

# Numerička simulacija optjecanja tijela

---

**Brkić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:349501>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**Numerička simulacija optjecanja tijela**

Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, Rujan 2023.

Ivan Brkić  
0069088225

Rijeka, 19. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Ivan Brkić (0069088225)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Numerička simulacija optjecanja tijela/Numerical Simulation of Flow Around Body**

### Opis zadatka:

Provesti detaljnu analizu turbulentnog strujanja zraka oko izabranog jednostavnog geometrijskog tijela zadanim komercijalnim računalnim programom. Opisati optjecanje fluida oko zadanog objekta s fizikalnog motrišta mehanike fluida kako bi se izračunao dinamički otpor i uzgon. Izraditi geometriju i numerički simulirati optjecanje te usporediti dobivene rezultate s očekivanim analitičkim vrijednostima.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

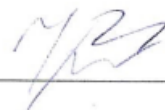


Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## IZJAVA

Ja, Ivan Brkić, izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ivan Brkić, 7. rujna 2023.,



## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
1.1.	Mehanika fluida.....	1
1.2.	Važnost numeričke simulacije optjecanja tijela .....	1
2.	TEORIJSKE OSNOVE.....	3
2.1.	Aerodinamika .....	3
2.2	Otpor i uzgon.....	5
2.2.1	Uzgon .....	5
2.2.2	Otpor.....	7
2.2.3	Bezdimenzijski parametri sile otpora $C_D$ i sile dinamičkog uzgona $C_L$ .....	7
2.3.	Strujanje zraka.....	9
3.	NUMERIČKE SIMULACIJE OPTJECANJA .....	12
3.1.	Primjeri korištenja CFD modeliranja .....	12
3.1.1.	CFD modeliranje visokih zgrada.....	12
3.1.2.	Proučavanje aerodinamičnosti formule [2] .....	18
4.	NUMERIČKA SIMULACIJA OPTJECANJA VALJKA .....	25
4.1.	Kreiranje geometrije i mreže valjka za CFD simulacije .....	25
4.2.	Virtual wind tunel simulacije .....	27
4.3.	Ovisnost koeficijenata otpora i uzgona te koeficijenta pritiska o rastu brzina.....	46
4.4.	Usporedba numeričkih rezultata sile otpora s eksperimentalnima.....	48
5.	ZAKLJUČAK .....	49
6.	LITERATURA.....	50
7.	POPIS SLIKA I TABLICA.....	51
	SAŽETAK .....	54
	SUMMARY .....	55

# 1. UVOD

## 1.1. Mehanika fluida

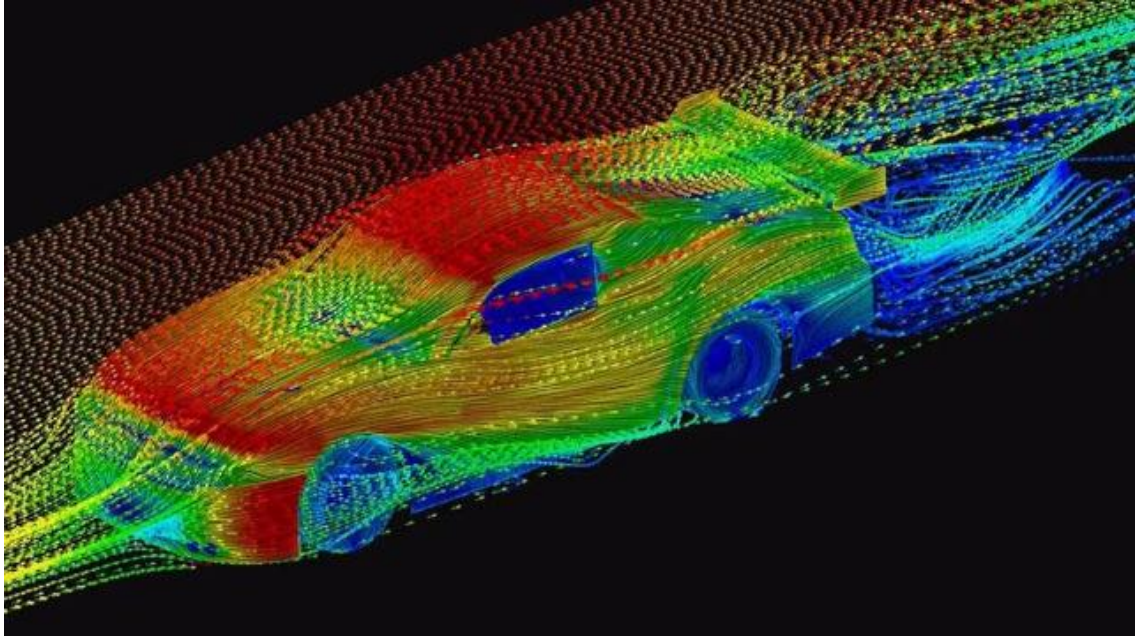
Mehanika fluida je dio fizike koji se bavi gibanjem fluida i silama koje djeluju na njega. Dijelimo je na statiku fluida koja je zadužena za proučavanje zakona i problema fluida u mirovanju, kinematiku fluida koja je zadužena za zakone gibanja fluida te na dinamiku fluida koja je usredotočena na sile koje djeluju na fluid te gibanja fluida uzrokovanih tim silama. Kinematika fluida klasificira strujanje i razvija metode za opis sustava koje se naknadno primjenjuju u dinamici fluida kako bi se mogli razrađivati osnovni zakoni dinamike fluida kao što su zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja te zakon očuvanja energije. Razne sile djeluju na fluid bez obzira na njegovo stanje. Neke od tih sila su gravitacijske, tlačne, smične i inercijske. Gibanje ili mirovanje fluida ovisi o ravnoteži spomenutih sila tj. fluid miruje kada su one u ravnoteži. Sile se dijele na volumenske (vanjske) i površinske (unutarnje) sile, a upravo određivanje i definiranje tih sila je zadatak mehanike fluida. [1]

## 1.2. Važnost numeričke simulacije optjecanja tijela

Numerička simulacija je jako važna stavka u širem spektru inženjerstva i znanosti te je u stalnom napretku i razvoju.

Simulacije provodimo preko CFD (engl. *Computational Fluid Dynamics*) programa koji obuhvaćaju sve potrebne alate, algoritme, informacije te imaju mogućnost da prihvatljivo analiziraju ponašanje fluida. Pomoću simulacija dobivamo potrebne povratne informacije koje pomažu prilikom konstruiranja i ponašanja određenog predmeta u kontaktu sa odabranim fluidom tj. omogućuju nam optimalnu konstrukciju simuliranih proizvoda. Isto tako ove metode su ekonomski i vremenski jako prihvatljive jer su puno jeftinije i vremenski učinkovitije. Bitno je spomenuti određena zanimanja koja koriste ove simulacije prilikom konstruiranja svojih proizvoda te su one gdje imaju najveći utjecaj sljedeće: aerodinamika, automobilska industrija te svemirska industrija. Simulacijama dobivamo povratne informacije vezane za raspored tlakova te sile otpora i uzgona.

U konačnici možemo zaključiti da je CFD neizbježna stavka u velikom broju zanimanja inženjerstva i konstrukcije jer štedi puno vremena i novca, a pritom daje zadovoljavajuće rezultate i informacije koji nam omogućuju pronalazak optimalnih rješenja i konstrukcija.[2][3]

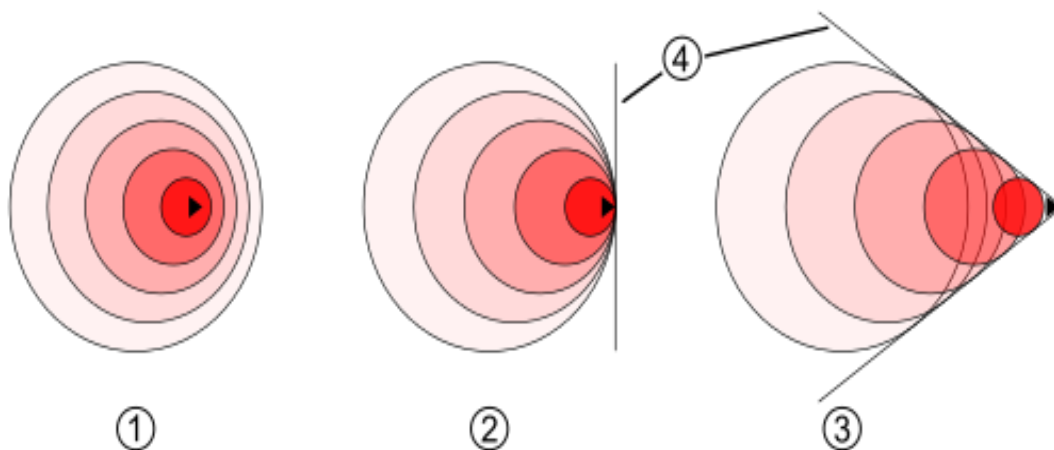


*Slika 1.1 : Primjer CFD modela [9]*

## 2. TEORIJSKE OSNOVE

### 2.1. Aerodinamika

Aerodinamika je znanstvena disciplina koju obuhvaća mehanika fluida te proučava strujanje plinova i sile kojima oni djeluju na tijelo sa kojim su u relativnom gibanju. Aerodinamika je važna stavka aeronautike zbog ispitivanja uzgona, otpora i momenata uzrokovanih silama zraka na zrakoplov tj. ima bitnu ulogu kod odabira povoljnih oblika dijelova zrakoplova. Razlikujemo nekoliko područja brzina relativnog gibanja te su u svakom od njih strujanje zraka i pojave uzrokovane strujanjem vrlo različite, pa tako i optimalna konstrukcija dijelova za različita područja varira. U području malih podzvučnih brzina zrak se smatra nestlačivim te otpor zrakoplova ovisi jedino o viskoznim svojstvima zraka odnosno na njega utječu otpor trenja, koje je posljedica manje brzine strujanja u graničnom sloju i prisutstva tangencijalnog naprezanja, te otpora oblika i induciranog otpora koji su prisutni zbog utjecaja različitih tlakova na dijelovima površine te zbog pojave zračnih vrtloga. U području između podzvučnih i nadzvučnih brzina osim viskoznosti u obzir moramo uzeti i stlačivost zraka, a pri brzinama približnim brzini zvuka pojavljuje se udarni val uz površinu tijela te uzrokuje naglu promjenu gustoće, temperature, brzine i tlaka, pa se zbog toga mijenja uzgon i povećava otpor. Prijelazno područje brzina približnih brzini zvuka nazivamo zvučnom barijerom. U nadzvučnom području udarni valovi se javljaju ispred tijela i na prednjim i izlaznim krilnim bridovima. Kod hiperzvučnih brzina javljaju se i termodinamički efekti koji nisu prisutni na nižim brzinama.[4]



Slika 2.1 : Prikaz podzvučne, nadzvučne brzine i zvučnog zida, brojevi na slici označavaju:

1 Podzvučna brzina, 2  $Ma = 1$  mah, 3 Nadzvučna brzina, 4 Zvučni zid [10]



Machov broj ( $Ma$ ) je omjer brzine nekog tijela i brzine zvuka u istom sredstvu te se dijeli na :

- podzvučni :  $Ma < 1$
- zvučni :  $Ma = 1$
- krozzvučni :  $0,8 < Ma < 1,2$
- nadzvučni :  $1,2 < Ma < 5$
- hiperzvučni :  $Ma > 5$



*Slika 2.2 : Prikaz probijanja zvučnog zida [10]*

## 2.2 Otpor i uzgon

### 2.2.1 Uzgon

Uzgon je sila kojom fluid utječe na tijelo uronjeno u fluid i to suprotno smjeru gravitacije te se računa pomoću slijedećeg izraza(2.2.1):

$$F_u = \rho g V \quad (2.2.1)$$

Gdje je:

$F_u$  = uzgon [N]

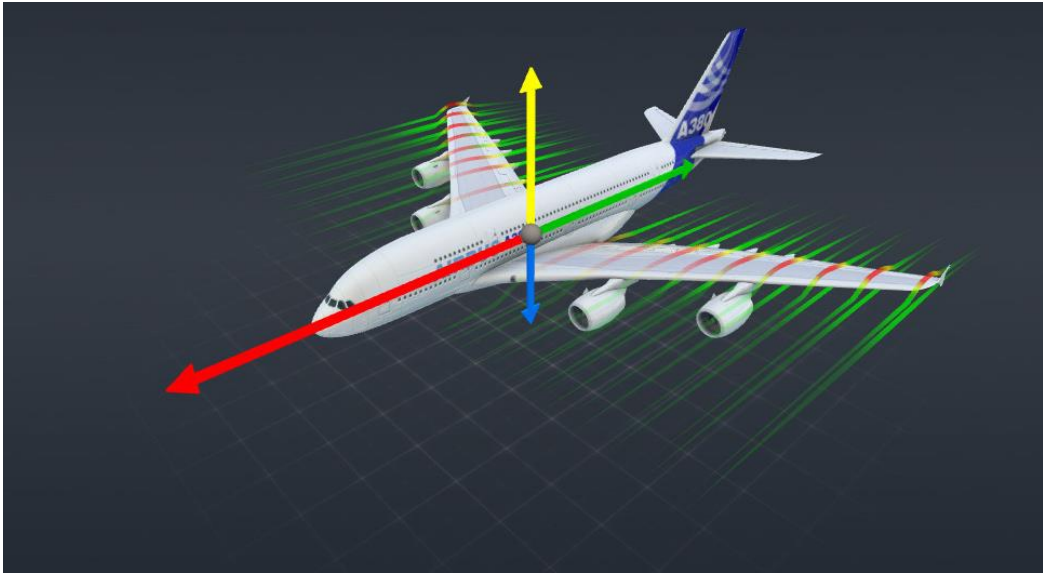
$\rho$  = gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  = gravitacijsko ubrzanje [ $\text{m/s}^2$ ]

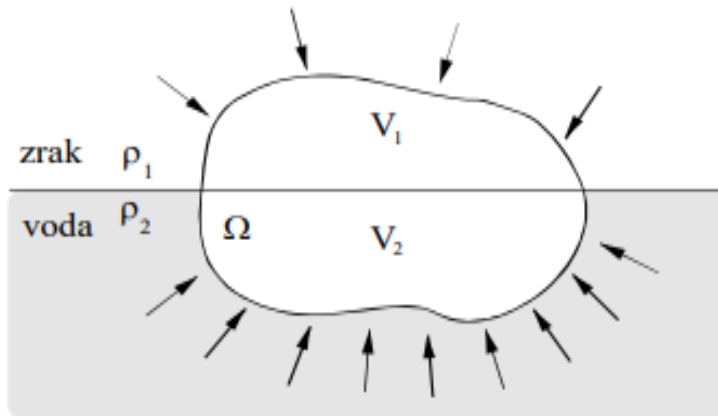
$V$  = volumen tijela

Kada tijelo miruje u fluidu prisutan je statički uzgon te na njega djeluje hidrostatski tlak jednak u svim smjerovima. Sile koje na tijelo djeluju bočno se poništavaju, a zbog većeg hidrostatskog tlaka na većoj dubini sile koje djeluju na tijelo prema dolje su manje od onih koje djeluju prema gore, pa je rezultantna sila prema gore uzgon.

Suprotno statičkom je dinamički uzgon koji djeluje na tijela koja se gibaju u fluidu te je usmjeren okomito na smjer strujanja. Dinamički uzgon zapravo omogućava let tijela koja imaju veću gustoću od zraka i to na način da se zbog nesimetrije tijela hvatište ne nalazi u geometrijskom središtu.[4]



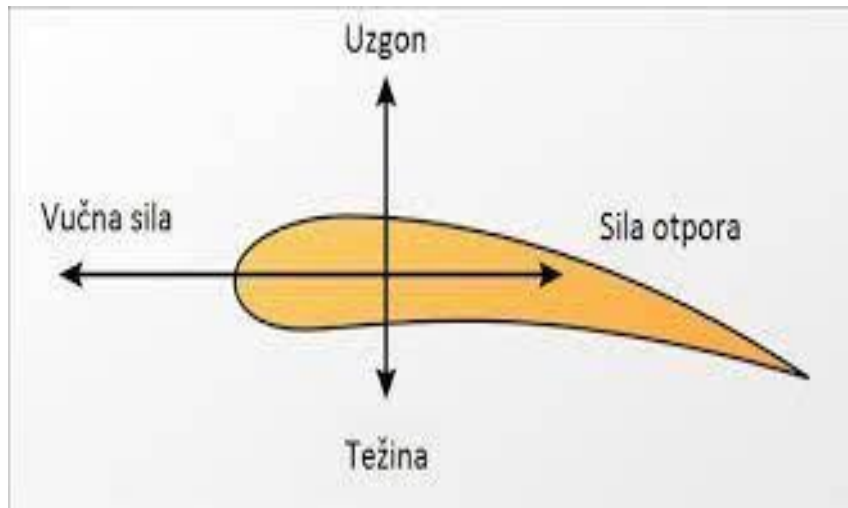
Slika 2.3 : Prikaz optjecanja aviona sa vidljivim strujnicama i rasporedom sila, crvena strelica prikazuje vučnu silu, zelena silu otpora, plava težinu, a žuta silu uzgona, vidljive su također strujnice zraka koje opstrujavaju oko aviona. [9]



Slika 2.4: Prikaz djelovanja uzgona na tijelo koje je isplivalo na površinu [7]

## 2.2.2 Otpor

Sila koja se javlja kod gibanja tijela u fluidu te djeluje u smjeru suprotnom od gibanja tijela. Iznos otpora ovisi o karakteristikama objekta, brzini, karakteristikama fluida. Kako bi postigli bolje rezultate inženjeri maksimalno smanjuju silu otpora optimalnom konstrukcijom.[5]



Slika 2.5 : Prikaz djelovanja uzgona i otpora [7]

## 2.2.3 Bezdimenzijski parametri sile otpora $C_D$ i sile dinamičkog uzgona $C_L$

Kod većine opstrujivanih tijela je nemoguće točno izračunati raspored smičnih i tlačnih naprezanja na stijenci tj. sile otpora i dinamičkog uzgona jer one ovise o većem broju parametara. Navedeni problem je riješen uvođenjem bezdimenzijskih parametara  $C_D$  i  $C_L$ . Ove parametre određujemo eksperimentalno ili numerički te pomoću njih algebarski možemo izraziti silu otpora  $F_D$  i dinamičkog uzgona  $F_L$  (2.2.2) [7]:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad (2.2.2)$$

Gdje je:

$C_D$  = Bezdimenzijska veličina koeficijenta sile otpora

$\rho$  = Gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  = Brzina nstrujavanja fluida [ $\text{m/s}$ ]

$A$  = Karakteristična površina tijela [ $\text{m}^2$ ]

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 A \quad (2.2.3)$$

Gdje je:

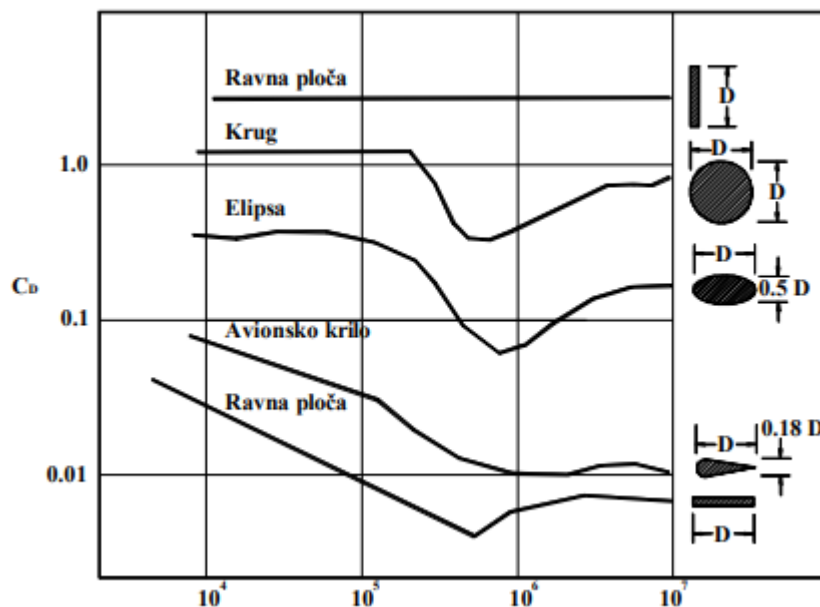
$C_L$  = Bezdimenzijska veličina koeficijenta dinamičkog uzgona

