

Analiza nestacionarnog strujanja zraka oko 2-D generičkog oblika autobusa u horizontalnoj ravnini

Puljić, Damjan

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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:235:645146>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Damjan Puljić

Zagreb, 2012

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić
Dr. sc. Ante Šoda

Student:

Damjan Puljić

Zagreb, 2012

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

Posebno se zahvaljujem svome mentoru dr. sc. Anti Šodi i asistentu Momiru Sjeriću na pomoći i uloženom trudu i vremenu pri izradi ovog rada.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske 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:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS - 3A/PDS - 3A

Sadržaj:

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	V
Popis oznaka	VI
Sažetak.....	VII
1 Uvod u aerodinamiku vozila	1
2 Aerodinamika tupih tijela (eng. Bluff Body Aerodynamics)	4
2.1 Zakoni dinamike fluida	4
2.2 Laminarno i turbulentno strujanje	4
2.3 Aerodinamičke sile	6
2.4 Aerodinamički koeficijenti.....	8
3 Računalna dinamika fluida (CFD).....	9
3.1 Mreže.....	9
3.2 Opis alata	11
4 Definicija geometrije, mreža i postavki strujanja	12
4.1 Geometrija.....	12
4.2 Mreže.....	13
4.2.1 Granični sloj (eng. <i>Boundary Layer</i>).....	15
4.2.2 Nestrukturirani dio mreže i domena strujanja	16
4.2.3 Zaobljenje vrhova	17
4.3 Postavke strujanja	18
4.3.1 Numeričke postavke strujanja.....	18
4.3.2 Fizikalne postavke strujanja	20
5 Analiza rezultata	21
5.1 Utjecaj kvalitete mreže.....	23
5.1.1 Geometrija R0.....	23
5.1.2 Geometrija R0.05.....	24
5.1.3 Geometrija R0.2.....	25
5.2 Utjecaj zaobljenja vrhova	26
5.2.1 Prikaz rezultata	26
5.2.2 Usporedba s podacima iz literature	28

5.3	Analiza utjecaja modela turbulencije i vremenskog koraka.....	29
5.4	Analiza raspodjele otpora zraka (C_d) po površini tijela.....	30
5.5	Prikaz i opis strujanja.....	32
5.5.1	Strujnice.....	32
5.5.2	Polje brzina.....	35
5.5.3	Polje tlaka.....	37
6	Zaključak.....	39
	Prilozi.....	40
	Literatura.....	41

Popis slika

Slika 1: Prikaz smanjenja koeficijenta otpora zraka (C_d) europskih automobila kroz povijest [1].....	1
Slika 2: Udio otpora vožnje u potrošnji goriva za gradske i međugradske autobuse [1]	2
Slika 3: Koeficijenti otpora zraka za tri različita oblika autobusa [1].....	3
Slika 4: Utjecaj smanjenja koeficijenta otpora zraka na uštedu goriva [1]	3
Slika 5: Laminarno strujanje oko aerodinamičkog profila	5
Slika 6: Turbulentno strujanje oko beskonačno dugog valjka	5
Slika 7: Tipična promjenjivost koeficijenta otpora zraka o vremenu u nestacionarnom turbulentnom strujanju	5
Slika 8: Pojava vrtloga pri opstrujavanju zraka oko horizontalnog presjeka generičkog autobusa	6
Slika 9: Prikaz koeficijenta otpora zraka C_d i udjela sila trenja za različite geometrije.....	7
Slika 10: Polje tlaka oko 2-D presjeka autobusa geometrije R0.05	7
Slika 11: Periodičko odvajanje vrtloga tegljača i utjecaj na ostale sudionike u prometu (motociklista) [6]	7
Slika 12: Definicija referentne površine vozila [1].....	8
Slika 13: Nestrukturirana mreža.....	9
Slika 14: Strukturirana mreža	10
Slika 15: Hibridna mreža.....	10
Slika 16 a) i b): Zadana geometrija	12
Slika 17: Hibridna mreža s označenim dijelovima	14
Slika 18: Fino područje mreže oko tijela	14
Slika 19: Uz samu stjenku (eng. <i>Wall</i>) se nalazi strukturirani dio mreže, granični sloj (eng. <i>Boundary layer</i>).....	14
Slika 20: Granični sloj grube mreže	15
Slika 21: Granični sloj srednje mreže.....	15
Slika 22: Granični sloj fine mreže	15
Slika 23: Raspodjela čvorova po bočnom bridu	16
Slika 24: Mreža u području vrha geometrije R0	17
Slika 25: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.025.....	17
Slika 26: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.05	17
Slika 27: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.1.....	17
Slika 28: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.2.....	17
Slika 29: Skica utjecaja različitih vrijednosti Strouhalovog broja na koeficijent C_d	19
Slika 30: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0 (fina mreža)	22
Slika 31: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.025 (fina mreža)	22
Slika 32: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.05 (fina mreža)	22
Slika 33: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.1 (fina mreža)	22
Slika 34: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.2 (fina mreža)	22
Slika 35: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent otpora C_d za geometriju R0	23
Slika 36: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent uzgona C_l za geometriju R0.....	23
Slika 37: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent otpora C_d za geometriju R0.05	24
Slika 38: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent uzgona C_l za geometriju R0.05.....	24

Slika 39: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent otpora C_d za geometriju R0.2	25
Slika 40: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent uzgona C_l za geometriju R0.2.....	25
Slika 41: Usporedni prikaz koeficijenta otpora C_d za svih pet korištenih geometrija	26
Slika 42: Usporedni prikaz koeficijenta uzgona C_l za svih pet promatranih geometrija	27
Slika 43: Srednje vrijednosti koeficijenta otpora zraka (C_d) za različite geometrije (fina i srednja mreža).....	27
Slika 44: Utjecaj zaobljenja prednjeg brida autobusa na koeficijent otpora zraka [1].....	28
Slika 45: Utjecaj zaobljenja bridova na zadanoj geometriji (fina i srednja mreža).....	28
Slika 46: Izmjereni koeficijenti otpora u zračnom kanalu za 2-D pravokutnik različitih omjera duljine i širine [9].....	28
Slika 47: Usporedba utjecaja različitog modela turbulencije i različitog vremenskog koraka na koeficijent otpora (C_d) za geometriju R0.2	29
Slika 48: Usporedba utjecaja različitog modela turbulencije i različitog vremenskog koraka na koeficijent otpora (C_d) za geometriju R0.2 (bez prikaza S-A modela turbulencije sa malim vremenskim korakom)	29
Slika 49: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.....	30
Slika 50: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.025.....	30
Slika 51: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.05.....	30
Slika 52: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.1.....	30
Slika 53: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.2.....	30
Slika 54: Utjecaj zaobljenja na koeficijente otpora prednje i stražnje stjenke.....	31
Slika 55 od a) do e): Trenutna slika strujanja. Prikazano je polje brzina u smjeru osi x i strujnice za pet korištenih geometrija.	33
Slika 56: Nakošeni stražnji kraj VW bube [1].....	34
Slika 57: Stražnji kraj Mini Coupe-a. Vidi se aktivni stražnji spojler koji rješava problem potlaka na stražnjem staklu	34
Slika 58 a) do e): Trenutna slika strujanja. Prikazano je polje brzina u smjeru osi x za pet korištenih geometrija.	36
Slika 59, a) do e): Trenutna slika strujanja. Prikazano je polje tlaka za pet korištenih geometrija.	38

Popis tablica

Tablica 1: Pregled i karakteristike mreža.....	13
Tablica 2: Postavke strujanja	20
Tablica 3: Srednje vrijednosti koeficijenta otpora C_d za svih pet geometrija (fina i srednja mreža)	27
Tablica 4: Aerodinamički koeficijenti na prednjoj i stražnjoj stijenci za svaku geometriju	31

Popis oznaka

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica (SI)
v	brzina	m/s
v_{zvuka}	brzina zvuka	m/s
ρ	gustoća	kg/m ³
H_{ref}	referentna visina	m
μ	dinamička viskoznost	Pas
L	duljina	m
D	širina	m
r	radijus zaobljenja	m
F_D	sila otpora	N
F_L	sila uzgona	N
q_∞	dinamički tlak neporemećene struje	Pa
ρ_∞	gustoća zraka neporemećene struje	kg/m ³
u_∞	brzina strujanja neporemećene struje	m/s
μ_∞	dinamička viskoznost neporemećene struje	Pas
A_{ref}	referentna površina	m ²
T	temperatura	K
α	napadni kut	deg
R	radijus vanjskog ruba domene strujanja	m
Δt	vremenski korak	s
f	frekvencija odvajanja vrtloga	Hz
T	period odvajanja vrtloga	s
Ma	Machov broj	-
Re	Reynoldsov broj	-
C_D	aerodinamički koeficijent otpora	-
C_L	aerodinamički koeficijent uzgona	-
$NTPER$	broj vremenskih koraka u periodu odvajanja vrtloga	-
St	Strouhalov broj	-

Sažetak

Zadatak ovog rada je istražiti strujanje oko zadanog generičkog oblika autobusa i prikazati utjecaj različitog stupnja zaobljenja oštih bridova na aerodinamičke koeficijente sile otpora zraka. Isto tako, cilj je analizirati poprečne sile, koje mogu djelovati na autobus prilikom udara bočnog vjetra. U skladu s tim, provedeno je dvodimenzijsko (2-D) numeričko ispitivanje generičkog oblika horizontalnog presjeka autobusa (pravokutnika) s različitim zaobljenjem vrhova. Ispitivanje je provedeno koristeći računalni program Fluent [REF: www.fluent.com].

Ispitivanje je provedeno na 2-D geometriji sa različitim zaobljenjima oštih bridova, od geometrije bez zaobljenja $r/D = 0$ (pri čemu je r radijus zaobljenja, a D je širina generičkog autobusa), do geometrije sa relativno velikim zaobljenjem od $r/D = 0.2$.

Analiza rezultata obuhvaća utjecaj zaobljenja oštih vrhova zadanog pravokutnika, utjecaj kvalitete diskretizacije domene strujanja (finoće CFD mreže), utjecaj dvaju različitih modela turbulencije te dviju veličina vremenskog koraka u nestacionarnim simulacijama. Razmatrana je raspodjela koeficijenta tlaka i otpora zraka po površini tijela, a uspoređene su trenutne slike strujnica oko tijela.

Dobiveni rezultati uspoređeni su s podacima iz literature.

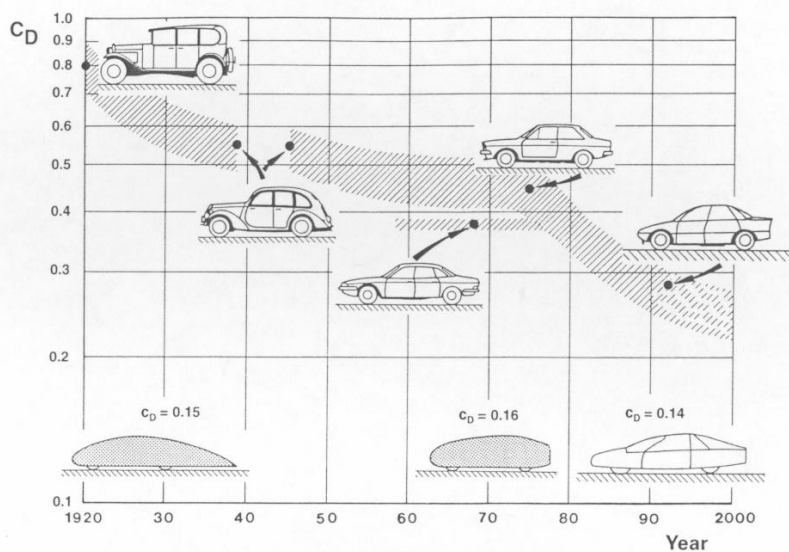
Analizom rezultata dobivene su osnovne smjernice kojih se treba pridržavati pri oblikovanju karoserije autobusa. Rezultati pokazuju da već malo zaobljenje bridova autobusa dovodi do značajnog smanjenja koeficijenta otpora zraka (C_d). Isto tako za zadane dimenzije autobusa i manje radijuse zaobljenja, oblikovanje prednjeg dijela ima veći utjecaj na aerodinamičke koeficijente, nego oblikovanje zadnjeg dijela. Razlog tome je što je tada pretlak na prednjoj strani presjeka veći od potlaka koji se generira na stražnjoj strani. Kod većih zaobljenja situacija se mijenja, jer koeficijent otpora zraka na prednjoj stranici poprima vrijednosti bliže nuli ili čak negativne, te vrlo malo sudjeluje u ukupnom koeficijentu otpora, pa stražnji kraj preuzima dominantan utjecaj u otporu zraka.

Na kraju rada prikazane su trenutne slike strujanja, pomoću kojih su dobiveni rezultati dodatno objašnjeni.

1 Uvod u aerodinamiku vozila

Općenito, aerodinamika je znanost koja proučava utjecaj zraka na tijela oko kojih zrak struji. Aerodinamika vozila je specijalizirana za strujanje zraka oko vozila. 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 veću važnost, jer 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 davali razna rješenja vezana za oblikovanje vozila, koja su poboljšavala performanse [1].

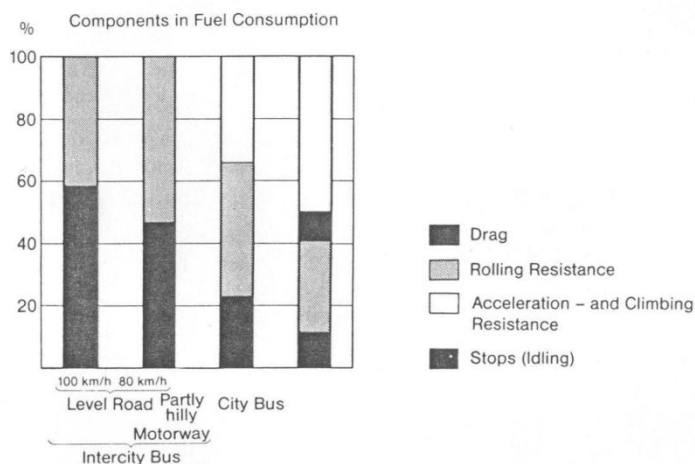
Dodatnu važnost, prilikom konstruiranja vozila za komercijalnu upotrebu (serijska vozila - osobni automobili, autobusi, kamioni...), aerodinamika je dobila u 70-im i 80-im godinama prošlog stoljeća, kada su porast cijene naftnih derivata i pojava ekološke svijesti doveli do toga da se potrošnja vozila mora smanjiti, što se zadržalo do danas. Osim konstruiranja motora i prijenosa snage sa što većom iskoristivošću, potrošnja se može smanjiti i smanjenjem sile otpora vožnje. U glavne sile otpora vožnje spadaju otpor kotrljanja i otpor zraka (aerodinamički otpor). Sila otpora kotrljanja se smanjuje odgovarajućom konstrukcijom pneumatika i kotača, dok se aerodinamički otpor smanjuje odgovarajućim oblikovanjem vozila [2]. Na Slici 1 vidimo kako su u određenim razdobljima u povijesti automobilske industrije zabilježena smanjenja faktora otpora zraka (C_d) kod komercijalnih vozila u europski. Na slici se također vidi i koeficijenti otpora zraka pojedinih prototipa koji su postojali u tom vremenu (prikazani su u dnu slike), te je jasno da aerodinamika nudi oblike s malim koeficijentom otpora od početka automobilske industrije. Najveća promjena koeficijenta u serijskim automobilima je uslijedila nakon naftne krize, odnosno poskupljenja pogonskih goriva.



Slika 1: Prikaz smanjenja koeficijenta otpora zraka (C_d) europskih automobila kroz povijest [1]

Aerodinamički otpor stvara sila otpora zraka koja djeluje na vozilo. Sila otpora zraka je ovisna o obliku vozila, tj. o koeficijentu otpora zraka C_d . Koeficijent otpora zraka je bezdimenzijska veličina koja nam daje podatak vezan za oblik promatranog tijela, te je preko koeficijenta otpora moguće uspoređivati aerodinamička svojstva različitih oblika, bez obzira na njihovu veličinu (koeficijent otpora zraka (C_d) je opisan u Poglavlju 2.4). Koeficijent otpora zraka je postao sinonim aerodinamike vozila. Povijest je pokazala razne načine kako postići što manji C_d (pogledati [1]) i važno je istaknuti da su, ne tako rijetko, dovoljne relativno male promjene oblika s kojima se postiže drastično smanjenje koeficijenta otpora zraka. U literaturi se za takve promjene koristi naziv optimizacija detalja (eng. *Detail Optimization* [1]). Upravno jedan takav detalj oblikovanja vozila je prikazan u ovome radu.

Tema ovog rada je pokazati kako detalj zaobljenja bridova na autobusu utječe na aerodinamičke koeficijente. Da bi se bolje shvatila važnost zaobljenja bridova potrebno je 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 su maksimalne dimenzije autobusa, koje moraju biti u propisanim granicama (duljina, visina, širina) kako bi autobus zadovoljavao homologacijske propise. Ta dva ograničenja navode na kutijasti oblik autobusa, koji za propisane maksimalne dimenzije nudi najviše prostora za putnike. Na žalost, takav oblik često daje nepovoljne aerodinamičke osobine. Što je koeficijent otpora veći to je veća i potrošnja goriva, a time i cijena prijevoza i cijena zagađenja okoliša. Cilj kod oblikovanja autobusa je, naravno, smanjiti C_d , ali istovremeno ne zaboraviti na spomenuta ograničenja u vidu oblika. To navodi na spomenutu optimizaciju detalja. Zaobljenje bridova je upravo jedan detalj koji je vrlo bitan za C_d , jer se već vrlo malim zaobljenjem postiže drastično smanjenje otpora zraka, što ćemo u ovome radu i pokazati.



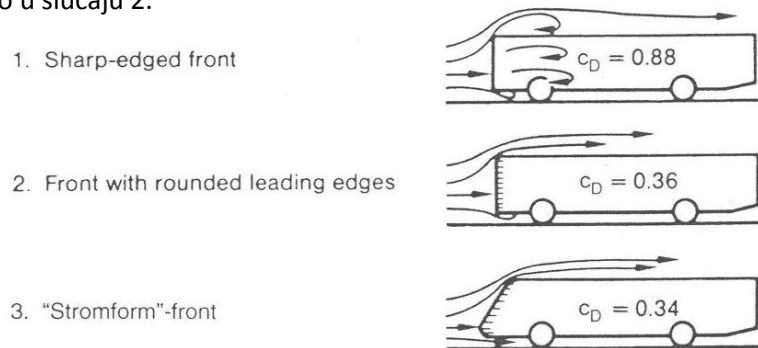
Pojmovi na Slici 2:

- eng. *Drag* – otpor zraka
- eng. *Rolling Resistance* – otpor kotrljanja
- eng. *Acceleration* – ubrzanje
- eng. *Climbing Resistance* – otpor penjanja
- eng. *Idling* – rad u praznom hodu
- eng. *City Bus* – gradski autobus
- eng. *Intercity Bus* – međugradski autobus
- eng. *Level Road* – ravna cesta
- eng. *Partly hilly* – djelomično brdovito
- eng. *Motorway* - autocesta

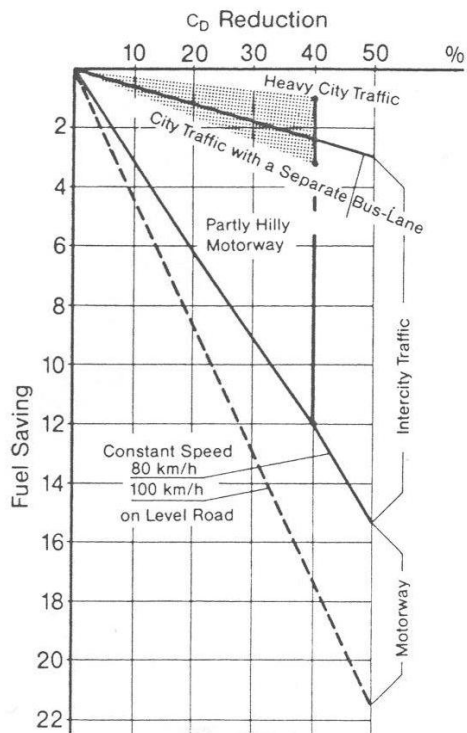
Slika 2: Udio otpora vožnje u potrošnji goriva za gradske i međugradске autobuse [1]

Na Slici 2 istaknuto je u kolikom udjelu sila aerodinamičkog otpora sudjeluje u ukupnoj potrošnji goriva, ovisno o namjeni autobusa. Ovdje je važno vidjeti gdje je i koliko primjenjiva aerodinamička optimizacija autobusa. Vidimo da je pri manjim brzinama i čestim promjenama režima vožnje (u gradu) otpor zraka tek manji „potrošač“ goriva, dok je pri većim brzinama i konstantnom režimu vožnje otpor zraka dominantna stavka u ukupnim otporima, te se njegovim smanjenjem postižu znatne uštede goriva.

