

# Analiza strujanja fluida oko neaerodinamičnog tijela

---

Vulelija, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:921787>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad  
**ANALIZA STRUJANJA FLUIDA OKO NEAERODINAMIČNOG  
TIJELA**

Rijeka, rujan 2022.

Ivan Vulelija  
0069084273

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad  
**ANALIZA STRUJANJA FLUIDA OKO NEAERODINAMIČNOG  
TIJELA**

Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, rujan 2022.

Ivan Vulelija

0069084273

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE**

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

**ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

Pristupnik: **Ivan Vulelija (0069084273)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza strujanja fluida oko neaerodinamičnog tijela / Analysis of Fluid Flow  
Around Blunt Body**

**Opis zadatka:**

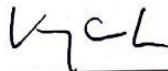
Opisati opstrujavanje fluida oko zadanog neaerodinamičnog profila s teoretskog motrišta mehanike fluida, kako bi se izračunao dinamički otpor i uzgon. Analizirati turbulentno strujanje zraka oko izabranog profila. Izabrati objekt, konstruirati geometriju tijela i numerički simulirati optjecanje koristeći komercijalni softver ili softver otvorenog koda.

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



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Prema članku 9. Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem kako sam završni rad na temu „Analiza strujanja fluida oko neaerodinamičnog tijela“ napravio u potpunosti sam. Koristeći se literaturama koje su navedene na kraju rada te koristeći znanja stečena tijekom obrazovanja.

Rijeka, srpanj 2022.

---

Ivan Vulelija

0069084273

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću i asistentu Luki Grbčiću na stručnom vodstvu i podršci tijekom izrade završnog rada.

Zahvalan sam svojoj obitelji i prijateljima koji su vjerovali u mene i pomogli mi na ovom putu. Bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće.

# SADRŽAJ

---

1.UVOD .....	1
2.TEORIJSKE OSNOVE.....	2
2.1. Fluid i mehanika fluida .....	2
2.1.1.Fluidi.....	2
2.1.2. Mehanika fluida .....	2
2.2.Svojstva fluida.....	3
2.2.1.Gustoća .....	3
2.2.2.Tlak i stlačivost .....	6
2.2.3.Brzina i ubrzanje .....	9
2.2.4.Temperatura .....	11
2.2.5.Viskoznost.....	12
3.AERODINAMIKA I VANJSKO STRUJANJE FLUIDA.....	15
3.1.Teorijske osnove aerodinamike i aerodinamika zgrada .....	15
3.2.Laminarno i turbulentno strujanje .....	19
4.KORIŠTENI PROGRAMSKI ALATI.....	21
4.1.Računalna dinamika fluida.....	21
4.2.HyperMesh, Virtual Wind Tunnel i AcuField .....	22
4.2.1. HyperMesh.....	22
4.2.2. Virtual Wind Tunnel .....	23
4.2.3. AcuConsole i AcuFieldView .....	24
5.SIMULACIJA I USPOREDBA REZULTATA .....	26
5.1.Izrada geometrije .....	26
5.2.Izrada mreže.....	26
5.3.Simulacija u Virtual Wind Tunnel-u.....	28
5.4.Interpretacija i usporedba rezultata .....	30
6.ZAKLJUČAK .....	39
7.LITERATURA.....	40
8.POPIS SLIKA I TABLICA.....	42
9.SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	43
10.SUMMARY AND KEY WORDS .....	44

# 1. UVOD

---

Ovaj završni rad se bavi analizom strujanja fluida oko tijela koja nisu aerodinamički oblikovana. U prvom dijelu će biti objašnjena teorija vezana za fluid i mehaniku fluida te objašnjena sva svojstva fluida. Ovaj rad u nastavku sadrži osnove aerodinamike i aerodinamike zgrada gdje je opterećenje vjetrom jedan od najkritičnijih parametara za projektiranje zgrada. Kod osnova aerodinamike objašnjava se važnost faktora tlaka, brzine, temperature i gustoće strujanja fluida za ocjenu kvalitete aerodinamičnosti. Aerodinamika zgrada bavi se većinom silom otpora u smjeru nastrujavanja fluida te će biti objašnjeno kada se uzima sila uzgona kako bi se projektirala zgrada koja je stabilna. U poglavlju s programskim alatima se opisuje koje alate koristimo, njihova svrha u analizi te zašto nam znatno olakšavaju cijeli proces. Kod simulacije se definira geometrija iz koje se izrađuje mreža koja je potrebna za daljnji rad u Virtual Wind tunnel-u. Poslije se pomoću Acu Console i Acufield View-a interpretiraju rezultati i moguća je njihova usporedba. Zaključuje se da ogromne zgrade i građevinski projekti ne trebaju skupe modele za analizu već se može provesti jeftina i kvalitetna simulacija.



## 2. TEORIJSKE OSNOVE

---

### 2.1. Fluid i mehanika fluida

#### 2.1.1. Fluidi

Fluid je kemijska tvar koja se sastoji od molekula koje s lakoćom mogu promijeniti svoj položaj. Već pri malom tangencijalnom, proizvoljnom naprezanju materija samog fluida će se deformirati. Fluidi se dijele na dvije vrste, a to su kapljevine (voda, ulje...) i plinovi [2]. Među česticama u fluidu postoje privlačne sile koje su znatno slabije nego sile među česticama čvrstih tvari. Proučavanjem fluida te njegovih analiza i sinteza, postoji karakteristično područje primjene mehanike fluida. Mehanika fluida je znanost koja se sastoji od hidrostatike, hidrodinamike i aerodinamike [1]. U ovom radu u fokusu će biti područje aerodinamike kao jedno od najbitnijih.

#### 2.1.2. Mehanika fluida

Mehanika fluida često se definira kao grana fizike koja se bavi ravnotežom fluida i zakonima strujanja. Načelno, molekularna građa fluida se zanemaruje, to jest pretpostavlja se da je fluid neprekidan. U mehanici fluida strogo su definirani zakoni koji se podjednako odnose i na plinove i na tekućine. Glavna razlika je ta da se plinovi mogu stlačiti dok tekućina ima zanemarivo malu kompresibilnost (malu stlačivost). Najbolji primjer toga može se vidjeti u Tablici 1. koja pokazuje odnose stupnjeva kompresije, prirasta tlaka i modula stišljivosti za tri različita elementa od kojih su dva fluid i jedan je krutina [7].

Tablica 1. Kompresibilnost zraka, ulja i čelika [7]

Medij	Stupanj kompresije (%)	Prirast $\Delta p$ (bar)	Modul stišljivosti $\beta = \frac{V \cdot \Delta p}{\Delta V}$ (bar)
ulje	0,2	24	12000
zrak	0,2	0,002	1
čelik	0,2	4200	$210 \cdot 10^4$

Mehanika fluida se koristila u dalekoj prošlosti. Tada je već postojala i koristila se za određene ljudske djelatnosti. Počinje se proučavati u 18. stoljeću od strane znanstvenika Jean Le Rond d'Alemberta, Daniel Bernoullia i Leonhard Eulera [5] [1]. Proučavali su zakone fluida i njegovu ravnotežu. Razvila se klasična mehanika fluida na kojoj je bio naglasak. Klasična mehanika fluida analizira idealne tekućine. Kada kažemo idealne smatramo da nemaju trenja, ne mogu se stlačiti niti rastezati.

Zanemarivanje bitnih faktora kao što je trenje znatno mijenja ponašanje fluida, te takvo učenje nije bilo upotrebljivo za praktičnu primjenu. Upravo iz tog razloga je izašla potreba za definiranjem prirodnih zakona koji određuju realni fluid. Radi matematički kompleksnih problema danas se koriste računala te razne numeričke metode koje zapravo i počivaju na zakonitostima definiranim preko d'Alembertovih, Bernoullijevih i Eulerovih jednadžbi.

## 2.2. Svojstva fluida

### 2.2.1. Gustoća

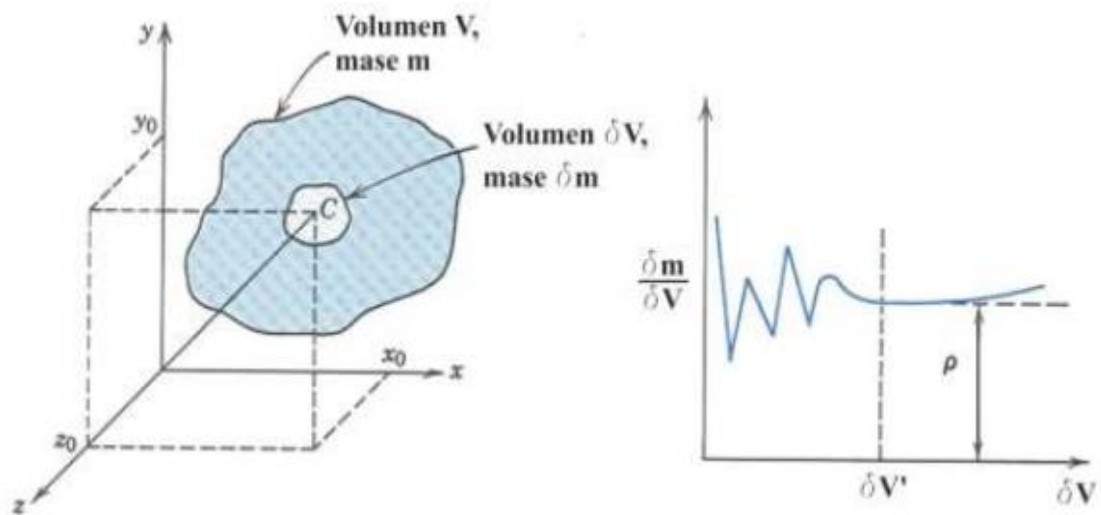
Gustoća je vrlo bitno svojstvo svakog fluida. Definirana je kao količnik mase i volumena tvari. Predmeti mogu zauzimati isti volumen, ali se njihove mase mogu znatno razlikovati[5]. Promatrajući ingot čelika i čašu napunjenu vodom, može se zaključiti kako je razlika u masi

posljedica različite gustoće. Pri tome primjeru masa čelika je znatno veća od čaše s vodom dok su im volumeni, tj. prostor kojeg zauzimaju približno jednaki – Slika 2.1.



*Slika 2.2. Različite mase i približno jednaki volumeni čaše vode i ingota čelika [5]*

Primjerice kod metala, aluminij ima manju gustoću nego željezo pa ga često susrećemo u primjeni u automobilskoj industriji, aeronautici i avioindustriji. Gustoća elemenata ili spoja ostaje konstanta kod čvrstih tvari iz razloga što su njihove molekule vezane jedna za drugu. Dok kod fluida gustoća nije konstantna te ona varira u velikom rasponu zbog ne vezivanja između molekula, te se one kao takve mogu slobodno gibati. Upravo zato može doći do pogrešnih izračuna gustoća. Pojedini dijelovi volumena stlačenog fluida će imati veću gustoću jer imaju i više molekula, a automatski sa tim neki dijelovi će imati manje molekula i manju gustoću. Sprečavanje takve greške se svodi na izračun gustoće u određenoj točki tako da se realna struktura tvari promjeni sa hipotetskim kontinuumom zadržavajući sva fizikalna svojstva uz to prelazeći u vrlo malene volumene pa sve do točke to jest do nultog volumena. Slika 2.3 opisuje volumen cijeloga tijela ( $V$ ), reducirani volumen ( $\delta V$ ), te nulti volumen u točki određenoj koordinatama  $x_0, y_0, z_0$  [1] [3].



Slika 2.3. Definicija gustoće u točki [1]

Formula koja definira gustoću je da ona ovisi o više faktora. Jedan od njih je vrijeme jer gustoća varira iz nekoliko razloga. Fluidu se može dovoditi i odvoditi toplina ili se vrši rad na fluidu u nekom vremenu.

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

Gdje je:

$\rho$  – gustoća;

$x, y, z$  – koordinate po osima;

$t$  – vrijeme.

Srednju gustoću možemo izraziti promatrajući volumen  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Gdje je:

$\rho$  – gustoća u  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$m$  – masa u kg;

$V$  – volumen u  $m^3$ .

Gustoća u točki izražena jednadžbom glasi:

$$\rho = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2.3)$$

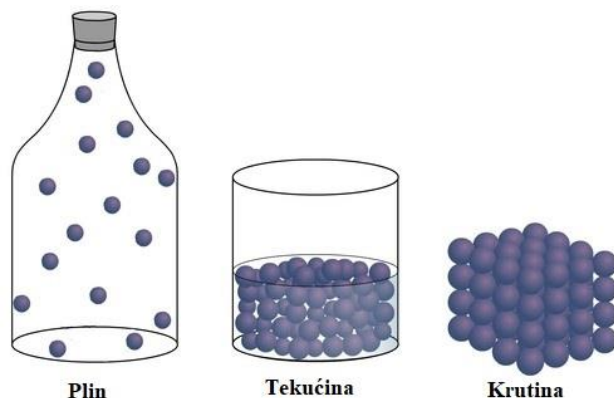
Vidljivo je sa Slike 2.3 da volumen  $\delta V$  ne može ići ispod najniže vrijednosti  $\delta V'$  jer u slučaju da ide rezultat bi bio nestabilan jer volumen mora imati određeni broj molekula da bi bio stabilan.

### 2.2.2. Tlak i stlačivost

U statici se rezultanta sila definirana normalnom i tangencijalnom komponentom. Naprezanje koje se javlja na površini je nastalo djelovanjem sile na površinu. Naprezanje definiramo kao sila po jedinici površine, te je ono matematički izraženo kao kvocijent sile i površine. Fluid koji miruje ima normalno naprezanje koje nazivamo tlak. Tlak je upravo intenzitet sile po jediničnoj površini. U mehanici fluida tlak se može definirati kao tekućina ili plin koji svojim molekulama „napadaju“ površinu/stijenku u dodiru s fluidom. Prema SI sustavu tlak se mjeri u Paskalima (Pa) gdje je  $Pa = N/m^2$  [1][2].

Fluid dok miruje nema tangencijalnog naprezanja. Kada se pomiče posuda u kojoj se nalazi fluid smično naprezanje omogućuje da fluid uspostavi horizontalnu slobodnu površinu. Jake kohezijske sile koje vladaju između molekula daju grupama molekula mogućnost da se mogu relativno kretati jedna prema drugoj zadržavajući relativno konstantan volumen. Iz tog razloga tekućine poprimaju oblik posude i formiraju slobodnu površinu gravitacijskom polju [2].

Kod plinova postoji razlika. Oni ekspandiraju do stijenke posude u kojoj se nalaze dok ne zauzmu sav raspoloživi volumen. Kod molekula plina kohezijska sila je vrlo mala te su molekule razmaknute. Plinovi se čuvaju u zatvorenim posudama jer ako je posuda otvorena oni se lako rasprše u okolinu (Slika 2.4). Stoga se često kaže da su plinovi stlačivi medij [2].



Slika 2.4. Grafički prikaz molekula plina, tekućine i krutog tijela [12]

Kapljevine su nestlačive i često se referira na njih u smislu nekompresibilnih fluida. Kod vode se efekt stlačivosti javlja pri ekstremno velikom tlaku od 1 GPa. Općenito za nestlačivi fluid vrijedi:

$$\rho = \text{const} \quad (2.4)$$

Gustoća se može računati po danoj formuli (2.2).

