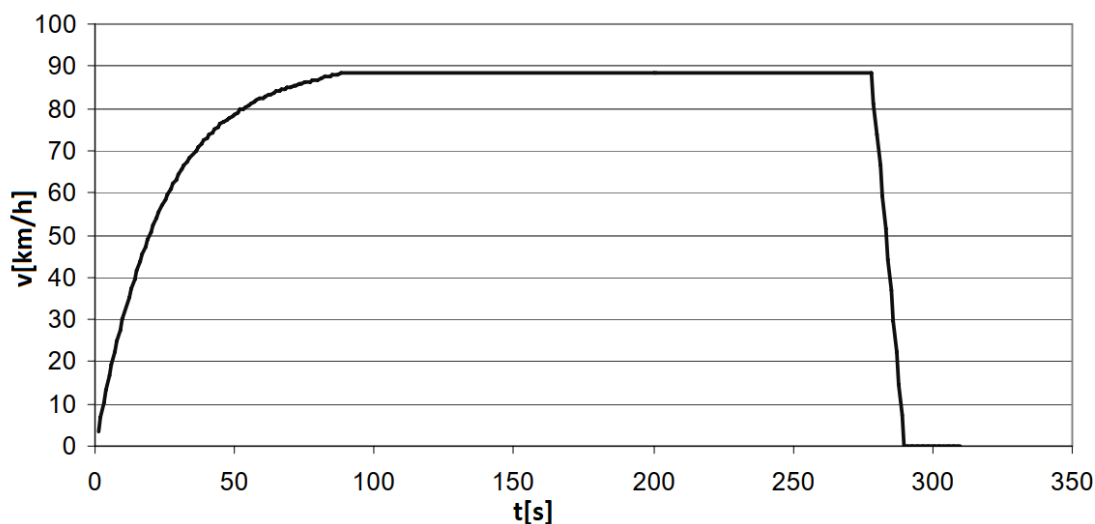
**Slika 77. Prikaz faktora tlaka po gornjem dijelu vozila za 3D slučaj**

Dijagrami koji su prikazani na Slici 73. i Slici 75. prikazuju kako je faktor tlaka raspoređen po donjoj konturi vozila za 2D i 3D slučaj, a dijagrami na Slici 74. i Slici 76. prikazuju kako je faktor tlaka raspoređen po gornjoj konturi vozila za 2D i 3D slučaj, zbog preglednosti dijagrama izabrani su samo radijusi 0, 100 i 250 mm. Iz dijagrama se može vidjeti kako se najveći tlak, tj. najveći otpor javlja pri radijusu zaobljenja od 0 mm i da se povećanjem radijusa tlak sve više smanjuje što govori da fluid brže struji preko konture vozila. Također se može vidjeti kako se na prednjoj plohi, koja prva dolazi u doticaj sa zrakom, javlja najveći tlak te se daljnjim prelaskom preko vozila brzina fluida naglo smanjuje pa se postepeno povećava kako dolazi sve do kraja vozila. Izraženije su promjene izraženije na gornjem dijelu vozila nego na donjem, kao što se može i vidjeti na dijagramima, zbog toga što se u ovome radu mijenjala zaobljenost prednjeg gornjeg ruba.

