

# Laboratorijska analiza optjecanja objekta

---

**Vunderlih, Eni**

**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:190:863795>

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

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



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**LABORATORIJSKA ANALIZA OPTJECANJA OBJEKTA**

Rijeka, rujan 2023.

Eni Vunderlih

0069088977

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**LABORATORIJSKA ANALIZA OPTJECANJA OBJEKTA**

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, rujan 2023.

Eni Vunderlih

0069088977

Rijeka, 17. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Eni Vunderlih (0069088977)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Laboratorijska analiza optjecanja objekta/Laboratory Analysis of Flow Around Body**

### Opis zadatka:

Opisati problem optjecanja fluida oko jednostavnog zadanog objekta - kvadra s fizikalnog motrišta mehanike fluida. Analizirati turbulentno strujanje zraka oko objekta. Provesti laboratorijski eksperiment optjecanja oko objekta zadanih dimenzija. Opisati laboratorijski postav zračnog tunela, provesti analizu optjecanja koristeći zračni tunel u Laboratoriju za mehaniku fluida Tehničkog fakulteta.

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, Eni Vunderlih, u skladu s člankom 11. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku prijediplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam ovaj završni rad naslova „Laboratorijska analiza optjecanja objekta“ izradila samostalno uz primjenu stečenog znanja tijekom studiranja, uz navedenu literaturu te uz vodstvo mentora.

Rijeka, rujan 2023.

---

Eni Vunderlih

## ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Ladu Kranjčeviću i asist. Andru Raku na velikoj pomoći tijekom pisanja završnog rada. Uz pomoć njihovih smjernica i stručnog znanja bolje sam savladala provođenje analize i pojmove koji su uz to vezani.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, ponajviše mami i bratu, koja mi je tijekom cijelog mog studiranja bila veliki oslonac u svim usponima i padovima. Bez njihove motivacije i podrške ovo ne bi bilo moguće.

Zahvaljujem se i svojim kolegama: Nadi Hrvatin, Sari Kauzlarić i Josipu Tomiću koji su mi olakšali završavanje ovog studija zajedničkim učenjem i druženjem, te sam pritom stekla dugoročna prijateljstva.

# SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	AERODINAMIKA.....	3
2.1	Uzgon.....	4
2.2	Težina.....	5
2.3	Potisak .....	5
2.4	Otpor.....	5
2.5	Čimbenici koji utječu na aerodinamičnost .....	6
2.6	Računanje finesa – računanje uzgona i otpora .....	6
3	TEORIJA SLIČNOSTI.....	8
3.1	Geometrijska sličnost .....	8
3.2	Kinematička sličnost.....	9
3.3	Dinamička sličnost .....	10
3.4	Dimenzionalna analiza .....	12
3.4.1	Rayleighova metoda.....	12
3.4.2	Buckinghamski $\pi$ teorem.....	13
4	ZRAČNI TUNEL.....	15
4.1	Tipovi i osnovni dijelovi zračnih tunela .....	16
4.1.1	Zatvoreni zračni tunel.....	17
4.1.2	Otvoreni zračni tunel.....	19
4.2	Senzorika u zračnim tunelima .....	20
4.2.1	Pitotova cijev.....	20
4.2.2	Anemometar s ugrijanom žicom .....	22
4.2.3	Skener tlaka .....	25
4.2.4	Transmitter tlaka.....	26
4.2.5	Senzori sila .....	26
4.3	Načini prikupljanja podataka sa senzoričke .....	27
4.4	Primjena zračnih tunela .....	28
5	OPSTRUJAVANJE ZRAKA OKO KVADRA U ZRAČNOM TUNELU.....	29
5.1	Turbulentna zona, granični sloj i stagnacijska točka .....	29
5.2	Utjecaj zida na strujanje zraka u zračnom tunelu .....	30
6	EKSPERIMENTALNA ANALIZA I KALIBRACIJA SENZORIČKE.....	33
6.1	Prvi rezultati – očitavanja Average Pitota i Hot Wire – a te njihovo osciliranje u vremenu 33	
6.2	Usporedba rezultata Average Pitota i Hot Wire – a između PLC – a i direktno preko transmitera .....	35

6.3	Funkcija odstupanja rezultata dobivenih PLC – om i direktno preko transmitera od Hot – wirea i Pitota.....	38
6.4	Utjecaj zida na uniformnost strujanja za Hot – wire .....	39
6.5	Mjerenja opstrujavanja zraka u području iza kvadra.....	42
7	ZAKLJUČAK.....	45
	LITERATURA .....	47
	POPIS SLIKA .....	49
	SAŽETAK.....	50
	SUMMARY .....	51



# 1 UVOD

U ovom radu opisat će se optjecanje fluida u zatvorenom zračnom tunelu, koji se nalazi u Laboratoriju za mehaniku fluida Tehničkog fakulteta u Rijeci, oko kvadra uz primjenu znanja iz mehanike fluida. Potrebno je provesti mjerenja čiji će rezultati opisati kakvo je strujanje zraka oko objekta zadanih dimenzija. Analizu strujanja zraka omogućiti će uređaji Average Pitot, Pitot i Hot Wire pomoću kojih će se prikupljati vrijednosti pomoću kojih će se doći do zaključaka kakav je protok zraka unutar zračnog tunela. Ponajviše će se promatrati turbulentno područje iza kvadra te utjecaj zida na uniformnost strujanja prilikom prikupljanja podataka pomoću Hot Wire – a. Prikupljene vrijednosti će se razlikovati s obzirom na način njihovog prikupljanja, pomoću PLC – a ili direktno preko transmitera, te će se provest mjerenja kojima će se utvrditi kolika su odstupanja tih podataka kako bi se dobili što ispravniji rezultati. Zbog postojećih odstupanja provedena je i kalibracija korištene sensorike. Također, provesti će se ispitivanja koja će omogućiti podatke kojima će se analizirati utjecaj kalibracije sensorike na rezultate mjerenja.

Fluid se može definirati kao materija koja ne može održavati tangencijalnu ili smičnu silu kada je u mirovanju i koja prolazi kroz neprekidnu promjenu oblika kada je podvrgnuta takvom opterećenju. Fluidi se dijele na kapljevine (voda, ulje, itd.) i plinove. Fizikalna svojstva fluida koja su od posebne važnosti su: gustoća, površinska napetost te viskoznost. Gustoća fluida ovisi o broju molekula koje zauzimaju jedinicu volumena te o pojedinačnoj masi tih molekula. Kod tekućina, gustoća ovisi o vrsti tekućine i o njezinoj temperaturi, u mnogo manjoj mjeri, dok kod plinova ovisi gotovo izravno o apsolutnom tlaku. Pojava koja opisuje ponašanje površine kapljevine kao neke vrste elastične membrane naziva se površinska napetost. Uzrokuju je neuravnotežene kohezivne sile koje djeluju između molekula fluida na površini. Viskoznost se definira kao svojstvo otpornosti fluida prema smičnoj deformaciji, također se definira i kao mjera unutarnjeg trenja u fluidu. Viskoznost se očituje tek pri gibanju fluida. [3] [4]

Fluidi se klasificiraju na slijedeće vrste: idealni, stvarni, Newtonov, nenevtonov i idealni plastični fluid. Fluid koji je nekomprimirajući i nema viskoznost pripada u kategoriju idealnog fluida te on u stvarnosti ne postoji. Fluid koji posjeduje barem neku viskoznost naziva se stvarnim fluidom. Svi fluidi koji postoje ili su prisutni u okolini nazivaju se stvarnim fluidima. Ako stvarni fluid slijedi Newtonov zakon viskoznosti, tj. smični napon je izravno proporcionalan smičnom deformiranju ili gradijentu brzine, tada se naziva Newtonovim fluidom. Ako stvarni fluid ne slijedi Newtonov zakon viskoznosti, tj. ako smični napon nije proporcionalan smičnom deformiranju ili gradijentu brzine, tada se naziva nenevtonovim fluidom. Fluid čija vrijednost smičnog napona

prelazi vrijednost granice tečenja, a smični napon je proporcionalan stopi smičnog deformiranja, odnosno gradijentu brzine, naziva se idealnim plastičnim fluidom.

Mehanika fluida je poddisciplina mehanike kontinuuma. Mehanika kontinuuma bavi se proučavanjem fizike kontinuiranih materijala, dok se mehanika fluida bavi proučavanjem fizike kontinuiranih materijala koji se deformiraju pod djelovanjem sile. Proučavaju se odnosi između sila, gibanja i statičkih uvjeta u kontinuiranom materijalu te se proučavaju mnogi raznoliki problemi kao što su površinska napetost, statika tekućine, strujanje u zatvorenim tijelima ili strujanje oko tijela (čvrstih ili drugih), stabilnost protoka, itd. Zapravo, gotovo svaka radnja koju osoba radi uključuje neku vrstu problema mehanike fluida. Mehanika fluida koristi se u različitim područjima i primjenama, neka od njih su: građevinarstvo, strojarstvo, kemijskog inženjerstvo, zrakoplovstvo, automobilska industrija, brodograđevinska industrija, energetika, hidrologija, meteorologija, oceanografija te biološke i medicinske primjene.

Statika fluida proučava fluid u stanju ravnoteže, tj. kada se fluid ne kreće. Uključuje proučavanje hidrostatskog tlaka, potiska, principa plovnosti (Arhimedov zakon) i ravnoteže plutajućih tijela. Dinamika fluida bavi se proučavanjem ponašanja fluida u gibanju. To uključuje analizu protoka fluida, sila koje djeluju na fluid u gibanju (uključujući pritisak, trenje, gravitaciju), te kinetičke i dinamičke karakteristike fluidnog toka.

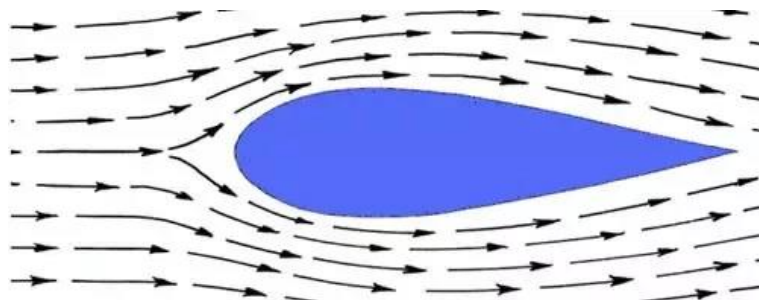
## 2 AERODINAMIKA

Aerodinamika je jedna od grane mehanike fluida koja proučava ponašanje fluida, posebno zraka, u kontekstu kretanja objekta kroz zrak. Fokusirana je na analizu i pretpostavljanje aerodinamičkih sila i drugih karakteristika koje utječu na gibanje objekta u zraku. Njezin glavni cilj je razumjeti i optimizirati ponašanje objekata u zraku kako bi se omogućila veća učinkovitost, stabilnost, performanse i sigurnost te je zbog toga temeljni aspekt transporta i inženjerstva.

Aerodinamika se bavi proučavanjem različitih koncepata i fenomena, kao što su strujanje fluida oko objekta (strujnice), profil krila, aerodinamički otpor, uzgon, turbulencija, granični sloj, interakcija objekta i zraka te mnogih drugih. Koriste se eksperimentalna mjerenja u zračnim tunelima, računalna dinamika fluida (RDF) i teorijski modeli kako bi se proučavalo i analiziralo ponašanje fluida u aerodinamičkom kontekstu. RDF je znanost koja primjenom računala dobavlja kvantitativne pretpostavke pojava protoka fluida, ove pretpostavke temelje se na zakonima očuvanja koji su ključni za gibanje fluida.

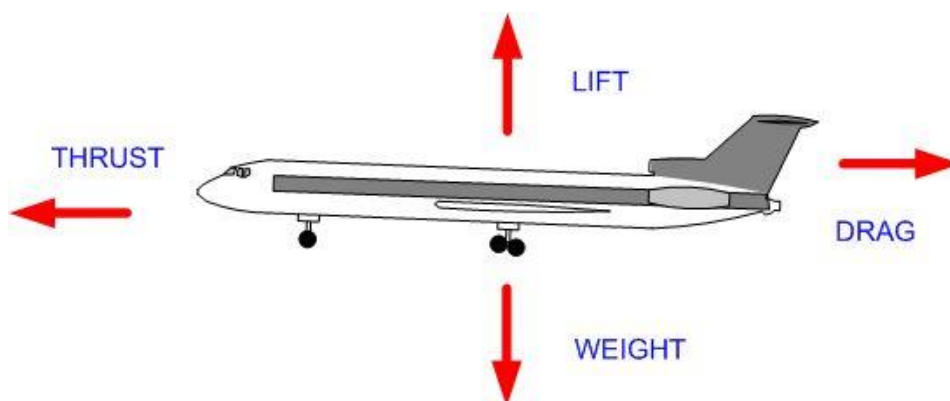
Ima rasprostranjenu primjenu u industriji zrakoplovstva, svemirskoj tehnologiji, automobilskoj industriji, sportskoj tehnologiji, razvoju vjetroturbina i u mnogim drugim područjima gdje je od velike važnosti razumijevanje i optimizacija gibanja objekata u zraku s ciljem postizanja željenih performansi i učinkovitosti. U primjeni aerodinamike obuhvaćaju se razni objekti, kao što su zrakoplovi, helikopteri, rakete, automobili, brodovi, sportska oprema poput bicikala i skijaških odijela, pa čak i sportske lopte. Za primjer se može uzeti zrakoplov, kod kojeg aerodinamika ima ključnu ulogu u stvaranju uzgona koji djeluje protiv sile gravitacije, smanjenju otpora kako bi se maksimizirala učinkovitost goriva te u održavanju kontrole i stabilnosti tijekom leta. Dizajn i oblik krila, trupa i drugih komponenti zrakoplova pažljivo su oblikovani u skladu sa zakonima aerodinamike kako bi se optimizirala aerodinamička izvedba. Slično tome, u slučaju automobila, aerodinamika ima utjecaj na čimbenike poput učinkovitosti goriva, upravljivosti i stabilnosti pri visokim brzinama. Proizvođači automobila često koriste aerodinamične značajke poput spojlera, difuzora, raznih krilaca za preusmjerenje zraka, kompleksnih izrada podnica i slično, kako bi smanjili otpor i poboljšali performanse.

Za brzine niže od brzine zvuka, najaerodinamičniji oblik je oblik suze (slika 2.1). Oblik suze ima zaobljeni nos koji se sužava dok se kreće unatrag, formirajući uski, ali zaobljeni rep koji postupno ponovno spaja zrak oko objekta umjesto stvaranja strujnih vrtloga. Pri visokim brzinama, poput brzine kojom putuje mlazni zrakoplov ili metak, druge su forme bolje. Za turbulentni protok, najmanji otpor se ostvaruje kada kraj ima tupi oblik.



Slika 2.1 Najaerodinamičniji oblik – oblik suze [6]

Postoje četiri sile koje djeluju na objekt koji se giba kroz zrak (slika 2.2). To su uzgon (*engl. lift*), težina (*engl. weight*), potisak (*engl. thrust*) i otpor (*engl. drag*). Ove sile uzrokuju kretanje objekta prema gore i dolje, te brže ili sporije. Količina svake sile u usporedbi s protivnom silom određuje način kretanja objekta kroz zrak.



Slika 2.2 Četiri sile letenja [9]

## 2.1 Uzgon

Uzgon je sila koja omogućuje objektu da se kreće prema gore te je suprotna težini. Uzgon je usmjeren okomito na smjer leta. Magnituda uzgona, na primjer u slučaju zrakoplova, ovisi o nekoliko čimbenika, a oni su slijedeći: oblik, veličina i brzina zrakoplova. Uzgon zrakoplova djeluje kroz jednu točku nazvanu centar pritiska. Centar pritiska definiran je na isti način kao i centar gravitacije, ali umjesto raspodjele težine koristi raspodjelu tlaka oko tijela. Većina uzgona zrakoplova generira se krilima. Da bi se zrakoplov kretao prema gore, uzgon mu mora biti veći od težine. Raspodjela uzgona oko zrakoplova važna je za rješavanje problema kontrole.

Aerodinamičke površine koriste se za upravljanje zrakoplovom u zakretanju, naginjanju i okretanju.

## **2.2 Težina**

Težina je rezultat gravitacije, sile koja objekte usmjerava prema centru Zemlje, pomnožene s ukupnom masom objekta. Kako bi zrakoplov mogao letjeti, on mora prevladati težinu. Magnituda težine ovisi o masi svih dijelova zrakoplova, dodatnom teretu poput goriva, putnika i prtljage. Iako je težina raspoređena po cijelom zrakoplovu, korisno ju je zamišljati kao sakupljena sila koja djeluje kroz jednu točku nazvana centar gravitacije. Tijekom leta, zrakoplov se okreće oko centra gravitacije. Letenje obuhvaća dva osnovna problema: prevladavanje težine objekta nekom suprotnom silom te upravljanje objektom u letu. Oba ova problema su povezana s težinom objekta i položajem centra gravitacije. Tijekom leta, težina zrakoplova se stalno mijenja jer zrakoplov troši gorivo. Također se mijenja raspodjela težine, a s time i položaj centra gravitacije. Stoga pilot mora stalno prilagođavati upravljačke elemente kako bi zrakoplov održavao ravnotežu.

## **2.3 Potisak**

Potisak je sila koja gura objekt prema naprijed te je suprotna sili otpora. Da bi se zrakoplov kretao prema naprijed, mora imati više potiska od otpora. Zrakoplovi koriste pogonski sustav za generiranje ove sile. Smjer sile potiska ovisi o tome kako su motori pričvršćeni na zrakoplov. Na nekim zrakoplovima smjer potiska se može mijenjati kako bi zrakoplov lakše poletio na vrlo kratkoj udaljenosti. Veličina potiska ovisi o mnogim čimbenicima koji su povezani sa pogonskim sustavom, kao što su vrsta motora, broj motora i postavka plina. Mali zrakoplovi mogu dobiti potisak od propelera, dok veliki zrakoplovi dobivaju potisak od mlaznih motora. Kod mlaznih motora, potisak zrakoplova je reakcija na brzi izlazak vrućeg plina iz mlaznice. Vrući plin izlazi prema natrag, ali potisak gura zrakoplov prema naprijed. Ova akcija – reakcija je objašnjena Newtonovim trećim zakonom.

## **2.4 Otpor**

Otpor je sila koja povlači natrag objekt koji se pokušava kretati. Otpor je usmjeren duž smjera leta i suprotan mu je. Oblik objekta utječe na količinu otpora. Na primjer, okrugle površine u pravilu imaju manji otpor od ravnih. Također, uske površine obično imaju manji otpor od širokih. Što više zraka udara u površinu, proizvodi se više otpora. Kao i kod uzgona, postoji mnogo čimbenika koji utječu na veličinu sile otpora, uključujući oblik zrakoplova, viskoznost zraka i brzinu zrakoplova.

Kao i kod uzgona, sabiremo sve pojedinačne komponente otpora i kombiniramo ih u jednu ukupnu silu otpora zrakoplova. I kao i kod uzgona, otpor djeluje kroz centar pritiska zrakoplova.

## 2.5 Čimbenici koji utječu na aerodinamičnost

Postoji mnogo čimbenika koji utječu na aerodinamičke sile koje djeluju na objekt. Te čimbenike možemo grupirati u one povezane s objektom, one povezane s kretanjem objekta kroz zrak i one povezane sa samim zrakom.

Geometrija objekta ima veliki utjecaj na aerodinamičke sile koje on stvara. O veličini objekta koji se kreće kroz zrak linearno ovise uzgon i otpor. Oblik poprečnog presjeka objekta određuje otpor stvoren varijacijom tlaka oko objekta. Ako otpor zamislimo kao aerodinamičko trenje, količina otpora ovisi o hrapavosti površine objekta; glatka, voštana površina proizvodi manje otpora od hrapave površine. Trenje površine objekta obično je uključen u izmjereni koeficijent otpora objekta.

Uzgon i otpor povezani su s kretanjem objekta kroz zrak, što znači da ovise o brzini zraka. Uzgon i otpor zapravo variraju s kvadratom relativne brzine između objekta i zraka. Nagib objekta prema toku također utječe na količinu uzgona i otpora koje generira predmet određenog oblika. Ako se objekt kreće kroz zrak brzinom blizu brzine zvuka, na objektu se formiraju udarni valovi koji stvaraju dodatnu komponentu otpora koja se naziva val otpora. Gibanje objekta kroz zrak također uzrokuje granične slojeve. To je područje vrlo niske brzine protoka u blizini površine koje doprinosi trenju površine objekta.