Plinovi se daju stlačiti pa ih se često naziva kompresibilnim medijem. U mehanici fluida se javljaju kao kontinuum s vremenski promjenjivom gustoćom i s prostorno promjenjivom gustoćom. Određena plinska masa neće zauzimati fiksni prostor nego će se širiti beskonačno, jedino ako nije ograničena spremnikom, onda će se širiti do stijenka spremnika. Idealni i realni plinovi se približno jednako ponašaju, to jest realni plin se ponaša prema zakonu idealnog plina [3]. Idealni plin nije isto što i idealni fluid jer se kod idealnog fluida zanemaruje trenje. Kod idealnog plina se razvija tangencijalno naprezanje i on je viskozozan [3]. Plinove dakle treba proučavati pomoću zakona o idealnom plinu:

$$pV = mRT \text{ ili } p = \rho RT \quad (2.5)$$

Gdje je:

$p$  – tlak u Pa;

$V$  – volumen u  $\text{m}^3$ ;

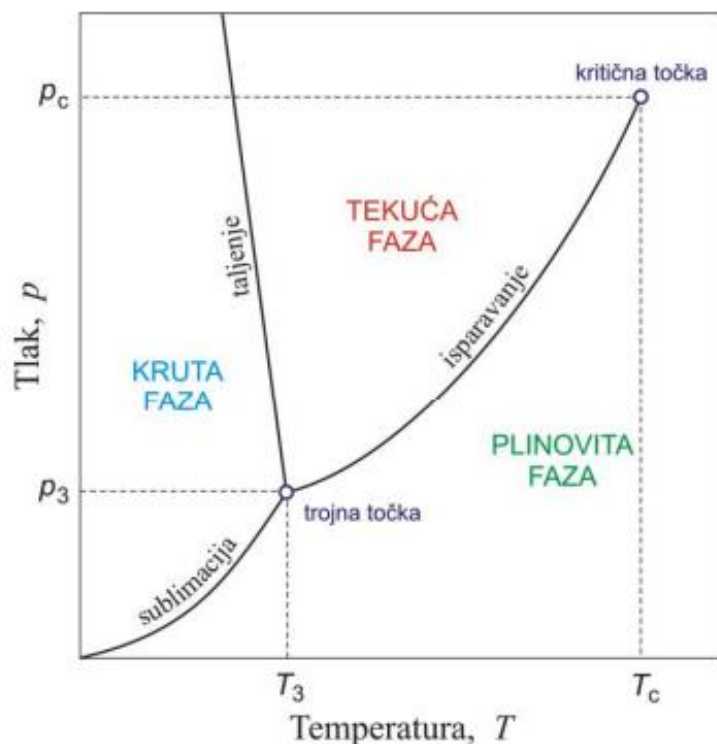
$m$  – masa u kg;

$R$  – plinska konstanta u  $(\text{J}/(\text{kgK}))$ , pri normalnim uvjetima zrak ima vrijednost od  $R = 287 \text{ J}/(\text{kgK})$ ;

$T$  – temperatura u K;

$\rho$  – gustoća u  $\text{kg}/\text{m}^3$

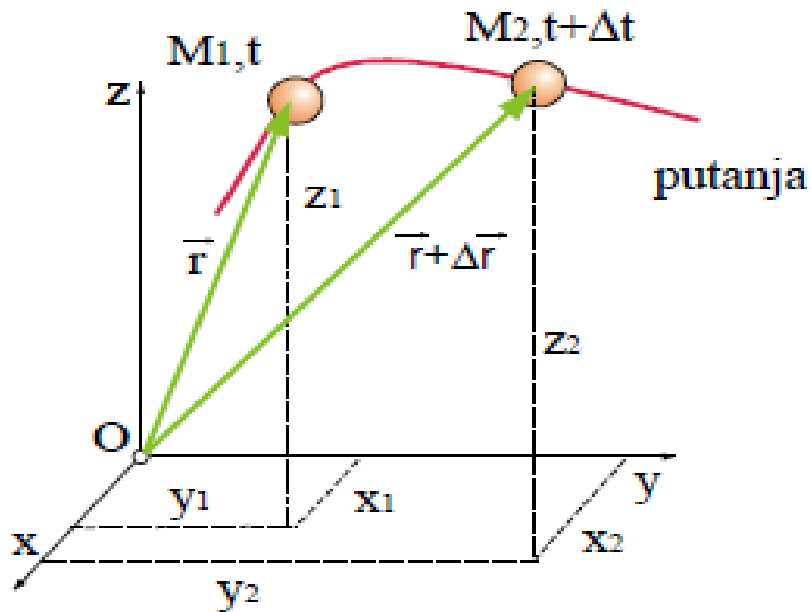
Poznato je da se tvari mogu pretvarati iz jednog agregatnog stanja u drugo to jest iz plinovitog u kapljevino te obratno. Prijelaznost u određenu fazu je ovisna o temperaturi i tlaku, pa s toga u fizici postoje tri agregatna stanja: kruto, kapljevito i plinovito stanje. Kao primjer mogu biti agregatna stanja vode. Slika 2.5 prikazuje dijagram ovisnost tlaka i temperature za promjenu agregatnih stanja. Iz toga faznog dijagrama jasno se mogu vidjeti krivulje isparavanja, sublimacije i taljenja sa zajedničkom trojnom točkom, te podjelama u kojima voda poprima svoja agregatna stanja [1] [2] [3].



Slika 2.5.  $p$ - $T$  fazni dijagram vode [13]

### 2.2.3. Brzina i ubrzanje

Da bi se došlo do brzine i ubrzanja potrebno je definirati temeljne pojmove. Gibanje je tijekom vremena promjena položaja u prostoru. Kontinuum u koji su smještena materijalna tijela je prostor [1]. Geometrijsko mjesto točaka u kojima se uzastopno nalazila materijalna čestica za vrijeme gibanja naziva se putanja. Vektor pomoću kojega se u prostoru prati gibanje čestice po putanji je vektor položaja  $\vec{r}$  (Slika 2.6.).



Slika 2.6. Gibanje čestice po putanji [22]

Vrijeme  $t[s]$  je kontinuum koji teče i pomoću kojega se mjeri starost. Dio putanje između dva uzastopna položaja materijalne čestice je pređeni put  $s[m]$ . Srednja brzina je definirana kao omjer prirasta vektora položaja i prirasta vremena pri gibanju materijalne čestice.

$$\vec{v}_{sr} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} [\text{ms}^{-1}] \quad (2.6)$$

Gdje je:

$\Delta \vec{r}$  – promjena pomaka u m;

$\Delta t$  – vrijeme u sekundama.



Granična vrijednost tog kvocijenta kada prirast teži nuli je trenutna brzina te se računa prema formuli:

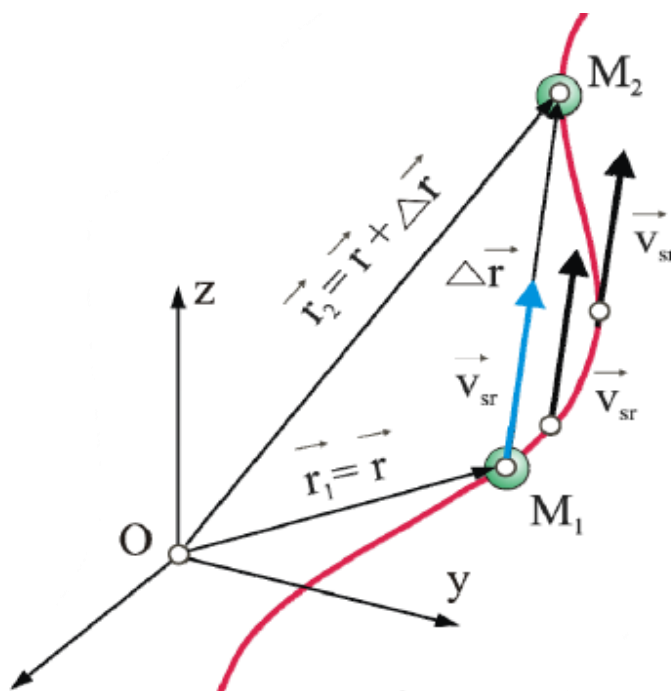
$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (2.7)$$

Srednje ubrzanje može se definirati kao promjenu brzine po promjeni vremena. Rezultat je svih sila koje djeluju na česticu.

$$\vec{a}_{sr} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} [ms^{-1}] \quad (2.8)$$

Trenutno ubrzanje proizlazi iz navedenog kvocijenta kao granična vrijednost kada prirast vremena teži nuli, a izražava se formulom:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} [ms^{-2}] \quad (2.9)$$



Slika 2.7. Prikaz pomaka  $r$ , brzine  $v$  i ubrzanja  $a$  u  $x, y, z$  koordinatnom sustavu [22]

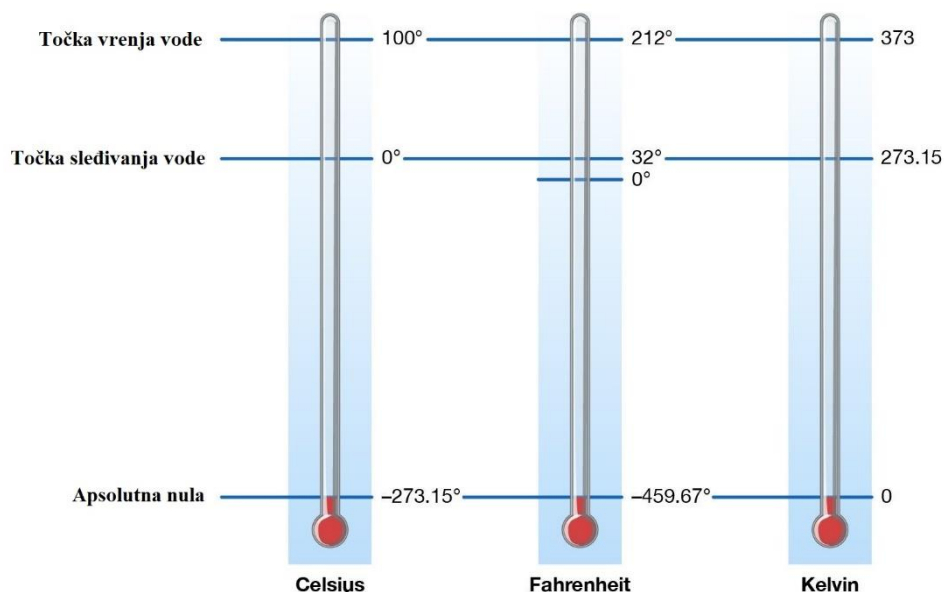
## 2.2.4. Temperatura

Temperatura je fizikalna veličina za mjeru prosječne kinetičke energije čestica u sustavu i još se naziva termodinamička temperatura. Kada toplina ulazi u sustav povećava se kinetička energija. Porastom kinetičke energije raste i temperatura. Mjerne jedinice koje se najčešće koriste su stupanj Celzijus (°C), stupanj Fahrenheit (°F) i Kelvin (K) [2]. U SI sustavu jedinica, Kelvin predstavlja mjernu jedinicu temperature. Kelvin se najčešće koristi u znanosti i tehnologiji dok je primjena Fahrenheit-a najveća u SAD-u[19]. U tehničkim znanostima i u termodinamici ova fizikalna veličina je od velike važnosti. Pojavljuje se najčešće u jednadžbi idealnog plina:

$$pV = mRT \quad (2.10)$$

U poglavlju o tlaku i stlačivosti su definirane sve oznake  $p$  je tlak,  $V$  volumen,  $m$  masa,  $R$  plinska konstanta i  $T$  je temperatura koja se izražava u kelvinima.

Teorijski ne postoji maksimalno dostižna temperatura, ali postoji teorijski minimalna. Minimalna je poznata kao apsolutna nula. Kada se ona postigne sve molekule zaustavljaju svoje gibanje. Realni fizički sustavi ne mogu nikada postići temperaturu apsolutne nule. Teorijski minimum se postiže kada je temperatura 0 K, -273,15 °C ili -459,67 °F.(Slika 2.8.)

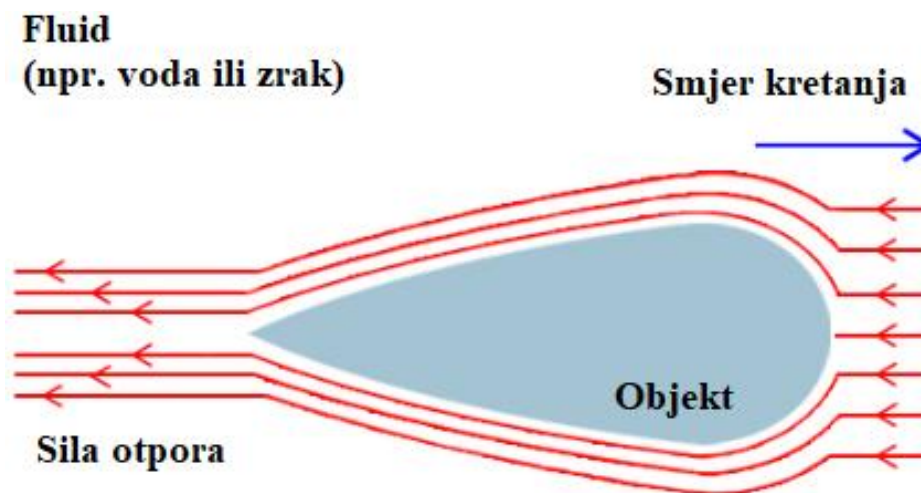


Slika 2.8. Apsolutna nula u Kelvin-u, Celsius-u i Fahrenheit-u [6]

### 2.2.5. Viskoznost

Promatrajući dva kruta tijela koja se dodiruju, između njih postoji kontaktna površina. Ako jedno od tih tijela pomaknemo između njih će nastati sila trenja. To je sila koja je suprotna sili s kojom smo pomaknuli jedno od dvaju tijela. Kretanjem vozila po cesti iako je cesta ravna vozilo usporava jer se između guma i asfalta pojavljuje sila trenja koja je suprotna sili gibanja vozila. Sve dok je sila gibanja veća od sile trenja auto će se gibati.

Kod fluida postoji svojstvo koje mu daje otpornost prema smičnim deformacijama. To svojstvo je viskoznost. Kada se metalna kuglica baci u vodu ona će vrlo brzo potonuti dok kod ulja će ta radnja trajati primjetno duže. Ulje ima veći unutarnji otpor nego li voda pa možemo pretpostaviti da je voda fluidnija, a ulje viskoznije. Sila kojom fluid djeluje na neko tijelo tijekom strujanja na njega samoga nazivamo silom otpora i veličina te sile ovisi o više parametara, ali jedan od njih je i viskoznost (Slika 2.9.).



Slika 2.9. Sila otpora [2]

Kako bi što bolje razjasnili viskoznost, zamislimo da se između dvije paralelne ploče nalazi neka tvar (Slika 2.10). Ploča koja se nalazi najniže je fiksna, dok na gornju djeluje sila  $F$ . Ta sila proizvodi smično naprezanje na tvar među pločama.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

Gdje je:

$\tau$  – smično naprezanje

$F$  – sila u N;

$A$  – kontaktna površina između ploče i fluida u  $m^2$ .