## 4.2. Dinamika vozila

### 4.2.1. Analiza potrošnje goriva

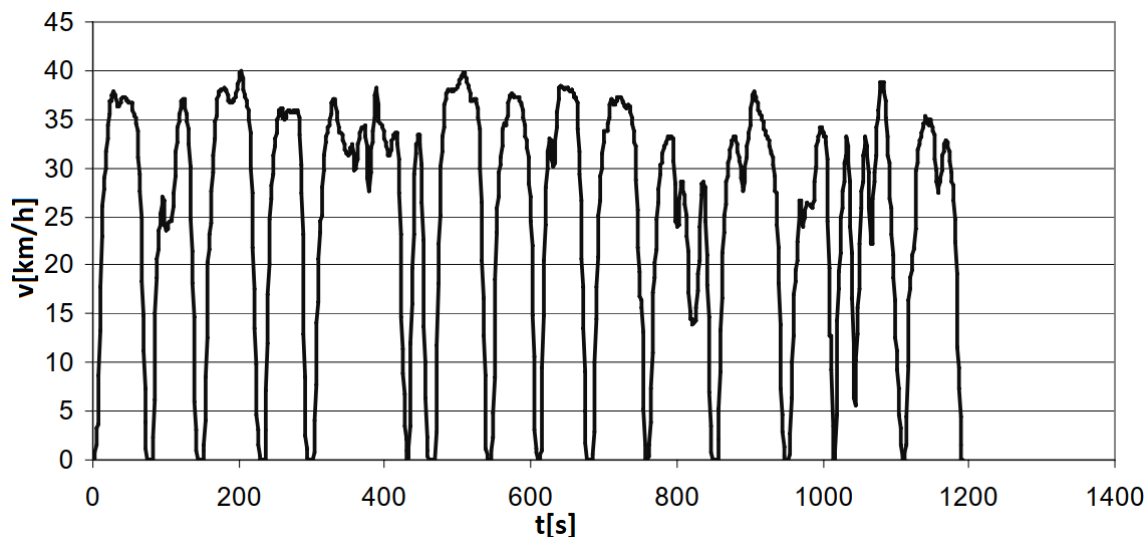
Potrošnja goriva izračunala se na osnovi fakotra otpora vozila u 2D i 3D slučaju za tri različita režima vožnje kao što je spomenuto u poglavlju *POTROŠNJA GORIVA*. Za režim *AUTOCESTA* upotrebljavao se ispitni vozni ciklus *Transit Coach Operating Duty Cycle – Commuter*[9] koji izgleda kao na Slici 78.



Slika 78. Ispitni vozni ciklus *Autocesta*[9]

Ciklus traje 310 sekundi od kojih se vozi 292 sekunde, udaljenost koju vozilo prijeđe iznosi 6 432,97 metara, maksimalna brzina koju postigne iznosi 88,74 km/h dok je srednja brzina 79,31 km/h.

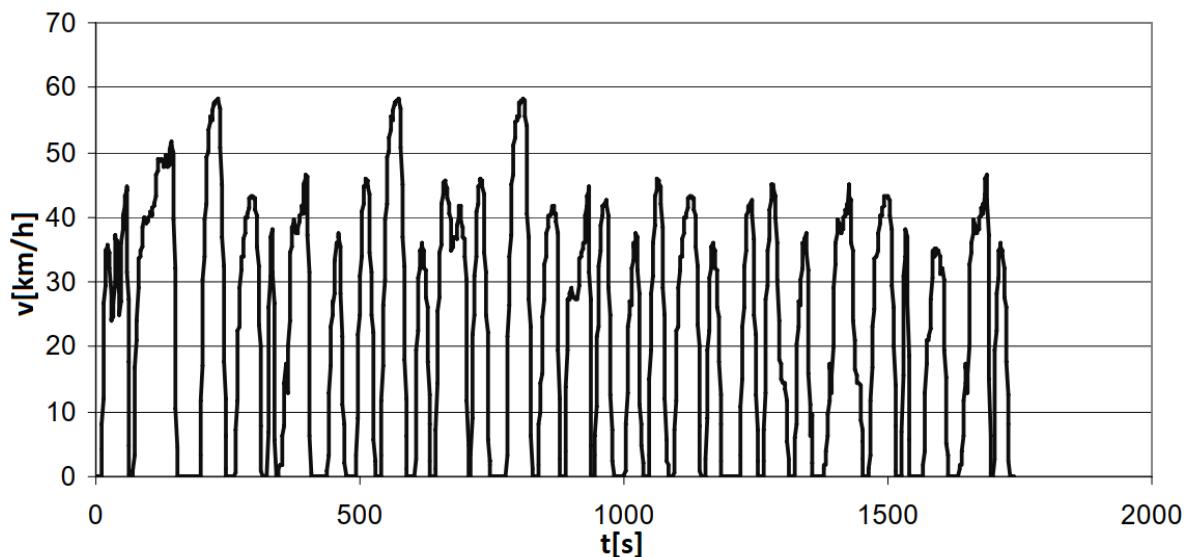
U režimu *PRIGRADSKA* upotrebljen je ispitni vozni ciklus *UG214 bus04: bus-lane*[9] koji se može vidjeti na Slici 79.