$\rho$  = Gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  = Brzina nstrujavanja fluida [ $\text{m/s}$ ]

$A$  = Karakteristična površina tijela [ $\text{m}^2$ ]

Karakteristična površina tijela je najčešće površina projekcije tijela na ravninu okomitu na vektor brzine nstrujavanja. Kod tankih oblika površina projekcije tijela na ravninu je vrlo mala pa se za karakterističnu površinu uzima planarna površina. Kretanje vrijednosti koeficijenta sile otpora s obzirom na oblik dvodimenzijjskih likova je prikazan na slijedećoj slici (Slika 2.6):



Slika 2.6: koeficijent otpora strujanja  $C_D$  za dvodimenzijjske likove [7]

### 2.3. Strujanje zraka

Strujanje podrazumijeva gibanje fluida oko predmeta u fluidu te ga grafički prikazujemo preko strujnica. Razlikujemo strujanje idealnog (nema viskoznosti) i realnog fluida, a opisujemo ga pomoću Bernoullijeve jednadžbe(2.3.1) koja glasi:

$$\rho + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = konst. \quad (2.3.1)$$

Gdje je :

$\rho$  = Gustoća fluida [kg/m<sup>3</sup>]

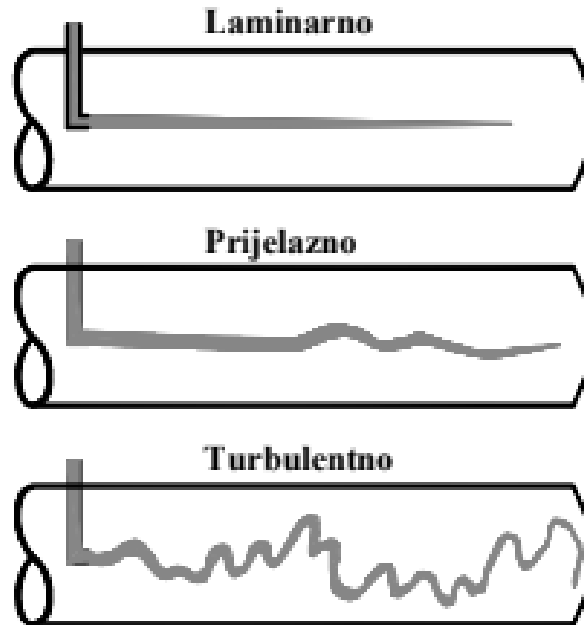
$v$  = Brzina strujanja fluida u nekoj promatranoj točki [m/s]

$g$  = Gravitacijsko ubrzanje [m/s<sup>2</sup>]

$h$  = Visina težišta poprečnog presjeka fluida u odnosu na vodoravnu ravninu [m]

$p$  = Tlak fluida u nekoj promatranoj točki [Pa]

Bernoullijeva jednadžba predstavlja temeljni zakon gibanja fluida te iz nje proizlazi da je u slučaju stabilnog strujanja nestlačive idealne tekućine ukupna energija tekućine jednaka u svim presjecima.[6]. Strujanje prema putanjama čestica fluida dijelimo na laminarno i turbulentno strujanje. Laminarno strujanje podrazumijeva mirno, jednolično, te usporedno gibanje svih slojeva fluida jednakom brzinom, dok turbulentno strujanje predstavlja nejednoliko gibanje fluida pri čemu dolazi do miješanja slojeva, a vektori brzina čestica imaju različite iznose i smjerove.



Slika 2.7 : Prikaz putanje gibanja čestica pri strujanju [7]

Vrstu strujanja određujemo Reynoldsovim brojem koji se računa pomoću slijedeće formule(2.3.2):

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (2.3.2)$$

Gdje je:

$Re$  = Reynoldsov broj

$\rho$  = Gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  = Brzina strujanja fluida [ $\text{m/s}$ ]

$L$  = Karakteristična dužina [ $\text{m}$ ]

$\mu$  = Kinematska viskoznost fluida [ $\text{kg/ms}$ ]

$\nu$  = Dinamička viskoznost fluida [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]



Slika 2.8 Prikaz laminarnog, prijelaznog i turbulentnog strujanja[7]

Vrijednosti Reynoldsovog broja pri kojima dolazi do promjene u strujanju očitamo sa slike(Slika 2.8):

- $Re \leq 2320$  predstavlja područje laminarnog strujanja
- $2320 < Re < 4000$  predstavlja prijelazno područje
- $Re \geq 4000$  predstavlja područje turbulentnog strujanja[4]

Treba napomenuti kako se prethodno spomenute granične vrijednosti dobivaju pri manjim brzinama strujanja te su relevantne u većini realnih simulacija strujanja, ali nisu uvijek dobre što je vidljivo na primjeru Osbornea Reynoldsa koji je uspio u laboratorijskim uvjetima postići laminarno strujanje uz visoki  $Re = 20000$ .



### 3. NUMERIČKE SIMULACIJE OPTJECANJA

#### 3.1. Primjeri korištenja CFD modeliranja

CFD modeliranje se u prethodna dva desetljeća počelo znatnije primjenjivati u širokom spektru zanimanja i to prvenstveno zbog jednostavnosti postupka u odnosu na fizičke pokuse te isto tako zbog ekonomskog čimbenika koji je znatno manji kod računalnih testiranja u odnosu na fizička. Numeričke simulacije pružaju zadovoljavajuće rezultate prilikom testiranja optjecanja predmeta različitim vrstama fluida te pomažu pri odabiru optimalne geometrije i konstrukcije objekata. U slijedećim poglavljima ćemo spomenuti neke konkretne primjere primjene CFD modeliranja i njegove prednosti.

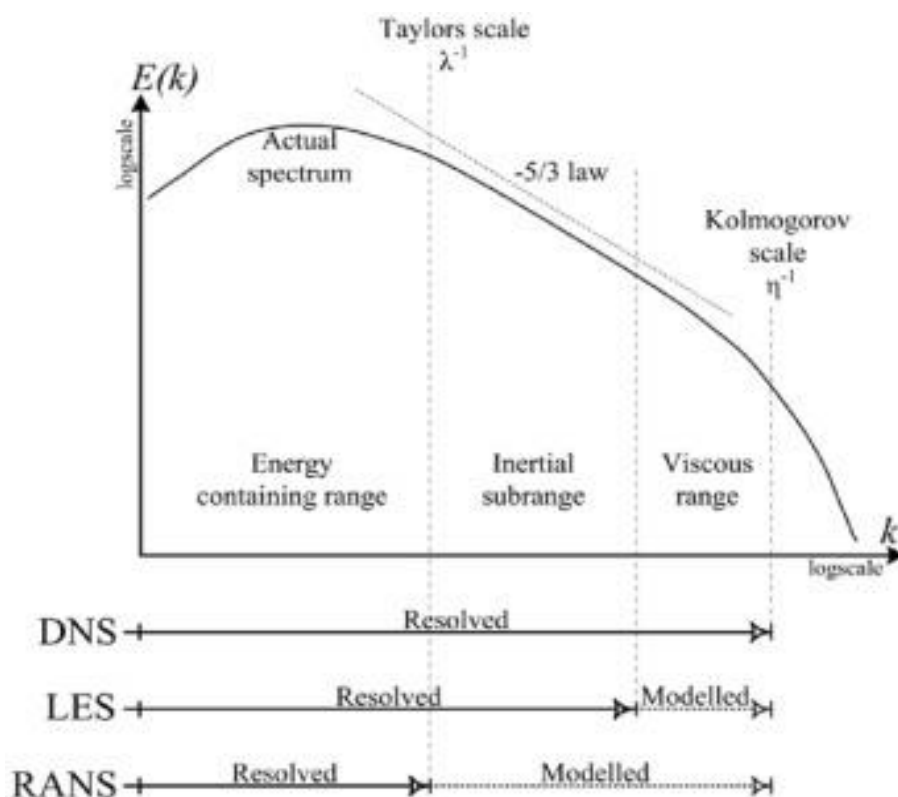
##### 3.1.1. CFD modeliranje visokih zgrada

Moderne visoke zgrade su osjetljive na pokrete vjetra što je razumljivo s obzirom na njihovu visinu. Modernizacija konstrukcije omogućila je da se visoke građevine od čvrstih i laganih materijala što povećava otpornost na pokrete vjetra. Vjetar stvara veliko bočno opterećenje pa se dizajnom zgrade mora osigurati sigurnost na njegove nalete.

Zračni tunel (engl. *Wind tunnel*) testiranje je standardno testiranje koje se koristi pri procjeni projekata osjetljivih na nalete vjetra kao što su visoke zgrade te se kao takvo konstantno poboljšava i modernizira kako bi postigli što bolje rezultate. Pri testiranju visokih zgrada u zračnom tunel primjenjuju se tri metode: 1. (engl. *HFBB-High-Frequency Base Balance metoda*), 2. (engl. *HFPI-High-Frequency Pressure Integration*), 3. aeroelastična metoda modeliranja. Najkorištenije su prva i druga spomenuta metoda zato jer daju najbolje rezultate pri mjerenju tlaka uzrokovanog vjetrom i dinamičkih sila na površini projekta. Pri korištenju HFBB metode javljaju se određeni problemi poput nemogućnosti procjene sila omotača (obloge) te zahtjeva laganih i krutih modela, pa zato ova metoda zbog svoje ograničenosti nije primjenjiva pri testiranju visokih zgrada. HFPI metoda zahtjeva krute ali fleksibilne modele što je puno prihvatljivije jer dobivamo puno bolje prikaze rasporeda tlakova na površini. U posljednje vrijeme počinju se više primjenjivati aeroelastični modeli koji imaju veće stupnjeve slobode. Aeroelastična metoda je najtočnija metoda jer mjeri sve reakcije i uzima u obzir sve vibracije ali je isto tako teško i skupo izraditi modele te se zato najčešće koristi u finalnoj fazi dizajniranja.

Glavne četiri stavke numeričkog modeliranja su odabir modela i metoda strujanja, odabir domene strujanja u okolini testiranog objekta i izrada mreže objekta (engl. *mesh*) te o njima ovisi kakva će biti kvaliteta i točnost provedene simulacije i dobivenih rezultata. Pri provođenju numeričkih

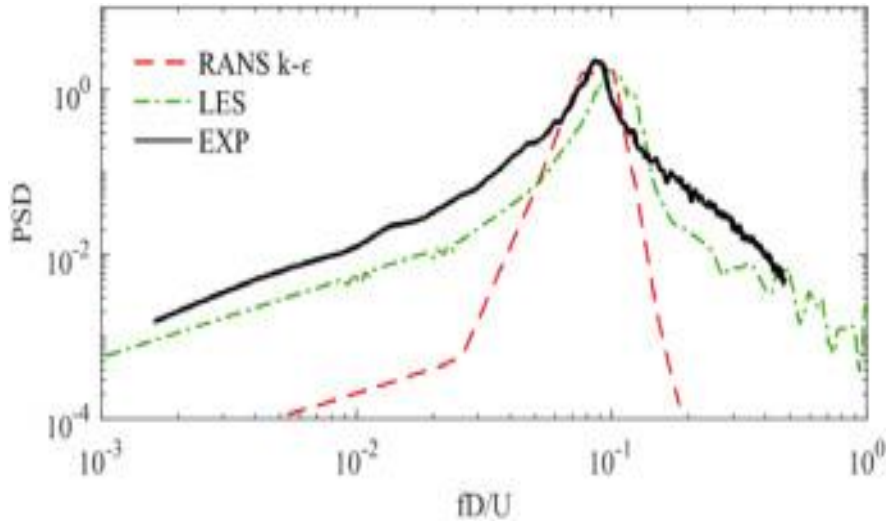
simulacija problemi strujanja se rješavaju pomoću Navier-Stokesovih jednačbi i jednačbe kontinuuma. Strujni modeli se koriste kako bi se opisalo strujanje fluida unutar zatvorene domene. Kod većine inženjerskih istraživanja je prisutan visok Reynoldsov broj strujanja pa je nemoguće direktno dobiti rezultate preko Navier-Stokesovih jednačbi jer je za to potreban izuzetan kompjuterski učinak. Ovisno o složenosti strujanja razlikujemo direktnu numeričku simulaciju; DNS (engl. *Direct Numerical Simulation*) koja nije optimalna pri testiranju modela visokih zgrada zato jer veliki modeli zahtijevaju ogromne računalne resurse, LES (engl. *Large Eddy Simulation*) metodu koja je na skali složenosti strujanja ispod DNS metode te RANS (engl. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) metodu koja je na dnu skale, a bolji prikaz i objašnjenje ovih metoda možemo vidjeti na slijedećoj slici(Slika 3.1) :



Slika 3.1: Usporedba navedenih metoda [2]

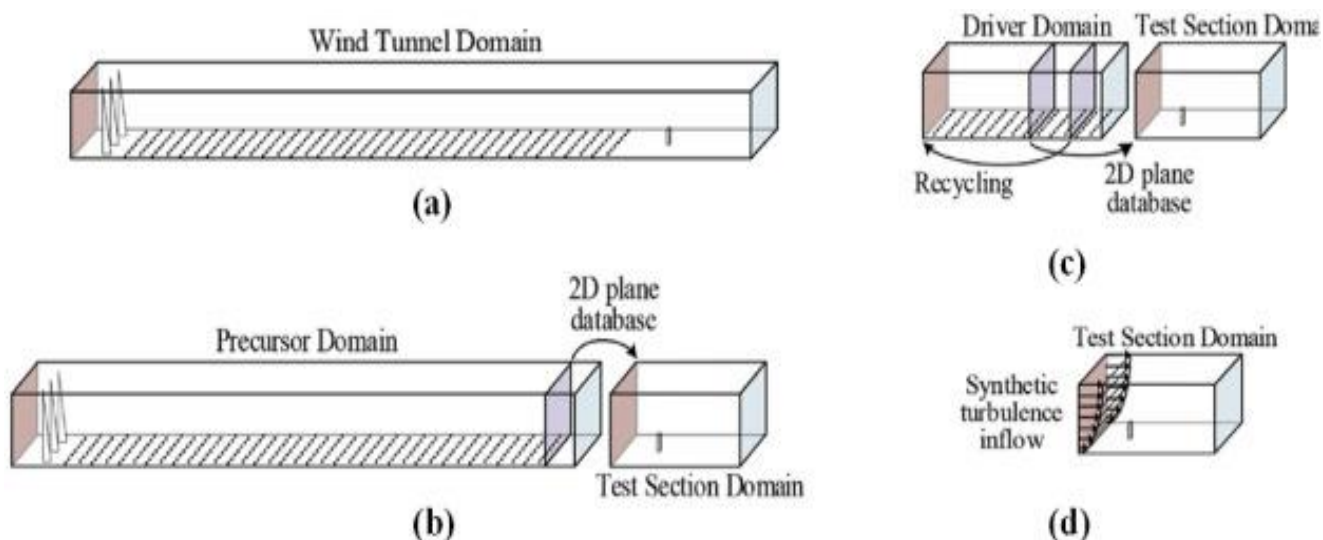
Na grafikonu je vidljiva glavna razlika između metoda tj. RANS metoda je najviše modelirana dok su LES i DNS metode manje modelirane. Odabir metode se vrši s obzirom na željena očekivanja. RANS metode se obično koriste kao početne analize kako bi se dobila okvirna rješenja. LES metoda skalira protjecanje fluida na veličinu mreže promatranog objekta te je zato vrlo bitno da se mreža pažljivo izradi kako bi rezultati bili što točniji. Isto tako LES modeli preciznije opisuju tranzicijsko

ponašanje vjetra za razliku od RANS modela koji ne mogu opisati isto, što je vidljivo na slijedećem grafu(Slika 3.2):



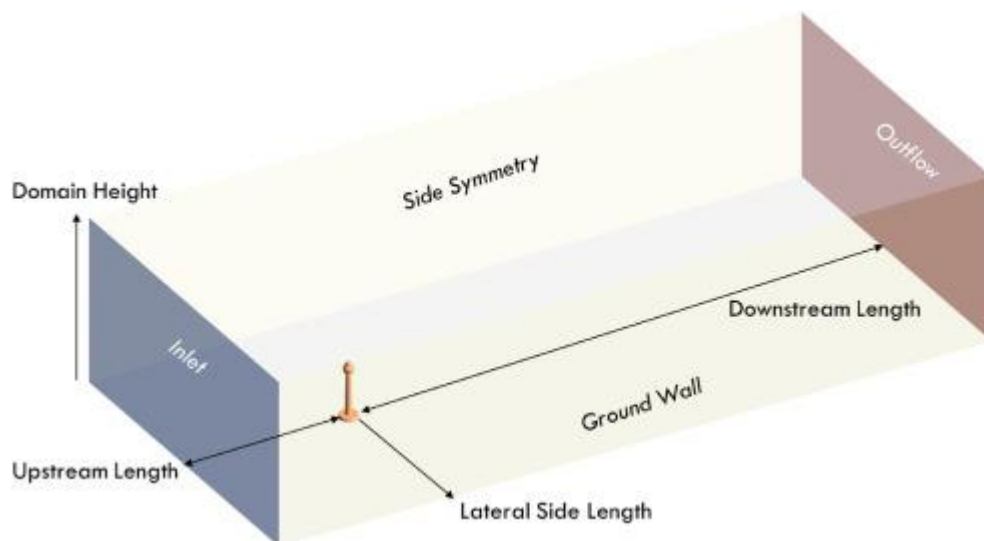
Slika 3.2: Usporedba metoda s obzirom na profil vjetra [2]

Jedan od većih izazova CFD modeliranja je simulacija stanja atmosfere u zadanoj domeni; isto tako domena mora imati mogućnost simulacije djelovanja vjetra, intenziteta strujanja, sila djelovanja i prostorne koherencije i korelacije, a to se sve generira pomoću četiri metode: a) Replikacija zračnog tunela, b) Metoda recikliranja domene, c) Metoda prethodne domene, d) Sintetično strujanje. Među spomenutim metodama zadnja se najviše koristi jer metode pod a, b i c zahtijevaju veće kompjuterske resurse zbog veličine domene i složenosti strujanja; isto tako problemi se javljaju jer je generirano strujanje osjetljivo na gustoću mreže opisane testiranom objektu. Metoda sintetičnog strujanja generira strujanje prema algoritmu koji omogućuje nasumičnost strujanja. Spomenute metode i njihove domene su vidljive na slici (Slika 3.3):



Slika 3.3: Prikaz domena za spomenute metode [2]

CFD domena simulacije je zapravo reprezentacija zračnog tunela ali sa numeričkim postavkama. Uobičajena postava za testiranje visokih zgrada je da se model zatvori u geometrijsko pravokutno tijelo u kojem su definirana strujanja, zidovi, i simetrije. Integralna duljina skale je dobivena simulacijama u zračnom tunelu. U numeričkim simulacijama isto kao i u testiranjima u zračnom tunelu su brzine i intenzitet strujanja idealizirani unutar prazne domene. Primjer objekta u kompletno definiranoj domeni je prikazan na slijedećoj slici(Slika 3.4):