Uzgon i otpor izravno ovise o masi protoka koji prolazi pored rakete. Otpor također na složen način ovisi o dva druga svojstva zraka: njegovoj viskoznosti i njegovoj stlačivosti. Ovi čimbenici utječu na otpor valova i trenje površine objekta koji su gore opisani.

Sve ove informacije o faktorima koji utječu na uzgon i otpor možemo skupiti u dvije matematičke jednadžbe koje se nazivaju jednadžba uzgona i jednadžba otpora. Pomoću ovih jednadžbi možemo predvidjeti koliku aerodinamičku silu stvara određeno tijelo koje se kreće određenom brzinom kroz određenu tekućinu.

## 2.6 Računanje finesa – računanje uzgona i otpora

Otpor  $D$  se računa pomoću koeficijenta otpora  $C_D$  čija formula glasi (2.1):

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2} \quad (2.1)$$

Uzgon  $L$  računa se pomoću koeficijenta uzgona  $C_L$  čija formula glasi (2.2):

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2} \quad (2.2)$$

Gdje je:

$D$  – otpor objekta

$L$  – uzgon objekta

$\rho$  – gustoća fluida

$A$  – referentna površina (površina tijela koja je izložena strujanju fluida)

$v$  – brzina fluida

U kontroliranom okruženju, kao što je zračni tunel, inženjeri postave brzinu i gustoću fluida i referentnu površinu objekta te izmjere nastali otpor i uzgon na njemu. Dijeljenjem izmjerene otpora sa postavljenim podacima dobije se bezdimenzijska vrijednost koeficijenta otpora i uzgona. Izbor referentne površine utječe na vrijednost koeficijenta pa je bitno navesti njezinu vrijednost. Pomoću gore navedenih jednadžbi može se predvidjeti otpor i uzgon koji će nastati pri različitim uvjetima brzine, gustoće i površine. Koeficijenti otpora i uzgona ovise i o učincima viskoznosti zraka i njegovoj kompresibilnosti. Ovi učinci moraju biti isti u izmjerenom i predviđenom slučaju kako bi koeficijenti otpora i uzgona bili ispravni. Učinci kompresibilnosti su pri malim brzinama (< 200 mph) zanemarivi, ali pri većim brzinama se trebaju uskladiti Machovi brojevi, omjer brzine zraka i brzine zvuka, između dva slučaja. Udarni valovi su prisutni u polju strujanja pri nadzvučnim brzinama pa je potrebno pri računanju koeficijenta otpora i uzgona uračunati otpor vala. Još je važnije uskladiti učinke viskoznosti zraka. Važan parametar pri određivanju viskoznosti je Reynoldsov broj, omjer inercijskih sila i viskoznih sila. Ako su Reynoldsovi brojevi eksperimenta i stvarnog problema sličnih vrijednosti, onda su pravilno modelirani učinci viskoznih sila u odnosu na inercijske. Ako se njihove vrijednosti značajno razlikuju, fizika stvarnog problema nije ispravno modelirana te će se predvidjeti netočan otpor. Veća vrijednost koeficijenta uzgona ukazuje na veću postignutu vrijednost sile uzgona. Niža vrijednost koeficijenta otpora ukazuje na manji otpor objekta te na bolju aerodinamičnost.

### 3 TEORIJA SLIČNOSTI

Teorija sličnosti se koristi kako bi se na osnovi ispitivanja umanjenog modela odredile karakteristike potrebne za konstruiranje i gradnju hidroturbina, kompresora, ventilatora, pumpi, plovni objekata, letjelica, automobila, brana i ostalih objekata. Ova teorija omogućuje da se rezultati dobiveni ispitivanjem modela prenesu na izvedbu stroja te se time predviđaju njegove karakteristike. Teorijom sličnosti se također mogu, ispitujući stroj pri jednom broju okretaja, odrediti karakteristike tog istog stroja pri drugom broju okretaja. Radne karakteristike strojeva moguće je točno odrediti samo eksperimentalnim ispitivanjima na modelima, oni predstavljaju umanjenu i vjerodostojnu kopiju objekta u realnoj izvedbi, odnosno kopiju prototipa. Prototip je objekt, odnosno stroj stvarne veličine te bi izvedeni stroj u idealnom slučaju trebao njemu odgovarati.

Ispitivanja je u većini slučajeva nemoguće provesti na objektima u stvarnim veličinama, a ako i je to moguće ona su izrazito skupa, pa se iz tog razloga eksperimentalna ispitivanja izvode na modelima tih objekata. Postoje razne prednosti izvođenja ispitivanja na modelu, a neke od njih su slijedeće: izrada modela je lakša, brža te jeftinija, lakše i potpunije se izvode eksperimenti, kao i promjene na modelu koje su relativno brze i ekonomične u cilju postizanja najpogodnijih karakteristika, i to u toku samog eksperimenta. U nekim slučajevima je skoro nemoguće realizirati potpunu sličnost između strujanja na modelu i stvarnom objektu.

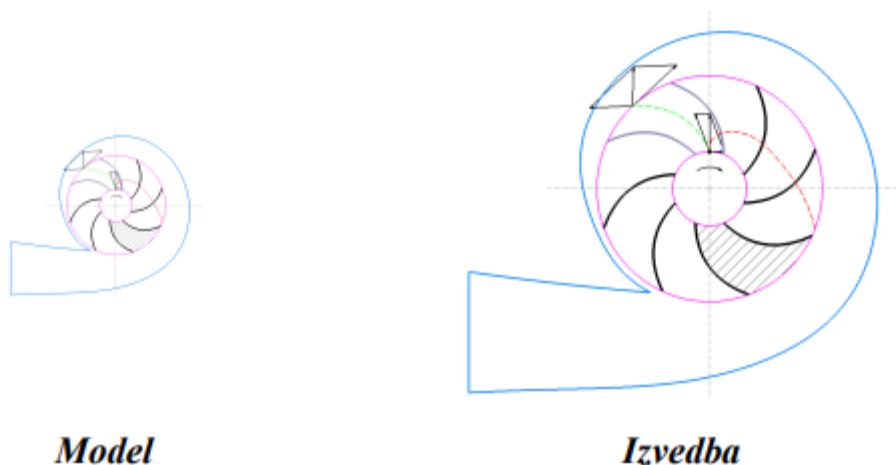
U mehanici fluida sličnost se odnosi na uvjete u kojima su dva strujanja slična. Kako bi mogli koristiti rezultate koje dobijemo ispitivanjima na modelima moraju se poznavati zakoni koji se povezuju veličinama dobivenim na modelima sa odgovarajućim veličinama koje se odnose na realne izvedbe. Ove zakone nazivamo zakonima sličnosti te oni povezuju geometrijske, kinematičke i dinamičke karakteristike strujanja okolo ili u modelu te strujanja oko objekta u stvarnoj veličini. Za dva strujanja se kaže da su slična ako je njihova geometrijska, kinematička i dinamička sličnost zadovoljena te tada postoji sličnost koja se naziva potpuna. U tom slučaju svaka se karakteristika jednog strujanja može postići množenjem odgovarajuće karakteristike drugog strujanja. U nastavku će se detaljnije opisati geometrijska, kinematička i dinamička sličnost na primjeru turbostrojeva.

#### 3.1 Geometrijska sličnost

Općenito, kada se za dva turbostroja kaže da su geometrijski slična (slika 3.1) onda postoji koeficijent geometrijske sličnosti  $\lambda_d$  takav da se bilo koja dimenzija izvedenog stroja može dobiti umnoškom ovog koeficijenta i pripadajuće dimenzije na modelu (3.1).



$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)_i = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)_m = \lambda_d \quad (3.1)$$



Slika 3.1 Geometrijska sličnost modela i izvedbe [2]

Geometrijska sličnost u mehanici fluida predstavlja sličnost dva prostora u kojima se odvijaju strujanja fluida. Ona je ostvarena ako je omjer svih odgovarajućih geometrijskih dužina konstantan (3.2). Indeksom 1 se označavaju veličine koje pripadaju prvom strujanju, a s indeksom 2 veličine koje se odnose na drugo strujanje, koeficijent za dužine označava se sa  $k_l$ .

$$\frac{l_1}{l_2} = k_l = const \quad (3.2)$$

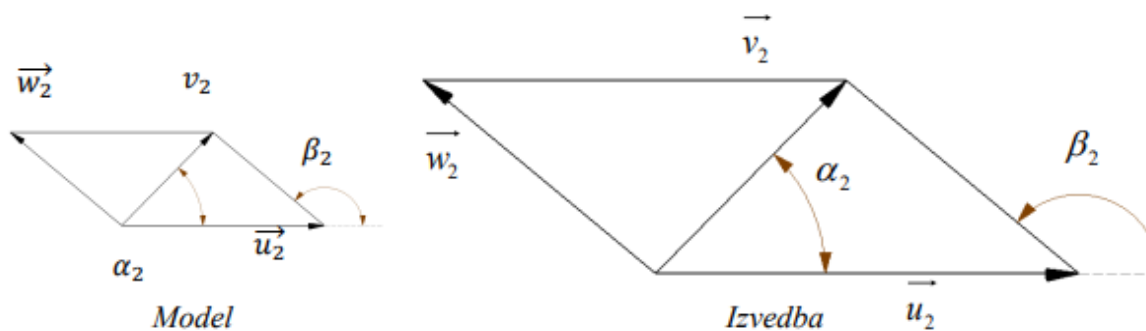
Na osnovu gore navedenog omjera vrijede i slijedeći omjeri, u kojima  $A$  i  $V$  predstavljaju odgovarajuće površine i volumene prostora kojima struji fluid (3.3):

$$\frac{A_1}{A_2} = k_l^2 \quad \frac{V_1}{V_2} = k_l^3 \quad (3.3)$$

### 3.2 Kinematička sličnost

Kinematička sličnost je kod turbostrojeva (slika 3.2) zadovoljena ako je omjer apsolutne brzine  $v$  i obodne brzine  $u$  jednak na modelu i izvedbi te je on konstantan i određen je koeficijentom sličnosti brzina  $\lambda_v$  (3.4).

$$\left(\frac{v}{u}\right)_i = \left(\frac{v}{u}\right)_m = \lambda_v \quad (3.4)$$



Slika 3.2 Kinematička sličnost modela i izvedbe [2]

Pri strujanju fluida zahtjeva se sličnost kretanja fluida te ona predstavlja kinematičku sličnost. Odnosi brzina  $v$  i ubrzanja  $a$  u odgovarajućim točkama prostora strujanja moraju biti konstantni te su definirani koeficijentima za brzinu i ubrzanje (3.5). Također, kutovi koji određuju pravce vektora brzine i ubrzanja u odgovarajućim točkama oba strujanja moraju biti međusobno jednaki.

$$\frac{v_1}{v_2} = k_v = const \quad \frac{a_1}{a_2} = k_a = const \quad (3.5)$$

### 3.3 Dinamička sličnost

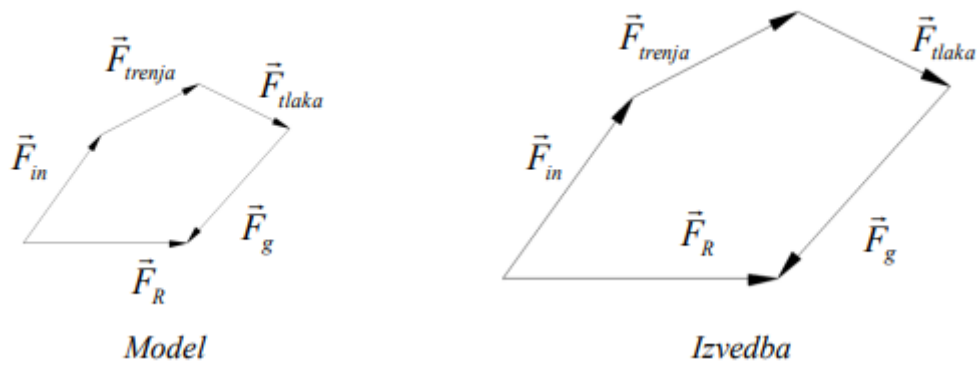
Ako su rezultirajuće sile koje djeluju na sustav (inercijske sile, sile trenja, sile tlaka, težina, itd.) kolinearne i jednakog omjera u svim točkama, onda postoji dinamička sličnost (slika 3.3). Ona je zadovoljena ako su omjeri inercijske sile i bilo koje druge sile na modelu i izvedbi jednaki te su ti omjeri određeni pripadajućim koeficijentima određenih sila (3.6). Vrijednosti u ovim izrazima predstavljaju tlak  $p$ , brzinu  $u$  te promjer  $d$ .

$$\left(\frac{F_{in}}{F_g}\right)_i = \left(\frac{F_{in}}{F_g}\right)_m = \lambda_{F_g} \quad \left(\frac{F_{in}}{F_{tr}}\right)_i = \left(\frac{F_{in}}{F_{tr}}\right)_m = \lambda_{F_{tr}} \quad \left(\frac{F_{in}}{F_p}\right)_i = \left(\frac{F_{in}}{F_p}\right)_m = \lambda_{F_p} \quad (3.6)$$

$$\frac{F_{in}}{F_g} = Fr^2 = \frac{u^2}{g \cdot d} \quad Fr - \text{Frudov broj}$$

$$\frac{F_{in}}{F_{tr}} = Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad Re - \text{Reynoldsov broj}$$

$$\frac{F_{in}}{F_p} = Eu = \frac{\rho \cdot u^2}{p} \quad Eu - \text{Eulerov broj}$$



Slika 3.3 Dinamička sličnost modela i izvedbe [2]

Kod dva strujanja, dinamička sličnost je ostvarena kad su oba strujanja definirana istim dinamičkim jednadžbama. Pri tome sile koje djeluju na fluid u oba strujanja moraju biti međusobno proporcionalne. Općenito, za vrijeme strujanja realnog fluida na njega utječu inercijske sile  $F_{in}$ , težina  $F_g$ , sile tlaka  $F_p$  i sile trenja  $F_{tr}$ . Na osnovu Dalamberovog principa može se napisati Navier-Stokesova jednadžba za strujanje fluida (3.7).

$$F_{in} + F_g + F_p + F_{tr} = 0 \quad (3.7)$$

U skladu s gore navedenom jednadžbom, odnos inteziteta odgovarajućih sila kod oba strujanja mora biti konstantan i definiran je s koeficijentom za sile (3.8).

$$\frac{F_{in,1}}{F_{in,2}} = \frac{F_{g,1}}{F_{g,2}} = \frac{F_{p,1}}{F_{p,2}} = \frac{F_{tr,1}}{F_{tr,2}} = k_F = const \quad (3.8)$$

Potpuna sličnost strujanja fluida se postiže kada su za oba strujanja međusobno jednaki Frudovi, Reynoldsovi te Eulerovi brojevi (3.9). Ove jednakosti se dobiju izjednačavanjem odnosa inercijskih sila s odnosima težina, sila trenja te sila tlaka.

$$Fr_1 = Fr_2 \quad Re_1 = Re_2 \quad Eu_1 = Eu_2 \quad (3.9)$$

U slučaju strujanja plinova pri velikim brzinama, dva strujanja će biti potpuno slična ako uz gore navedene jednakosti vrijedi i jednakost Machovih brojeva za ta strujanja (3.10).

$$Ma_1 = Ma_2 \quad (3.10)$$

Potpunu sličnost dva strujanja nije moguće ostvariti zbog prirode problema strujanja te se tada govori o djelomičnoj sličnosti. Također, na pojave u mehanici fluida ne djeluju sve sile podjednako. Na primjer, prilikom strujanja fluida u cijevima najviše utječu sile trenja pa je dovoljna sličnost po Reynoldsovom broju.

### 3.4 Dimenzionalna analiza

Dimenzionalna analiza, kada se odnosi na primjene u matematici i fizičkim znanostima, definira se kao temeljna metoda kojom se povezuju mjerljivi atributi ili karakteristike unutar ili između sustava korištenjem činjenice da vrijednost mjerne jedinice ostaje nepromijenjena bez obzira na količinu ili sastav za koji se koristi. Dimenzionalna analiza je korisna pri rješavanju različitih problema, a neki od njih su slijedeći: provjeravanje ako je jednačba u skladu s načelom homogenosti dimenzija, pretvaranje iz jednog sustava jedinica u drugi, određivanje ili izvođenje odnosa između dviju fizičkih karakteristika ili između dviju veličina, izražavanje jednog atributa pomoću drugog.

U mehanici fluida dimenzionalnom analizom se proučavaju odnosi između različitih fizičkih veličina koje sudjeluju u strujanju fluida. U to se uključuje i ispitivanje dimenzija i jedinica varijabli u jednačbi kako bi se odredilo njihovo ponašanje i međusobni odnosi. Glavni joj je cilj generirati bezdimenzijske parametre koji su od velike pomoći pri dizajniranju eksperimenata i izvještavanju o eksperimentalnim rezultatima. Kada se bezdimenzijski skaliraju varijable, eliminiraju se učinci jedinica i razmjera što omogućava generalizaciju i usporedbu između različitih sustava. Skalarni zakoni, koji omogućuju predviđanje performansi prototipa u stvarnoj veličini na temelju performansi umanjenih modela, dobivaju se uz pomoć dimenzionalne analize. To je izrazito korisno pri provođenju eksperimenata na geometrijski smanjenim modelima zbog uštede vremena i resursa. Još jedna primjena dimenzionalne analize očituje se u uvidu u trendove i odnose između različitih parametara uključenih u strujanje fluida. Također, omogućava istraživačima prepoznavanje važnih bezdimenzijskih grupa, poput Reynoldsova, Machova i Frudova broja, koji se koriste za predviđanje i razumjevanje fenomena te karakteriziraju ponašanje strujanja fluida. Sveukupno gledajući, dimezionalna analiza je u mehanici fluida izrazito vrijedna tehnika koja pomaže u dizajniranju eksperimenata, interpretaciji rezultata te razvoju općih načela i odnosa koji upravljaju strujanjem fluida.

#### 3.4.1 Rayleighova metoda

Rayleighova metoda je matematička tehnika koja se primjenjuje pri strukturnoj analizi kako bi se približno odredile prirodne frekvencije i oblici vibrirajućih sustava. Primjenjiva je na homogene i linearne sustave s koncentriranim masama i elastičnim elementima. Pronalazak linearnih kombinacija oblika vibriranja koje zadovoljavaju rubne uvjete vibrirajućeg sustava je najvažnija ideja ove metode. Spomenute linearne kombinacije poznate su kao Rayleigh-Ritzove

aproximacije. Ova tehnika je korisna u inženjerskim primjenama jer omogućuje učinkovit način procjene dinamičkog ponašanja konstrukcija bez rješavanja potpunih vladajućih jednažbi.

U mehanici fluida ova tehnika se primjenjuje za aproksimaciju ponašanja sustava protoka fluida. Uglavnom se koristi za analizu stabilnosti i oscilacijskog ponašanja protoka fluida. Rayleigovom metodom pretpostavljaju se probna ili približna rješenja za brzinu ili tlak fluida, a zatim se primjenjuju osnovne jednažbe dinamike fluida, kao što su Navier-Stokrsove jednažbe, kako bi se dobili skupovi jednažbi. Potom se dobivene jednažbe rješavaju kako bi se odredile prirodne frekvencije i odgovarajući oblici protoka fluida. Ključna ideja primjene ove ideje u mehanici fluida je pronaći oblik linearne kombinacije koji zadovoljava rubne uvijete sustava protoka fluida. Tom kombinacijom pruža se procjena dinamičkog ponašanja strujanja fluida bez rješavanja potpunih osnovnih jednažbi. Postoje raznolike primjene Rayleighove metode koje se odnose na strujanje fluida, a neke od njih su slijedeće: analiziranje nestabilnosti protoka, odvajanja vrtloga i osciliranog kretanja, razumijevanje ponašanja fluidnih sustava koji su podvrgnuti vanjskim poremećajima te predviđanje pojave nestabilnosti.