**Slika 79. Ispitni vozni ciklus Prigradska[9]**

Karakteristike su ispitnog ciklusa *Prigradska* da ciklus traje 1 192 sekundi od kojih se vozi 1 154 sekunde, udaljenost koju vozilo prijeđe iznosi 8 344,63 metra, maksimalna brzina koju postigne iznosi 39,8 km/h dok je srednja brzina 26,03 km/h.

Za režim *Gradska* korišten je ispitni vozni ciklus *Braunschweig City Driving Cycle*[9] koji se može vidjeti na Slici 80.

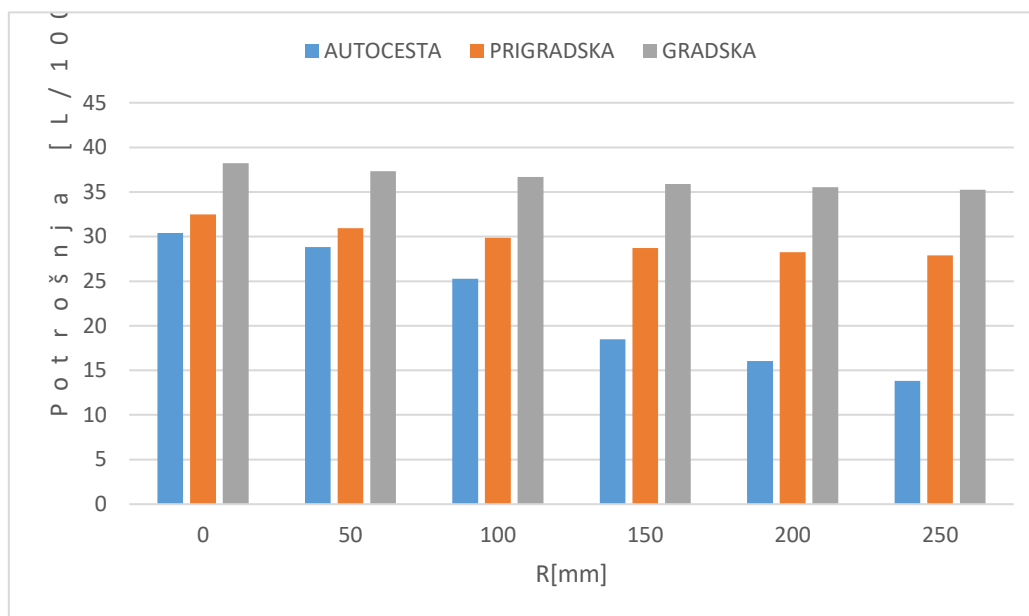


**Slika 80. Ispitni vozni ciklus Gradska[9]**

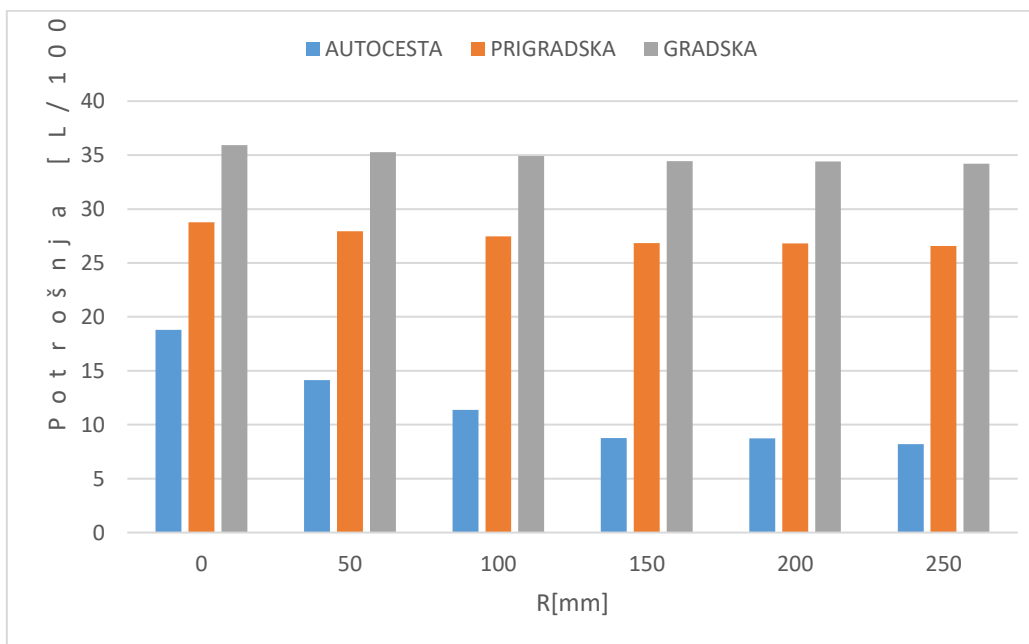
Ispitni ciklus *Gradska* traje 1 740 sekundi od kojih se vozi 1 452 sekunde, udaljenost koju vozilo prijeđe iznosi 10 900,32 metra, maksimalna brzina koju postigne iznosi 58,21 km/h dok je srednja brzina 27,03 km/h.

Nakon provedenih simulacija dobiveni su rezultati koji su prikazani dijagramima potrošnje goriva u ovisnosti o radijusu zaobljenja na Slici 81. za 2D slučaj i na Slici 82. za 3D slučaj.

Može se vidjeti da pri gradskom i prigradskom režimu vožnje faktor otpora zraka, tj. zaobljenost ne utječe značajno na potrošnju goriva zbog malih brzina kretanja vozila dok u režimu autoceste postoji značajna promjena potrošnje goriva u ovisnosti o velični zaobljenosti zbog velike brzine kretanja vozila.