Na Slici 3 vidimo tri različito oblikovana prednja kraja autobusa. Prvi je autobus sa oštrim bridovima (eng. *Sharp-Edged Front*), drugi je sa zaobljenim bridovima (eng. *Rounded Leading Edges*), a treći autobus ima preoblikovani cijeli prednji kraj (naziv za tako oblikovani prednji kraj je eng. *Streamlined* ili njem. *Stromformig*). Vidimo da se relativno malim zaobljenjem bridova dobiva značajno smanjenje otpora zraka, dok se dodatnim preoblikovanjem cijelog prednjeg dijela dobiva puno manje poboljšanje, pa se takvo oblikovanje, kao u trećem slučaju, koristi kod autobusa čija namjena to opravdava (npr. međugradski autobus – slika 2). U ovom radu će se prikazati utjecaj zaobljenja bridova, sličan kao u slučaju 2.



Slika 3: Koeficijenti otpora zraka za tri različita oblika autobusa [1]



Slika 4: Utjecaj smanjenja koeficijenta otpora zraka na uštedu goriva [1]

Na Slici 4 možemo vidjeti utjecaj smanjenja koeficijenta otpora zraka (eng. *Cd Reduction*) na uštedu u potrošnji goriva (eng. *Fuel Saving*). Ovdje se jasno vidi za koje vrste autobusa je optimizacija oblika nužna, kako bi potrošnja goriva bila prihvatljiva i konkurentna na tržištu. Vidimo da autobusi koji se kreću većim brzinama duže vrijeme (autocesta) imaju najveću uštedu u potrošnji goriva, dok je ušteda kod autobusa u velikim gradskim gužvama zanemariva (isti zaključak kao na Slici 2).

2 Aerodinamika tupih tijela (eng. Bluff Body Aerodynamics)

Aerodinamika tupih tijela proučava strujanje fluida oko tijela koja nisu aerodinamički oblikovana, odnosno tupih tijela. Takvi oblici se često susreću u strojarstvu. Motorna vozila su upravo takva skupina tijela koja svojim oblikom spadaju u kategoriju aerodinamički neoblikovanih tijela, odnosno u eng. literaturi nazivana „Bluff Bodies“, a u njem. literaturi „Stumpferkoerper“.

2.1 Zakoni dinamike fluida

Kao i za klasičnu fiziku, tako i za dinamiku fluida koriste se osnovni zakoni fizike:

- Zakon očuvanja mase
- Zakon očuvanja momenta količine gibanja (drugi Newtonov zakon)
- Zakon očuvanja energije (prvi zakon termodinamike)

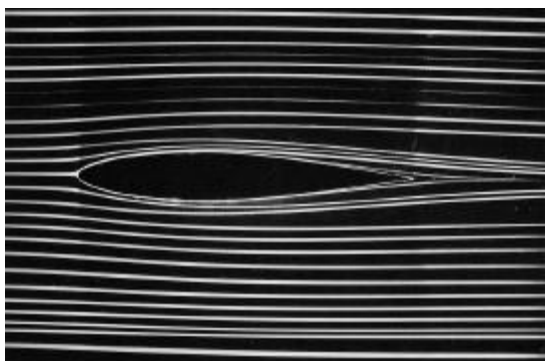
Bitno se razlikuju dvije vrste strujanja, stlačivo i nestlačivo. U stlačivom strujanju se gustoća fluida mijenja, dok je u nestlačivom strujanju gustoća fluida konstantna u vremenu i prostoru, tj. u cijeloj domeni strujanja. U nestlačivom strujanju jednadžba očuvanja energije postaje jednadžba temperaturnog 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 [3]. U razmatranjima u ovom radu, brzine strujanja zraka su daleko ispod brzine zvuka, pa se strujanje promatra kao nestlačivo.

$$M_a = \frac{v}{v_{zvuka}}$$

2.2 Laminarno i turbulentno strujanje

Prema stanju graničnog sloja, strujanje fluida se može podijeliti i na laminarno i turbulentno strujanje (Slika 5 i Slika 6). Laminarno strujanje je strujanje pri kojem se slojevi fluida ne miješaju i u potpunosti je opisano s dvije jednadžbe, jednadžbom kontinuiteta i jednadžbom očuvanja momenta i u jednostavnim slučajevima se može riješiti analitički [5], dok se složeniji slučajevi rješavaju pomoću računalne dinamike fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics* – CFD), o kojoj će biti riječ u Poglavlju 5.

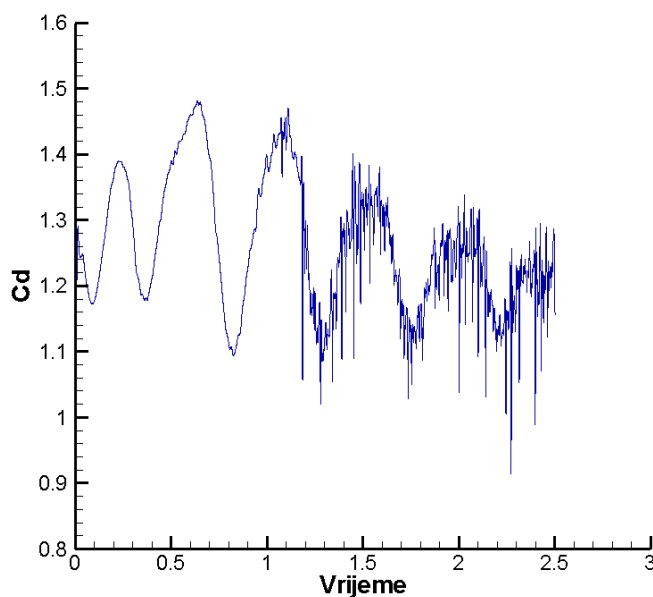


Slika 5: Laminarno strujanje oko aerodinamičkog profila



Slika 6: Turbulentno strujanje oko beskonačno dugog valjka

Turbulentno strujanje je kaotično gibanje čestica, gdje se slojevi međusobno miješaju, te dolazi do stvaranja vrtloga. Za turbulentno strujanje također vrijede dvije spomenute jednačbe kao i kod laminarnog strujanja, ali je potrebna i jednačba koja će opisati utjecaj turbulencije na polje strujanja, posebno onaj dio strujanja koji se nalazi uz čvrste stjenke. Turbulentno strujanje se prepoznaje po nepravilnoj i nepredvidivoj promjeni fizikalnih veličina tijekom vremena (Slika 7). U ovom radu je korišten tzv. model turbulencije Spalart-Allmaras, koji je često upotrebljavan u zrakoplovstvu, za što je i podešen, ali pokazuje vrlo dobre rezultate i u strujanjima oko tupih tijela [8].

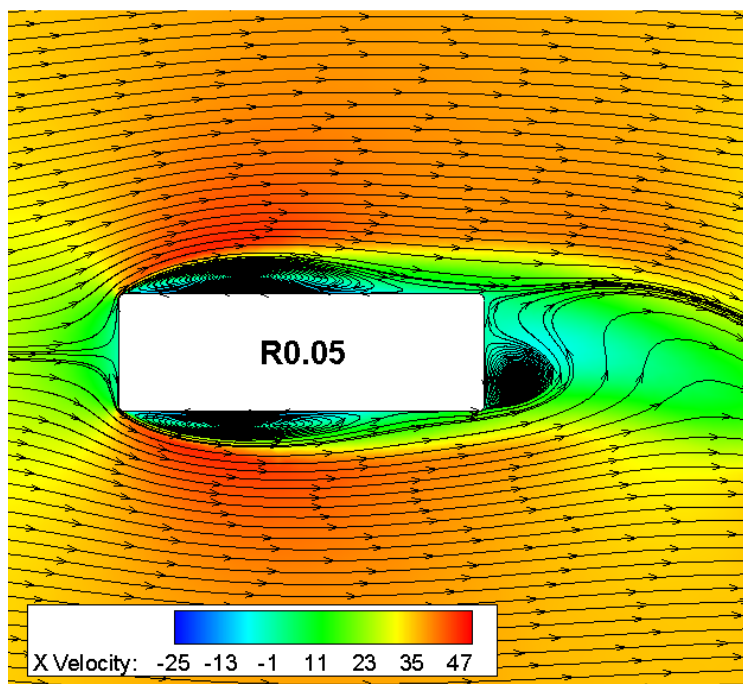


Slika 7: Tipična promjenjivost koeficijenta otpora zraka o vremenu u nestacionarnom turbulentnom strujanju

Podjela na laminarno i turbulentno strujanje vrši se prema Reynolds-ovom broju, koji predstavlja omjer sila inercije i sila viskoznosti. Sile inercije su posljedica mase i gibanja fluida, dok su sile viskoznosti sile među česticama fluida, odnosno sila trenja između susjednih slojeva fluida koji struje različitim brzinama. Kada inercijske sile postanu puno veće od sila viskoznosti, odnosno kada Reynoldsov broj prijeđe kritičnu vrijednost, strujanje postaje turbulentno. Strujanje oko vozila je obično turbulentno, odnosno s tipičnim vrijednostima Reynoldsovog broja reda veličine između 1 i 10 miliona.

$$Re = \frac{\text{inercijske sile}}{\text{sile viskoznosti}} = \frac{\rho v H_{ref}}{\mu} [4]$$

Osnovne pojave koje se javljaju pri opstrujavanju fluida oko tupih tijela, su pojave odvajanja i ponovnog nalijeganja graničnog sloja, odvajanje vrtloga i prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje. Zbog svih pojava strujanje je nestacionarno, odnosno vremenski promjenjivo, pa je prilikom računanja aerodinamičkih koeficijenata vrlo važno vršiti nestacionarne simulacije.



Slika 8: Pojava vrtloga pri opstrujavanju zraka oko horizontalnog presjeka generičkog autobusa

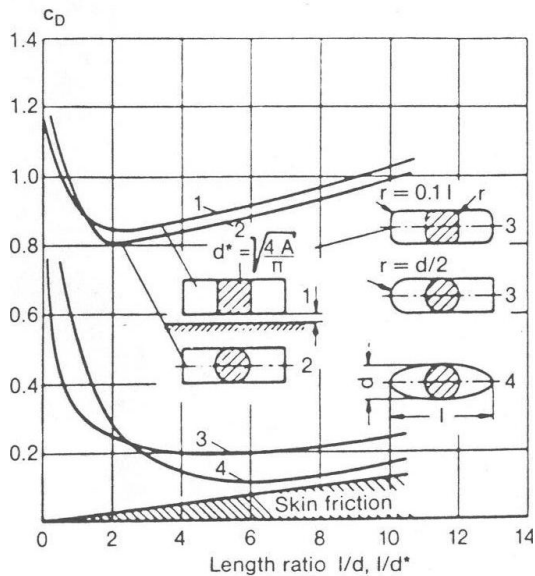
Na Slici 8 možemo vidjeti navedene pojave, snimljene pri izradi ovog rada. Na bočnim bridovima promatrane geometrije (presjeka autobusa) vidimo kako se odvajaju granični slojevi zbog nagle promjene geometrije. Pojavljuju se vrtlozi, koji kasnije, pred sam završetak bočnog brida nestaju jer granični sloj naliže natrag na brid, te se ubrzo, opet zbog nagle promjene geometrije na stražnjem dijelu, granični sloj ponovno odvaja i nastaju novi vrtlozi. Odvajanje vrtloga odvija se periodički, te je strujanje nestacionarno. Ova slika prikazuje trenutak u kojem se odvaja vrtlog na lijevoj strani stražnjeg kraja.

2.3 Aerodinamičke sile

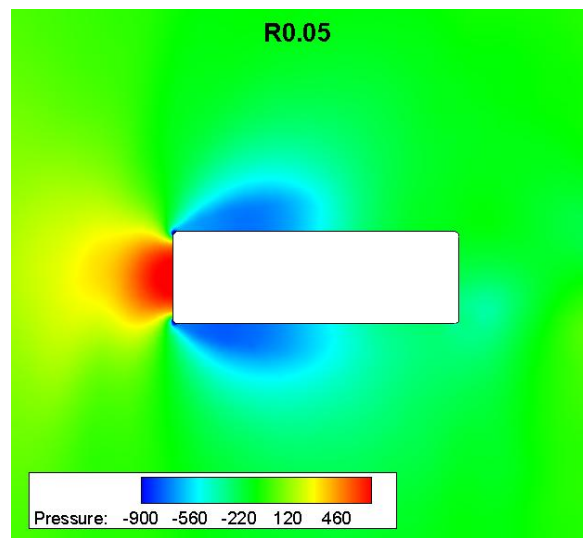
Fluid prilikom opstrujavanja oko nekog tijela djeluje na to tijelo odgovarajućom silom. Ta sila je suma sila tlaka i sila viskoznosti fluida, odnosno sila trenja. Sile tlaka djeluju na svaku površinu oko koje se nalazi fluid i ovise o tlaku fluida uz površinu i veličini površine.

Sila trenja nastaje zbog viskoznosti fluida. Čestice koje se nalaze uz samu površinu tijela oko kojeg opstrujava fluid se gibaju zajedno s površinom. Kada postoji relativno gibanje između površine tijela i fluida postoji i relativna brzina između čestica fluida koje su uz samu površinu tijela i susjednih čestica koje struje oko površine. Susjedne čestice djeluju jedna na drugu silama viskoznosti, te se tako se gibanja fluida prenosi na površinu u vidu sile trenja.

U strujanjima oko tijela promatranih u ovom radu, sile tlaka su daleko veće od sila trenja, što je tipično za aerodinamiku tzv. tupih tijela [1, 6, 9, 10]. U slučajevima gdje imamo velike površine koje su paralelne na smjer strujanja (npr. jako dugačko vozilo kao npr. vlak) sile trenja mogu biti istog reda veličine kao i tlačne sile. Na Slici 9 se vidi utjecaj sile trenja (eng. *Skin friction*) u ukupnom koeficijentu otpora zraka (C_d). Povećanjem omjera duljine i širine (eng. *Length ratio*) povećava se i sila trenja, pa ta sila za vrlo izduljena tijela može postati čak veća od tlačne komponente otpora zraka. U suprotnosti od tupih tijela, kod tzv. aerodinamički oblikovanih tijela (eng. *Streamlined Bodies*), kao npr. krila zrakoplova, sila trenja apsolutno dominira u ukupnom otporu zraka, dok se udjel sila tlaka može skoro zanemariti.



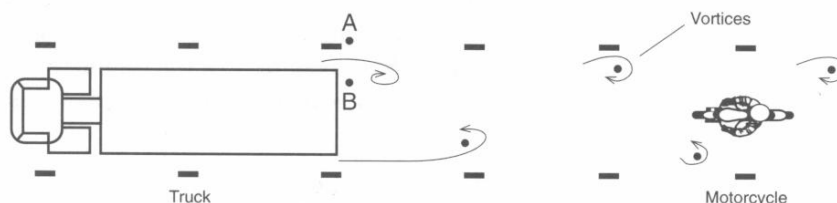
Slika 9: Prikaz koeficijenta otpora zraka C_d i udjela sile trenja za različite geometrije



Slika 10: Polje tlaka oko 2-D presjeka autobusa geometrije R0.05

Na zadanoj geometriji (presjeku autobusa) najveći utjecaj na aerodinamičke sile, a time i aerodinamičke koeficijente, se očekuje od strane sila tlaka. Na Slici 10 možemo vidjeti polje tlaka oko presjeka autobusa. Na mjestima gdje je tlak manji i sila koja djeluje na površinu je manja (plava i svijetlozelena boja), a na mjestima gdje je tlak veći, veća je i sila (crvena boja).

Velik utjecaj na sile tlaka imaju, već spomenuti, vrtlozi, koji se pojavljuju u turbulentnim strujanjima. Kada je strujanje turbulentno i nestacionarno, vrtlozi nastaju periodički i tako periodički mijenjaju sile koje djeluju na tijelo oko kojeg struji fluid (prikazano na Slici 7). Takve pojave kod vozila su svakodnevna stvar, te jedan primjer utjecaja vrtloga u prometu možemo vidjeti na Slici 11.



Slika 11: Periodičko odvajanje vrtloga tegljača i utjecaj na ostale sudionike u prometu (motociklista) [6]

2.4 Aerodinamički koeficijenti

Za međusobnu usporedbu aerodinamičkih sila koje djeluju na različita tijela koriste se bezdimenzijski koeficijenti, koji prikazuju iznose sila i momenata koji djeluju na promatrano tijelo, neovisno o dimenzijama tijela. U ovome radu će se koristiti dva aerodinamička koeficijenta. Jedan je koeficijent otpora, C_D , a drugi je koeficijent uzgona C_L . Ti koeficijenti su definirani na slijedeći način:

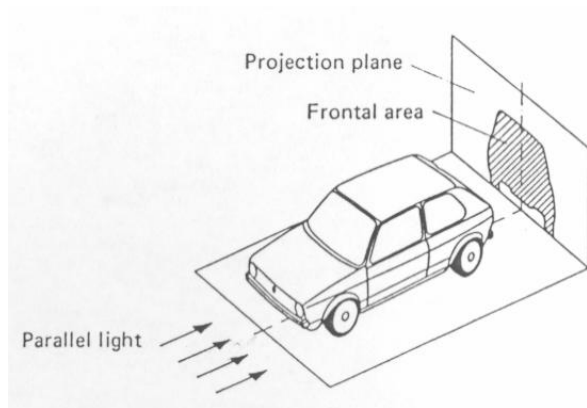
- Aerodinamički koeficijent otpora (eng. Drag coefficient):
$$C_D = \frac{F_D}{q_\infty \cdot A_{ref}}$$

- Aerodinamički koeficijent uzgona (eng. Lift coefficient):
$$C_L = \frac{F_L}{q_\infty \cdot A_{ref}}$$

- $q_\infty = \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty$ - dinamički tlak neporemećene struje
- A_{ref} - referentna površina
- F_D - sila otpora
- F_L - sila uzgona

U jednadžbama, sile otpora i uzgona su stvarne (izmjerene) sile koje djeluju na tijelo, dinamički tlak neporemećene struje je definiran postavkama strujanja, dok referentna površina ovisi o obliku tijela i vrsti dominantnih sila koje djeluju na tijelo.

Kod strujanja oko aerodinamički neoblikovanih ili tzv. tupih tijela, referentna površina se uzima kao projekcija tijela u smjeru strujanja (Slika 12) [1].