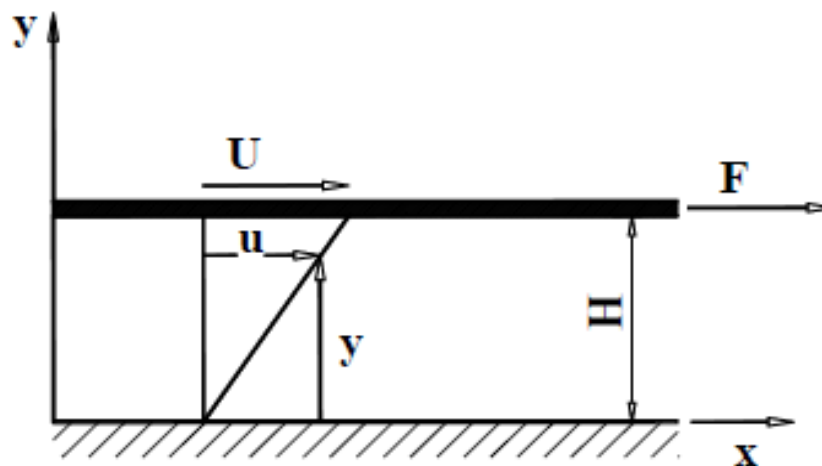
Kada sila  $F$  uzrokuje gibanje ploče stalnom brzinom, onda možemo zaključiti da je tvar između ploče fluid. U neposrednom kontaktu s čvrstom granicom fluid ima istu brzinu kao čvrsta granica. Primjer dokazuje da je sila  $F$  direktno proporcionalna površini  $A$  i  $U$  i obrnuto proporcionalna debljini sloja fluida  $H$ . Formula glasi:

$$F = \mu \frac{AU}{H} \quad (2.12)$$

Gdje je:

$\mu$  - faktor koji je vezan za svojstva fluida;

$U/H$  – predstavlja brzinu kutne deformacije, može biti zapisan kao  $du/dy$



Slika 2.10. Analiza viskoznosti fluida [1]

Uvrštavanjem u prethodnu jednadžbu 2.11. dobiva se smično naprezanje pa se zaključno može formulirati Newtonov zakon viskoznosti:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.13)$$

Gdje su:

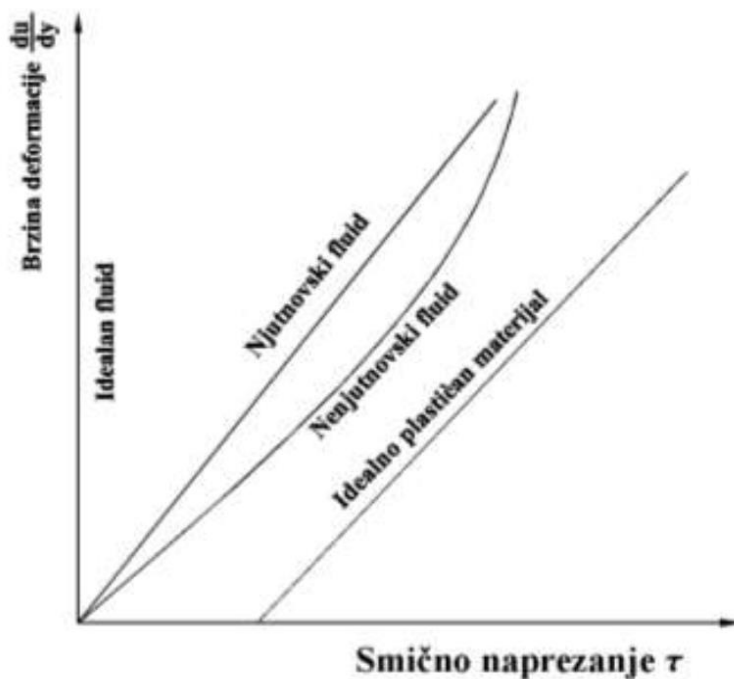
$\tau$  – smično naprezanje

$du/dy$  – brzina kutne deformacije pri jednodimenzionalnom strujanju fluida

$\mu$  - dinamički koeficijent viskoznosti

Fluidi su podijeljeni na dvije osnovne skupine. Fluide kod kojih je brzina deformacije linearno proporcionalna smičnom naprezanju se zovu newtonskim fluidima prema znanstveniku Sir Isaacu Newtonu. Sve prisutni fluidi kao što su zrak, benzin, voda, ulje i slični njima spadaju u tu grupu fluida. Dok kod nenewtonskih fluida odnos između intenziteta smičnog naprezanja i brzine deformacije je nelinearan. Primjeri takve vrste fluida su krv, blato, tekuća plastika i zubna pasta. [1]

Na Slici 2.11. može se vidjeti graf ovisnosti brzine deformacije o smičnom naprezanju i prema tome razaznati karakteristične krivulje ovisnosti za newtonski i nenewtonski fluid.

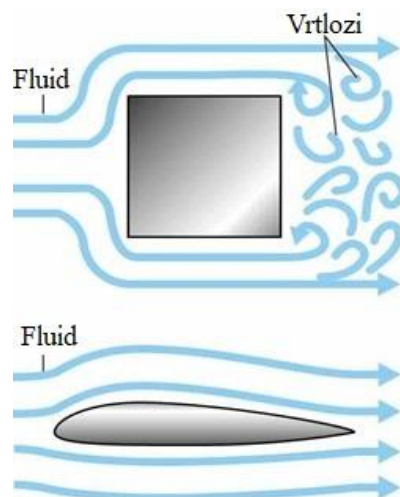


Slika 2.11. Newtonski i nenewtonski fluid [1]

### 3. AERODINAMIKA I VANJSKO STRUJANJE FLUIDA

#### 3.1. Teorijske osnove aerodinamike i aerodinamika zgrada

Kategorija mehanike fluida koja se bavi strujanjem plinova (osobito zraka) preko tijela kao što su zrakoplovi, rakete, automobili ili pak neki drugi objekti, naziva se aerodinamika. Materijalno tijelo predstavlja prepreku gibanju zraka, pri nekoj brzini pa je stoga kao takvo bitno dobro poznavanje formiranja zračnih struja. Tijela mogu biti više ili manje aerodinamična, ovisno o njihovoj primjeni i konstrukciji. Slika 3.1 prikazuje opstrujavanje neaerodinamičnog tijela (kocke) i aerodinamičnog tijela (krilo zrakoplova). Vidi se kako strujnice fluida imaju puno mirniji tok kod profila zrakoplova i ne izazivaju toliku pojavu vrtloga. Ovi efekti razmatrani su u danjem dijelu ovog rada.



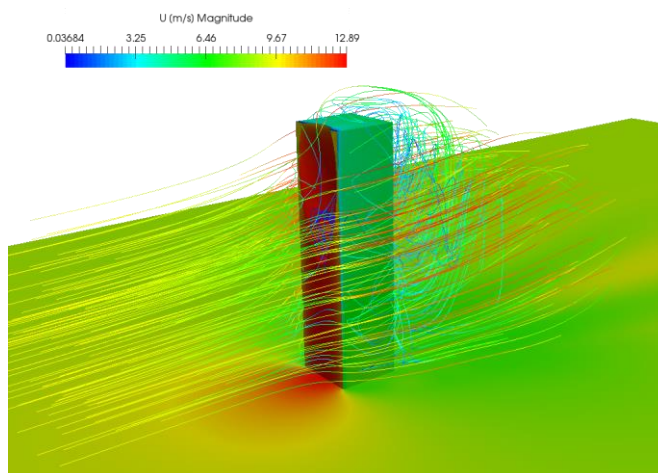
Slika 3.1. Opstrujavanje fluida oko neaerodinamičnog i aerodinamičnog tijela [14]

Najvažniji čimbenici za ocjenu kvalitete aerodinamičnosti su tlak, brzina, temperatura i gustoća strujanja fluida, dakako ovisni o vremenu i prostoru nastrujavanja.

Kao što je već spomenuto u uvodnom dijelu, aerodinamika građevinskih konstrukcija danas je također bitna. Stambene zgrade često se izvode ne aerodinamično zbog jednostavnost i niskih troškova izgradnje, no to često može izazvati manje ili veće štete koje naposljetku mogu dovesti u pitanje ljudske živote [4].

Ovakvim razmišljanjem aerodinamika je jedna od glavnih sigurnosnih problema današnjice, pa je potrebno vrlo dobro poznavanje dviju osnovnih veličina, a to su sila otpora (eng. *drag*) i aerodinamična sila uzgona (eng. *lift*).

Ne aerodinamična tijela poput zgrada često se pojednostavljaju modelima poput kocke ili kvadra kako bi bila što jednostavnija, pa je stoga i u ovom radu obuhvaćena aproksimacija geometrijskim tijelima (Slika 3.2).

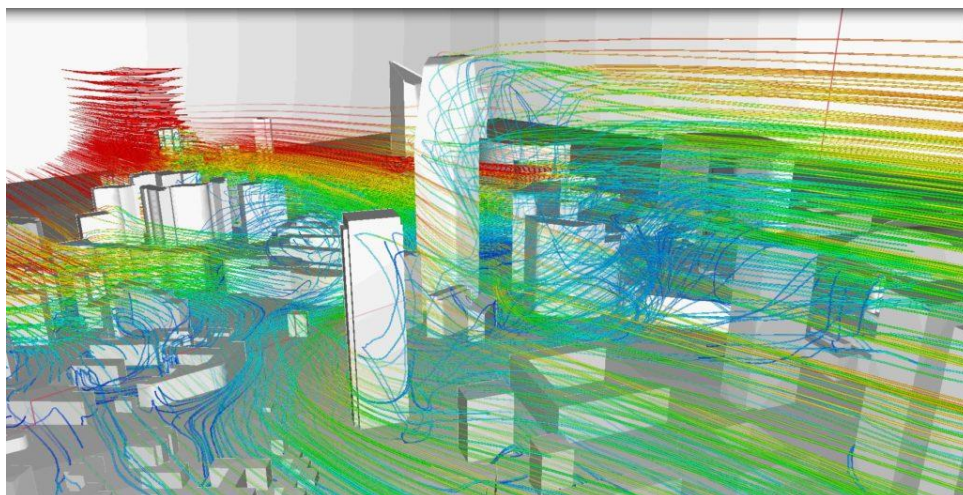


Slika 3.2. Aproksimacija zgrade geometrijskim tijelom [15]

Putanje silnica protoka zraka oko zgrada u izgrađenim područjima gradova mogu biti vrlo kompleksne, osobito kada postoji više zgrada u neposrednoj blizini jedne drugoj [21]. Efekti strujanja uvelike mogu utjecati na stanovnike zgrada i na same pješake na razini tla uokolo građevine. Potrebno je osigurati njihovo nesmetano kretanje uslijed posljedica jakog vjetra koji nailazi sa raznih smjerova na izgrađenu stambenu zgradu.

Prilikom „udara“ vjetra o površinu zgrade, tok fluida se obično dijeli na onaj koji teče preko i oko zgrade. To rezultira stvaranjem jakih vrtloga na mjestima zavjetrine kuda prolaze strujnice fluida koje se na tom mjestu spajaju (Slika 3.2 i Slika 3.3) [21].

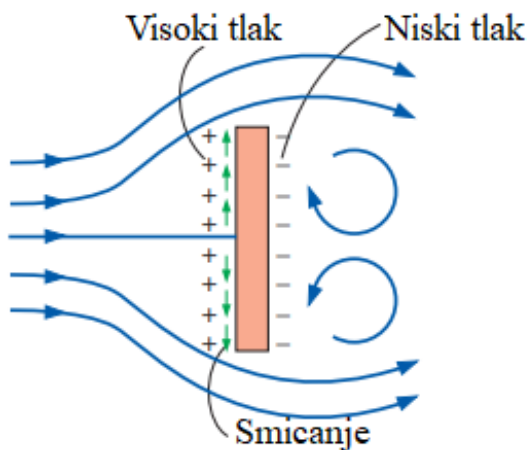
Dakako ovi efekti ovise o brzini nastrojavanja jer ukoliko je brzina veća, veći su i nastali vrtlozi tj. veća je nelagoda kod prolaska pješaka u prizemlju zgrade pogotovo u direktnom prolazu kod kojeg nastaje „efekt kanjona“ [21]. Čest je osjećaj „njihanja“ zgrade kod stanovnika na višim katovima zbog jakih naleta vjetra.



Slika 3.3. Simulacija opstrujavanja kompleksa zgrada [16]

Pri osvrtu na aerodinamičnost, to jest na ne aerodinamičnost obične zgrade ključne su dvije veličine od kojih je sila otpora važnija. Ta sila  $F_D$  predstavlja otpor u smjeru nastrojavanja fluida i ona je paralelna s relativnom brzinom  $v$ . Ona se uobičajeno u praksi može izmjeriti uz pomoć kalibrirane opruge, rastezanjem u smjeru strujanja. Uobičajene zgrade imaju vrlo veliku silu otpora, te se kod njih zapravo jedino ona uzima u obzir. Sila uzgona je izuzetno mala, no svejedno se javlja kod određenih dijelova zgrada poput balkona ili različitih krovišta. Čak i takva malena može uzrokovati velike štete koje mogu narušiti sveopću stabilnost zgrade.

Na površinu nastrojavanja nailazi struja fluida gdje dolazi do smanjenja brzina nastrojavanja, te se strujnice dijele i obilaze oko i preko prepreke/zgrade. Zbog te smanjene brzine dolazi do porasta tlaka na unutrašnjem dijelu površine, a kako se približavamo uglovima zgrade tlak pada i brzina raste. Posljedica toga su mirnija područja stagnacije na bočnim stranama građevine, te vrtlozi na stražnjoj površini (Slika 3.4) [2].



Slika 3.4. Grafički prikaz nastrojavanja fluida na prednju površinu tijela [2]



Pripadajući koeficijent otpora zraka (eng. *drag coefficient* -  $C_D$ ) računa se:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 A} \quad (3.1)$$

Gdje je:

$F_D$  – sila otpora koja ima smjer suprotno od smjera gibanja tijela, u N;

$\rho$  – gustoća fluida koji opstrujava tijelo u  $\text{kg/m}^3$

$v$  – brzina objekta u odnosu na fluid u m/s

$A$  – kontaktna površina između tijela i fluida u  $\text{m}^2$

Osim koeficijenta otpora može se još spomenuti i koeficijent aerodinamičkog uzgona zraka iako je on manje bitan kod promatranja zgrade:

$$C_L = \frac{2L}{\rho v^2 A} \quad (3.2)$$

Pri čemu je:

$L$  – sila uzgona, u N;

$\rho$  – gustoća fluida koji opstrujava tijelo u  $\text{kg/m}^3$

$v$  – brzina objekta u odnosu na fluid u m/s

$A$  – kontaktna površina između tijela i fluida u  $\text{m}^2$

Lokalni koeficijent otpora i uzgona primarno su funkcije samog oblika tijela na koje nastrojava fluid, ali u nekim slučajevima oni također ovise o Reynoldsovom broju, te o hrapavosti površina.

Izraz  $\frac{1}{2}\rho v^2$  u  $C_D$  i  $C_L$  predstavlja dinamički tlak.

Zgrade se konstruiraju aerodinamičnije te tako estetski bolje izgledaju i smanjuje se sila otpora koja je nepoželjna. Na Slici 3.5. prikazana je aerodinamična moderna zgrada. Najveći razlog tome je manji tlak na površini nastrojavanja fluida na zgradu koji osim što proizvodi ogromnu buku pri sudaru sa zgradom, raznosi i oštećuje zgradu sitnim česticama u struji vjetra [4].

Iduće rješenje ka smanjenju otpora je hrapavost površine stoga zgrade vrlo često imaju ogromne staklene površine koje pomažu induciranjem prijelaza u laminarno strujanje pomoću glatkih površina.



*Slika 3.5. Moderni aerodinamičniji neboderi/zgrade [17]*

### **3.2. Laminarno i turbulentno strujanje**

Poznavanje i razumijevanje strujanja/opstrujavanja fluida je od iznimne važnosti pri analizi njihovog efekta na sustave koji funkcioniraju u fluidu. Za precizno modeliranje u računalnoj dinamici fluida (eng. *CFD*), inženjeri i konstruktori moraju imati široko znanje mehanike fluida kako bi kvalitetno proveli istraživanja i simulacije koje su ponekad od iznimne važnosti. Ovakvo znanje zahtjeva razumijevanje strujnica protoka, brzina unutar sustava, te tlakova. Samo tada je moguće sa sigurnošću odrediti i raspoznati laminarno i turbulentno strujanje [10].

