

# Mjerenje brzine strujanja u podzvučnom aerotunelu AT-1

---

**Petrović, Matej**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:289284>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Matej Petrović**

**MJERENJE BRZINE STRUJANJA U  
PODZVUČNOM AEROTUNELU AT-1**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, 2016.**

Zagreb, 20. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Teorija leta I**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 3597**

Pristupnik: **Matej Petrović (0135232043)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Mjerenje brzine strujanja u podzvučnom aerotunelu AT-1**

### Opis zadatka:

U završnom potrebno je opisati načela mjerenja brzine strujanja zraka te različite sustave mjerenje brzine zraka u podzvučnim aerotunelima kao i izvore mjerene nesigurnosti. Za praktični dio raada potrebno je izvršiti umjeravanje brzine zraka s frekvencijom rada motora u tunelu AT-1. Brzinu je potrebno mjeriti na više različitih načina, primjerice, anemometrom te Pitot statičkim sustavom. Dobivene rezultate usporediti i grafički prikazati.

Zadatak uručen pristupniku: 4. ožujka 2016.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



---

dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**MJERENJE BRZINE STRUJANJA U PODZVUČNOM AEROTUNELU  
AT-1**

**AIRSPPEED MEASURING IN SUBSONIC WIND TUNNEL AT-1**

Mentor: dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

Student: Matej Petrović

JMBAG: 0135232043

Zagreb, rujan 2016.

## SAŽETAK

Aerotuneli su bitan alat za istraživanje i razumijevanje gibanja fluida. Imaju razne namjene, a najčešća primjena je u aerodinamici, odnosno zrakoplovstvu. U ovom radu je opisan princip i metode koje se najčešće koriste u mjerenju brzine zraka u aerotunelima, s posebnim osvrtom na podzvučne aerotunele. Izmjerena je brzina strujanja zraka u podzvučnom aerotunelu AT-1 koristeći različite frekvencije rada motora. U obzir je uzeta vlažnost zraka.

KLJUČNE RIJEČI: fluid; brzina zraka; aerotunel

## SUMMARY

Wind tunnels are important tool for research and understanding of fluid movement. They have various purposes, but the most common use is in aerodynamics, regarding aviation. In this paper are described principles and usual ways of measuring air velocity in wind tunnels with special reference to subsonic wind tunnels. The air velocity in subsonic wind tunnel AT-1 is measured using different frequencies of engine. Air humidity is taken into consideration as well.

KEYWORDS: fluid; air velocity; wind tunnel

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEORIJA MJERENJA BRZINE ZRAKA.....	2
2.1. Reynoldsov broj .....	2
2.2. Bernoulijeva jednadžba.....	4
2.3. Mjerenje statičkog tlaka .....	5
2.4. Mjerenje zaustavnog tlaka .....	7
2.5. Mjerni pretvornici tlaka .....	8
3. SUSTAVI MJERENJA BRZINE ZRAKA U PODZVUČNIM AEROTUNELIMA.....	10
3.1. Klasifikacija aerotunela.....	10
3.2. Komponente aerotunela .....	11
3.2.1. Radna sekcija.....	15
3.2.2. Difuzori .....	15
3.2.3. Kutne sekcije .....	16
3.2.4. Saće i mreže .....	16
3.2.5. Konvergentna mlaznica.....	17
3.2.6. Pogonska sekcija .....	18
3.3. Metode mjerenja brzine zraka.....	19
3.3.1. Venturijeva cijev.....	19
3.3.2. Pitot-Prandtlova cijev .....	20
3.3.3. Anemometar s toplom žicom .....	21
3.3.4. Laser-Dopplerov anemometar.....	23
4. IZVORI MJERENE NESIGURNOSTI .....	25
5. UMJERAVANJE BRZINE ZRAKA S FREKVENCIJOM RADA MOTORA U TUNELU AT-1 ....	28
5.1. Karakteristike aerotunela AT-1.....	29
5.2. Određivanje brzine strujanja u aerotunelu AT-1 .....	29
6. REZULTATI .....	33
7. ZAKLJUČAK .....	35
Literatura.....	36