Pojmovi na Slici 12:

- eng. *Parallel light* – paralelni snop svjetlosti
- eng. *Projection plane* – ravnina projekcije
- eng. *Frontal area* – referentna površina

Slika 12: Definicija referentne površine vozila [1]

Kod dvodimenzijskog strujanja oko tupih tijela, referentna površina je produkt najveće duljine presjeka okomitog na strujanje (širine presjeka) i jedinične duljine, što je ustvari isto projekcija tijela (u ovom slučaju jediničnog tijela) u smjeru strujanja.

3 Računalna dinamika fluida (CFD)

Zbog aerodinamički neoblikovanog oblika vozila, strujanje oko vozila je vrlo kompleksno i nemoguće ga je u potpunosti matematički opisati, te mjerenja aerodinamičkih svojstava u zračnim tunelima daju nezamjenjiva i najtočnija rješenja. Ipak, pažljivom upotrebom i poznavanjem matematičkih modela strujanja fluida moguće je dobiti vrlo točna rješenja i tako u konačnici smanjiti skupa ispitivanja u zračnim tunelima. To je bio jedan od glavnih motova za razvoj Računalne dinamike fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics*).

Zbog iznimno velikog broja kompleksnih matematičkih operacija, koje CFD metoda koristi za simulacije strujanja fluida, uporaba Računalne dinamike fluida se i danas intenzivno razvija zajedno s pojavom sve bržih računala. Brža računala imaju mogućnost u prihvatljivom vremenu doći do zadovoljavajućih rezultata. Razvijeni su razni računalni programi za simulacije strujanja fluida, od kojih je jedan i program Fluent, pomoću kojeg su u ovome radu provedene simulacije.

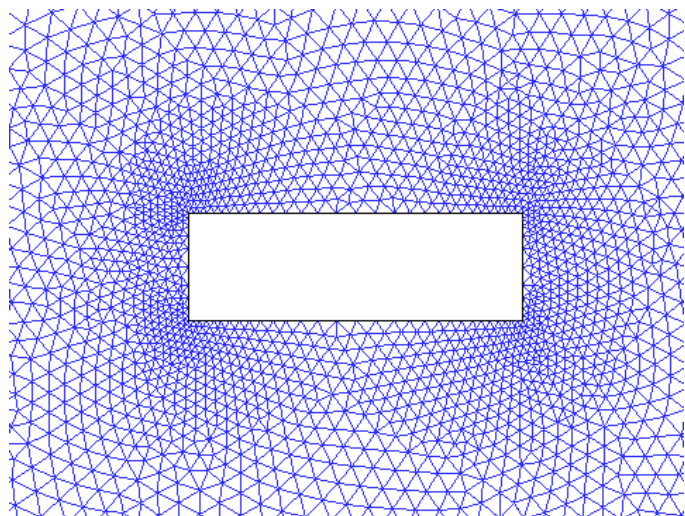
3.1 Mreže

Budući da se u ovom radu promatra dvodimenzijaska geometrija, u daljnjem tekstu će se govoriti o mrežama koje se koriste pri simulacijama dvodimenzijskog strujanja. Diskretizacija domene strujanja, tzv. CFD mreža ima velik utjecaj na dobivanje točnih rezultata. Postoji više oblika elemenata koji se koriste u izradi mreža. Ovdje su upotrebljavana dva osnovna oblika, trokutni i četverokutni.

Ovisno o tipu korištenog konačnog volumena imamo različite vrste CFD mreža:

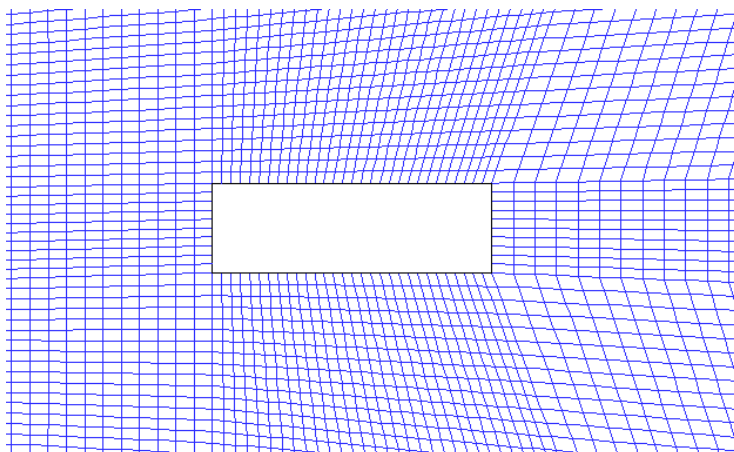
- Nestrukturirana mreža
- Strukturirana mreža
- Hibridna mreža

Nestrukturirana mreža (Slika 13) se sastoji od trokutnih elemenata. Prednost takvog oblika je relativno jednostavna izrada mreže, zbog lakog opisivanja složenih oblika bez velike distorzije elementa. Iz tog razloga je izrada automatizirana, odnosno postoje umreživači koji mogu izraditi sasvim zadovoljavajuću nestrukturiranu mrežu, pa je proces izrade mreže kratak. Nedostatak je što svojstva ovih elemenata ne omogućavaju točna rješenja kao kod četverokutnih elemenata.



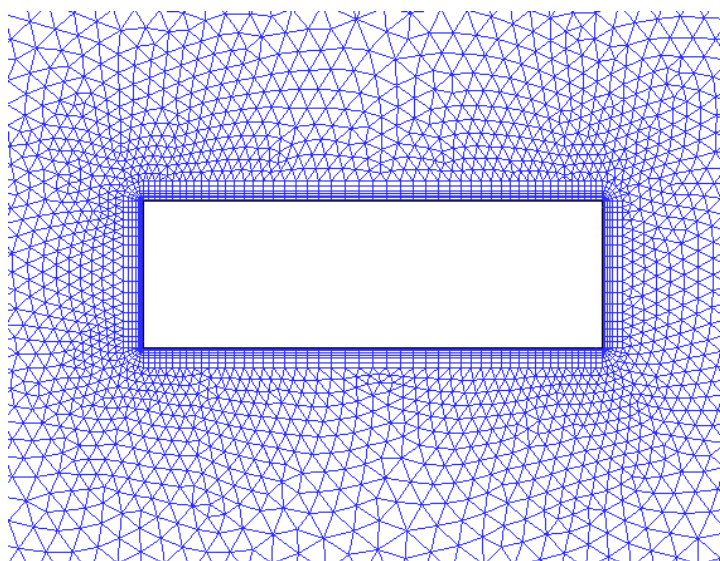
Slika 13: Nestrukturirana mreža

Strukturirana mreža (Slika 14) se sastoji od četverokutnih elemenata. Četverokutni elementi, zbog svojih svojstava, daju točnije rezultate od trokutnih, ali je izrada strukturiranih mreža složenija i automatski postupak najčešće nije moguć, te je potrebna poluautomatska izrada.



Slika 14: Strukturirana mreža

Hibridna mreža (Slika 15) kombinira pozitivne karakteristike nestrukturirane i strukturirane mreže. Na mjestima gdje su veliki gradijenti fizikalnih veličina i gdje su potrebna točnija rješenja (npr. Granični sloj uz čvrstu stjenku), postavlja se fina mreža sa četverokutnim elementima, a u ostalom dijelu domene strujanja postavljaju se trokutni elementi, veličinom ovisni također o gradijentima promatranih fizikalnih veličina. Najčešće se dio uz površinu tijela umrežuje četverokutnim elementima i u literaturi se naziva eng. *Boundary layer* (Granični sloj). Strukturirani dijelovi se izrađuju poluautomatski, dok se nestrukturirani dijelovi izrađuju automatski.



Slika 15: Hibridna mreža

Općenito, izrada i provjera ispravnosti mreže je velikim dijelom određena iskustvom i uspoređivanjem rezultata sa već ispitanim geometrijama (ili u zračnom tunelu ili pomoću CFD-a). Izrada mreže stoga uvelike ovisi o iskustvu onoga koji je izrađuje i o dostupnim podacima u provjerenoj literaturi.

Ako se simulacijom dobiju valjani rezultati, koji su slični sa ispitivanjima u zračnom tunelu može se zaključiti da je mreža dobra. Ukoliko rezultate mjerenja za usporedbu nisu dostupni, ispravnost mreže može se provjeriti izradom mreža različite finoće i međusobnom usporedbom dobivenih rezultata.

3.2 Opis alata

Za simuliranje strujanja korišten je alat Fluent 6.2.16. Fluent je računalni program namijenjen simulaciji strujanja fluida i prijenosa topline u kompleksnim geometrijama. Podržava 2-D i 3-D simulacije strujanja. U ovome radu se je simulirano 2-D strujanje. Fluent u 2-D strujanju može koristiti tri vrste mreža, nestrukturiranu, strukturiranu i hibridnu [5].

Fluent omogućava i automatsko profinjavanje mreže na mjestima gdje se pokaže da su gradijenti fizikalnih veličina veliki. Ovdje to nije korišteno, nego je mreža optimirana „ručno“. Za rješavanje problema Fluent koristi jednačbe dinamike fluida spomenute u Poglavlju 2. Osim njih Fluent ima mogućnost korištenja transportnih jednačbi kemijskih spojeva.

Što se tiče simuliranja turbulencije, Fluent na raspolaganju ima nekoliko različitih modela, od kojih su u ovome radu korištena dva – Spalart-Allmarasov model s jednom transportnom jednačbom te tzv. k-omega model sa dvije transportne jednačbe.

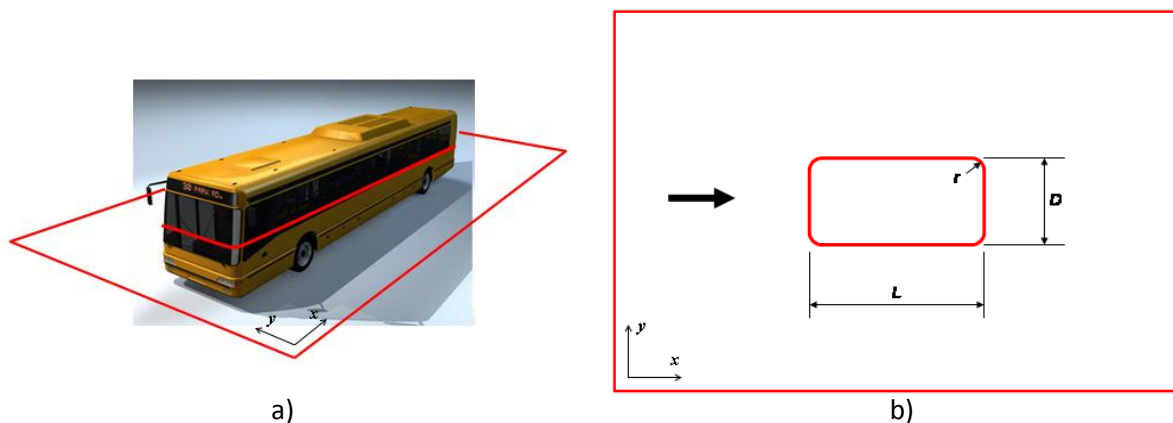
Spalart-Allmarasov model je relativno jednostavan model turbulencije napravljen za upotrebu u zrakoplovstvu, za računanje toka fluida vezanog za stjenku, odnosno za strujanja bez odvajanja graničnog sloja i pojave vrtloga [7]. Međutim pokazuje dobre rezultate i za strujanja kakva su provedena u ovome radu, dakle za strujanja gdje dolazi do odvajanja graničnog sloja i pojave vrtloga [8].

Za izradu mreža korišten je alat Gambit, koji dolazi uz Fluent. U Gambitu se mogu izrađivati dvodimenzijske i trodimenzijske mreže. Korisniku su na raspolaganju svi osnovni elementi koji se inače koriste u računalnoj dinamici fluida. Za izradu mreža u ovome radu su korišteni dvodimenzijski osnovni elementi – trokutni i četverokutni.

4 Definicija geometrije, mreža i postavki strujanja

4.1 Geometrija

U radu su napravljene simulacije u ravnini (dvodimenzijske simulacije). Geometrija oko koje se ispituje strujanje je definirana zadatkom:



Slika 16 a) i b): Zadana geometrija

Prikazana geometrija na Slici 16 predstavlja horizontalni presjek generičkog oblika autobusa. U zadatku su zadane duljina i širina autobusa, koje odgovaraju duljini i širini pravokutnika u zadanoj geometriji:

$$L = 7.5 \text{ m} \qquad D = 2.4 \text{ m}$$

Geometrija se nalazi u xy ravnini, a smjer strujanja zraka je u smjeru osi x, odnosno napadni kut strujanja (α) je jednak nuli.

U ovome radu će se prikazati utjecaj zaobljenja bridova autobusa, što u zadanoj geometriji odgovara zaobljenju vrhova pravokutnika. Provesti će se simulacije za pet različitih geometrija, odnosno četiri različita zaobljenja vrhova pravokutnika:

$$\frac{r}{D} = 0 \qquad \frac{r}{D} = 0.025 \qquad \frac{r}{D} = 0.05 \qquad \frac{r}{D} = 0.1 \qquad \frac{r}{D} = 0.2$$

Veličina r predstavlja radijus zaobljenja vrha pravokutnika. U radu će se za označavanje pojedinih geometrija koristiti slijedeći izrazi: **R0**, **R0.025**, **R0.05**, **R0.1** i **R0.2**, gdje R označava da se radi o pravokutnom presjeku sa odgovarajućim zaobljenjem, a broj definira iznos radijusa zaobljenja vrhova pravokutnika.

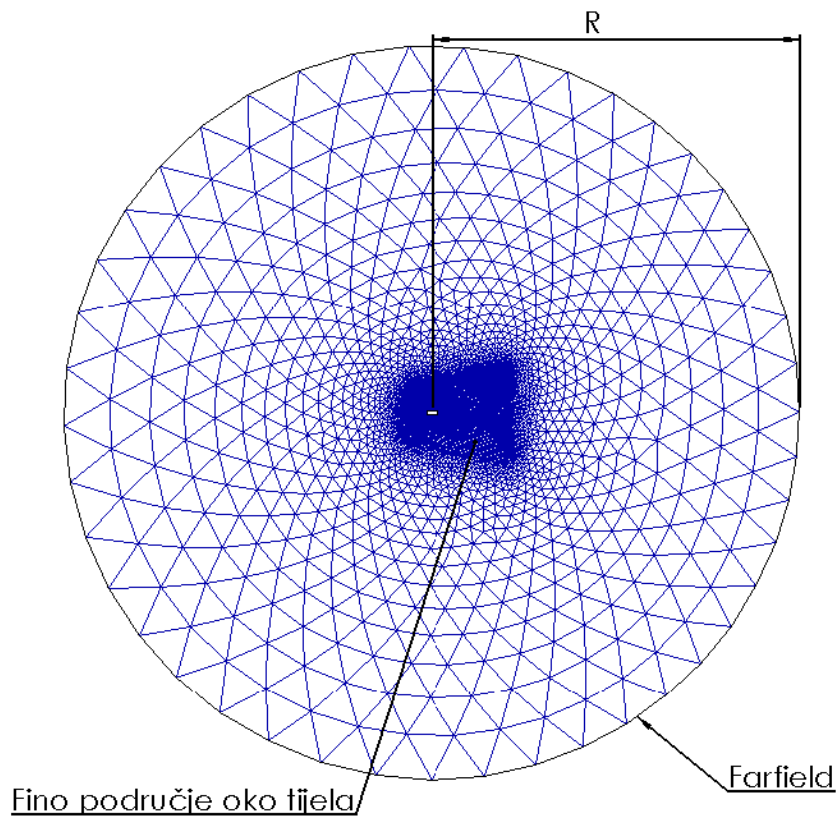
4.2 Mreže

Ukupno je izrađeno petnaest mreža, za svaku geometriju po tri mreže - gruba, srednja i fina. Prikaz i karakteristike mreža dan je u Tablici 1.

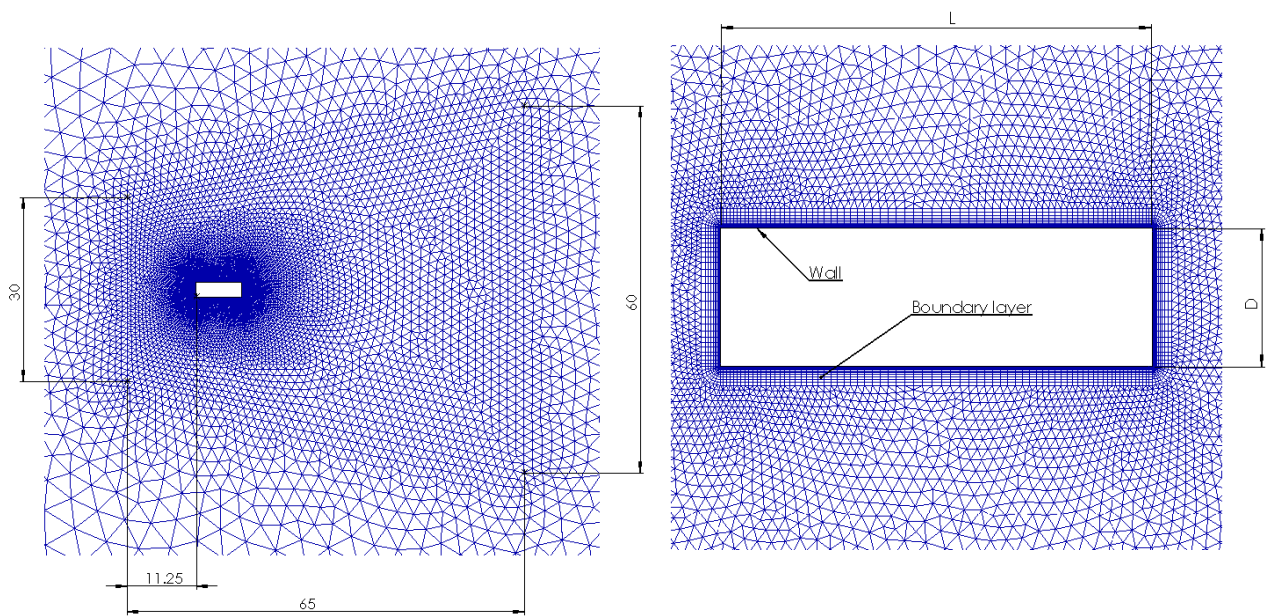
Tablica 1: Pregled i karakteristike mreža

Geometrija	R0			R0.025			R0.05			R0.1			R0.2		
Duljina L [m]:	7.5			7.5			7.5			7.5			7.5		
Širina D [m]:	2.4			2.4			2.4			2.4			2.4		
Radijus zaobljenja r [m]:	0			0			0			0			0		
Mreža:	gruba	srednja	fina	gruba	srednja	fina	gruba	srednja	fina	gruba	srednja	fina	gruba	srednja	fina
Ukupna broj elemenata:	5706	10482	20548	5770	10684	21700	5296	10528	21376	5132	10200	20644	4946	9764	20082
Ukupna broj čvorova:	3141	5938	11756	3249	6087	12432	2976	6027	12296	2888	5845	11891	2795	5627	11662
Visina prvog sloja [m]:	0.02	0.014	0.0075	0.02	0.014	0.0075	0.02	0.014	0.0075	0.02	0.014	0.0075	0.02	0.014	0.0075
Ukupna broj strukturiranih slojeva:	5	8	12	5	8	12	5	8	12	5	8	12	5	8	12
Ukupna visina strukturiranog dijela [m]:	0.218	0.334	0.336	0.218	0.334	0.336	0.218	0.334	0.336	0.218	0.334	0.336	0.218	0.334	0.336
Broj čvorova po zaobljenom bridu:	0	0	0	3	4	5	4	6	8	6	9	12	9	14	20

Na slikama 17, 18 i 19 prikazan je primjer jedne fine hibridne mreže. Mreža se sastoji od nekoliko dijelova, vanjskog ruba (eng. *Farfield*) i grubog dijela mreže dalje od tijela (Slika 17), finog dijela mreže bliže tijelu (Slika 18), te graničnog sloja (eng. *Boundary layer*) i stjenke (eng. *Wall*) koja je definirana geometrijom zadanog presjeka (Slika 19).



