

Karakterizacija pitot-statičkih cijevi

Štulina, Šime

Master's thesis / Diplomski rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:684078>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Šime Štulina

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Josip Stepanić, dipl.ing.

Student:

Šime Štulina

Zagreb, 2011.

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

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj podršci i pomoći tijekom studiranja, tvrtci Croatia Airlines na ustupanju literature i fotografija te svome mentoru Prof.dr.sc. Josipu Stepaniću na stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Šime Štulina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Šime Štulina** Mat. br.: 0035156885

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KARAKTERIZACIJA PITOT-STATIČKIH CIJEVI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CHARACTERISATION OF PITOT-STATIC TUBES**

Opis zadatka:

Uvodno opisati sustav Pitot-statički te istaknuti njegove konstrukcijske i radne značajke. Navesti i analizirati glavne karakteristike zastupljenijih vrsta Pitot-statičkih cijevi.

Postaviti sustav za karakterizaciju Pitot-statičkih cijevi kao osjetnika. Istaknuti raspon primjenjivosti sustava i potrebne preduvjete za dobivanje statistički utemeljenih rezultata karakterizacije. Analizirati izvore sustavnih pogreški. Provesti seriju pokusa za ispitivanje radnih svojstava modela sustava u karakterističnim letnim uvjetima odnosno njima bliskim uvjetima te karakterizirati uzorke Pitot-statičkih cijevi. Kritički razmotriti dobivene rezultate i usporediti ih s rezultatima dobivenim u prethodnim radovima vezanim uz karakterizaciju Pitotovih i Pitot-statičkih cijevi.

Analizirati primjenjivost karakteriziranih Pitot-statičkih cijevi u različitim uvjetima leta. Razmotriti uzročno-posljedičnu vezu izvedbe pojedinih dijelova osjetnika na rezultate mjerenja.

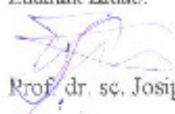
Zadrtak zadan:
08. rujna 2011.

Rok predaje rada:
10. studenog 2011.

Predvideni datumi obrane:
16. – 18. studenog 2011.

Zadrtak zadan:

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Josip Stepanić


Prof. dr. sc. Vedran Žanić

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	5
POPIS SLIKA	7
POPIS TABLICA.....	9
POPIS OZNAKA	10
SAŽETAK.....	11
1. UVOD	12
1.1. Razvoj Pitot – statičkog sustava	13
1.2. Konstrukcijske i radne značajke Pitot - statičkog sustava.....	13
2. TEORIJSKA PODLOGA I PRORAČUNI PITOT – STATIČKIH CIJEVI	18
2.1. Bernoulijeva jednadžba	18
2.2. Jednadžba manometra.....	20
2.3. Primjena Bernoulijeve jednadžbe kod Pitot – statičkih cijevi.....	21
3. POSTUPAK I CILJEVI IZVOĐENJA MJERENJA	24
4. KARAKTERIZACIJA STRUJANJA ZRAKA IZ VENTILATORA	25
4.1. Oprema i način ispitivanja.....	25
4.2. Rezultati mjerenja.....	29
5. MJERENJA BRZINE STRUJANJA ZRAKA PITOT-STATIČKIM CIJEVIMA.....	36
5.1. Postavljanje mjerne opreme i opisivanje postupka mjerenja.....	36
5.2. Mjerenja na poziciji 1	42
5.2.1. Rezultati mjerenja za cijev PS-1	43
5.2.2. Rezultati mjerenja za cijev PS-2	44
5.2.3. Rezultati mjerenja za cijev PS-3	45
5.2.4. Rezultati mjerenja za PS-4	46
5.2.5. Rezultati mjerenja za PS-5	47
5.2.6. Rezultati mjerenja za cijev PS-6	48

5.2.7.	Rezultati mjerenja za cijev PS-7	49
5.2.8.	Rezultati mjerenja za PS-8	50
5.2.9.	Rezultati mjerenja za cijev PS-9	51
5.2.10.	Rezultati mjerenja za cijev PS-10.....	52
5.2.11.	Prosječne visine i prosječne brzine za sve cijevi na poziciji 1	52
5.3.	Usporedba rezultata s referentnim vrijednostima za poziciju 1	53
5.4.	Mjerenja na poziciji 2	55
5.4.1.	Rezultati mjerenja za sve cijevi na poziciji 2.....	55
5.5.	Usporedba rezultata s referentnim vrijednostima za poziciju 2	57
5.6.	Relativna odstupanja srednjih vrijednosti.....	58
6.	KARAKTERIZACIJA STRUJANJA OKO PITOT-STATIČKIH CIJEVI	60
6.1.	Karakterizacija strujanja oko cijevi PS-4	61
6.2.	Karakterizacija strujanja oko PS-8	62
7.	ZAKLJUČAK	64
	LITERATURA.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1-1	Pitot-statički sustav na zrakoplovu Dash Q400 [3]	14
Slika 1-2	Pitot-statičke cijevi na zrakoplovu Dash Q400 [3].....	14
Slika 1-3	Pitot-statički sustav zrakoplova A320	15
Slika 1-4	Distribucija tlakova kroz Pitot – statički sustav [4].....	16
Slika 1-5	Pitot cijevi za različite brzine letenja: a) zrakoplov generalne avijacije, b) komercijalni putnički zrakoplov i c) nadzvučni borbeni zrakoplov (slike preuzete sa www.airliners.net).....	17
Slika 2-1	Promjena tlaka okomito na strujnice [6].....	19
Slika 2-2	Diferencijalni manometar [6].....	21
Slika 2-3	Mjerenje statičkog i ukupnog tlaka [7]	21
Slika 2-4	Pitot – statička cijev [6], [7]	23
Slika 4-1	Ventilator	25
Slika 4-2	Mjerenje broja okretaja ventilatora stroboskopom	26
Slika 4-3	Anemometar	26
Slika 4-4	Postavljena oprema i mjerne pozicije	27
Slika 4-5	Izvođenje mjerenja.....	28
Slika 4-6	Prosječna brzina strujanja duž y osi s označenim odabranim područjima	34
Slika 4-7	Prosječna brzina strujanja duž z osi s označenim odabranim područjima.....	35
Slika 5-1	Pitot-statičke cijevi korištene pri mjerenjima	37
Slika 5-2	Postavljena mjerna oprema	38
Slika 5-3	Postavljena oprema i mjerne pozicije	38
Slika 5-4	Mjerna pozicija 1	39
Slika 5-5	Mjerna pozicija 2	40
Slika 5-6	Skica očitavanja na U-cijevi	41
Slika 5-7	Cijev PS-1	43
Slika 5-8	Cijev PS-2	44
Slika 5-9	Cijev PS-3	45
Slika 5-10	Cijev PS-4.....	46
Slika 5-11	Cijev PS-5	47
Slika 5-12	Cijev PS-6.....	48

Slika 5-13	Cijev PS-7.....	49
Slika 5-14	Cijev PS-8.....	50
Slika 5-15	Cijev PS-9.....	51
Slika 5-16	Cijev PS-10.....	52
Slika 5-17	Grafički prikaz i usporedba rezultata za poziciju 1	53
Slika 5-18	Mjerenja na poziciji 2	55
Slika 5-19	Grafički prikaz i usporedba rezultata za poziciju 2	57
Slika 5-20	Relativna odstupanja za poziciju 1 i 2	59
Slika 6-1	Karakterizacija strujanja oko Pitot-statičkih cijevi.....	60
Slika 6-2	PS-4 sa označenim pozicijama za mjerenje tlaka	61
Slika 6-3	PS-8 sa označenim pozicijama za mjerenje tlaka	62

POPIS TABLICA

Tabela 1	Brzine na udaljenosti $x = 2$ m	29
Tabela 2	Brzine na udaljenosti $x = 1,6$ m	30
Tabela 3	Brzine na udaljenosti $x = 1,2$ m.....	31
Tabela 4	Brzine na udaljenosti $x = 0,8$ m	32
Tabela 5	Brzine na udaljenosti $x = 0,4$ m	33
Tabela 6	Rezultati mjerenja za PS-1	43
Tabela 7	Rezultati mjerenja za PS-2.....	44
Tabela 8	Rezultati mjerenja za PS-3	45
Tabela 9	Rezultati mjerenja za PS-4.....	46
Tabela 10	Rezultati mjerenja za PS-5	47
Tabela 11	Rezultati mjerenja za PS-6	48
Tabela 12	Rezultati mjerenja za PS-7	49
Tabela 13	Rezultati mjerenja za PS-8	50
Tabela 14	Rezultati mjerenja za PS-9	51
Tabela 15	Rezultati za PS-10	52
Tabela 16	Prosječne visine i brzine za sve cijevi	52
Tabela 17	Rezultati mjerenja na poziciji 2.....	56
Tabela 18	Relativna odstupanja za poziciju 1	58
Tabela 19	Relativna odstupanja za poziciju 2.....	58
Tabela 20	Rezultati karakterizacije za PS-4.....	61
Tabela 21	Rezultati karakterizacije za PS-8.....	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
g	[m/s ²]	Gravitacija
h	[m]	Visina stupca fluida
p	[N/m ²]	Tlak
R	[m]	Radijus zakrivljenosti
t	[s]	Vrijeme
v	[m/s]	Brzina
\bar{v}	[m/s]	Prosječna brzina
v_{PS}	[m/s]	Brzina određena pomoću Pitot-statičke cijevi
\bar{v}_{PS}	[m/s]	Prosječna brzina određena pomoću Pitot-statičke cijevi
z	[m]	Geodetska visina
Δh	[m]	Razlika visina stupaca fluida
$\bar{\Delta h}$	[m]	Prosječna razlika visina stupaca fluida
Δv_r	[%]	Relativno odstupanje prosječne brzine
ρ	[kg/m ³]	Gustoća

SAŽETAK

U ovom radu uvodno su opisane radne i konstrukcijske značajke Pitot-statičkih cijevi i sustava te njihova primjena u zrakoplovstvu. Dan je kratak pregled povijesnog razvoja Pitot-statičkih cijevi. Obradena je teorijska podloga rada Pitot-statičkih te su dani izrazi za izračunavanje brzine pomoću tlakova izmjerenih Pitot-statičkim cijevima. Detaljno su opisana mjerenja izvedena anemometrom i Pitot-statičkim cijevima te su prikazani dobiveni rezultati.

1. UVOD

Suvremeno zrakoplovstvo vrlo je kompleksna grana, kako industrije, tako i prometa. Zrakoplove, s jednog stajališta, razmatramo kao cjelinu sastavljenu od međusobno povezanih sustava. Da bi sve to skupa funkcioniralo sustavi moraju biti prilagođeni radu u uvjetima u kojima se zrakoplov nalazi i najbolje iskoristiti te uvjete u svrhu pouzdanog i sigurnog letenja te prikupljanja podataka potrebnih za opisivanje stanja zrakoplova i okoline u kojoj se zrakoplov nalazi.

Od samih početka razvoja zrakoplovstva uvidjelo se da za siguran let zrakoplovom treba raspolagati sa više podataka. Ključni podatci koje dobivamo razmatrajući atmosferu oko zrakoplova su visina leta, brzina leta, brzina uspinjanja, odnosno spuštanja zrakoplova te napadni kut zrakoplova u odnosu na neporemećenu struju zraka. Da bi primjereno opisali atmosferu oko zrakoplova potrebno je imati sustav koji će mjeriti stanje atmosfere oko zrakoplova te pilotima davati potrebne podatke. Sustav koji se koristi za mjerenje stanja atmosfere oko zrakoplova naziva se Pitot-statički sustav.

U ovom radu opisane su konstrukcijske i radne značajke Pitot-statičkog sustava. Uvodno su dani neki povijesni podatci samog nastanka Pitot-statičkih cijevi. Također je dana i teorijska podloga Pitot-statičkog sustava, odnosno izrazi kojima možemo izračunavati potrebne podatke na temelju rezultata dobivenih mjerenjem tlakova.

Težište rada je nizom mjerenja karakterizirati Pitot-statičke cijevi. Karakterizacija znači da rezultate mjerenja brzine dobivene Pitot-statičkim cijevima u pojednostavljenoj okolini usporedimo sa referentnim podacima i na temelju toga izdvojimo i analiziramo izvore sustavnih pogreški te vidimo dali su Pitot-statičke cijevi primjenjive u rasponima brzina koje su korištene u pokusima.

1.1. Razvoj Pitot – statičkog sustava

Henri Pitot (1695 – 1771), francuski inženjer, proučavajući strujanje vode kanalima i rijekama konstruirao je cijev s otvorom prema nasmjerenju vodi koja mu je omogućila, što će kasnije biti podrobnije objašnjeno, da dobije podatak o brzini strujanja vode. [1]

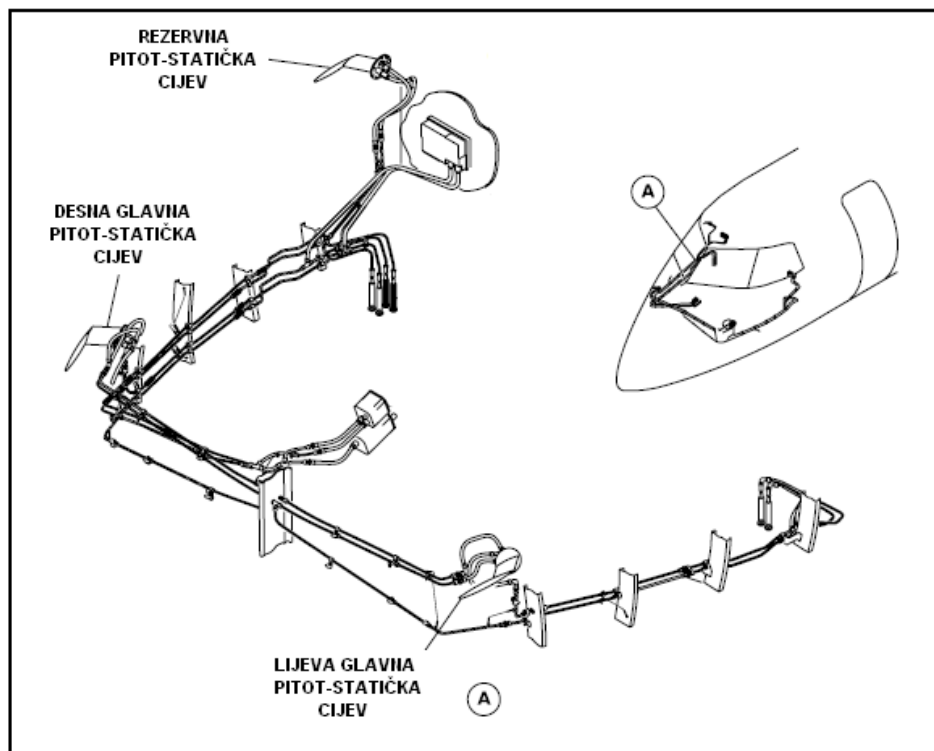
Izum Henri Pitot-a usavršio je njemački inženjer Ludwig Prandtl (1875 – 1953) koji se smatra utemeljiteljem moderne mehanike fluida i "ocem" moderne aerodinamike. On je napravio Pitot- Prandtl cijev, odnosno Pitot-statičku cijev koja služi za mjerenje brzine strujanja fluida. [2]

1.2. Konstruktivske i radne značajke Pitot - statičkog sustava

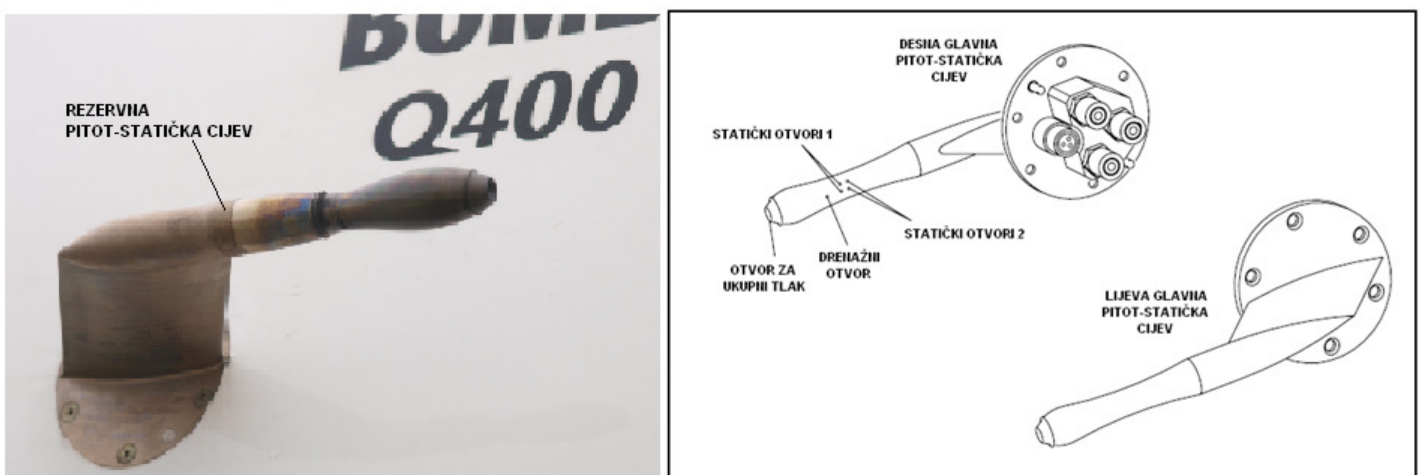
Pitot-statički sustav zrakoplova je sustav koji mjeri ukupni tlak nastao kretanjem zrakoplova i statički tlak atmosfere oko zrakoplova te tako daje podatke potrebne za brzinu, visinu i brzinu promjene visine zrakoplova.