### 3.4.2 Buckinghamski $\pi$ teorem

Buckinghamski  $\pi$  teorem je matematički teorem koji omogućuje analizu međuovisnosti fizičkih varijabli u obliku bezdimenzijskih grupa i te se grupe nazivaju Pi grupe ( $\pi$  – grupe). Pri  $n$  broju varijabli koje su povezane s  $k$  dimenzionalnih parametara, postoji  $n - k$  bezdimenzijskih grupa koje potpuno opisuju sustav. Ovaj teorem se koristi u područjima znanosti i inženjerstva, kao što je mehanika fluida, termalna analiza, elektromagnetizam te druge discipline koje uključuju dimenzionalnu analizu. Omogućuje sistematsko pristupanje analizama i modeliranjima fenomena s minimalnim brojem nezavisnih dimenzionalnih parametara što omogućava lakše proučavanje složenih sustava i razumijevanje njihovih osnovnih međuovisnosti.

Buckinghamski  $\pi$  teorem ima široku primjenu u mehanici fluida za dimenzionalnu analizu i modeliranje te pri tome koristi Pi grupe, bezdimenzijske grupe, kojima se upravlja ponašanje sustava strujanja fluida. U gornjem odlomku je opisan način kojim se određuje broj Pi grupa te se one konstruiraju takvim kombiniranjem varijabli pri kojem se dimenzije ukidaju te ostaju samo omjeri varijabli. Uvidu u osnovnu fiziku problema i omogućavanje formuliranja pojednostavljenih modela pružaju upravo te bezdimenzijske grupe. Pi grupe također osiguravaju jezgrovitiju analizu fenomena protoka fluida. Primjena ovog teorema u mehanici je veoma široka. On pomaže u razvoju skalarnih zakona, testiranja modela te kriterija sličnosti. Pojednostavljuje usporedbu različitih sustava protoka fluida te u različitim uvjetima strujanja pomaže u predviđanju ponašanja fluida. Osim toga, ovaj teorem inženjerima i istraživačima omogućava sistematičnije dizajniranje

eksperimenata i analizu eksperimentalnih postavaka. Buckinghamski  $\pi$  teorem uvelike je doprinijeo razumijevanju i napretku fenomena strujanja fluida te se pokazao vrijednim adutom u mehanici fluida jer je pružio okvir za dimenzionalnu analizu, formulaciju modela i interpretaciju podataka.

## 4 ZRAČNI TUNEL

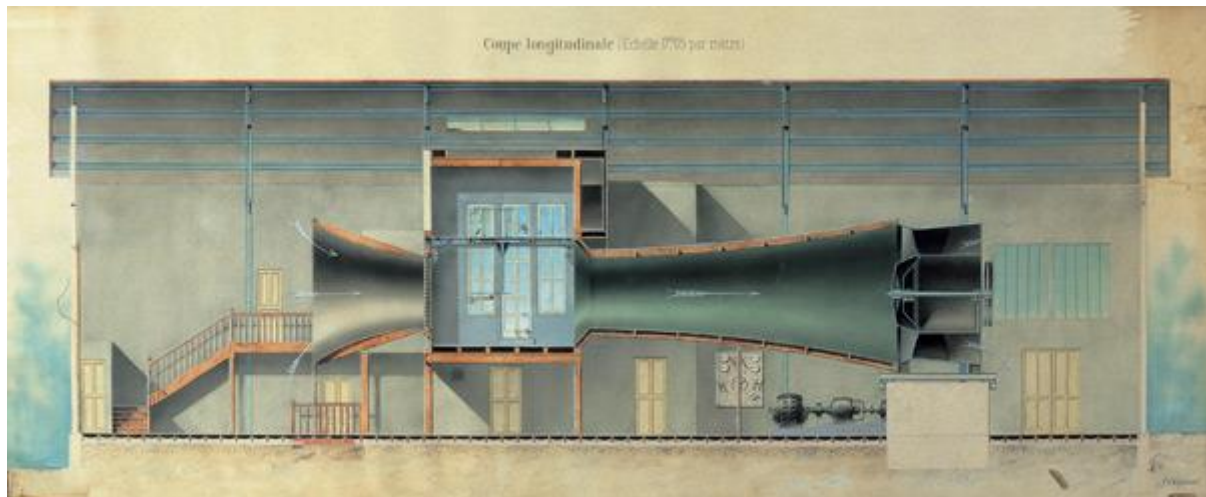
Zračni tunel, ili aerodinamički tunel, je postrojenje koje se koristi za simuliranje kretanja zraka oko objekta kako bi se odredila aerodinamička svojstva tog objekta te za mjerenje parametara strujanja samog zraka kroz tunel. Njihov princip rada se temelji na Newtonovom proučavanju fluida te njegovim zakonitostima iz područja fizike. U ovim tunelima strujanje zraka se omogućuje uz pomoć ventilatora ili kompresora. Objekt koji se ispituje postavlja se u zračni tunel tako da se ne pomiče te zrak koji struji oko tog nepokretnog objekta prikazuje što bi se dogodilo da se objekt kreće kroz zrak. Objekti koji se ispituju mogu biti: umanjena maketa vozila ili raznih letjelica, jedan dio vozila, zrakoplov ili svemirska letjelica u realnoj veličini ili čak uobičajeni predmet poput teniske loptice. Inženjeri na razne načine proučavaju kretanje zraka kroz tunel, kao na primjer: ubrizgavanjem dima ili boje u tunel i fotografiranjem njegovog kretanja oko objekta, pričvršćivanjem konaca na objekt kako bi se pokazalo kako zrak struji te objekti često imaju posebne instrumente za mjerenje sila koje zrak proizvodi na objekt. Poboljšanjem protoka zraka oko objekta može se povećati njegov uzgon i smanjiti otpor.

Britanski inženjer Francis H. Wenham (1824. – 1908.) smatra se zaslužnim za projektiranje i rad prvog zračnog tunela 1871. godine. Montirao je razne oblike u tunel te mjerio sile uzgona i otpora koje je stvarao zrak dok je strujao. Rezultati ovog jednostavnog eksperimenta bili su od velikog značaja za razvoj aeronautike. Orville i Wibur Wright su također značajno doprinijeli u dizajnu i testiranjima na zračnim tunelima. Izgradili su svoj tunel i instrumente za mjerenje uzgona i omjera uzgona i otpora 1901. godine nakon niza neuspjelih ispitivanja na temelju podataka prikupljenih iz eksperimenata Otta Lilienthala. Zaključili su kako su Lilienthalovi podaci bili točni samo za njegov oblik krila, te da će uz prilagodbe njegovih podataka eksperimenti na njihovim oblicima krila biti uspješni. Time su poboljšali aerodinamiku svojih dizajna zrakoplova.

Izgled današnjih aerodinamičkih tunela razlikuje se od izgleda prvih te su brojni inženjeri tražili rješenja za njihovo poboljšavanje. Postojali su razni problemi kod prvih zračnih tunela, a neki od njih su slijedeći: smanjenje gubitaka protoka prilikom puhanja ventilatora te potrošnje energije, ublažavanje zračnih turbulencija, načini na koje se može okom vidjeti strujanje zraka jer je proziran, oblik zračnog tunela, mogućnost opisivanja fizikalnih procesa jer u vrijeme prvih tunela nisu sva današnja znanja iz aerodinamike bila poznata. Problematika strujanja zraka, koja se počela rješavati istovremeno s razvojem prvih zrakoplova, također je bila ozbiljan problem.

Uvođenje kolektora, koji se postavlja iza ispitnog dijela, bio je prvi značajniji korak u razvoju zračnih tunela. Konvergentni dio kolektora povećava brzinu u ispitnom dijelu temeljem zakona o očuvanju protoka te se poboljšavanjem usisa osiguralo kvalitetniji protok zraka uz manje gubitke.

Daljnji bitni korak u razvoju ovih tunela, i u razvoju same aerodinamike, je primjena difuzora i zatvorene pokusne komore u kojoj se kreira slobodan protok zraka. Primjenom difuzora se povećavao tlak ispred ventilatora te se smanjila potreba za električnom energijom. Ovo je izumio francuski inženjer i fizičar Gustave Eiffel, a na slici 4.1 je prikazan njegov zračni tunel.



*Slika 4.1 Jedan od prvih zračnih tunela Gustave Eiffela [13]*

Cirkulacija zraka u zatvorenom krugu druga je velika inovacija kod aerodinamičkih tunela. Ludwig Prandtl je 1909. godine u Njemačkoj izradio prvo takvo postrojenje. Nakon usisavanja zraka nizvodno od probnog odsječka, zrak se provlačio kroz četiri uzastopna zavoja, a zatim je ponovno strujao uzvodno do kolektora. Ovaj način strujanja zraka doveo je do bolje iskoristivosti goriva te je omogućio kontrolirane uvijete pri ispitivanju, kao što su tlak, temperatura, vlaga. Prvi primjer vizualizacije strujanja zraka i utjecaja na postavljeni objekt u zračnom tunelu bio je uz korištenje dima. Najvažnija postignuća u razvoju zračnih tunela u tom razdoblju su inovacije Eiffela i Prandtla: jedan difuzor i zatvoreni krug.

Ovo su bile preteče današnjih mnogo složenijih zračnih tunela. Veliki napredak u razvoju aerodinamičkih tunela omogućio je razvoj tehnologije, koji je bio gotovo eksponencijalan nakon Prvog, a pogotovo nakon Drugog svjetskog rata. Došlo je do razvoja novih vrsta pogona te do novih saznanja iz fizike poput Reynoldsova broja, koeficijenta provlačenja te brzina većih od brzine zvuka (Machov broj).

#### **4.1 Tipovi i osnovni dijelovi zračnih tunela**



Postoji mnogo različitih vrsta aerodinamičkih tunela te nekoliko različitih načina njihove klasifikacije jer su oni dizajnirani za određenu namjenu i raspon brzina. S obzirom na omjer brzine u ispitnom dijelu, odnosno brzine objekta  $v$ , i brzine zvuka  $c$ , čime se izračunava Machov broj ( $M$ ) (4.1), zračne tunele dijelimo na: podzvučne ( $M < 0.8$ ), transonične ( $0.8 < M < 1.2$ ), nadzvučne ( $1.2 < M < 5.0$ ) i hipersonične ( $M > 5.0$ ). U slučajevima koji uključuju podzvučna strujanja, brzine su značajno manje od brzine zvuka, što omogućuje zanemarivanje učinaka kompresibilnosti. Osim toga, gustoća zraka ostaje gotovo konstantna. Kod transoničnih strujanja brzine su vrlo blizu brzini zvuka, a kod nadzvučnih strujanja brzine su veće od brzine zvuka. Prilikom ovih strujanja učinci kompresibilnosti i gustoće zraka, koja može varirati zbog lokalnih udara valova, ekspanzija ili gušenja protoka, moraju se uzeti u obzir. Za hipersonična strujanja brzine su puno veće od brzine zvuka te se učinci kompresibilnosti moraju uzeti u obzir. Glavna karakteristika ovih strujanja je ta da je temperatura protoka toliko visoka da se kemija dvoatomnih molekula zraka mora uzeti u obzir. Drugi način klasifikacije zračnih tunela je s obzirom na njihovu geometriju. Razlikuju se zatvoreni i otvoreni tip tunela koji će detaljnije biti objašnjeni u nastavku. Aerodinamički tuneli mogu se razlikovati i po vrsti radnog fluida koja se koristi u tunelu. Najzastupljeniji fluid koji se koristi u ovim tunelima je zrak, ali mogu se koristiti i voda, dušik ili helij te kriogeni dušik. Voda se koristi za proučavanja strujanja oko podmornice ili brodova ili za vizualizaciju udarnih valova za brze zrakoplove. Dušik ili helij se kao radni fluidi koriste u nekim hipersoničnim postrojenjima, a kriogeni dušik se koristi za ispitivanje transoničnih strujanja s visokim Reynoldovim brojem.

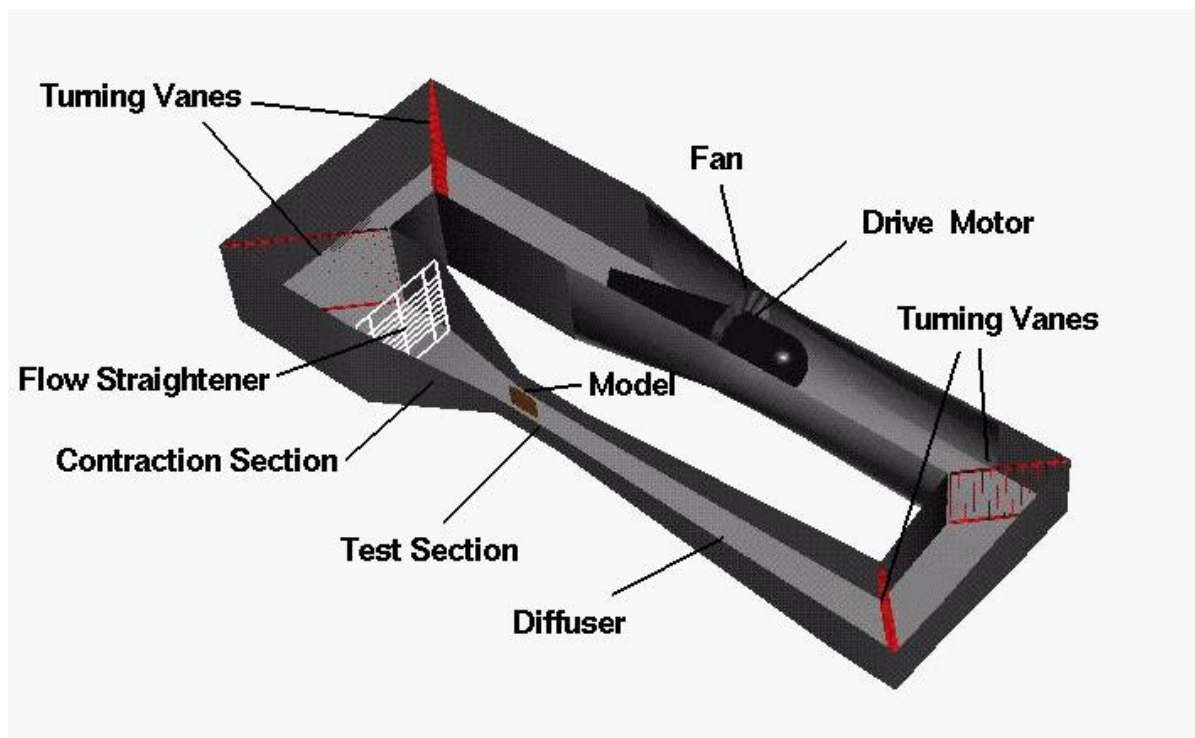
$$M = \frac{v}{c} \quad (4.1)$$

Dijelovi zračnih tunela razlikuju se kod različitih vrsta tunela, ali ovo su neki od njihovih osnovnih dijelova. Razni uređaji koji ujednačavaju brzine strujanja te smanjuju turbulencije, kao što su mreže, saće te skretne lopatice. Dio zračnog tunela u kojem se radni fluid, najčešće zrak, dovodi do maksimalne brzine naziva se sapnica. Objekt na kojem se vrše ispitivanja postavlja se u ispitnu sekciju. Zračni tuneli također imaju difuzor u kojem se brzina strujanja zraka smanjuje kako bi se smanjili ukupni energetske gubici i imaju snažan pogonski agregat koji pomoću ventilatora stvara zračnu struju.

#### 4.1.1 Zatvoreni zračni tunel

Zatvoreni zračni tunel naziva se još i Prandtlov tunel, po njemačkom inženjeru, ili Gottingen tunel, po istraživačkom laboratoriju u Njemačkoj gdje se ovaj tip tunela prvi put koristio. U zatvorenom zračnom tunelu strujanje zraka je cirkularno unutar sustava pa nije potrebno stalno dovoditi svježih zrak iz okoline. U tunelu prikazanom na slici 4.2 zrak se kreće suprotno od kazaljke na satu.

Strujanje zraka kroz tunel pokreće ventilator (*engl. fan*), koji se pokreće velikim pogonskim motorom (*engl. drive motor*). Zrak se zatim okreće u kutovima tunela uz pomoć okretnih lopatica (*engl. turning vanes*) koje minimaliziraju ukupni gubitak tlaka u kutovima zračnog tunela. Ispravljač protoka (*engl. flow straightener*) je dio zatvorenog tunela kroz koji zrak prolazi prije ulaska u ispitnu sekciju (*engl. test section*) kako bi strujanje zraka u ispitnom dijelu bilo što ujednačenije. Između ispravljača protoka i ispitnog dijela zrak prolazi kroz kontrakcijski dio (*engl. contraction section*). Kada tunel radi pri malim brzinama, ispitna sekcija ima najmanju površinu poprečnog presjeka te zbog toga ima najveću brzinu strujanja unutar tunela. Zrak izlaskom iz ispitnog dijela ulazi u difuzor (*engl. diffuser*) gdje se površina poprečnog presjeka povećava čime se smanjuje brzina protoka zraka prije nego što se vrati u ventilator.



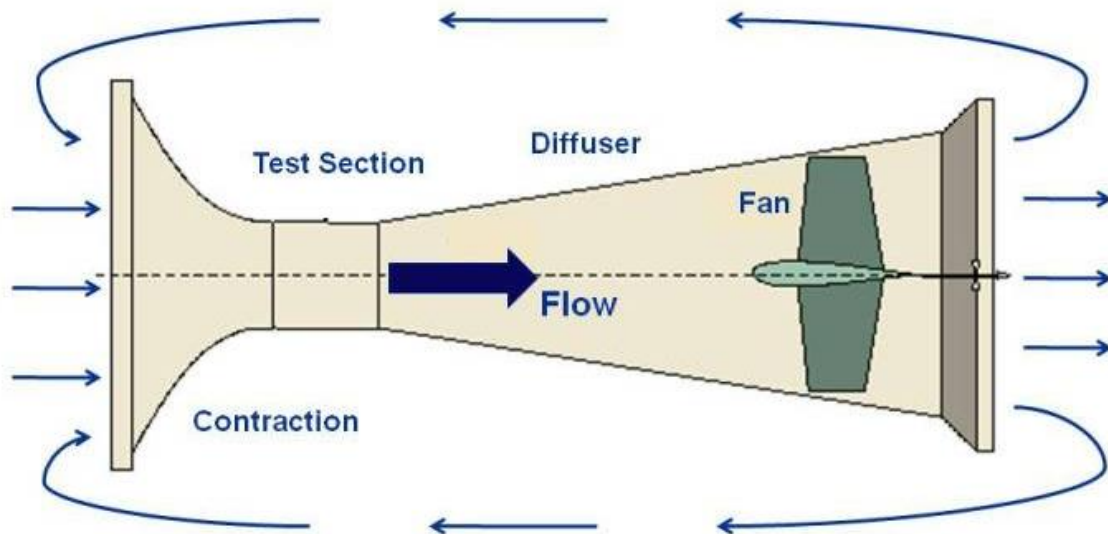
Slika 4.2 Zatvoreni zračni tunel i njegovi osnovni dijelovi [15]

Zatvoreni aerodinamički tunel ima brojne prednosti, neke od njih su sljedeće. Kvaliteta protoka zraka u ispitnom dijelu je vrlo visoka jer okretne lopatice i ispravljači protoka neposredno prije ispitne sekcije osiguravaju relativno ujednačeno strujanje unutar ispitnog dijela. Ima niske operativne troškove – nakon što zrak krene cirkulirati u tunelu, ventilator i motor moraju savladati samo gubitke duž zida i kroz okretne lopatice te ventilator ne mora stalno ubrzavati zrak. U odnosu na rad otvorenog zračnog tunela, zatvoreni zračni tunel ima tihi rad.

S druge strane postoje i određeni nedostaci u odnosu na otvoreni zračni tunel. Troškovi izgradnje su veći zbog prisustva dodatnih lopatica i kanala. Ima lošiji dizajn za pogon i vizualizaciju dima te se mora uzeti u obzir projektiranje dijela za pročišćavanje ispušnih produkata koji se skupljaju u tunelu. Temperature su u zatvorenim tunelima veće pa ponekad dolazi do potrebe za izmjenjivačima topline ili aktivnim hlađenjem.

#### 4.1.2 Otvoreni zračni tunel

Otvoreni zračni tunel još se naziva i Eiffelov tunel, po francuskom inženjeru, ili NPL tunel, po Nacionalnom laboratoriju fizike u Engleskoj gdje je prvi put korišten. U Eiffelovom tunelu ispitni dio je otvoren, dok je kod zatvorenog zračnog tunela taj dio zatvoren. U otvorenom zračnom tunelu (slika 4.3) zrak koji struji kroz ispitnu sekciju skuplja se iz okoline u kojoj se nalazi tunel te nakon prolaska kroz njega ispušta se nazad u okolinu. Protok zraka omogućen je pomoću ventilatora.