Prvi od ta dva režima naziva se laminarno strujanje za koje su specifične glatke strujnice i visoko uređeno gibanje. Turbulentno strujanje s druge strane karakteriziraju brzinske fluktuacije i kaotično gibanje. Prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje se ne događa najjednom već se pojavljuje u područjima u kojima strujanje varira između dva režima prije nego što postane potpuno turbulentno. Tranzicijsko područje također ovisi o samoj geometriji, hrapavosti površina, brzini strujanja, temperaturi površine i vrsti fluida. U praksi najviše se susrećemo sa kaotičnim gibanjem dok je uređeno gibanje najistaknutije kod jače viskoznih fluida, npr. ulja, pri njihovom prolasku kroz male cijevi ili uske prolaze [2] [10].

Ovakve zaključke o vrstama strujanja prvi je formulirao Osborne Reynolds (1842–1912). Stoga se njemu u čast omjer između inercijskih sila i viskoznih sila u fluidu naziva Reynoldsov broj. Takav izraz je često poznat u obliku:

$$R_e = \frac{\text{inercijske sile}}{\text{viskozne sile}} = \frac{vD}{\nu} = \frac{4Q}{D\pi\nu} \quad (3.3)$$

Gdje je:

$v$  – brzina strujanja fluida u m/s;

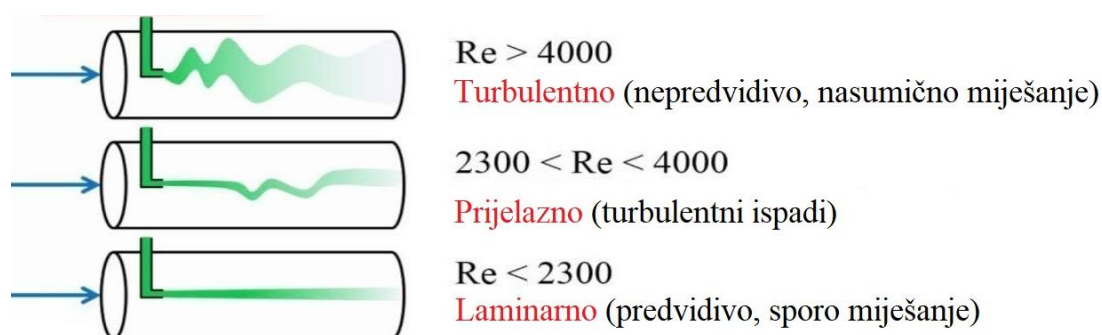
$D$  – promjer cijevi ili neka druga karakteristična dužina u m;

$\nu$  – kinematički koeficijent viskoznosti u m<sup>2</sup>/s;

$Q$  – protok u m<sup>3</sup>/s

Kod velikih Reynoldsovih brojeva, inercijske sile koje su proporcionalne gustoći fluida i kvadratu brzine fluida, su relativno velike u odnosu na viskozne sile. Zato viskozne sile ne mogu spriječiti nasumične i uzastopne fluktuacije tekućine. Pri manjim vrijednostima Reynoldsovog broja, te sile su dovoljno velike da spriječe fluktuacije i osiguraju mirnu protočnost fluida [2].

Kritični Reynoldsov broj je pokazatelj prelaska u turbulentni režim, a on se razlikuje ovisno o geometriji, te uvjetima strujanja. Vrijedi da je za vrijednosti  $R_e \leq 2300$  laminarno područje pri malim brzinama. Kada je  $R_e > 4000$  područje je potpuno turbulentno, a za sve vrijednosti između pretpostavlja se prijelazno strujanje [1].



Slika 3.6. Vrste režima strujanja [18]

## 4. KORIŠTENI PROGRAMSKI ALATI

---

### 4.1. Računalna dinamika fluida

Računalna dinamika fluida – CFD (eng. *Computational Fluid Dynamics*) grana je znanosti koja primjenom znanja i iskustva mehanike fluida postavlja za cilj različite izrade računalnih simulacija upotrebom definiranih modela, a sve to u svrhu lakše i jednostavnije vizualizacije rješenja nekog problema. Takvom metodom olakšano je predočavanje krajnjih rezultata uz neka nova saznanja koja su teško razaznajuća matematičkim pristupom. Uz pomoć CFD-a predviđaju se različiti potrebni podaci poput prijelaza topline, tlakova, strujanja fluida, prijenosa mase i slično. Temelj samog CFD-a počiva na Navier-Stokesovim jednadžbama, a najviše se upotrebljava u rješavanju problema aerodinamike letjelica i vozila, hidrodinamike brodova, izgaranja u motorima, kemijskog inženjerstva, unutarnje i vanjske okoline zgrada, meteorologije, hidrologije, te biomedicine [8].

Inženjerski problemi rješavaju se najčešće na 3 načina, uz pomoć analitičkih, eksperimentalnih i numeričkih metoda. Trebalo bi reći da je CFD grana koja koristi numeričke metode za rješavanje jednadžbi strujanja fluida. Općenito prva faza rješavanja je idealizacija ili matematičko modeliranje, nakon čega slijedi prostorna i/ili vremenska diskretizacija matematičkog modela, te na kraju rješavanje sustava diskretiziranih jednadžbi. Primjenom diskretizacije, sustav diferencijalnih jednadžbi zamjenjuje se algebarskim sustavom jednadžbi, a praktično se koriste različite aproksimativne metode simulacije poput metode konačnih elemenata, metode konačnih razlika, metode konačnih volumena i metode rubnih elemenata [8].

Prema tome sama CFD analiza numeričkih metoda može se podijeliti na tri glavna dijela, a to su: predobrada (eng. *pre-processing*), rješavanje (eng. *processing*) i naknadna obrada/analiza (eng. *post-processing*).

Predobrada podrazumijeva definiranje samog problema, to jest njegovo modeliranje u određenom 3D programu. Ova faza je zahtjevna za čovjeka jer je on odgovoran za unesene dimenzijske parametre baš kao i za konstrukciju cjelokupnog modela.

U idućoj fazi procesuiranja koriste se napredne numeričke metode za dobivanje zadovoljavajućeg rješenja u CFD rješavaču. Ovo područje je ne zahtjevno za čovjeka zbog toga jer računalo obavlja komplicirane izračune uz pomoć svog hardver-a i softwer-a. Numerički se rješava željeni matematički model sa zadanim početnim i rubnim uvjetima. Potrebno je dobro

paziti pri postavljanju parametara izračuna, poput broja iteracija i broja korištenih računalnih jezgri, kako bi bilo dovoljno računalnih resursa na raspolaganju.

Za vizualni prikaz i očitavanje rezultata potrebna je zadnja faza post-procesuiranja koja je zapravo program koji inženjer mora znati koristiti i tako dobiti tražene podatke iz ogromne količine podataka CFD analize kao što su tlak, brzina, snaga vrtloga i ostali.

Danas je primjena CFD-a uobičajena stvar u praksi zbog izuzetno jakih procesora računala. Teoretski ne postoje računalni modeli koje takva metoda ne može riješiti zbog uvođenja potrebnih modela turbulencije, poput k-epsilon ili k-omega. Najveća razlika između njih je ta da k-epsilon model se upotrebljava za strujanje fluida udaljeno od stijenke zida, na slobodnoj površini, dok k-omega najbolje opisuje područje protoka u neposrednoj blizini zida gdje se razvija nepovoljan gradijent tlaka. Takva primjena daje dovoljno točne rezultate čak i pri simulaciji najzahtjevnijeg, turbulentnog strujanja [8].

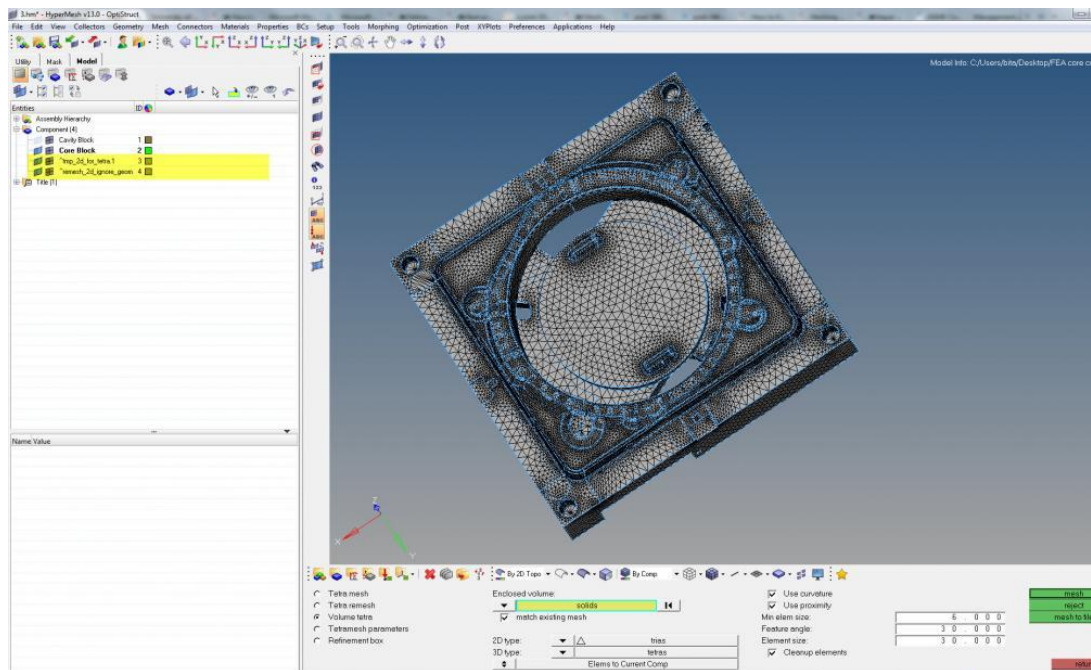
## **4.2. HyperMesh, Virtual Wind Tunnel i AcuField**

### 4.2.1. HyperMesh

HyperMesh je popularan multidisciplinarni pre i djelomično post-procesorski program, koji upravlja generiranjem velikih i složenih numeričkih mreža. Omogućuje vrlo interaktivno vizualno okruženje za analizu modela proizvoda. Također, korisnicima omogućuje izmjenu prethodno definiranih mreža bez ponovnog meshinga(kreiranja nove mreže). Njegova izravna kompatibilnost s komercijalnim CAD i CAE(eng. *Computer Aided Engineering*) sustavima čine ga izvanrednom platformom za analizu u različitim područjima industrije. Općenito, ovaj softver pomaže geometrijski optimizirati oblik modela pretvorivši ga u mrežu konačnih elemenata sa određenim brojem čvorova [11] [19].

Program također nudi i generiranje, te montažu(eng. *Assembly*) složenih dijelova u jedan proizvod koji se uz pomoć automatskog kreiranja mreže ostvaruje izuzetno brzo i kvalitetno.(Slika 4.1.)

Uz HyperMesh na tržištu postoji još nekolicina sličnih pred-procesorskih programa poput Ansys-a, Matlab-a, Fusion-a 360 i slični. Cjelokupni proces meshing-a u ovome završnome radu odrađen je uz pomoć programa HyperMesh, otvaranjem gotovog 3D modela napravljenog u programu Autodesk Inventor.



Slika 4.1. Generiranje mreže složenog 3D modela

#### 4.2.2. Virtual Wind Tunnel

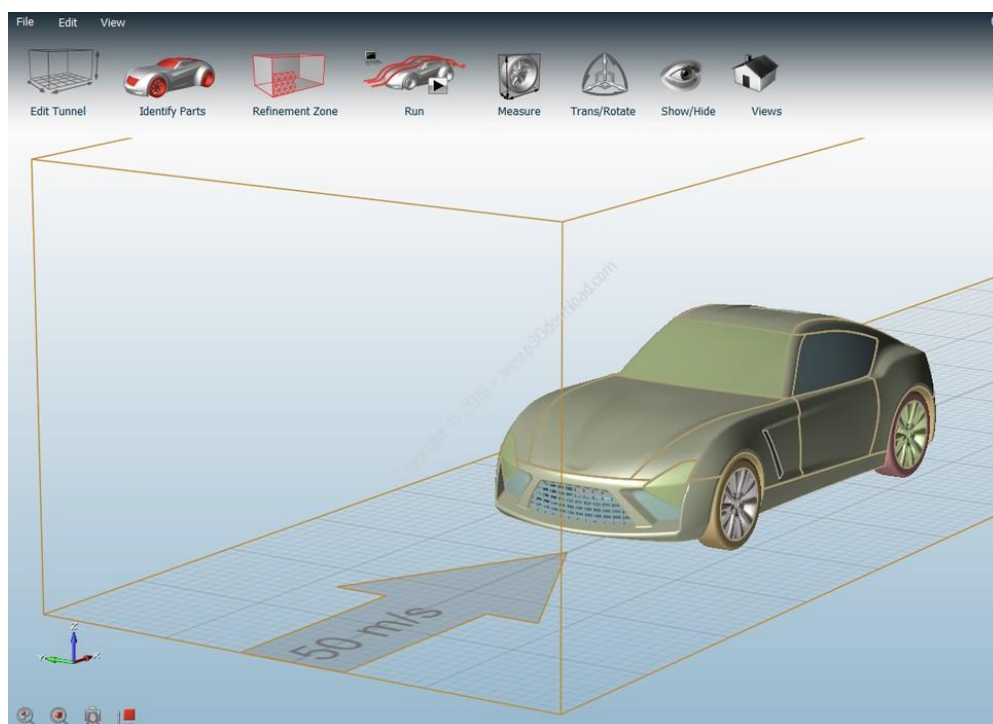
Način na koji zrak struji oko objekata poput automobila, zgrada i određenih proizvoda utjecat će na izvedbu krajnjeg objekta. Stoga je konstruktorima potrebno vizualizirati tijekom i finalni izgled prilikom projektiranja. To se može postići uz pomoć različitih simulatora zračnih tunela poput Virtual Wind Tunnela, napravljenog od tvrtke Altair. Ovaj softver za simulaciju aerodinamike uvelike pomaže u vizualizaciji protoka fluida i relativno jednostavan je za korištenje. Iako naizgled vrlo ne zahtjevan program, VWT jedan je od najsloženijih korištenih u ovom radu. Pod složnošću misli se na izračune i radnje koje sam program obavlja prilikom simulacije.

Iako u praksi postoje i fizički zračni tuneli otvorenog ili zatvorenog tipa, oni se sve više izbjegavaju zbog velikih financijskih troškova za njihovu izradu. Za sve važe projekte poput konstrukcija svemirskih raketa i letjelica, NASA još uvijek proizvodi simulacije i na fizičkim i virtualnim zračnim tunelima [11] [8].

VWT program općenito je namijenjen za upotrebu na vozilima u automobilskoj industriji, ali također daje točne rezultate i za ostale objekte koji se simuliraju (Slika 4.2.). Sam program zamišljen je kao procesor i post-procesor u jednom, jer nakon obavljenog izračuna u CFD AcuSolver-u, baziranom na metodi konačnih elemenata, daje automatski generirani izvještaj sa pripadajućim podacima i slikama. U tom izvještaju moguće je pronaći podosta podataka o silama i koeficijentu uzgona, otpora, aerodinamičnim svojstvima i slično.

Pravilna izvedba CFD simulacije osigurana je pravilnim podešavanjem dimenzija tunela, pozicioniranjem objekta u tunelu, odabirom parametara strujanja, kvalitetom mreže, i odabirom broja iteracija.

VWT koristi dvije tehnologije za modeliranje turbulentnog nastrujanja uz predviđanje polja nastrujanja od kojih je jedna *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), a druga *Detached-Eddy Simulation* (DES). RANS tehnologija se većinski upotrebljava kod stacionarnog strujanja fluida (eng. *steady*) simulacije dok se DES tehnologija koristi za nestacionarno strujanje fluida (eng. *transient*) [2].