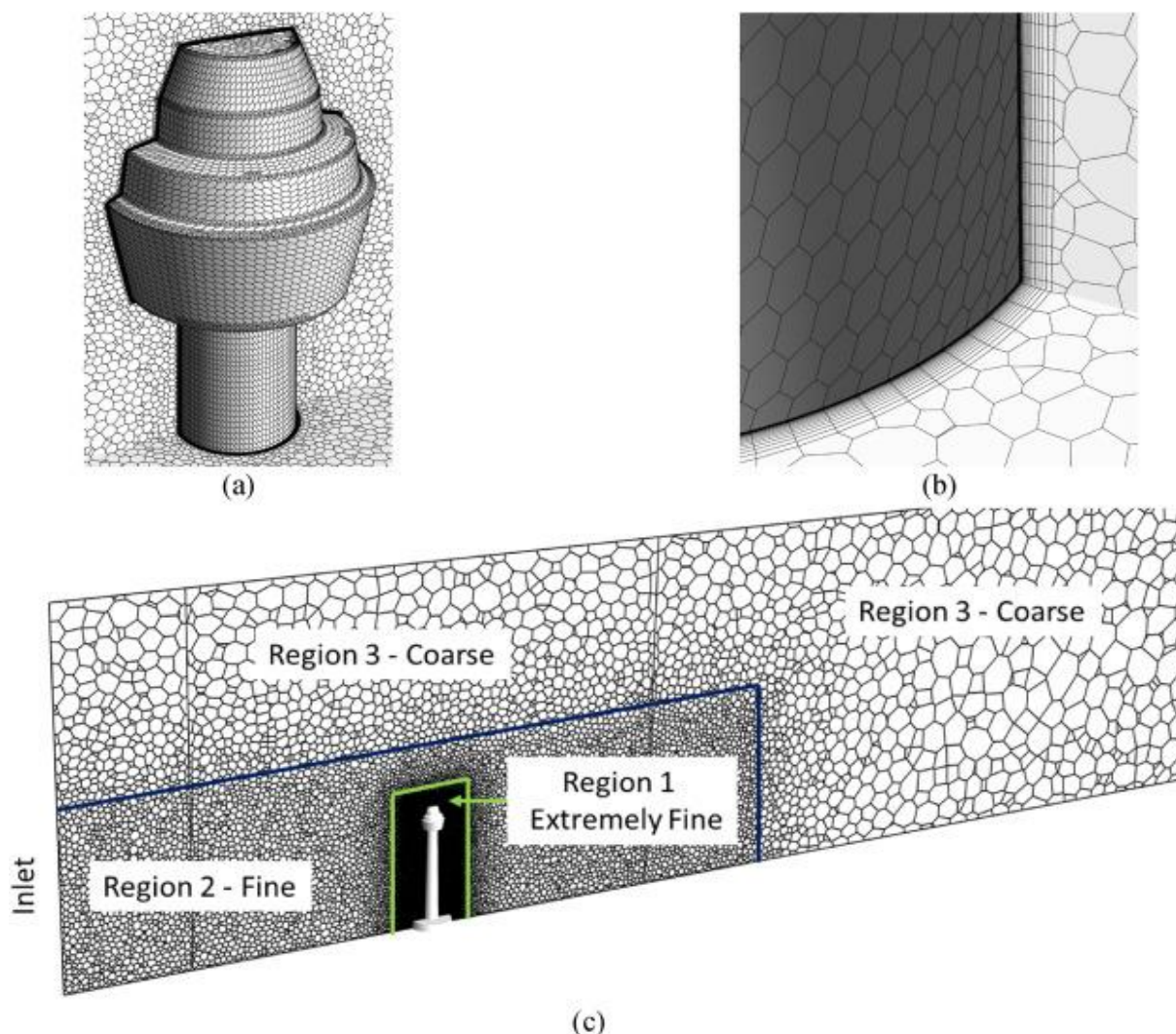


Slika 3.4: Prikaz objekta u definiranoj domeni [2]

Jedan od glavnih problema definiranja domene je veličina odnosno udaljenost krajeva domene u odnosu na promatrani objekt. CFD preporuča korištenje  $5H$ , gdje je  $H$  visina objekta, udaljenosti od

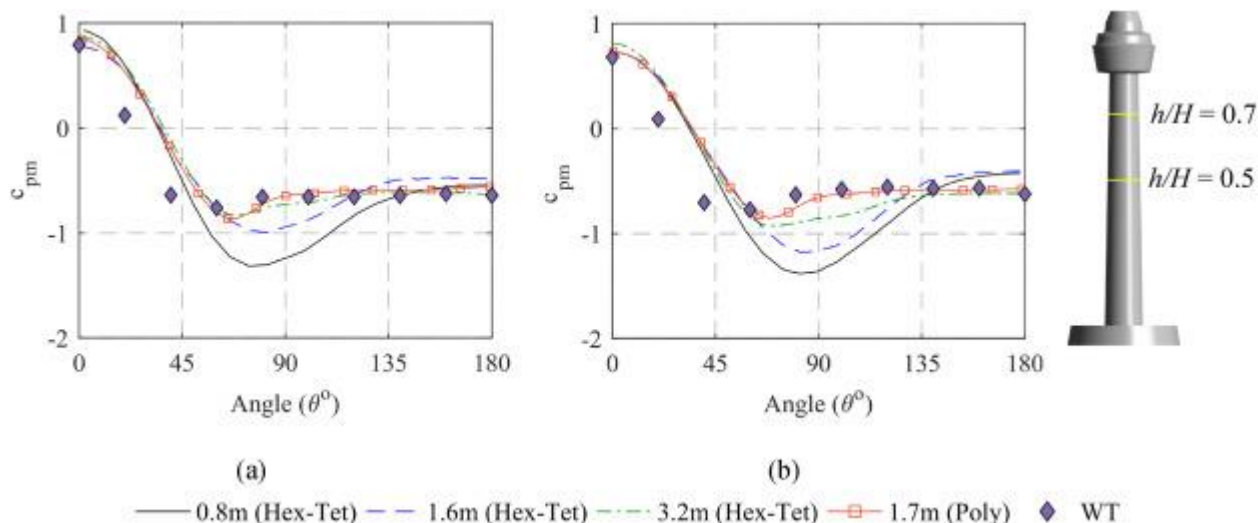
(početka domene do promatranog objekta te  $15H$  od promatranog objekta do kraja domene kako bi se protok u cijelosti razvio. Udaljenost  $5H$  se također preporuča sa bočnih strana. Također je bitno paziti da se omjeri blokada (engl. *blockage ratio*; predstavlja omjer veličine objekta u odnosu na ostatak slobodne domene u poprečnom presjeku) održavaju ispod 3%, a maksimalno dopušteno je 5%. Spomenute preporuka za kreiranje domene se prvenstveno odnosi na simulacije visokih zgrada te u drugim slučajevima gdje ne očekujemo velike turbulencije iza objekta pa u tom dijelu smanjujemo domenu kako bi uštedili na računalnim resursima.

Mreža je vrlo bitan dio CFD simulacije. Mreža mora biti dovoljno fina kako bi riješila sve potrebne skale za određeni problem ali u istu ruku ne previše fina jer bi to moglo znatno povećati vrijeme simulacija. Iz prakse proizlazi da se za kreiranje mreža visokih zgrada u obzir moraju uzeti četiri čimbenika: 1) Broj površnih ćelija za mjerenje rasporeda tlakova, 2) slojevi inflacije, 3) filtriranje prednjeg dijela mreže za održavanje profila vjetra i strujanja, 4) filtriranje stražnjeg dijela radi dobivanja formacije strujnica i cirkulacija strujanja. Domena se dijeli na 3 regije od kojih je regija 1 najbliža okruženju objekta te je definirana na način da se strujnice što bolje vide, regija 2 kreće od početka domene pa sve do stražnje strane objekta te ima svrhu održavanja sintetičkog strujanja i profila vjetra, regija 3 sadrži manju mrežu te obuhvaća dijelove udaljenije od objekta i služi samo kako bi se omogućio kontinuitet strujanja unutar domene. Ovakav raspored je povoljan jer omogućuje korisniku da fokusira najveću gustoću na dio koji ga najviše zanima. Primjer mreže objekta i spomenutih regija vidljivi su na slijedećoj slici (Slika 3.5):



Slika 3.5: Prikaz regija i mreže [2]

Važno je također spomenuti i oblik ćelija koje će sačinjavati mrežu. Najviše korišteni oblici ćelija su heksaedarski ili tetraedarski. Heksaedarski oblik je najčešće nemoguće implementirati zbog složene geometrije pa se koriste kombinacije heksaedarskih i tetraedarskih ćelija. U posljednje vrijeme na popularnosti su dobile poliedarske ćelije jer uz manji broj ćelija predviđaju promjenu smjera strujanja bolje nego tetraedarske ćelije. Mreža kombinacije tetraedarskih i heksaedarskih ćelija (3.2 miliona) je uspoređena sa mrežom poliedarskih ćelija (1.7 miliona). Dobiveni rezultati su pokazali da je mreža sačinjena od poliedarskih ćelija dala puno bolje i preciznije rezultate u kraćem roku nego mreža sačinjena od kombinacije tetraedarskih i heksaedarskih ćelija (Slika 3.6).



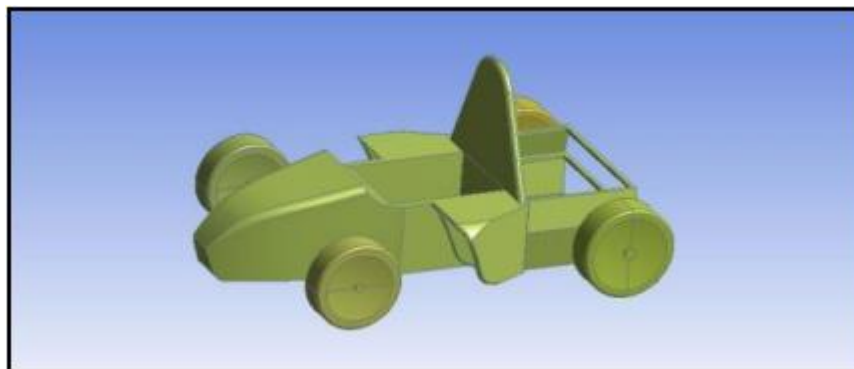
Slika 3.6: Usporedba mreža sačinjenih od različitih oblika stanica [2]

### 3.1.2. Proučavanje aerodinamičnosti formule [2]

Ovo istraživanje opisuje dizajn i CFD analizu formule. Fokus istraživanja je prvenstveno na testiranju aerodinamičnosti formule sa prednjim spojlerom i bez prednjeg spojlera te sa vatrozidnim otvorima. Cilj ovog istraživanja je proučavajući aerodinamičnost formule smanjiti silu otpora isto kao i poboljšati stabilnost formule. Ovim postupcima se također smanjuje otpor zraka na vozilo. Testiranje je obavljeno u programu ANSYS Fluent (turbulentne simulacije strujanja zraka) na skaliranom modelu. CFD je u zadnjih par desetljeća imalo veliku ulogu u industriji trkaćih auti te se pomoću simulacija dobiva aerodinamično optimalni oblik vozila. Sila otpora negativno utječe na performans auta pa je cilj smanjiti je što je više moguće. Potisna sila (eng. *downforce*) je korisna jer pomaže zadržati trkaći auto na tlu.

Dakle, pri modeliranju oblika formule potrebno je dobiti što aerodinamičniji oblik kako bi otpor zraka bio što manji, a da se istovremeno osigura stabilnost formule. Stabilnost formule se poboljšava krilima ili spojlerima. Ove simulacije su provedene na tri različita modela koji će biti opisani i prikazani u nastavku:

Model 1 (Slika 3.7):



*Slika 3.7 : Prvi model [2]*

Prvi model je bazični model SAE formule sa uobičajenim oblikom i dimenzijama.

Model 2 (Slika 3.8):

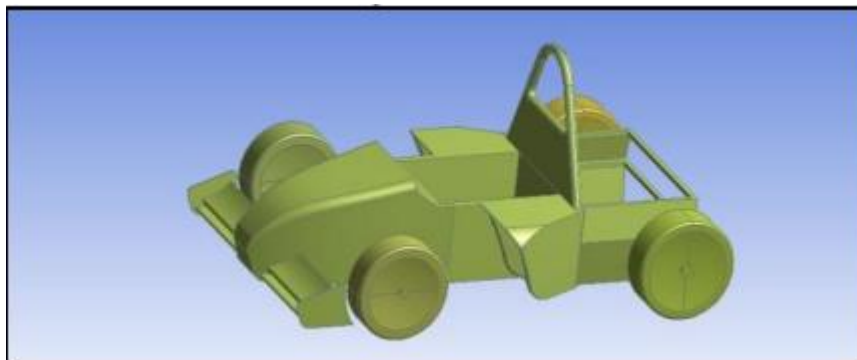


*Slika 3.8: Drugi model [2]*

Drugi model je isti kao i prethodni ali sa izrezanim vatrozidom kako bi se smanjio koeficijent otpora

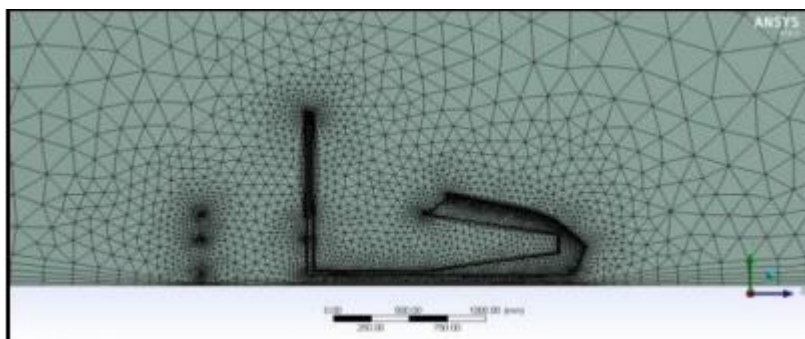


Model 3 (Slika 3.9):



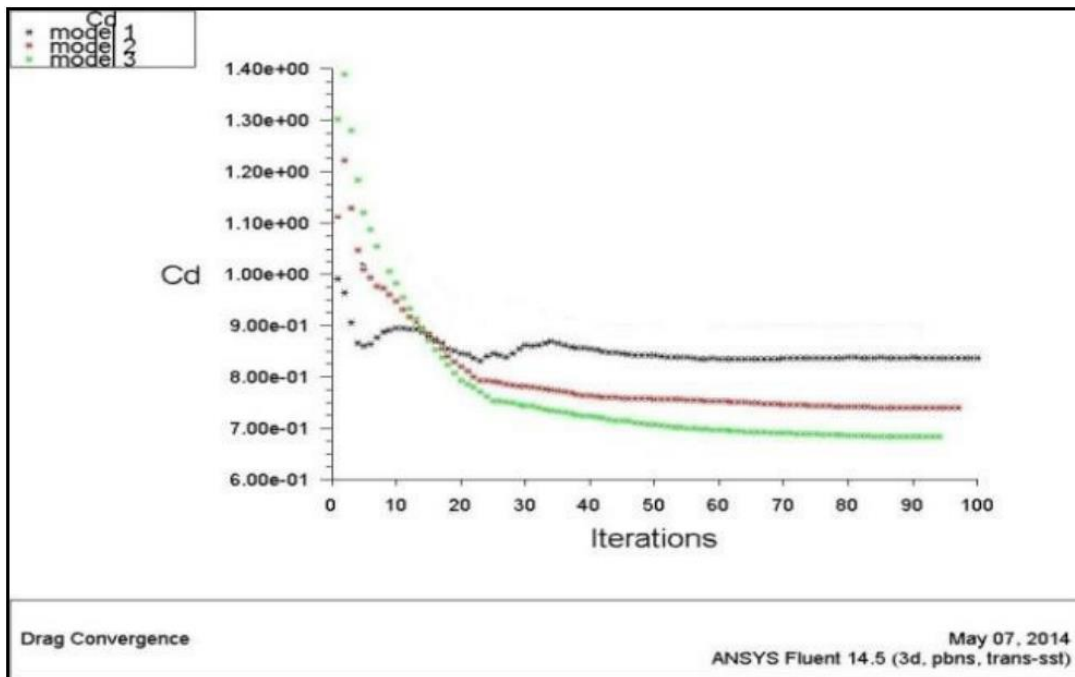
Slika 3.9 : Treći model [2]

Treći model ima izrezani vatrozid i stavljeno mu je prednje krilo što će smanjiti silu otpora i povećati stabilnost povećanjem sile uzgona. Kako bi se skratio kompjuterski proces simulacije korištena je samo polovica formule što je moguće jer je simetrična. Korištena je nestrukturirana mreža trokutastog oblika te je bila sačinjena od 1119641 ćelija. Primjer korištene mreže je vidljiv na slijedećoj slici(Slika 3.10):

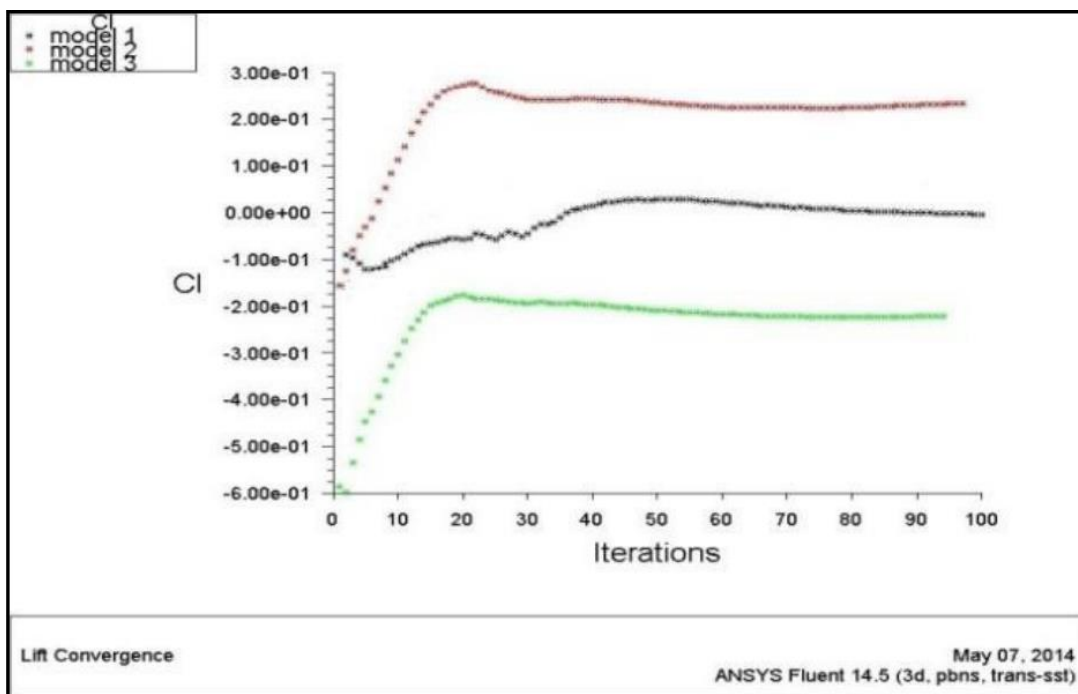


Slika 3.10 : Korištena mreža [2]

Testiranje i analiza je obavljena postavljajući model formule u zračni tunel gdje je brzina strujanja zraka iznosila 25 m/s. Za kalkulacije je korišten ANSYS FLUENT solver te su dobiveni grafovi koji prikazuju usporedbu koeficijenta sile otpora i usporedbu koeficijenta sile uzgona za svaki spomenuti model te konvergenciju istih prema dobivenim vrijednostima pri prikazanom broju iteracija, a ti grafovi su (Slika 3.11; Slika 3.12):