Elementi sustava su osjetnici tlakova, tri primarna instrumenta: brzinomjer, visinomjer i variometar, te cjevovoda i drenažnih otvora kako je i prikazano na slikama 1-1 i 1-2.

Osjetnici tlakova u jednoj izvedbi mogu biti Pitot-statičke cijevi, odnosno u drugoj izvedbi Pitot cijevi i odvojeni statički otvori.



Slika 1-1 Pitot-statički sustav na zrakoplovu Dash Q400 [3]



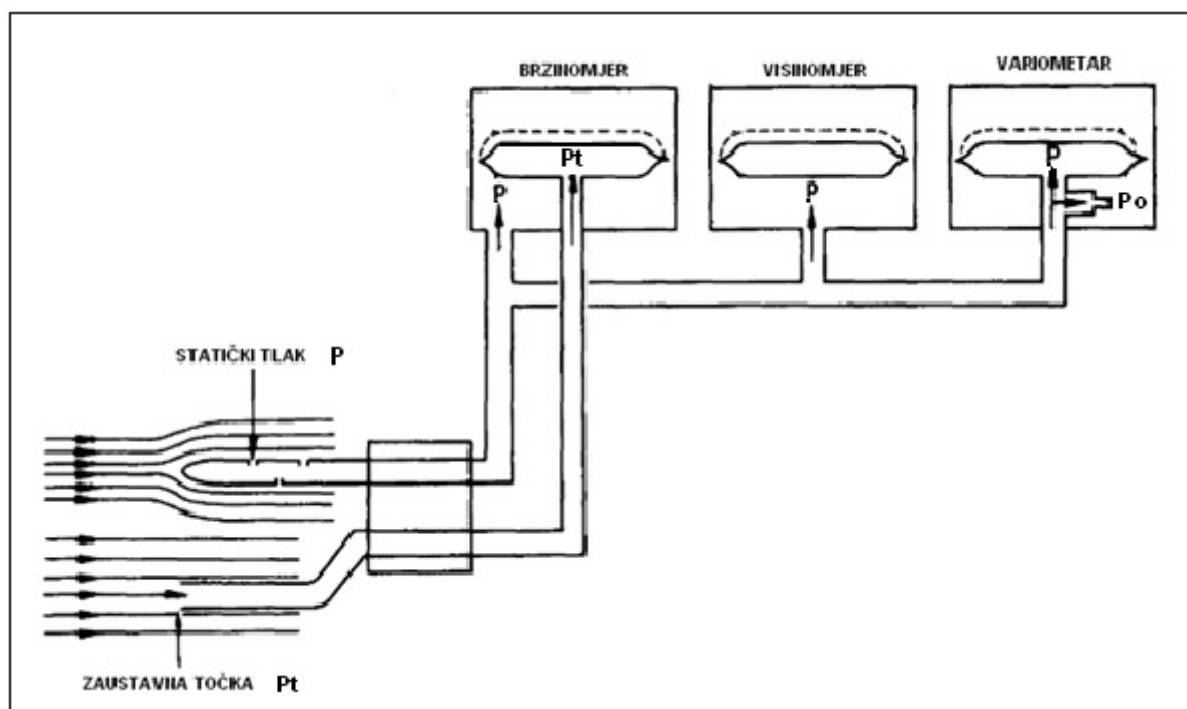
Slika 1-2 Pitot-statičke cijevi na zrakoplovu Dash Q400 [3]

Koliko će Pitot – statički sustav biti kompleksan prvenstveno ovisi o tipu i veličini samog zrakoplova te broju i tipu instrumenata u sustavu. Tako kod današnjih komercijalnih putničkih zrakoplova imamo sustave sa više cijevi i otvora za mjerenje statičkog tlaka (slika 1-3), što je potrebno radi sigurnosti, odnosno redundantnosti sustava.



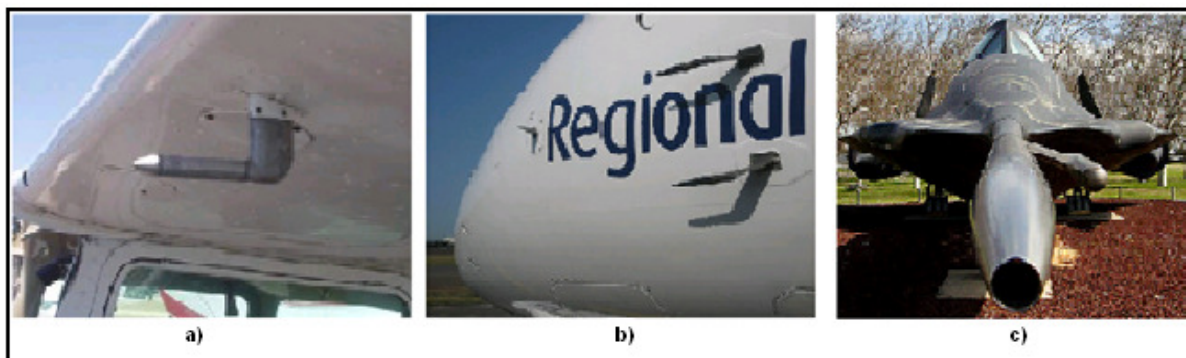
Slika 1-3 Pitot-statički sustav zrakoplova A320

Mjerenje ukupnog tlaka izvodi se pomoću Pitotove cijevi postavljene na mjesto gdje će se nalaziti u neporemećenoj struji zraka te tako pomoću cjevovoda prenositi iznos tlaka do instrumenta. Statički tlak se mjeri statičkim otvorima, bilo da su oni postavljeni na samu Pitotovu cijev ili da su odvojeni i smješteni posebno na trup zrakoplova. Ovisno o tlaku instrumenti dakle prikazuju iznose brzine leta, visine leta i brzine promjene visine leta [4]. Princip rada ovakvih sustava bazira se na razlici tlakova koje dobivamo iz Pitot-statičkih cijevi. Na slici 1-4 vidimo da se tlak prenosi na aneroidne kapsule i komore pojedinog instrumenta pa se tako u komoru brzinomjera distribuira statički tlak, a u njegovu membranu ukupni tlak. Pošto imamo različite tlakove unutar i izvan membrane, ona će, ovisno o razlici tlakova, mijenjati svoj volumen, odnosno dimenzije. Kalibriranjem membrane, iz te promjene volumena, direktno dobivamo podatak o brzini leta. Visinomjer ima zatvorenu kapsulu u komori u koju se distribuira statički tlak, promjenom statičkog tlaka mijenja se volumen kapsule. Statički tlak opada s porastom visine iz čega se, preko kapsule, dobiva informacija o visini. Variometar također za rad koristi samo statički tlak te se iz promjene njegove kapsule određuje brzina penjanja, odnosno spuštanja.



Slika 1-4 Distribucija tlakova kroz Pitot – statički sustav [4]

Princip rada Pitot- statičkog sustava prikazan na slici 1-4 vrijedi od samih početaka uporabe sustava pa do danas. Razlika je u tome što su danas sustavi elektronički pa se podatci digitaliziraju radi jednostavnije distribucije po zrakoplovu i naravno, što je najvažnije, smanjuju masu sustava, a s time i zrakoplova. Same Pitot- statičke cijevi, također se nisu kvalitativno mijenjale, prvenstveno su se morale prilagođavati povećanju brzine leta. Pitot- statičke cijevi za veće brzine morale su prilagoditi svoj izgled aerodinamici većih brzina, ali princip je ostao isti. Kod borbenih zrakoplova koji lete nadzvučnim brzinama cijevi su smještene ispred samog zrakoplova da bi se spriječio utjecaj udarnih valova koji ovode do kvalitativno drugačijih grešaka u mjerenju tlakova. Na slici 1-5 prikazane su Pitot-statičke cijevi na zrakoplovima koji lete u različitim rasponima brzina.



Slika 1-5 Pitot cijevi za različite brzine letenja: a) zrakoplov generalne avijacije, b) komercijalni putnički zrakoplov i c) nadzvučni borbeni zrakoplov (slike preuzete sa www.airliners.net)

2. TEORIJSKA PODLOGA I PRORAČUNI PITOT – STATIČKIH CIJEVI

Da bi u potpunosti razumjeli kako radi sama Pitot-statička cijev potrebno je poznavati teorijsku podlogu rada Pitot- statičke cijevi. Pitot cijevi svoju teorijsku podlogu nalaze u području mehanike fluida koje se naziva dinamika fluida. Glavni dio dinamike fluida je Bernoulijeva jednadžba. Osim Bernoulijeve jednadžbe, za proračune kod Pitot-statičkih cijevi, potrebno je poznavati jednadžbu manometra, koja omogućava izračun tlakova te prijenosni mehanizam.

2.1. Bernoulijeva jednadžba

Daniel Bernoulli (1700 - 1783), Švicarski liječnik, matematičar i fizičar u svom uratku "Hidrodinamika" (Basel 1738), koje je bilo prekretnica u teoriji o strujanju fluida, razvio je teorije vodenog vijka, vjetrenjače te vodenih pumpi i turbina. Bio je prvi koji je razlučio hidrostatički i hidrodinamički tlak, što je bio temelj njegovog zakona stacionarnog strujanja koji je i danas osnova hidrodinamike te aerodinamike [5].

Bernoulijeva jednadžba, nastala je kao integral jednadžbe gibanja fluida po putu u smjeru strujnice, zamišljene krivulje, kojoj se u svakoj točki smjer tangente poklapa sa smjerom vektora brzine. Međutim da bi to bilo valjano, potrebno je uvesti sljedeće pretpostavke:

1. Strujanje je nestlačivo
2. Strujanje je stacionarno
3. Inercijalni koordinatni sustav
4. Fluid je idealan
5. Bernoulijeva jednadžba vrijedi duž strujnice

Nestlačivim strujanjem smatramo ono kod kojeg nema promjene gustoće fluida ($\rho = konst.$), dok je stacionarno strujanje takvo strujanje kod kojeg se strujnice poklapaju s trajektorijama, prostornim krivuljama koje svojim gibanjem opisuju čestice fluida. Treća pretpostavka znači da se fluid giba u inercijalnom koordinatnom sustavu.

Idealan fluid je fluid zanemarive viskoznosti, što znači da će Bernoulijeva jednađba biti primjenjiva za slobodna strujanja, dalje od stjenke i u kratkim cjevovodima, u kojima se utjecaj viskoznih sila može zanemariti.

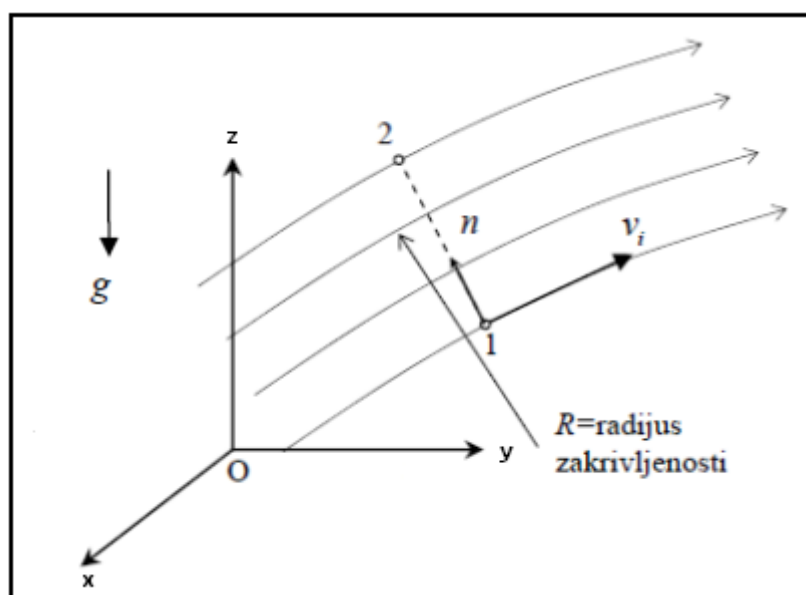
Uvođenjem ovih pretpostavki prilikom integriranja jednađbe gibanja fluida po putu u smjeru strujnice dobivamo osnovnu Bernoulijevu jednađbu (1) koja glasi:

$$p + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g z = konst. \quad (1)$$

Ako jednađbu gibanja fluida integriramo po putu okomitom na strujnice, dobit ćemo izraz (2) za promjenu tlaka okomito na strujnice:

$$p_2 = p_1 - \rho g(z_2 - z_1) + \int_1^2 \rho \frac{v^2}{R} dn \quad (2)$$

Put prijedan duž opisane krivulje integracije, n , mjeri se od središta zakrivljenosti strujnice, kako je i prikazano na slici 2-1.



Slika 2-1 Promjena tlaka okomito na strujnice [6]

Na temelju jednadžbe (2) i slike 2-1 slijedi da kod strujanja fluida s ravnim strujnicama ($R = \infty$) promjena tlaka okomito na strujnice ista je kao i kod fluida u mirovanju, odnosno u strujanju fluida u horizontalnoj ravnini sa zakrivljenim strujnicama tlak raste od središta zakrivljenosti strujnica [6].

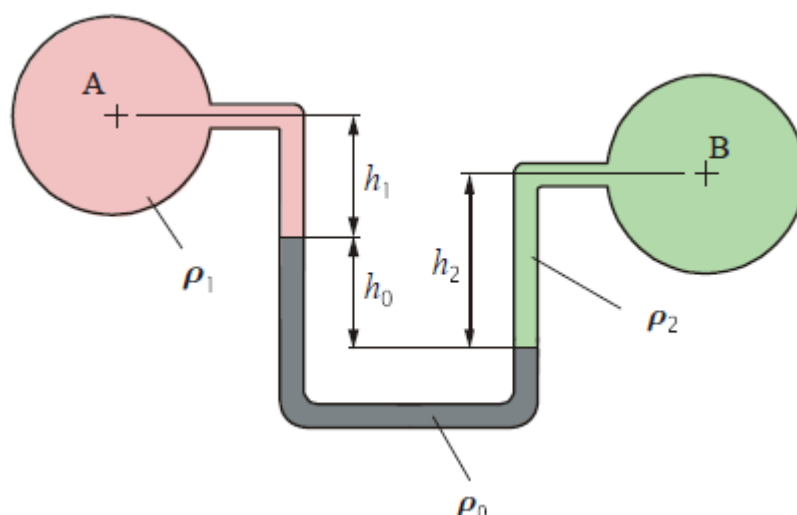
2.2. Jednadžba manometra

Jednadžba manometra je jednadžba promjene tlaka između dviju točaka koje se mogu međusobno spojiti kroz fluid. Izvod kreće s time da se tlaku u polazišnoj točki dodaju sve promjene tlaka oblika ρgh , (idući od meniskusa do meniskusa) i to s pozitivnim predznakom ako se ide prema dolje, a negativnim ako se ide prema gore. Kad se dođe do druge točke tako dobiveni izraz se izjednačuje s tlakom u toj točki.