Slika 17: Hibridna mreža s označenim dijelovima



Slika 18: Fino područje mreže oko tijela

Slika 19: Uz samu stjenku (eng. *Wall*) se nalazi strukturirani dio mreže, granični sloj (eng. *Boundary layer*)

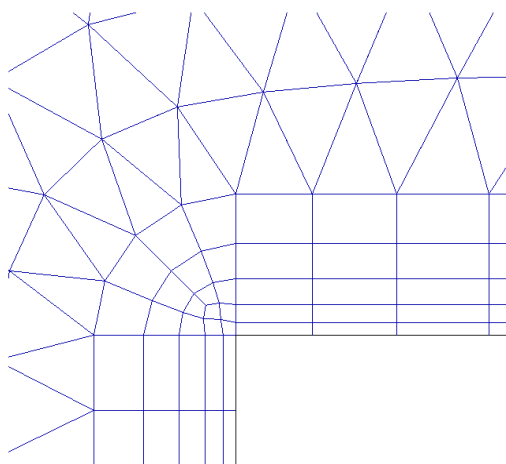
4.2.1 Granični sloj (eng. *Boundary Layer*)

Granični sloj je strukturirani dio mreže koji se nalazi uz samu stjenku i sastoji se od četverokutnih elemenata. Prilikom njegove izrade važno je pravilno definirati broj redova, koeficijent rasta među redovima i visinu prvog reda. U ovom su radu korištene tri različite postavke graničnoga sloja, za tri različite finoće mreže.

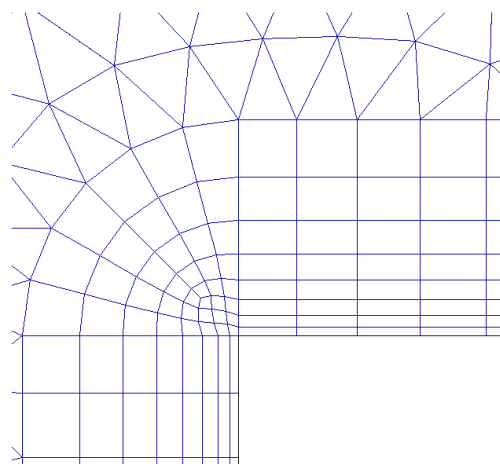
Na Slici 20 prikazan je granični sloj za grubu mrežu. Prvi red je visok 20mm, ima ih ukupno 5, a koeficijent rasta je 1.4.

Na Slici 21 prikazan je granični sloj za srednje finu mrežu. Prvi red je u visini 14mm, ima ukupno 8 redova, te je koeficijent rasta 1.3.

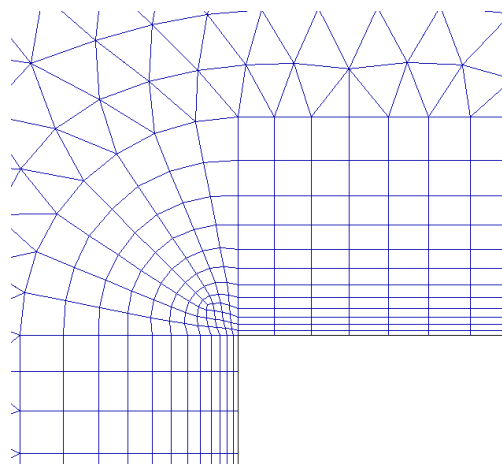
Na Slici 22 prikazan je granični sloj fine mreže. Prvi red je u visini 7.5mm, ima ukupno 12 redova, a koeficijent rasta iznosi 1.22.



Slika 20: Granični sloj grube mreže

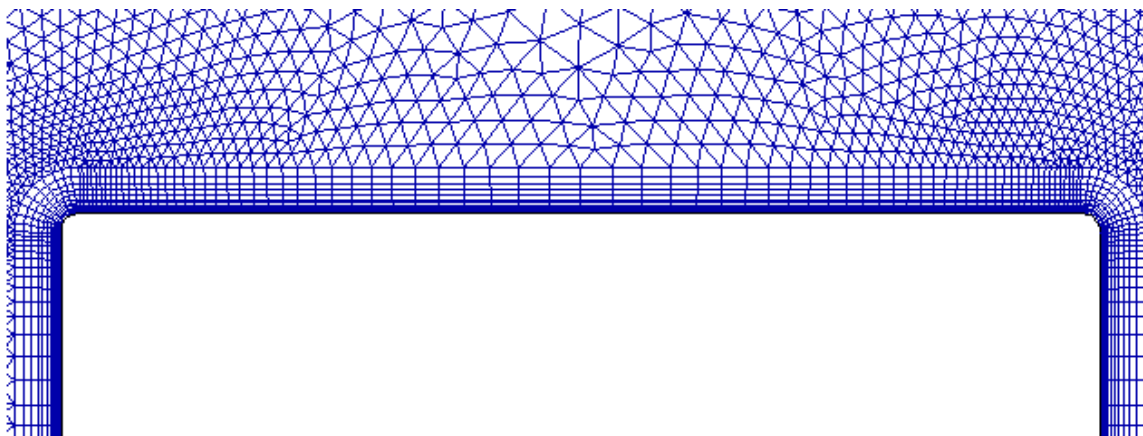


Slika 21: Granični sloj srednje mreže



Slika 22: Granični sloj fine mreže

Sama stjenka je umrežena čvorovima, raspoređenima tako da su dijelovi mreže bliži vrhovima, odnosno zaobljenjima, manji, jer se na tom dijelu očekuju veći gradijenti fizikalnih veličina, dok se prema sredini brida stjenke elementi povećavaju. Broj čvorova po pojedinom bridu ovisi o finoći mreže.



Slika 23: Raspodjela čvorova po bočnom bridu

4.2.2 Nestrukturirani dio mreže i domena strujanja

Ostali dio mreže, koji ne pripada graničnom sloju je nestrukturiran. Nestrukturirani dio je napravljen iz dva dijela, finijeg i grubljeg.

Finiji se dio mreže (Slika 18) sastoji od manjih elemenata s manjim koeficijentom rasta i nalazi se u blizini promatranog presjeka. Oblik tog dijela je definiran pretpostavljenom strujanju. Kasnije, prilikom analize rezultata, pokazalo se da je oblik i veličina finijeg dijela nestrukturirane mreže zadovoljavajući.

Grublji se dio mreže (Slika 17) nalazi između finijeg dijela i vanjskog ruba. Grublji dio mreže je bitan što povećava domenu strujanja bez da značajno povećava broj elemenata, te tako vrlo malo produljuje vrijeme računanja, a istovremeno zbog njegove veličine vanjski se rub nalazi daleko od promatranog presjeka.

Veličina domene strujanja, odnosno udaljenost vanjskog ruba od promatranog presjeka je ovdje odabrana tako da je polumjer kružnice koji definira vanjski rub sto puta veći od veličine D (slika 17).

$$\frac{R}{D} = 100$$

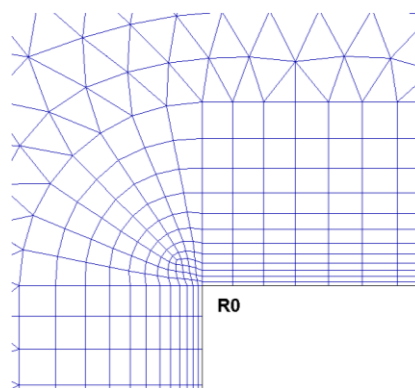
Kao što je spomenuto, vanjski rub domene strujanja je u postavkama strujanja definiran kao farfield. Farfield rubni uvjet definira konstante vrijednosti veličina statičkog tlaka i Machovog broja, te smjera vektora brzine strujanja, dok se ostale varijable ekstrapoliraju iz unutrašnjosti domene. Zato je važno da vanjski rub bude dovoljno daleko od promatranog presjeka, te da tako eventualne numeričke greške, koje nastaju na vanjskoj granici domene, što manje utječu na strujanje oko samog tijela.

4.2.3 Zaobljenje vrhova

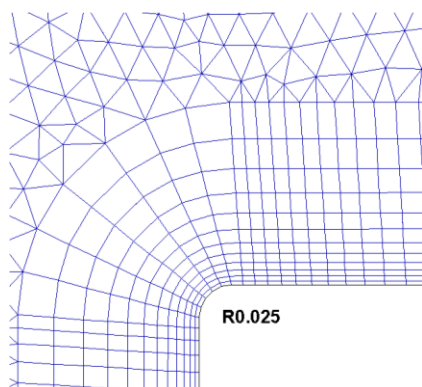
Kod mreža koje opisuju geometriju sa zaobljenim vrhovima (geometrije R0.025, R0.05, R0.1, R0.2) potrebno je zaobljenje definirati s određenim brojem čvorova, kako bi mreža što točnije opisivala zaobljenje. Kod grubljih mreža i manjih radijusa zaobljenja korišteno je manje čvorova, dok je kod finijih mreža i većih radijusa zaobljenja korišteno više čvorova. Točan broj čvorova po zaobljenju za svaku mrežu prikazan je u tablici 1.

Na slikama 24 do 28 vidimo kako izgleda fina mreža oko samog zaobljenja za svih pet geometrija. Tijekom izrade mreže pažnja je bila usmjerena da je u svim mrežama jednake finoće veličina elemenata uz samo zaobljenje jednaka, što se može vidjeti na slikama.

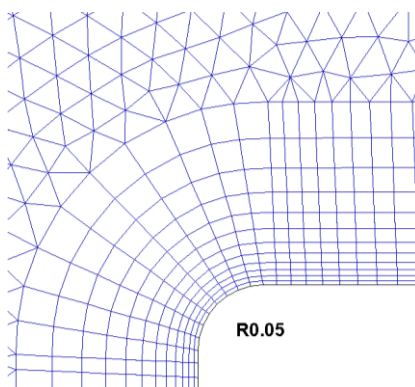
Jedino je mreža za geometriju R0 nešto drugačija od ostalih mreža (Slika 24), jer nema zaobljenja vrhova. Kod njene izrade, korištena je opcija „*wedge corner shapes*“, te je tako granični sloj oko vrha geometrije zaobljen.



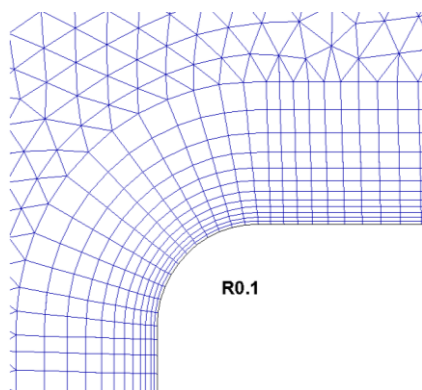
Slika 24: Mreža u području vrha geometrije R0



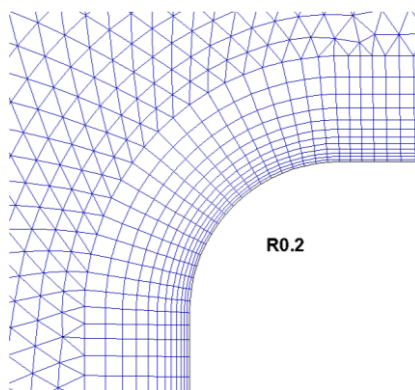
Slika 25: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.025



Slika 26: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.05



Slika 27: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.1



Slika 28: Mreža u području zaobljenja kod geometrije R0.2

4.3 Postavke strujanja

4.3.1 Numeričke postavke strujanja

Prilikom podešavanja simulacije potrebno je definirati postavke rješavača (eng. *Solver*). On se odabire ovisno o tipu strujanja. Ako je strujanje stlačivo, odnosno ako ima značajne promjene gustoće, odabire se „Density based solver“, a ako je strujanje nestlačivo odabire se „Pressure based solver“. U simuliranim strujanjima Machov broj iznosi 0.1, što strujanja svrstava u nestlačiva (Poglavlje 2.1), te je odabran „pressure based solver“. U alatu Fluent „pressure based solver“ se nalazi pod nazivom „segregated solver“.

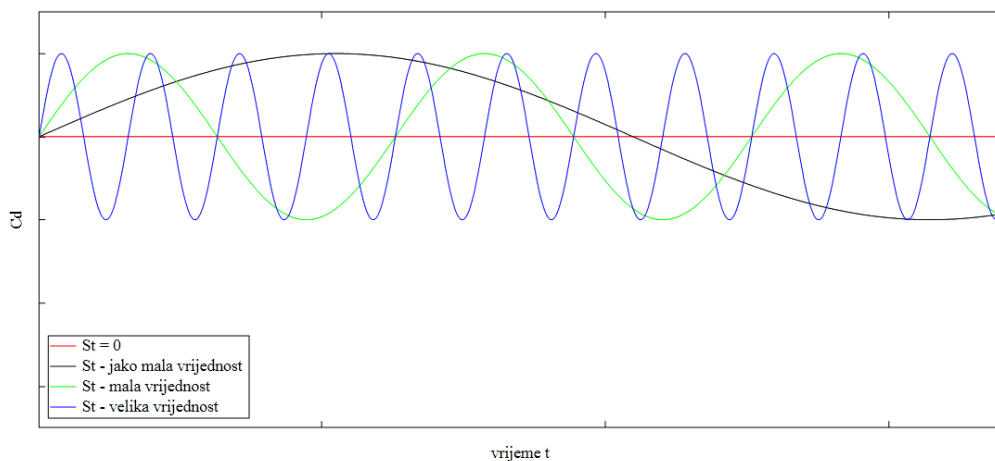
Turbulentno strujanje je izrazito nestacionarno, te sve fizikalne veličine osciliraju tijekom vremena. Osim toga, u zadanom slučaju to turbulentno strujanje je, kada se potpuno razvije, periodičko, što znamo iz mnogobrojnih izvora u literaturi. Kako bi se prilikom simulacije moglo zabilježiti što više perioda fizikalnih veličina, neovisno o brzini (tj. frekvenciji) tih periodičkih promjena, potrebno je odabrati dovoljno mali vremenski korak Δt . Broj vremenskih koraka Δt koji se nalazi u jednom periodu T označava se varijablom *NTPER* (eng. *Number of time steps per period* – broj vremenskih koraka u periodu). *NTPER* se određuje prema literaturi i iskustvu, te je u ovom slučaju odabran kao u [8]:

$$NTPER = 500$$

Kada smo odabrali broj vremenskih koraka u jednom periodu, da bismo mogli izračunati Δt , nedostaje nam podatak koliki je period T , odnosno kolika je dominantna frekvencija promjene fizikalnih veličina. Promjene fizikalnih veličina u strujanju su zapravo produkti odvajanja velikih vrtloga (eng. *Large Eddies*), odnosno kada se u strujanju odvoji vrtlog, dogode se promjene fizikalnih veličina. Dakle, frekvencija promjene fizikalnih veličina je ujedno i frekvencija odvajanja vrtloga. Frekvenciju vrtloga pretpostavljamo preko Strouhalovog broja. Strouhalov broj je bezdimenzijski koeficijent strujanja, koji označava bezdimenzijsku frekvenciju. Računa se prema izrazu:

$$St = f \cdot \frac{H_{ref}}{u_{\infty}}$$

Strouhalov broj je i mjera nestacionarnosti strujanja. Što je Strouhalov broj veći to je frekvencija odvajanja vrtloga veća, odnosno nestacionarnost je jače izražena. Kada se Strouhalov broj smanjuje, strujanje se sve više približava stacionarnom strujanju, odnosno ako je Strouhalov broj 0, nestacionarno strujanje postaje kvazi-stacionarno, sa beskonačno velikim periodama odvajanja vrtloga. Skicu kako Strouhalov broj utječe na, primjerice, koeficijent otpora zraka vidi se na Slici 29.



Slika 29: Skica utjecaja različitih vrijednosti Strouhalovog broja na koeficijent C_d

Strouhalov broj se pretpostavlja po podacima iz literature. Ako nismo sigurni koji Strouhalov broj odabrati, odabire se veći, jer ukoliko podesimo vremenski korak Δt za strujanje s većim frekvencijama, gdje nam treba mali Δt , takav mali Δt odgovarati će i strujanju s manjim frekvencijama, odnosno s manjim Strouhalovim brojem. Razlika će biti jedino što će onda period T kod strujanja s manjim frekvencijama biti podijeljen na više vremenskih koraka Δt , a time je povećana točnost i finoća rješenja. Nedostatak kod odabira manjeg vremenskog koraka Δt je u tome što je potrebno više vremena za računanje simulacije. Često smo vrlo ograničeni s računalnim resursima, pa je potrebno uzeti optimalni vremenski korak.

Strouhalov broj možemo zapisati na slijedeći način, te sređivanjem dobiti izraz za Δt :

$$St = \frac{1}{T} \cdot \frac{H_{ref}}{u_\infty} = \frac{1}{NTPER \cdot \Delta t} \cdot \frac{H_{ref}}{u_\infty}$$

$$\Delta t = \frac{1}{NTPER \cdot St} \cdot \frac{H_{ref}}{u_\infty}$$

Odabrana vrijednost Strouhalovog broja je 0.2, referentna duljina (H_{ref}) je veličina D koja opisuje širinu autobusa i iznosi 2.4 m, brzina neporemećene struje zraka u je jednaka 34 m/s što odgovara Machovom broju 0.1.

Nakon uvrštavanja slijedećih veličina:

$$NTPER = 500, \quad St = 0.2, \quad H_{ref} = 2.4 \text{ m}, \quad u_\infty = 34 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dobijemo:

$$\Delta t = 0.0007 \text{ s}$$

U ovome radu će se uspoređivati različite geometrije. Između geometrije R0 i R0.2 očekuje se vrlo velika razlika u strujanju zraka. Ako je razlika u strujanju vrlo velika, teško je s jednakim postavkama strujanja dobiti dobra rješenja u oba slučaja. Iz tog razloga, kako bi dobili točnija rješenja i finije dijagrame za konačni vremenski korak Δt je odabrana manja vrijednost:

$$\Delta t = 0.0002 \text{ s}$$

4.3.2 Fizikalne postavke strujanja

U svim simulacijama je provedena analiza sa identičnim postavkama strujanja.

Reynoldsov broj je definiran na osnovu širine promatranog presjeka, odnosno veličine D ($H_{ref} = D$).

$$Re = \frac{\rho_{\infty} \cdot u_{\infty} \cdot H_{ref}}{\mu_{\infty}}$$

Nakon uvrštavanja slijedećih vrijednosti:

$$\rho_{\infty} = 1.176674 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad u_{\infty} = 34 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad H_{ref} = 2.4 \text{ m}, \quad \mu_{\infty} = 1.98 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

Dobijemo vrijednost Reynoldsovog broja:

$$Re = 4.85 \cdot 10^6$$

Odabrane vrijednosti statičkog tlaka, temperature i gustoće zraka u vanjskom rubu (eng. *Farfield*) mogu se pogledati u tablici 2. Zrak je u simulacijama strujanja definiran kao idealni plin (eng. *Ideal Gas*).