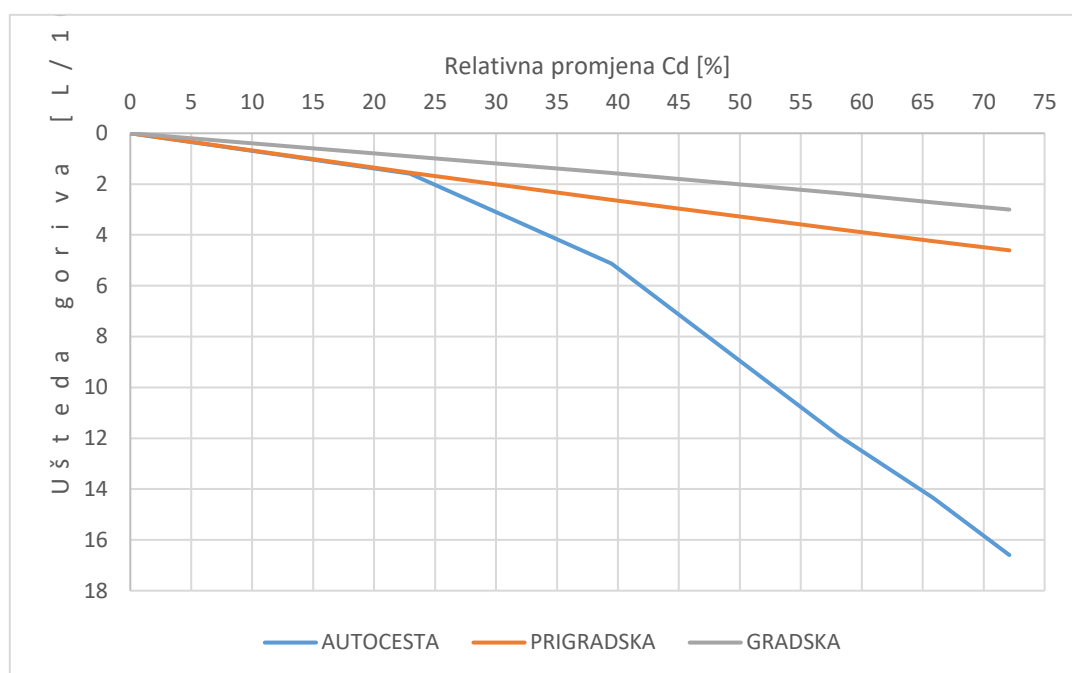


**Slika 81. Dijagram potrošnje goriva na 100 km za 2D**

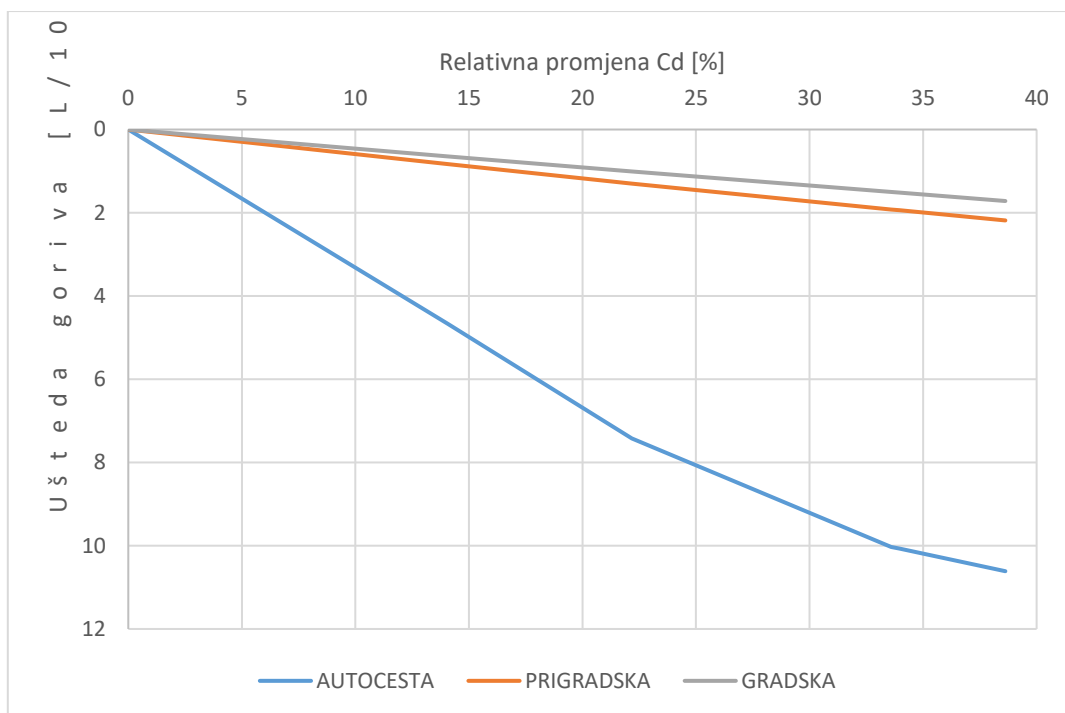


**Slika 82. Dijagram potrošnje goriva na 100 km za 3D**

Na dijagramima, koji su prikazani na Slici 83. i Slici 84., prikazana je ušteda goriva u ovisnosti o relativnoj promjeni faktora otpora zraka (koja je bazirana na faktoru otpora zraka pri zaboljenju od 0 mm) za 2D slučaj i 3D slučaj. Može se vidjeti kako povećanje faktora otpora zraka znatno utječe kod vožnje autocestom npr. smanjenjem otpora zraka za 38% potrošnja goriva se može smanjiti za 56%, tj. može se uštediti približno 11 L/100 km kao što se može vidjeti na dijagramu za 3D slučaj. Kod prigradskog režima smanjenjem otpora zraka za 38% potrošnja goriva se može smanjiti za 8%, tj. može se uštediti približno 2 L/100 km kao i u gradskom režimu gdje se otpor zraka smanji za 38%, a potrošnja goriva za 5%.