Na slici 2-2 vidimo primjer diferencijalnog manometra, ako krenemo računati tlak u točki B polazimo od tlaka u točki A i računamo prema jednadžbi (3):

$$p_A + \rho_1 g h_1 + \rho_0 g h_0 - \rho_2 g h_2 = p_B \quad (3)$$

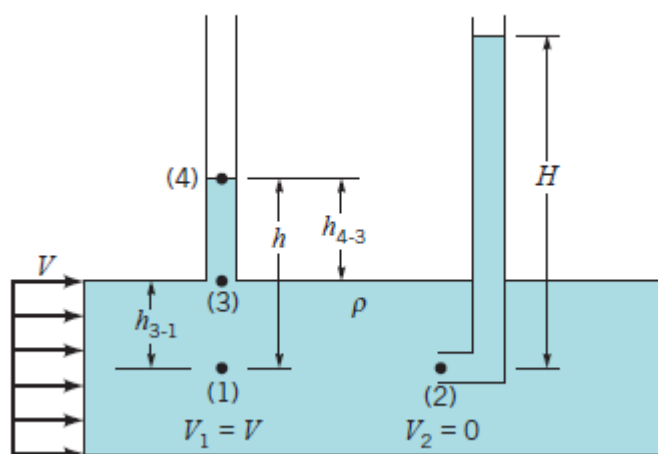
Pojmovi vezani uz jednadžbu manometra su apsolutni i manometarski tlak. Apsolutni tlak se mjeri od apsolutne nule (100% vakuum), dok je manometarski tlak razlika između apsolutnog i atmosferskog tlaka (mjeri se u odnosu na atmosferski tlak). Pozitivni manometarski tlak se naziva pretlak, a negativni podtlak [6].



Slika 2-2 Diferencijalni manometar [6]

2.3. Primjena Bernoulijeve jednadžbe kod Pitot – statičkih cijevi

Za ovaj rad bitna primjena Bernoulijeve jednadžbe je ona koja se bavi zaustavnim i dinamičkim tlakovima. Kinetička energija se pretvara u unutarnju energiju, a to se manifestira povećanjem tlaka. Svaki član Bernoulijeve jednadžbe (1) ima dimenziju sile po površini ($\frac{N}{m^2}$). Prvi član jednadžbe (1), p , je stvarni tlak fluida dok teče i naziva se *statički tlak*. Uobičajeni način mjerenja tog tlaka koristi provrt na ravnoj ploči.



Slika 2-3 Mjerenje statičkog i ukupnog tlaka [7]

Na provrt se pričvrsti cjevčica kao na slici 2-3. Prema slici 2-3 vidimo dakle da tlak u točki 1 iznosi:

$$p_1 = \rho g h_{3-1} + p_3 \quad (4)$$

isto kao da fluid miruje. Pozivajući se na jednadžbu manometra (3), dobivamo iznos tlaka u točki 3:

$$p_3 = \rho g h_{4-3} \quad (5)$$

Pošto vrijedi da:

$$h_{3-1} + h_{4-3} = h \quad (6)$$

Slijedi:

$$p_1 = \rho g h \quad (7)$$

Drugi član jednadžbe (1), naziva se *dinamički tlak* ($\rho \frac{v^2}{2}$), koji nastaje zbog strujanja fluida. Vidimo da se na slici 2-3 nalazi još jedna cjevčica s otvorom u smjeru nailaska struje fluida, ona će se napuniti fluidom te će visina stupca fluida u njoj davati iznos *ukupnog* ili *zaustavnog tlaka* koji je zbroj statičkog i dinamičkog tlaka. Točka na samom otvoru druge cjevčice naziva se *zaustavna točka* te je u njoj brzina fluida jednaka nuli [7]. Postavljanjem Bernoullijeve jednadžbe za ovaj slučaj, tlak u točki 2 će iznositi:

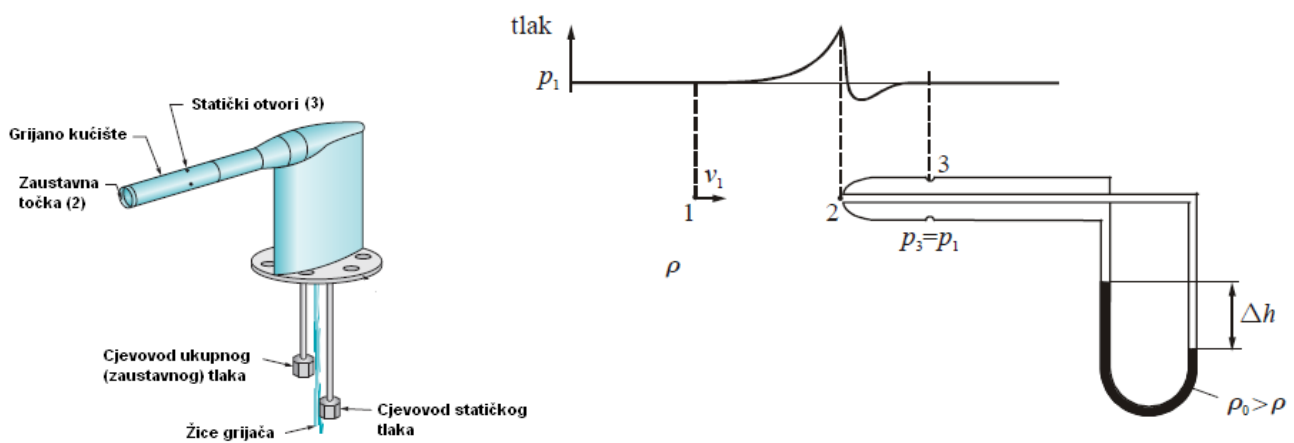
$$p_2 = p_1 + \rho \frac{v^2}{2} \quad (8)$$

Dok će brzina strujanja fluida biti:

$$v = \sqrt{2g(H - h)} \quad (9)$$

Sada možemo jednostavno primijeniti prethodne izraze na Pitot – statičku cijev i preko njih dobiti izraz kojim će se moći računati brzina nastrujavanja fluida (u našem slučaju zraka), odnosno brzina gibanja samog zrakoplova. Dakle, brzina neporemećene struje zraka (v), za slučaj kad imamo dva različita fluida, računat će se prema izrazu:

$$v = \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} \quad (10)$$



Slika 2-4 Pitot – statička cijev [6], [7]

3. POSTUPAK I CILJEVI IZVOĐENJA MJERENJA

Cilj ovog rada je karakterizirati Pitot-statičke cijevi, dakle postaviti ih kao osjetnik i pomoću njih mjeriti brzinu strujanja zraka. Međutim da bi mogli analizirati rezultate mjerenja dobivenih Pitot-statičkim cijevima potrebno je imati referentne podatke koji će nam služiti za usporedbu. U skladu s time prvi dio mjerenja provedenih i opisanih u ovom radu odnosi se na mjerenja brzine strujanja zraka iz ventilatora, tj. karakterizacijom strujanja zraka iz ventilatora pomoću anemometra. Cilj ovih mjerenja je dobiti područje strujanja koje će biti prikladno za rad sa Pitot-statičkim cijevima. Analizom rezultata izabrane su dvije pozicije u struji zraka ispred ventilatora na kojima su se provela mjerenja Pitot-statičkim cijevima.

Drugi dio mjerenja izveden je tako da su se na odabranim pozicijama postavljale različite Pitot-statičke cijevi kao osjetnici tlakova te su se pomoću izraza iz poglavlja 2, na temelju izmjerenih tlakova izračunavale brzine strujanja zraka za svaku pojedinu cijev.

Zadnji dio mjerenja odnosio se na karakterizaciju strujanja zraka oko samih Pitot-statičkih cijevi pomoću improvizirane sonde kojom se mjerio zaustavni tlak u neposrednoj blizini kućišta Pitot-statičkih cijev što je dalo sliku o raspodjeli tlakova i brzina oko Pitot-statičkih cijevi.

Obavljena mjerenja omogućila su analizu i usporedbu rezultata dobivenih za različite Pitot-statičke cijevi.

4. KARAKTERIZACIJA STRUJANJA ZRAKA IZ VENTILATORA

Generator strujanja zraka koji je korišten za izradu ovog rada je ventilator s električnim pogonom. Prvi dio mjerenja se sastojao u tome da se karakterizira strujanje zraka iz ventilatora pomoću anemometra, kako bi imali referentne vrijednosti koje bi mogli usporediti sa vrijednostima dobivenim korištenjem Pitot-statičkih cijevi. Rezultati mjerenja su tablično prikazani, dok su prosječne brzine prikazane grafički.

4.1. Oprema i način ispitivanja

Ispitivanja su provedena pomoću sljedećih uređaja i opreme:

- ✓ ventilator
- ✓ anemometar
- ✓ stativ
- ✓ hvataljke
- ✓ libela
- ✓ metar
- ✓ zaporni sat



Slika 4-1 Ventilator

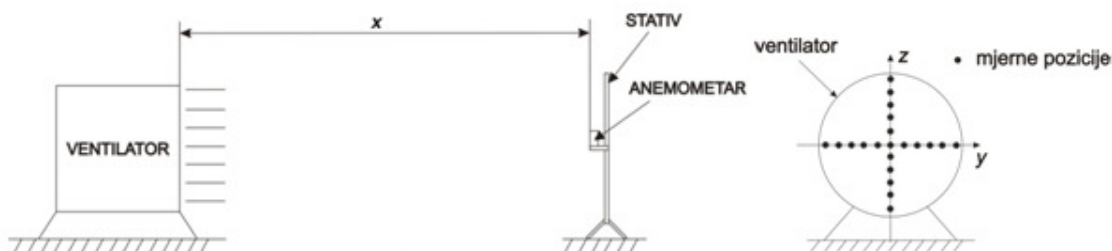
Ventilator (slika 4-1) pogonjen je elektromotorom snage 4 KS (2,942 kW), brzina vrtnje, koja se mjerila stroboskopom (slika 4-2) iznosi 2609 o/min, a promjer kućišta, odnosno ventilatora je 500 mm.



Slika 4-2 Mjerenje broja okretaja ventilatora stroboskopom



Slika 4-3 Anemometar



Slika 4-4 Postavljena oprema i mjerne pozicije

Oprema je postavljena kako je prikazano na slici 4-4. Mjerne pozicije definirane su x , y i z koordinatom kako je prikazano na slici 4-4. Mjerena je komponenta brzine strujanja paralelna s osi x .

Preliminarnim ispitivanjima došli smo do zaključka da je strujanje turbulentno pa rezultati variraju s vremenom tako da je odlučeno da se za istu poziciju radi više očitavanja brzine kako bi se dobila srednja brzina strujanja zraka, također smo ne temelju tih ispitivanja utvrđeno na kojim pozicijama će se obavljati mjerenja.

Po x osi izabrane su udaljenosti od ventilatora 2 m, 1,6 m, 1,2 m, 0,8 m i 0,4 m. Na svakoj udaljenosti mjerena je x komponenta brzine i to na (y [cm], z [cm]) koordinatama kako slijedi:

(0,0), (5,0), (10,0), (15,0), (20,0), (25,0), (-5,0), (-10,0), (-15,0), (-20,0), (-25,0), (0,5), (0,10), (0,15), (0,20), (0,25), (0,-5), (0,-10), (0,-15), (0,-20), (0,-25).

Za svaku poziciju radi se 10 očitavanja brzine, prvo nakon 15 sekundi rada ventilatora, a ostala u intervalu od svakih 5 sekundi. Nakon očitavanja rezultati se zbroje te podjele s brojem očitavanja pa tako dobijemo srednju vrijednost brzine za promatranu poziciju.



Slika 4-5 Izvođenje mjerenja

4.2. Rezultati mjerenja

Idućim tablicama prikazani su dobiveni rezultati mjerenja te izračunate prosječne brzine.

Tabela 1 Brzine na udaljenosti $x = 2$ m

VRIJEME [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	PROSJEČNA BRZINA \bar{v} [m/s]
(y[cm],z[cm])	Brzina v [m/s]										
(0,0)	8,0	8,4	9,2	8,3	9,0	8,3	8,6	10,9	9,1	9,1	8,9
(5,0)	6,9	9,3	7,8	8,4	6,9	9,3	7,8	7,1	7,9	8,4	8,0
(10,0)	8,3	7,8	9,9	8,5	9,7	10,8	9,2	9,6	10,0	6,8	9,1
(15,0)	9,9	8,8	7,9	6,9	8,6	6,5	9,1	8,8	9,3	8,6	8,4
(20,0)	8,7	8,1	9,6	8,4	9,6	7,6	7,4	8,0	7,9	9,4	8,5
(25,0)	8,2	6,1	8,0	5,2	8,8	8,4	8,2	8,8	9,0	9,2	8,0
(-5,0)	8,0	8,0	7,7	8,4	7,3	7,6	7,8	7,5	6,5	7,4	7,6
(-10,0)	8,6	8,9	9,1	9,4	8,5	8,0	9,0	7,6	8,0	8,7	8,6
(-15,0)	11,8	10,7	10,6	11,5	11,1	9,0	9,5	11,1	10,5	9,2	10,5
(-20,0)	10,3	9,9	11,6	10,5	10,5	10,8	11,5	11,5	11,0	10,7	10,8
(-25,0)	8,1	9,3	9,6	12,4	10,1	9,6	10,8	9,8	11,5	11,1	10,2
(0,5)	7	8,4	9,2	7,8	8,1	8,8	8,8	8,0	6,7	7,8	8,1
(0,10)	7,3	8,4	9,9	9,1	8,0	8,4	9,2	8,1	10,2	10,0	8,9
(0,15)	12,9	9,7	11,7	11,0	11,5	10,6	11,8	11,8	10,9	8,8	11,1
(0,20)	13,4	11,2	13,0	13,0	13,0	13,4	13,4	13,8	13,5	14,2	13,2
(0,25)	12,7	13,0	12,2	12,2	11,1	13,4	11,5	12,7	13,0	10,9	12,0
(0,-5)	8,8	8,8	9,2	7,6	8,4	10,2	10,2	8,2	7,2	8,2	8,7
(0,-10)	8,4	9,8	9,3	9,8	9,8	10,6	7,3	9,1	10,5	10,7	9,5
(0,-15)	8,7	6,4	9,0	9,2	7,0	8,0	7,1	10,6	12,6	12,1	9,1
(0,-20)	10,8	11,6	11,9	9,3	11,5	10,0	9,9	11,4	10,7	13,4	11,1
(0,-25)	10,5	11,8	8,8	10,3	11,6	13,6	12,9	11,5	14,0	10,6	11,6

Tabela 2 Brzine na udaljenosti $x = 1,6$ m

VRIJEME [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	PROSJEČNA BRZINA \bar{v} [m/s]
(y[cm],z[cm])	Brzina v [m/s]										
(0,0)	9,6	7,0	6,7	7,9	7,3	7,4	7,4	7,9	7,7	6,9	7,6
(5,0)	9,3	9,7	6,5	9,3	6,9	6,5	6,0	7,3	8,4	7,9	7,8
(10,0)	9,2	6,9	10,2	7,0	3,8	7,7	9,9	10,0	8,0	9,9	8,3
(15,0)	12,0	11,7	10,0	10,1	10,6	8,8	11,5	10,7	11,5	9,4	10,6
(20,0)	13,7	11,2	9,0	12,2	10,1	9,9	9,1	13,9	12,2	11,0	11,2
(25,0)	11,9	12,2	10,0	12,3	11,5	13,0	12,6	11,2	9,6	10,1	11,4
(-5,0)	7,3	8,9	8,4	7,1	8,8	6,1	6,6	8,1	10,3	7,3	7,9
(-10,0)	10,6	11,5	11,8	11,2	10,8	9,6	10,5	10,1	11,5	12,6	10,0
(-15,0)	13,4	13,8	13,2	13,2	13,3	13,8	13,2	13,8	14,1	13,4	13,5
(-20,0)	14,3	14,9	14,3	14,3	14,5	14,1	14,6	13,5	11,9	13,3	14,0
(-25,0)	13,4	12,0	12,9	11,9	10,7	10,0	9,7	13,7	14,3	13,8	12,2
(0,5)	8,8	9,6	8,6	7,8	9,2	7,4	8,1	7,3	9,4	6,9	8,3
(0,10)	10,8	13,5	10,2	11,1	10,8	11,0	10,8	10,7	7,9	10,8	10,8
(0,15)	13,9	12,6	12,6	12,5	12,9	13,0	13,7	13,6	13,3	12,5	13,1
(0,20)	15,3	14,1	14,3	14,5	14,9	15,6	14,6	17,1	15,0	14,2	15,0
(0,25)	14,5	13,8	12,7	11,9	15,5	13,3	11,5	13,8	12,1	14,3	13,3
(0,-5)	6,9	9,6	5,7	8,4	11,0	8,7	11,6	10,9	9,8	8,5	9,1
(0,-10)	10,9	10,1	8,4	9,6	12,6	10,9	11,4	9,9	10,2	8,5	10,3
(0,-15)	13,3	14,2	13,4	12,7	12,8	13,4	14,5	12,7	9,8	11,2	12,8
(0,-20)	15,3	14,1	15,0	14,2	14,6	13,8	14,9	13,8	12,9	11,9	14,1
(0,-25)	14,8	13,0	14,5	11,5	15,4	15,2	14,3	13,4	14,8	16,5	14,3