Tablica 2: Postavke strujanja

Geometrija:		R0	R0.025	R0.05	R0.1	R0.2		
Numeričke postavke:	Solver:	Segregated	Segregated	Segregated	Segregated	Segregated		
	Model turbulencije:	S-A	S-A	S-A	S-A	S-A	k-omega	
	Vremenski korak Δt [s]:	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002
	Ukupno simulirano vrijeme Σt [s]:	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	5
Fizikalne postavke:	Tip fluida:	zrak	zrak	zrak	zrak	zrak	zrak	zrak
	Reynoldsov broj Re :	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06
	Machov broj Ma :	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Brzina strujanja u [m/s]:	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7
	Gustoća ρ [kg/m ³]:	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176
	Tlak p [Pa]:	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
	Temperatura T [K]:	300	300	300	300	300	300	300

5 Analiza rezultata

Za svaku izrađenu mrežu provedena je barem jedna simulacija strujanja. Prilikom simulacije bilježeni su signali aerodinamičkih koeficijenata otpora zraka (C_d) i uzgona (C_l). Ukupno simulirano vrijeme je barem 2.5 sekunde za svaku simulaciju, odnosno za vremenski korak $\Delta t = 0.0002$ s, simulirano vrijeme je 12500 vremenskih koraka. Za vremenski korak $\Delta t = 0.0001$ s, broj vremenskih koraka je duplo veći, 25000. Kada se uzme u obzir da je za svaki vremenski korak provedeno 50 iteracija, jasno je da je za jedno prosječno osobno računalo potrebno prilično puno vremena za provedbu simulacija.

Na slikama 30 do 34 prikazani su aerodinamički koeficijenti otpora (C_d) i uzgona (C_l) dobiveni simulacijama strujanja s finim mrežama. Kao što je već spomenuto, zbog oblika zadane geometrije strujanje je nestacionarno i periodičko, te se koeficijenti periodički mijenjaju tijekom vremena. Kad se nakon početnog perioda simulacije (eng. *Transient period*, njem. *Einschwingen*) strujanje ustali, te se signali počnu periodički ponavljati moguća je analiza strujanja, te je ovdje analiza tako i napravljena.

Kod svih simulacija vidi se izrazita nestacionarnost strujanja. Vrijeme potrebno da se strujanje ustali, te koeficijenti počnu periodički ponavljati, iznosi otprilike 1.5 s. Jedina iznimka je tijelo sa najviše zaobljenim bridovima R0.2, kod kojeg strujanje izgleda potpuno razvijeno, tj. ustaljeno već nakon otprilike 0.3 s. No, daljnja analiza će pokazati, da rezultati za geometriju R0.2 izračunati sa S-A modelom turbulencije na finoj mreži ne odgovaraju eksperimentalnim mjerenjima iz literature, odnosno da kod velikih zaobljenja bridova grublja prostorna diskretizacija (srednja mreža) daje točnije rezultate nego fina mreža. Istovremeno, na finoj prostornoj diskretizaciji domene strujanja 2-jednadžbeni model turbulencije k-omega SST daje bolje rezultate od, u ovom radu korištenog, standardnog S-A modela.

Analiza rezultata obuhvaća nekoliko dijelova. Prvi dio (Poglavlje 5.1) prikazuje kakav je utjecaj kvalitete (finoće) mreže na aerodinamičke koeficijente otpora (C_d) i uzgona (C_l).

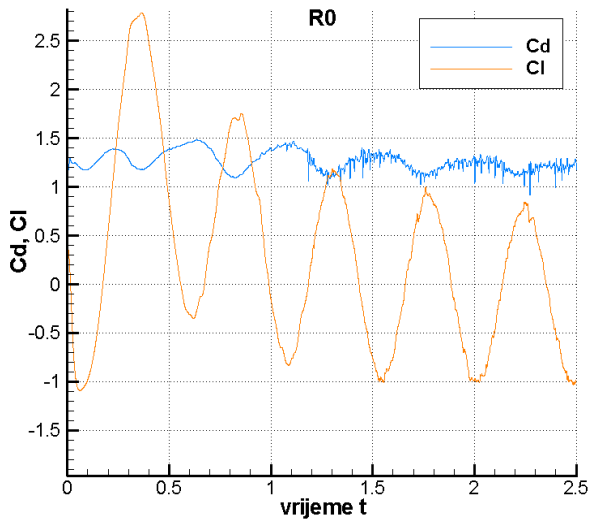
Drugo dio (Poglavlje 5.2) prikazuje utjecaj zaobljenja vrhova na promjenu aerodinamičkih koeficijenata. Važnost zaobljenja vrhova, odnosno bridova, je prikazana u Poglavlju 1. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima iz literature.

U trećem dijelu (Poglavlje 5.3) uspoređeni su rezultati za R0.2 geometriju dobiveni sa dva različita modela turbulencije i dva vremenska koraka, te će se pokazati njihov utjecaj na koeficijent otpora zraka.

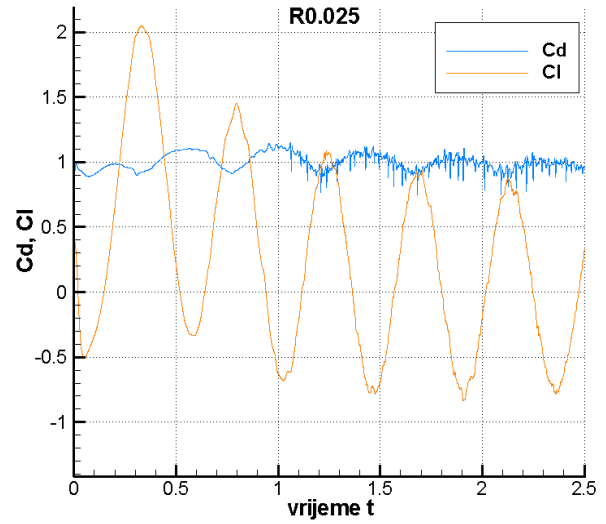
U četvrtom dijelu (Poglavlje 5.4) analizirana je raspodjela otpora zraka po površini tijela. U tom se dijelu vidi koji dijelovi promatrane geometrije generiraju najviše aerodinamičkog otpora, pa će time biti jasno na koji dio, prilikom oblikovanja karoserije autobusa, treba obratiti veći dio pažnje.

U zadnjem se dijelu analiziraju slike strujanja (Poglavlje 5.5). Analizirane su slike strujnica, polja brzina i polja tlaka. U tom dijelu je fizikalno objašnjeno što utječe na dobivene rezultate i zašto različite geometrije daju drugačije rezultate.

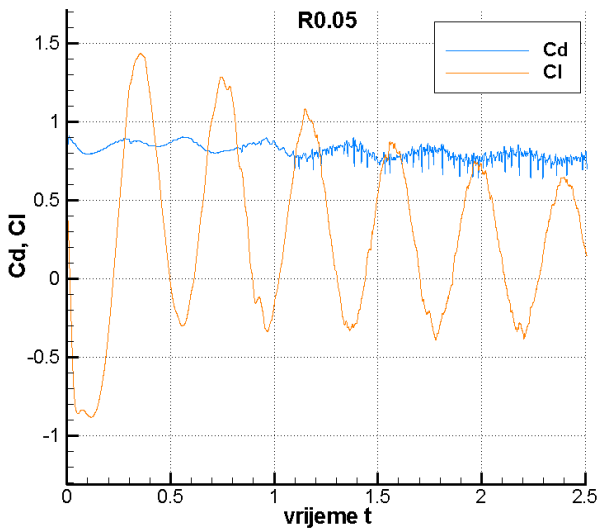
Analiza rezultata



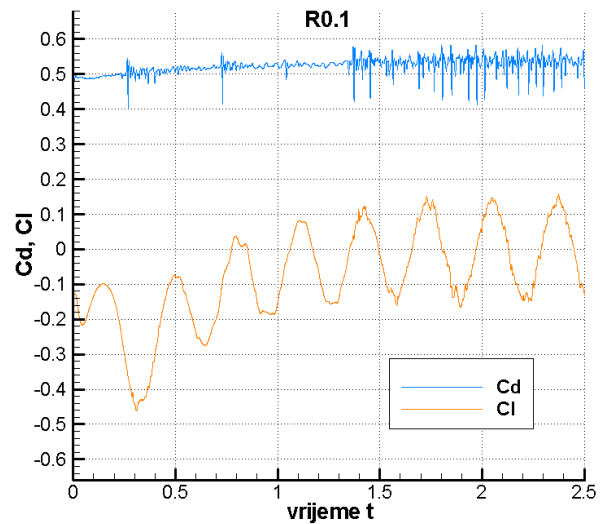
Slika 30: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0 (fina mreža)



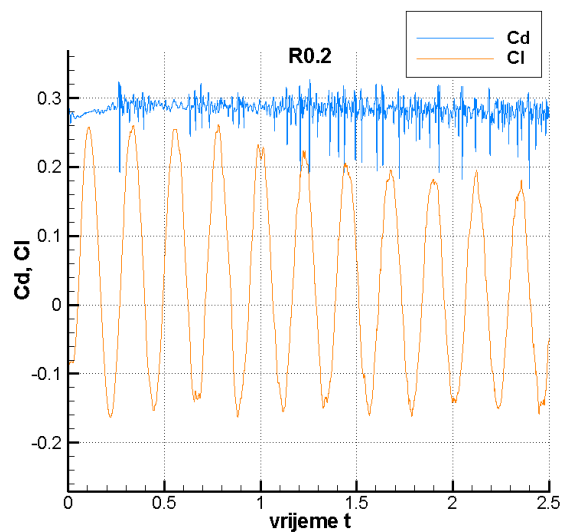
Slika 31: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.025 (fina mreža)



Slika 32: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.05 (fina mreža)



Slika 33: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.1 (fina mreža)



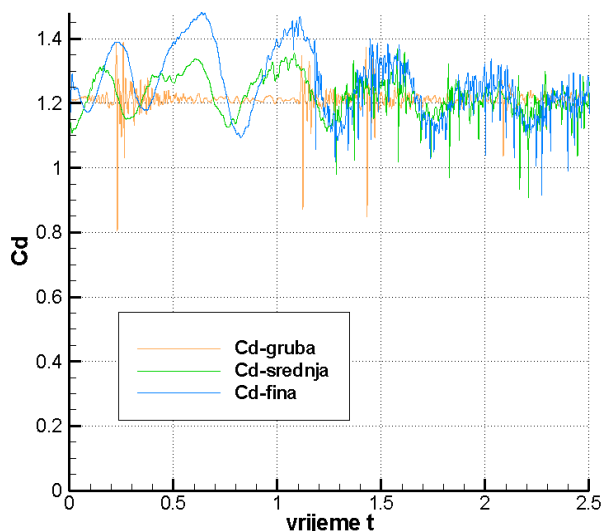
Slika 34: Aerodinamički koeficijenti C_d i C_l za geometriju R0.2 (fina mreža)

5.1 Utjecaj kvalitete mreže

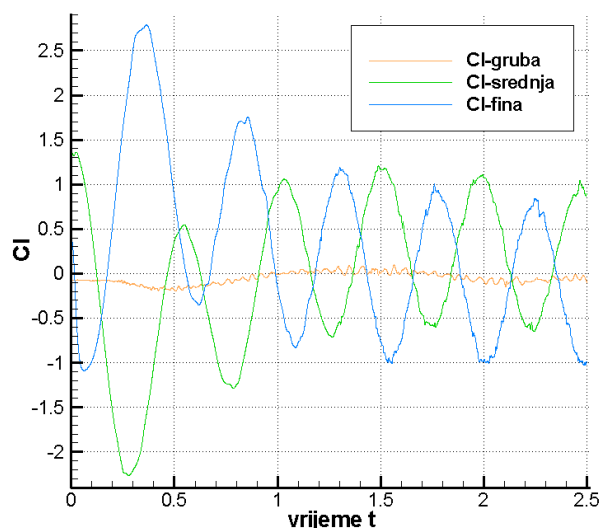
Za svaku geometriju su izrađene tri mreže – gruba, srednja i fina. Dijagramima će se prikazati kakav utjecaj ima kvaliteta mreže na rezultate za koeficijent otpora (C_d) i koeficijent uzgona (C_l). Prikazani su rezultati za tri geometrije R0, R0.05 i R0.2. Za prikaz rezultata ostalih geometrija (geometrije R0.025 i R0.1) nema potrebe, jer se kvalitativno ne odudaraju od prikazanih rezultata za geometrije R0 i R0.05.

5.1.1 Geometrija R0

Na Slici 35 i Slici 36 prikazan je utjecaj kvalitete mreže na aerodinamičke koeficijente otpora (C_d , Slika 35) i uzgona (C_l , Slika 36), za geometriju bez zaobljenja vrhova (geometrija R0).



Slika 35: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent otpora C_d za geometriju R0



Slika 36: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent uzgona C_l za geometriju R0

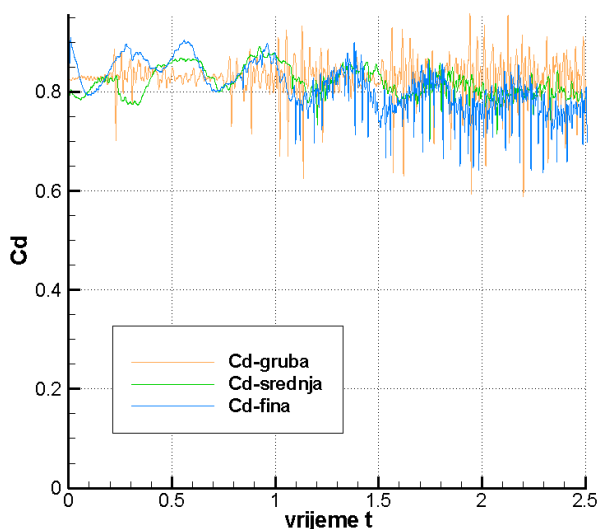
Prema prikazanim dijagramima vidi se da gruba mreža nije u mogućnosti prikazati nestacionarnost strujanja, iako se srednji koeficijent otpora grube mreže gotovo ne razlikuje u odnosu na srednju i finu mrežu

Srednja i fina mreža daju slične rezultate, te se brži proračun simulacija može napraviti s srednjom mrežom sa zadovoljavajućom točnošću. Periodičko ponavljanje signala počinje nakon nešto više od jedne sekunde.

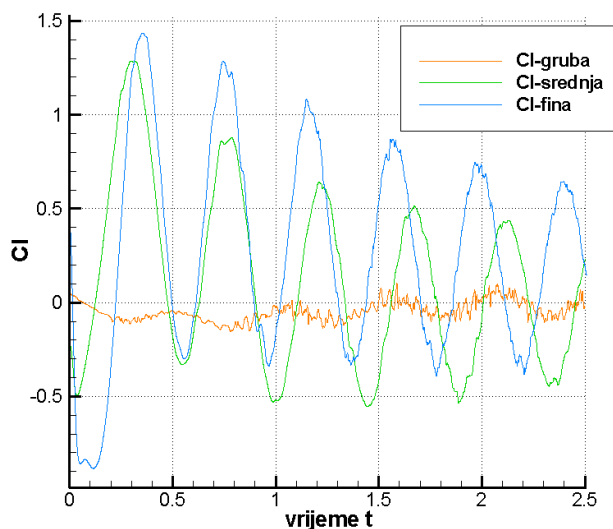
Budući da je napadni kut strujanja jednak nuli, dijagrami za aerodinamički koeficijent uzgona C_l u svim rješenjima mora prikazivati osciliranje signala oko nule, odnosno srednja vrijednost koeficijenta uzgona u ustaljenom strujanju mora biti jednaka nuli. To je jedan od kriterija koji može poslužiti za ocjenu valjanosti simulacije. Gledano prema tom kriteriju, fina mreža za geometriju R0 daje točnije rezultate, jer je srednji koeficijent uzgona jednak nuli.

5.1.2 Geometrija R0.05

Na slikama 37 i 38 vidi se utjecaj kvalitete mreže na aerodinamičke koeficijente C_d (Slika 37) i C_l (Slika 38) za geometriju R0.05.



Slika 37: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent otpora C_d za geometriju R0.05



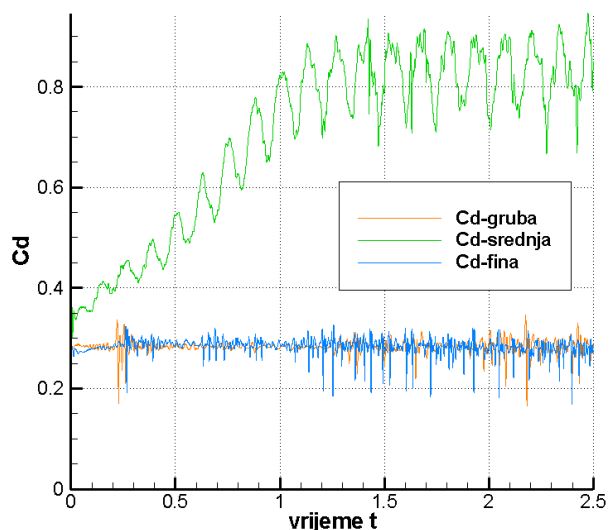
Slika 38: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent uzgona C_l za geometriju R0.05

Isto kao i kod prethodno razmatrane geometrije, gruba mreža nije u mogućnosti prikazati nestacionarnost strujanja. Srednji koeficijent otpora zraka grube nešto je veći nego kod srednje i fine mreže.

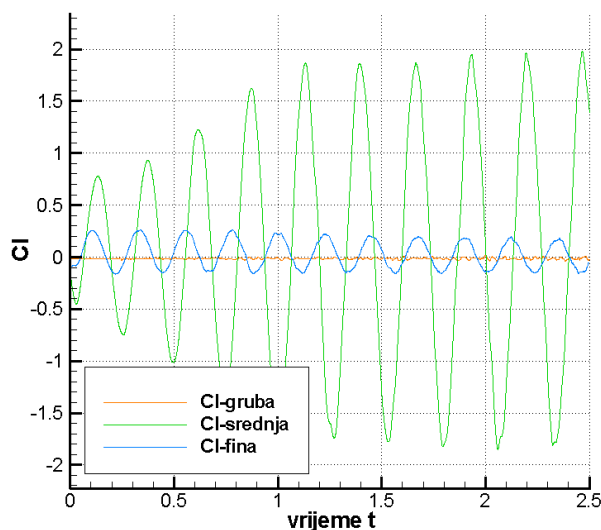
Fina i srednja mreža prikazuju nestacionarnost strujanja, ali rezultati su nešto drugačiji. Vrijednost koeficijenta otpora (C_d) je podjednaka za obje mreže, a ako pogledamo koeficijent uzgona (C_l), vidimo da je u razvijenom strujanju srednja vrijednost jednaka nuli za srednju mrežu, dok je za finu mrežu srednja vrijednost koeficijenta C_l veća od nule. Ipak, ta tvrdnja se mora uzeti sa rezervom, jer u ovoj simulaciji strujanje nije potpuno razvijeno., odnosno u dijagramu se nije pojavila potpuna periodičnost signala, pa bi za potpunu analizu simulacije morale trajati malo dulje.

5.1.3 Geometrija R0.2

Na slikama 39 i 40 vidi se utjecaj kvalitete mreže na aerodinamičke koeficijente C_d (Slika 39) i C_l (Slika 40) za geometriju R0.2.