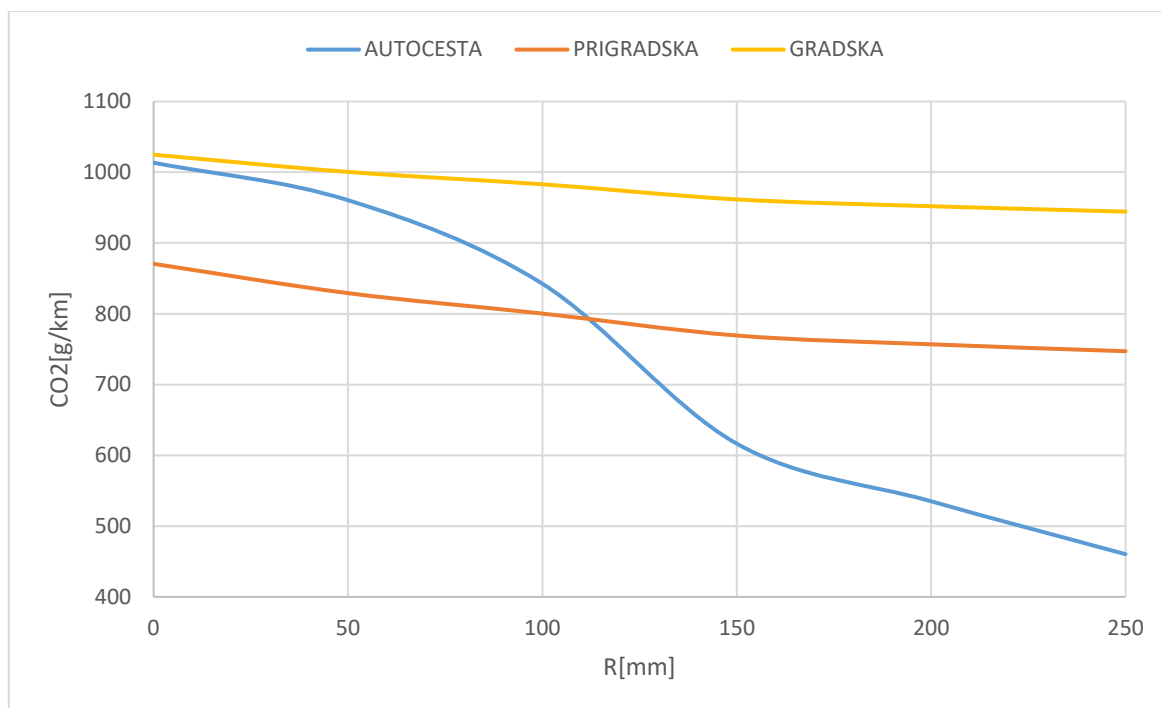


Slika 83. Dijagram uštede goriva u ovisnosti o relativnoj promjeni  $C_D$  za 2D slučaj