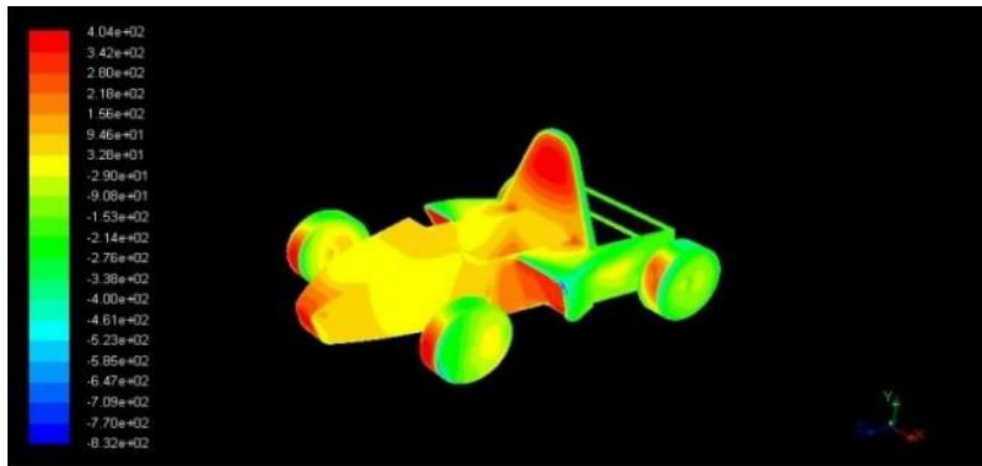


Slika 3.11 : Usporedba koeficijenta sile otpora [2]

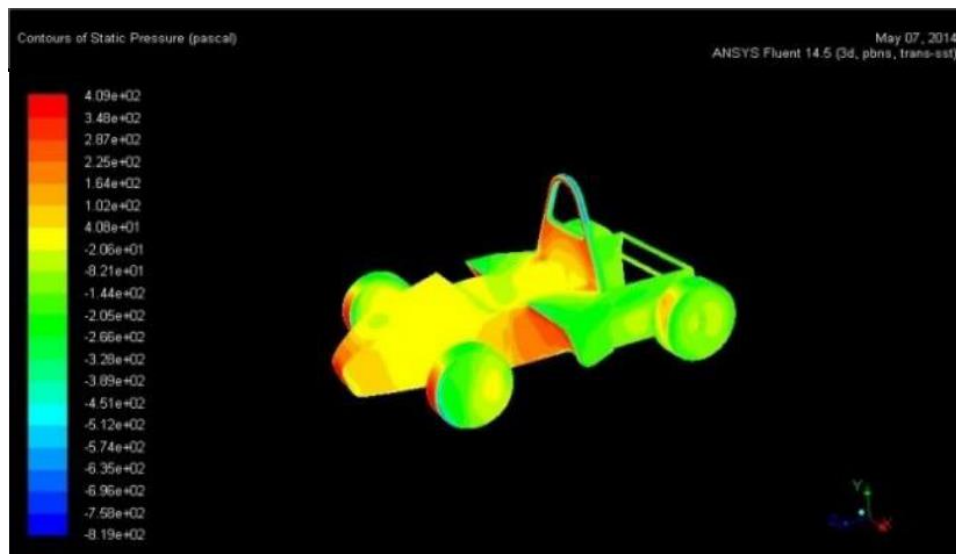


Slika 3.12 : Usporedba koeficijenta sile uzgona [2]

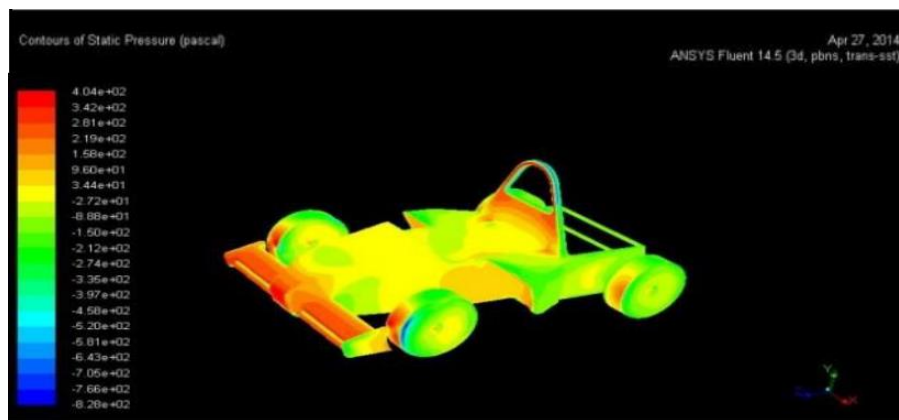
Na grafovima je vidljivo da je koeficijent sile otpora manji za treći model u usporedbi sa prvim modelom 1, tj. konkretnije za prvi model iznosi 0.85, za drugi model 0.75, a za treći model 0.7 te koeficijent potisne sile za treći model iznosi – 0.25, a za prvi model 0.2. Ovi grafovi pokazuju kako se određenim promjenama bazičnog modela mogu znatno poboljšati svojstva formule. Također su dobiveni iznosi i raspored tlakova za svaki model što je vidljivo na slijedećim slikama(Slika 3.13; Slika 3.14; Slika 3.15):



Slika 3.13 : Prikaz iznosa i rasporeda tlakova za prvi model [2]



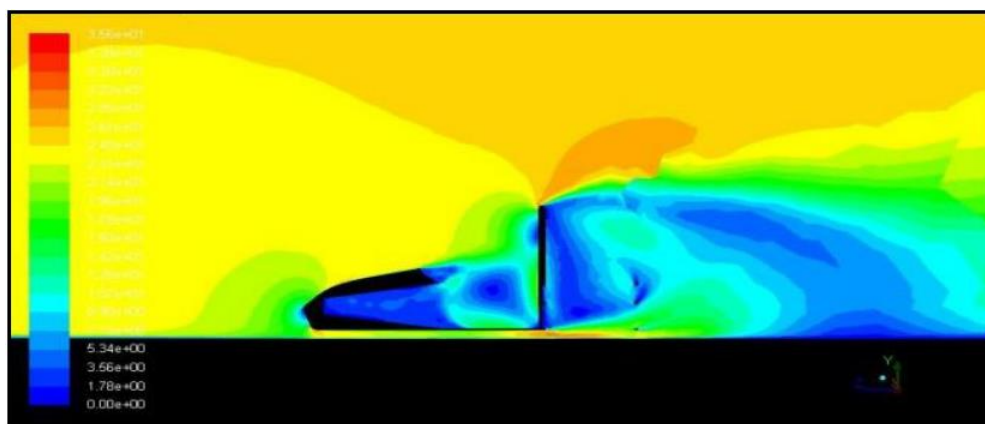
Slika 3.14 : Prikaz iznosa i rasporeda tlakova za drugi model [2]



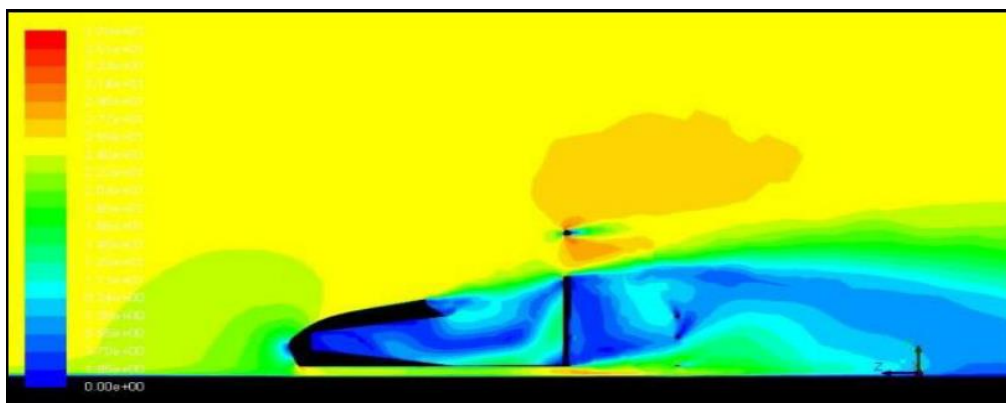
Slika 3.15 : Prikaz iznosa i rasporeda tlakova za treći model [2]

Na slikama kontura prva dva modela je vidljivo kako se veliki iznosi tlakova nalaze u blizini vozača te je u trećem modelu izrezivanjem vatrozida omogućen prolaz zraka čime je smanjen koeficijent otpora i vrijednosti tlakova u okolini vozača, a prednje krilo je povećava potisnu silu na prednjem dijelu bolida i to na način da je tlak veći na gornjem dijelu krila, a manji na donjem dijelu pa se javlja potisna sila koja gura bolid prema tlu.

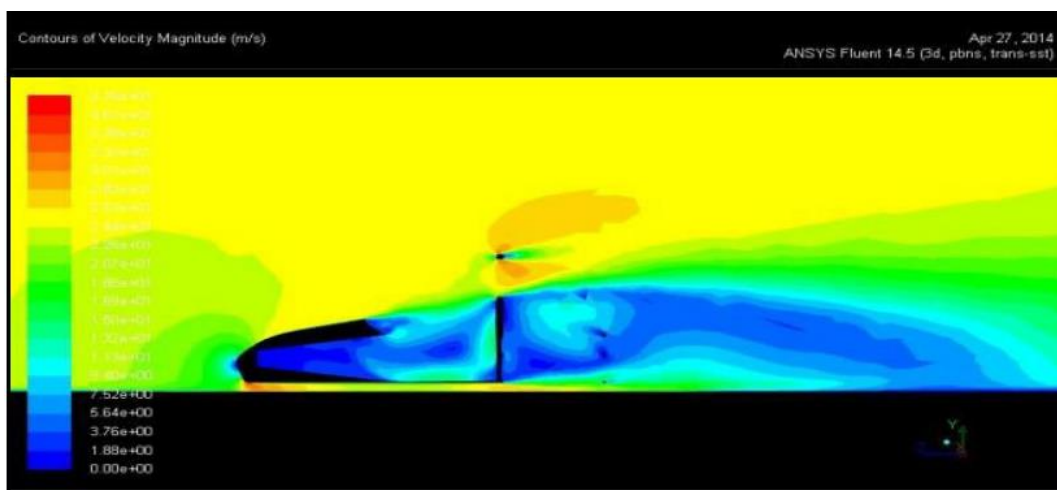
Osim tlakova dobiven je također i iznos i raspored brzina zraka za sve modele te je vidljivo kako su u trećem modelu prijelazi između područja brzina bolje raspoređeni i pravilniji za razliku od prva dva modela gdje su ti prijelazi puno grublji i nepravilniji , a to je prikazano na sljedećim slikama(Slika 3.16; Slika 3.17; Slika 3.18):



Slika 3.16 : Prikaz iznosa i rasporeda brzina zraka o doticaju sa prvim modelom [2]



Slika 3.17 : Prikaz iznosa i rasporeda brzina zraka u doticaju sa drugim modelom [2]



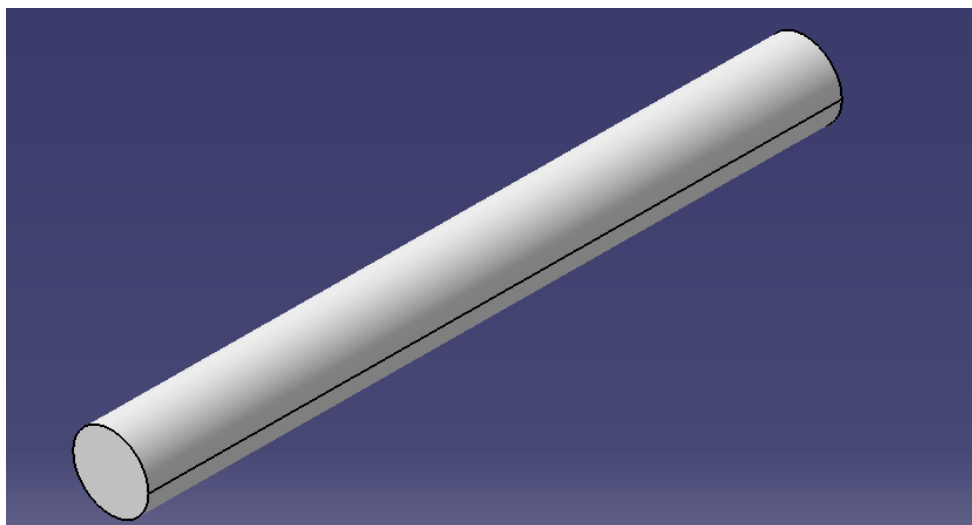
Slika 3.18 : Prikaz iznosa i rasporeda brzina zraka u doticaju sa trećim modelom [2]

Sve u svemu kako bi se poboljšala aerodinamička svojstva formule napravljene su preinake baznog modela te su izvršene simulacije. Rezanjem vatrozida i dodavanjem krila na prednji dio formule je znatno smanjen koeficijent sile otpora, a povećan koeficijent potisne sile što ima pozitivne efekte na performans same formule te je smanjen engl. *Wake Region* iza bolida tj. u prijevodu prostor nestabilnog strujanja.

## 4. NUMERIČKA SIMULACIJA OPTJECANJA VALJKA

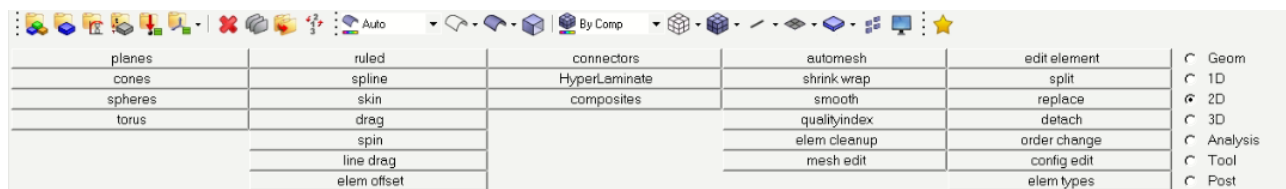
### 4.1. Kreiranje geometrije i mreže valjka za CFD simulacije

Prvi korak pri provođenju CFD simulacija jest kreiranje geometrije koju želimo testirati. U ovom slučaju to će biti valjak promjera 50 milimetara i duljine 460 milimetara te ćemo ga izraditi u programu CATIA(Slika 4.1):



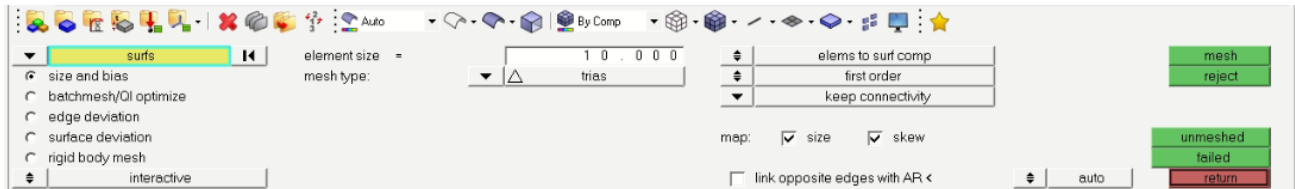
Slika 4.1 : Valjak korišten u simulacijama

Sljedeći korak obuhvaća kreiranje mreže valjka koja je potrebna za provođenje simulacija, a ona se izrađuje na način da se kreirana geometrija učita u program HyperMesh te joj se tamo opisuje mreža. Sami postupak kreiranja mreže vidljiv je na slijedećim slikama(Slika 4.2; Slika 4.3):



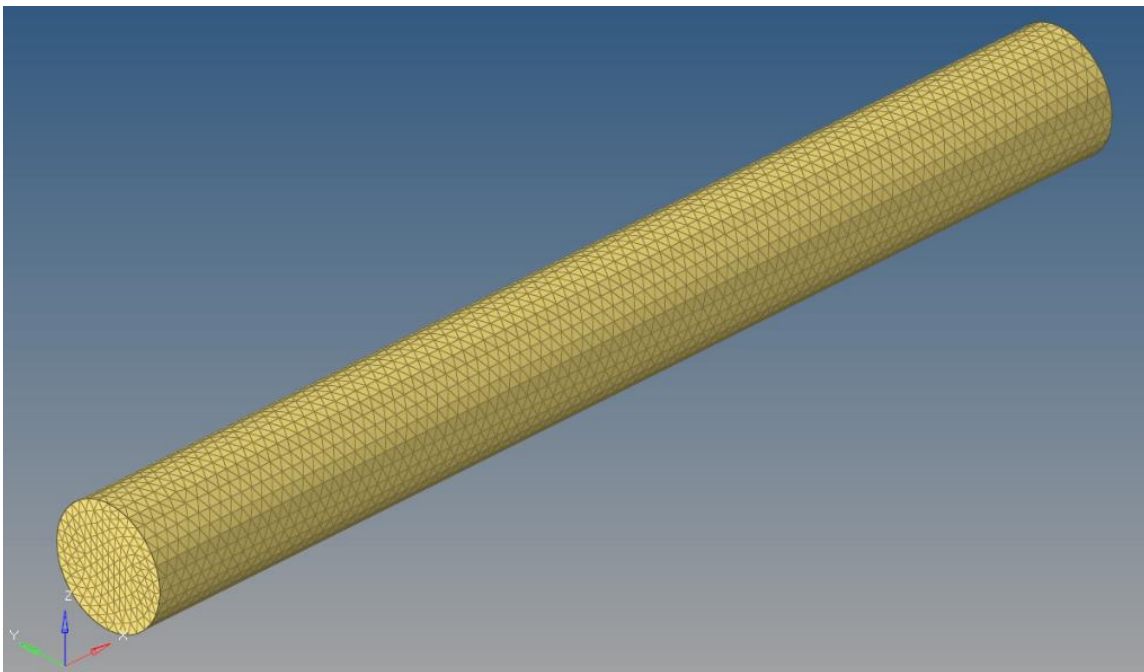
Slika 4.2 : Izbornik u HyperMeshu

Nakon što je model uspješno učitano u izborniku ćemo odabrati “automes” te će nam se u nastavku otvoriti postavke za izradu mreže vidljive na slijedećoj slici. Bitno je odabrati oblik ćelija koje će sačinjavati mrežu, a to je u ovoj situaciji trokut te skalnu odnosno broj ćelija koji treba sačinjavati mrežu.



Slika 4.3 : Postavke mesha

Nakon odabranih postavki pritiskom na „mesh“ dobije se mreža koja opisuje željenu geometriju kao na slijedećoj slici(Slika 4.4):

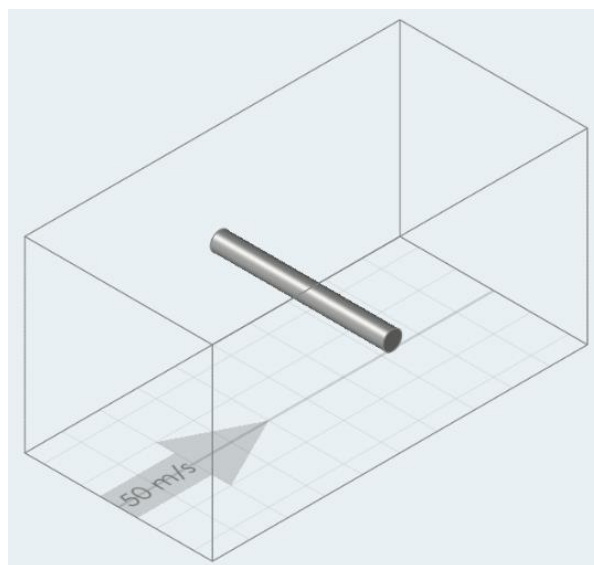


Slika 4.4 : Mreža opisana valjku

Slijedeći korak je spremiti kreiranu mrežu u oblik koji Zračni tunel može prepoznati, a u ovom slučaju je to „.nas“ datoteka.