Tabela 3 Brzine na udaljenosti $x = 1,2$ m

VRIJEME [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	PROSJEČNA BRZINA \bar{v} [m/s]
(y[cm],z[cm])	Brzina v [m/s]										
(0,0)	6,1	4,0	5,0	1,6	4,2	4,9	4,3	3,9	3,4	5,3	4,3
(5,0)	5,3	3,7	7,0	5,3	4,0	6,3	6,5	6,5	6,5	4,3	5,5
(10,0)	9,4	8,8	10,0	9,1	11,5	10,0	11,7	11,6	9,2	7,5	9,9
(15,0)	15,6	16,9	13,4	14,9	12,6	14,2	14,2	18,3	15,9	17,4	15,3
(20,0)	17,2	16,2	14,0	14,9	15,5	17,0	15,1	13,8	18,4	16,8	15,9
(25,0)	13,6	15,4	13,0	13,0	16,9	16,4	15,6	15,7	13,2	15,5	14,8
(-5,0)	7,5	6,4	5,8	6,9	8,0	7,7	7,6	7,6	6,2	6,0	7,0
(-10,0)	14,9	14,2	13,2	13,8	15,3	14,7	15,2	15,7	12,6	14,4	14,4
(-15,0)	17,6	17,2	17,2	17,9	16,9	16,5	17,2	16,2	17,0	16,8	17,1
(-20,0)	16,3	15,5	15,7	16,9	16,2	14,0	16,9	16,6	16,7	15,7	16,1
(-25,0)	12,2	10,0	13,0	14,2	10,8	12,9	10,1	11,4	12,4	12,6	12,0
(0,5)	6,0	8,8	8,6	7,3	5,8	6,2	3,1	7,7	5,5	4,3	6,3
(0,10)	13,5	11,4	11,6	11,5	14,2	13,9	12,3	12,6	11,2	12,1	12,4
(0,15)	16,5	16,3	16,1	17,5	16,1	16,8	16,9	16,1	15,2	15,1	16,3
(0,20)	16,5	15,5	16,5	17,7	17,6	16,5	17,2	16,1	16,9	17,1	16,8
(0,25)	14,9	16,5	17,1	18,1	17,6	16,7	16,2	14,2	14,4	14,1	16,0
(0,-5)	6,4	8,5	5,7	5,3	5,6	8,0	8,1	8,4	7,9	7,8	7,2
(0,-10)	14,3	14,3	13,2	12,6	14,2	14,7	12,6	13,7	13,9	13,1	13,7
(0,-15)	17,8	18,1	16,7	15,7	17,7	16,9	17,2	17,6	14,1	14,1	16,6
(0,-20)	16,3	13,3	14,3	15,7	16,1	13,9	16,4	12,9	13,8	16,0	14,9
(0,-25)	13,8	13,2	13,3	13,5	14,8	13,6	11,5	11,9	14,5	12,2	13,2

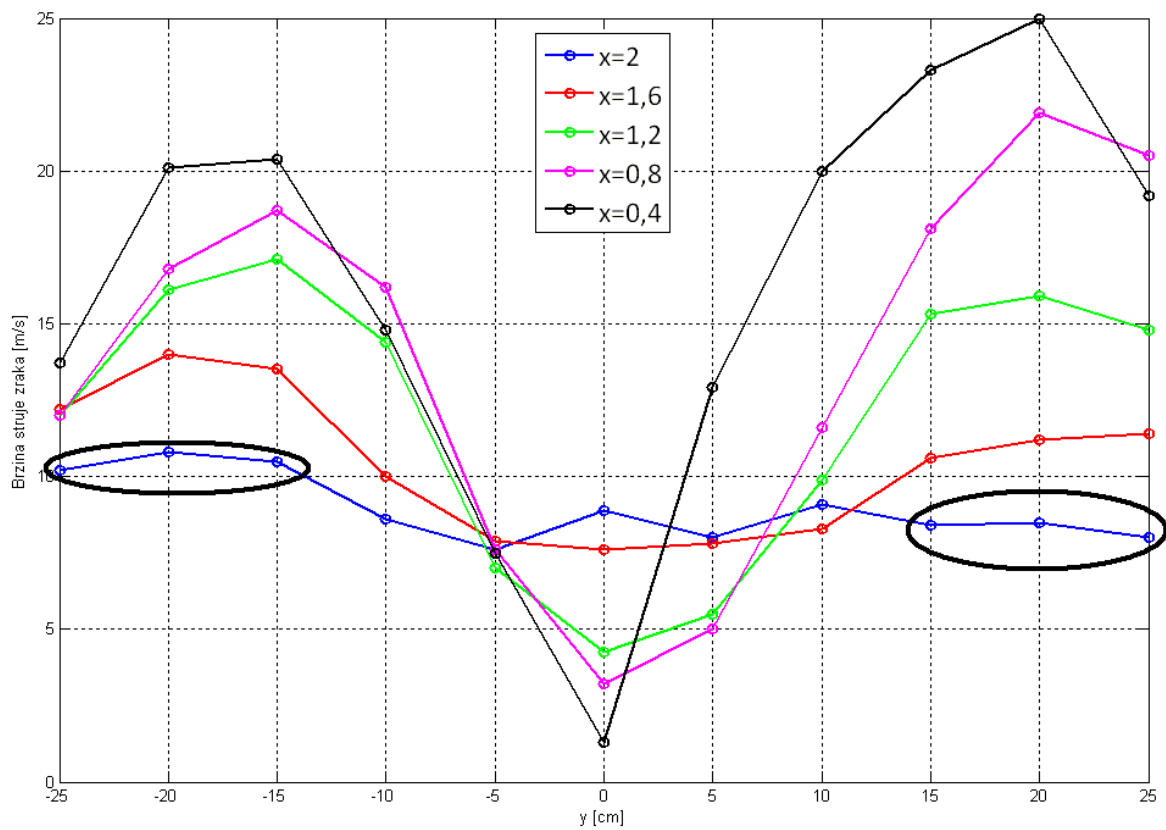
Tabela 4 Brzine na udaljenosti $x = 0,8$ m

VRIJEME [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	PROSJEČNA BRZINA \bar{v} [m/s]
(y[cm],z[cm])	Brzina v [m/s]										
(0,0)	3,5	3,2	4,2	6,0	3,5	0,7	3,0	1,1	3,3	3,0	3,2
(5,0)	4,3	10,3	6,1	5,5	4,6	4,5	1,8	5,6	3,9	3,1	5,0
(10,0)	10,0	10,2	11,3	13,0	9,3	14,0	8,3	13,3	11,2	14,9	11,6
(15,0)	21,6	21,3	16,7	15,8	18,2	17,3	18,1	16,9	17,8	16,9	18,1
(20,0)	14,3	11,6	21,3	20,8	21,1	20,5	22,2	21,3	21,8	22,8	21,9
(25,0)	20,1	21,5	19,9	21,8	20,0	21,0	18,8	20,7	20,0	21,1	20,5
(-5,0)	7,3	7,3	7,8	7,3	8,2	7,6	7,6	7,3	8,4	7,6	7,6
(-10,0)	16,9	15,6	16,2	16,3	16,6	16,1	15,0	16,0	16,5	16,5	16,2
(-15,0)	18,4	17,6	18,9	18,8	18,4	18,4	18,9	19,0	19,6	18,8	18,7
(-20,0)	16,2	16,4	18,0	16,7	16,8	16,8	17,6	16,0	17,4	16,5	16,8
(-25,0)	14,6	11,4	15,4	13,4	10,6	13,4	9,9	9,2	9,4	12,2	12,0
(0,5)	6,9	7,8	9,1	7,9	8,1	9,2	7,2	10,9	9,0	6,3	8,2
(0,10)	10,1	11,3	9,9	9,8	10,9	11,0	10,2	12,2	11,8	10,3	10,8
(0,15)	15,5	15,7	14,8	15,3	15,8	15,7	15,8	15,1	16,9	15,9	15,7
(0,20)	16,3	16,1	15,2	16,5	14,9	15,4	15,3	14,8	17,9	17,2	16,0
(0,25)	12,8	13,7	10,9	13,3	13,0	13,0	13,0	11,7	14,4	10,4	12,6
(0,-5)	11,5	8,2	9,9	10,3	10,0	10,5	14,2	12,6	15,2	11,0	11,3
(0,-10)	17,2	17,6	18,4	18,1	17,6	18,8	18,3	18,4	18,3	17,7	18,0
(0,-15)	19,2	17,6	20,9	21,0	21,1	19,6	19,8	18,7	20,3	21,1	19,9
(0,-20)	20,8	19,7	19,8	21,1	14,6	21,8	15,5	20,7	22,2	20,8	19,7
(0,-25)	13,9	17,7	13,3	17,5	12,2	18,2	19,5	18,7	16,5	12,6	16,0

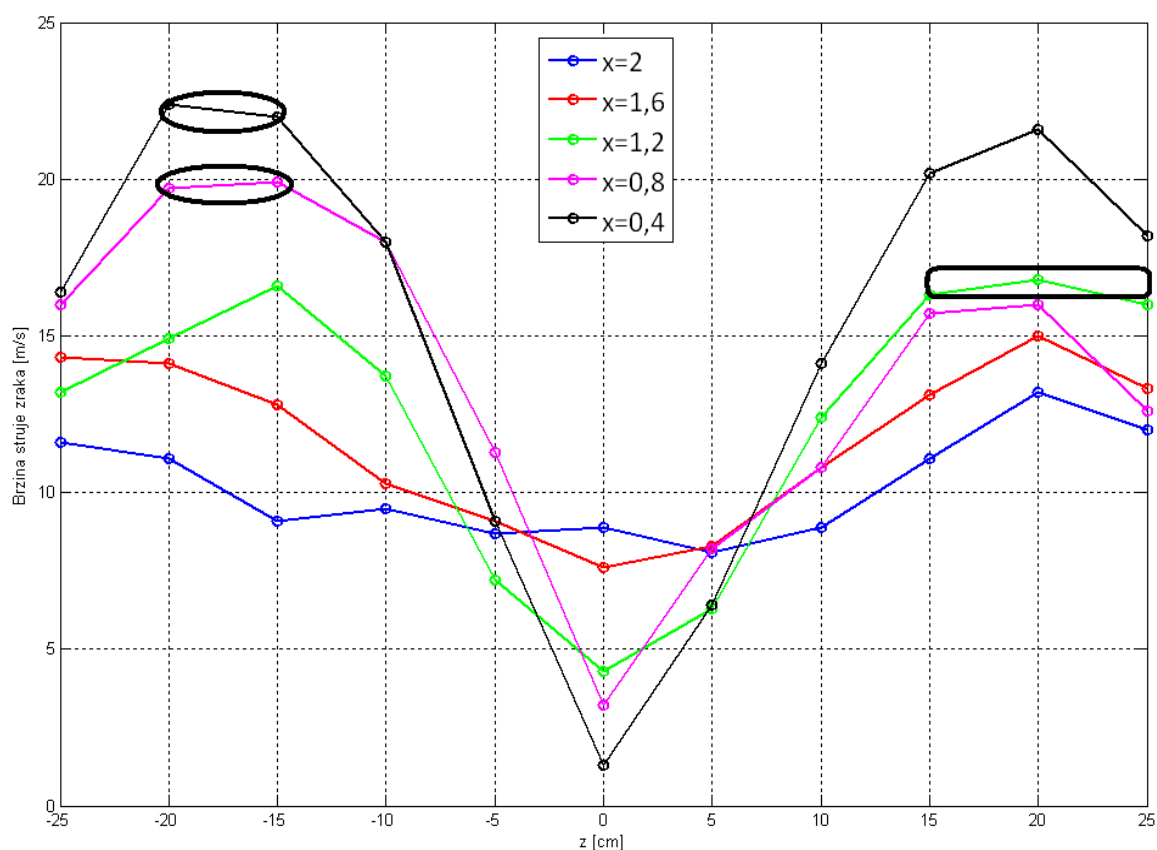
Tabela 5 Brzine na udaljenosti $x = 0,4$ m

VRIJEME [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	PROSJEČNA BRZINA \bar{v} [m/s]
(y[cm],z[cm])	Brzina v [m/s]										
(0,0)	0,7	0,9	1,5	0,9	2,7	1,0	1,3	1,5	1,0	1,5	1,3
(5,0)	12,3	12,3	15,1	10,8	12,9	15,3	15,1	13,8	11,1	10,1	12,9
(10,0)	20,7	19,7	21,4	19,2	23,0	22,3	19,6	17,7	16,8	19,1	20,0
(15,0)	23,6	23,1	23,2	23,4	23,5	23,4	24,0	22,4	22,9	23,9	23,3
(20,0)	25,4	25,3	25,7	24,1	25,4	25,2	24,7	25,3	24,5	24,8	25,0
(25,0)	18,8	20,9	19,5	19,2	18,0	18,0	18,8	19,0	20,1	20,1	19,2
(-5,0)	8,3	8,5	8,2	8,0	8,0	7,6	6,9	5,3	5,1	9,1	7,5
(-10,0)	14,2	15,4	15,3	14,2	15,1	14,4	14,6	15,3	14,6	14,6	14,8
(-15,0)	20,1	20,3	20,2	20,5	20,4	20,3	20,6	20,4	20,6	20,5	20,4
(-20,0)	20,3	20,0	19,8	20,5	19,8	20,0	20,5	20,1	20,1	19,7	20,1
(-25,0)	13,0	12,1	13,1	15,1	15,2	13,6	15,7	12,1	13,5	13,2	13,7
(0,5)	8,2	8,4	9,2	7,2	1,5	3,0	5,9	6,8	6,9	6,9	6,4
(0,10)	15,0	18,8	16,4	13,8	12,9	12,6	12,5	12,9	13,0	13,2	14,1
(0,15)	20,7	20,3	19,9	19,9	20,1	19,8	19,9	20,4	20,7	20,1	20,2
(0,20)	20,8	21,2	21,4	21,1	20,8	21,9	21,8	22,1	22,6	22,6	21,6
(0,25)	17,5	18,1	17,6	18,0	19,1	18,4	18,4	17,8	18,6	18,8	18,2
(0,-5)	6,2	10,0	10,3	7,4	6,5	8,8	10,1	10,4	9,6	12,0	9,1
(0,-10)	17,0	18,7	17,4	19,2	18,0	17,2	18,6	18,9	17,4	17,5	18,0
(0,-15)	22,1	21,8	23,0	21,4	21,1	21,1	22,2	22,5	22,1	22,2	22,0
(0,-20)	22,8	22,2	22,2	22,6	22,5	22,6	22,6	22,2	22,2	22,5	22,4
(0,-25)	15,8	16,5	16,2	15,3	16,1	16,5	15,6	17,6	17,2	17,6	16,4

Slika 4-5 i slika 4-6 prikazuju vrijednosti prosječnih brzina po pozicijama raspoređenim duž y i z osi. Izabrana su područja pogodna za karakterizaciju Pitot-statičkih cijevi, koja su i označena na slikama. Dodatnim mjerenjima potvrđena je osnosimetričnost strujanja. Mjereni su i iznosi radijalnih i cirkumferentnih brzina izdvojenih područja, ali nisu iznosili više od 0,2 m/s, što je zanemarivo u odnosu na x komponentu brzine strujanja.



Slika 4-6 Prosječna brzina strujanja duž y osi s označenim odabranim područjima



Slika 4-7 Prosječna brzina strujanja duž z osi s označenim odabranim područjima

Analizom rezultata slijedi da je strujanje zraka koje generira ventilator turbulentno, naročito u blizini ventilatora, dok se udaljavanjem smanjuju skokovi u mjerenjima te strujanje postaje izobraženije. Zbog geometrije ventilatora i njegovog kućišta, brzine strujanja su najmanje u osi simetrije, odnosno u osi vrtnje ventilatora te se povećanjem radijusa povećava i brzina. Međutim analizom rezultata mjerenja pronađeno je nekoliko pozicija gdje je strujanje jednoliko te je na njima moguće vršiti karakterizaciju Pitot-statičkih cijevi.