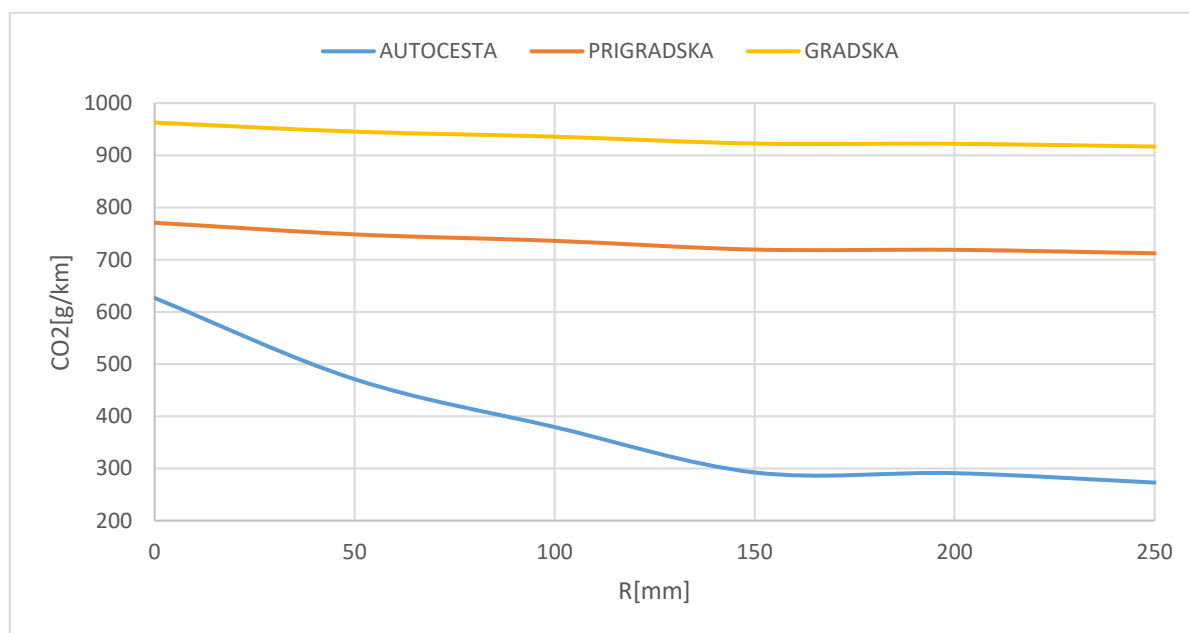


**Slika 84. Dijagram uštede goriva u ovisnosti o relativnoj promjeni  $C_D$  za 3D slučaj**

Također se u ovome radu promatra i emisija  $CO_2$  po kilometru koja se stvori kroz tri navedena režima rada, a rezultati su prikazani na dijagramima emisije  $CO_2$  u ovisnosti o radijusu zaobljenja, na Slici 85. za 2D slučaj i na Slici 86. za 3D slučaj, kako se emisija  $CO_2$  pri gradskom i prigradskom režimu vožnje značajno ne mijenja, zbog malih brzina kretanja vozila, dok u režimu autoceste postoji značajna promjena emisije  $CO_2$  u ovisnosti o velični zaobljenosti zbog velike brzine kretanja vozila.



Slika 85. Dijagram ovisnosti emisije  $CO_2$  o radijusu zaobljenja za 2D slučaj



Slika 86. Dijagram ovisnosti emisije  $CO_2$  o radijusu zaobljenja za 3D slučaj

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio prikazati utjecaj pojedinih segmenata vozila na ukupan otpor zraka te prikazati na pojednostavljenim 2D i 3D modelima autobusa kako smanjiti zahtjeve za računalne resurse, a dobiti što točnije vrijednosti onim vrijednostima koji se dobivaju u stvarnosti. Rad se najviše bazirao na promjeni zaobljenja prednjeg gornjeg ruba vozila te kako i koliko utječe takva promjena na aerodinamiku vozila, a naročito na potrošnju goriva pri različitim voznim ciklusima. U radu se nisu detaljno kvantitativno razmatrali rezultati dobiveni simulacijama zbog ograničenih resursa studentske verzije ANSYS i jer bi za to bio potreban veći opseg ispitivanja i vremena.

Rad sadrži izbor optimalnog postava za simulaciju računalne dinamike fluida za 2D i 3D te tablice u kojima su prikazani faktori otpora zraka za zaobljenja prednjeg gornjeg ruba od 0, 50, 100, 150, 200 i 250 mm. Također i dijagrami koji prikazuju koliko su dobivene vrijednosti faktora otpora zraka u 2D i 3D različite od vrijednosti iz literature. Analiziralo se uz pomoć dijagrama faktora tlaka u ovisnosti o duljini vozila koji dijelovi i koliko utječu na aerodinamiku vozila. U radu je obrađen postupak izrade simulacijskog modela za analizu dinamike vozila te prikazani rezultati potrošnje goriva, emisije  $CO_2$ , uštede goriva u ovisnosti o faktoru otpora zraka za ispitne procedure koje simuliraju vožnju autocestom, prigradsku vožnju i gradsku vožnju.