## 4.2. Virtual wind tunnel simulacije

U prethodnom dijelu je ukratko opisan postupak kreiranja geometrije i mreže koja se sprema u .nas datoteku i tako učitava u VWT gdje se vrše simulacije. Duljina tunela koji se koristi za testiranje iznosi 1000 milimetara, a visina i širina 500 milimetara. Valjak je postavljen u središte tunela vidljivo na sljedećoj slici(Slika 4.5):



Slika 4.5 : Valjak unutar VWT

Parametri koji su korišteni za svaku simulaciju te ostaju nepromjenjivi su sljedeći :

- Širina predmeta = 0.005 [m]
- Dužina predmeta = 0.46 [m]
- Kinematički viskozitet zraka =  $1.515 \cdot 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>/s]
- Gustoća zraka = 1.2 [kg/m<sup>3</sup>]
- Temperatura zraka = 21 [°C]
- Karakteristična površina = 0.023 [m<sup>2</sup>]

Također formule koje ćemo koristiti za usporedbu su definirane sljedećim izrazima(4.2.1; 4.2.2; 4.2.3):



Formula za izračun Reynoldsovog broja(4.2.1):

$$Re = \frac{v \cdot C}{\mu} \quad (4.2.1)$$

Gdje je :

$v$  = Brzina strujanja fluida [m/s]

$C$  = Širina predmeta [m]

$\mu$  = Kinematički viskozitet [m/s<sup>2</sup>]

Munsonova formula za računanje koeficijenta sile otpora (4.2.2):

$$C_D = \frac{5,93}{\sqrt{Re}} + 1,17 \quad (4.2.2)$$

Gdje je :

$Re$  = Reynoldsov broj

Formula za izračun sile otpora(4.2.3):

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad (4.2.3)$$

Gdje je:

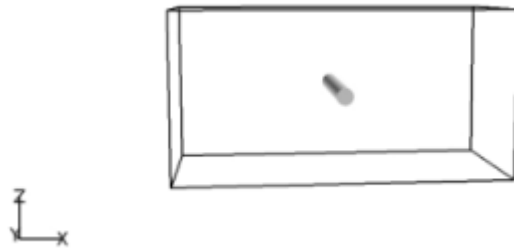
$C_D$  = Bezdimenzijska veličina koeficijenta sile otpora

$\rho$  = Gustoća fluida [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = Brzina nastrujavanja fluida [m/s]

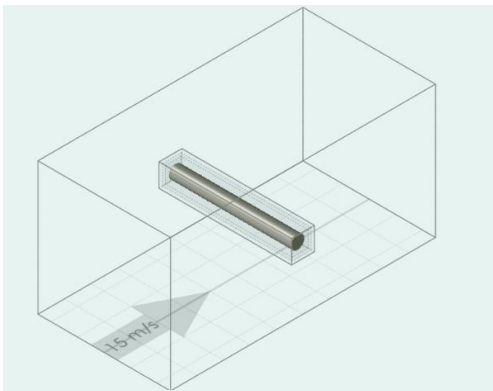
$A$  = Karakteristična površina tijela[m<sup>2</sup>]

Nakon ispunjenja svih radnji spomenutih u prethodnim koracima možemo započeti sa simulacijama.

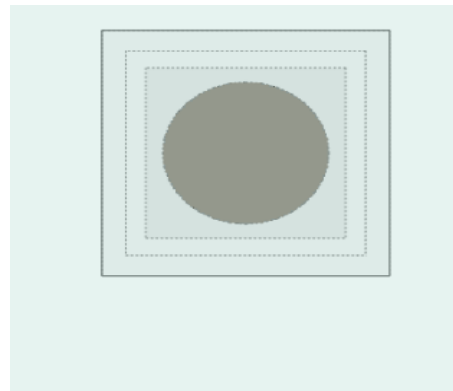


Slika 4.6 : Položaj valjka koji ćemo koristiti u svim simulacijama osim 5.

Iste zone ugušćenja su korištene u svim simulacijama gdje su opisane te je svrha tih zona da uguste mrežu u prostoru u blizini valjka kako bi dobili preciznije rezultate. Sastoji od tri regije od kojih prva opisuje uzak prostor oko predmeta, a svaka slijedeća zona je malo šira ali sa svih strana jednako udaljena od prijašnje zone te je tako postignuta gusta mreža u okolini valjka, a raspored tih regija u provedenim simulacijama vidljiv je na slikama u nastavku. Također u prvih nekoliko simulacija ćemo koristiti brzinu strujanja zraka 15 [m/s] kako bi ispitali točnost mreže i metode simulacije te u konačnici odabrali onu sa najmanjom greškom. Kako je brzina nepromjenjiva u ovim simulacijama Reynoldsov broj je također konstanta te iznosi 49504.95



Slika 4.7 : Izometrijski prikaz zona ugušćavanja



Slika 4.8 prikaz zona ugušćavanja sa bočne strane valjka

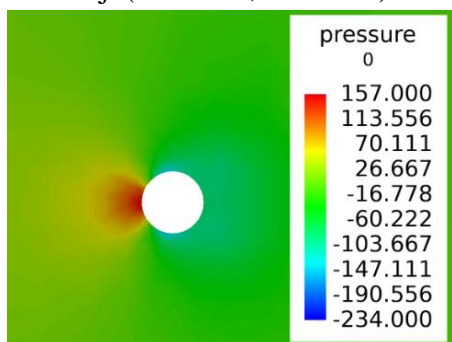
Provjera točnosti rezultata dobivenih provedenim metodama te odabir najbolje je prikazana u slijedećoj tablici(Tablica 4.1):

Tablica 4.1- Prikaz rezultata i odabir optimalne metode

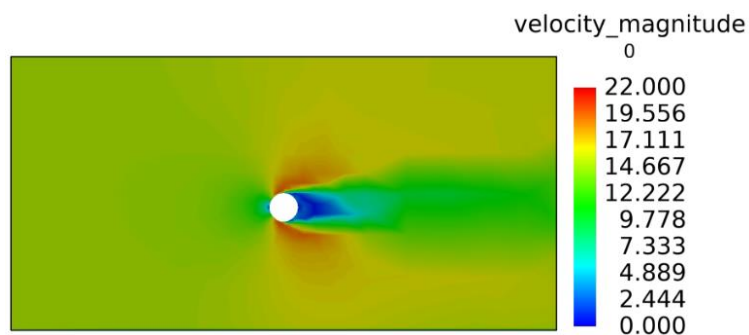
Simulacija	1.	2.	3.	4.
Korištena mreža	Coarse	Coarse	Medium	Medium
Broj elemenata	119706	117306	1639992	1296893
Refinement zone	3	/	/	3
Trajanje simulacije [h]	0.008	0.009	0.176	0.157
Broj iteracija	23	24	23	30
$C_l$ dobiven CFD simulacijom	-0.009	-0.005	0.004	-0.001
$C_d$ dobiven CFD simulacijom	1.083	1.079	0.873	0.957
$C_d$ dobiven pomoću Munsonove formule	1.1966	1.1966	1.1966	1.196
$F_d$ dobiven pomoću Munsonove formule [N]	3.7156	3.7156	3.7156	3.7156
$F_d$ dobiven CFD simulacijom [N]	3.3627	3.3503	2.7107	2.9715
Greška [%]	9.5	9.83	27.05	20

Konture tlaka i brzina dobivene pri simulacijama na površini valjka :

1.simulacija(Slika 4.8; Slika 4.9) :

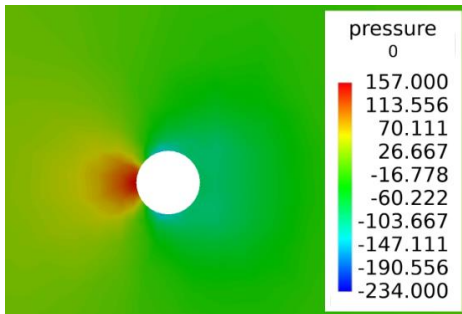


Slika 4.8 : Konture tlakova

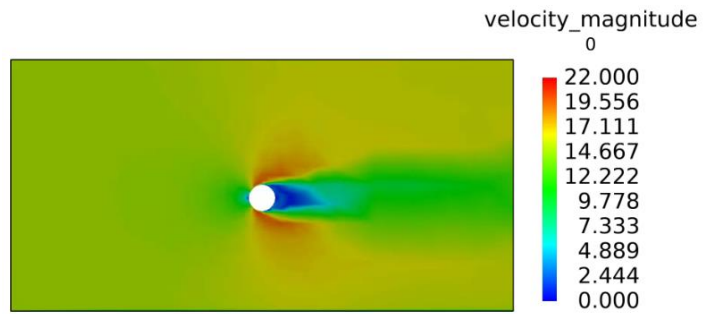


Slika 4.9 : Konture brzina

2.simulacija(Slika 4.10; Slika 4.11):

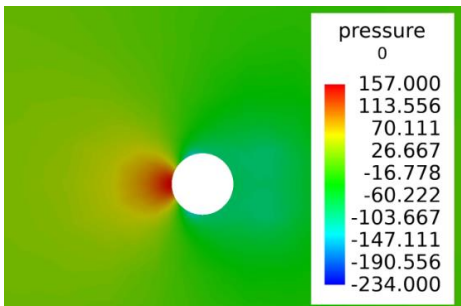


Slika 4.10 : Konture tlakova

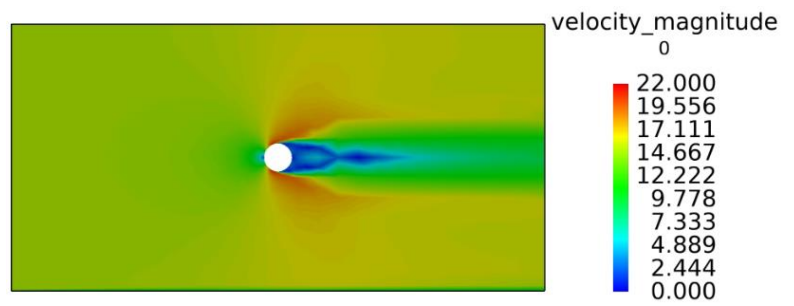


Slika 4.11 : Konture brzina

3.simulacija(Slika 4.12; Slika 4.13) :

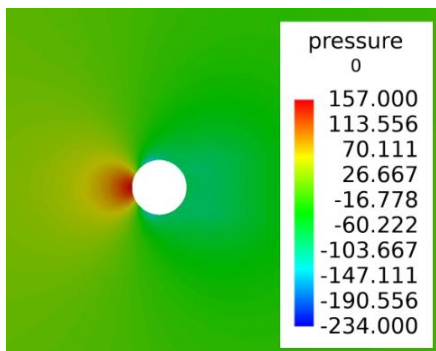


Slika 4.12 : Konture tlakova

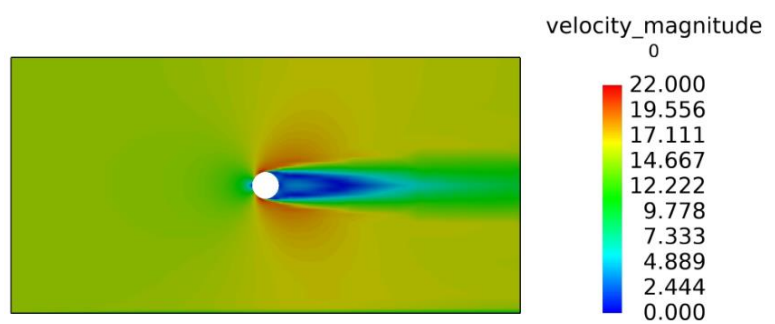


Slika 4.13 : Konture brzina

4.simulacija(Slika 4.14; Slika 4.15) :



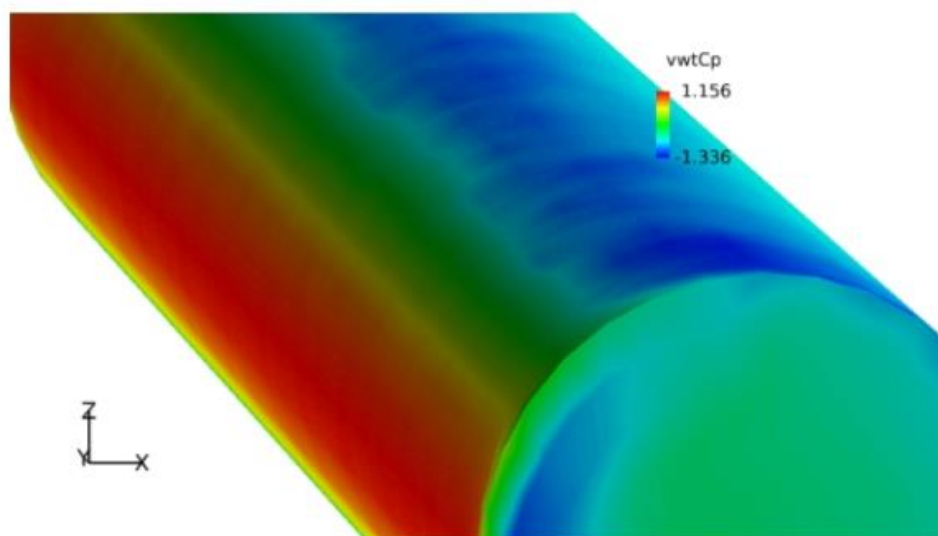
Slika 4.14 : Prikaz kontura brzina



Slika 4.15 : Prikaz kontura tlaka

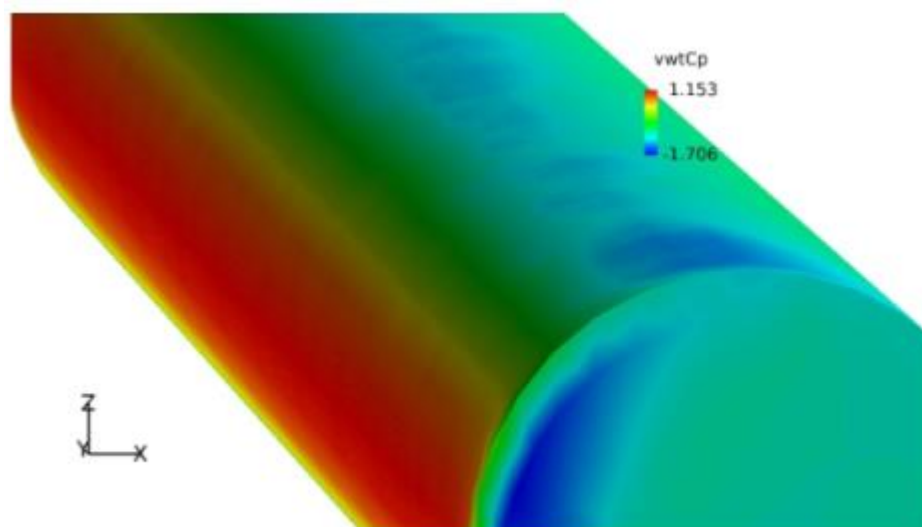
Koeficijenti pritiska  $C_p$  dobiveni simulacijama :

1.simulacija(Slika 4.16) :



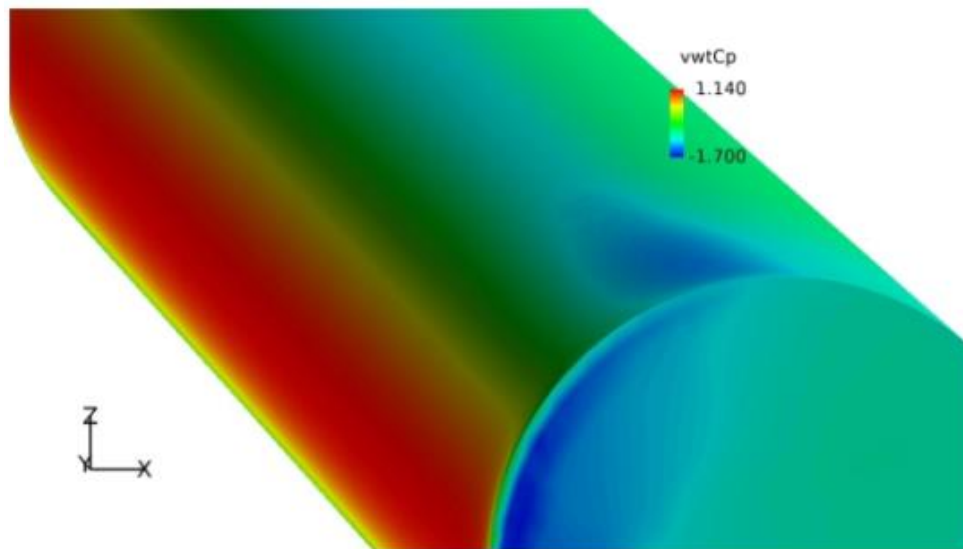
Slika 4.16 : Iznos  $C_p$

2.simulacija(Slika 4.17) :



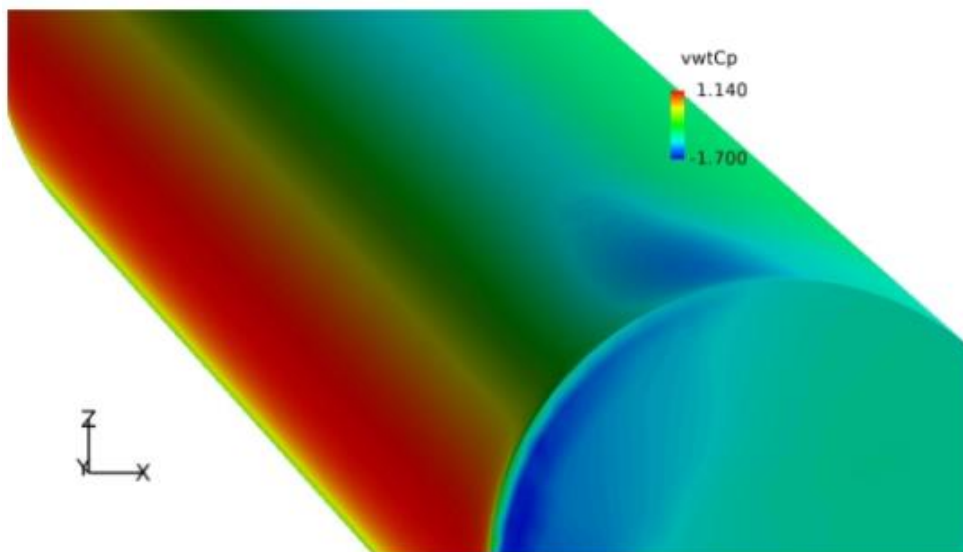
Slika 4.17 : Iznos  $C_p$

3.simulacija(Slika 4.18) :



Slika 4.18 : Iznos  $C_p$

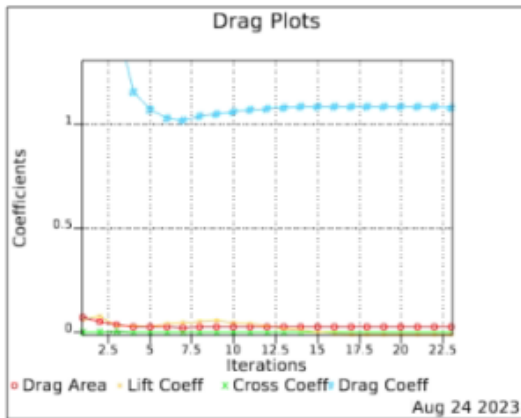
4.simulacija(Slika 4.19) :



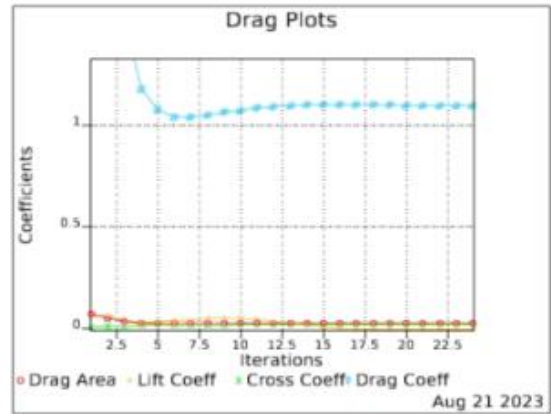
Slika 4.19 : Iznos  $C_p$

Prikaz konvergiranja vrijednosti po iteracijama :