Slika 4.3 Otvoreni zračni tunel i njegovi osnovni dijelovi [17]

Velika prednost otvorenog aerodinamičkog tunela je njegova niska cijena izgradnje. Također, ima bolji dizajn za pogon i vizualizaciju dima, u odnosu na zatvoreni tip, i u ovim tunelima nema nakupljanja ispušnih produkata.

Postoje i brojni nedostaci ovih tunela, a neki od njih su slijedeći. U ispitnoj sekciji moguća je loša kvaliteta strujanja zraka jer protok koji okreće ugao u otvor zvona može zahtijevati velike rešetke ili ispravljače strujanja. Isto tako, tunel se treba držati podalje od objekata u prostoriji, poput

zidova, stolova, ljudi, jer oni također stvaraju asimetriju zvona. U slučaju kada je tunel otvoren prema atmosferi može doći do raznih problema koji su uzrokovani vjetrovima i drugim vremenskim uvjetima. Za razliku od zatvorenih zračnih tunela, otvoreni tuneli imaju visoke operativne troškove jer ventilator mora neprestano ubrzavati strujanje zraka. Tijekom rada, ventilator stvara glasnu buku što može ograničiti vrijeme trajanja rada.

## 4.2 Senzorika u zračnim tunelima

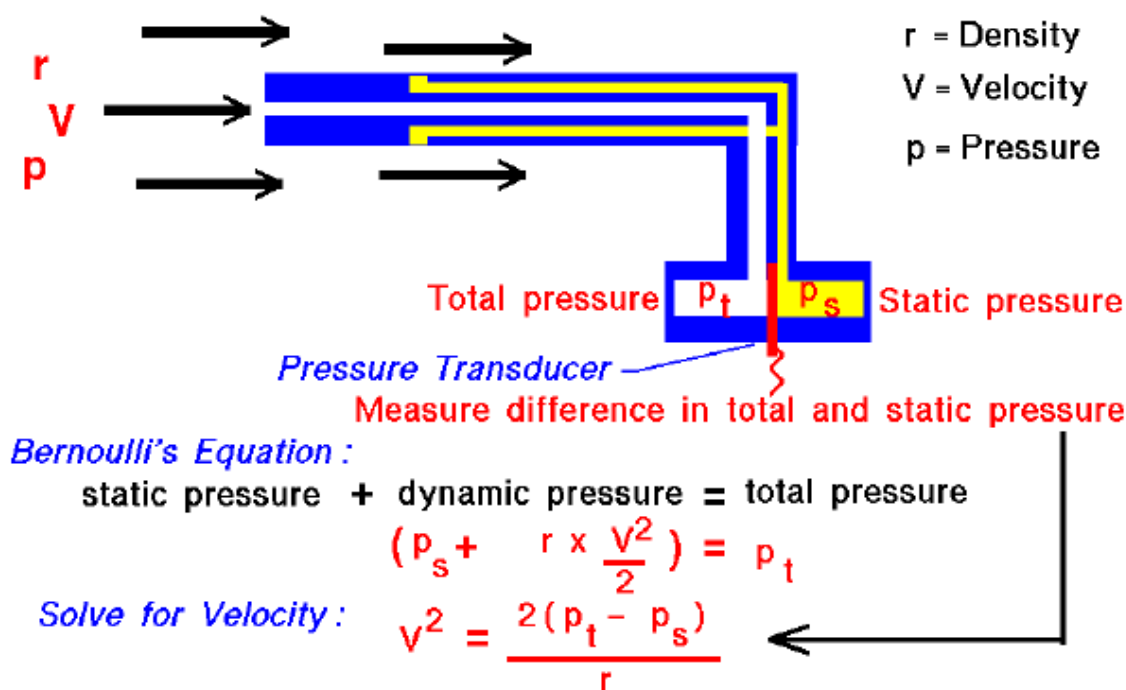
U zračnim tunelima se upotrebljavaju različite vrste senzora i mjernih instrumenata koji se koriste za prikupljanje podataka te za praćenje karakteristika strujanja zraka i aerodinamičkih svojstava tijekom izvođenja raznih testiranja. Senzori su u zračnim tunelima postavljeni strateški kako bi sakupljali relevantne informacije kao što su tlak zraka, temperatura, brzina protoka, turbulencije i sile koje djeluju na model ili objekt koji se ispituje. Podaci koji se prikupe tijekom testiranja koriste se za analizu i validaciju numeričkih modela te za poboljšanje njihovih dizajna i performansi.

Senzori tlaka su instrumenti koji pretvaraju ulazni mehanički tlak radnog fluida u električni izlazni signal. U zračnim tunelima nalaze se na različitim mjestima te mjere tlak zraka koji struji pružajući važne podatke o aerodinamičkim silama koje djeluju na objekt. Senzori brzine su uređaji koji mjere brzinu i smjer protoka zraka te na taj način pomažu u određivanju područja visoke ili niske brzine unutar zračnih tunela. Kako se amplituda vibracija povećava, izlaz senzora također poraste. Ovi senzori su dostupni u različitim oblicima, veličinama te nivoima osjetljivosti. Senzori temperature imaju primjenu u svakodnevnom životu, bilo u obliku bojlera, termometara ili frižidera, ali se primjenjuju i u aerodinamičnim tunelima. Ovi senzori mjere stupanj topline ili hladnoće te ga pretvaraju u električni signal. Napon diode određuje rad temperature metra, te je promjena temperature proporcionalna otporu diode. Što je temperatura hladnija, otpor će biti manji, i obrnuto. Unutar zračnih tunela, sensorima temperature se mjeri temperatura zraka koja je važna za razumijevanje toplinskih efekata na aerodinamičnost testiranog objekta. Primjenjuju se i senzori sile koji prikupljaju informacije o aerodinamičkim silama koje djeluju na model koji se nalazi u ispitnoj sekciji. Općenito, senzori sila su uređaji koji pretvaraju mehaničku silu, kao što je opterećenje, težina, kompresija ili pritisak, u drugu fizičku veličinu, u ovom slučaju u električni izlazni signal. Što je sila koja se primjenjuje na senzor veća, električni signal se proporcionalno mijenja.

### 4.2.1 Pitotova cijev

Pitotova cijev je jedan od najjednostavnijih senzora brzina i ima širok raspon primjene. Funkcionira na principu Bernoullijeve jednadžbe koja kaže da se na temelju razlike tlakova može

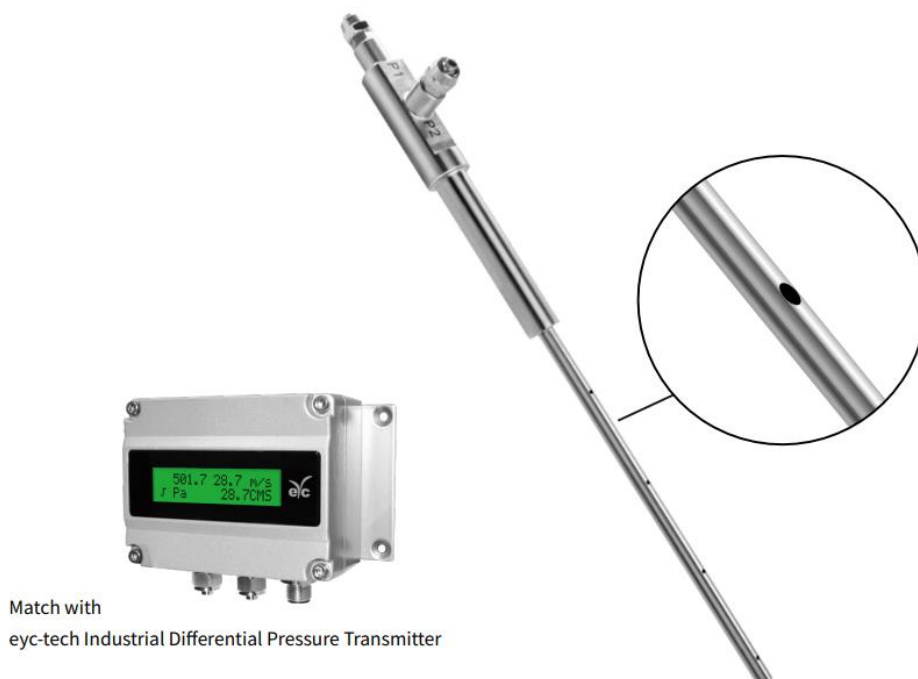
izračunati brzina fluida u točki. Radi na principu mjerenja dva tlaka: statički i ukupni udarni tlak. Statički tlak (*engl. static pressure*) je radni tlak u cijevi, kanalu ili okolini, uzvodno od Pitotove cijevi, te se mjeri pod pravim kutom u odnosu na smjer strujanja zraka, po mogućnosti u području niskih turbulencija. Ukupni udarni tlak (*engl. total pressure*) je zbroj statičkog i dinamičkog tlaka i mjeri se u trenutku udara strujnog toka u otvor Pitotove cijevi. Za mjerenje ovog tlaka Pitotove cijevi imaju malu cijev, koja je ponekad u obliku slova L, s otvorom direktno okrenutim prema nadolazećoj struji. Pretvarač tlaka (*engl. pressure transducer*) je uređaj kojem sa jedne strane dolazi statički tlak, a sa druge strane ukupni udarni tlak. Ovaj uređaj mjeri razliku tih dvaju tlakova mjerenjem naprezanja u tankom elementu pomoću elektroničkog mjerača naprezanja. Nakon što se razlika tlakova izmjerila pomoću Pitotove cijevi, i uz poznavanje gustoće zraka, Bernoullijevom jednadžbom se određuje brzina fluida u točki. Na slici 4.4 prikazana je shema ove cijevi.



Slika 4.4 Shema Pitotove cijevi i Bernoullijeva jednadžba [19]

Prosječna Pitotova cijev (*engl. average Pitot tube*) je uvedena kako bi se izračunala prosječna brzina po visini Pitotove cijevi. Na njoj se nalazi više otvora, koji su raspodijeljeni po cijeloj dužini cijevi, za statički i ukupni udarni tlak. Tlakovi izmjereni u svim otvorima totalnog tlaka, i zasebno u svim statičkim, kombiniraju se te njihova razlika izračunata temeljem Bernoullijeve jednadžbe predstavlja prosječni brzinu u cijevi. Otvori koji su bliži izlazu kombiniranog signala imaju nešto

veći utjecaj od otvora koji su udaljeniji. Na slici 4.5 prikazan je average Pitot koji se nalazi na zračnom tunelu Tehničkog fakulteta u Rijeci.



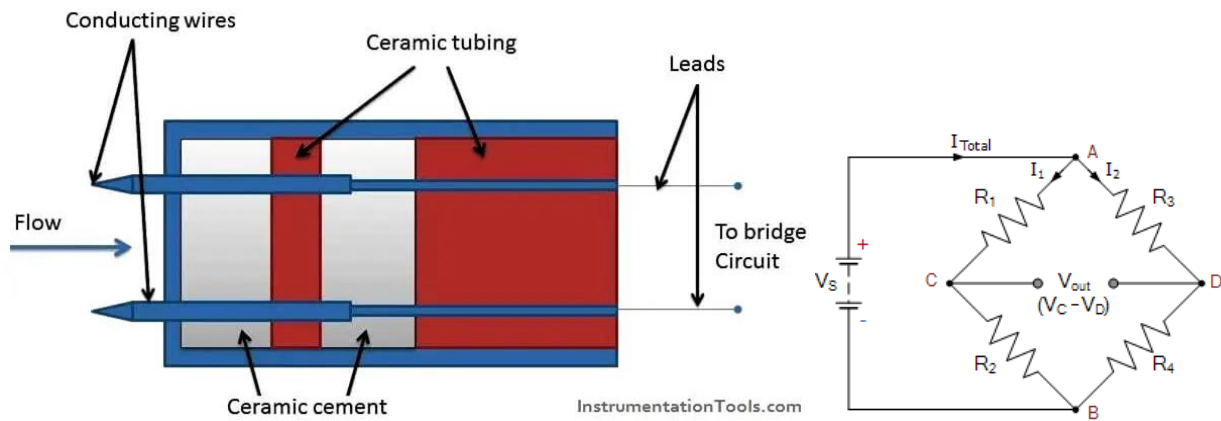
Slika 4.5 Average Pitot i transponder na koji je priključen

#### 4.2.2 Anemometar s ugrijanom žicom

Anemometar s ugrijanom žicom (*engl. hot wire anemometer*) pripada jednoj od vrsti toplinskih anemometra te se koristi za mjerenje brzine i smjera strujanja fluida. Princip rada mu se temelji na promjeni temperature žice, koja gubi toplinu jer se dio nje zadržava u struji fluida. Zbog toga se temperatura žice smanjuje i mijenja se otpor žice. Određuje se odnos između otpora žice i brzine strujanja zraka, te promjena otpora žice postaje mjera brzine strujanja. Rad ovog uređaja može se objasniti pomoću dvije metode mjerenja brzine protoka, koje će biti objašnjene u nastavku.

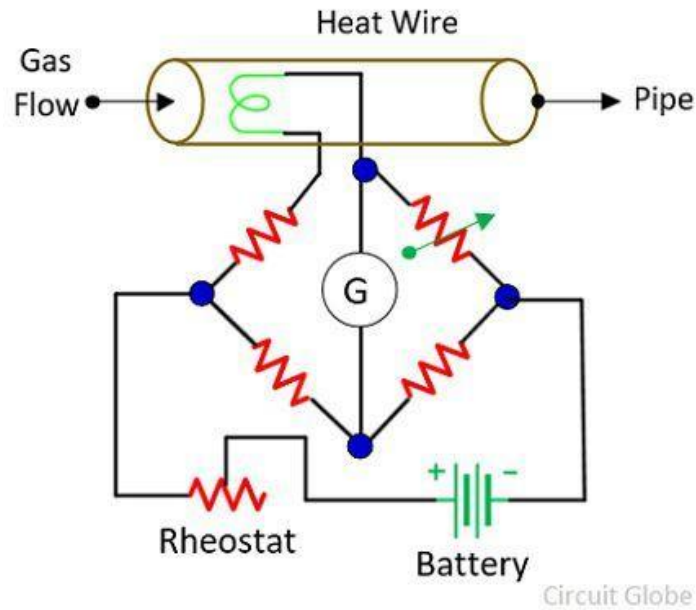
Dva važna dijela potrebna za konstrukciju anemometra s ugrijanom žicom su Wheatstoneov most i provodne žice (*engl. conducting wires*) (slika 4.6). Provodne žice su spojene unutar keramičkog tijela anemometra (*engl. ceramic tubing*) te izvodi (*engl. leads*), koji se nalaze unutar žica, izlaze iz keramičkog tijela i spajaju se na Wheatstoneov most. Taj most mjeri varijacije u otporu žice. Općenito, Wheatstoneov most sastoji se od dva serijsko – paralelna rasporeda otpornika spojenih između priključaka za napajanje naponom i uzemljenja, stvarajući nultu razliku napona između

dvije paralelne grane kada su uravnotežene. Koristi se za točno mjerenje nepoznatih vrijednosti otpora ili kao sredstvo za kalibriranje mjernih instrumenata, korištenjem varijabilnog otpora i jednostavne matematičke formule.



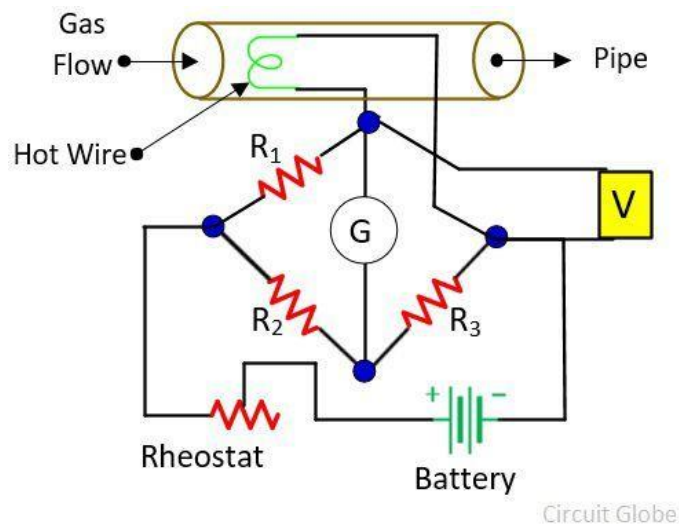
Slika 4.6 Konstrukcija anemometra s ugrijanom žicom [21] i Wheatstoneov most [23]

U metodi konstantne struje (slika 4.7), anemometar se postavlja u struju fluida čiji je protok potrebno izmjeriti. Kroz žicu prolazi struja konstantne jakosti, te to ukazuje da se Wheatstoneov most održava na konstantnom naponu. Kada se žica drži u struji fluida, tada se toplina žice prenosi na tekućinu. Toplina je izravno proporcionalna otporu žice, što znači da ako se toplina žice smanji, smanjit će se i otpor žice. Wheatstoneov most mjeri varijacije otpora koje su jednake brzinama strujanja fluida.



Slika 4.7 Metoda konstantne struje [20]

U slučaju metode konstantne temperature (slika 4.8), žica se zagrijava električnom strujom. Kada se ta vruća žica stavi u struju fluida, prenosi se toplina sa žice na fluid. Može se zaključiti da se temperatura žice mijenja što dovodi do promjene njezinog otpora. U ovoj metodi princip rada je da temperatura žice ostaje konstantna. Ukupna struja potrebna da se žica dovede u početno stanje jednaka je brzini protoka fluida.



Slika 4.8 Metoda konstantne temperature [20]



Postoji mnogo prednosti anemometra s ugrijanom žicom, neke od njih su navedene u ovom odlomku. Elektroničke komponente koje se koriste u njemu su točne i cijena im je pristupačna. Nudi visoku osjetljivost te mu je prostorna rezolucija izvrsna. Omogućuje visoko frekvencijski odziv, veći od 10 KHz. Ovaj instrument može raditi pri visokim temperaturama te je malen, pouzdan, točan i jednostavan za upotrebu. Omjer signala i šumova koje stvara je nizak. Anemometar s ugrijanom žicom može raditi pri velikim protocima fluida te može provoditi mjerenja u turbulentnim i laminarnim strujanjima.

S druge strane, postoje i razni nedostaci ovog uređaja. Anemometar s ugrijanom žicom je uređaj osjetljivog tipa te se može koristiti samo u čistim plinovitim fluidima. U njemu se nakuplja prašina i nečistoće pa ga je potrebno ponovno kalibrirati. Sonde u uređaju su osjetljive pa može doći do njihovog loma. Mogu nastati različiti problemi povezani s kontaminacijom i prijenosom topline između sonde i površine. Skretanje pokazivača ima problema zbog promjene atmosferske temperature. Snaga potrebna za rad ovog uređaja je relativno velika.

Na slici 4.9 nalazi se slika anemometra s ugrijanom žicom koji se nalazi na zračnom tunelu Tehničkog fakulteta u Rijeci.



*Slika 4.9 Anemometar s ugrijanom žicom i transmitser na koji je spojen*

#### 4.2.3 Skener tlaka

Skeneri tlaka (*engl. pressure scanner*) su uređaji koji se sastoje od više senzora tlaka ili pretvarača koji su raspoređeni u matrici ili polju. Ovi senzori se postavljaju na strategijske lokacije kako bi istovremeno ili zasebno mjerili tlakove. Prikupljeni podaci sa senzora pružaju cjelovitu sliku o

raspodjeli tlakova u određenom sustavu ili okolini, u zračnim tunelima to je ispitna sekcija. Ovi podaci se obrađuju i analiziraju uz pomoć specijaliziranog softvera ili sustava za akviziciju podataka, te to omogućuje vizualizaciju, tumačenje i daljnju analizu tlakova. Općenito, skeneri tlaka mogu mjeriti tlakove u različitim točkama, na površinama, u kanalima ili unutar struje fluida. Zbog toga oni omogućuju detaljnije razumijevanje varijacija tlaka i gradijenta na površini ili unutar područja strujanja. Te informacije posebno su korisne za optimizaciju aerodinamičkih performansi modela na kojem su se provela testiranja.