Slika 39: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent otpora C_d za geometriju R0.2



Slika 40: Utjecaj kvalitete mreže na koeficijent uzgona C_l za geometriju R0.2

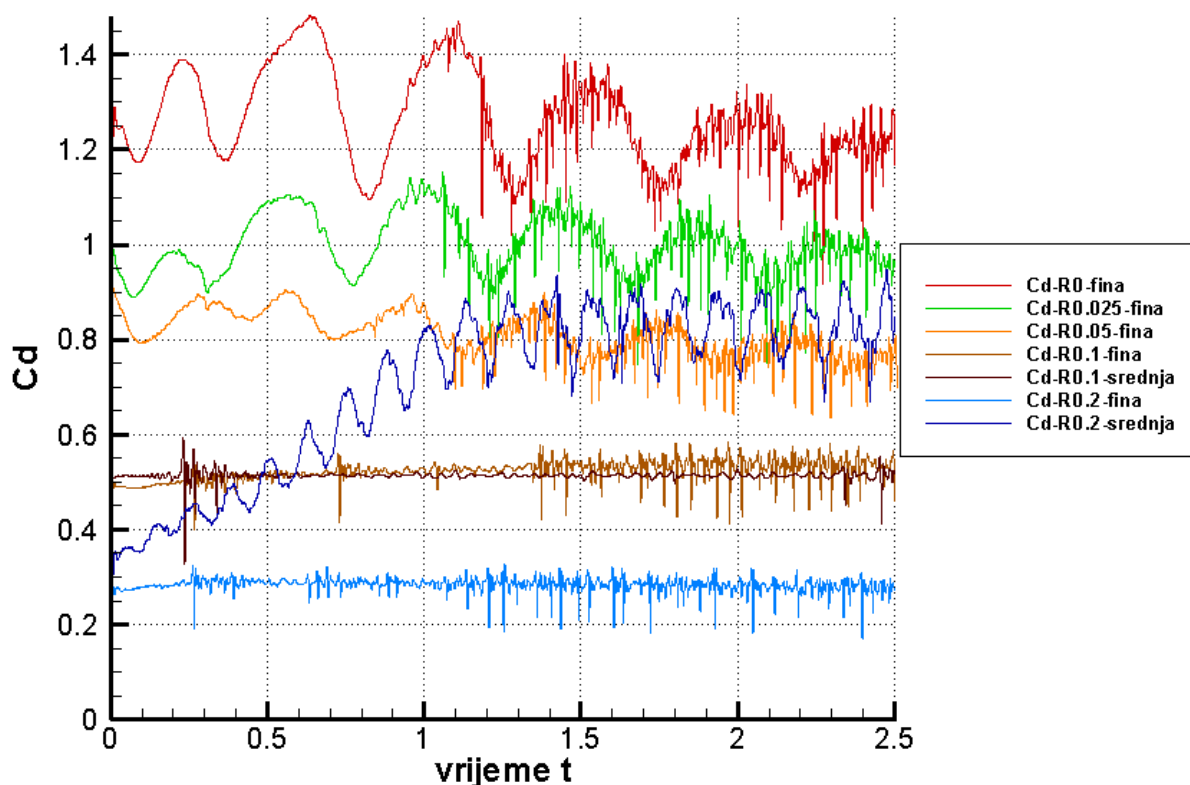
Geometrija R0.2 daje najzanimljivije rezultate. Vidimo da se rezultati srednje mreže jako razlikuju od rezultata grube i fine mreže. Problem je, vjerojatno, u postavkama strujanja, te da bismo problem pronašli, potrebno je napraviti još nekoliko simulacija s različitim mrežama, različitim modelima turbulencije i različitim vremenskom koraku, o čemu će biti riječi u Poglavlju 5.4. Isto tako, kasnije u analizi će se vidjeti da je periodička promjena aerodinamičkih koeficijenata C_l ovisna o naizmjeničnom pojavljivanju vrlo glava na bočnim bridovima. Kako su vrhovi sve zaobljeniji, tako su i vrtlozi na bočnim bridovima sve manji, a time su veće frekvencije i manje amplitude koeficijenta. Ulogu u formiranju otpora i uzgona ima i pojava ponovnog nalijeganja odvojenog graničnog sloja na stjenku tijela. Ako vrtlozi nisu preveliki, tj. ako bridovi nisu previše oštri, granični se sloj ima mogućnost prije vratiti na bočne stjenke tijela, pa će time i vrtložni trag iza tijela (nizvodno od tijela) biti manji. S druge strane, manji vrtložni trag ne znači automatski i manji otpor tijela, o čemu će isto biti riječi kasnije.

Slika 39 jasno pokazuje da samo srednja mreža daje periodički promjenjiv signal otpora, iako je srednja vrijednost približno jednaka, ili čak malo veća nego kod R0.05 geometrije. Istovremeno je amplituda promjene koeficijenta uzgona na srednjoj mreži puno veća nego kod ostalih geometrija, što je suprotno očekivanjima. Moguće objašnjenje ovih neočekivanih rezultata biti će dano u slijedećim poglavljima.

5.2 Utjecaj zaobljenja vrhova

5.2.1 Prikaz rezultata

Logično je pretpostaviti da će za veće zaobljenje brida koeficijent otpora zraka biti manji. Tu logiku slijede i dobiveni rezultati. Na Slici 41 prikazan je dijagram koeficijenata otpora zraka (C_d) za svih pet slučaja geometrije (R0, R0.025, R0.05, R0.1 i R0.2). Prikazani rezultati su dobiveni simulacijom strujanja na finim mrežama. Za geometrije R0.1 i R0.2 prikazani su i rezultati dobiveni sa srednjim mrežama, koji bolje odgovaraju podacima u literaturi.



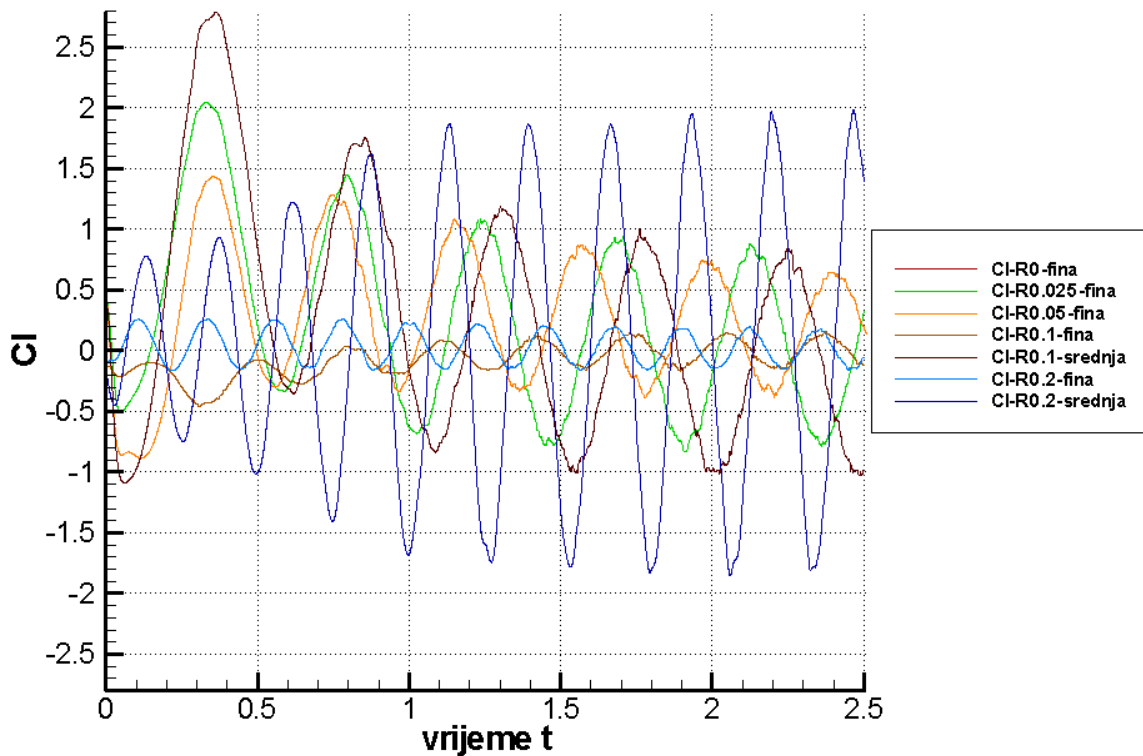
Slika 41: Usporedni prikaz koeficijenta otpora C_d za svih pet korištenih geometrija

Na Slici 42 prikazana je usporedba koeficijenata uzgona (C_l) za svih pet geometrija (također su za geometrije R0.1 i R0.2 prikazani rezultati dobiveni srednjim i finim mrežama, a za ostale geometrije samo rezultati dobiveni finim mrežama). Kako su bridovi zaobljeniji, vidimo da se amplitude značajno smanjuju, te da se frekvencija osciliranja povećava. Kao što je već spomenuto, budući da je zadani napadni kut strujanja jednak nuli, i srednja vrijednost koeficijenta uzgona u ustaljenom strujanju mora biti jednaka nuli.

Za svaku geometriju na osnovi prikazanih dijagrama, izračunate su srednje vrijednosti koeficijenta otpora za ustaljeno strujanje. Izračunate vrijednosti su prikazane u Tablici 3.

Srednje vrijednosti koeficijenta otpora zraka (C_d) prikazane su i u dijagramu na Slici 43. Vidimo da se već vrlo malim zaobljenjem dobije značajno smanjenje koeficijenta otpora. Isto tako, vidimo da svako daljnje povećanje zaobljenja ima sve manji značaj na smanjenje otpora zraka, odnosno nagib linije u dijagramu postaje sve manji. Simulacije na srednjoj mreži pokazuju da prilikom prekoračenja

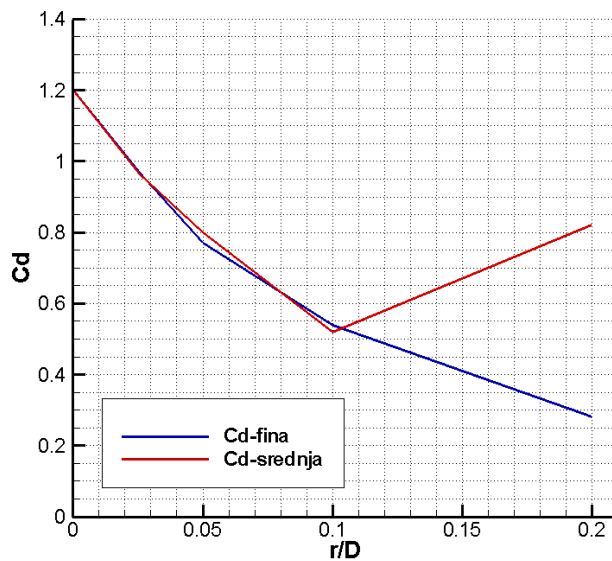
određene vrijednosti zaobljenja, može čak doći do povećanja ukupnog otpora tijela, što je posljedica ubrzanja strujanja bez odvajanja na vrlo zaobljenim stražnjim bridovima, koje smanjuje tlak na površinu i time stvara silu u pozitivnom x-smjeru, tj. otpor zraka.



Slika 42: Usporedni prikaz koeficijenta uzgona C_l za svih pet promatranih geometrija

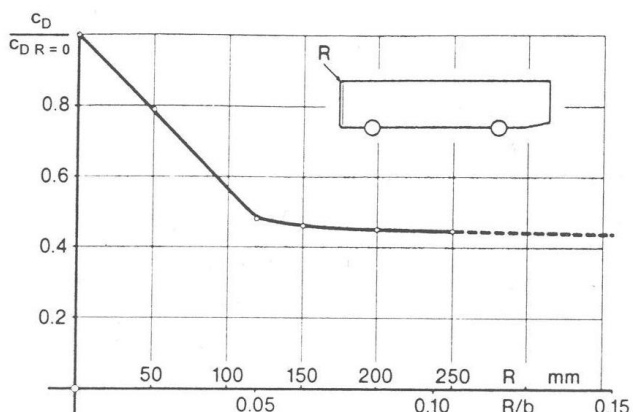
Tablica 3: Srednje vrijednosti koeficijenta otpora C_d za svih pet geometrija (fina i srednja mreža)

	R0	R0.025	R0.05	R0.1	R0.2
C_d - fina mreža	1.2	0.975	0.77	0.54	0.28
C_d - srednja mreža	1.2	0.97	0.8	0.52	0.82

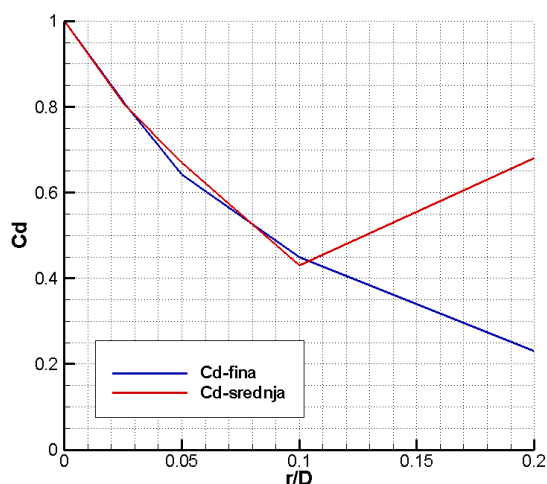


Slika 43: Srednje vrijednosti koeficijenta otpora zraka (C_d) za različite geometrije (fina i srednja mreža)

5.2.2 Usporedba s podacima iz literature



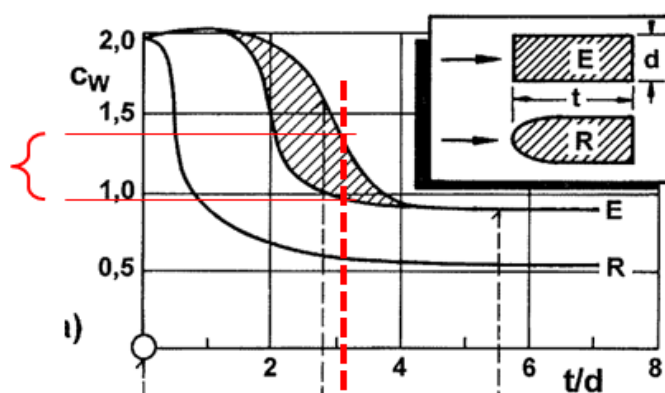
Slika 44: Utjecaj zaobljenja prednjeg brida autobusa na koeficijent otpora zraka [1]



Slika 45: Utjecaj zaobljenja bridova na zadanoj geometriji (fina i srednja mreža)

Na Slici 44 vidimo eksperimentalno utvrđen utjecaj zaobljenja prednjih bridova autobusa na smanjenje otpora zraka u odnosu na vrijednost koeficijenta otpora bez zaobljenja bridova. Slika 45 daje isti prikaz za rezultate iz ovog rada. Plava krivulja pokazuje rezultate na finoj mreži, dok crvena krivulja prikazuje rezultate sa srednjih mreža, koji bolje odgovaraju rezultatima iz literature. Bitno je zapamtiti da su na Slici 44 zaobljeni samo prednji bridovi autobusa, dok su na Slici 45 prikazani rezultati za zaobljenje sva četiri brida, tj. prednjih i stražnjih bridova, što doprinosi laganom porastu otpora prilikom prevelikog zaobljenja stražnjih bridova.

Na Slici 46 vidimo izmjerene koeficijente otpora zraka u zračnom kanalu za dvodimenzijски pravokutnik, različitih odnosa duljine i širine. Taj dijagram ćemo usporediti sa dobivenim koeficijentom otpora zraka za geometriju $R0$, koji iznosi: $C_d = 1.2$. Dakle, na Slici 46 promatramo geometriju E , gdje je definiran pravokutnik bez zaobljenja bridova. Isprekidanom crvenom linijom je označen odnos duljine i širine kakav je i u geometriji zadanog autobusa, te vidimo da se izmjereni koeficijent otpora zraka za geometriju $R0$ kreće otprilike od 0.9 do 1.4, što odgovara dobivenom rezultatu iz ovog rada.

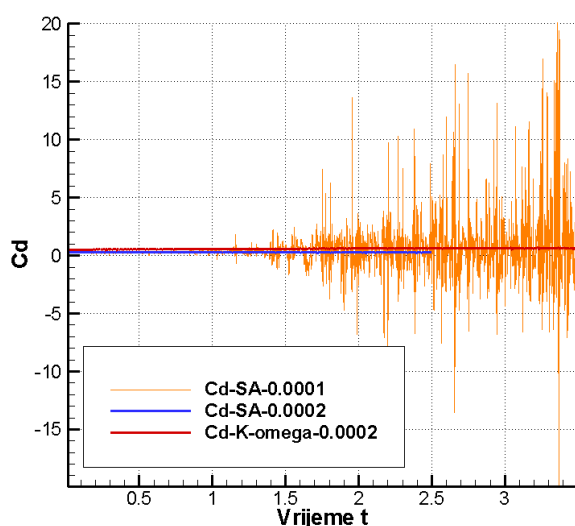


Slika 46: Izmjereni koeficijenti otpora u zračnom kanalu za 2-D pravokutnik različitih omjera duljine i širine [9]

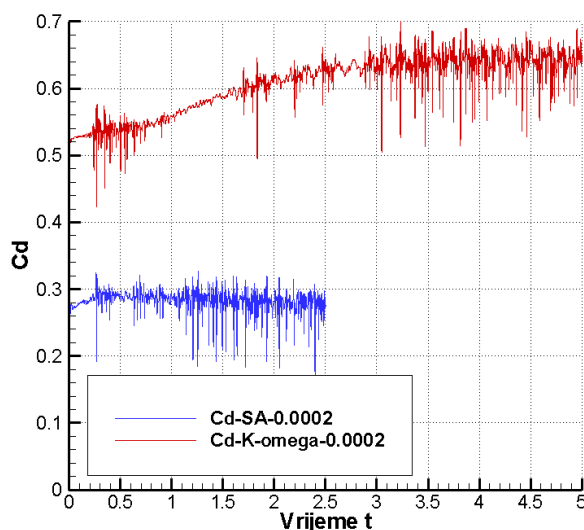
5.3 Analiza utjecaja modela turbulencije i vremenskog koraka

Za geometriju R0.2 simulacije na finoj mreži ponovljene su s 2-jednadžbenim modelom k-omega SST i standardnim vremenskim korakom ($\Delta t = 0.0002$ s), te sa standardnim modelom turbulencije S-A i dvostruko manjim vremenskim korakom ($\Delta t = 0.0001$ s).

Rezultati na Slici 47 i Slici 48 pokazuju da k-omega SST model ispravno predviđa puno veći otpor zraka na finoj mreži od standardnog modela S-A. Istovremeno simulacija sa manjim vremenskim korakom daje istu srednju vrijednost otpora kao i standardni vremenski korak ali pri potpuno nerealnim amplitudama koeficijenta otpora zraka, što pokazuje da model S-A ima problema ispravno simulirati strujanje oko R0.2 tijela na finoj mreži. Na Slici 48 nisu prikazani rezultati za model turbulencije sa vremenskim korakom $\Delta t = 0.0001$ s, kako bi se lakše usporedila preostala dva rezultata.