Popis slika.....	37
Popis tablica .....	38
Popis grafikona .....	39

## 1. UVOD

Napretkom aerodinamičkih istraživanja koji je započeo krajem 19. stoljeća pojavljuju se i prvi aerotuneli. Prvi aerotunel napravila su braća Wright 1901. godine. Kasnije se sve više razvijaju da bi danas postojali izrazito napredni i sofisticirani aerotuneli u kojima je moguće provoditi eksperimente i istraživanja u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Spadaju u glavne i esencijalne alate u istraživanju i razumijevanju aerodinamike. Cilj ovog završnog rada je objasniti teoriju mjerenja brzine zraka te navesti sustave koji se koriste pri mjerenju brzine zraka u podzvučnim aerotunelima. Rad je podijeljen na 7 poglavlja:

1. Uvod
2. Teorija mjerenja brzine zraka
3. Sustavi mjerenja brzine zraka u podzvučnim aerotunelima
4. Izvori mjerene nesigurnosti
5. Umjeravanje brzine zraka s frekvencijom rada motora u aerotunelu AT-1
6. Rezultati
7. Zaključak

U drugom poglavlju opisana je teorija mjerenja brzine zraka, počevši od fundamentalnih jednadžbi za modeliranje toka fluida preko osnovnih parametara koji određuju osobine fluida do načina mjerenja statičkog i zaustavnog tlaka. Također su opisani i mjerni pretvornici tlaka koji se najčešće koriste.

U trećem poglavlju opisani su aerotuneli, njihova podjela i klasifikacija po brzinama strujanja zraka te osnovni dijelovi aerotunela. Prikazani su i opisani sustavi mjerenja brzine zraka koji se koriste u podzvučnim aerotunelima.

Četvrto poglavlje obuhvaća najčešće pogreške koje se javljaju pri mjerenjima u aerotunelima te opisuje mjernu nesigurnost.

U petom poglavlju opisan je proces kalibracije aerotunela te karakteristike i značajke aerotunela AT-1, kao i praktični dio rada čiji su rezultati prikazani u šestom poglavlju.



## 2. TEORIJA MJERENJA BRZINE ZRAKA

Fundamentalni princip iz kojeg su izvedene jednačbe korištene za modeliranje toka u podzvučnim aerotunelima sadržan je u tri osnovna načela<sup>1</sup>:

1. zakon održanja mase
2. drugi Newtonov zakon
3. prvi termodinamički zakon.

Zakon održanja mase, poznatiji i kao jednačba kontinuiteta (1), izražava zakon o neuništivosti materije, odnosno masa ne može biti niti stvorena niti uništena. Budući da je tekućina nestlačiva, protok fluida kroz cijev je stalan te je brzina strujanja veća što je cijev uža.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Oznaka  $\rho$  predstavlja gustoću fluida,  $t$  vrijeme, a  $\vec{V}$  je vektor brzine fluida. Drugi Newtonov zakon (2), odnosno temeljni zakon gibanja, pokazuje da je promjena količine gibanja  $m\vec{V}$  razmjerna sili  $F$  koja djeluje, a odvija se u smjeru te sile.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{V}) \quad (2)$$

U slučaju pretpostavke nepromjenjivosti mase koji se javlja pri brzinama puno manjim od brzine svjetlosti<sup>2</sup>, jednačba poprima jednostavniji oblik i objašnjava da ako na tijelo mase  $m$  djeluje sila  $F$ , ona mu daje ubrzanje  $a$  (3).

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3)$$

Prvi termodinamički zakon govori kako je energija stalna, ne može se stvoriti ni iz čega niti se može uništiti, već se može samo prenijeti iz jednog oblika u drugi, ili s jednog tijela na drugo.

Ovi zakoni daju vezu među raznim fizikalnim veličinama fluida (kao što su gustoća, brzina, tlak, brzina deformacije, unutarnja energija, viskoznost) i opisuju njihove varijacije sa promjenom tlaka i temperature u vremenu i prostoru.

### 2.1. Reynoldsov broj

Viskoznost fluida je jedan od primarnih osobina fluida. Definira se kao otpor kojim se fluid suprotstavlja strujanju. Strujanje fluida pod djelovanjem sila može se shematski predstaviti kao klizanje paralelnih slojeva koji se gibaju različitim brzinama. Ako sile prestanu djelovati, fluidni slojevi prelaze u stanje mirovanja ne pokazujući nikakvu tendenciju vraćanja u početni položaj.

---

<sup>1</sup> Izvor [1]

<sup>2</sup> tzv. nerelativistička aproksimacija

Zaustavljanje fluida pripisuje se djelovanju viskoznosti kao efektu otpora. Kao mjera viskoznosti može poslužiti vrijeme koje je potrebno da se fluid pretoči iz jedne posude u drugu. Što je vrijeme duže, fluid je viskozniji i obrnuto<sup>3</sup>.