Postoje mnoge vrste ovih uređaja. Minijsaturni elektronički skeneri tlaka imaju neusporedivu dugotrajnu stabilnost, izborni izlaz senzora temperature i automatski promjenjivi referentni tlak. Ova vrsta skenera tlaka koristi se prilikom testiranja u zračnim tunelima. Elektronički skeneri tlaka sastoje se od niza silikonskih senzora tlaka, jedan za svaki tlačni priključak, čiji se analogni izlazi elektronički višestruko spojeni kroz jedno ugrađeno pojačalo pri vrlo visokim brzinama korištenjem binarnog adresiranja. Piezoelektrični skeneri tlaka dizajnirani su za kretanje u različitim smjerovima širenjem u nekim smjerovima i skupljanjem u drugim, ovisno o polarizaciji primijenjenog napona. ESP skeneri tlaka uključuju dvopoložajni razvodnik koji se pokreće trenutnim impulsima upravljačkog tlaka.

#### 4.2.4 Transmitter tlaka

Transmitter tlaka (*engl. pressure transmitter*) je uređaj koji pretvara izmjerene podatke o tlakovima u električne signale. Sastoji se od osjetnog elementa, obično dijafragme ili piezoresistivnog senzora, koji se deformira kao odgovor na primijenjeni tlak. Nastala deformacija generira električni signal proporcionalan tlaku. Osjetni element je povezan s signalnom kondicijskom strujom koja pojačava, filtrira i linearno obrađuje električni signal za određeno mjerenje. U pravilu je izlaz transmitera analogni signal, poput 4 – 20 mA strujne petlje ili naponskog signala, koji se jednostavno integrira u kontrolne sustave ili sustave akvizicije podataka. Ali, ponekad su izlazi na transponderima digitalni, kao što su RS485 ili Modbus, kako bi se mogla uspostaviti komunikacija s računalnim sustavima i drugim uređajima. Tlakovi se uz pomoć transmitera mogu kontinuirano pratiti u stvarnom vremenu uz visoku točnost i stabilnost. Transponderi tlaka izdržljivi su u teškim uvjetima, kao što su ekstremne temperature, korozivne tekućine te visoke razine vibracija. Također, pružaju mogućnost praćenja podataka na daljinu i lako se integriraju u automatizirane sustave.

#### 4.2.5 Senzori sila

Senzori sila služe za određivanje sila koje nastaju prilikom strujanja zraka oko modela prilikom aerodinamičkih testiranja u zračnim tunelima. Ovi senzori moraju biti prilagođeni modelu i obliku ispitne sekcije te moraju odgovarati uvjetima testiranja. Zbog ovih razloga, senzori sila se proizvode po narudžbi za određeni aerodinamički tunel u kojem će se koristiti. Često se primjenjuju i kao postolja koja fiksiraju objekt koji se ispituje. Postoje različite vrste ovih senzora te njihov odabir ovisi o načinu fiksiranja testnog modela i načinu dovođenja izmjerenih podataka do inženjera. S obzirom na broj komponenti sila koje mjere, razlikuju se senzori koji mjere samo jednu komponentu do onih koji mjere svih šest komponenti aerodinamičkih sila. Prema mjestu postavljanja senzora sila, postoje unutarnji senzori koji se nalaze u samom modelu i vanjski senzori koji su postavljeni izvan modela ili izvan ispitne sekcije.

Senzor sila koji se nalazi u zračnom tunelu Tehničkog fakulteta u Rijeci mjeri svih šest komponenti sila nastalih strujanjem zraka oko testnog modela te se temelji na paralelnom mehanizmu Stewartove platforme. Postoje tipovi Stewartovih platformi, senzor sila RITEH – a je 6-6 platforma. Ova platforma ima šest različitih sferičnih zglobova na gornjem spoju štapova s pločom te ima šest različitih sferičnih zglobova na donjim krajevima štapova. Stewartova platforma temelj je za izgled senzora te se sastoji od nekoliko dijelova. Čvrsta i nepomična podloga sprječava utjecaj vanjskih gibanja i oscilacija na izmjerene podatke. Također, osigurava stabilnost ostalim dijelovima platforme. Gornja ploča mora podnositi opterećenja koja nastaju tijekom ispitivanja i prenosi učinak na štapove. Štapni oslonci, kojih je šest, služe za podupiranje ploče te su to najkompliciraniji i najbitniji dijelovi platforme. U štapovima se nalaze senzori aksijalnih sila. Sastavni dio platforme su uteg koji služi za neutraliziranje težine platforme te razni prihvatni dijelovi kojim se fiksira model. Potrebno je osigurati i primjereni hardver i softver koji će prikupljati, obrađivati i prikazivati podatke mjerenja.

### **4.3 Načini prikupljanja podataka sa sensorike**

Jedan od načina prikupljanja podataka sa sensorike je pomoću PLC – a. PLC (programmable logic controller) je malo, modularno računalo s prilagođenim uputama za izvođenje određenog zadatka. Koriste se, za širok raspon industrija, u industrijskim sustavima upravljanja te su u velikoj mjeri zamijenili mehaničke releje, sekvencer bubnja i mjerače vremena. Sve središnje procesorske jedinice kontinuirano prolaze kroz ulazno skeniranje, skeniranje programa i izlazno skeniranje, ponavljajući izvođenje jednog zadatka pritom prateći uvijete. Podatke koje PLC prikuplja mogu se koristiti kao povratne informacije za realizaciju potrebnih promjena i poboljšanja određenog procesa, od kojih se neki mogu izvesti automatski u skladu s kodiranjem uređaja, ili testnog

modela. PLC ima sposobnost kontinuiranog rada bez održavanja te je imao veliki utjecaj na digitalizaciju velikog broja industrija.

U kontekstu zračnih tunela, PLC se koristi za automatizaciju i kontrolu raznih funkcija i operacija te upravlja cjelokupnim radom tunela. Kontrolira ventilator koji generira protok zraka, podešava brzinu i tlak zraka te regulira temperaturu i druge uvijete unutar tunela. Uz pomoć PLC – a inženjeri mogu osigurati točne i ponovljive eksperimente kontrolirajući parametre ispitivanja. Podaci od senzoričke generiraju se pomoću raznih senzora te se kroz transmiere tlaka tlak pretvara u napon ili struju te se dobiju potrebni rezultati. Te podatke pohranjuje PLC koji taj napon ili struju pretvara u bitove, ovisno o rasponu koji je zadan, te ih preračunava u tlak, brzinu i druge vrijednosti koje su inženjerima potrebne. Na kraju cijelog ovog procesa pomoću Python skripti dobile su se vrijednosti koje su prikazane u obliku grafova.

Drugi način prikupljanja podataka sa senzoričke u zračnom tunelu je direktno preko konvertera. Općenito, konverter je uređaj koji pretvara jednu vrstu signala ili mjerenja u drugu. Ovu pretvorbu je potrebno raditi kako bi bila omogućena komunikacija između različitih senzora, instrumenata ili sustava upravljanja. Postoje ADC i DAC konverteri. ADC je konverter podataka koji kodira analogni signal u binarni kod, odnosno digitalni signal. Ova vrsta konvertera koristi se u zračnim tunelima, gdje se vrijednosti struje ili napona dobivene od transmiere tlaka konvertiraju u digitalne podatke potrebne za daljnju analizu. DAC konverter, koji se često koristi u televizijama i mobitelima, pretvara digitalne signale u analogne.

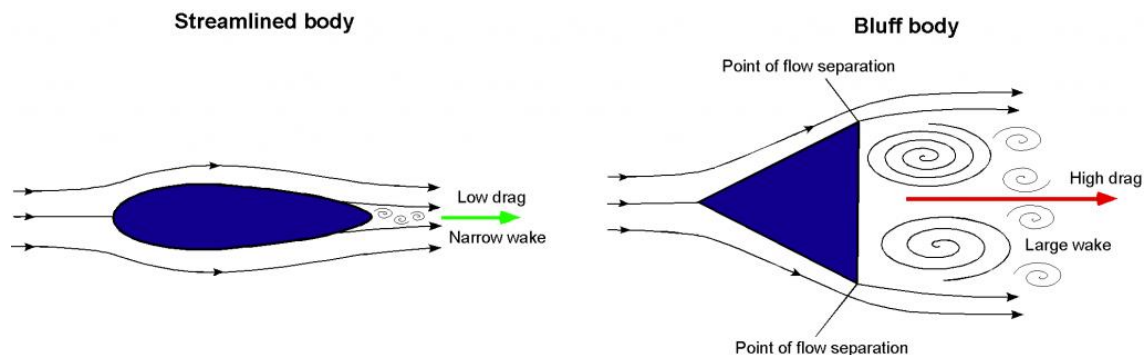
#### **4.4 Primjena zračnih tunela**

Ispitivanja u zračnim tunelima imaju veoma široku primjenu u današnje vrijeme. Koriste se za testiranje gotovo svega što se kreće kroz zrak, od padobrana, automobila i traktorskih prikolica do svemirskih letjelica, zrakoplova, projektila i dronova. Proučavaju se aerodinamičke sile i ostali utjecajni faktori na testirane objekte kako bi inženjeri mogli optimizirati njihov oblik, smanjiti otpor zraka, povećati im stabilnost te poboljšati potrošnju goriva. Zračni tuneli imaju i primjenu u građevinarstvu. U njima se simulira utjecaj vjetra na građevine poput zgrada, mostova i stadiona te na temelju dobivenih rezultata inženjeri mogu projektirati građevine koje mogu izdržati različite brzine i smjerove vjetra. Aerodinamični tuneli imaju primjenu i u sportu. Sportski profesionalci i treneri ih koriste za testiranje aerodinamičkog otpora sportaša. Budući da sportaši neprestano mijenjaju položaje tijela tijekom sporta, inženjeri mjere otpor za njihove specifične položaje za sport kojim se bave. Također, sportsku opremu se može optimizirati testiranjem u zračnim tunelima.

## 5 OPSTRUJAVANJE ZRAKA OKO KVADRA U ZRAČNOM TUNELU

### 5.1 Turbulentna zona, granični sloj i stagnacijska točka

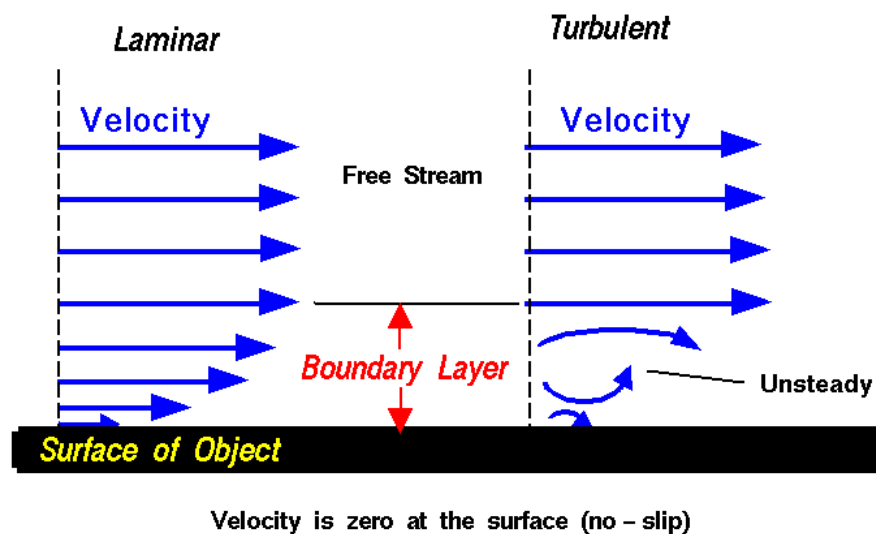
Pojam turbulentna zona (*engl. wake*) predstavlja područje poremećenog strujanja zraka koji se formira iza objekta koji se kreće kroz fluid, poput zraka. U ovom području vlada niži tlak te je turbulencija veća u usporedbi sa vrijednostima u neometanom strujanju zraka udaljenijem od objekta. Ova pojava je temeljena na jednadžbama očuvanja mase i količine gibanja. Veličina i oblik turbulentnog područja ovisi o mnogim čimbenicima, kao što su veličina, oblik i brzina objekta te svojstva fluida kojim objekt struji (slika 5.1). Ako je objekt veći i aerodinamičnijeg oblika, ova zona je veća i ima glatkije oblike strujanja. Kod manjih i nepravilnije oblikovanih objekata u turbulentnom području se može stvarati više turbulencija te ima složenije oblike. Efekti koji nastaju ovim fenomenom važni su pri određivanju aerodinamičnosti testiranih objekata. U slučaju zrakoplova, pojavu turbulentne zone stvaraju krila što utječe na performanse zrakoplova te na stabilnost drugih zrakoplova u njegovoj blizini tijekom leta. Prilikom dizajniranja automobila, turbulentno područje koje nastaje iza automobila prilikom vožnje utječe na njegov otpor i potrošnju goriva. Dobro razumijevanje ove pojave je ključno za optimizaciju različitih objekata koji se kreću kroz fluide.



Slika 5.1 Oblik i veličina turbulentne zone u ovisnosti o obliku objekta [28]

Granični sloj (*engl. boundary layer*) je tanki sloj fluida koji nastaje u neposrednoj blizini objekta koji struji kroz taj fluid. U tom području brzina strujanja se mijenja od nule, na površini objekta, do brzine slobodnog protoka udaljenog od površine. Molekule fluida koje struje u blizini objekta su poremećene te se stvaraju aerodinamičke sile između fluida i objekta. Oblik i brzina objekta, masa fluida koja prolazi pored objekta te njezina viskoznost i kompresibilnost utječu na vrijednosti tih sila. Molekule koje prolaze odmah do površine objekta lijepe se za nju te se

molekule malo iznad njih sudaraju sa njima što usporava brzinu njihovog strujanja. Kako se udaljava od površine, intenzitet ove pojave se sve više smanjuje. U ovisnosti o veličini Reynoldsovog broja, strujanje u graničnom sloju može biti laminarno ili turbulentno (slika 5.2). Pri manjim Reynoldsovima brojevima, strujanje u ovom sloju je laminarno, odnosno slojevito, te se njegova brzina jednoliko mijenja kako se udaljava od površine. Strujanje ovog sloja je turbulentno, čija je karakteristika nestabilna brzina i vrtloženje strujanja, ako su Reynoldsovi brojevi veći. Učinci graničnog sloja na uzgon sadržani su u formuli za koeficijent uzgona, dok su učinci na otpor sadržani u formuli za koeficijent otpora.



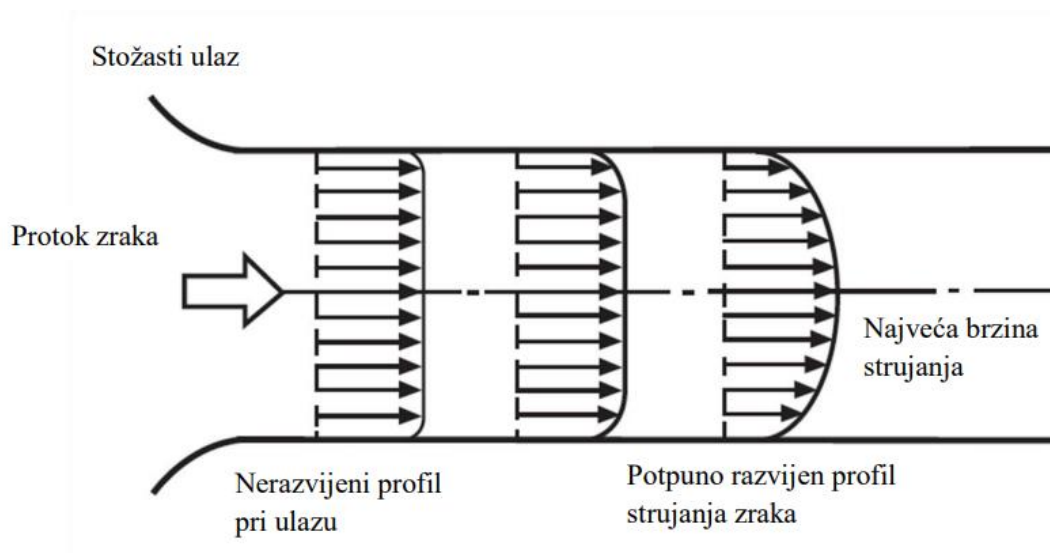
Slika 5.2 Granični sloj [29]

Stagnacijska točka je određena točka na površini objekta u koju fluid izravno udara te brzina strujanja ima vrijednost nula nakon čega dolazi do promjene smjera protoka. Ova točka je poznata i kao točka ukupnog tlaka jer tlak na površini objekta doseže svoj maksimum, kinetička energija fluida se u potpunosti pretvara u tlak. U pravilu, stagnacijska točka se nalazi na prednjoj površini objekta, koja je direktno usmjerena prema smjeru strujanja fluida. Poznavanje pozicije i položaja ove točke važno je za analizu objekata koji struje kroz fluid te za određivanje optimalnih aerodinamičkih svojstava, kao što su sile otpora i uzgona.

## 5.2 Utjecaj zida na strujanje zraka u zračnom tunelu

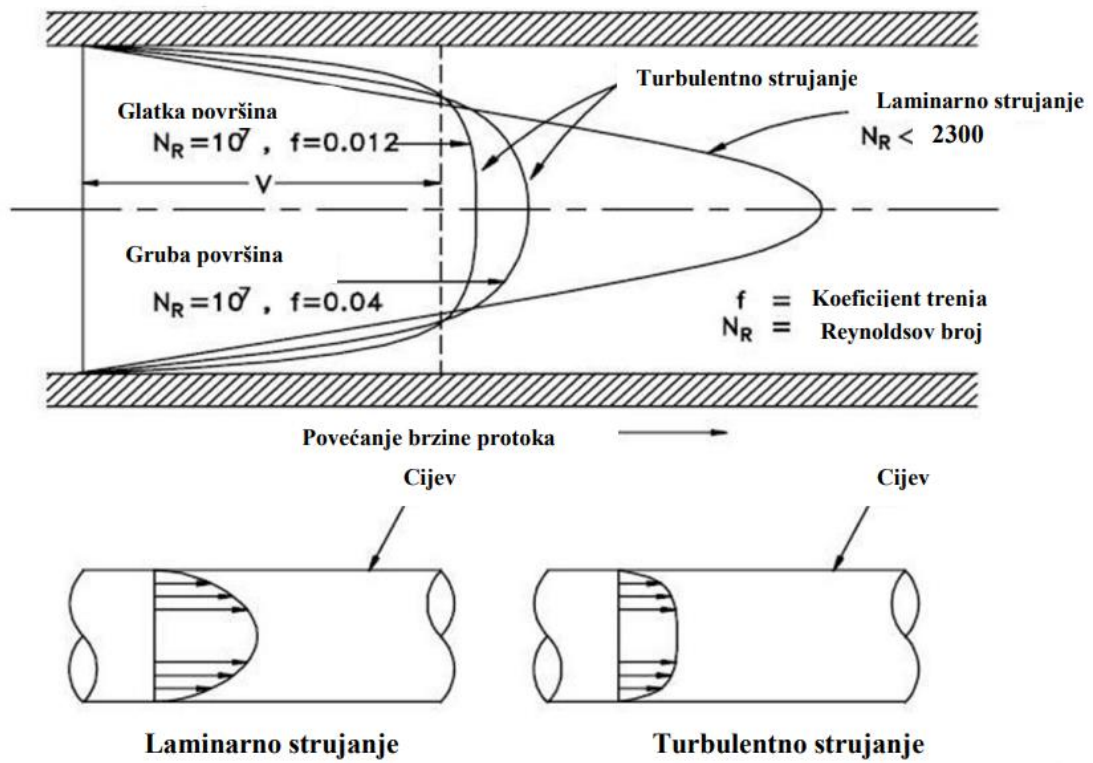
Zrak koji struji u zračnom tunelu nema jednoliku brzinu strujanja po poprečnom presjeku, već ima određeni profil brzine. Taj profil brzine ovisi o kvaliteti zraka te o hrapavosti i obliku uzvodnog i dovodnog kanala. Ako struja zraka ulazi u tunel kroz stožasti ulaz, profil brzine razvija se po dužini

tunela, te na određenoj udaljenosti nizvodnog kanala biti će potpuno razvijen (slika 5.3). Duljina strelica na slici 5.3 proporcionalna je prosječnoj brzini strujanja. Oblik ovih strelica, koje shematski prikazuju strujanje zraka, ukazuje da se radi o laminarnom strujanju, ali to nije u potpunosti točno. U ovisnosti o brzinama zraka u aerodinamičkom tunelu, može se zaključiti da će strujanje biti turbulentno. To znači da se najveći dio zraka kreće naprijed s prosječnom brzinom, ali i da postoji kontinuirano vrtloženje i miješanje unutar protoka struje zraka.