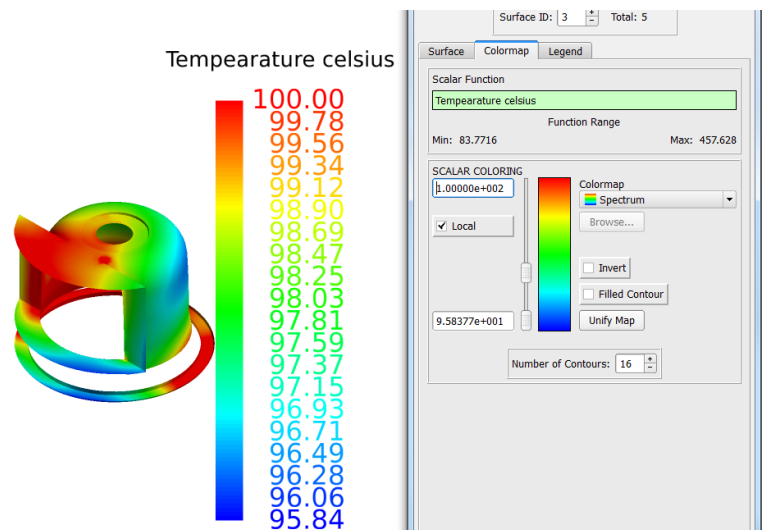
Slika 4.2. Prikaz sučelja i modela u VWT programu

#### 4.2.3. AcuConsole i AcuFieldView

Ova dva programa povezana su tako da AcuConsole izvršava pred-procesorske radnje za AcuFieldView(AFV) koji ima ulogu CFD post-procesora. Prikaz finalnih rezultata u kvalitativnom obliku često je težak za razumjeti, ali uz AcuFieldView puno jednostavnije analizirati dobivene podatke u obliku slika i animacija.

Na početku potrebno je datoteku s nastavkom .acs otvoriti u AcuConsole kako bi se prikazao izgled samog tunela i modela. Podešavanjem parametara oslobađa se model iz tunela i kada se prikazano pokaže zadovoljavajuće ulazi se u AFV.

Sami program AcuFieldView daje različite mogućnosti prikaza tijela i strujnica oko njega. Vizualni spektar boja za određene fizikalne veličine može se mijenjati po želji. Također mogu se mijenjati mjerne jedinice i određene točke u kojima se želi dobiti grafički i kvalitativni rezultat (Slika 4.3.).



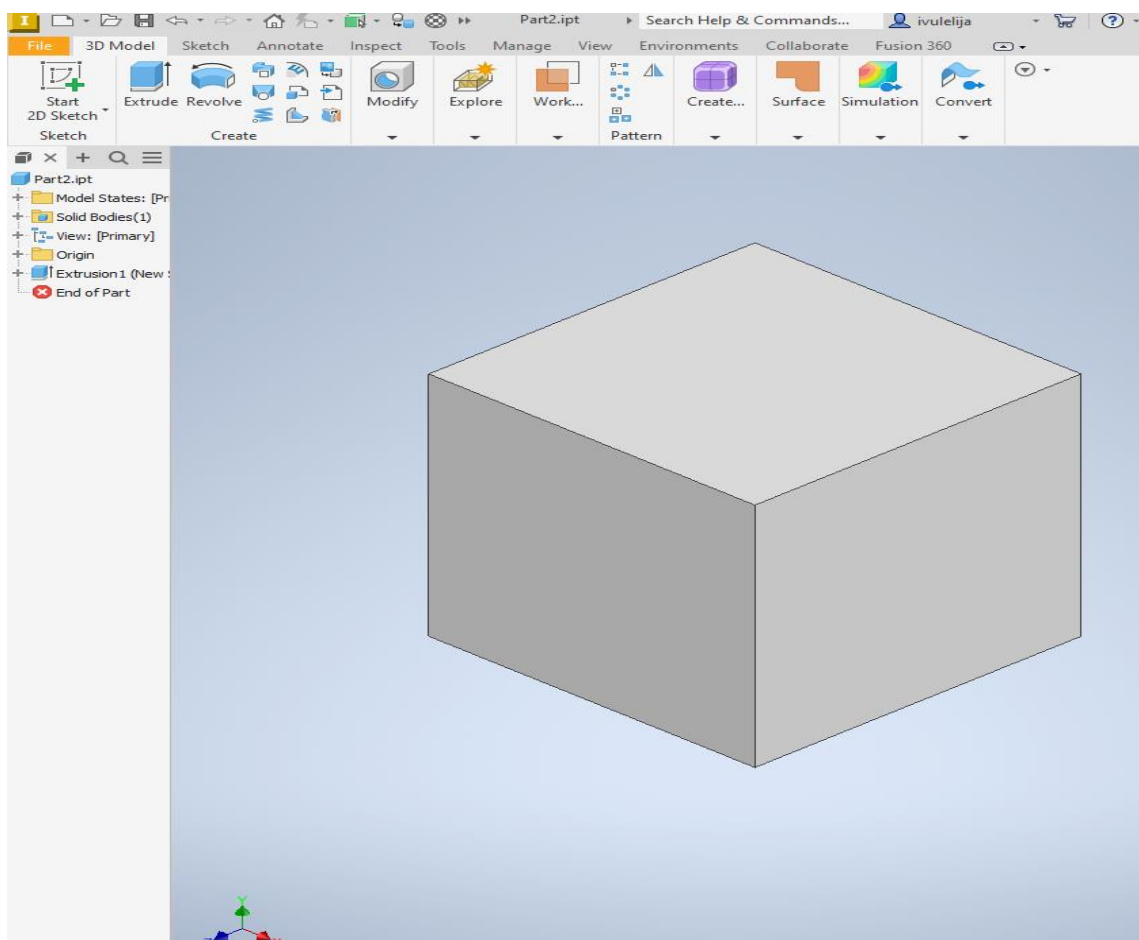
Slika 4.3. Mogućnosti prikaza AcuFieldView programa [20]



## 5. SIMULACIJA I USPOREDBA REZULTATA

### 5.1. Izrada geometrije

Za provedbu simulacije potrebna je geometrija koja je jednaka geometriji zgrade. U ovoj simulaciji zgradu zamjenjuje kocka. Geometrija je napravljena u programu Inventor. Inventor nudi izradu djelova. Ulaskom u željenu ravninu potrebno je definirati profil koji je kvadrat dimenzija 100x100mm. Izvlačenjem kvadrata za 100mm dobivamo kocku dimenzija 100x100x100mm.



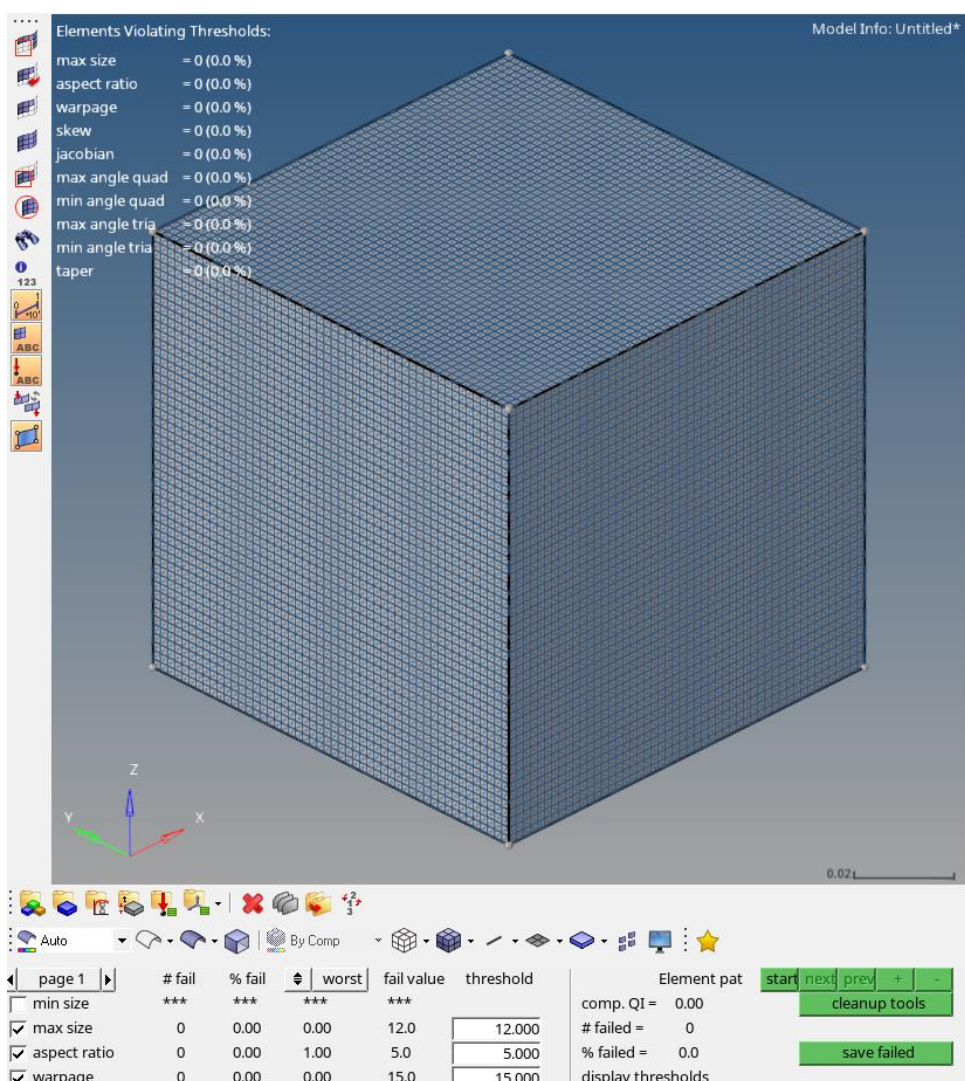
Slika 5.1 Geometrija kocke za simulaciju

### 5.2. Izrada mreže

Nakon izrade geometrije potrebno je izraditi mrežu modela u HyperMesh-u. Geometriju napravljenu u Inventoru treba prebaciti u STEP datoteku kako bi se mogla učitati. U Altair HyperMesh-u učitavanjem kocke započinje izrada mreže (eng. *meshing*). Tijekom izrade mreže treba obratiti pozornost na nekoliko parametara kao što su veličina i vrsta elemenata koji će činiti

mrežu. Za vrstu elemenata najbolje postaviti pravilne 2D kvadrate zbog ravnih stranica tijela. Ovi elementi sastoje se od 4 čvora. Izgenerirana mreža nema greške iz razloga što je geometrija prejednostavna da bi bilo greške, te su sve stranice pravilnih bridova. Ukoliko se analiziraju složeni objekti, izgled mreže je od iznimne važnosti pa je stoga potrebno pravilno definiranje mreže određenim elementima. Svaka složena mreža stvarnog modela ima neke pogreške zbog ograničenja programa u izradi. Ovakve probleme moguće je popravljati ručno na nepravilno definiranim elementima ili uključiti automatski popravak i/ili automatsko generiranje nove mreže. Kao što je već prije spomenuto HyperMesh je izuzetno bogat program različitim opcijama izrade mesha, no za ovaj radi korištene su samo one osnovne.

Slika 5.2 prikazuje izgled gotove, izgenerirane mreže koja omogućuje daljnji rad sa modelom.



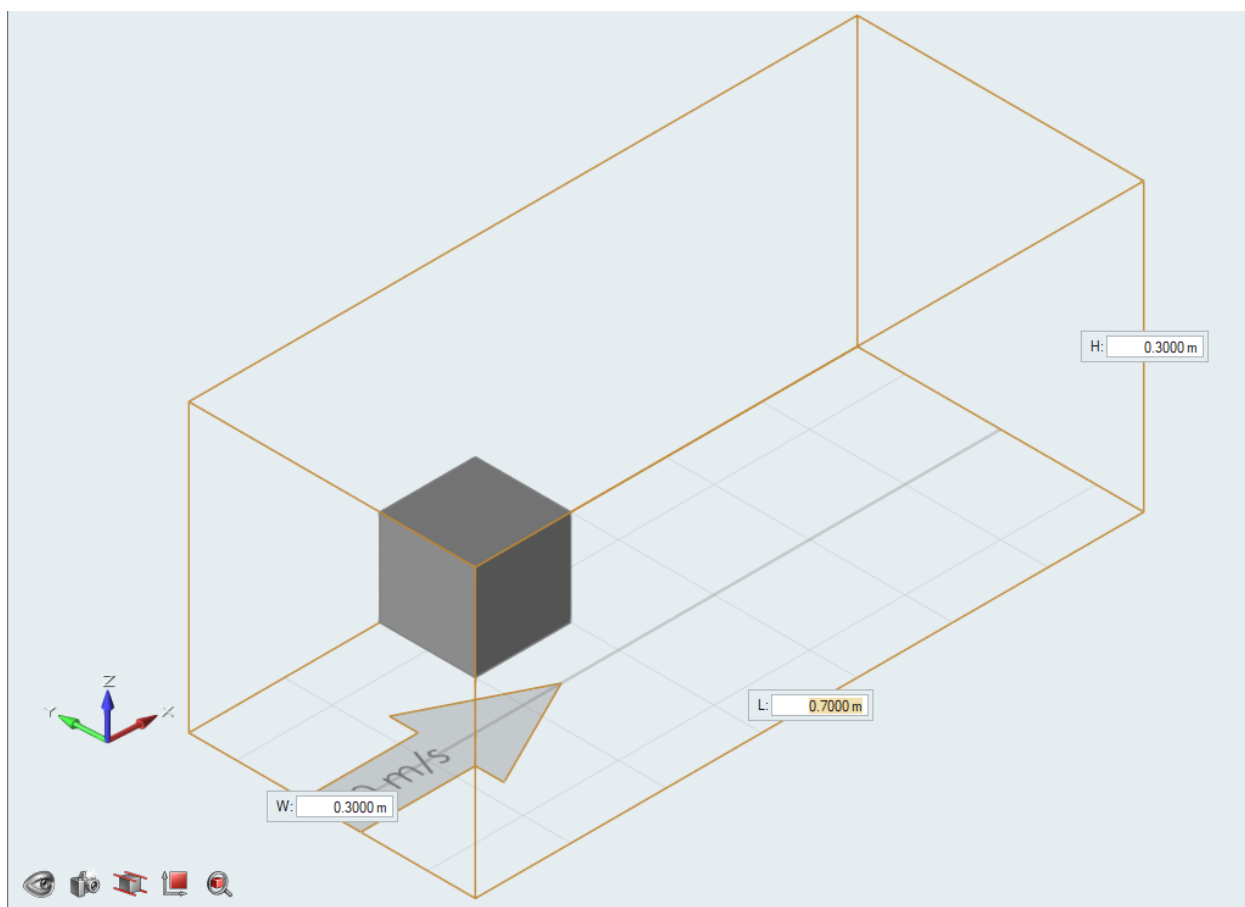
Slika 5.2. Izrađena mreža kocke u Hypermesh programu

Izradom mreže obavljen je rad u HyperMesh-u. Mrežu spremamo u NASTRAN obliku to jest datoteci s nastavkom .nas. Ovakav tip datoteke je prilagođen za učitavanje mreže u Virtual Wind Tunnelu koji služi kao glavni program za obradu i simulaciju nastrujavanja fluida na model.

### 5.3. Simulacija u Virtual Wind Tunnel-u

Simulacija u zračnom tunelu će se temeljiti na dvije simulacije od koje oba dvije koriste istu geometriju samo je razlika u kutu pod kojim se nalazi objekt. U prvoj simulaciji kocka će biti paralelna sa ulazom tunela, a u drugoj će kocka biti zakrenuta pod određenim kutom oko Z osi.