5. MJERENJA BRZINE STRUJANJA ZRAKA PITOT-STATIČKIM CIJEVIMA

U ovom poglavlju opisan je postupak mjerenja brzine struje zraka iz ventilatora pomoću Pitot-statičkih cijevi te su prikazani rezultati dobiveni mjerenjima.

5.1. Postavljanje mjerne opreme i opisivanje postupka mjerenja

Pri određivanju brzine strujanja zraka Pitot-statičkim cijevima korištena je sljedeća oprema:

- ✓ ventilator
- ✓ Pitot-statičke cijevi
- ✓ stativ
- ✓ hvataljke
- ✓ libela
- ✓ metar
- ✓ zaporni sat
- ✓ polimerna crijeva
- ✓ U-cijev
- ✓ alkohol
- ✓ teflonska traka
- ✓ mjerna skala

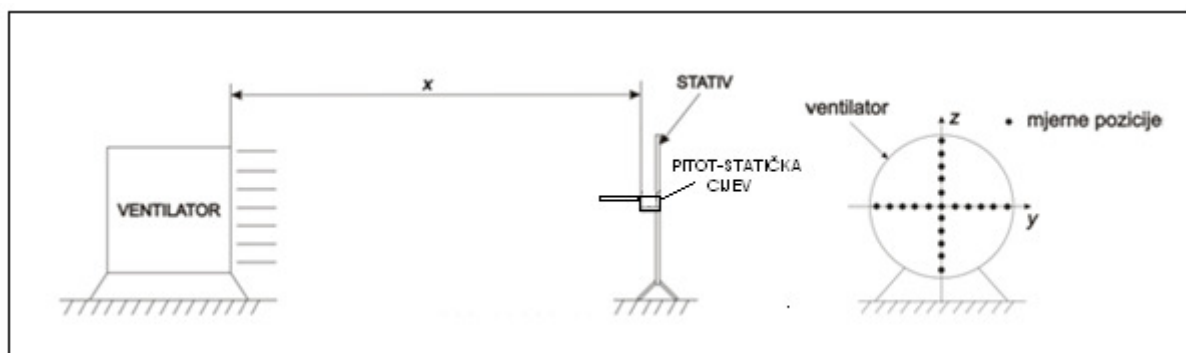


Slika 5-1 Pitot-statičke cijevi korištene pri mjerenjima



Slika 5-2 Postavljena mjerna oprema

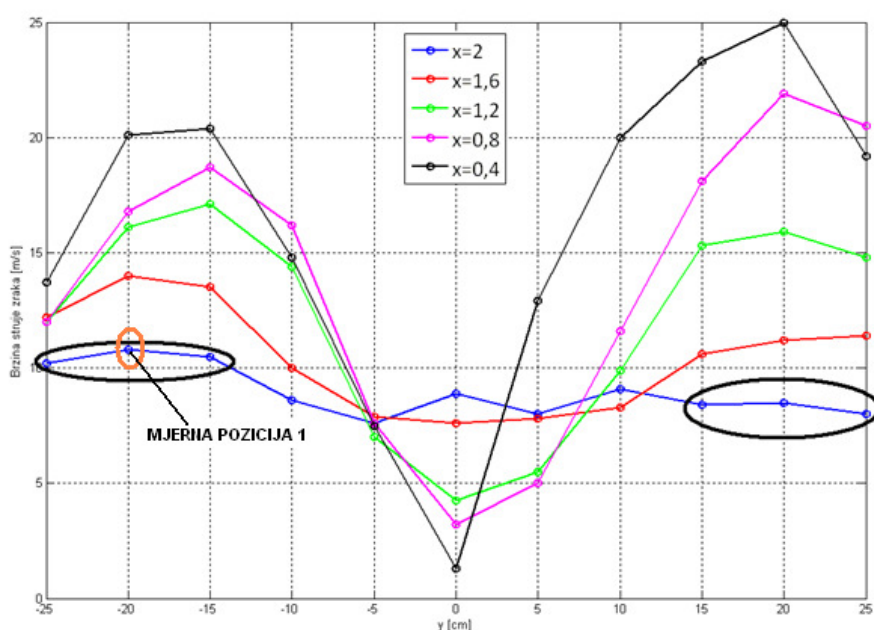
Oprema je postavljena kako je prikazano na slici 5-3. Mjerne pozicije definirane su x , y i z koordinatom kako je prikazano na slici. Mjerena je komponenta brzine strujanja paralelna s osi x .



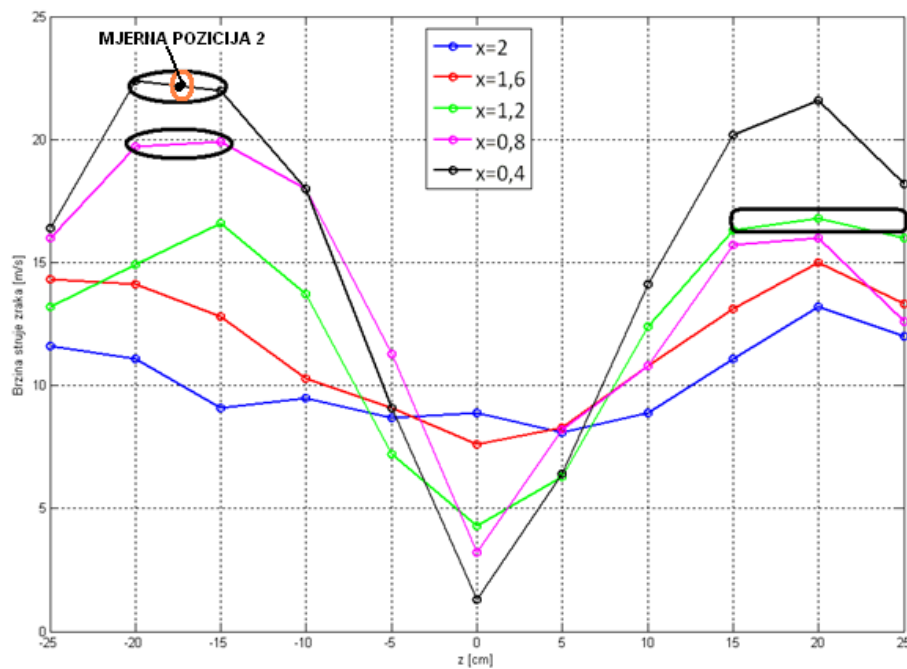
Slika 5-3 Postavljena oprema i mjerne pozicije

Mjerne pozicije odabrane su na temelju rezultata dobivenih u četvrtom poglavlju ovog rada. Na kraju tog poglavlja prikazano je pet pozicija na kojima je strujanje jednoliko i na kojima je moguće obaviti mjerenja Pitot-statičkim cijevima. Od tih pet pozicija, odabrane su dvije na kojima će se karakterizirati Pitot-statičke cijevi. Prva pozicija nalazi se na koordinatama ($y = -20, z = 0$), na udaljenosti dva metra od ventilatora ($x = 2 \text{ m}$), a označena je na slici 5-4.

Druga pozicija smještena je na koordinatama ($y = 0, z = -17,5$), na udaljenosti 0,4 metra od ventilatora ($x = 0,4 \text{ m}$), kao što se vidi na slici 5-5.



Slika 5-4 Mjerna pozicija 1



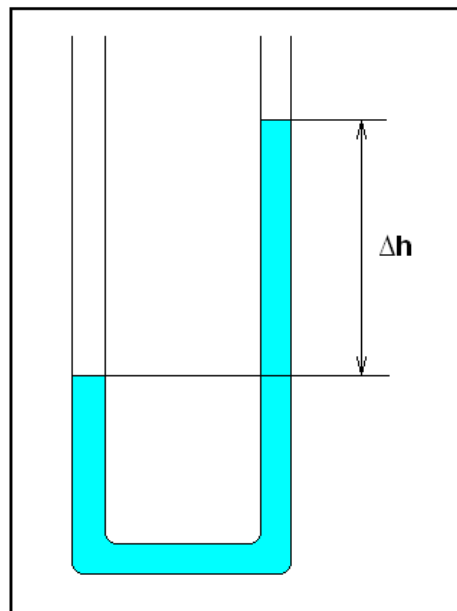
Slika 5-5 Mjerna pozicija 2

Ukupno je karakterizirano deset cijevi. Oznake cijevi su: PS-1, PS-2, PS-3, PS-4, PS-5, PS-6, PS-7, PS-8, PS-9, i PS-10. Karakterizacija je izvršena na svim cijevima za obje odabrane pozicije. Cijevi PS-1, PS-2 i PS-3 su konstrukcijski iste te su karakterizirane da se provjeri pouzdanost mjerenja. Također su, uz Pitot-statičke, korištene i Pitotove cijevi.

Rezultat se očitavao kao porast visine stupca alkohola, u jednom kraku U-cijevi, u odnosu na početno stanje, udvostručavanjem te visine dobiva se razlika visina stupaca u krakovima Δh (slika 5-6), zatim se pomoću jednadžbe (10) izračunavala brzina strujanja zraka.

Pritom su korišteni slijedeći podatci:

- $\rho_0 = 760 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- $\rho = 1,2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$



Slika 5-6 Skica očitavanja na U-cijevi

5.2. Mjerenja na poziciji 1

Preliminarnim mjerenjima zaključeno je da je na poziciji 1 strujanje turbulentno te da se visina stupca alkohola u U-cijevi mijenja s vremenom. Zato je odlučeno da se, kao što je to bio slučaj u poglavlju 4, za svaku poziciju radi se 10 očitavanja visine stupca, prvo nakon 15 sekundi rada ventilatora, a ostala u intervalu od svakih 5 sekundi. Nakon očitavanja računamo srednju vrijednost visine stupca alkohola za promatranu poziciju.

Rezultati su prikazani za svaku cijev zasebno.

Točnost očitavanja visine je 0,5 mm, odnosno točnost računanja brzine je 2,5 [m/s].

5.2.1. Rezultati mjerenja za cijev PS-1

Slika 5-7 Cijev PS-1

Tabela 6 Rezultati mjerenja za PS-1

t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	12	12	10	8	12	10	8	10	10

5.2.2. Rezultati mjerenja za cijev PS-2

Slika 5-8 Cijev PS-2

Tabela 7 Rezultati mjerenja za PS-2

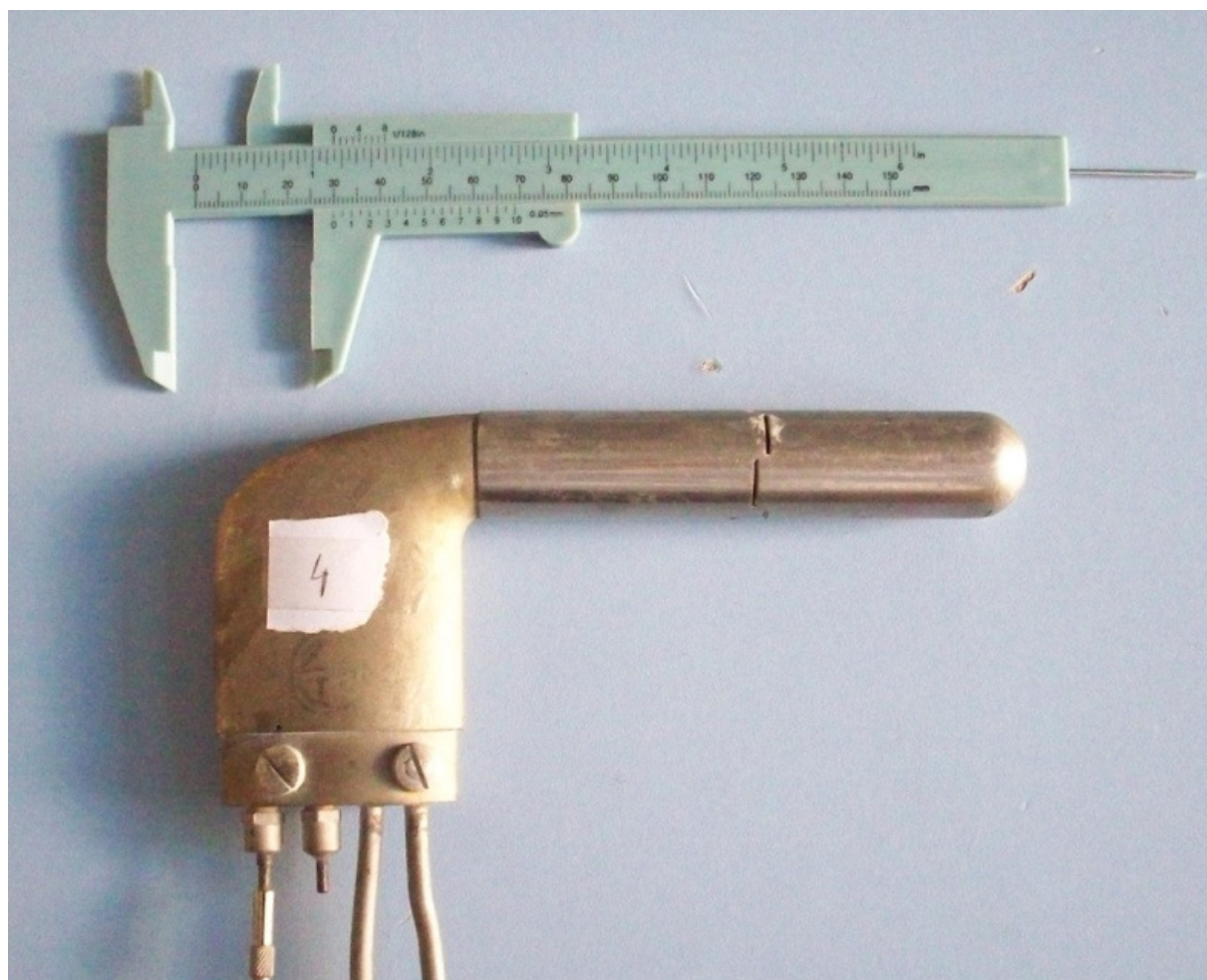
t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	12	10	12	10	8	12	8	10	10

5.2.3. Rezultati mjerenja za cijev PS-3

Slika 5-9 Cijev PS-3

Tabela 8 Rezultati mjerenja za PS-3

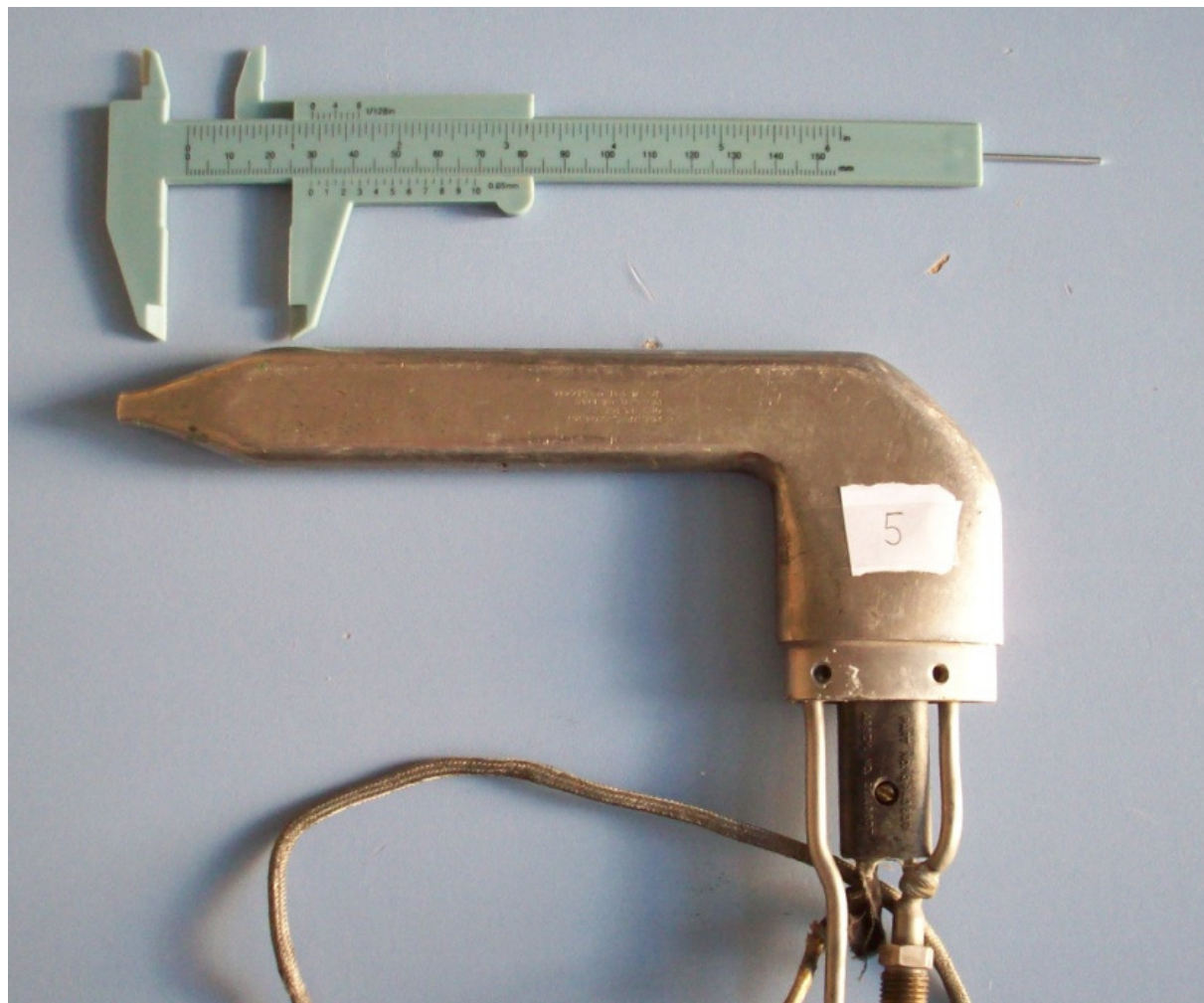
t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	10	12	10	12	8	10	10	10	8