Viskozne sile proporcionalne su s dinamičkim koeficijentom viskoznosti  $\mu$ , a inercijalne s gustoćom fluida  $\rho$ , a njihov odnos poznatiji je kao kinematički koeficijent viskoznosti  $\vartheta$  (4).

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Najvažniji parametar pri provođenju eksperimenata u podzvučnim aerotunelima je Reynoldsov broj. Pomoću njega se izražava utjecaj viskoznosti na strujanje. Reynoldsov broj predstavlja količnik inercijalnih i viskoznih sila. Kod strujanja oko aeroprofila njegova vrijednost je velika (oko  $10^6$ ) što pokazuje da su inercijalne sile dominantne, a djelovanje viskoznih sila svedeno je na tanki sloj fluida koji se naziva granični sloj<sup>4</sup>. Granični sloj je sloj fluida u kojemu se brzina mijenja od nule (to je brzina fluida u neposrednom dodiru s tijelom) do brzine slobodnog strujanja (brzina se povećava kada udaljenost od tijela raste).

$$Re = \frac{Vl}{\vartheta} \quad (5)$$

$V$  označava brzinu strujanja,  $l$  je karakteristična duljina (npr. duljina cijevi, srednja duljina tetive krila zrakoplova i sl.), a  $\vartheta$  kinematički koeficijent viskoznosti (5).

Reynoldsov broj je primarni parametar sličnosti pri brzinama manjim od  $0,3 \text{ Ma}^5$ . Služi kao kriterij prema kojemu se može utvrditi hoće li u danim okolnostima nastupiti laminarno ili turbulentno strujanje fluida. Strujanje u graničnom sloju u početku je laminarno, zatim slijedi relativno kratka prijelazna zona na kojoj dolazi do transformacije laminarnog strujanja u turbulentno da si se produžilo kao razvijeno turbulentno strujanje. Prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje ovisi o brzini fluida i o njegovoj viskoznosti. Brzina kod koje nastaje turbulentno strujanje zove se kritična brzina. Za vrijednost Reynoldsovog broja manjeg od oko 2 300 strujanje je laminarno, a za vrijednost većeg od oko 2 300 strujanje je turbulentno.

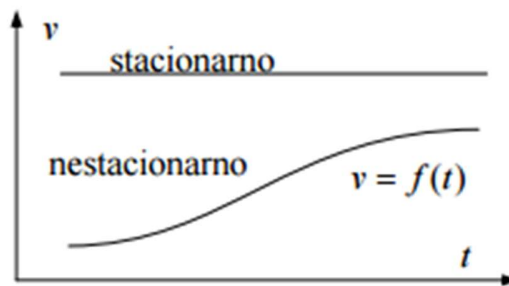
U laminarnom strujanju (Slika 1.) gotovo nema miješanja čestica i slojevi fluida teku glatko. Pojavljuje se kada fluid teče paralelnim slojevima bez poremećaja između slojeva. Brzine u ovom strujanju su pravilne funkcije prostora i vremena.

---

<sup>3</sup> Izvor [1]

<sup>4</sup> Izvor [1]

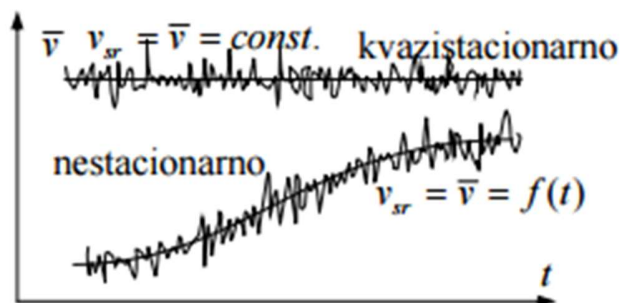
<sup>5</sup> Izvor [2]



Slika 1. Laminarno strujanje

Izvor [3]

Ako brzina fluida prijeđe određenu granicu nastupa turbulentno strujanje (Slika 2.). Turbulentno strujanje je nemirno, neustaljeno gibanje po nepravilnim i nepredvidivim putanjama sa intenzivnim miješanjem čestica fluida. U njemu se samo srednje strujanje, obuhvaćajući veće mase fluida, no ne i elementarne čestice, odvija u određenom smjeru i nekim određenim profilom srednjih brzina. Za turbulentno strujanje karakteristično je da pored srednje brzine cijelog strujanja, svaka čestica fluida ima još i dodatnu brzinu koja može biti djelomično u smjeru glavnog strujanja, djelomično okomita na smjer strujanja.