*Slika 5.3 Razvoj profila brzine [13]*

Materijal i stanje površine stijenki zidova zračnih tunela utječe na razvoj profila brzine strujanja (slika 5.4). Svaka čestica zraka ne putuje istom brzinom po cijelom poprečnom presjeku tunela, brzina zraka u dodiru sa stijenkom zida jednaka je nuli i povećava se udaljavanjem od zida. Oblik krivulje brzine strujanja, koji je vidljiv na slici 5.4, ovisi o tome radi li se o laminarnom ili turbulentnom protoku. U slučaju laminarnog strujanja, krivulja brzine biti će paraboličnog oblika te će maksimalna brzina u središtu tunela biti do dva puta veća od prosječne brzine. Ako je protok u tunelu turbulentan, postoji prilično ravnomjerna raspodjela brzina po cijelom odjeljku presjeka što znači da je strujanje zraka gotovo jednolično. Kod grubih stijenki zida, profil brzina je neujednačeniji nego kod glatkijih stijenki.

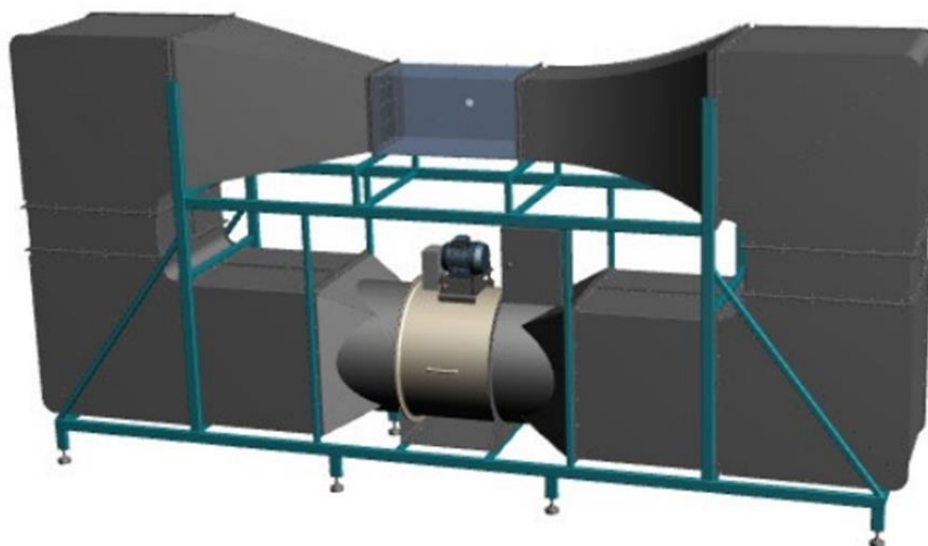


Slika 5.4 Utjecaj stanja stijenki i vrste strujanja na profil brzine protoka zraka [13]



## 6 EKSPERIMENTALNA ANALIZA I KALIBRACIJA SENZORIKE

Eksperimentalna analiza strujanja zraka oko određenog objekta, kvadra s dimenzijama 600 x 400 x 500 mm, odrađena je u zatvorenom zračnom tunelu Tehničkog fakulteta u Rijeci. Princip rada zatvorenog tunela objašnjen je u poglavlju 4.1.1 te je model zračnog tunela Tehničkog fakulteta u Rijeci prikazan na slici 6.1. Sastoji se od: četiri koljena u kojima se nalaze skretni limovi koji usmjeravaju strujanje zraka, difuzora s instaliranim rešetkama, kontrakcije, zatvorene testne sekcije dimenzija 500 x 500 x 1000 mm u kojoj se nalazi kvadar te se nasuprot njoj nalazi ventilator, modela HPX-90-4T-7.5 IE3. Također, provedena su ispitivanja kako i u kojoj mjeri kalibracija senzoričke utječe na rezultate. Tijekom provođenja svih mjerenja zrak je strujao u smjeru suprotno od kazaljke na satu. Može se očekivati simetrična raspodjela tlaka i brzine na kvadru.

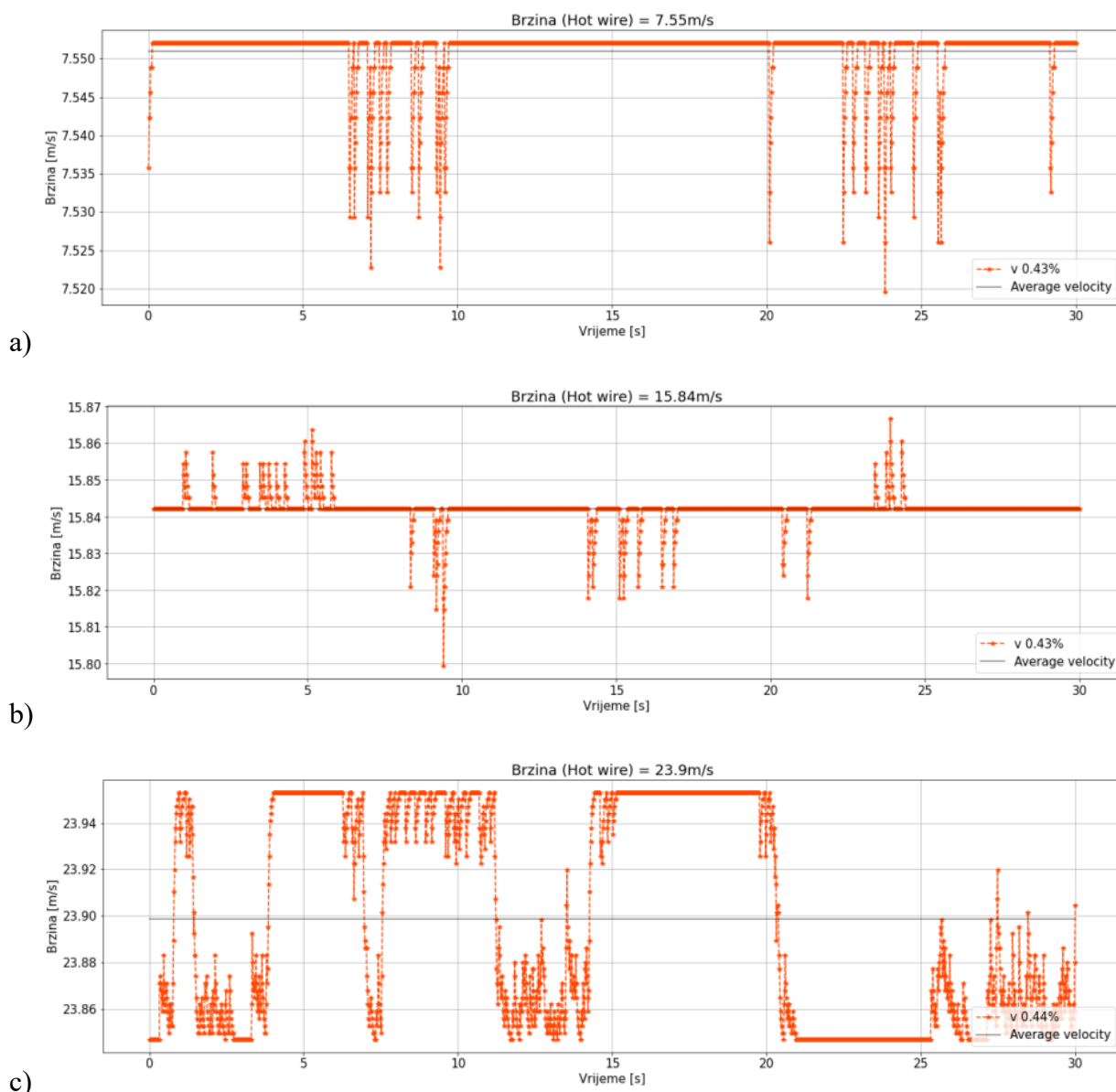


*Slika 6.1 Model zatvorenog zračnog tunela Tehničkog fakulteta u Rijeci*

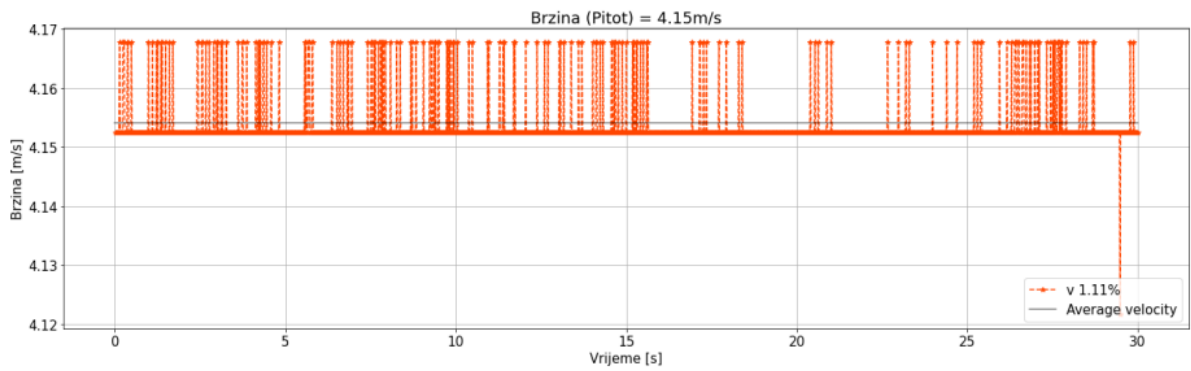
### 6.1 Prvi rezultati – očitavanja Average Pitota i Hot Wire – a te njihovo osciliranje u vremenu

Neuniformni protok, pojava wake – a pri većim brzinama ili greške u točnosti odašiljača neki su od razloga zašto očitavanja brzine strujanja pomoću Average Pitota i Hot Wirea osciliraju u vremenu te su zbog toga provedena prva mjerenja. Pomoću ovih rezultata napravljena je kalibracija. U ovim mjerenjima koristili su se, uz Average Pitot i Hot Wire, transmiteri „Differential Pressure – PHD330“, koji ima odstupanje preciznosti  $\pm 2,0\%$  i „Air Velocity Transmitter – FTM84/85“, koji ima odstupanje preciznosti  $\pm 1,5\%$ . Prilikom ovih mjerenja, kalibracija PLC – a provodila se ručno, odnosno na principu osciliranja vrijednosti maksimuma i minimuma tlakova, brzina i temperatura

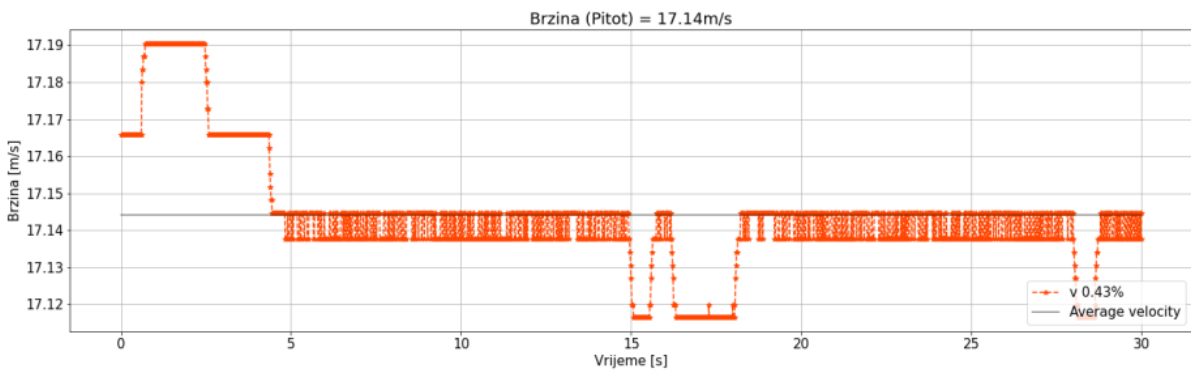
kako bi se podesio raspon unutar kojeg PLC točno pretvara vrijednosti napona u željene jedinice. Dakle, problem je bio kod neravnomjernog prikupljanja podataka s transmitera pa su prvotna mjerenja odrađena na prije spomenuti način, a nadalje će biti prikazani drugačiji oblici rješavanja ovog problema. Kalibracija je bila potrebna jer su se pomoću PLC – a prikupljali podaci sa Average Pitota i Hot wirea na način objašnjen u poglavlju 4.3. Na slijedećim slikama prikazani su prikupljeni podaci brzina s Hot Wire – a (slika 6.2) i Average Pitota (slika 6.3) u intervalu od 30 sekundi s frekvencijom 60 Hz. Na slikama je prikazana prosječna brzina te odstupanja od iste.



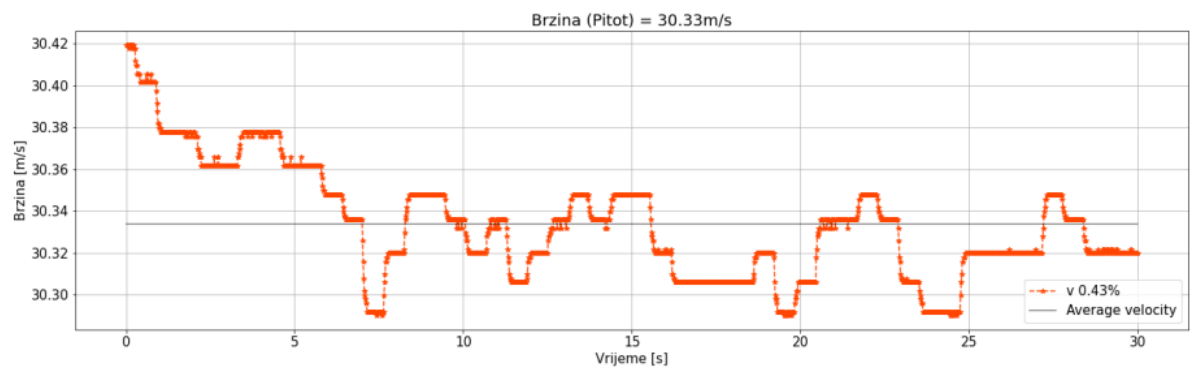
Slika 6.2 Prikupljeni podaci oscilacije brzina strujanja s Hot Wire – a pri prosječnim brzinama: a) 7.55 m/s, b) 15.84 m/s, c) 23.9 m/s



a)



b)



c)

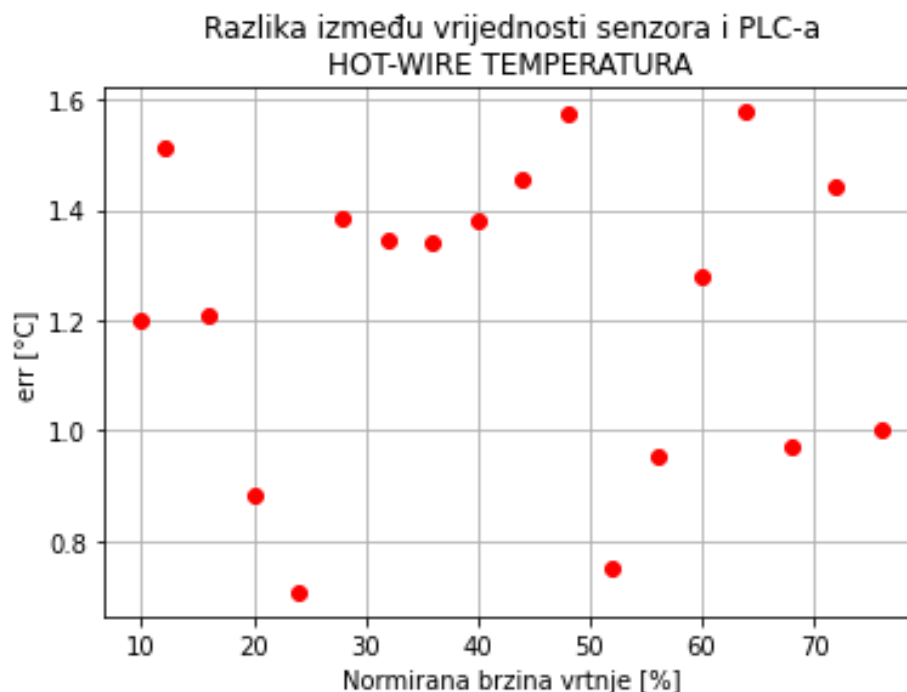
Slika 6.3 Prikupljeni podaci oscilacije brzina strujanja s Average Pitota pri prosječnim brzinama: a) 4.15 m/s, b) 17.14 m/s, c) 30.33 m/s

Ovi grafovi dobiveni su pokretanjem Python skripte te se iz njih može iščitati da brzine strujanja, i kod Average Pitota i kod Hot Wirea, osciliraju u intervalu od  $\pm 0,1$  m/s pri većim i pri manjim brzinama. Kod Average Pitota oscilacije ne prelaze 1,2%, a kod Hot Wirea 0,5% iz čega možemo zaključiti da su provedena mjerenja unutar zadovoljavajućih grešaka preciznosti korištenih transmitera.

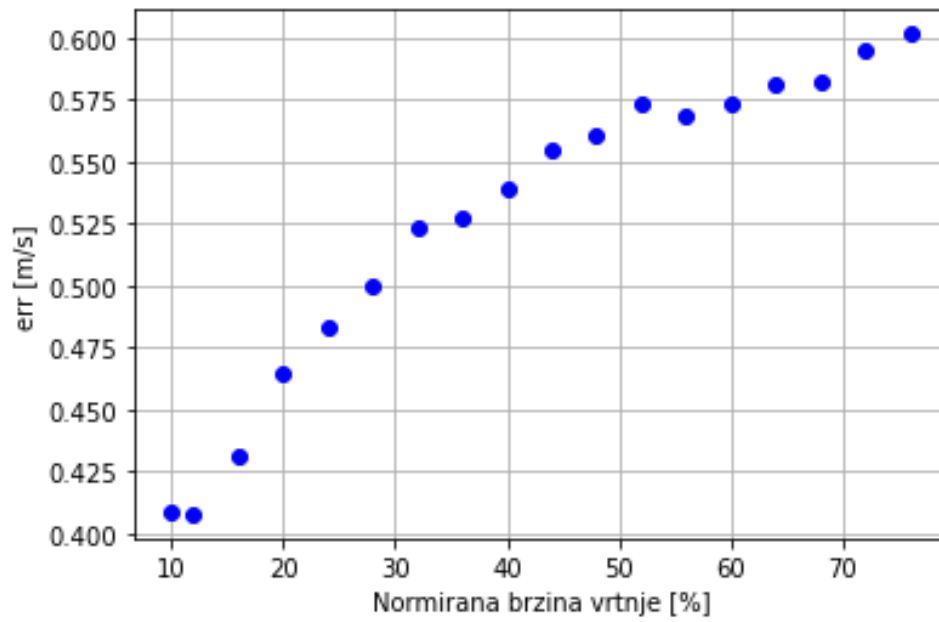
## 6.2 Usporedba rezultata Average Pitota i Hot Wire – a između PLC – a i direktno preko transmitera

Do odstupanja u prikupljenim podacima pomoću PLC – a i direktno preko transmitera može doći zbog raznih čimbenika, a neki od njih su slijedeći: vibracije koje su uzrokovane turbulentnim strujanjem zraka, kalibracija uređaja, brzina obrade podataka, pogreške koje nastaju prilikom testiranja te signalni šum. Signalni šum nastaje zbog smetnji, koje mogu biti električne ili elektromagnetske, u vodovima koji prenose signale između PLC – a i senzora te time utječe na točnost izmjerenih podataka. Podaci ovih mjerenja također su prikupljeni nakon ručne kalibracije PLC – a, koja je bila izvedena na isti način kao i kod prvih mjerenja.