5.2.4. Rezultati mjerenja za PS-4

Slika 5-10 Cijev PS-4

Tabela 9 Rezultati mjerenja za PS-4

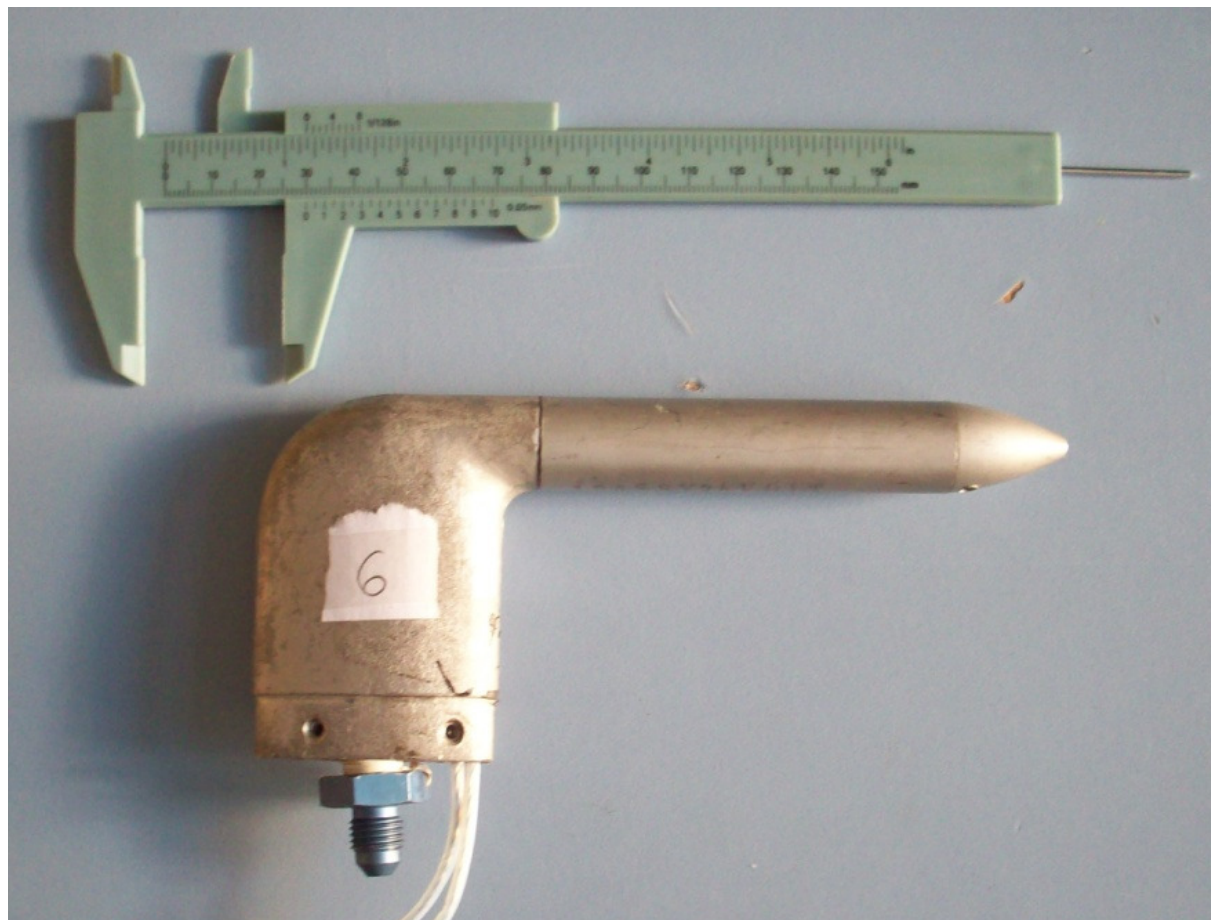
t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	8	6	8	6	6	6	8	6	8	6

5.2.5. Rezultati mjerenja za PS-5

Slika 5-11 Cijev PS-5

Tabela 10 Rezultati mjerenja za PS-5

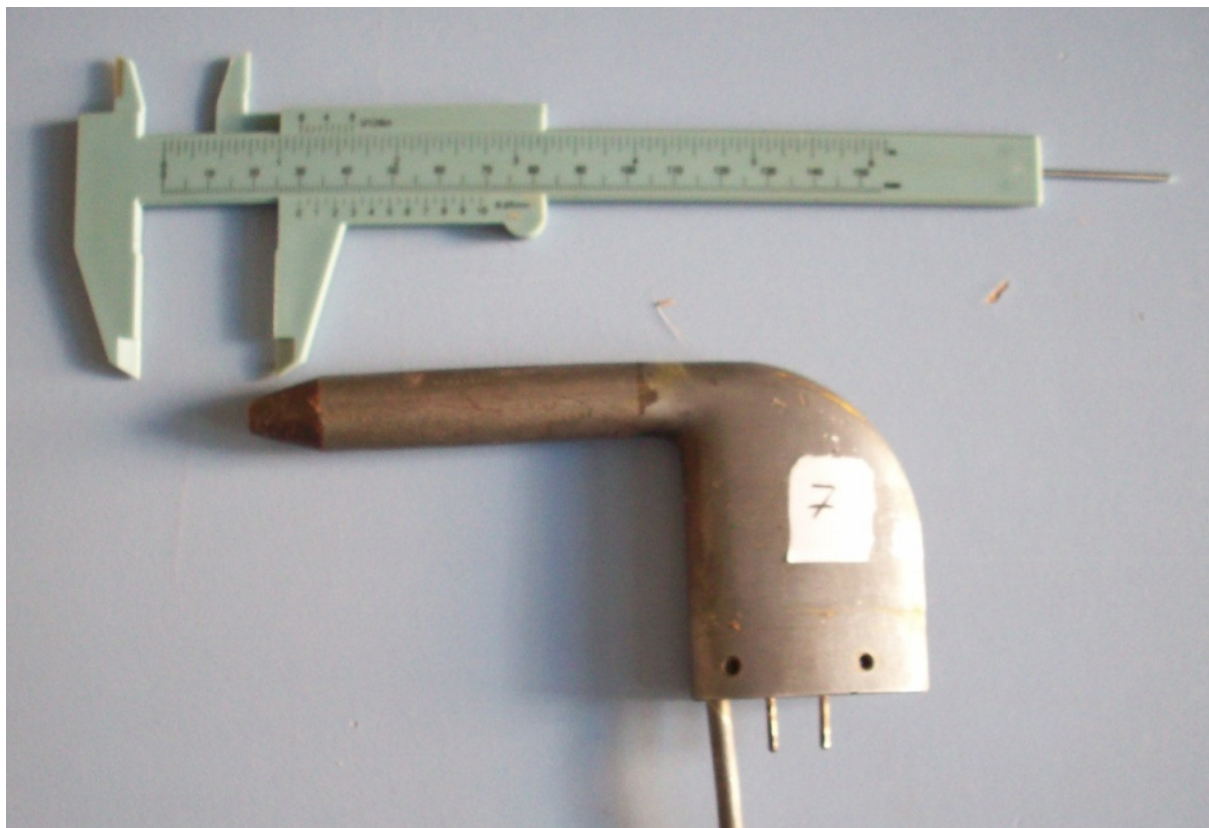
t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	6	6	6	8	8	8	6	12	6	10

5.2.6. Rezultati mjerenja za cijev PS-6

Slika 5-12 Cijev PS-6

Tabela 11 Rezultati mjerenja za PS-6

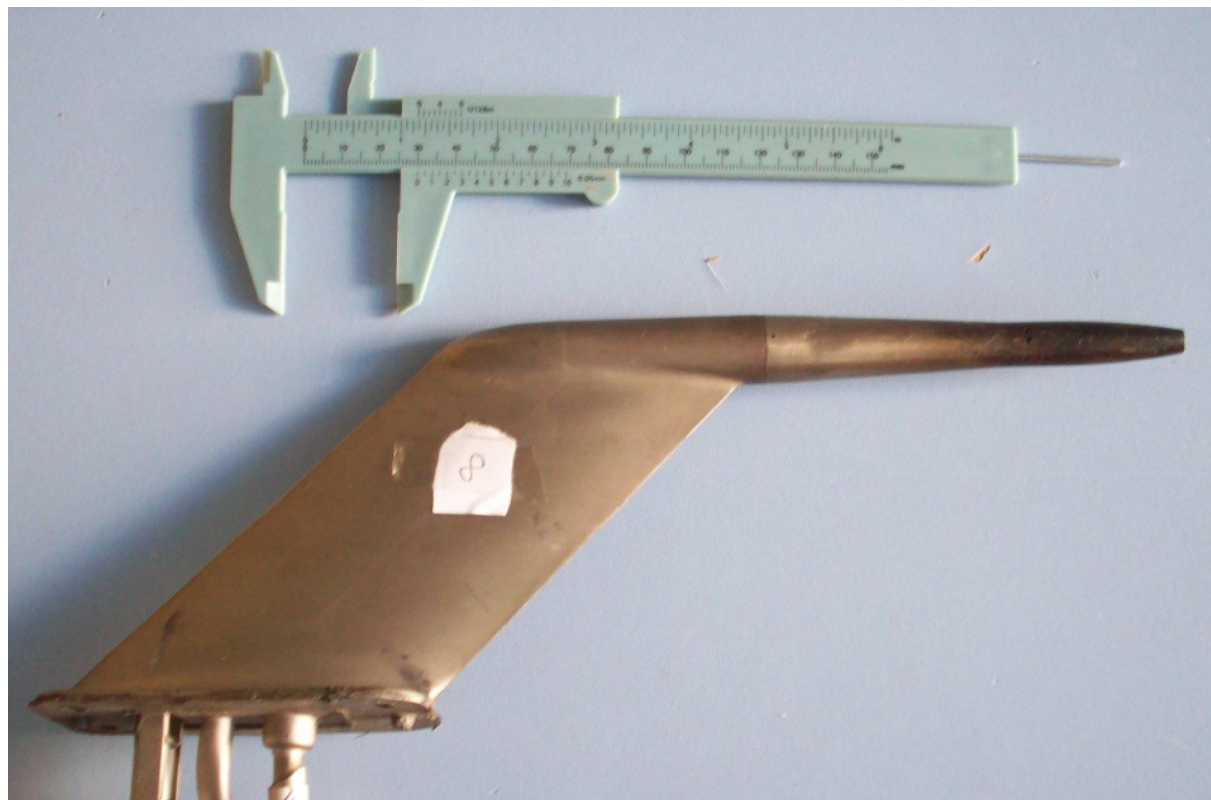
t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	8	6	6	8	8	6	6	6	10	8

5.2.7. Rezultati mjerenja za cijev PS-7

Slika 5-13 Cijev PS-7

Tabela 12 Rezultati mjerenja za PS-7

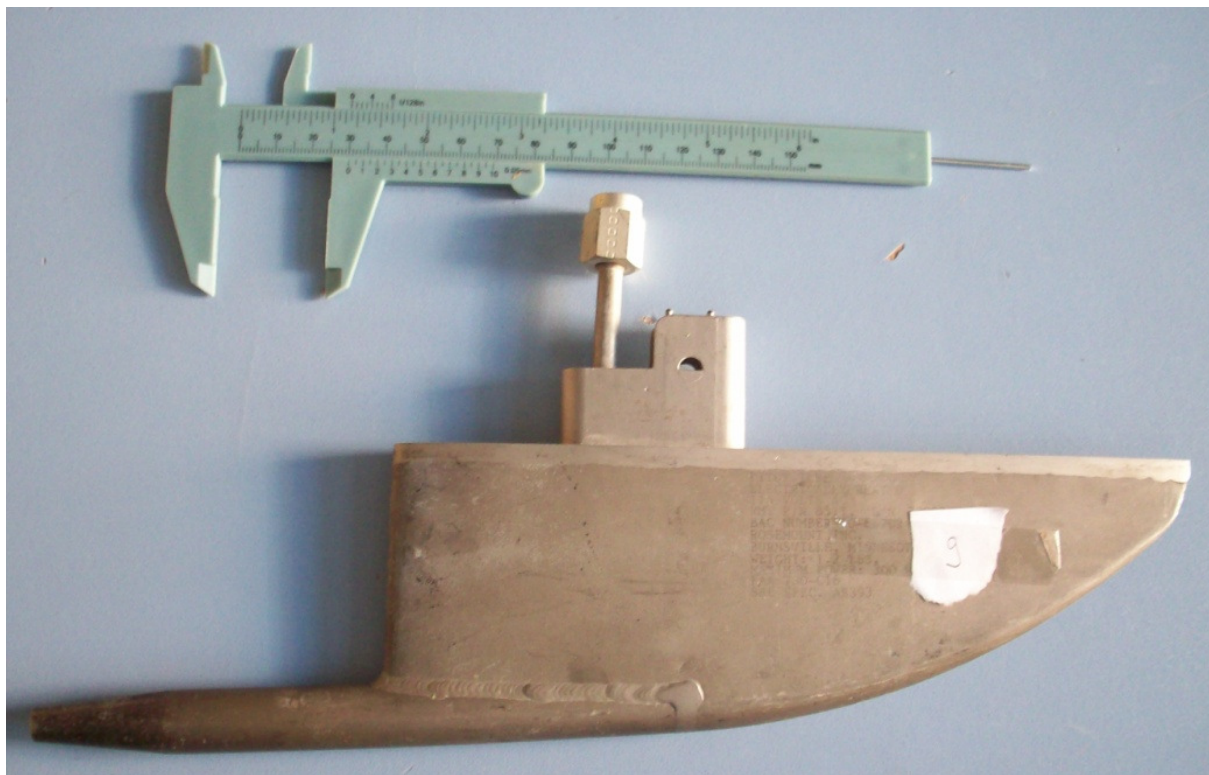
t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	10	10	8	6	8	10	6	8	8