Potrebno je unijeti model u Virtual Wind Tunnel uz prethodno određenu veličinu tunela. Kako se ne bi predimenzionirao tunel potrebno je uzeti u obzir neke smjernice. Dužina tunela će biti 0.7m, širina 0.3m, a visina 0.3m. Pozicionirati ćemo model 0.2m od početka tunela ostaviti sa svake strane 0.1m osim iza modela biti će 0.6m do kraja tunela. Iako bi model trebao dodirivati tunel kako bi bio idealni primjer zgrade to u VWT nije moguće jer model ne smije dodirivati tunel.



Slika 5.3. Dimenzioniranje tunela i pozicioniranje modela

Tablica 2. Prikaz dimenzija zračnog tunela

Dimenzije zračnog tunela		
Duljina	Širina	Visina
0.7 m	0.3 m	0.3 m

Nakon dimenzioniranja tunela i pozicioniranja modela potrebno je identificirati određene dijelove. Objekt nad kojim se vrši simulaciju nema izmjenjivače topline ni kotače koji utječu na opstrujavanje. Potrebno je odrediti samo granične slojeve (eng. *boundary layers*). Oni se nalaze na površini tijela i na stijenkama zidova zračnog tunela. Automatski program prepoznaje položaj graničnih slojeva pa nije potrebno posebno označavanje.

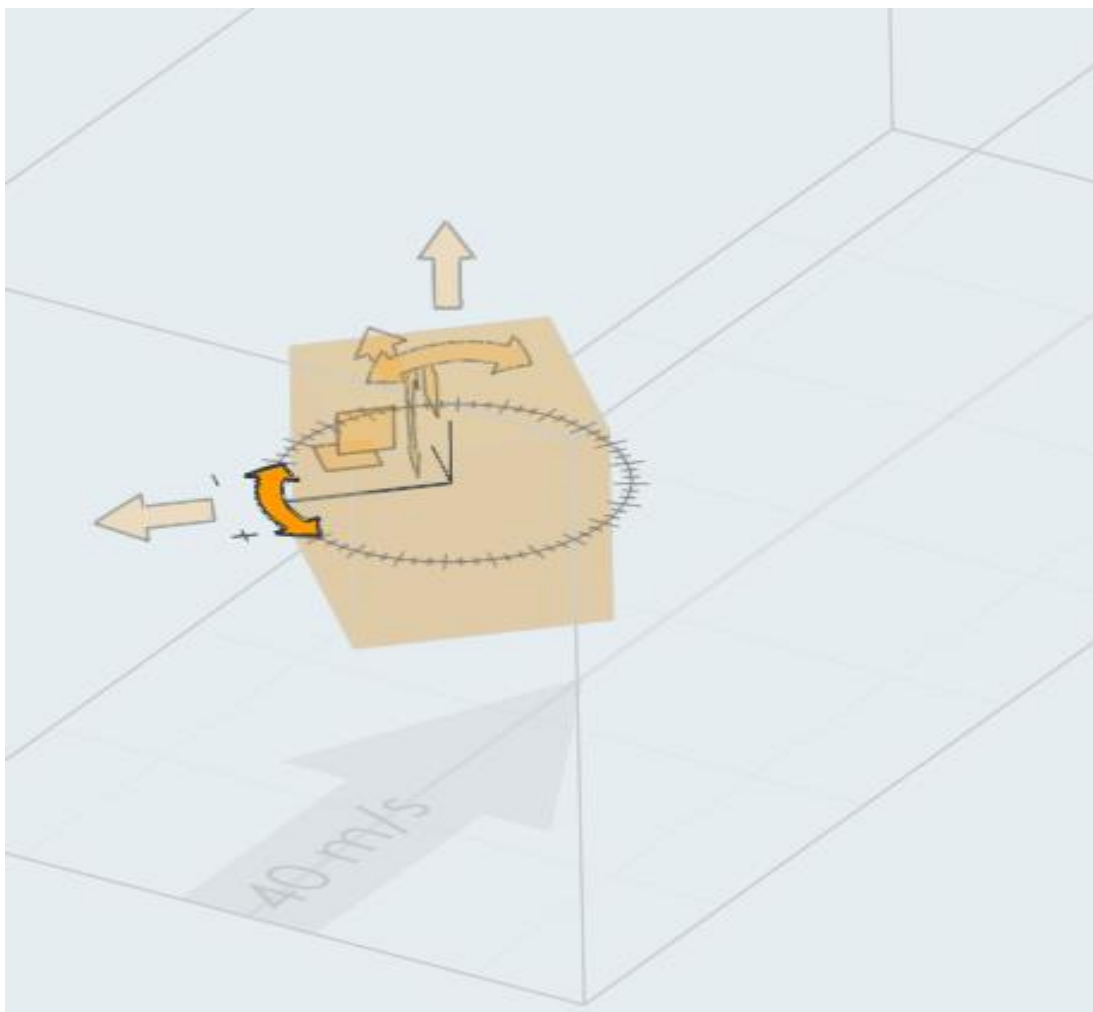
Nakon identifikacije se oko modela postavlja zona pročišćavanja, usavršavanja (eng. *refinement zone*). *Software* automatski kreira tri zone, pri čemu najmanja zona sadrži najmanje konačne elemente i obrnuto. Tako dobivamo postupan prijelaz veličine elemenata koji daje preciznije rezultate u blizini samog modela, a udaljavanjem rezultati su manje precizni zbog korištenja većih elemenata.

Prije same simulacije potrebno je odrediti parametre prije pokretanja. Parametri se odnose na brzinu nastrojavanja objekta, vrstu analize, broj koraka te visinu i broj graničnih slojeva. Brzina koja je postavljena u oba dvije simulacije iznosi 40 m/s što je 144 km/h, vrsta analize je stacionarna (eng. *steady*). Simulaciju provodimo u 10 koraka s visinom prvog graničnog sloja od 0,00037 m, uz ukupan broj od 3 graničnih slojeva. Isti parametri se koriste u obje simulacije kako bi se rezultati mogli usporediti.

Popis najvažnijih parametara:

- Tip analize → stacionarni tip
- Ulazna brzina → 40 m/s
- Vrsta obrade simulacije → grubo (eng. *Coarse*)
- Broj koraka iteracija → 10
- Izlazna frekvencija → 2

Kod prve simulacije kocka se nalazi paralelno sa ulazom tunela. Nakon završetka prve simulacije, u VWT postavke sve ostaju iste i model ostaje isti samo se model rotira za 45° (Slika 5.4.).

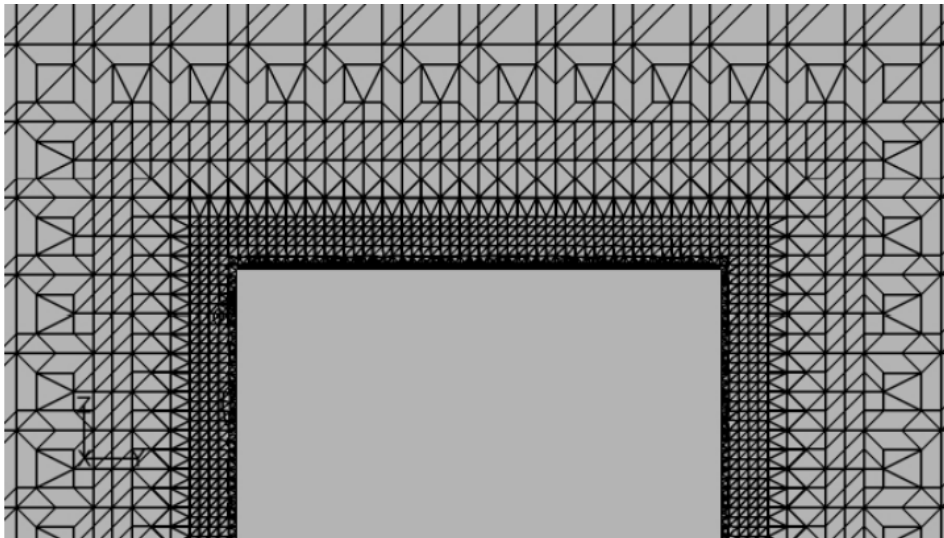


Slika 5.4. Kocka zakrenuta za 45°

#### 5.4. Interpretacija i usporedba rezultata

Analiza podataka dobivenih izvođenjem simulacije opstrujavanja kocke, interpretirana je preko prikaza grafičkih rezultata u programu AcuFieldView i preko podataka dobivenih PDF datotekom VWT programa.

Promatranjem prvog slučaja, u kojem je prednja površina kocke postavljena okomito na nastrujavanje fluida, mogu se prikazati rezultati o kvaliteti mreže samog tunela. Ona je zbog definiranja tri zone kvalitetnija nego bi ona bila korištenjem samo jedne zone. Na Slici 5.5. i Tablici 3 prikazana je mreža samog tunela sa elementima meshing-a.

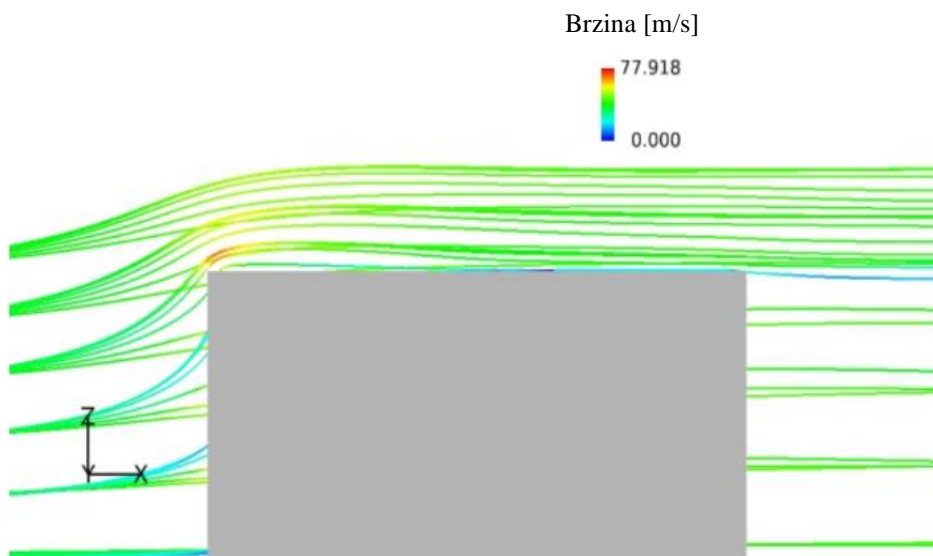


Slika 5.5. Prikaz izgleda mreže tunela za prvi slučaj

Tablica 3. Podatci mreže tunela

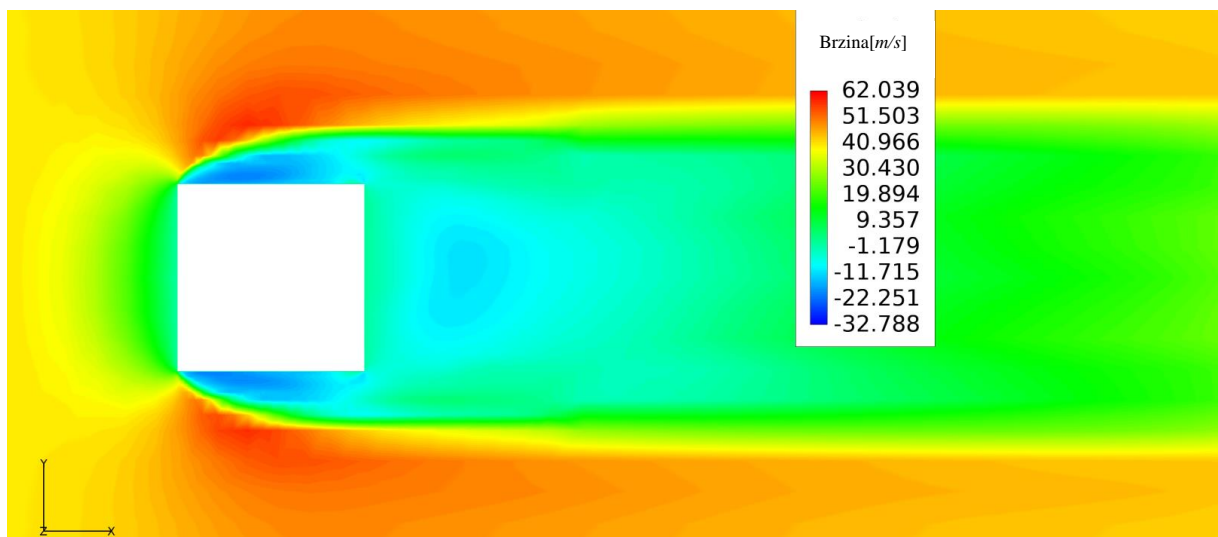
Broj čvorova mreže	457589
Broj elemenata mreže	2509900
Broj zona ugađivanja mreže	3

Grafičkim prikazom silnica strujanja fluida na Slici 5.6. vidi se kako zapravo u stvarnosti nevidljivi fluid(zrak) opstrujava oko gornje polovice kocke. Ovakav izgled uvelike olakšava analizu, ali kako bi se još bolje vizualiziralo gibanje oko tijela koristi se prikaz u AcuFieldView programu i on za polja brzine u poprečnom presjeku izgleda kao na Slici 5.7.