Slika 2. Turbulentno strujanje

Izvor [3]

## 2.2. Bernoulijeva jednadžba

Bernoulijeva jednadžba je osnovni zakon gibanja fluida. Proizlazi iz primjene zakona o očuvanju energije na strujanje fluida. Za idealan slučaj stabilnog protoka fluida sa viskoznošću jednakoj nuli i uniformnom raspodjelom vektora brzina, Reynoldsov broj poprima vrijednost u beskonačnosti.

Bernoulijeva jednadžba se postavlja i vrijedi samo duž strujnice. Strujnica je crta koja je određena vektorom brzine, odnosno to je tangenta na putanju i kroz nju nema protoka.

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = const. \quad (6)$$

Jednadžba (6) pokazuje da je zbroj statičkog tlaka  $p$  i dinamičkog tlaka  $q$  konstantan. U dinamičkom tlaku  $\rho$  označava gustoću, a  $V$  brzinu fluida u nekoj točki. Prema tome, ondje gdje je brzina fluida veća, tlak je manji, a ondje gdje je brzina fluida manja, tlak je veći. Na Bernoulijevoj jednadžbi zasnivaju se mnoge inženjerske primjene, kao npr. let zrakoplova. Zrak struji uz gornju zakrivljenu plohu krila brže nego ispod krila, pa je tlak na donju plohu krila veći nego na gornju, što ima za posljedicu da na krila djeluje ukupna sila prema gore koja diže zrakoplov<sup>6</sup> (sila uzgona). Bernoulijeva jednadžba predstavlja zakon očuvanja energije koji govori da za vrijeme stacionarnog strujanja jedinica mase fluida ima konstantnu energiju duž cijele strujnice.

Statički tlak je tlak koji okomito djeluje na smjer strujanja fluida. To je tlak fluida na stjenku. Dinamički tlak je tlak koji nastaje zbog strujanja fluida, odnosno zbog brzine strujanja. Suma statičkog i dinamičkog tlaka duž strujnice uvijek je konstantna.

### 2.3. Mjerenje statičkog tlaka

Mjerenje tlaka u većini slučajeva svodi se na mjerenje pomaka osjetnog elementa. Uslijed razlike tlakova dolazi do pomaka osjetnog elementa (membrana, mijeh, spiralna cijev) koji se može detektirati pretvornikom pomaka. Postoje i mjerni osjetnici tlaka kod kojih se mjerenje svodi na mjerenje promjene narinutog napona na mjerni osjetnik ili promjene jakosti električne struje uslijed promjene otpora koja nastaje kao posljedica promjene naprezanja u osjetnom elementu.

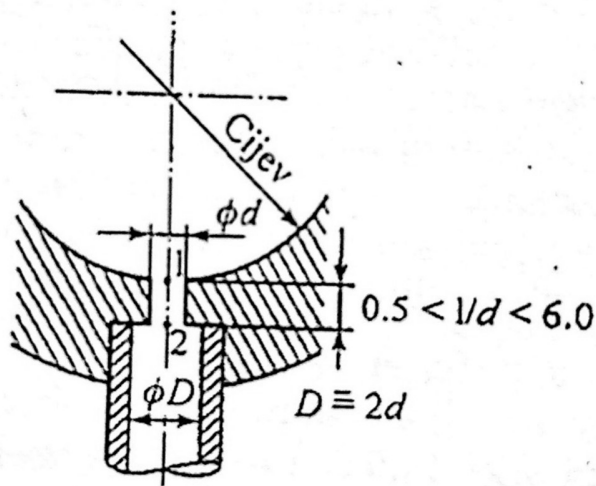
Međusobno djelovanje fluidnih čestica definirano je u mehanici neprekidnih sredina s pomoću površinskih sila. U općem slučaju površinske sile se izražavaju pomoću tenzora naprezanja koji omogućava izračunavanje elementarne aerodinamičke sile na elementarnu površinu. Statički tlak u nekoj točki definira se kao srednja vrijednost zbroja normalnih naprezanja u toj točki.