1.simulacija (Slika 4.20) i 2.simulacija (Slika 4.21) :

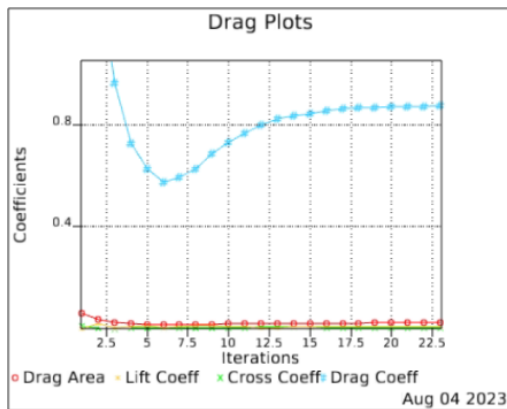


Slika 4.20 : Konvergiranje koeficijenata

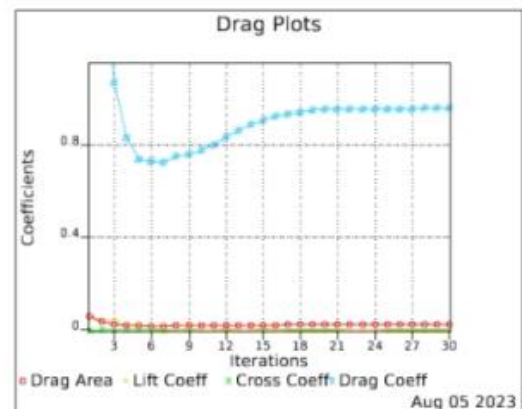


Slika 4.21 : Konvergiranje koeficijenata

3.simulacija(Slika 4.22) i 4.simulacija(Slika 4.23) :



Slika 4.22 : Konvergiranje koeficijenata



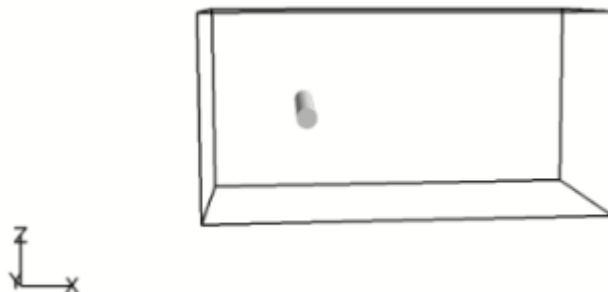
Slika 4.23 : Konvergiranje koeficijenata

Po dobivenim rezultatima iz prve četiri simulacije je vidljivo da je najbolje rezultate (greška 9,5 %) dala simulacija u kojoj smo koristili coarse mrežu te smo definirali refinement zonu, pa ćemo te postavke koristiti za daljnje simulacije sa različitim brzinama. Također proučavajući konture tlakova, brzina te koeficijente pritiska, otpora i uzgona primjetno je da smo približne rezultate dobili za simulacije u kojima smo koristili coarse mrežu sa ili bez definiranih zona ugušćenja, a simulacije sa medium mrežom su rezultirale nepreciznijim iznosima tlakova, brzina i koeficijenata, ali su

međusobno pružile slične rezultate sa malim odstupanjima pa ih nećemo uzimati u obzir za daljnje simulacije. Usporedbe se vrše pomoću rezultata dobivenih simulacijama i rezultata dobivenih pomoću Munsonove formule[8]

5.simulacija(Slika 4.25; Slika 4.26; Slika 4.27):

U ovoj simulaciji smo valjak pozicionirali bliže zidovima tunela kako bi iza valjka povećali domenu te provjerili kako to utječe na tlakove, brzine, sile i koeficijente:



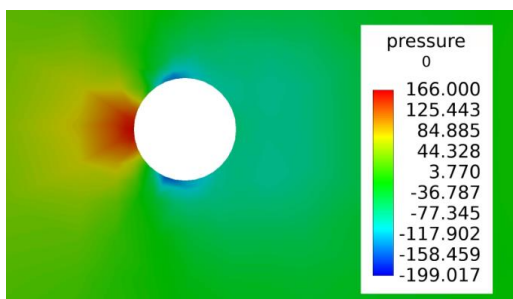
Slika 4.24 : Položaj valjka u 5. simulaciji

Tablica 4.2 : Rezultati simulacije gdje je valjak pozicioniran na način da ima veću testnu sekciju sa stražnje strane

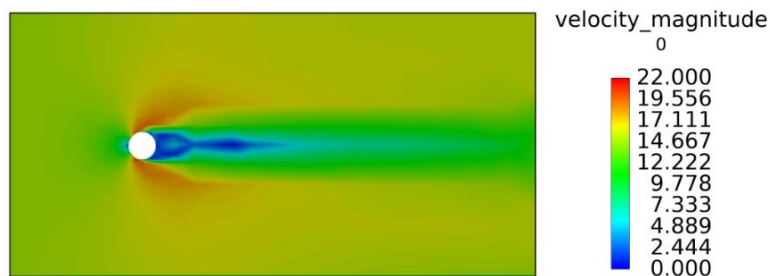
Korištena mreža	Coarse
Broj elemenata	115716
Refinement zone	3
Trajanje simulacije [h]	0.012
Broj iteracija	36
$C_l$ dobiven CFD simulacijom	-0.066
$C_d$ dobiven CFD simulacijom	1.079
$F_d$ dobiven CFD simulacijom [N]	3.3503
$C_d$ dobiven pomoću Munsonove formule	1.1966
$F_d$ dobiven pomoću Munsonove formule [N]	3.7156
Greška [%]	9.83

Konture tlaka i brzina na površini valjka :



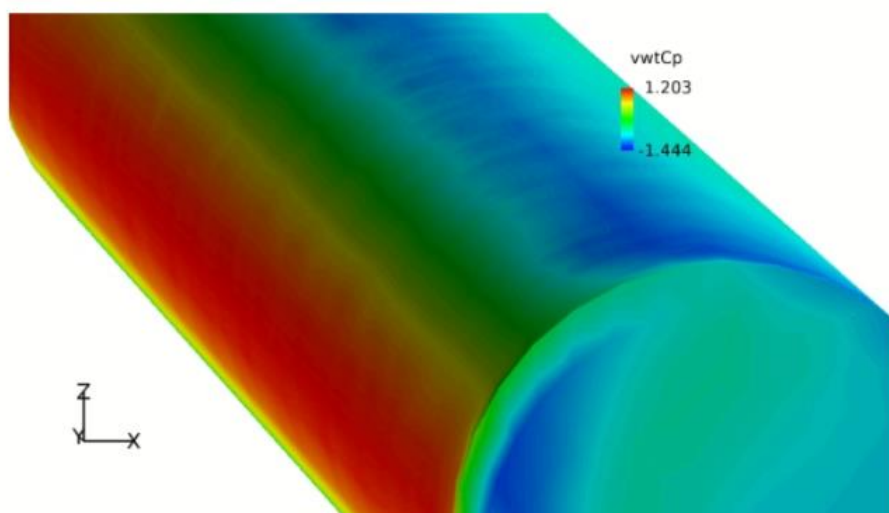


Slika 4.25 : Konture tlakova



Slika 4.26 : Konture brzina

Koeficijent pritiska  $C_p$  :



Slika 4.27 : Iznos  $C_p$

Promjenom položaja valjka u VWT vidljiva su povećanja u vidu iznosa tlakova i koeficijenata sila i pritiska što rezultira i ukupnom većom silom otpora i uzgona. Spomenuto je posljedica blizine testirane geometrije rubu domene, dakle treba pripaziti kako će se predmet pozicionirati u tunel kako bi se dobili što točniji rezultati. Promatrajući koeficijente sila i silu otpora rezultati su slični onima gdje je valjak u sredini tunela.

U daljnjim simulacijama ćemo promatrati kako se mijenjaju dobiveni rezultati u ovisnosti na povećanje brzine strujanja zraka, a time i Reynoldsovog broja; zadani parametri ostaju isti te će brzina i Reynoldsov broj koji se mijenjaju u daljnjim simulacijama biti prikazani u tablicama. Korištena je mreža coarse te su definirane 3 zone ugušćenja koje smo prethodno objasnili.

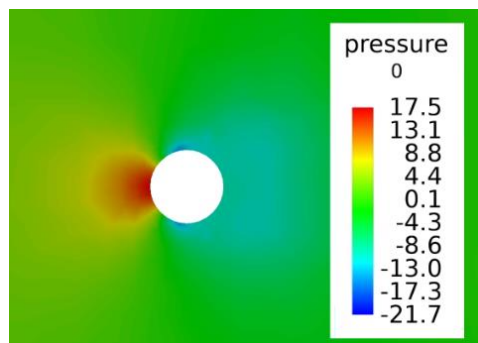
6., 7. i 8. simulacija :

Tablica 4.3 : Rezultati dobiveni simulacijama promjenom brzine

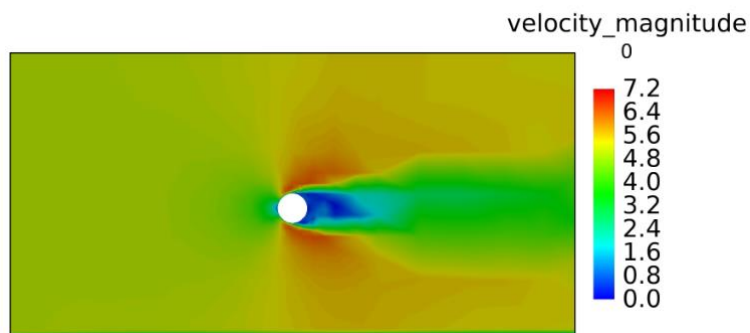
Simulacija	6.	7.	8.
Brzina strujanja [m/s]	5	10	20
Broj elemenata	124468	121462	113043
Reynoldsov broj	16501.65	33003.3	66006.6
Trajanje simulacije [h]	0.008	0.008	0.007
Broj iteracija	20	21	20
$C_l$ dobiven CFD simulacijom	-0.052	-0.039	0.141
$C_d$ dobiven CFD simulacijom	1.276	1.169	0.993
$C_d$ dobiven pomoću Munsonove formule	1.2162	1.2026	1.1931
$F_d$ dobiven pomoću Munsonove formule [N]	0.4196	1.6597	6.586
$F_d$ dobiven CFD simulacijom [N]	0.4402	1.6132	5.481
Greška [%]	4.9	2.8	16.77

Konture tlaka i brzina na površini valjka :

6.simulacija(Slika 4.28; Slika 4.29):

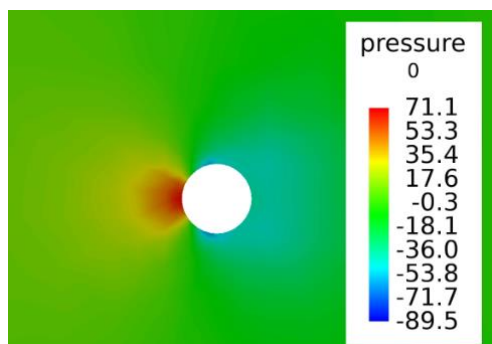


Slika 4.28: Konture tlakova

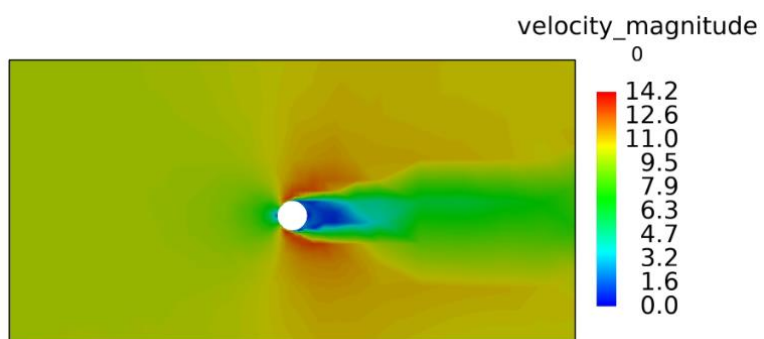


Slika 4.29 : Konture brzina

7.simulacija(Slika 4.30; Slika 4.31):

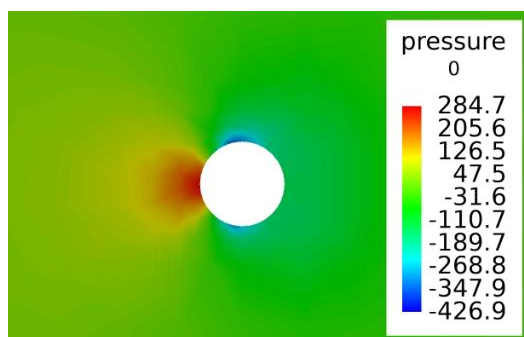


Slika 4.30 : Konture tlakova

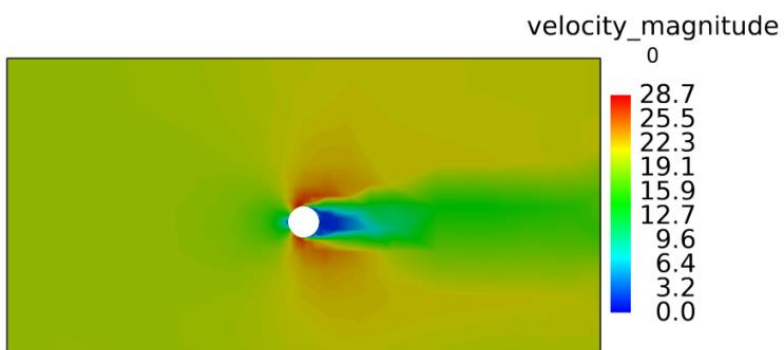


Slika 4.31 : Konture brzina

8.simulacija(Slika 4.32; Slika 4.33):



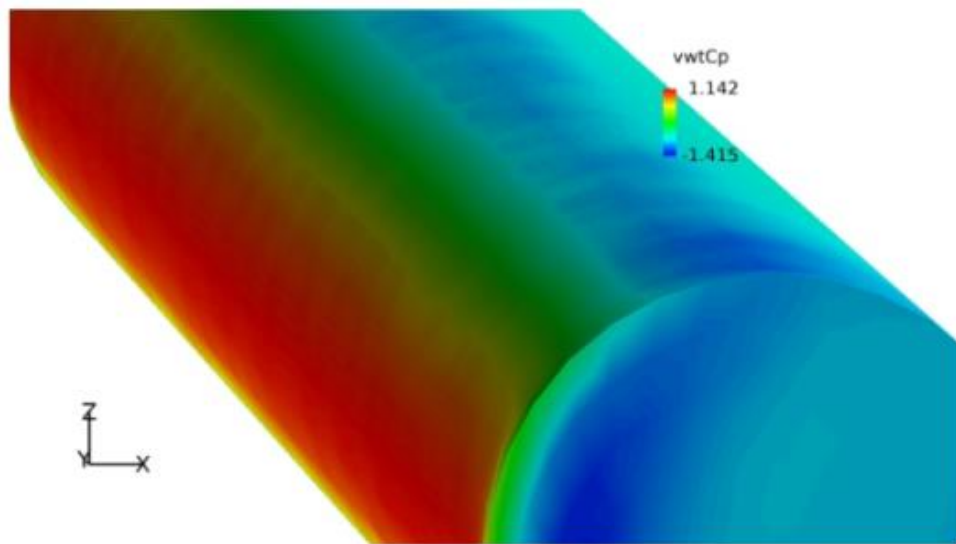
Slika 4.32 : Konture tlakova



Slika 4.33 : Konture brzina

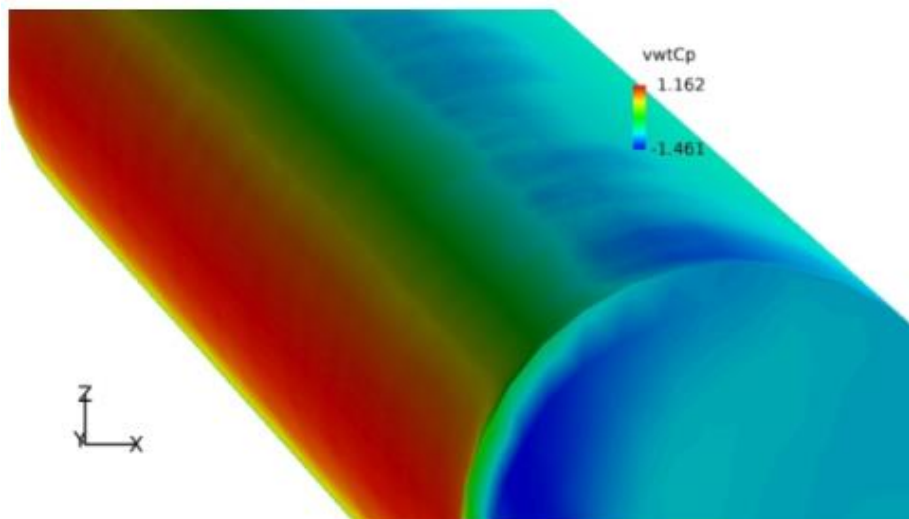
Koeficijenti pritiska  $C_p$  :

6.simulacija(Slika 4.34) :



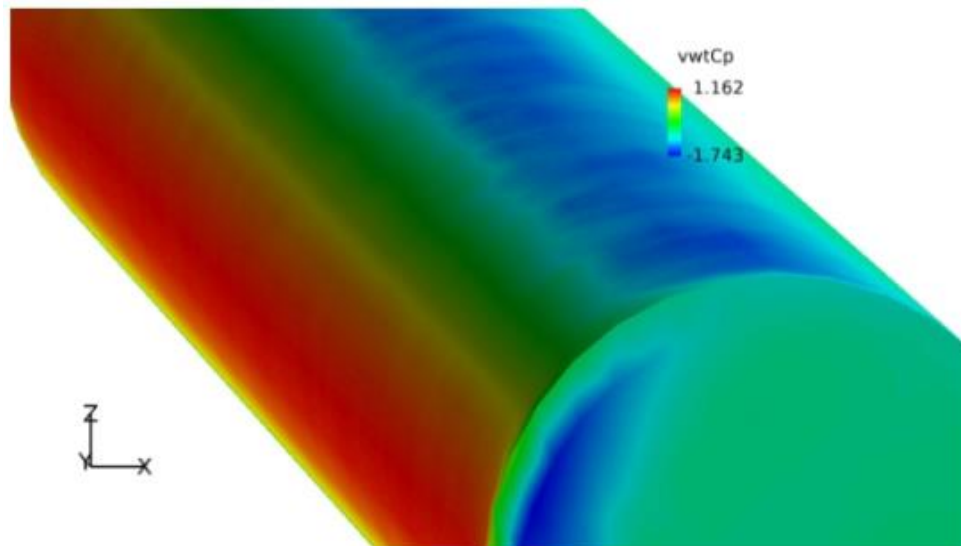
Slika 4.34 : Iznos  $C_p$

7.simulacija(Slika 4.35) :



Slika 4.35 : Iznos  $C_p$

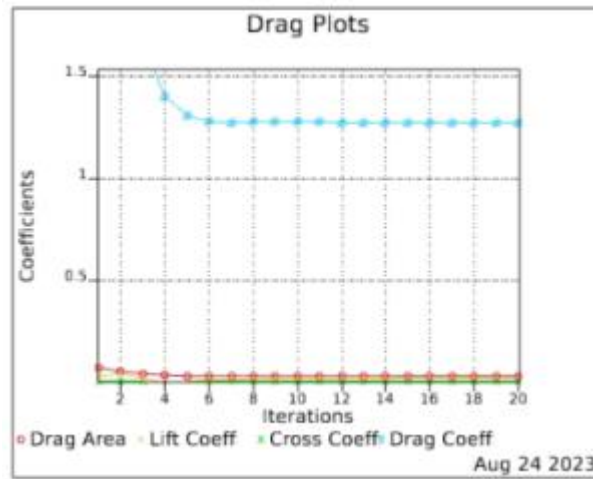
8.simulacija(Slika 4.36) :