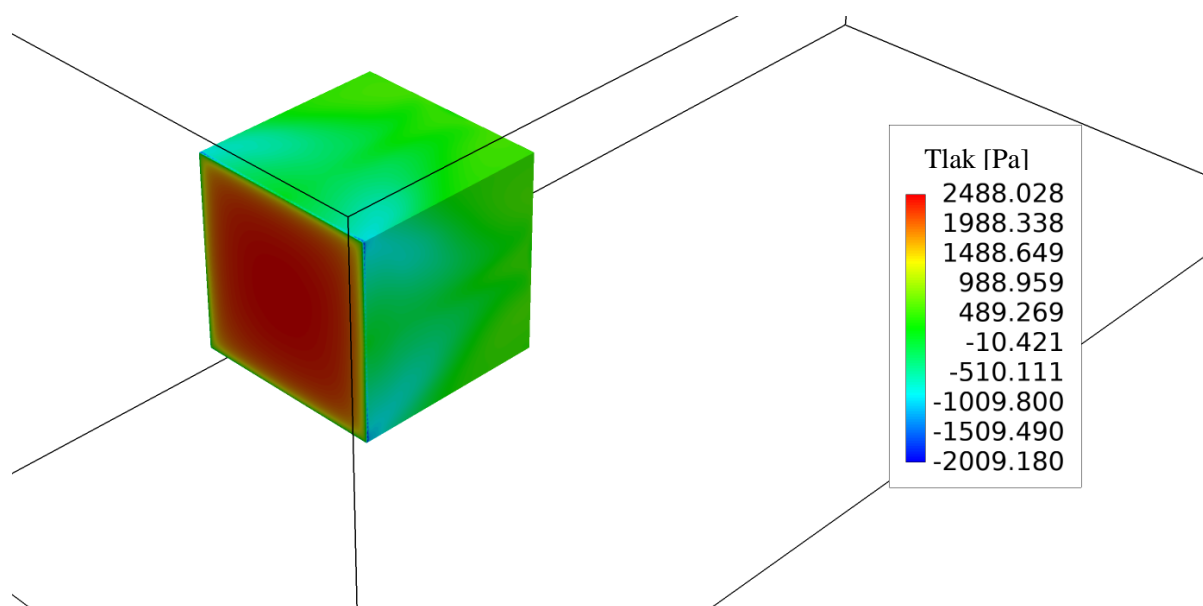
Slika 5.6. Jednostavni prikaz strujnica brzine fluida oko kocke





Slika 5.7. Prikaz brzine i tlakova u X smjeru nastrujavanja fluida na kocku u AFW-u

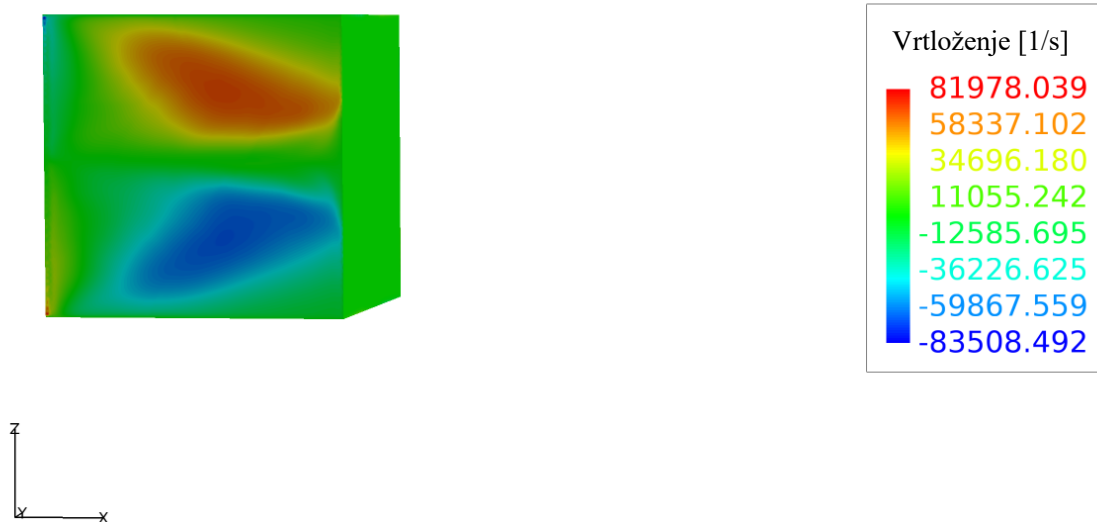
Iz ovakvog prikaza zorno se može zaključiti da brzina u smjeru nastrujavanja po X osi (na prednju površinu kocke) ima mali intenzitet zbog zaustavljanja na prepreci. Prednja površina cjelokupno je zahvaćena strujom fluida na koju on nastrujava i usporava se pri dijeljenju od sredine prema vanjskim bridovima. Središnji dio te površine naziva se stagnacijsko područje u kojem možemo reći kako je brzina nula ili vrlo blizu nule. Baš zbog toga u ovome dijelu nastaje najveći tlak koji zbog samog oblika modela i okomitog nastrujavanja fluida ima izuzetno veliki iznos, pa stoga govorimo o velikom koeficijentu otpora. Područje tlaka može se vidjeti na Slici 5.8.



Slika 5.8. Prikaz rasporeda tlaka na stranama kocke

Ako se promatra koeficijent uzgona tj. sila uzgona, ona je vrlo mala i javlja se neposredno nakon prolaska rubnog brida prednje površine. Na bočnim stranama brzina je na prednjem dijelu (promatrano za poprečni presjek) veća i to na mjestima ponešto udaljenijim od same bočne površine. Pri kraju bočnih dijelova brzina se ponovno smanjuje i vidi se kako tlak varira između pozitivne i negativne vrijednosti. (Slika 5.8.)

Zbog toga se na ovim dijelovima počinju javljati vrtlozi koji gledajući sa lijeve bočne strane imaju negativnu vrtložnost, tj. rotaciju čestica tekućine u smjeru kazaljke na satu. Do ove pojave dolazi zbog velikih gradijenata brzine na koje nailazimo na tom početnom, bočnom dijelu strujnog polja. Granični sloj se odvaja od stijenke na kutu tijela i tvori tanki posmični sloj preko kojeg se brzina rapidno mijenja. Koncentracija vrtložnosti se u sloju smicanja smanjuje zbog smirivanja toka i vrtložnosti prema stražnjem rubu modela kocke. Blizu gornjeg desnog kuta postoji područje pozitivne vrtložnosti, čija je rotacija suprotna od smjera kazaljke na satu. Ovakav sekundarni režim strujanja uzrokovan je odvajanjem toka. Zorni prikaz strujnica vrtloženja sa jačinom vrtloga prikazan je na Slici 5.9.

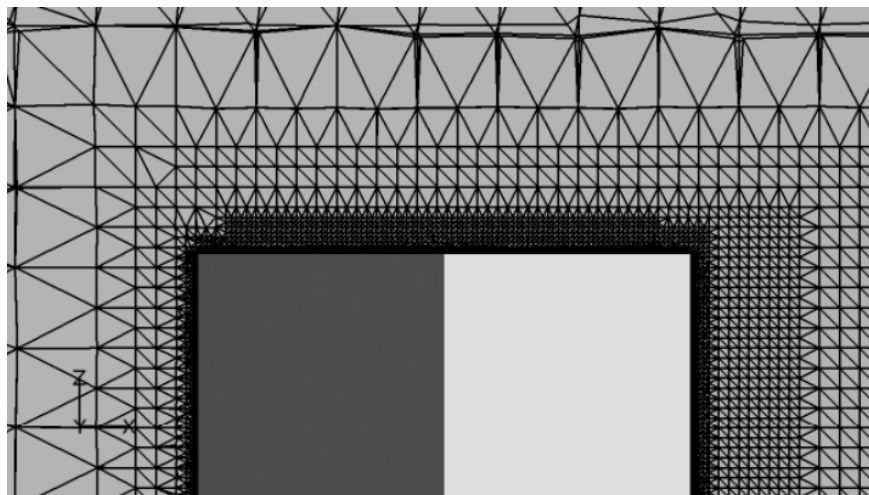


Slika 5.9. Grafički prikaz vrtloženja u AFV programu.

Zaključno se o vrtlozima može reći da separacijom struje fluida od stijenke tijela, u većini slučajeva u praksi nastaje vrtložno područje za koje karakteristično vrijede smanjena brzina strujanja i niži tlak.



Drugi slučaj simulacije napravljen je na kocku zakrenutu na ulaznu struju fluida pod kutem od 45°. Podjela mreže tunela napravljena je u 3 zone kao i u prvom slučaju s time da se veličina elemenata povećava udaljavanjem od samog modela kocke (Slika 5.10.).



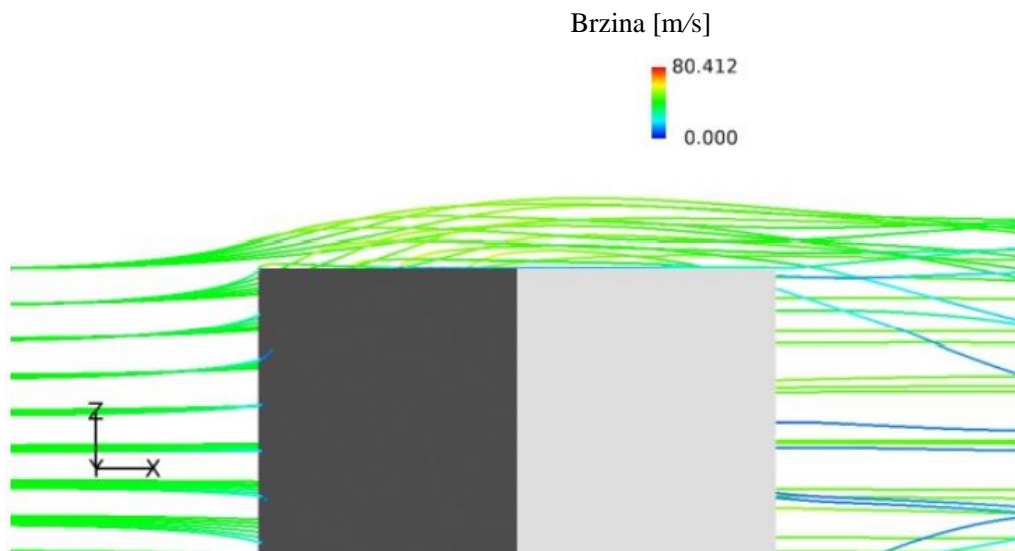
*Slika 5.10. Mreža tunela za kocku postavljenu pod 45° u smjeru nastrojavanja*

Tablica 4. prikazuje podatke o elementima tunela koje je automatski izgenerirao program. Većim brojem elemenata postižu se točniji rezultati, no potrebno je paziti na računalne resurse jer simulacija može postati vrlo zahtjevna.

*Tablica 4. Karakteristike automatski generiranog tunela za kocku zarotiranu pod 45°*

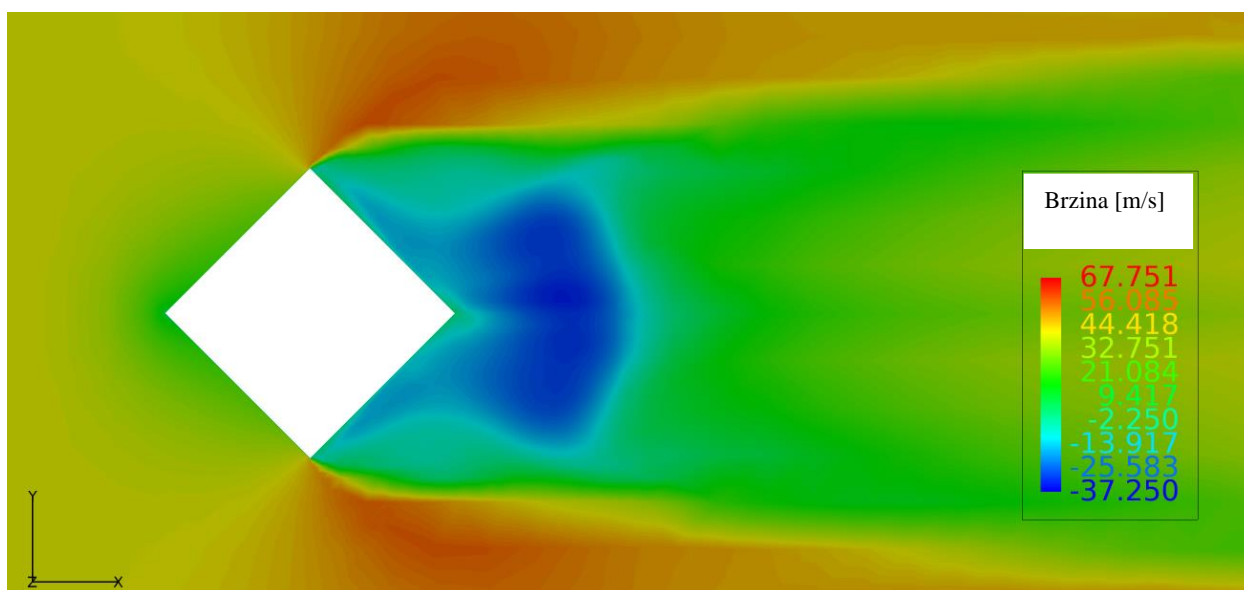
Broj čvorova mreže	714410
Broj elemenata mreže	4080340
Broj zona uglađivanja mreže	3

Slika 5.11. daje grafičku vizualizaciju separacije strujnica pri nastrojavanju na kocku u drugom slučaju. Kako je kocka zakrenuta struja fluida se dijeli na dvije prednje površine. Zato je Prednji brid stagnacijsko područje neovisno o debljini.

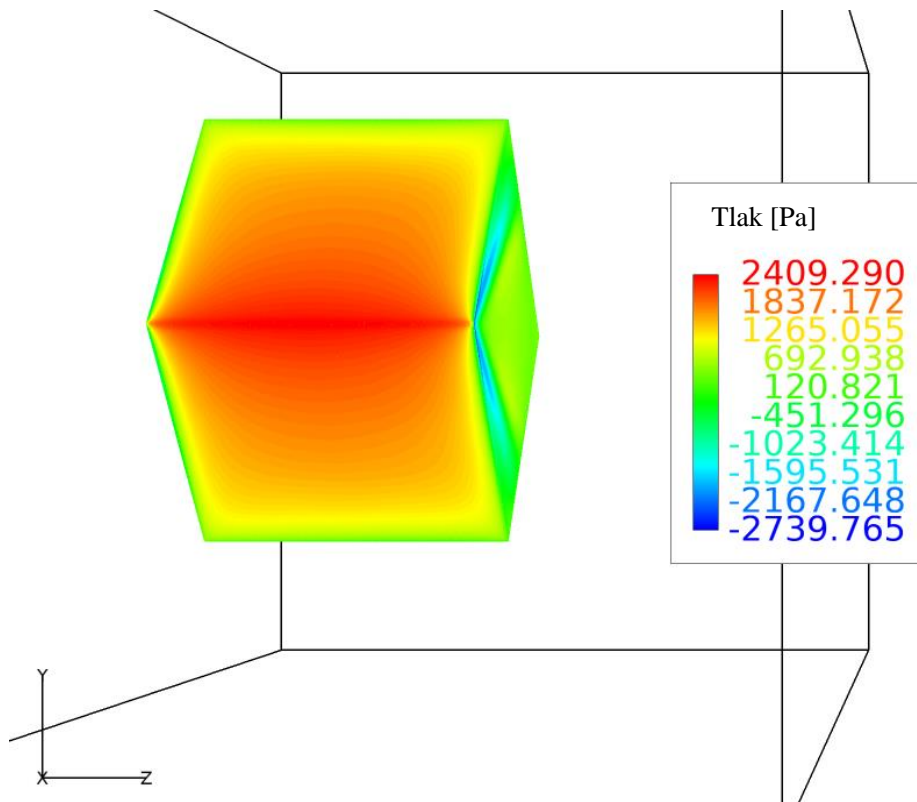


Slika 5.11. Strujnice fluida na kocku pod 45°

Rezultate brzine zatim sagledavamo u programu AFV na Slici 5.12. Može se primijetiti kako se intenzitet brzina po X osi polagano povećava kretanjem fluida od prednjeg razdjelnog brida prema susjednim bridovima. S time se usporedno prati i tlak koji je najveći na prednjem bridu i okolnom prednjem području dok se on sve više smanjuje dolaskom do bočnih bridova (Slika 5.13.). Najveći intenzitet brzine pojavljuje se nakon prolaska fluida preko bokova i bočnih bridova. Ako se govori o koeficijentu otpora, on je najveći na prednjem dijelu zakrenute kocke, ali je manji od onoga u prvom slučaju analize.