Analizom rezultata može se vidjeti kako već malim zaobljenjem prednjega gornjeg brida dolazi do znatne promjene faktora otpora zraka. Nadalje, važno je napomenuti kako se sve većim povećanjem radijusa ne dobiva sve manji faktor otpora zraka, tj. te dvije vrijednosti nisu proporcionalne, već se u jednom trenutku faktor otpora zraka neznatno mijenja s povećanjem radijusa. Simulacije su također pokazale kako postoji značajna razlika u ispitivanju 2D i 3D modela npr. kod simulacije računalne dinamike fluida gdje se može vidjeti da je faktor otpora zraka veći u 2D nego u 3D. Također se uočilo kako je i s ograničenim resursima studentske verzije moguće dobiti približne vrijednosti kao i u realnim uvjetima. Iz dobivenih krivulja faktora tlaka može se iščitati kako se najveći tlak, tj. najveći otpor javlja pri radijusu zaobljenja od 0 mm i da se povećanjem radijusa tlak sve više smanjuje što govori da fluid brže struji. Također se može vidjeti kako se na prednjoj plohi, koja prva dolazi u doticaj sa zrakom, javlja najveći tlak te se daljnjim prelaskom preko vozila brzina fluida naglo smanjuje pa se postepeno povećava kako dolazi sve do kraja vozila. Izraženije promjene su više vidljive na gornjem dijelu vozila nego na donjem zbog toga što se u ovome radu mijenjala zaobljenost prednjeg gornjeg



rubu. Ispitivanjem utjecaja faktora otpora zraka na potrošnju goriva dokazalo se kako povećanje faktora otpora zraka znatno utječe kod vožnje autocestom npr. smanjenjem otpora zraka za 38% potrošnja goriva se može smanjiti za 56%, kod prigradskog režima smanjenjem otpora zraka za 38% potrošnja goriva se može smanjiti za 8%, a kod gradskog režima smanjenjem otpora zraka za 38% potrošnja goriva se može smanjiti za 5%.

Može se zaključiti da kod vožnje manjim brzinama promjena faktora otpora zraka ne utječe znatno dok kod vožnje većim brzinama promjena faktora otpora zraka igra značajniju ulogu.

**LITERATURA**

- [1] Puljić, Damjan: Završni rad, Zagreb, 2012., 06.01.2025
- [2] Hucho, W. H.: Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition, 06.01.2025
- [3] Mashhadi A., Sohankar A., Alam M. M.: Flow over rectangular cylinder: Effects of cylinder aspect ratio and Reynolds number; International Journal of Mechanical Sciences; 2021., 06.01.2025.
- [4] [https://eduidea.org/smotra2013/radovi/pdf\\_06.pdf](https://eduidea.org/smotra2013/radovi/pdf_06.pdf), 06.01.2025.
- [5] [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Fizika\\_1\\_predavanja\\_11.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Fizika_1_predavanja_11.pdf), 06.01.2025
- [6] [https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model) , 06.01.2025.
- [7] <https://courses.ansys.com/index.php/courses/solution-setup-in-ansys-fluent/lessons/how-to-initialize-the-solution-in-ansys-fluent-lesson-5/> , 06.01.2025.
- [8] [https://www.mercedes-benz-bus.com/en\\_DE/models/intouro/facts/facts-intouro.html](https://www.mercedes-benz-bus.com/en_DE/models/intouro/facts/facts-intouro.html), 06.01.2025.
- [9] <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7984f440f0b642860d8c2d/ppr-354.pdf>, 06.01.2025.
- [10] [https://www.ina.hr/app/uploads/2020/01/Dizelska\\_goriva\\_izdanje\\_14.pdf](https://www.ina.hr/app/uploads/2020/01/Dizelska_goriva_izdanje_14.pdf), 18.01.2025.
- [11] [https://www.sucic.info/voz/voz\\_co2.php](https://www.sucic.info/voz/voz_co2.php), 18.01.2025.