5.2.8. Rezultati mjerenja za PS-8

Slika 5-14 Cijev PS-8

Tabela 13 Rezultati mjerenja za PS-8

t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	8	8	8	10	6	10	6	8	8

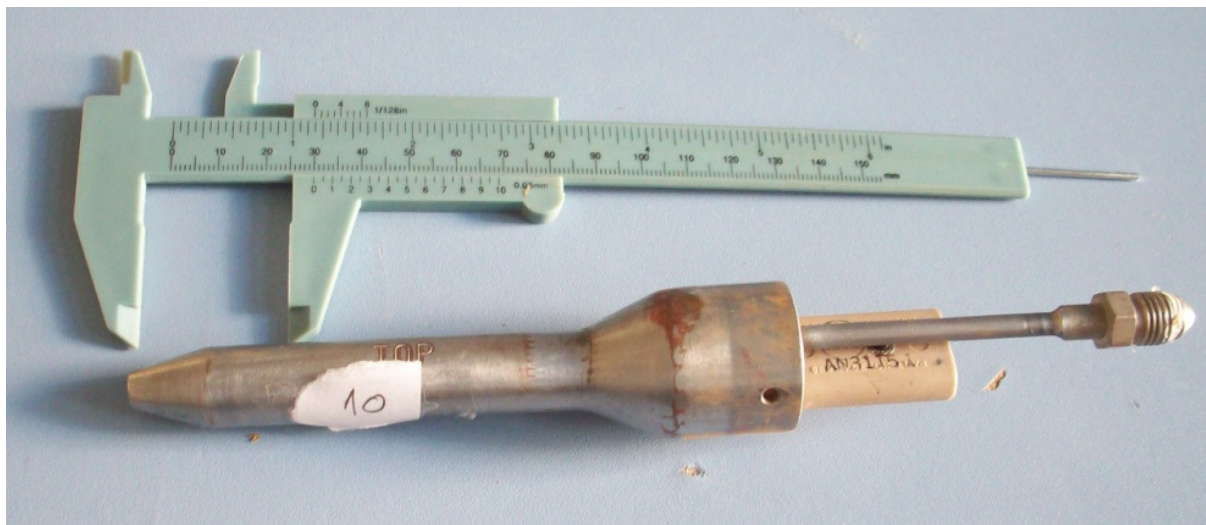
5.2.9. Rezultati mjerenja za cijev PS-9

Slika 5-15 Cijev PS-9

Tabela 14 Rezultati mjerenja za PS-9

t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	8	8	8	6	8	8	8	10	6

5.2.10. Rezultati mjerenja za cijev PS-10



Slika 5-16 Cijev PS-10

Tabela 15 Rezultati za PS-10

t [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Δh [mm]	10	10	8	8	8	8	6	6	8	6

5.2.11. Prosječne visine i prosječne brzine za sve cijevi na poziciji 1

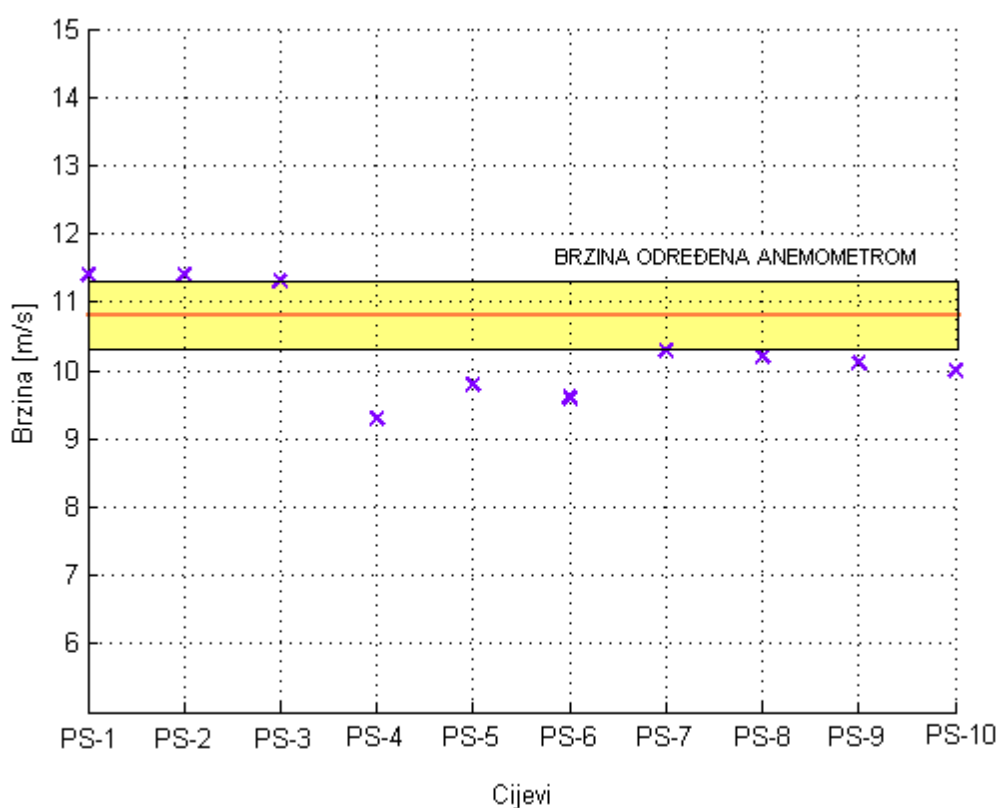
Tabela 16 Prosječne visine i brzine za sve cijevi

CIJEVI	PS-1	PS-2	PS-3	PS-4	PS-5	PS-6	PS-7	PS-8	PS-9	PS-10
$\Delta \tilde{h}$ [mm]	10,2	10,2	10,0	6,8	7,6	7,2	8,4	8,2	8,0	7,8
\bar{v} [m/s]	11,4	11,4	11,3	9,3	9,8	9,6	10,3	10,2	10,1	10,0

5.3. Usporedba rezultata s referentnim vrijednostima za poziciju 1

Graf na slici 5-17 prikazuje određene brzine i referentnu vrijednost određenu anemometrom na poziciji 1. U ovom slučaju referentna vrijednost označuje vrijednost dobivenu drugačijim postupkom mjerenja, anemometrom, kojega također treba dodatno provjeriti.

Točnost očitavanja brzine na anemometru je 0,5 [m/s], čime je definirano polje oko linije referentne brzine.



Slika 5-17 Grafički prikaz i usporedba rezultata za poziciju 1

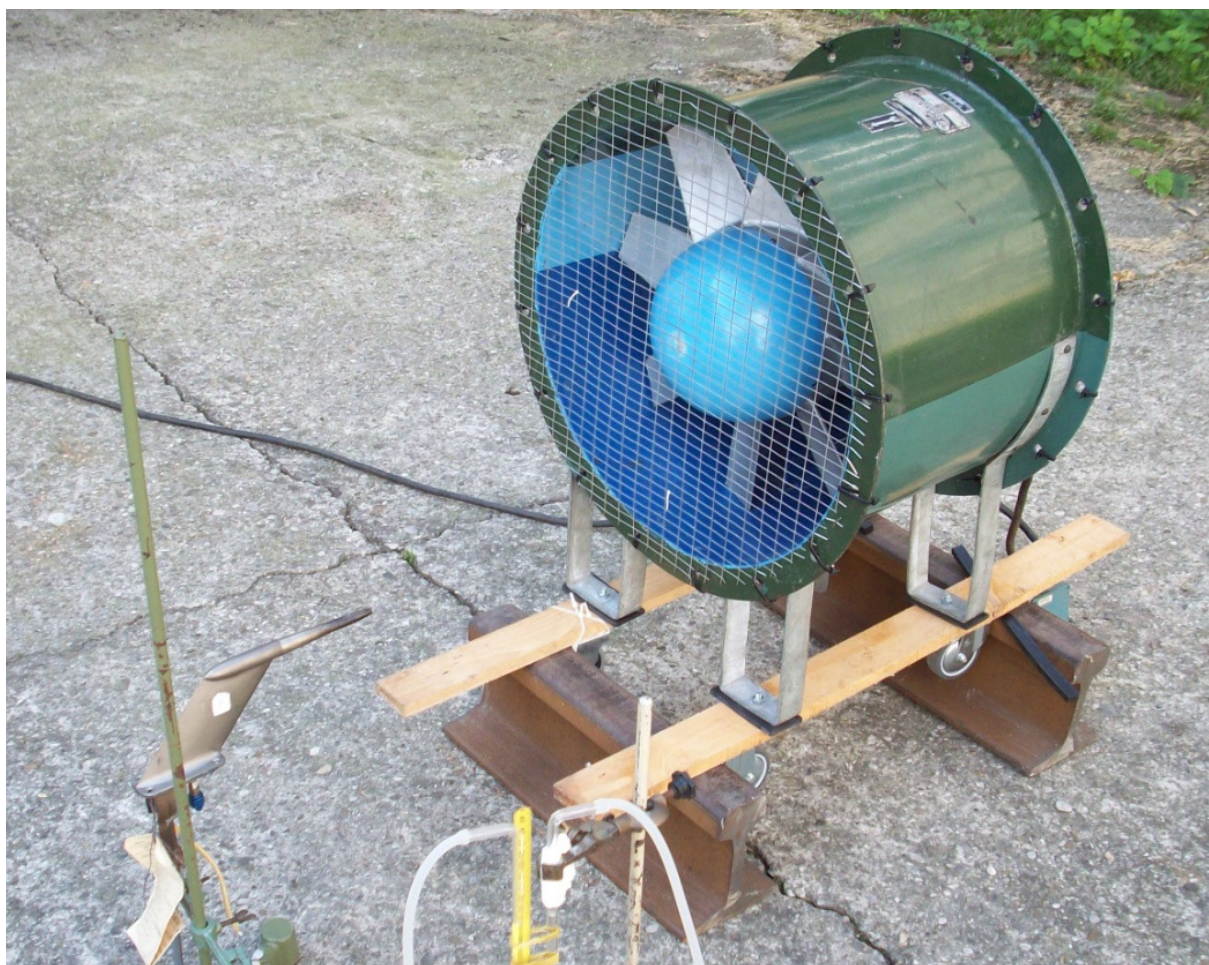
Referentna brzina, izmjerena anemometrom, za poziciju jedan iznosi 10,8 [m/s]. Iz slike 5-17 slijedi da niti jedna od karakteriziranih cijevi ne daje rezultat jednak referentnom. Međutim, ako uđemo u dublju analizu vidimo da cijevi PS-1, PS-2, PS-3 i PS-7 od referentne vrijednosti odstupaju samo 0,5 [m/s] što je približno 5%. Prve tri cijevi su konstrukcijski identične te daju iste rezultate. Ni ostale cijevi ne daju prevelika odstupanja, osim cijevi PS-4, koja daje

najveće odstupanje (1,5 [m/s]). Promatrajući slike korištenih cijevi, vidimo da se cijev PS-4 konstrukcijski izdvaja od ostalih, naime njena napadna ivica u obliku je polukugle na koju se nastavlja cijev valjkastog oblika, što je moguć razlog tolikog odstupanja od referentne veličine. Također možemo primijetiti da prve tri cijevi daju rezultat veći od referentnog, dok sve ostale daju manji.

5.4. Mjerenja na poziciji 2

Postupak mjerenja na poziciji 2 isti je kao i postupak mjerenja na poziciji 1. Pošto su slike cijevi istaknute u odjeljku s rezultatima mjerenja na poziciji 1, u ovom odjeljku prikazani su samo rezultati mjerenja za svih deset cijevi u jednoj tablici.

5.4.1. Rezultati mjerenja za sve cijevi na poziciji 2

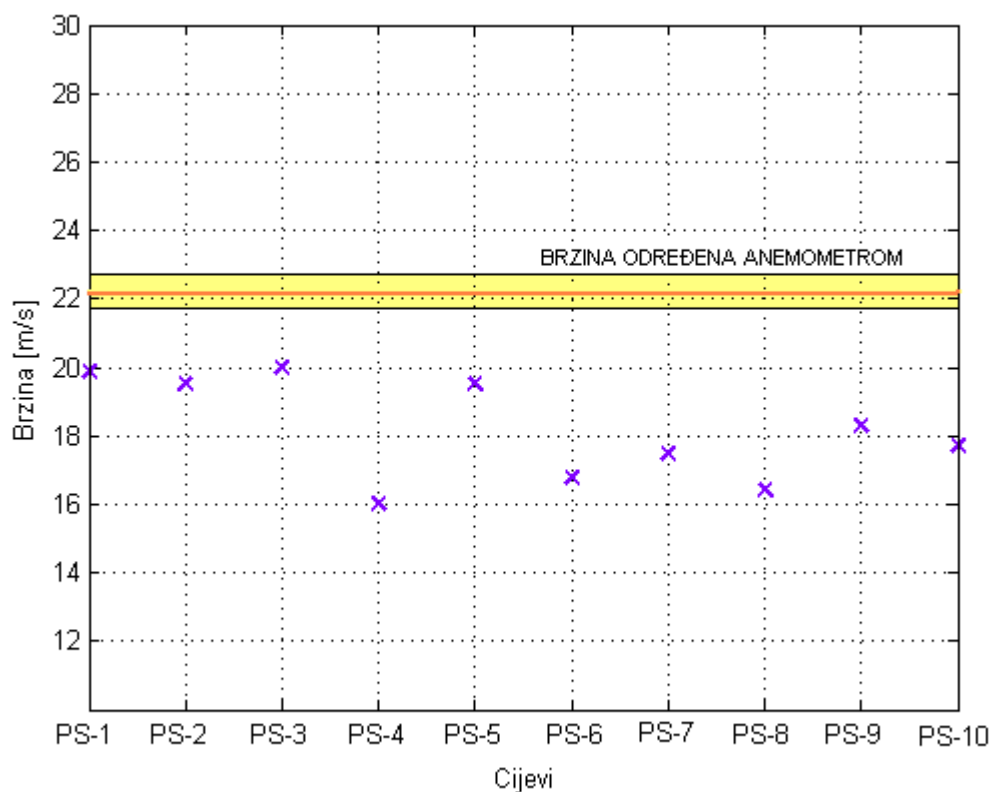


Slika 5-18 Mjerenja na poziciji 2

Tabela 17 Rezultati mjerenja na poziciji 2

VRJEME [s]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	Prosječna visina stupca alkohola $\Delta \tilde{h}$ [mm]	PROSJEČNA BRZINA \bar{v} [m/s]
CIJEV	Visina stupca alkohola Δh [mm]											
PS-1	32	32	30	32	32	32	32	30	30	30	31,2	19,9
PS-2	28	30	30	30	32	30	30	28	30	30	29,8	19,5
PS-3	32	34	32	32	30	32	30	30	30	32	31,4	20,0
PS-4	20	18	20	20	20	20	20	22	20	22	20,2	16,0
PS-5	32	28	28	28	30	32	32	30	30	28	29,8	19,5
PS-6	24	22	22	24	20	22	22	22	22	22	22,2	16,8
PS-7	26	26	28	24	24	22	22	24	20	24	24,0	17,5
PS-8	20	22	22	20	22	20	20	20	22	24	21,2	16,4
PS-9	26	28	26	26	26	26	28	26	26	24	26,2	18,3
PS-10	18	22	24	24	24	24	28	28	24	30	24,6	17,7

5.5. Usporedba rezultata s referentnim vrijednostima za poziciju 2



Slika 5-19 Grafički prikaz i usporedba rezultata za poziciju 2

Promatrajući rezultate vidimo da je najveća razlika u odnosu na rezultate za poziciju 1 to što su sve izmjerene vrijednosti manje od referentne, koja je za ovaj slučaj 22,2 [m/s]. Također se vidi da cijev PS-4 najviše odudara od zadane vrijednosti i to za 6,2 [m/s] što je gotovo 28% manje od referentnog iznosa. Najmanje odstupanje opet pokazuju prve tri cijevi, ali je ono u ovom slučaju ipak veće i iznosi oko 10%.

5.6. Relativna odstupanja srednjih vrijednosti

Izračunata je srednja vrijednost (\widetilde{v}_{PS}) brzina dobivenih Pitot-statičkim cijevima za obadvije pozicije. Za poziciju 1 ona iznosi 10,1 [m/s], dok za poziciju 2 iznosi 17,76 [m/s]. Prema izrazu (11) izračunata su relativna odstupanja brzine (Δv_r) pojedine cijevi od srednje brzine osam Pitot-statičkih cijevi (PS-1, PS-2 i PS-3 su iste pa je uzeta samo jedna brzina). Ova vrijednost u postocima pokazuje koliko brzine pojedinih cijevi odstupaju od prosječne brzine osam cijevi.