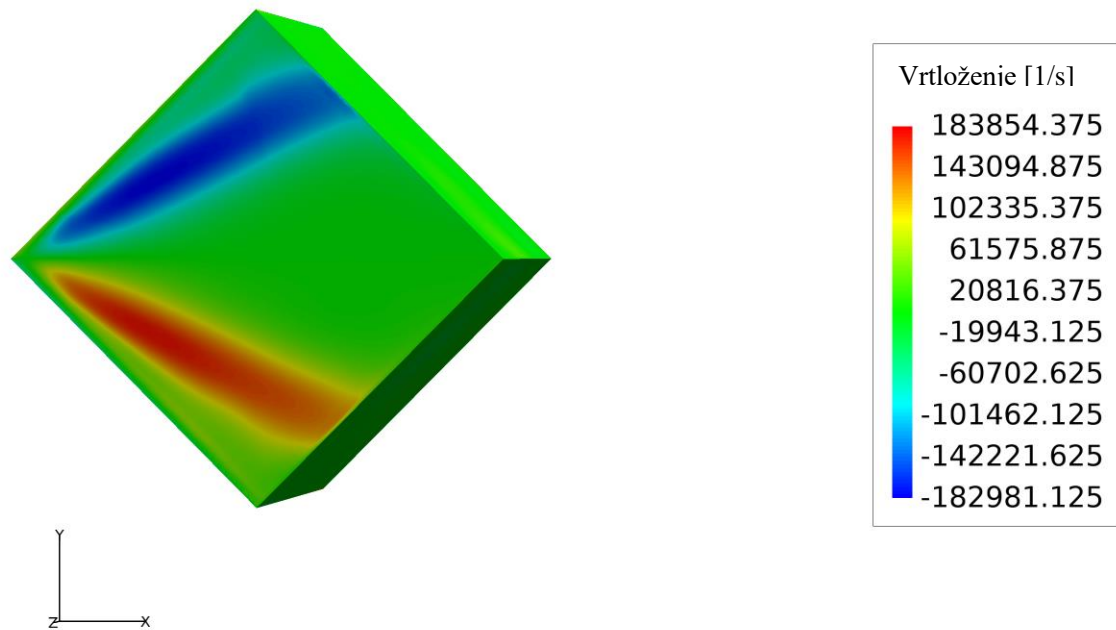


Slika 5.12. Pogled odozgo na kocku pod 45° i prikaz polja brzine



Slika 5.13. Intenzitet tlaka na kocku pod 45°

Na stražnjem dijelu kocke, intenzitet brzine opada prema stražnjem bridu, te dolazi do negativnog tlaka. Kao i u prvom slučaju javljaju se vrtlozi pri prolasku fluida preko bočnih bridova i stranica. Kutni vrtlozi javljaju se pri prolasku struje fluida oko rubnih, bočnih bridova u smjeru nastrojavanja i isto kao i kod prvoga slučaja imaju pozitivnu vrtložnost gdje se udaljavanjem od boka, te približavanjem stražnjem bridu ta vrtložnost mijenja u negativnu. Grafički prikaz strujnica vrtloga vidljiv je na Slici 5.14. Ovaj slučaj generira puno jače vrtloge prolaskom modela kroz fluid zbog drugačije aerodinamike tijela i drugačijih fluktuacija brzina oko njega.



Slika 5.14. Prikaz odozgo vrtloženja fluida oko kocke pod 45°

Usporedbu aerodinamičnosti moguće je prikazati preko različitih podataka pa je stoga u Tablici 5. navedeno par najvažnijih karakterističnih veličina koje zorno prikazuju sličnosti i razlike u simulacijama.

Tablica 5. Usporedba rezultata za dvije simulacije

Model kocke zaokrenut oko Z osi pod određenim kutom	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Prednja površina nastrojavanja fluida [m <sup>2</sup> ]	Maksimalne brzine postignute na simulaciji [m/s]	Maksimalni tlakovi postignuti na simulaciji [N/m <sup>2</sup> ]
0°	1.468	0.030	0.010004	62.039	2488.028
45°	1.362	0.041	0.014147	67.751	2409.290

Iako su razlike u simulacijama relativno male, vidi se da već i pri promjeni kuta od 45 stupnjeva neaerodinamičnom tijelu mijenjaju određena svojstva koja se u praksi mogu smatrati pozitivnim i negativnim.

Pod kutom od 0° kocka nema dobra aerodinamična svojstva te ima mali uzgon. Do ovog zaključka može se doći promatranjem dobivenih rezultata koji govore da kocka pruža veći otpor kada fluid nastrojava direktno na njenu prednju površinu. Iako je ta površina neznatno veća u slučaju nastrojavanja pod kutom od 45° vidi se da je razlika u koeficijentu uzgona u 0.1, baš kao

i za koeficijent otpora. Ovo se možda čini mala vrijednost ali u praksi pri ogromnim konstrukcijama kao što su kuće ili zgrade takav faktor od 0.1 može biti izuzeto važan. Kako je već prije spomenuto u ovome radu, danas se sve više počinje paziti na aerodinamičnost pri konstrukcijama zbog toga jer svaka ne aerodinamičnost uzrokuje razne nepoželjne pojave, poput vrtloga na zavjetrinskom dijelu zgrada ili objekata. Još jedan od pozitivnih aspekata aerodinamičnije konstrukcije je taj da se i sami vrtlozi javljaju na udaljenijim stražnjim dijelovima od samog promatranog tijela.

Ako pak se želi dobiti što aerodinamičnija svojstva protoka fluida na tijelu poput kocke, potrebno je objekt pravilno pozicionirati i/ili ga drugačije oblikovati. Ovakvo što najlakše je shvatiti usporedbom sa zaobljenim profilom avionskog krila, koje je sposobno generirati koeficijent uzgona i preko *dva* pod određenim kutom, dok neaerodinamična kocka generira uzgon od 0.03 ili pod kutom, 0.04.

## 6. ZAKLJUČAK

---

Radom se postigla analiza strujanja fluida oko neaerodinamičnoga tijela. Opisuje se strujanje oko kocke koje je pokrijepljeno sa svim potrebnim podacima za analizu. Analizom iz dviju simulacija postiže se rezultat da kocka pod određenim kutom ima bolja svojstva i manji otpor, manji tlak na površini te to znači da fluid brže struji oko nje.

Zaključno se može reći kako bez CFD simulacija u praksi analiziranje bi bilo izuzetno ograničeno zbog ekstremnih troškova uslijed svake promjene modela. Kako danas tehnologije sve više napreduju omogućeno je kvalitetno i relativno jeftino simuliranje uz prikaz različitih podataka koji bi na fizičkim modelima testiranja bili teško dobavljivi i vizualizirani.

Teoretski opisane jednadžbe i zakoni u prvom dijelu rada kvantitativno i grafički su prikazani u drugom dijelu, pa stoga treba zaključiti kako svako tijelo ima određenu aerodinamiku. Kako je u ovom slučaju većinski promatrana najobičnija kocka, koja bi u pravilu trebala predstavljati neaerodinamičnu građevinu u praksi, vidi se da čak i za nju, pod određenim kutom nastrojavanja, ovisi uzgon i sila otpora. Vrlo je važno provesti ovakve analize da bi se mogle otkloniti opasne situacije i poboljšati aerodinamična svojstva “tupih“ tijela.

Dobiveni rezultati u skladu su sa prethodno očekivanim zbog izuzetno jednostavne geometrije. Za simulacije nekih ozbiljnijih projekata potrebno je osigurati značajno jače računalne resurse. Kocka kao takva, vrlo je neaerodinamična zbog izuzetno velikog otpora na prednjoj površini i velike podjele strujnica nastrojavanog fluida. Tlakovi koji se u praksi javljaju mogu dovesti do ozbiljnih oštećenja zgrada i sličnih objekata zbog brzih promjena smjera i jačine protoka vjetra ili fluida. Uz to moguća je pojava raznih čestica koje dodatno oštećuju i troše građevine uz pojavu vrtloga na stražnjem dijelu objekta.

## 7. LITERATURA

---

- [1] Kranjčević, L.: "Mehanika fluida – Skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci", Rijeka, 2020.
- [2] Çengel, Y. A.; Cimbala J. M.: "Fluid Mechanics – Fundamentals and Applications", McGraw-Hill, New York, 2014.
- [3] Anderson, J. D.: "Fundamentals of Aerodynamics", McGraw-Hill Companies, 1984.
- [4] Kabošova, L.; Foged W. I.; Kmet S.; Katunsky D.: "Hybrid design method for wind-adaptive architecture", ResearchGate- PDF, 2019.
- [5] Houghton, E. L.; Carpenter P. W.: "Aerodynamics for Engineering Students", Butterworth-Heinemann, 2003.
- [6] Augustin, A. I dr.: "Absolute zero", s Interneta, <https://www.britannica.com/science/absolute-zero> , 16.8.2022.
- [7] Nikolić, G.; Korbar, R.: "Automatizacija – predavanja", 2007.
- [8] Wikipedia: "Računalna dinamika fluida", s interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Računalna\\_dinamika\\_fluida](https://hr.wikipedia.org/wiki/Računalna_dinamika_fluida), 17.8.2022.
- [9] Fluid, s interneta, <https://www.britannica.com/science/fluid-physics>, 15.8.2022.
- [10] The Differences Between Laminar vs. Turbulent Flow, s inteneta, <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-the-differences-between-laminar-vs-turbulent-flow>, 12.8.2022.
- [11] CFD and more with Acusolve and HyperWorks, [https://www.slideshare.net/altairhtcus/cfd-and-more-with-acusolve-and-hyperworks?from\\_action=save](https://www.slideshare.net/altairhtcus/cfd-and-more-with-acusolve-and-hyperworks?from_action=save), 15.8.2022.
- [12] Slika stanja tvari, s interneta, <https://www.siyavula.com/read/science/grade-8/particle-model-of-matter/06-particle-model-of-matter?id=toc-id-4>, 17.8.2022.
- [13] Slika faznog dijagrama, s interneta, <https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=fazni+dijagram>, 15.8.2022.
- [14] Slika nastrojavanja fluida, s interneta, <https://m.blog.naver.com/carcam/220422197253>, 10.8.2022.

- [15] Slika s interneta, <https://www.structuralguide.com/lateral-loads/>, 15.8.2022.
- [16] Slika s interneta, <https://www.mechhead.com/urban-simulation-with-ansys-from-lidar-file-to-3d-city-model/>, 16.8.2022.
- [17] Slika s interneta, <https://www.archdaily.com/149556/shanghai%25e2%2580%2599s-pudong-district-on-the-rise>, 12.8.2022.
- [18] Slika s interneta, <https://engg.directory/fr/flux-laminaire-vsflux-turbulent>, 14.8.2022.
- [19] Riteh repozitorij: Dagostin, K. (2019): Opstrujavanje aerodinamičnog profila sportskog motocikla (Završni rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:598949>
- [20] Slika s interneta, [https://community.altair.com/community?id=community\\_question&sys\\_id=04b640ba1b2bd0908017dc61ec4bcb08](https://community.altair.com/community?id=community_question&sys_id=04b640ba1b2bd0908017dc61ec4bcb08), 17.8.2022.
- [21] Autodesk, "Flow around buildings", s interneta, <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/FlowDesign/files/GUID-3B35931F-AB23-45E9-BFCA-2E578D26BF3A-htm.html>, 14.8.2022.
- [22] Žigulić, R., Braut. S., Kinematika, Rijeka, 2012.



## 8. POPIS SLIKA I TABLICA

---

Slika 2.2. Različite mase i približno jednaki volumeni čaše vode i ingota čelika [5].....	4
Slika 2.3. Definicija gustoće u točki [1].....	5
Slika 2.4. Grafički prikaz molekula plina, tekućine i krutog tijela [13].....	7
Slika 2.5. p-T fazni dijagram vode [14].....	8
Slika 2.6. Gibanje čestice po putanji [1].....	9
Slika 2.7. Prikaz pomaka r, brzine v i ubrzanja a u x,y,z koordinatnom sustavu [1].....	10
Slika 2.8. Apsolutna nula u Kelvin-u, Celsius-u i Fahrenheit-u [6].....	11
Slika 2.9. Sila otpora [2].....	12
Slika 2.10. Analiza viskoznosti fluida [1].....	13
Slika 2.11. Newtonski i nenevtonski fluid [1].....	14
Slika 3.1. Opstrujavanje fluida oko neaerodinamičnog i aerodinamičnog tijela [15].....	15
Slika 3.2. Aproksimacija zgrade geometrijskim tijelom [16].....	16
Slika 3.3. Simulacija opstrujavanja kompleksa zgrada [17].....	17
Slika 3.4. Grafički prikaz nastrojavanja fluida na prednju površinu tijela [2].....	17
Slika 3.5. Moderni aerodinamičniji neboderi/zgrade [18].....	19
Slika 3.6. Vrste režima strujanja [19].....	20
Slika 4.1. Generiranje mreže složenog 3D modela.....	23
Slika 4.2. Prikaz sučelja i modela u VWT programu.....	24
Slika 4.3. Mogućnosti prikaza AcuFieldView programa [21].....	25
Slika 5.1 Geometrija kocke za simulaciju.....	26
Slika 5.2. Izrađena mreža kocke u Hypermesh programu.....	27
Slika 5.3. Dimenzioniranje tunela i pozicioniranje modela.....	28
Slika 5.4. Kocka zakrenuta za 45°.....	30
Slika 5.5. Prikaz izgleda mreže tunela za prvi slučaj.....	31
Slika 5.6. Jednostavni prikaz strujnica brzine fluida oko kocke.....	31
Slika 5.7. Prikaz brzine i tlakova u X smjeru nastrojavanja fluida na kocku u AFW-u.....	32
Slika 5.8. Prikaz rasporeda tlaka na stranama kocke.....	32
Slika 5.9. Grafički prikaz vrtloženja u AFV programu.....	33
Slika 5.10. Mreža tunela za kocku postavljenu pod 45° u smjeru nastrojavanja.....	34
Slika 5.11. Strujnice fluida na kocku pod 45°.....	35
Slika 5.12. Pogled odozgo na kocku pod 45° i prikaz polja brzine.....	35
Slika 5.13. Intenzitet tlaka na kocku pod 45°.....	36
Slika 5.14. Prikaz odozgo vrtloženja fluida oko kocke pod 45°.....	37
Tablica 1. Kompresibilnost zraka, ulja i čelika [7].....	3
Tablica 2. Prikaz dimenzija zračnog tunela.....	29
Tablica 3. Podatci mreže tunela.....	31
Tablica 4. Karakteristike automatski generiranog tunela za kocku zarotiranu pod 45°.....	34
Tablica 5. Usporedba rezultata za dvije simulacije.....	37

## 9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

---

Prvim dijelom ovog završnog rada objašnjene su sve teorijske osnove vezane za fizikalne veličine koje se javljaju u daljnjim razmatranjima i u razmatranju aerodinamike općenito. Daljnjim ulaskom u problematiku zadatka definirane su vrste strujanja fluida i osnove aerodinamike zgrada. Za praktični dio završnog rada promatrana je jednostavna geometrija kocke koja sukladno stvarnosti najbolje opisuje model zgrada u simulacijama. Pojašnjenjem računalne dinamike fluida i korištenih programa u samoj izradi simulacija i analiza, došlo se je do brojčanih i grafičkih rezultata generiranih post-procesorom za dva različita slučaja opstrujavanja neaerodinamičnog tijela. Prema dobivenim podacima izveo se kratak zaključak temeljen na ključnim razlikama između dvije simulacije, a na samom kraju izveden je zaključak o cjelokupnom radu i računalnoj dinamici fluida.

**Ključne riječi:** CFD, aerodinamičnost, neaerodinamičnost, analiza, kocka, zgrada, simulacija, Altair, HyperMesh, Virtual Wind Tunnel, fluid, struja fluida, opstujavanje, mreža, sila otpora

## 10. SUMMARY AND KEYWORDS

---

The first part of this final paper explains all the theoretical bases related to fluid mechanics and aerodynamics in general. Moving deeper into the problems of the task, the types of fluid flow and the basics of building aerodynamics are defined. For the practical part of the final work, a simple geometry of a cube was observed, which is the best description of the building model in simulations and in reality. By using computational fluid dynamics methods and related programs for the creation of simulations and analyses, numerical and graphical results generated by the post-processor for two different cases of obstruction of a non-aerodynamic body were obtained. According to the obtained data, a short conclusion was given, which was based on the key differences between the two simulations. Also, at the very end, a conclusion was drawn about the overall CFD and data in this paper.

**Keywords:** CFD, aerodynamics, non-aerodynamics, analysis, cube, building, simulation, Altair, HyperMesh, Virtual Wind Tunnel, fluid, fluid flow, persistence, mesh, drag force