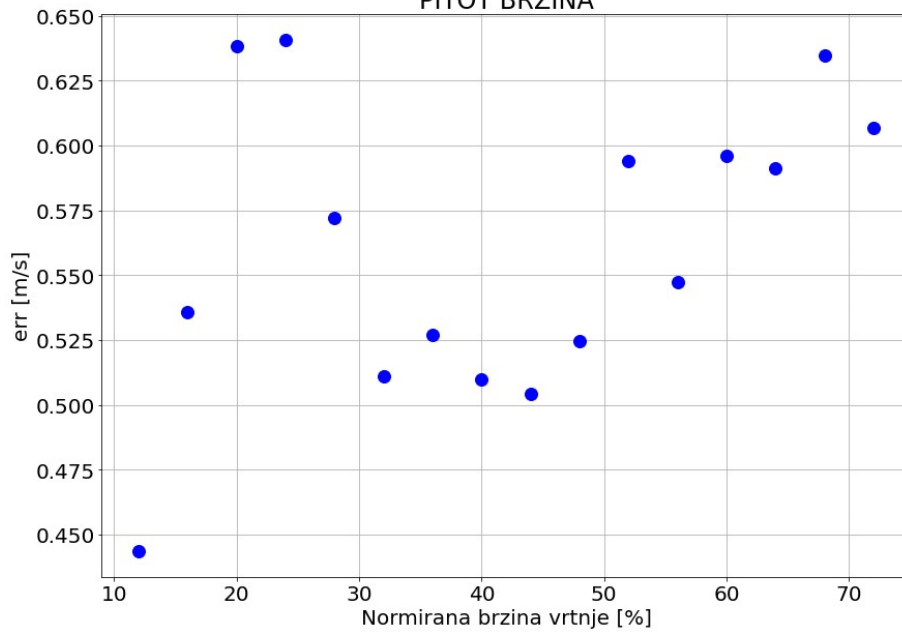
Odstupanja su prikazana na grafovima (slika 6.3) pri mjerenju temperature, brzine i tlaka na Hot Wireu i Average Pitotu. Grafovi koji prikazuju odstupanja na Hot Wireu su dobiveni iz jedne Python skripte, a grafovi koji prikazuju odstupanja na Average Pitotu dobiveni su pomoću druge Python skripte. Grafovi prikazuju točne vrijednosti odstupanja podataka dobivenih preko senzora od podataka prikupljenih PLC – om. Porastom normirane brzine vrtnje ventilatora, kod mjerenja brzine preko Hot Wirea i tlaka preko Average Pitota, odstupanja se u pravilu povećavaju. Prilikom mjerenja temperature preko Hot wirea i brzine preko Pitota, odstupanja koja su dobivena raznoliko osciliraju neovisno o porastu normirane brzine vrtnje ventilatora. Postojanje ovih odstupanja je očekivano zbog prethodno navedenih razloga, ali uvijek je poželjno da ona budu što manja.

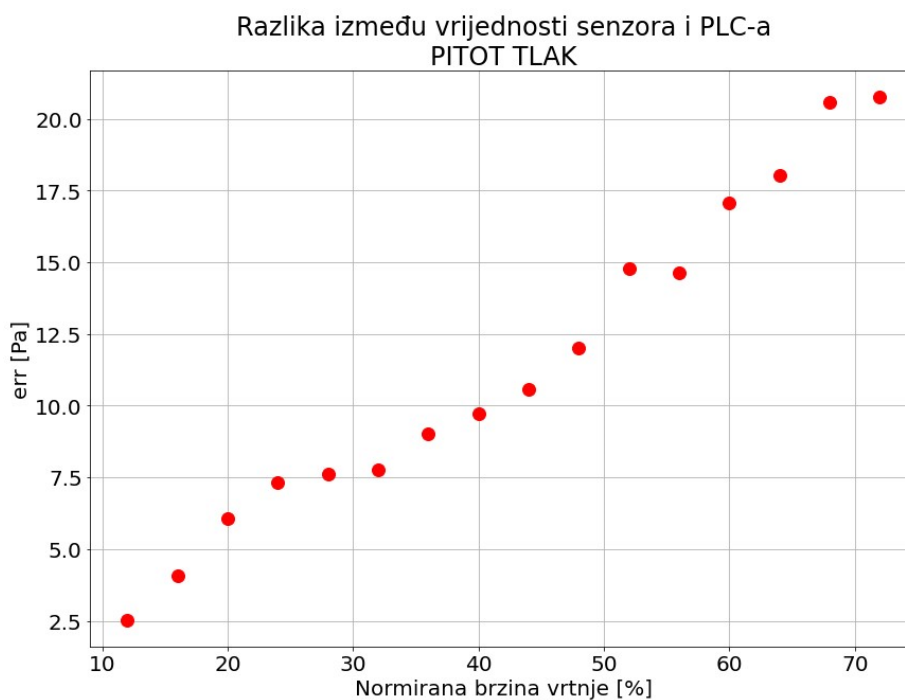


Razlika između vrijednosti senzora i PLC-a  
HOT-WIRE BRZINA



Razlika između vrijednosti senzora i PLC-a  
PITOT BRZINA

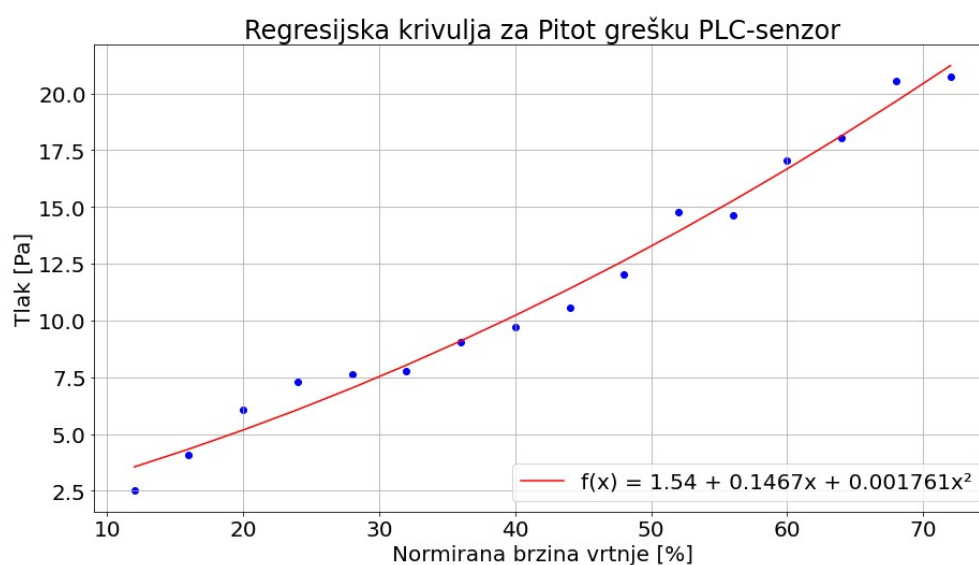
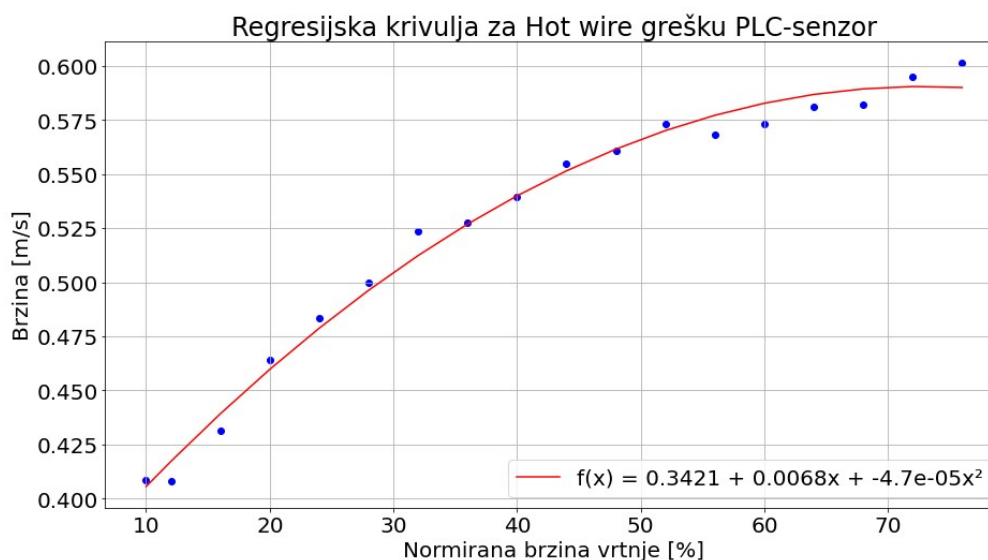




*Slika 6.4 Odstupanja prikupljenih podataka putem PLC – a i direktno preko transmitera za Average Pitot i Hot Wire*

### 6.3 Funkcija odstupanja rezultata dobivenih PLC – om i direktno preko transmitera od Hot – wirea i Pitota

Odrađena su mjerenja s različitim vrijednostima normirane brzine vrtnje, čije su se vrijednosti povećavale po 4%, te je dobiveno mnogo podataka pomoću kojih je dobivena regresijska funkcija. Ova funkcija je korisna za preračunavanje vrijednosti koje se prikupljaju putem PLC – a u točne vrijednosti koje su zadane transponderom. Korištenjem jedne Python skripte izračunate su funkcije drugog reda s kojom se najbolje opisuju odstupanja vrijednosti brzina i tlakova PLC-a od direktnih vrijednosti na transponderu dobivenih preko Hot Wirea i Pitota. Njihove regresijske krivulje dobivene su pokretanjem druge Python skripte i prikazane su na grafovima, zajedno sa pripadajućim funkcijama, na slici 6.4. Prikazane funkcije su od velike važnosti jer one omogućuju kalibraciju vrijednosti koje se dobiju preko PLC – a. Korištenjem ovih funkcija dobivaju se točne vrijednosti s minimalnim odstupanjima od realnih, bez potrebe za konverterom i podešavanjem minimuma i maksimuma kao što se radilo prilikom prvih mjerenja.

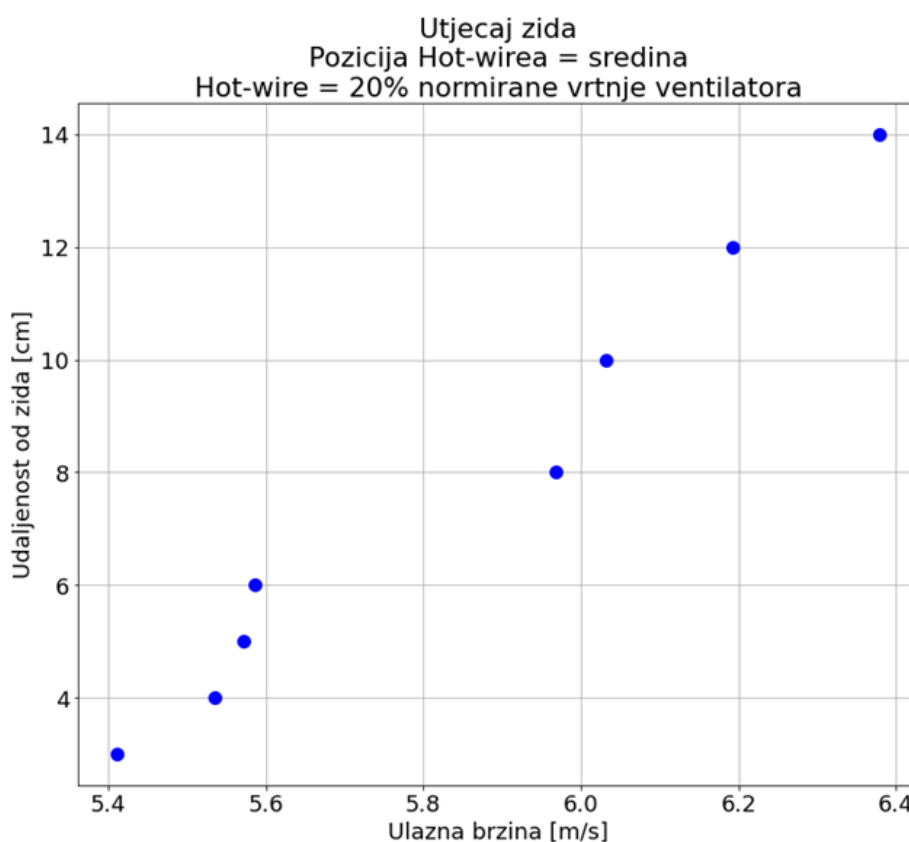


*Slika 6.5 Grafovi regresijskih krivulja i njihove funkcije*

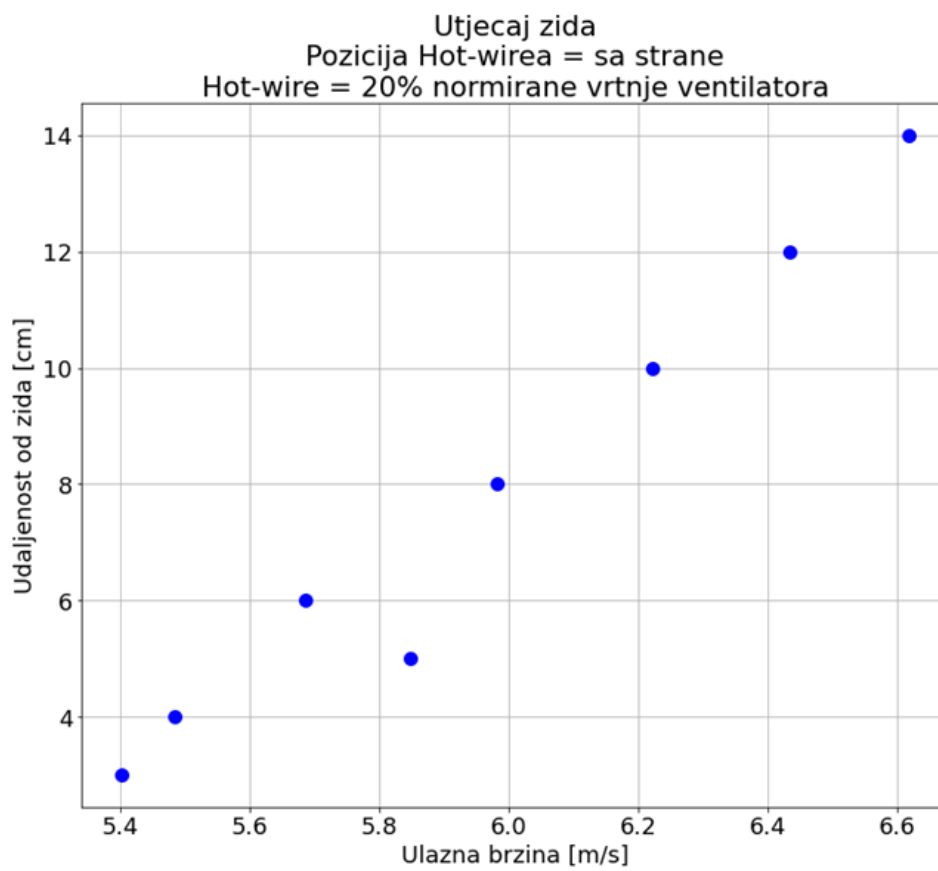
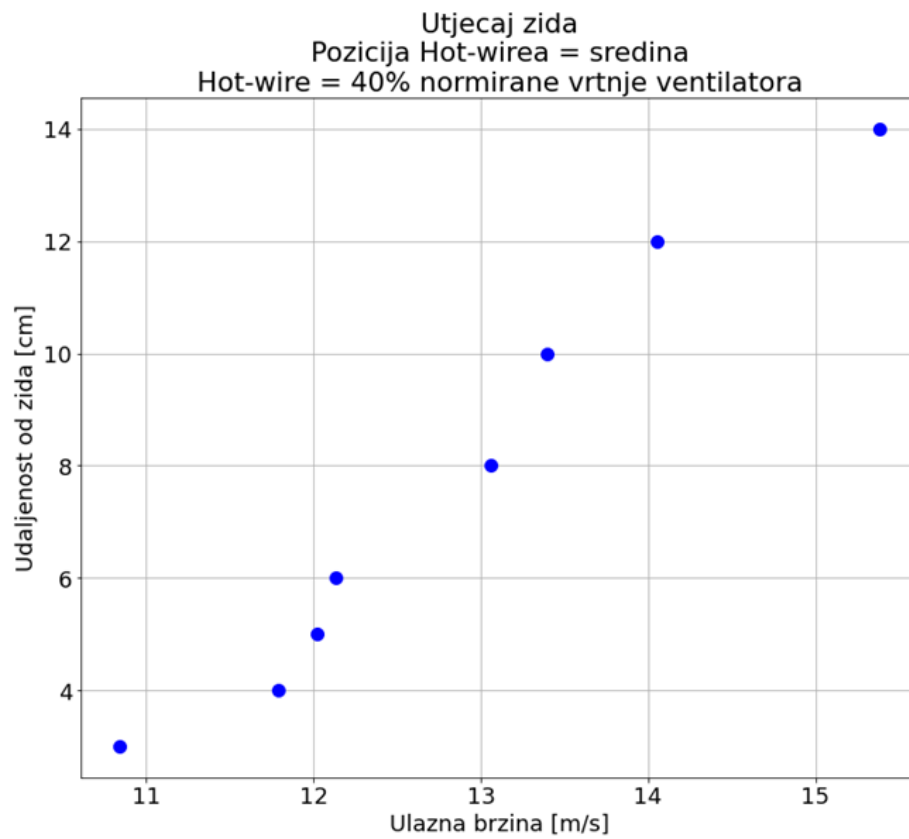
#### 6.4 Utjecaj zida na uniformnost strujanja za Hot – wire

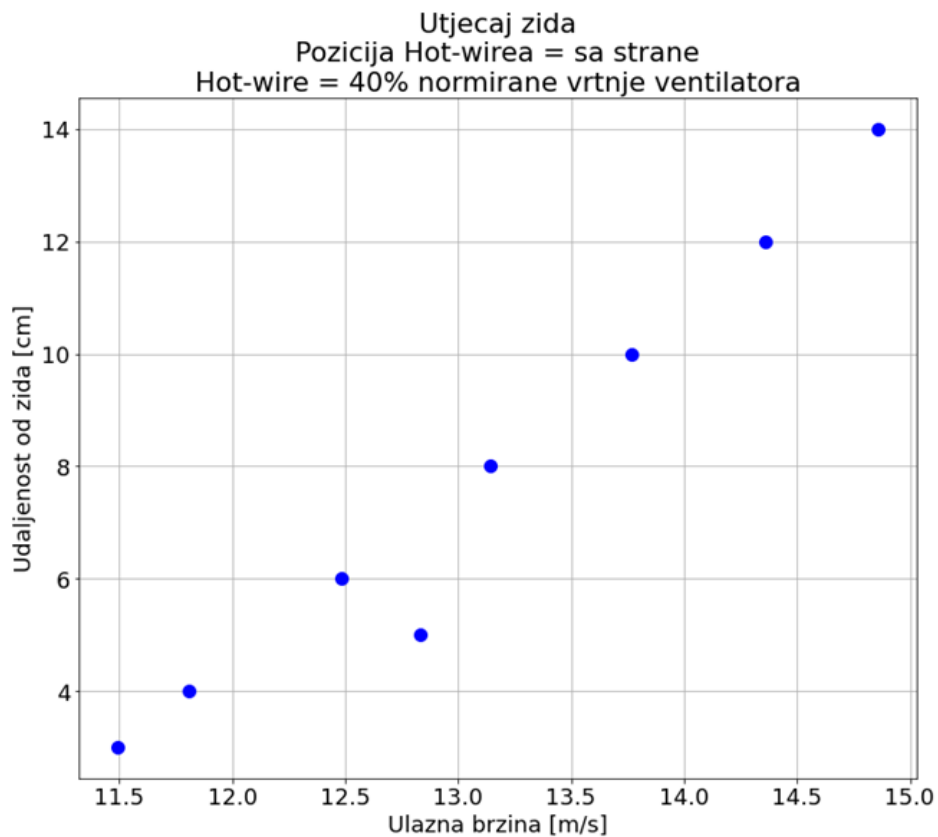
Način utjecaja zidova zračnog tunela na strujanje zraka unutar tunela je objašnjen u poglavlju 5.2. Također, izvršena su mjerenja koja proučavaju efekte zida prilikom prikupljanja podataka o brzini strujanja putem Hot Wire – a. Mjerenja su se provodila tako što je Hot Wire bio postavljen na sredini zračnog tunela te sa strane, odnosno bliže stijenci zida. Hot Wire se pomicao i po dubini tunela za ova dva slučaja, 3 cm od gornjeg dijela testne sekcije do 14 cm od gornjeg dijela testne sekcije. Također, mjerenja su se odradila pri 20% i 40% normirane brzine vrtnje ventilatora. Poznavajući kako zidovi zračnog tunela utječu na strujanje zraka, može se očekivati da će se brzine povećavati udaljavanjem Hot Wirea po dubini od gornjeg dijela testne sekcije. Isto tako, brzine očitane putem Hot Wirea pozicioniranog na sredini tunela bi trebale biti veće od brzina očitanih

kada je Hot Wire pozicioniran blizu zida tunela. Pomoću Python skripte prikupljeni rezultati su prikazani u obliku grafova (slika 6.5.). Iz prikazanih grafova može se zaključiti kako konstrukcija zatvorenog zračnog tunela Tehničkog fakulteta u Rijeci ima prostora za unaprjeđenje. Na to nam ukazuje nelinearan rast brzine i neočekivano ponašanje struje zraka udaljavanjem od stijenka zida. Najznačajniji primjer vidljiv je na trećem i četvrtom grafu na slici 6.5, kada je Hot Wire postavljen blizu stijenke zida. Tada je brzina strujanja manja kada je Hot Wire udaljen 6 cm od gornjeg dijela testne sekcije nego kada je udaljen 5 cm, a trebalo bi biti obrnuto. Također, predviđalo se da će vrijednosti brzine postati sličnije ili gotovo jednake kako se Hot Wire udaljavao od zida, međutim, to se nije dogodilo. Iz toga se zaključuje kako uniformnost tunela nije ispunila očekivanja.