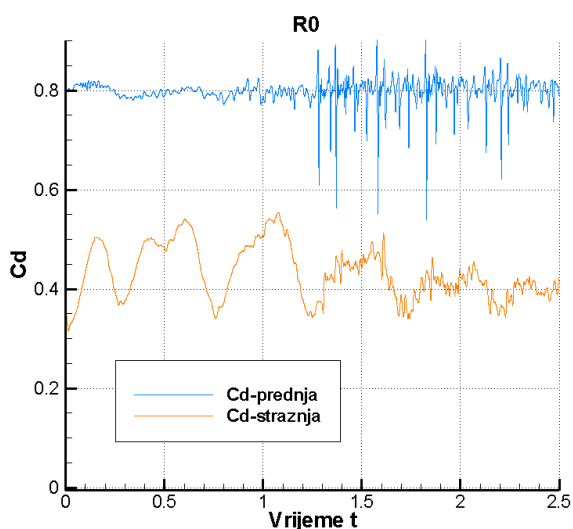


Slika 47: Usporedba utjecaja različitog modela turbulencije i različitog vremenskog koraka na koeficijent otpora (C_d) za geometriju R0.2

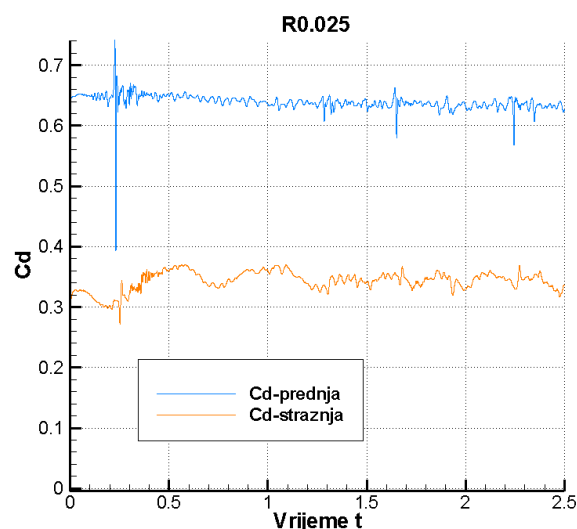


Slika 48: Usporedba utjecaja različitog modela turbulencije i različitog vremenskog koraka na koeficijent otpora (C_d) za geometriju R0.2 (bez prikaza S-A modela turbulencije sa malim vremenskim korakom)

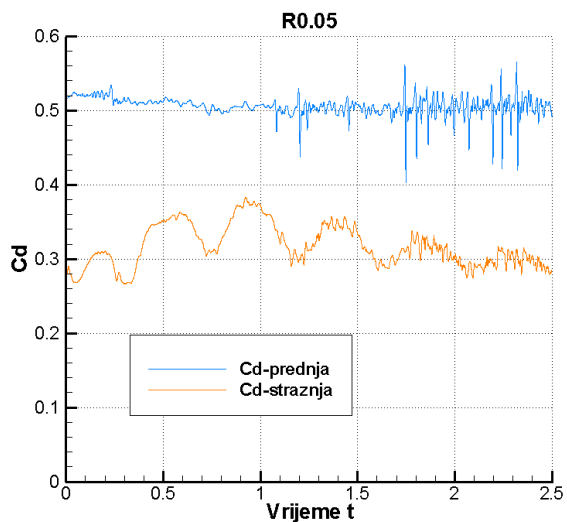
5.4 Analiza raspodjele otpora zraka (C_d) po površini tijela



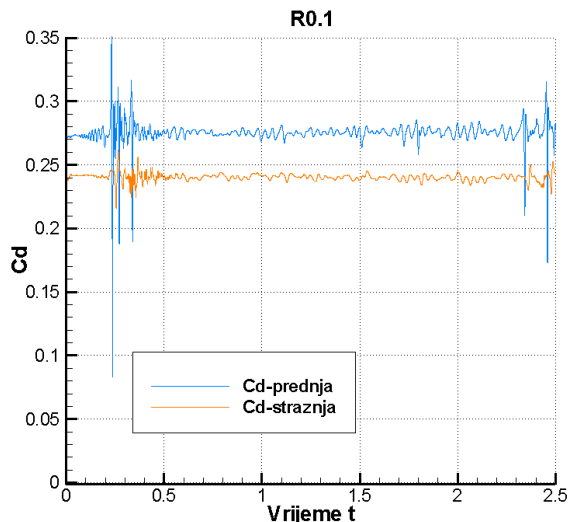
Slika 49: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0



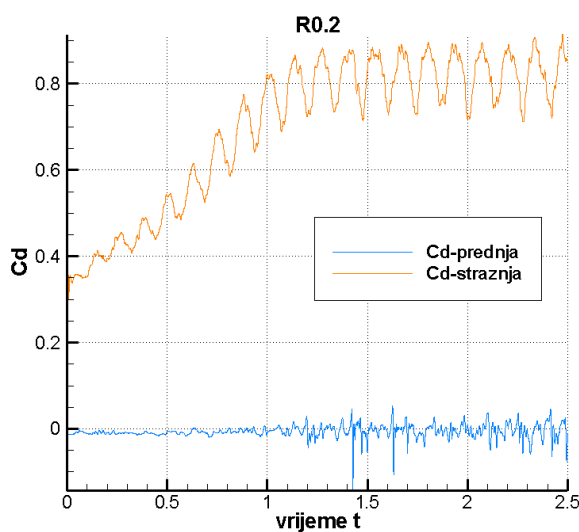
Slika 50: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.025



Slika 51: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.05



Slika 52: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.1



Slika 53: Raspodjela otpora zraka na prednjem i stražnjem bridu za geometriju R0.2

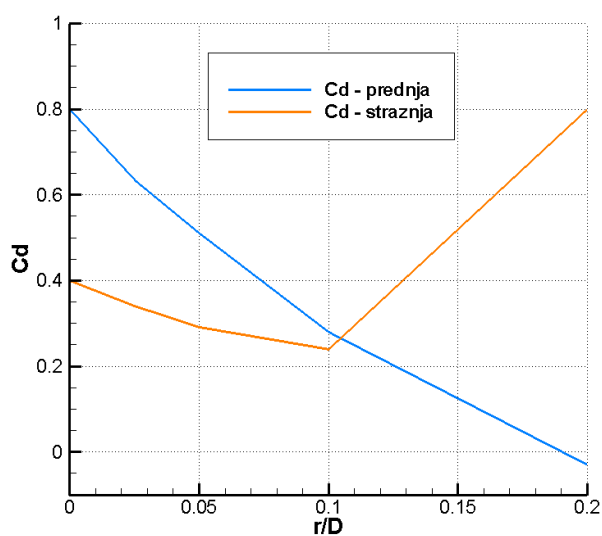
Na slikama 49 do 53 vidimo veličinu koeficijenta otpora zraka posebno za prednji i stražnji brid promatrane geometrije. Podaci su dobiveni tako da je promatran posebno koeficijent na svakome bridu, prednjem, stražnjem, lijevom i desnom. Kako su otpor zraka za lijevi i desni brid vrlo mali u odnosu na prednji i stražnji, nisu prikazani u dijagramima. Kod geometrija s zaobljenjima, prednji i stražnji brid uključuju i zaobljenja. Svi rezultati su dobiveni simulacijama na srednje finim (srednjim) mrežama.

Rezultati pokazuju da je utjecaj na koeficijent otpora zraka u čak četiri geometrije veći na prednjoj stjenici (odnosno bridu). Samo u geometriji R0.2 prednja stjenka ima manji utjecaj na ukupni koeficijent otpora. Dva su razloga za to. Prvi razlog tome je što kod ove geometrije nema odvajanja vrtloga na prednjoj strani i bočnim bridovima, te se zbog toga strujanje značajno razlikuje u odnosu na ostale geometrije, gdje je odvajanje vrtloga na tim mjestima prisutno. Drugi razlog je što na stražnjim bridovima nema ranog odvajanja vrtloga, te se zbog toga strujanje iza tijela značajno razlikuje u odnosu na ostale geometrije, gdje je odvajanje vrtloga na relativno oštrim stražnjim bridovima prisutno.

Tablica 4: Aerodinamički koeficijenti na prednjoj i stražnjoj stjenici za svaku geometriju

Geometrija	R0	R0.025	R0.05	R0.1	R0.2
<i>C_d</i> -prednja stjenka	0.8	0.635	0.51	0.28	-0.03
<i>C_d</i> -stražnja stjenka	0.4	0.34	0.29	0.24	0.3

U Tablici 4 vidimo srednje koeficijente otpora zraka posebno za svaku stjenku. Ti podaci grafički su pokazani na Slici 54. Vidimo da kod geometrije s vrlo malim zaobljenjem, zaobljenje prednjeg dijela ima veći utjecaj na koeficijent otpora zraka, nego zaobljenje stražnjeg dijela.



Slika 54: Utjecaj zaobljenja na koeficijente otpora prednje i stražnje stjenke

Trebamo obratiti pažnju da se strujanje kod tupih tijela mora promatrati kao cjelina, jer strujanje oko jednog dijela geometrije utječe na strujanje oko drugog dijela. Tako se prilikom analize Slike 54 ne smije zaboraviti da su podaci dobiveni simulacijom gdje su i prednji i stražnji bridovi zaobljeni, pa se ne smiju koeficijenti otpora za stražnju stranu izvlačiti iz konteksta, jer je za svako promatrano stražnje zaobljenje dolazna struja zraka različita, zbog različito oblikovanog prednjeg dijela. Kada bi htjeli promatrati posebno utjecaj stražnje strane, potrebno je simulirati strujanje gdje je prednja strana uvijek jednaka a stražnja se mijenja. Zaobljenje prednje strane se može promatrati odvojeno, jer zadnja stranica nema utjecaja na strujanje oko prednje stranice.

Iz navedenih rezultata se jasno vidi zašto aerodinamičari u automobilskoj industriji uvijek prate jednostavno pravilo: Prednji dio zaobliti što više moguće, a stražnji kraj ostaviti „čoškast“, tj sa oštrim bridovima.

5.5 Prikaz i opis strujanja

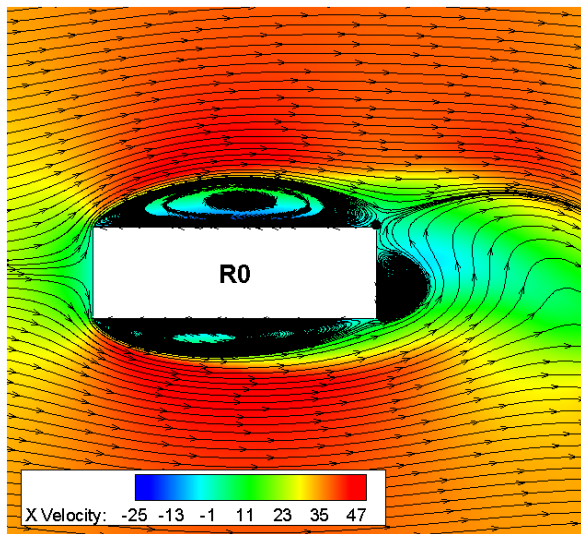
5.5.1 Strujnice

Na Slici 55 od a) do e) vidimo trenutnu sliku strujanja za pet različitih geometrija. Bojama je prikazano polje brzina u smjeru osi x, na svakoj slici se u legendi vidi da su boje i pridružene vrijednosti brzine jednake za svaku sliku, kako bi se slike mogle međusobno uspoređivati. Prikazane su brzine od -25 m/s (tamno plava boja, recirkulatorno, tj. uzvodno strujanje), pa do 50 m/s (crvena boja, ubrzanje nizvodnog strujanja u odnosu na neporemećenu struju).

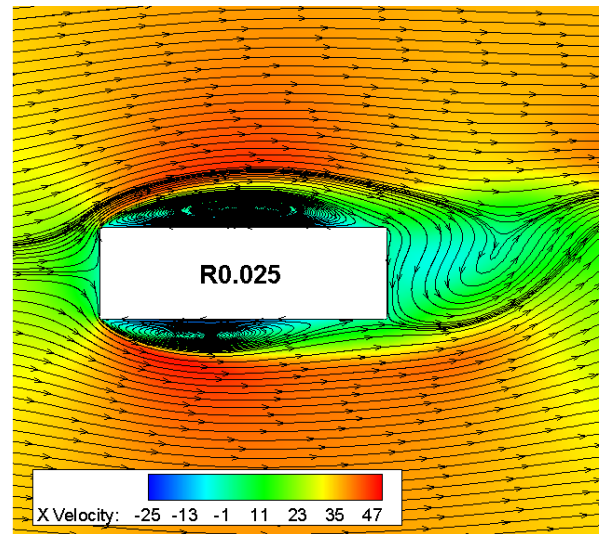
Na slici a), geometrija R0, vidimo da nastaju veliki vrtlozi na stražnjem i bočnim bridovima. Vrtlozi nastaju zbog odvajanja graničnog sloja. Naime, granični sloj nije u mogućnosti pratiti naglu promjenu geometrije, a kod strujanja zraka, gdje god se nalazi oštar brid, nalaze se i veliki vrtlozi. Vrtlozi na desnom (gornjem) bridu se okreću u smjeru kazaljke na satu, a na lijevom bridu obrnuto, odnosno, fluid se uz stjenku giba suprotno strujanju.

Fluid se obično giba iz područja većeg u područje nižeg tlaka, te tlak određuje globalni smjer gibanja fluida. Prema Bernoullijevoj jednadžbi, tlak je ovisan o brzini, kada je brzina veća, tlak je manji i obrnuto. Kada se na naglom prijelazu odvoji granični sloj, nastaje vrlo velik potlak (Slika 59) iza prijelaza, te se fluid koji se nalazi dalje nizvodno iza brida počne gibati prema bridu, te nastaje „uzvodno strujanje“.

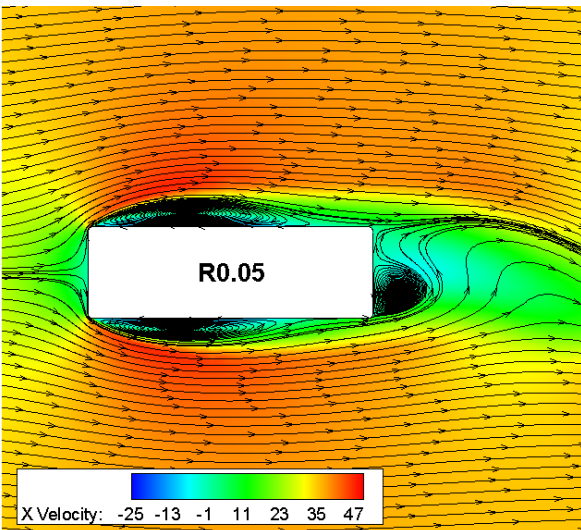
Ista pojava se događa i na stražnjem bridu, opet iz razloga nagle promjene geometrije.



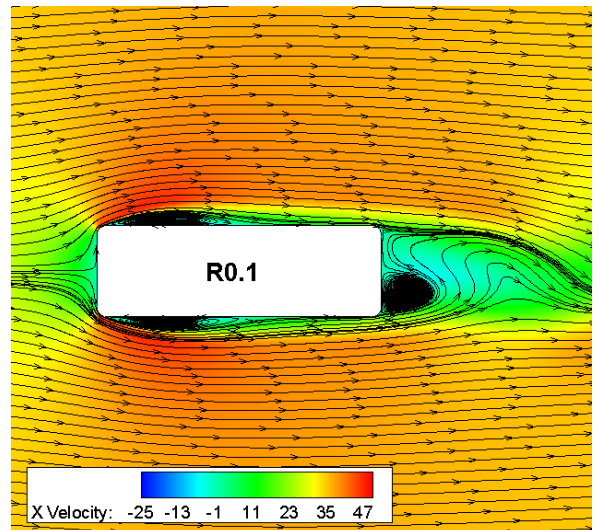
a)



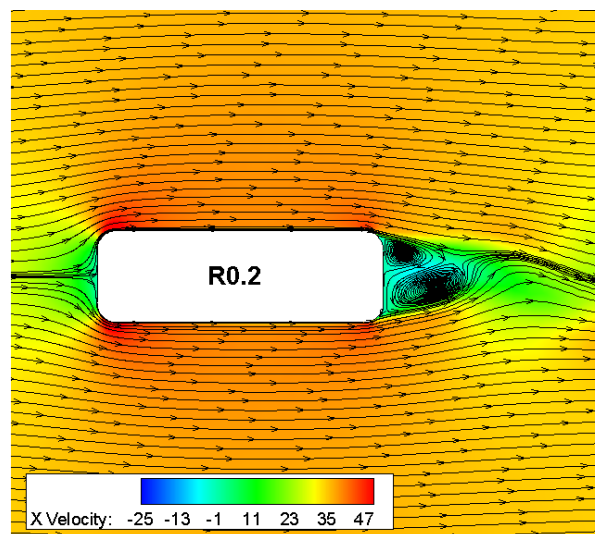
b)



c)



d)



e)

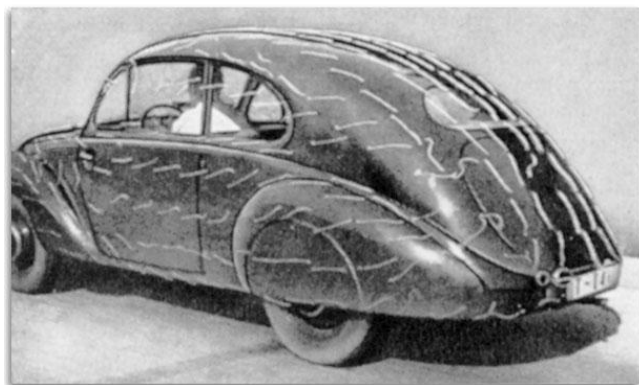
Slika 55 od a) do e): Trenutna slika strujanja. Prikazano je polje brzina u smjeru osi x i strujnice za pet korištenih geometrija.

Kako se zaobljenje vrha pravokutnika povećava, tako se granični sloj odvaja s manjim intenzitetom, te nastaju manje razlike tlaka i brzine, i manji vrtlozi.

Vrtlozi ne dopuštaju da strujanje ide uz tijelo, odnosno da granični sloj nalegne natrag na stjenku, te fluid opstrujava oko tijela i vrtloga. Kako su bočni vrtlozi za geometriju R0 veliki i prekrivaju cijelu stranicu, strujanje nema šanse nalijeći na stjenku. Zaobljenjem vrhova smanjuju se vrtlozi, te je tako strujanju omogućeno da opstruji oko vrtloga i natrag nalegne na stjenku (vidi se lijepo na slikama 55 c) i d), te slabo na slici b)). Vrtlozi na bočnim stranicama su zaslužni za nestacionarnost i periodičnost koeficijenta uzgona C_l .

Na slici 55 e) prikazano je strujanje oko geometrije R0.2. Vidimo da je na prednjoj strani zaobljenje dovoljno da ne dođe do pojave odvajanja graničnog sloja, odnosno stvaranja vrtloga. Skroz do stražnjeg dijela granični sloj ostaje uz stjenku i tek onda se odvaja. Ovo kasno odvajanje vrtloga ima za posljedicu puno manji vrtložni trag nego u ostalim slučajevima.

No, manji vrtložni trag ne znaci automatski i manji otpor zraka, zato jer ubrzanje na nakošenim zaobljenim bridovima stražnjeg kraja, neposredno prije odvajanja vrtloga, provocira veliki pad tlaka (pogledati 5.5.3). To polje negativnog tlaka (potlaka) širi se na cijelu vertikalnu stražnju stranicu tijela i povećava globalni otpor tijela. Ova pojava negativnog utjecaja nakošenog stražnjeg kraja poznata je u automobilskoj industriji i njome su se bavili aerodinamičari i dizajneri prilikom konstruiranja poznatih automobila poput Volkswagen Bube (Slika 56) ili Mini Coupe (Slika 57). U slučaju vozila Mini Coupe problem potlaka na stražnjem staklu vozila riješen je tek upotrebom aktivnog stražnjeg spojlera.