Mjerenje neke fizikalne veličine ostvaruje se pomoću pretvornika kojih mogu biti jedan ili više u seriji sve dok se ne dobije željena forma izlaznog signala. Kako ne postoji beskontaktno mjerenje tlaka, potrebno je u točki fluidne struje gdje se mjeri tlak postaviti osjetilo pretvornika tlaka na način da se minimalno remeti strujanje i tako minimalno mijenjaju veličine stanja fluida. Osjetilo uzima energiju od fluida i proizvodi signal ovisan o mjernoj veličini. Izlazna veličina iz osjetila je iste fizikalnosti kao mjerna veličina ili različite, gdje se izlazna veličina obrađuje (transformira, filtrira, pojačava, pretvara u različite forme električnog signala). Izlazna veličina na kraju procesa se prikazuje na indikatoru i osiguran je izlazni signal sposoban za prijenos na veće udaljenosti (električni, optički ili pneumatski). Pri mjerenju statičkog tlaka prvi pretvornik u nizu ima najčešće tlak kao svoju izlaznu veličinu.

---

<sup>6</sup> Izvor [4]

Najjednostavniji oblik ima pretvornik za mjerenje površinskog tlaka s pneumatskim izlazom. Izvodi se u obliku kružnog otvora malog promjera u zidu površine i priključne cijevi. Tlak na izlazu iz cijevi mjeri se izravno nekim mjernim pretvornikom tlaka koji u pravilu ima električni izlaz ili se pomoću transmisivne cijevi prenosi do mjernog pretvornika. Na slici 3 prikazano je mjerenje tlaka na površini u jednoj točki u cijevi ili na površini zida makete. Otvor za mjerenje tlaka mora biti okomit na površinu s oštrim bridovima bez ijednog brida povijenog bilo na površinu, bilo u otvor. Odstupanje od ovog vodi do pogreške do 1 % od vrijednosti dinamičkog tlaka, ovisno o veličini nepravilnosti<sup>7</sup>.

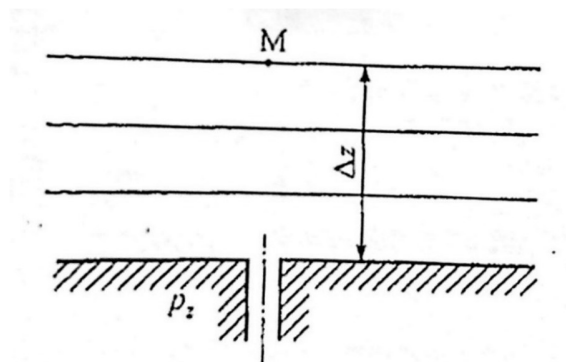


Slika 3. Mjerenje površinskog tlaka

Izvor [1]

Tlak se može mjeriti u fluidnom polju pomoću površinskog tlaka ako strujnice iznad površine nisu zakrivljene (Slika 4.). Statički tlak se preko graničnog sloja prenosi na otvor za mjerenje tlaka tako da je izmjereni tlak  $p_z = p_M + \rho g \Delta z$ , gdje je  $\Delta z$  vertikalna udaljenost između otvora i točke M u kojoj se želi odrediti tlak, a  $g$  je ubrzanje Zemljine sile teže.

<sup>7</sup> Izvor [1]



Slika 4. Mjerenje statičkog tlaka u fluidnom polju

Izvor [1]

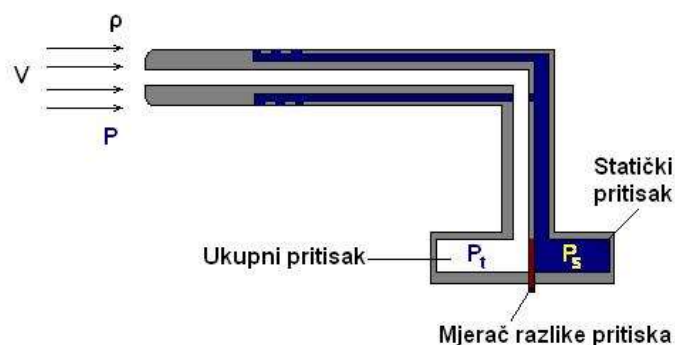
Kada su strujne linije u fluidnom polju iznad čvrste površine zakrivljene ili je čvrsta površina valovita, mora se koristiti pretvornik za mjerenje statičkog tlaka čiji se osjetilni dio postavlja u mjernu točku M. Najpoznatiji pretvornik je Prandtlova cijev.