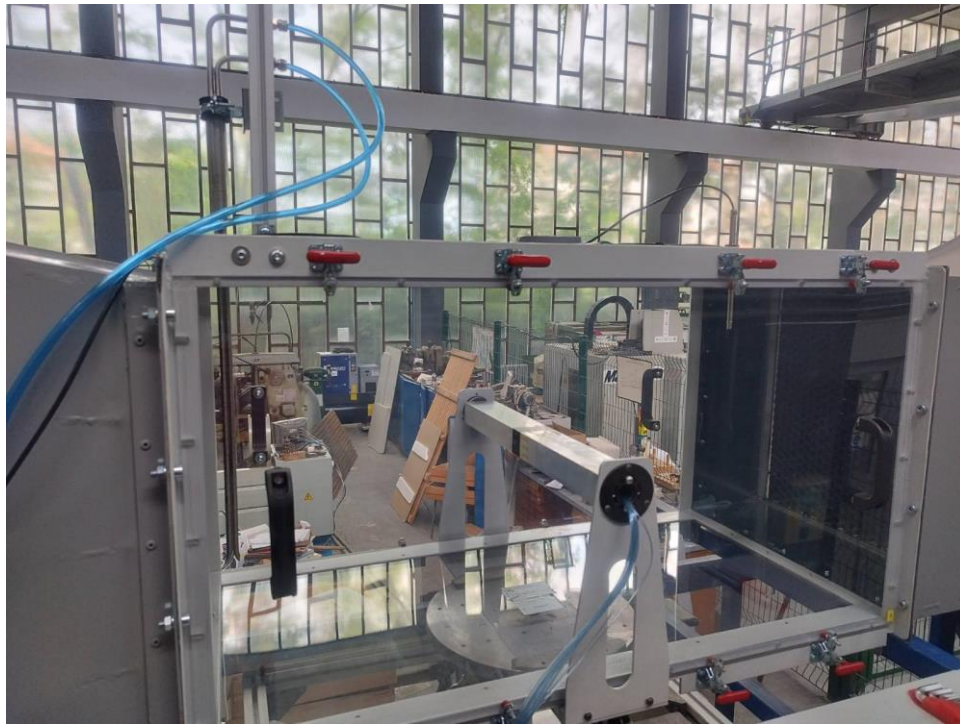




*Slika 6.6 Utjecaj zida na prikupljene podatke brzine strujanja preko Hot Wirea*

## 6.5 Mjerenja opstrujavanja zraka u području iza kvadra

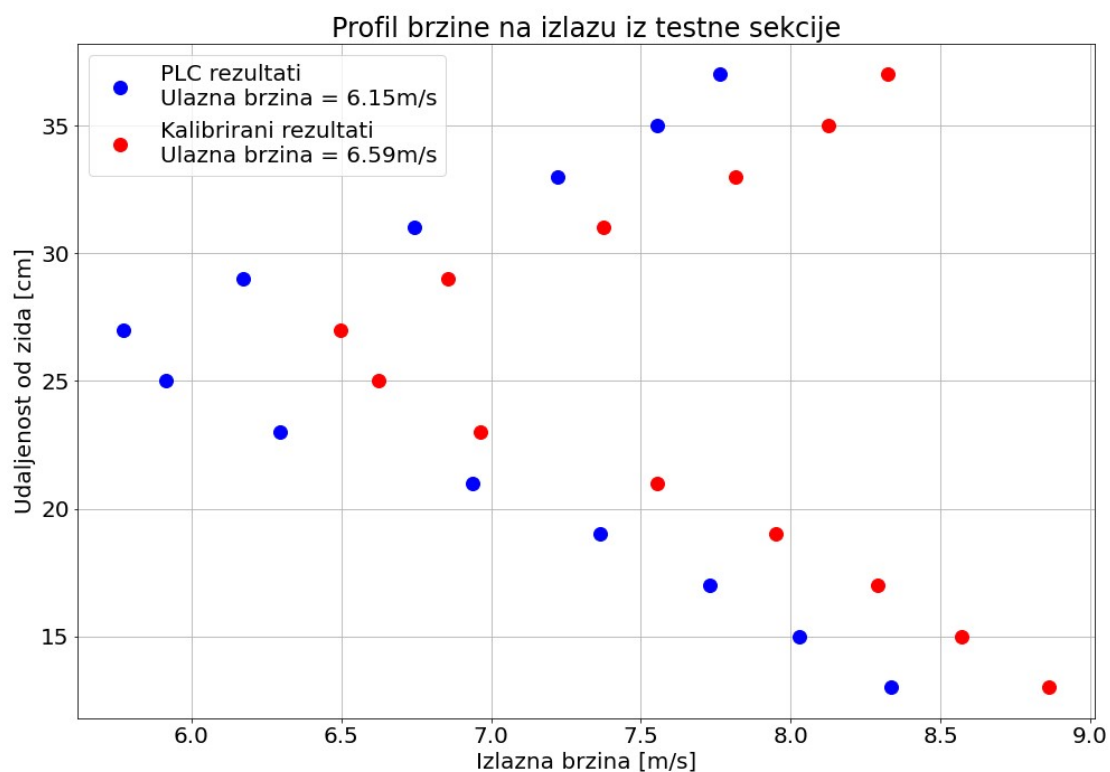
Pomoću Python skripte analiziralo se strujanje zraka oko kvadra. Na ulazu u testnu sekciju nalazi se Hot Wire kojim se prikupljaju ulazne brzine, dok se Pitot nalazi na izlazu iz testne sekcije (slika 6.6.). Pomicanjem Pitota po vertikali dobio se profil brzine strujanja koji nije uniforman zbog kvadra koji se nalazio u testnoj sekciji tijekom provođenja mjerenja. Ovim mjerenjem može se zaključiti koliko određeni objekt, kvadar, utječe na stvaranje turbulentnog područja te koliki je pad brzine u tom području.



*Slika 6.7 Pozicija Hot Wirea (desno od kvadra) i Pitota (lijevo od kvadra) u testnoj sekciji*

Provedeno je ispitivanje u kojem se promatralo strujanje zraka na izlazu iz testne sekcije, odnosno iza kvadra. Pretpostavlja se da će iznos profila brzine strujanja biti najmanji kada se Pitot nalazi u području iza kvadra, te će sukladno tome rasti kako se udaljava od tog područja. Frekvencija prikupljanja podataka, u intervalu od 40 s, za ovo mjerenje iznosila je 10 Hz te je normirana brzina vrtnje ventilatora iznosila 20%. Rezultati ispitivanja zadovoljavaju pretpostavku te su prikazani na grafu (slika 6.7.) koji je dobiven pomoću gore spomenute Python skripte. Iz grafa je vidljivo da je izlazna brzina najmanja kada je Pitot udaljen oko 25 cm od stijenke zida, što je područje iza kvadra, te da udaljavanjem od tog područja brzina raste. Može se zaključiti da u području iza kvadra vlada turbulentno strujanje, odnosno da je to područje wake – a. Brzine na izlazu su se povećale u odnosu na vrijednost ulazne brzine u područjima udaljenijim od područja iza kvadra. U području iza kvadra, izlazne brzine su manje nego ulazna brzina. Poznavajući kako stijenke zida zračnog tunela utječe na protok zraka, brzina strujanja trebala bi poprimati veće vrijednosti udaljavajući Pitot od zida tunela. To u ovom slučaju nije tako zbog utjecaja kvadra. Na grafu su također vidljive razlike u vrijednostima rezultata prikupljenih PLC – om i pomoću regresijske funkcije koja je prikazana u poglavlju 6.3. Prisustvo ovih odstupanja je normalno, zbog razloga navedenih u prvom odlomku poglavlja 6.2. Provođenjem ovakvih mjerenja, u kojima se proučava raspon brzine po vertikali na izlazu iz testne sekcije, odnosno iza objekta, može se dobiti veličina turbulentne zone. Pomoću te

informacije može se odrediti koliki je otpor promatranog objekta što je od velike važnosti pri rješavanju optimizacijskog problema popravljanja aerodinamike tog objekta.



Slika 6.8 Iznos profila brzine na izlazu iz testne sekcije u ovisnosti o položaju Pitota

## 7 ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu objasnio se što je i čime se bavi znanost zvana aerodinamika te su detaljnije objašnjeni pojave i pojmovi koji su potrebni za razumijevanje provedene laboratorijske analize optjecanja objekta. Neke od tih pojava su turbulentna zona koja se stvara iza ispitivanog objekta te utjecaj stijenki testne sekcije na uniformnost strujanja zraka. Provela su se mjerenja kojima su se dobili podaci koji opisuju strujanje zraka oko kvadra dimenzija 600 x 400 x 500 mm i koji su potrebni za analizu utjecaja kalibracije senzoričke na rezultate mjerenja.

Mjerenja koja su se analizirala u ovom radu izvodila su se na zatvorenom zračnom tunelu koji se nalazi u Laboratoriju za mehaniku fluida Tehničkog fakulteta u Rijeci. Pitot, Average Pitot i Hot Wire dio je senzoričke koja se nalazi na ovom zračnom tunelu i koja je omogućila podatke potrebne za provedenu analizu. Podaci su se sa senzoričke prikupljali pomoću PLC – a ili direktno preko konvertera.

Prilikom provođenja laboratorijske analize optjecanja objekta izvršilo se nekoliko mjerenja u eksperimentalnom zračnom tunelu. Prva mjerenja provela su se kako bi se uočilo osciliranje vrijednosti brzina strujanja pomoću Average Pitota i Hot Wirea u vremenu te kako bi se napravila kalibracija njihovim transmiterima. Ova kalibracija provodila se ručno, odnosno podešavanjem vrijednosti minimuma i maksimuma tlakova, brzina i temperatura kako bi PLC ispravno pretvarao vrijednosti napona u potrebne jedinice. Kasnije se cijeli proces automatizirao što je od velike važnosti za lakše prikupljanje točnih podataka. Prilikom izvođenja slijedećih mjerenja utvrdilo se postojanje odstupanja vrijednosti rezultata temperature, brzine i tlaka mjerenih Average Pitotom i Hot Wireom, između PLC – a i direktno preko transmitera. Ova odstupanja su očekivana zbog raznih razloga kao što su: vibracije, brzina obrade podataka i signalni šum, ali je cilj da ona budu što manja. Nadalje, automatiziranjem procesa i korištenjem Python skripte dobivene su regresijske krivulje i njihove funkcije koje najbolje opisuju odstupanja rezultata vrijednosti brzina i tlakova PLC – a od direktnih vrijednosti na transmiteru te se pomoću dobivenih krivulja izračunavaju točni podaci. Ovo je veliko postignuće provedenih mjerenja. Provedena su i mjerenja kojima se analizirao utjecaj zida na prikupljanje podataka brzine protoka preko Hot Wirea. Ova mjerenja su ukazala na to kako konstrukcija zatvorenog zračnog tunela Tehničkog fakulteta u Rijeci ima prostora za unaprjeđenje. Do ovog zaključka se došlo zbog nelinearnog rasta brzine strujanja udaljavanjem od stijenki zida tunela. Zadnja mjerenja koja su se odradila imala su svrhu određivanja opstrujavanja zraka u području iza kvadra, kako bi se odredilo postojanje turbulentne zone. Rezultati ovog ispitivanja zadovoljili su pretpostavku da će iznos profila brzine biti najmanji kada se Pitot nalazi u području iza kvadra te da će sukladno tome rasti kako se udaljava od tog

područja. Dobiveni rezultati ukazuju na to da u području iza kvadra vlada turbulentno strujanje, odnosno da je to područje wake – a.

## LITERATURA

- [1] Kranjčević, L.: „Mehanika fluida – Skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci“, Rijeka, 2020.
- [2] Čarija, Z.: „Dio predavanja kolegija – Hidraulički strojevi“, Rijeka, 2021.
- [3] S Internet adrese: <https://www.informit.com/articles/article.aspx?p=2832417&seqNum=4>, 02.05.2023.
- [4] S Internet adrese: <https://www.britannica.com/science/fluid-physics>, 02.05.2023.
- [5] S Internet adrese: <https://gaugehow.com/lesson/types-of-fluids/>, 04.05.2023.
- [6] S Internet adrese: <https://www.quora.com/Why-is-a-tear-drop-shape-more-aerodynamic-with-a-round-head-than-with-a-sharp-head-as-if-mirroring-the-back-end>, 04.05.2023.
- [7] S Internet adrese: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-aerodynamics-58.html>, 04.05.2023.
- [8] S Internet adrese: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/four-forces-on-an-airplane/>, 05.05.2023.
- [9] S Internet adrese: <https://geniuserc.com/how-aircraft-fly-and-aerodynamics-forces/>, 05.05.2023.
- [10] S Internet adrese: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/dragco.html>, 20.05.2023.
- [11] S Internet adrese: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/liftco.html>, 20.05.2023.
- [12] S Internet adrese: <https://www.znrfak.ni.ac.rs/SERBIAN/010-STUDIJE/OAS-4-1/III%20GODINA/PREDMETI/ZNR-305-PRIMENJENA%20MEHANIKA%20FLUIDA/PREDAVANJA/2019-20/Mehanika%20fluida%20P11.pdf>, 21.05.2023.
- [13] Matas, A.: „Profil brzine strujanja zraka u zračnom tunelu“, završni rad, Split, 2019.
- [14] S Internet adrese: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=621>, 10.06.2023.
- [15] S Internet adrese: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunpart.html>, 12.06.2023.
- [16] S Internet adrese: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>, 12.06.2023.
- [17] S Internet adrese: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>, 13.06.2023.

- [18] S Internet adresse: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>, 13.06.2023.
- [19] S Internet adresse: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html>, 20.06.2023.
- [20] S Internet adresse: <https://circuitglobe.com/hot-wire-anemometer.html> , 20.06.2023.
- [21] S Internet adresse: <https://instrumentationtools.com/hot-wire-anemometer-principle/>, 20.06.2023.
- [22] S Internet adresse: <https://www.watelectronics.com/hot-wire-anemometer/>, 10.07.2023.
- [23] S Internet adresse: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>, 10.07.2023.
- [24] S Internet adresse: [https://www.globalspec.com/learnmore/sensors\\_transducers\\_detectors/pressure\\_sensing/pressure\\_scanners](https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/pressure_sensing/pressure_scanners), 13.07.2023.
- [25] S Internet adresse: <https://new.abb.com/products/measurement-products/measurement-products-blog/what-is-a-pressure-transmitter>, 13.07.2023.
- [26] Ivančić, F.: „Konstrukcija i kalibracija šest-osnog senzora sile za primjenu u zračnom tunelu“, diplomski rad, Rijeka, 2021.
- [27] S Internet adresse: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/programmed-logic-controller-PLC> , 16.07.2023.
- [28] S Internet adresse: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/bluff-body-flows/> , 18.07.2023.
- [29] S Internet adresse: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/BGP/boundlay.html> , 18.07.2023.
- [30] Cengel, Y. A.; Cimbala J.M.: „Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications“, SAD, 2014.



## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Najaerodinamičniji oblik – oblik suze [6].....	4
Slika 2.2 Četiri sile letenja [9].....	4
Slika 3.1 Geometrijska sličnost modela i izvedbe [2].....	9
Slika 3.2 Kinematička sličnost modela i izvedbe [2].....	10
Slika 3.3 Dinamička sličnost modela i izvedbe [2].....	11
Slika 4.1 Jedan od prvih zračnih tunela Gustave Eiffela [13].....	16
Slika 4.2 Zatvoreni zračni tunel i njegovi osnovni dijelovi [15].....	18
Slika 4.3 Otvoreni zračni tunel i njegovi osnovni dijelovi [17].....	19
Slika 4.4 Shema Pitotove cijevi i Bernoullijeva jednadžba [19].....	21
Slika 4.5 Average Pitot i transponder na koji je priključen.....	22
Slika 4.6 Konstrukcija anemometra s ugrijanom žicom [21] i Wheatstoneov most [23].....	23
Slika 4.7 Metoda konstantne struje [20].....	24
Slika 4.8 Metoda konstantne temperature [20].....	24
Slika 4.9 Anemometar s ugrijanom žicom i transponder na koji je spojen.....	25
Slika 5.1 Oblik i veličina turbulentne zone u ovisnosti o obliku objekta [28].....	29
Slika 5.2 Granični sloj [29].....	30
Slika 5.3 Razvoj profila brzine [13].....	31
Slika 5.4 Utjecaj stanja stijenke i vrste strujanja na profil brzine protoka zraka [13].....	32
Slika 6.1 Model zatvorenog zračnog tunela Tehničkog fakulteta u Rijeci.....	33
Slika 6.2 Prikupljeni podaci oscilacije brzina strujanja s Hot Wire – a pri prosječnim brzinama: a) 7.55 m/s, b) 15.84 m/s, c) 23.9 m/s.....	34
Slika 6.3 Prikupljeni podaci oscilacije brzina strujanja s Average Pitota pri prosječnim brzinama: a) 4.15 m/s, b) 17.14 m/s, c) 30.33 m/s.....	35
Slika 6.4 Odstupanja prikupljenih podataka putem PLC – a i direktno preko transpondera za Average Pitot i Hot Wire.....	38
Slika 6.5 Grafovi regresijskih krivulja i njihove funkcije.....	39
Slika 6.6 Utjecaj zida na prikupljene podatke brzine strujanja preko Hot Wirea.....	42
Slika 6.7 Pozicija Hot Wirea (desno od kvadra) i Pitota (lijevo od kvadra) u testnoj sekciji.....	43
Slika 6.8 Iznos profila brzine na izlazu iz testne sekcije u ovisnosti o položaju Pitota.....	44

## SAŽETAK

U ovom završnom radu prikazani su rezultati laboratorijske analize strujanja zraka oko određenog objekta, kvadra. Dobivene su vrijednosti odstupanja prikupljenih podataka putem PLC – a i direktno preko transmitera za Average Pitot i Hot Wire. U radu su istaknute i regresijske krivulje koje su dobivene na temelju razlike očitavanja između PLC – a i transmitera te se mogu koristiti ubuduće za različite normirane brzine vrtnje ventilatora kako bi se došlo do točnih podataka i preko PLC – a. Provedena su i mjerenja koja omogućuju analizu utjecaja zida na uniformnost strujanja zraka te mjerenja kojima se opisuje turbulentno područje iza kvadra. Također, u ovom završnom radu objašnjeni su pojmovi vezani za aerodinamičnost objekata, vrste i dijelovi zračnih tunela, sensorika koja se primjenjuje prilikom mjerenja te problemi koji se pojavljuju prilikom strujanja fluida oko određenog tijela.

Ključne riječi: aerodinamika, zračni tunel, sensorika, laboratorijska analiza

## **SUMMARY**

This undergraduate thesis presents the results of a laboratory analysis of airflow around a specific object, a cube. Deviation values were obtained from data collected via PLC and directly through the Average Pitot and Hot Wire transmitters. The work highlights regression curves derived from the differences between PLC and transmitter readings, which can be used in the future for various standardized fan rotation speeds to obtain accurate data through the PLC. Measurements were also conducted to analyze the influence of a wall on airflow uniformity and to describe the turbulent region behind the cube. Additionally, this undergraduate thesis explains concepts related to object aerodynamics, types and components of wind tunnels, the sensing technology used in measurements, and challenges arising during fluid flow around a particular body.

Keywords: aerodynamics, wind tunnel, sensing technology, laboratory analysis