Slika 56: Nakošeni stražnji kraj VW bube [1]



Slika 57: Stražnji kraj Mini Coupe-a. Vidi se aktivni stražnji spojler koji rješava problem potlaka na stražnjem staklu

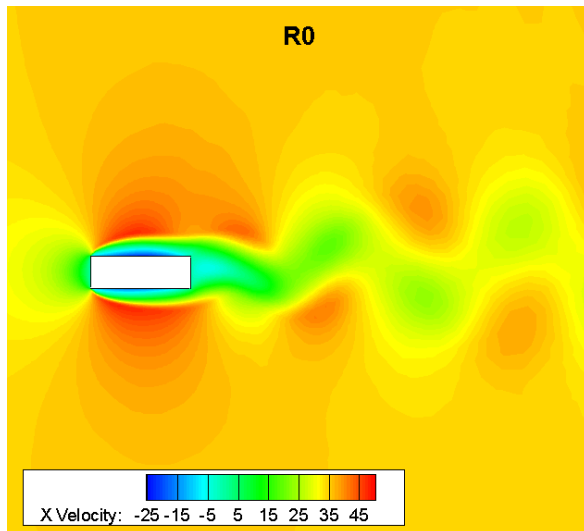
Vrtlozi na stražnjem dijelu se stvaraju, povećavaju i odvajaju. Te pojave se događaju naizmjenično na jednoj i drugoj strani stražnjeg kraja. Upravo ti vrtlozi su zaslužni za nestacionarnost i periodičnost koeficijenta C_d prikazanim ranije.

5.5.2 Polje brzina

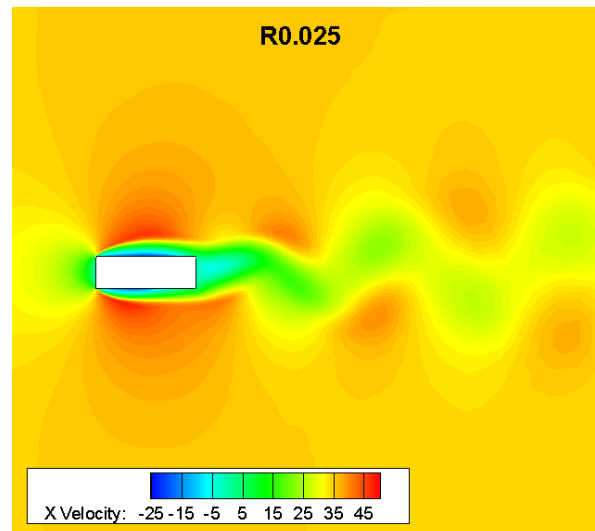
Polje brzina je prikazano iz razloga da se vidi utjecaj svake geometrije na veličinu vrtložnog traga (Slika 58 a) do e) na slijedećoj stranici). Vidimo da se povećanjem zaobljenja vrhova pravokutnika smanjuje veličina vrtložnog traga. Tip strujanja kakav se nalazi u ovim slučajevima omogućuje slijedeći pogled i analizu vrtložnog traga. Smanjenje vrtložnog traga se može promatrati na taj način da tijelo sa manjim vrtložnim tragom i manje utječe na strujanje. Manjim utjecajem tijela na strujanje, manje su i sile aerodinamičkog otpora, te se može zaključiti da će tijela sa manjim vrtložnim tragom imati i manji koeficijent otpora zraka C_d .

Radi bolje usporedbe i razumijevanja, možemo slike polja brzina i strujnica usporediti sa slikom strujanja oko aerodinamički oblikovanog tijela na slici 5 u Poglavlju 2.2. Vidimo da aerodinamički oblikovano tijelo, jako malo utječe na strujanje, te vrtložnog traga i vrtloga gotovo nema (toliko su mali da se na slici niti ne uočavaju). Iz tog razloga je sila otpora zraka u strujanjima oko aerodinamički oblikovanih tijela vrlo mala u usporedbi sa aerodinamički neoblikovanim tijelima (tupim tijelima).

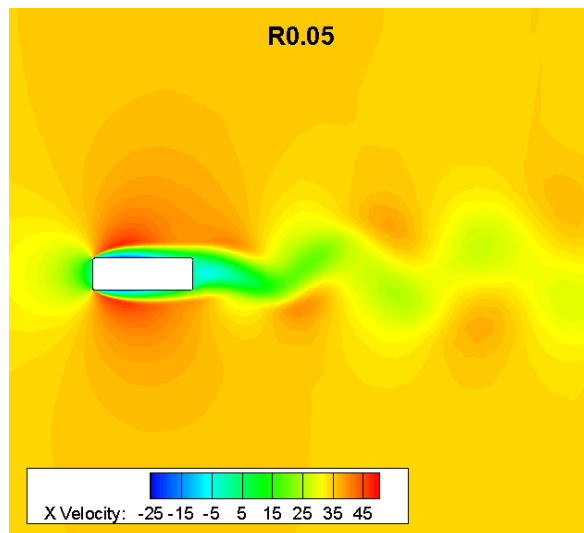
Ipak, kako je prikazano u prethodnom poglavlju, to pravilo vrijedi sve dok zaobljenje stražnjeg brida ne postane preveliko i omogući ubrzanje i zakretanje strujanja prema stražnjoj stranici tijela. Tada polje negativnog tlaka dobije priliku utjecati na veliku okomitu površinu i stvara izrazitu komponentu otpora zraka, koja može višestruko premašivati dio otpora koji nastaje na svim ostalim površinama vozila.



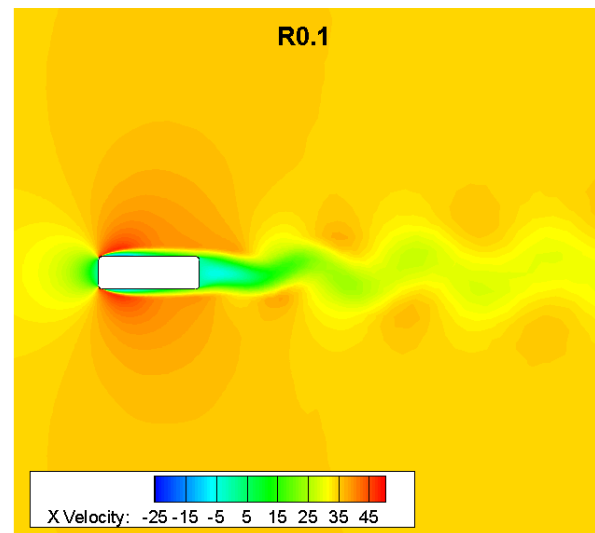
a)



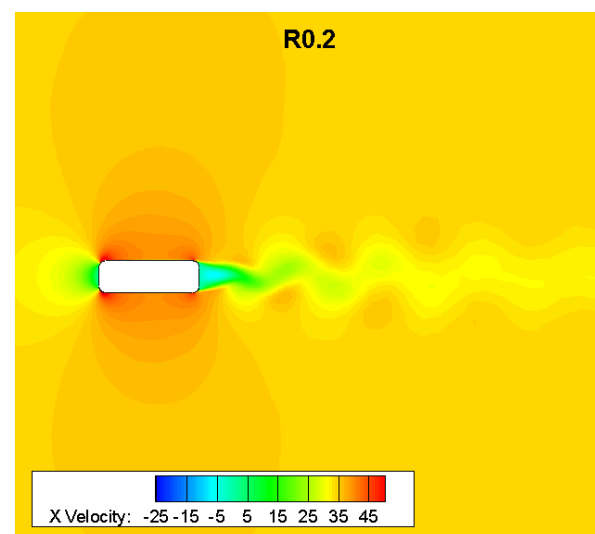
b)



c)



d)



e)

Slika 58 a) do e): Trenutna slika strujanja. Prikazano je polje brzina u smjeru osi x za pet korištenih geometrija.

5.5.3 Polje tlaka

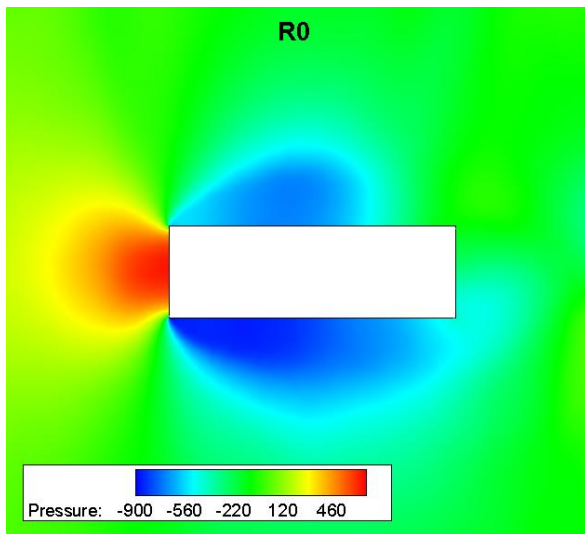
Polje tlaka je vrlo zanimljivo i važno za analizu, jer kako je navedeno u Poglavlju 2.3, sile otpora zraka kod tupih tijela su većinskim dijelom posljedica sila tlaka. Dakle, iz polja tlaka možemo vidjeti na kojem dijelu tijela nastaju najveće sile otpora. Polje tlaka za svih pet geometrija je prikazano na Slici 59 od a) do e) (slijedeća stranica).

Crveno područje nam pokazuje pretlak, koji stvara pozitivnu silu na površinu. Vidimo da na prednjem bridu, zbog zaustavljanja zraka koji nastrojava, raste tlak, koji djeluje na površinu silom u smjeru strujanja te pravi aerodinamički otpor. Na stražnjem dijelu vidimo svjetlo zelenu i svjetlo plavu boju koje govore da se na tom dijelu nalazi potlak, koji djeluje negativnom silom na površinu, odnosno pravi silu također u smjeru strujanja. Zbroj tih dviju sila na prednjoj i stražnjoj površini nam daje ukupnu silu otpora zraka.

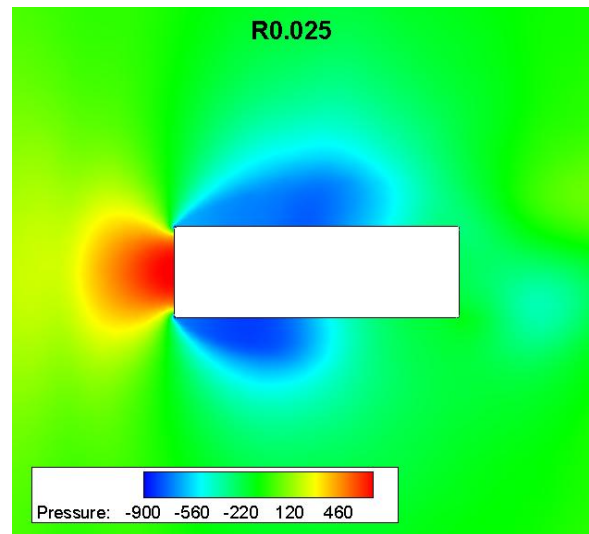
Plava područja na bočnim bridovima prikazuju polja potlaka, koji je zaslužan za koeficijent uzgona C_l . Koeficijent uzgona C_l u dvodimenzijском strujanju, je zaslužan za bočne sile koje djeluju na vozilo, promatrano u tri dimenzije. Kako je već rečeno, napadni kut strujanja je jednak nuli, te je srednji koeficijent uzgona jednak nuli, odnosno srednje sile tlaka zraka na bočnim bridovima se poništavaju. Međutim, vidimo da su potlaci koji nastaju na bočnim bridovima vrlo veliki, što odgovara velikim amplitudama koeficijenata uzgona (Slika 42), te smanjenje tih amplituda, odnosno zone potlaka utječe na ponašanje vozila i sigurnost drugih sudionika u prometu. Ta zona potlaka se vrlo lako uočava na kamionima s ceradom, gdje vidimo kako prilikom brže vožnje cerada treperi. Isto tako znamo da kada se mimoilazimo ili obilazimo veće vozilo osjetimo bočno zanošenje, čiji je uzrok upravo polje tlaka.

Kod velikog zaobljenja prednjih vrhova događa se zanimljiva pojava. Naime kako je tlak ispred presjeka velik, nastaju veliki gradijenti tlaka, te zrak struji velikim brzinama uz zaobljeni brid. Iz Bernoullijeve jednadžbe znamo da se povećanjem brzine smanjuje tlak zraka, pa tako na zaobljenjima, gdje nema odvajanja graničnog sloja, nastaje potlak, koji na površinu djeluje silom, čija jedna komponenta djeluje obrnuto smjeru strujanja, te tako nastaje negativan aerodinamički otpor. Sve većim zaobljenjem brida dolazimo do toga da je površina uz koju se fluid giba velikom brzinom sve veća, a time je veća i negativna sila otpora zraka. Posljedica toga je da je na prednjoj površini kakva je kod geometrije R0.2 rezultanta sile pretlaka na ravnom bridu i sila potlaka na zaobljenjima suprotna od smjera strujanja, te tako nastaje negativna sila otpora zraka. Iz tog razloga je na Slici 53 i Slici 54 koeficijent otpora zraka u negativnom području.

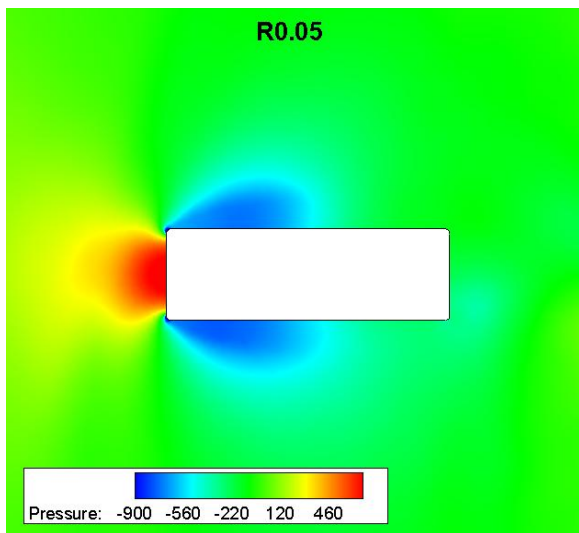
Kada je zaobljenje prednjeg brida toliko da nema pojave odvajanja vrtloga na prednjoj strani (Slika 55 e)), daljnje značajno smanjenje koeficijenta otpora zraka optimizacijom detalja više nije moguće, nego se mora primijeniti optimizacija oblika (Slika 3).



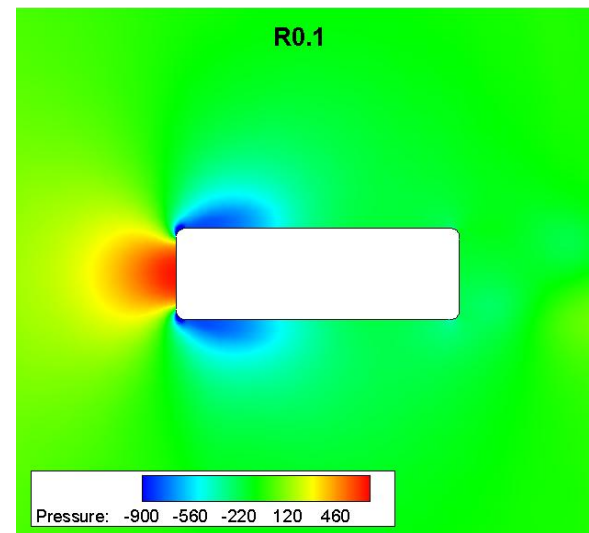
a)



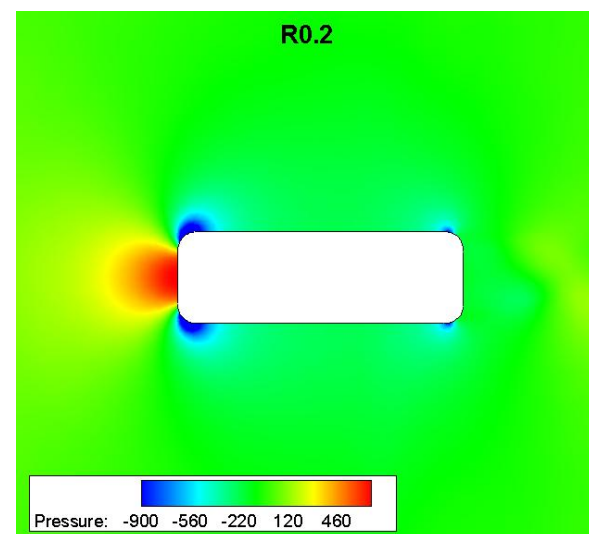
b)



c)



d)



e)

Slika 59, a) do e): Trenutna slika strujanja. Prikazano je polje tlaka za pet korištenih geometrija.

6 Zaključak

U ovom radu cilj je bio dati osnovne smjernice za razumijevanje strujanja oko tupih tijela, te prikazati osnove koje se trebaju poštivati prilikom oblikovanja gospodarskih vozila, poput autobusa. Provedenim simulacijama cilj je ispunjen, te su dobiveni odgovori na mnoga pitanja. U radu se nije detaljno ulazilo u kvantitativnu točnost dobivenih rezultata simulacija, jer je za to ipak potreban veći opseg ispitivanja i više vremena.

Analiza rezultata pokazuje, da se već vrlo malim zaobljenjem bridova dobivaju značajno manji koeficijenti otpora zraka. Osim toga dobivaju se i manji koeficijenti uzgona, a budući da su ovo dvodimenzijaska promatranja, koeficijent uzgona se odnosi na bočne sile tijekom vožnje, čije amplitude zaobljenjem bridova postaju manje.

Nadalje, došlo se je do zaključka da su za aerodinamičko oblikovanje autobusa optimizacijom detalja važni prednji i stražnji kraj geometrije. Na prednjem kraju zaobljenje bridova uvijek donosi prednosti, no te prednosti postaju sve manje porastom radijusa zaobljenja i pokazuju da se, sa aerodinamičkog stajališta, ne isplati ići u prevelike preinake oblika prednjeg kraja. Što se tiče stražnjeg kraja, tamo preveliko zaobljenje može dovesti do negativnog efekta, tj. do porasta ukupnog otpora zraka, pa treba biti izuzetno pažljiv prilikom preinake oštarih rubova na geometrijama poput karoserije autobusa. Za daljnje smanjenje koeficijenta otpora zraka potrebne su veće promjene, koje prelaze okvire optimizacije detalja.

Najzanimljiviji detalj u analizi je geometrija R0.2, čiji prednji kraj pravi negativni koeficijent otpora zraka, što je jako povoljno za smanjenje ukupnog aerodinamičkog otpora. Prilikom oblikovanja autobusa, čija namjena zahtjeva vrlo nizak koeficijent otpora zraka, ovu pojavu svakako treba iskoristiti, ali samo na prednjoj strani autobusa!

Prilozi

- I. CD-R disk

Literatura

- [1] Hucho, W. H.: Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition
- [2] Šoda, A., Ormuž, K.: Motorna Vozila, skripta, FSB, Zagreb 2011.
- [3] Buresti, G.: Bluff Body Aerodynamics Lecture Notes, Department of Aerospace Engineering, University of Pisa, Italy 2000.
- [4] Virag, Z.: Mehanika Fluida I - Što valja zapamtiti, FSB, Zagreb 2009.
- [5] Jiyuan, T., Guan., H. Y., Chaoquin, L.: Computational Fluid Dynamics, USA 2008.
- [6] Katz, J.: Race Car aerodynamics, Bentley Publishers, Cambridge, USA 1995.
- [7] Fluent 6.2.16 Help
- [8] Šoda A., Mannini, C., Sjerić, M.: Investigation of Unsteady air Flow Around Two-Dimensional Rectangular Cylinders, Transactions of FAMENA XXXV-2 (2011), Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, ISSN 1333-1124, pages 11 – 34
- [9] W.-H. Hucho: Aerodynamik des stumpfen Körper, Vieweg, 2002
- [10]Ortel, H.: Introduction to Fluid Mechanics, University of Karlsruhe, Germany 2005
- [11]Fluent 6.2 User's Guide, January 2005
- [12]Gambit 2.2 Documentation