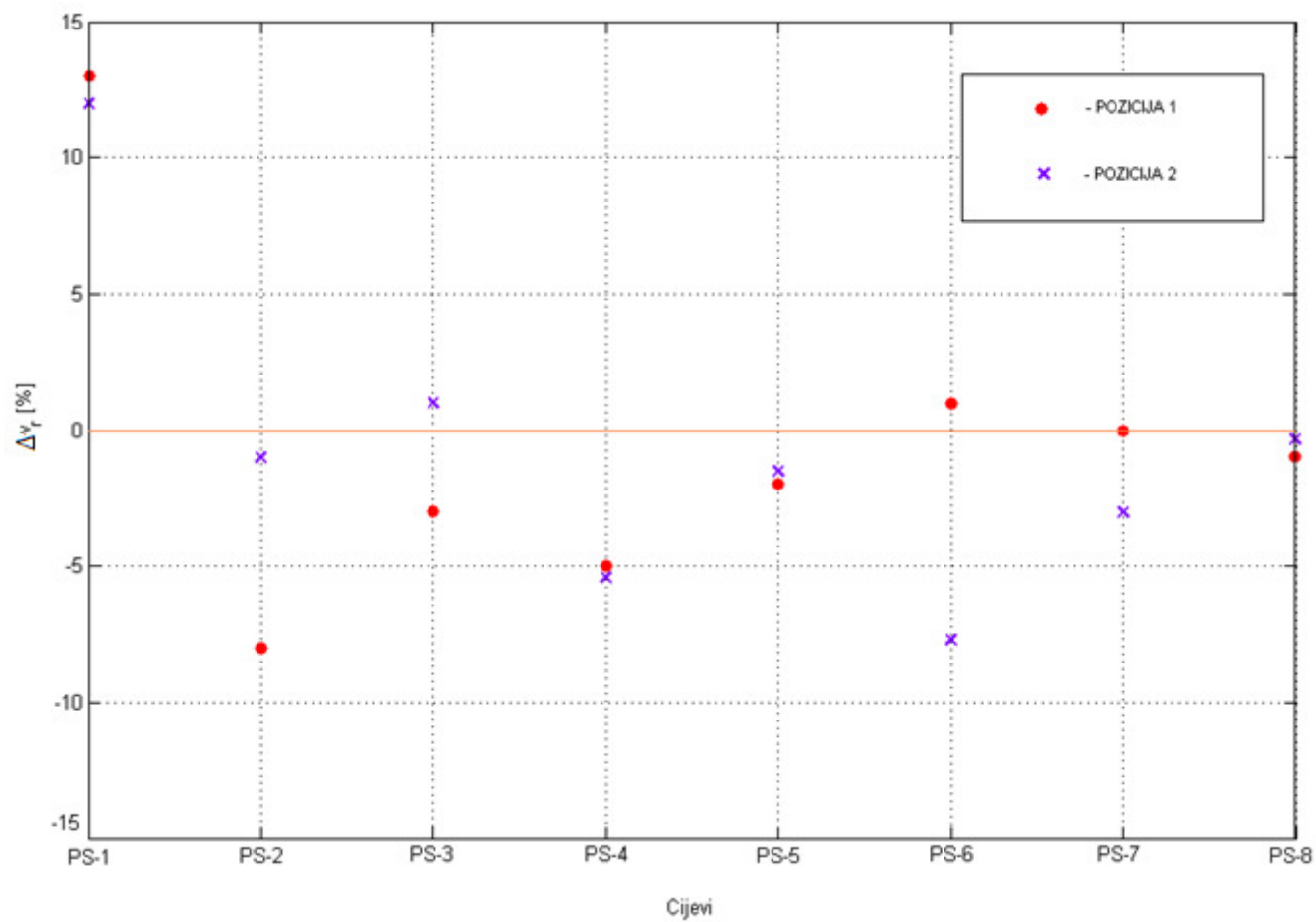
$$\Delta v_r = \frac{v_{PS} - \widetilde{v}_{PS}}{\widetilde{v}_{PS}} \times 100\% \quad (11)$$

Tabela 18 Relativna odstupanja za poziciju 1

CIJEV	PS-1	PS-2	PS-3	PS-4	PS-5	PS-6	PS-7	PS-8
Δv_r [%]	13,0	-8,0	-3,0	-5,0	-2,0	1,0	0	-1,0

Tabela 19 Relativna odstupanja za poziciju 2

CIJEV	PS-1	PS-2	PS-3	PS-4	PS-5	PS-6	PS-7	PS-8
Δv_r [%]	13,0	-8,0	-3,0	-5,0	-2,0	1,0	0	-1,0



Slika 5-20 Relativna odstupanja za poziciju 1 i 2

6. KARAKTERIZACIJA STRUJANJA OKO PITOT-STATIČKIH CIJEVI

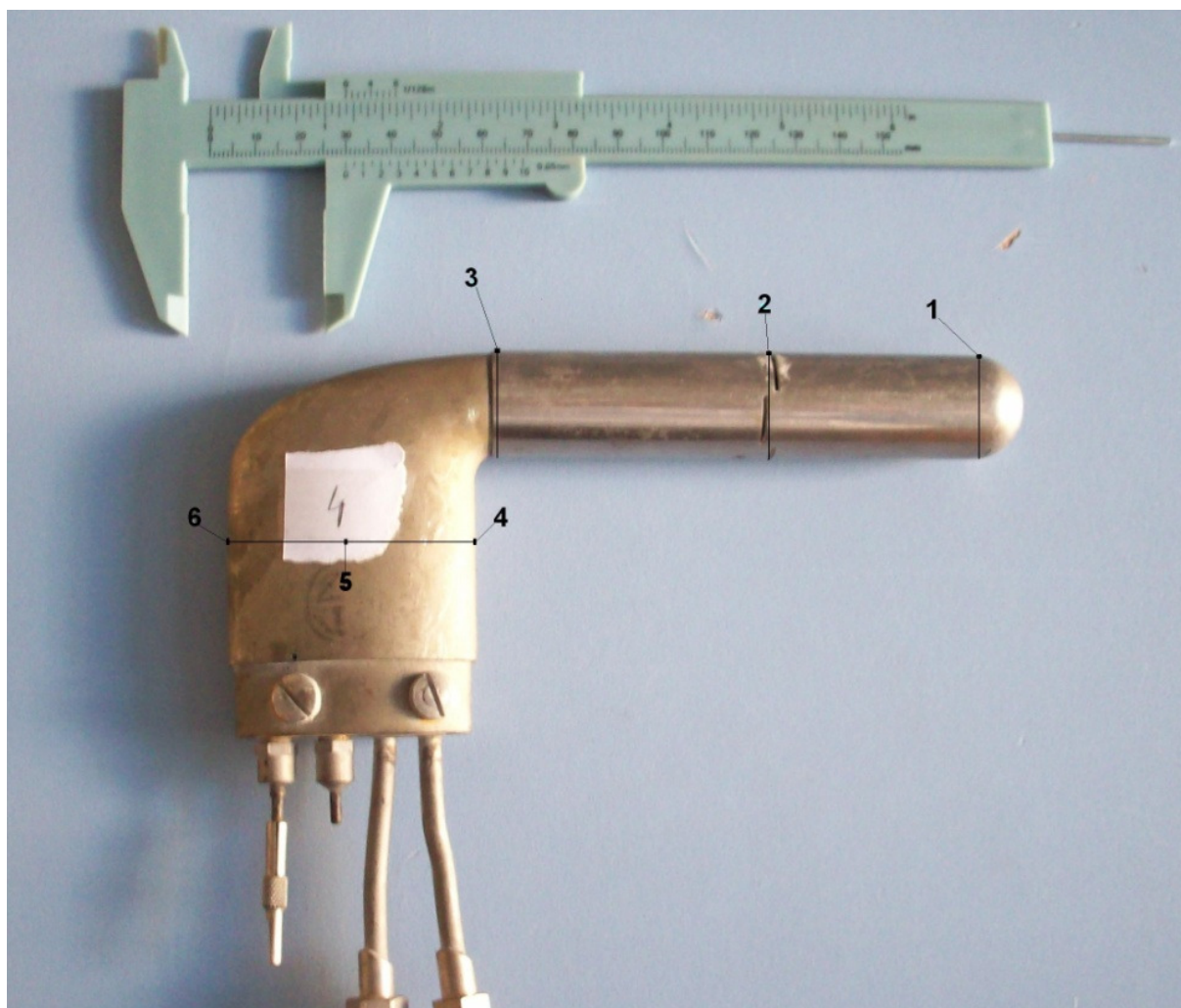
U ovom poglavlju opisana su mjerenja tlaka i izračuni brzine oko Pitot-statičkih cijevi. Cilj mjerenja je bio analizirati strujanje zraka oko samih Pitot-statičkih cijevi, odnosno prostornu raspodjelu tlakova i brzina. Oprema za izvođenja mjerenja ista je kao i oprema navedena za mjerenja u poglavlju 5, uz dodatak zatupljene medicinske igle kao improvizirane Pitotove cijevi. Ova mjerenja izvedena su na cijevima PS-4 i PS-8.

Prilikom ovih mjerenja nije bilo promjene rezultata u ovisnosti o vremenu pa se tako nije trebalo očitavati rezultate više puta.



Slika 6-1 Karakterizacija strujanja oko Pitot-statičkih cijevi

6.1. Karakterizacija strujanja oko cijevi PS-4



Slika 6-2 PS-4 sa označenim pozicijama za mjerenje tlaka

Tabela 20 Rezultati karakterizacije za PS-4

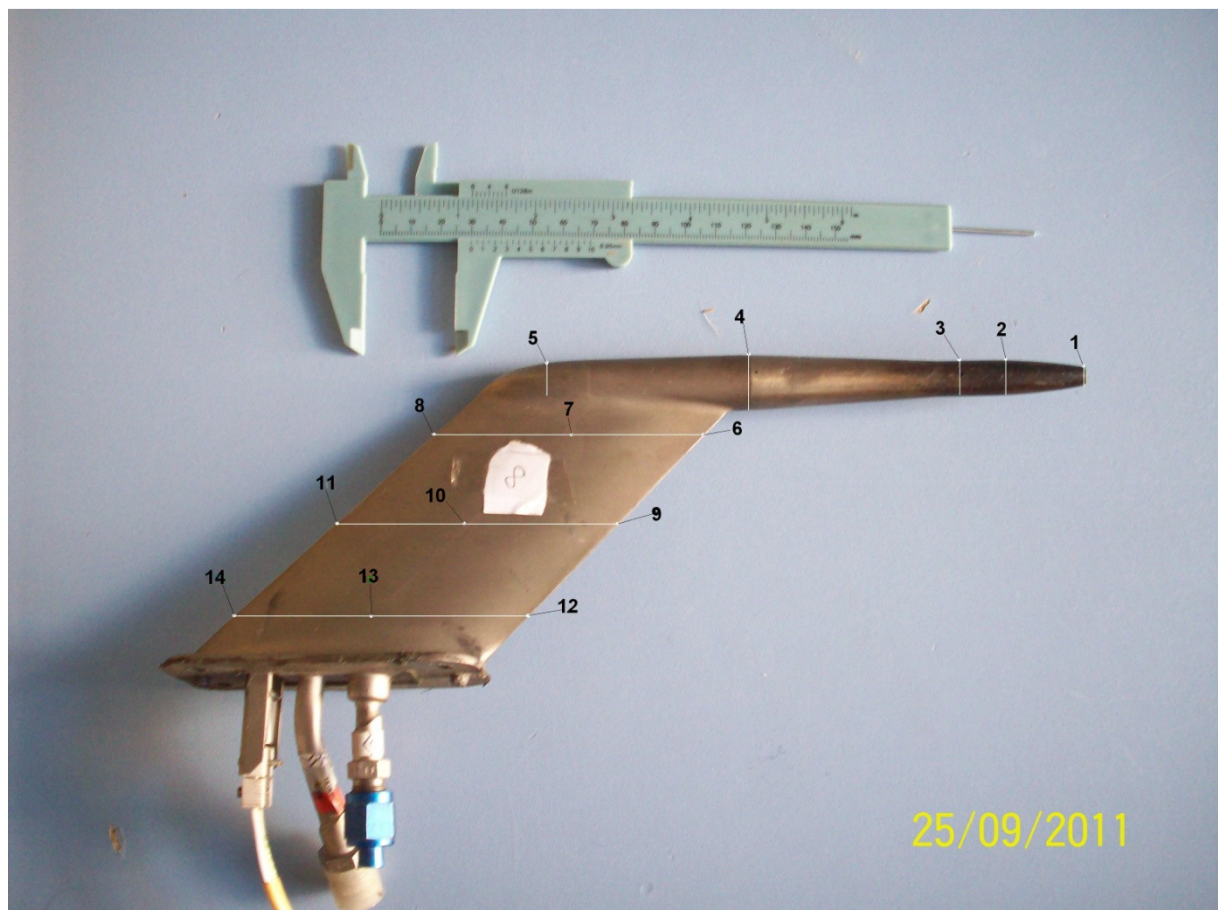
POZICIJA	1	2	3	4	5	6
Δh [mm]	24	22	24	20	8	4
v [m/s]	17,5	16,7	17,5	16,0	10,1	7,1

Na zadanim točkama se mjerio ukupni tlak, igla je ručno postavljena suprotno smjeru strujanja zraka, ali uvijek paralelno površini cijevi. Prilikom mjerenja bilo je potrebno

provjeriti dali je strujanje oko cijevi simetrično, preliminarnim mjerenjima utvrđena je simetričnost strujanja. Odabrano je šest mjernih točaka na cijevi (slika 6-2).

Rezultati prikazani tablicom 20 pokazuju da je na prve tri točke raspored brzina gotovo jednak, pošto su točke postavljene na ravnom dijelu stijenke cijevi. Na nosaču od napadne prema izlaznoj ivici imamo značajan pad brzine, razlog tome je geometrija i otpor nosača jer su mjerenja rađena u neposrednoj blizini stijenke cijevi (2-3 mm).

6.2. Karakterizacija strujanja oko PS-8



Slika 6-3 PS-8 sa označenim pozicijama za mjerenje tlaka

Tabela 21 Rezultati karakterizacije za PS-8

POZICIJA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Δh [mm]	26	18	10	12	14	20	12	8	12	8	7	8	6	4
v [m/s]	18,2	15,1	11,3	12,4	13,4	16,0	12,4	10,1	12,4	10,1	9,4	10,1	8,7	7,1

U ovom slučaju je također potvrđena simetričnost strujanja. Zaključci koje možemo izvući iz ovih rezultata malo su drugačiji u odnosu na PS-4, razlika je u tome što se kod PS-8 zbog promjene geometrije cijevi mijenja brzina duž cijevi (točke 1,2,3,4 i 5), dok je na nosaču opet najveća brzina na napadnoj, a najmanja na izlaznoj ivici.

7. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak karakterizacije Pitot-statičkih cijevi. Uvodno su opisane konstrukcijske i radne značajke, kako Pitot-statičkih cijevi, tako i Pitot-statičkih sustava primijenjivanih u zrakoplovstvu. Spomenut je i povijesni razvoj Pitot-statičkih cijevi. Da bi razumjeli princip rada Pitot-statičkih cijevi obrađena je i teorijska podloga koja se temelji na Bernoullijevoj jednadžbi, gdje su dani i izrazi koji su primijenjeni na izračun brzina strujanja zraka na temelju rezultata mjerenja. Detaljno je opisan postupak karakterizacije Pitot-statičkih cijevi i svih mjerenja koja su se izvodila. Prvi dio mjerenja dao nam je iznose s kojima smo uspoređivali rezultate dobivene na temelju mjerenja Pitot-statičkim cijevima. Drugim djelom mjerenja, pomoću Pitot-statičkih cijevi, dobili smo podatke s kojima smo računali brzinu strujanja zraka na dvije različite pozicije. Usporedbom rezultata dobivenih Pitot-statičkim cijevima sa referentnim vidi se da niti jedna cijev nije dala vrijednost jednaku referentnoj, a isto tako sve su cijevi dale različite iznose brzina, s različitim odstupanjima. Određena su i relativna odstupanja srednjih brzina.

LITERATURA

- [1] www.britannica.com (Henri Pitot)
- [2] www.ias.ac.in (Ludwig Prandtl)
- [3] Bombardier Aerospace, Dash Q400, Aircraft Maintenance Manual Part 2, Revision 35, Lipanj 2011.
- [4] Pallett E.H.J., Aircraft Instruments, Longman Publishing Group, Velika Britanija, 1988.
- [5] www.daniel-bernoulli.com
- [6] Virag Z., Mehanika Fluida I – što valja zapamtiti, predavanja
- [7] Munson B.R., Young D.F., Okiishi T.H., Huebsch W.W., Fundamentals of fluid mechanics, Wiley, SAD, 2009.