Slika 4.36 : Iznos  $C_p$

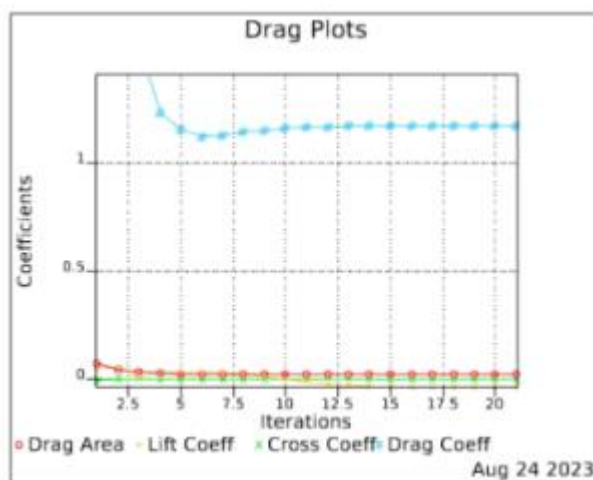
Prikaz konvergiranja vrijednosti po iteracijama :

6.simulacija(Slika 4.37) :



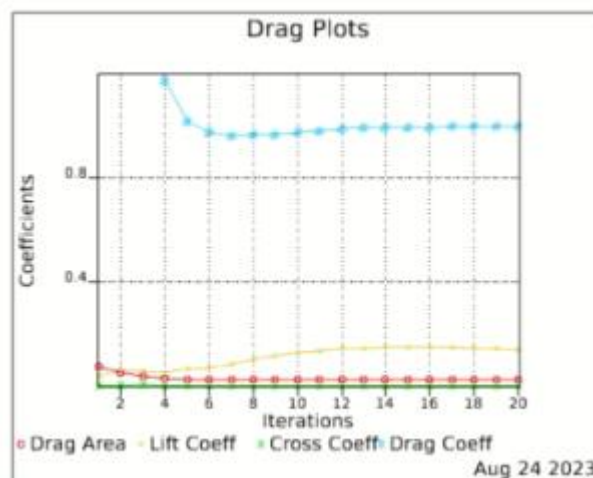
Slika 4.37 : Konvergiranje koeficijenata

7.simulacija(Slika 4.38) :



Slika 4.38 : Konvergiranje koeficijenata

8.simulacija(Slika 4.39) :



Slika 4.39 : Konvergiranje koeficijenata

9., 10. i 11. simulacija(Tablica 4.4) :

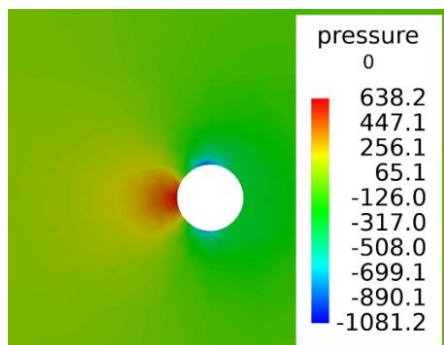
Tablica 4.4 : Prikaz rezultata dobivenih promjenom brzine

Simulacija	9.	10.	11.
Brzina strujanja [m/s]	30	35	40
Broj elemenata	117245	115395	115835
Reynoldsov broj	99009.9	115511.55	132013.2
Trajanje simulacije [h]	0.007	0.007	0.006
Broj iteracija	19	18	17

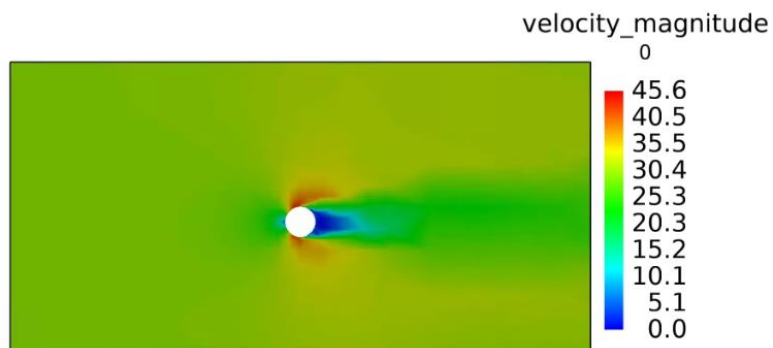
$C_l$ dobiven CFD simulacijom	0.151	0.127	0.064
$C_d$ dobiven CFD simulacijom	0.885	0.855	0.816
$C_d$ dobiven pomoću Munsonove formule	1.1889	1.1874	1.1863
$F_d$ dobiven pomoću Munsonove formule [N]	14.7654	20.0738	26.1939
$F_d$ dobiven CFD simulacijom [N]	10.992	14.4538	18.0173
Greška [%]	25.56	28	31.22

Konture tlaka i brzina na površini valjka :

9.simulacija(Slika 4.40; Slika 4.41) :

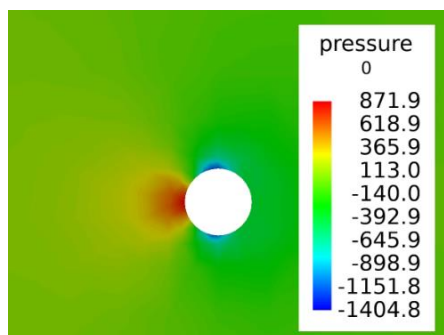


Slika 4.40 : Konture tlakova

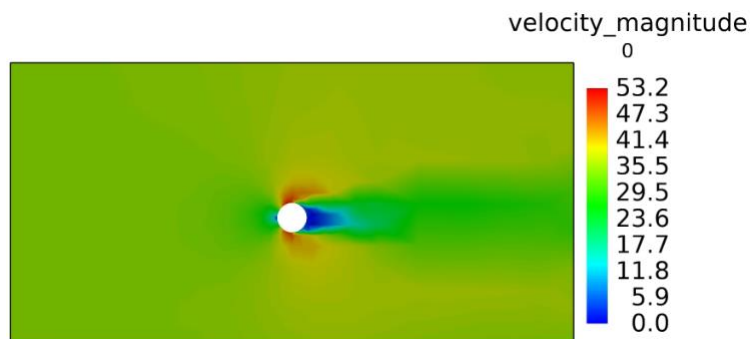


Slika 4.41 : Konture brzina

10.simulacija(Slika 4.42; Slika 4.43) :

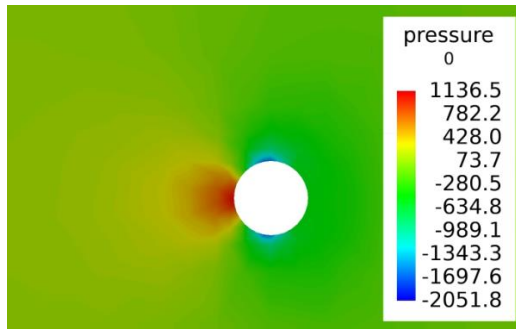


Slika 4.42 : Konture tlakova

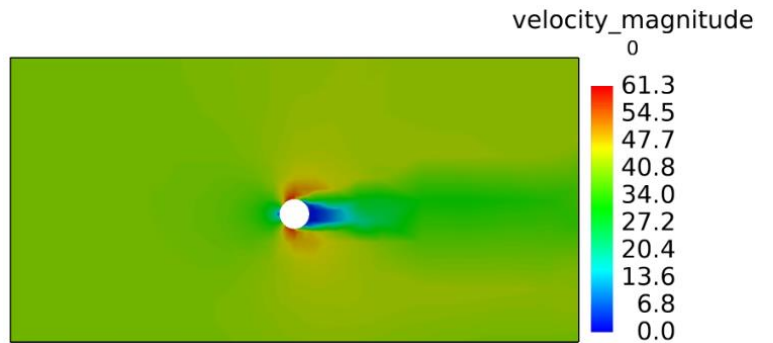


Slika 4.43 : Konture brzina

11. simulacija (Slika 4.44; Slika 4.45):



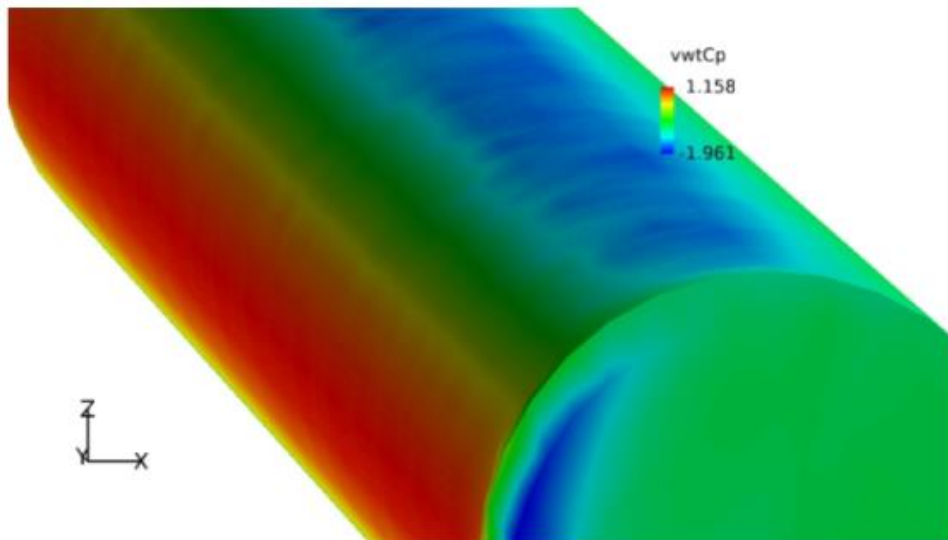
Slika 4.44 : Konture tlakova



Slika 4.45 : Konture brzina

Koeficijenti pritiska  $C_p$  :

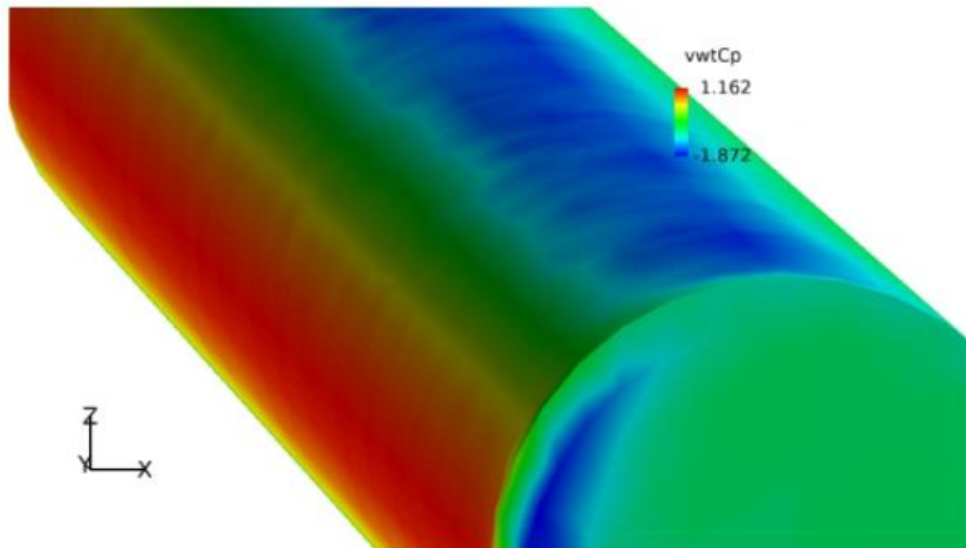
9. simulacija (Slika 4.46) :



Slika 4.46 : Iznos  $C_p$

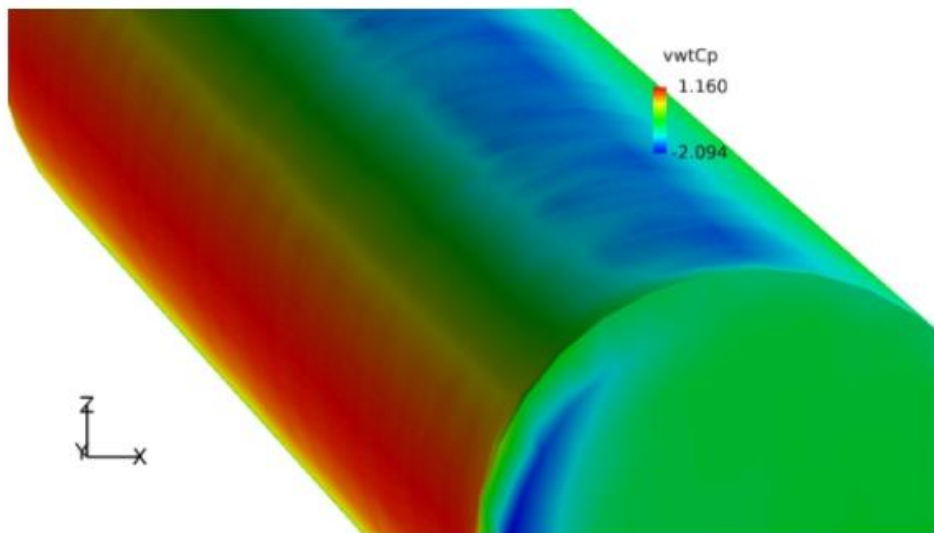
10. simulacija (Slika 4.47) :





Slika 4.47 : Iznos  $C_p$

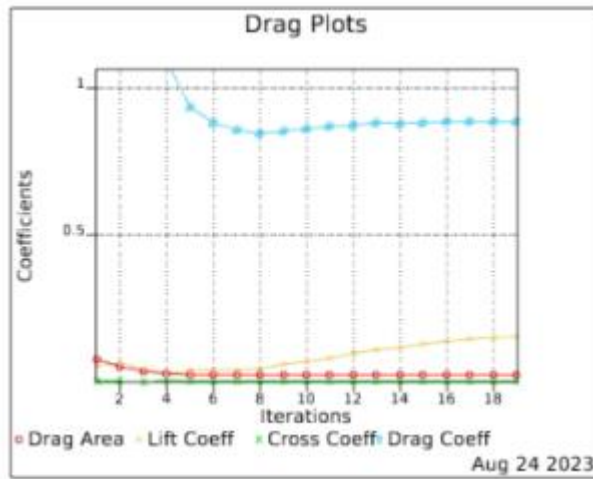
11.simulacija(Slika 4.48) :



Slika 4.48 : Iznos  $C_p$

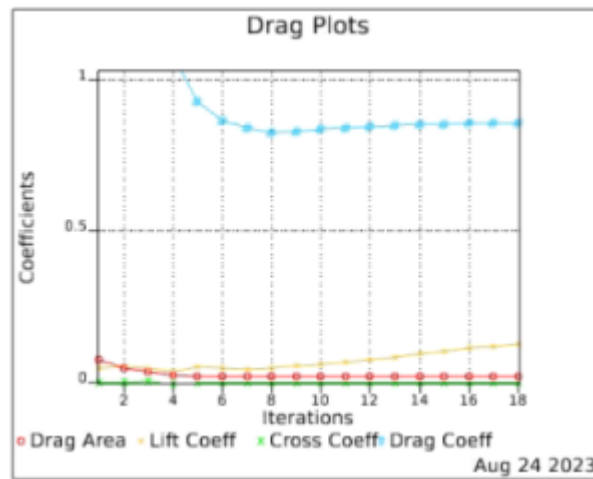
Prikaz konvergiranja vrijednosti po iteracijama :

9.simulacija(Slika 4.49) :



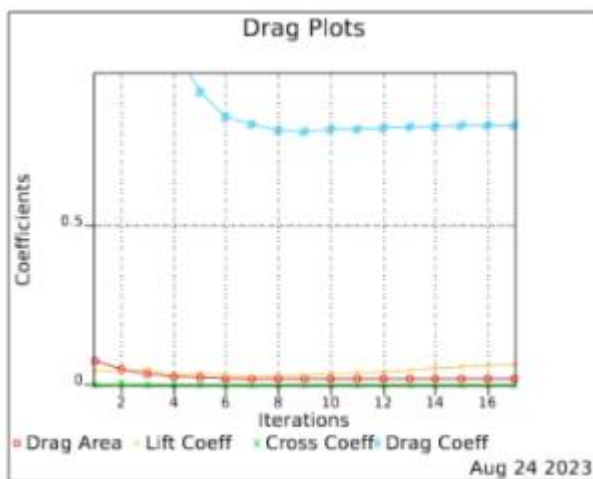
Slika 4.49 : Konvergiranje koeficijenata

10.simulacija(Slika 4.50) :



Slika 4.50 : Konvergiranje koeficijenata

11.simulacija(Slika 4.51) :

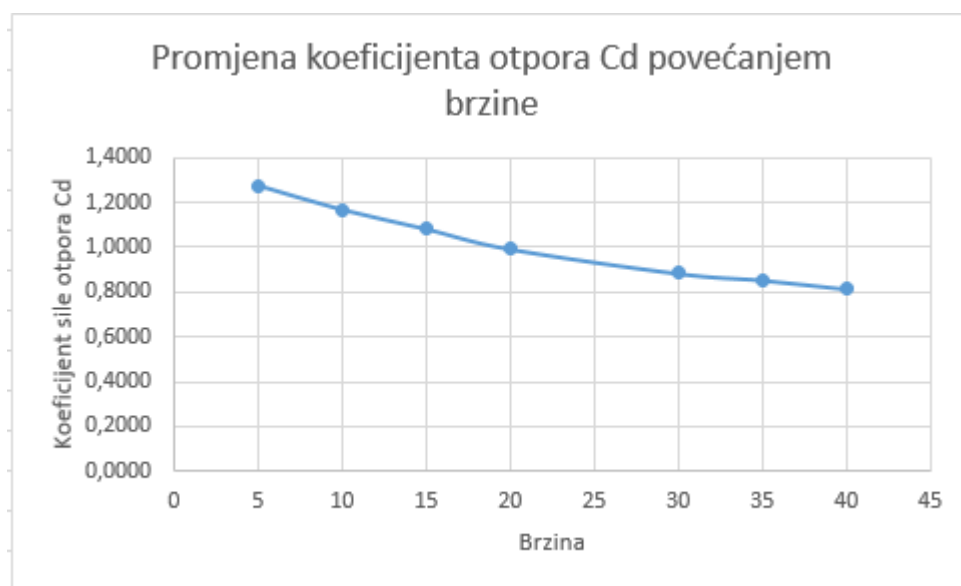


Slika 4.51 : Konvergiranje koeficijenat

Provodeći simulacije pri različitim brzinama uočavamo da se povećanjem brzine smanjuje iznos koeficijenta otpora, a iznosi talkova povećavaju; razlika između minimuma i maksimuma koeficijenta pritiska se povećava dok se koeficijenti uzgona se u prvom dijelu promjena povećavaju, a kasnije počinju padati. Također je vidljivo da se povećanjem brzine povećava greška između rezultata dobivenih simulacijom i rezultata dobivenih eksperimentalnom formulom što je razumljivo jer povećanjem brzine dolazi do kompleksnijih strujanja te je za točnije rezultate potrebno imati bolju računalnu opremu, izraditi gušću i bolju mrežu te povećati broj iteracija kako bi vrijednosti do kraja iskonvergirale. Povećanje greške u rezultatima moguće je povezati sa smanjenjem broja iteracija jer vrijednosti ne stignu konvergirati do kraja zbog nedovoljne snage računala, pa pri većim brzinama dolazi do malih oscilacija rezultata.

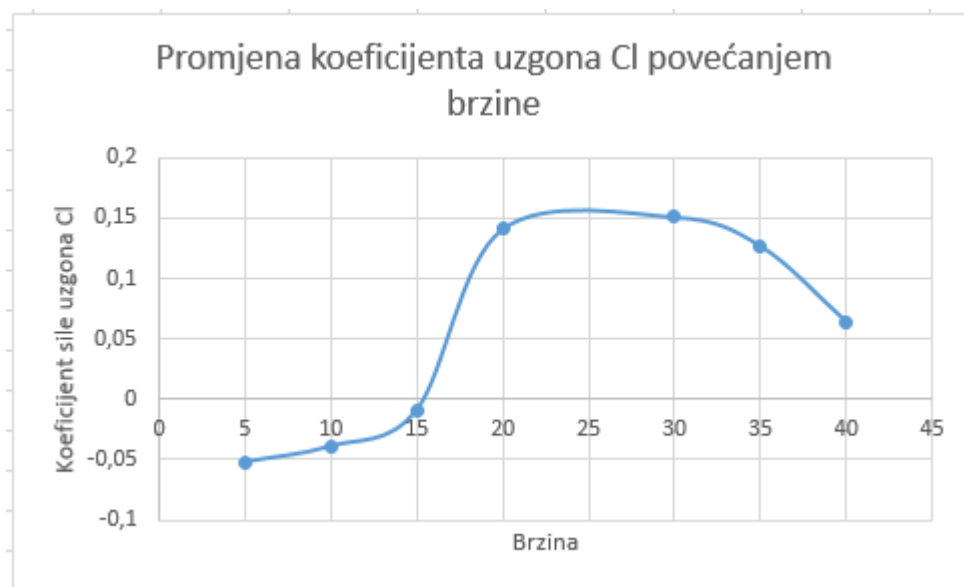
#### 4.3. Ovisnost koeficijenata otpora i uzgona te koeficijenta pritiska o rastu brzina

U ovom poglavlju će se pomoću grafova prikazati ovisnost spomenutih parametara o porastu brzine.



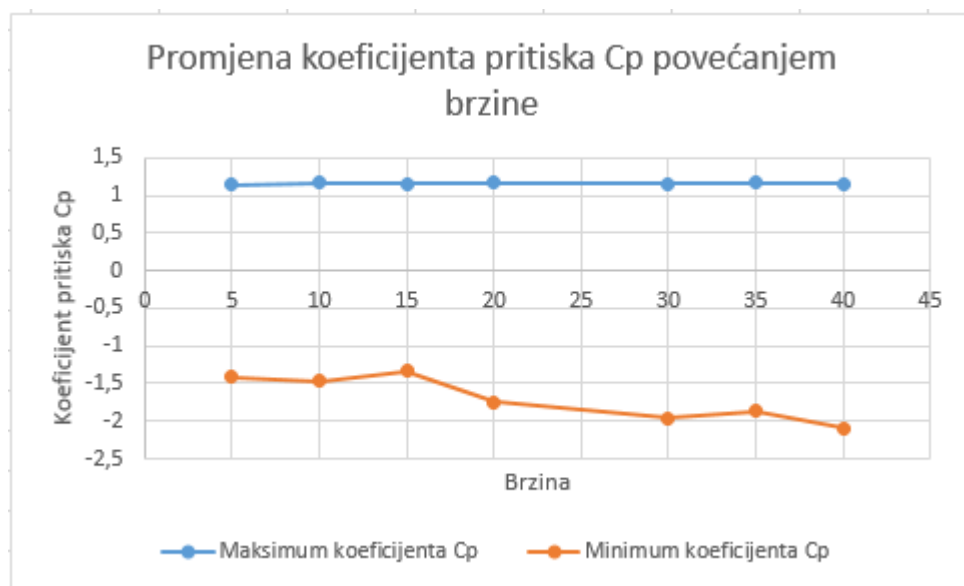
Slika 4.52 : Graf ovisnosti koeficijenta Cd o brzini

Iz grafa(Slika 4.52) je vidljivo da vrijednost koeficijenta sile otpora Cd povećanjem brzine pada



Slika 4.53 : Graf ovisnosti koeficijenta  $C_l$  o brzini

Na grafu(Slika 4.53) je vidljivo kako iznosi koeficijenta  $C_l$  rastu porastom brzine u prvom dijelu te počinju padati daljnjim povećanjima.

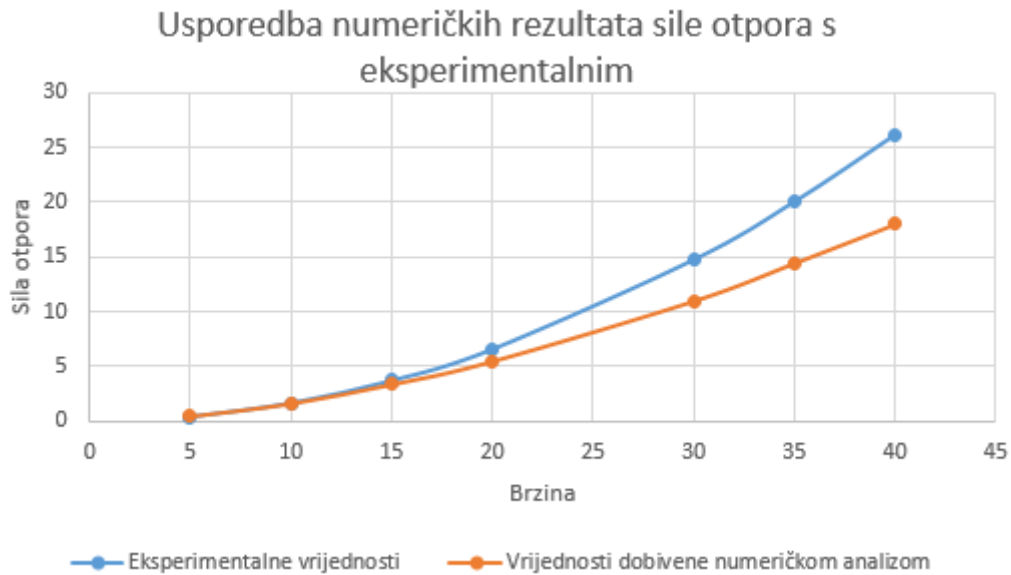


Slika 4.54 : Graf ovisnosti koeficijenta  $C_p$  o brzini

Promatrajući graf(Slika 4.54) očitavamo kako interval između maksimalne i minimalne vrijednosti koeficijenta  $C_p$  porastom brzine raste.

#### 4.4. Usporedba numeričkih rezultata sile otpora s eksperimentalnima

Graf(Slika 4.55) dobiven simulacijom i Munsonovom formulom:



Slika 4.55 : Graf usporedbe vrijednosti sile otpora u ovisnosti o brzini dobivenih simulacijama i Munsonovom formulom

Porast brzine uzrokuje povećanje Reynoldsovog broja te u konačnici i same sile otpora te je promatrajući graf vidljivo da rezultati dobiveni simulacijama pri povećanju Reynoldsovog broja padaju isto kao i oni dobiveni pomoću Munsonove formule, a također je moguće primijetiti kako zbog jednostavnije simulacije greška u rješenjima raste povećanjem brzine i kompleksnosti strujanja, ali su dobiveni rezultati okvirno točni i upotrebljivi.

## 5. ZAKLJUČAK

Upotreba CFD numeričkih simulacija je u današnje vrijeme sve korištenija i to u mnogo područja i njihovih grana te se iz dana u dan sve više modernizira i daje točnije rezultate u kratkom roku čime je postignuta velika novčana ušteda i skraćeno vrijeme potrebno za dobivanje rezultata. Naravno modernizacijom programa zahtjevi računalne opreme također rastu, ali i uzevši to u obzir CFD numeričke simulacije su optimalno rješenje pogotovo u ranoj fazi projekata. U radu su prikazani primjeri primjene simulacija na konkretnim projektima kako bi se dobio uvid koliko su simulacije zapravo bitne i koliko olakšavaju proces te je objašnjen teorijski dio i princip na koji se one provode. Rezultati dobiveni simulacijama nisu stopostotno točni već ih se treba kritički sagledavati i uspoređivati sa već dokazanim vrijednostima kao što je u radu korištena Munsonova formula. Primjerice u radu je proučavanjem rezultata zaključeno kako su relativno dobra rješenja dobivena pri manjim brzinama ali se njenim povećanjem greška povećavala pa više nisu bila dovoljno dobra da bi se koristila. Dakle kako bi se određena korist izvukla iz dobivenih rezultata potrebno je imati puno teorijskog i praktičnog znanja te iskustva u korištenju programa za simulacije. Provodeći simulacije također je uočena velika razlika u rezultatima i to samo jer su zone ugušćenja oko valjka bile krivo postavljene pa su numeričke vrijednosti rasle, a eksperimentalne padale iz čega slijedi kako bi trebalo paziti na svaki sitnicu prilikom pokretanja simulacije kako bi ona dala relevantne i upotrebljive rezultate. Složenije simulacije zahtijevaju moćnu računalnu opremu te uzimaju više vremena, a jednostavnije simulacije se čak mogu pokrenuti i na jednostavnim osobnim računalima. Za učenje o provođenju simulacija postoje brojni forumi, video uradci te lekcije na službenim stranicama programa pa se relativno brzo može shvatiti kako programi funkcioniraju.

## 6. LITERATURA

- [1] Izv.prof.dr.sc.Jasna Prlić Kardum, Skripta s odabranim poglavljima, Mehanika Fluida, [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/Mehanika\\_fluida\\_PrlicKardum.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Mehanika_fluida_PrlicKardum.pdf) [Pristupljeno 17. svibnja 2023].
- [2] "ScienceDirect,S interneta, <https://www.sciencedirect.com/>. [Pristupljeno 17. svibnja 2023].
- [3] "Altair", S interneta, <https://altair.com/hyperworks-applications>. [Pristupljeno 17. svibnja 2023].
- [4] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=623>>. [Pristupljeno 19. 5. 2023.].
- [5] "Wikipedia", S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamika\\_vjetroagregata](https://hr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamika_vjetroagregata). [Pristupljeno 19. svibnja 2023].
- [6] "Wikipedia", S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Bernoullijeva\\_jednad%C5%BEba](https://hr.wikipedia.org/wiki/Bernoullijeva_jednad%C5%BEba). [Pristupljeno 20. svibnja 2023].
- [7] Kranjčević, L. (2020.) Mehanika fluida: Skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci, Rijeka, 2023.
- [8] T. Baracu and R. Boşneagu, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXII 2019, pg. 256-267.
- [9] "Siemens", S interneta, <https://resources.sw.siemens.com/en-US/video-cfd-simulation>. [Pristupljeno 19. svibnja 2023].
- [10] "Wikiwand", S interneta, <https://www.wikiwand.com/hr/Mach>. [Pristupljeno 19. svibnja 2023].

## 7. POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 1.1 : Primjer CFD modela [9] .....	2
Slika 2.1 : Prikaz podzvučne, nadzvučne brzine i zvučnog zida, brojevi na slici označavaju:.....	3
Slika 2.2 : Prikaz probijanja zvučnog zida [10] .....	4
Slika 2.3 : Prikaz optjecanja aviona sa vidljivim strujnicama i rasporedom sila, crvena strelica prikazuje vučnu silu, zelena silu otpora, plava težinu, a žuta silu uzgona, vidljive su također strujnice zraka koje opstrujavaju oko aviona. [9] .....	6
Slika 2.4: Prikaz djelovanja uzgona na tijelo koje je isplivalo na površinu [7] .....	6
Slika 2.5 : Prikaz djelovanja uzgona i otpora [7] .....	7
Slika 2.6: koeficijent otpora strujanja $C_D$ za dvodimenzijske likove [7] .....	8
Slika 2.7 : Prikaz putanje gibanja čestica pri strujanju [7].....	10
Slika 2.8 Prikaz laminarnog, prijelaznog i turbulentnog strujanja[7] .....	11
Slika 3.1: Usporedba navedenih metoda [2] .....	13
Slika 3.2: Usporedba metoda s obzirom na profil vjetra [2] .....	14
Slika 3.3: Prikaz domena za spomenute metode [2] .....	15
Slika 3.4: Prikaz objekta u definiranoj domeni [2] .....	15
Slika 3.5: Prikaz regija i mreže [2].....	17
Slika 3.6: Usporedba mreža sačinjenih od različitih oblika stanica [2] .....	18
Slika 3.7 : Prvi model [2] .....	19
Slika 3.8: Drugi model [2].....	19
Slika 3.9 : Treći model [2] .....	20
Slika 3.10 : Korištena mreža [2].....	20
Slika 3.11 : Usporedba koeficijenta sile otpora [2].....	21
Slika 3.12 : Usporedba koeficijenta sile uzgona [2].....	21
Slika 3.13 : Prikaz iznosa i rasporeda tlakova za prvi model [2] .....	22
Slika 3.14 : Prikaz iznosa i rasporeda tlakova za drugi model [2] .....	22
Slika 3.15 : Prikaz iznosa i rasporeda tlakova za treći model [2] .....	23
Slika 3.16 : Prikaz iznosa i rasporeda brzina zraka o doticaju sa prvim modelom [2] .....	23
Slika 3.17 : Prikaz iznosa i rasporeda brzina zraka u doticaju sa drugim modelom [2] .....	24
Slika 3.18 : Prikaz iznosa i rasporeda brzina zraka u doticaju sa trećim modelom [2].....	24



Slika 4.1 : Valjak korišten u simulacijama.....	25
Slika 4.2 : Izbornik u HyperMeshu .....	25
Slika 4.3 : Postavke mesha.....	26
Slika 4.4 : Mreža opisana valjku .....	26
Slika 4.5 : Valjak unutar VWT.....	27
Slika 4.6 : Položaj valjka koji ćemo koristiti u svim simulacijama osim 5.....	29
Slika 4.7 : Izometrijski prikaz zona ugušćavanja.....	29
Slika 4.9 : Konture tlakova.....	30
Slika 4.10 : Konture brzina .....	30
Slika 4.11 : Konture tlakova.....	31
Slika 4.12 : Konture brzina .....	31
Slika 4.13 : Konture tlakova.....	31
Slika 4.14 : Konture brzina .....	31
Slika 4.15 : Prikaz kontura brzina .....	31
Slika 4.16 : Prikaz kontura tlaka .....	31
Slika 4.17 : Iznos $C_p$ .....	32
Slika 4.18 : Iznos $C_p$ .....	32
Slika 4.19 : Iznos $C_p$ .....	33
Slika 4.20 : Iznos $C_p$ .....	33
Slika 4.21 : Konvergiranje koeficijenata.....	34
Slika 4.22 : Konvergiranje koeficijenata.....	34
Slika 4.23 : Konvergiranje koeficijenata.....	34
Slika 4.24 : Konvergiranje koeficijenata.....	34
Slika 4.25 : Položaj valjka u 5. simulaciji .....	35
Slika 4.26 : Konture tlakova.....	36
Slika 4.27 : Konture brzina .....	36
Slika 4.28 : Iznos $C_p$ .....	36
Slika 4.29: Konture tlakova.....	37
Slika 4.30 : Konture brzina .....	37
Slika 4.31 : Konture tlakova.....	38

Slika 4.32 : Konture brzina .....	38
Slika 4.33 : Konture tlakova.....	38
Slika 4.34 : Konture brzina .....	38
Slika 4.35 : Iznos $C_p$ .....	39
Slika 4.36 : Iznos $C_p$ .....	39
Slika 4.37 : Iznos $C_p$ .....	40
Slika 4.38 : Konvergiranje koeficijenata.....	40
Slika 4.39 : Konvergiranje koeficijenata.....	41
Slika 4.40 : Konvergiranje koeficijenata.....	41
Slika 4.41 : Konture tlakova.....	42
Slika 4.42 : Konture brzina .....	42
Slika 4.43 : Konture tlakova.....	42
Slika 4.44 : Konture brzina .....	42
Slika 4.45 : Konture tlakova.....	43
Slika 4.46 : Konture brzina .....	43
Slika 4.47 : Iznos $C_p$ .....	43
Slika 4.48 : Iznos $C_p$ .....	44
Slika 4.49 : Iznos $C_p$ .....	44
Slika 4.50 : Konvergiranje koeficijenata.....	45
Slika 4.51 : Konvergiranje koeficijenata.....	45
Slika 4.52 : Konvergiranje koeficijenat.....	45
Slika 4.53 : Graf ovisnosti koeficijenta $C_d$ o brzini.....	46
Slika 4.54 : Graf ovisnosti koeficijenta $C_l$ o brzini.....	47
Slika 4.55 : Graf ovisnosti koeficijenta $C_p$ o brzini.....	47
Slika 4.56 : Graf usporedbe vrijednosti sila otpora u ovisnosti o brzini dobivenih simulacijama i Munsonovom formulom.....	48
Tablica 4.1- Prikaz rezultata i odabir optimalne metode .....	30
Tablica 4.2 : Rezultati simulacije gdje je valjka pozicioniran bliže rubovima domene.....	35
Tablica 4.3 : Rezultati dobiveni simulacijama promjenom brzine.....	37

## SAŽETAK

CFD numeričke simulacije uvelike olakšavaju ljudima posao te smanjuju količinu utrošenog vremena i novca. U ovom radu je objašnjeno kako funkcioniraju simulacije, prikazani su primjeri te je napravljeno jednostavno testiranje na valjku. U prva dva poglavlja su objašnjeni osnovni pojmovi i terminologija koje je potrebno razumjeti kako bi se shvatila tema te su spomenuta područja i grane u kojima se koriste numeričke simulacije. Isto tako su prikazane i formule za računanje određenih varijabli. U trećem poglavlju je prikazana primjena provođenja simulacija na konkretnim projektima i istraživanjima te su objašnjeni svi principi i postupci istih. Objašnjene su formule i metode kojima se programi koriste kako bi se dobili rezultati te su istaknuti najvažniji grafovi i varijable koje se promatraju nakon simulacija poput rasporeda tlakova, brzina, koeficijenta tlaka, vrijednosti sila, itd. Također su opisani svi koraci i postupci potrebni kako bi se simulacije mogle izvršiti. U četvrtom poglavlju je napravljena zadana geometrija na kojoj će se provoditi simulacije te su svi postupci i rezultati postepeno objašnjeni i nakon provođenja dovoljnog broja simulacija obzirom na dobivene rezultate je zaključeno kako porastom brzine raste i sila otpora i njezin koeficijent, povećavaju se koeficijenti pritiska i tlakovi na površini promatranog predmeta, a vrijednosti uzgona prvo rastu pa pri povećanju brzine padaju. Također je uočeno kako se povećanjem brzine i kompleksnosti strujanja greška povećava pa rezultati nisu relevantni pa je za takve simulacije potrebna bolja priprema i jače računalo.

Ključne riječi: Računalna dinamika fluida (RFD), aerodinamika, mehanika fluida, eksperiment

## **SUMMARY**

CFD numerical simulations greatly facilitate people's work and reduce the amount of time and money spent. In this paper, it is explained how the simulations work, examples of application are presented, and a simple test on a roller is made. In the first two chapters, the basic concepts and terminology that need to be understood in order to understand the topic are explained, and the areas and branches in which numerical simulations are used are mentioned. Some formulas for calculating certain variables are also presented. In the third chapter, the application of conducting simulations on specific projects and research is presented, and all principles and procedures of the same are explained. Formulas and methods used by programs to obtain results are explained, and the most important graphs and variables observed after simulations are highlighted like distribution of pressures, velocity, pressure coefficients, force values, etc. Also all the steps and procedures necessary to perform the simulations are described. In the fourth chapter, the default geometry on which the simulations will be carried out was made, and all the procedures and results were gradually explained, and after conducting a sufficient number of simulations, considering the results, it was concluded that with the increase in speed, the resistance force and its coefficient also increase, the pressure coefficients and pressures increase on the surface of the observed object, and the lift force values first increase and then decrease when the speed increases. It was also observed that by increasing the speed and by that the complexity of the flow, the error increases, so the results are not relevant, so better preparation and a stronger computer are needed for such simulations.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics(CFD), Aerodynamics , Fluid Mechanics, Experiment