## 2.4. Mjerenje zaustavnog tlaka

Kada se fluidna čestica sa određenom brzinom i pod određenim tlakom dovede u stanje mirovanja bez trenja i razmjene topline s okolinom, svoju kinetičku energiju pretvara u povećanje tlaka i temperature. Tlak koji si pritom postiže naziva se zaustavnim tlakom  $p_0$ . Zaustavni tlak se naziva i totalnim ili ukupnim tlakom. Kod nevtložnog strujanja nestlačivog fluida zaustavni tlak je jednak:

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

Kod malih podzvučnih brzina zaustavna temperatura je bliska temperaturi neporemećenog strujanja. Za mjerenje zaustavnog tlaka upotrebljavaju se Pitot cijevi (Slika 5.) s otvorom okrenutim suprotno od smjera brzine slobodnog strujanja.



Slika 5. Pitot cijev

Izvor [5]

Promjer cijevi je nekoliko milimetara, ali se za mjerenje zaustavnog tlaka u graničnom sloju upotrebljavaju i epidermijske igle promjera manjeg od 1 mm.

Pogreška mjerenja može nastati zbog više razloga: nekolinearnost vektora brzine i mjerne cijevi, neuniformiranost brzine strujanja, viskoznosti i turbulencije struje.

Kada se Pitot cijev koristi u kombinaciji s Prandtlovom cijevi za mjerenje brzine u izotropskoj turbulentnoj struji, efekti fluktuacija na zaustavni i statički tlak se poništavaju pri mjerenju diferencijalnog tlaka<sup>8</sup>.

## 2.5. Mjerni pretvornici tlaka

Nakon što je izabran pretvornik tlaka ili zaustavnog tlaka s pomoću kojeg je pretvoren tlak s mjesta mjerenja u tlak na izlazu iz pretvornika, tlak se preko cjevovodnih linija prenosi do mjernog pretvornika. Mjerni pretvornici izražavaju tlak diferencijalno u odnosu na prihvaćeni referentni tlak ili apsolutno gdje je prihvaćeni referentni tlak jednak nuli.

Mjerni pretvornici pretvaraju tlak na ulazu u izlaznu veličinu koja je proporcionalna tlaku. Prema fizikalnosti izlazne veličine postoje:

- hidrostatički pretvornici
- mehanički pretvornici
- elektromehanički pretvornici<sup>9</sup>

Hidrostatički pretvornici pretvaraju tlak ili razliku tlakova u visinu stupca  $h$  tekućine poznate gustoće. Tekućina koja se upotrebljava u hidrostatičkim pretvornicima mora imati stabilne kemijske karakteristike, malu viskoznost, mali koeficijent toplinskog širenja, mali stupanj ishlapljivosti, mali stupanj apsorpcije vlage iz plina (zraka) s kojim je u kontaktu, malu sklonost zaprljanju i malu stlačivost. Cilj je održati gustoću tekućine konstantnom u dužem periodu. Tekućine koje se upotrebljavaju su destilirana voda ( $999 \text{ kg/m}^3$ ), metilni alkohol ( $792 \text{ kg/m}^3$ ), toluol ( $866 \text{ kg/m}^3$ ), živa ( $13590 \text{ kg/m}^3$ ) i sl. Gustoće tekućina su izražene na standardnom atmosferskom tlaku od  $101\,325 \text{ Pa}$  pri  $20^\circ\text{C}$ .

Postoje još i hidrostatički mikromanometri koji pretvaraju diferencijalni tlak i imaju malu pogrešku (od nekoliko desetina do nekoliko tisućinka milimetara vodenog stupca). Upotrebljavaju se za mjerenje malih diferencijalnih tlakova, malih brzina i umjeravanje pretvornika diferencijalnog tlaka male granice pogreške.

Mehanički mjerni pretvornici pretvaraju tlak ili razliku tlakova u silu ili deformaciju elastičnog elementa. Intenzitet sile ili veličina deformacije proporcionalni su tlaku, odnosno razlici tlakova. Takvi pretvornici imaju bolje dinamičke karakteristike od hidrostatičkih pretvornika, kompaktniji

---

<sup>8</sup> Izvor [1]

<sup>9</sup> Izvor [1]

su, ali nisu podobni za mjerenje veoma malih tlakova i diferencijalnih tlakova. Njihova granica pogreške se izražava u postocima od maksimalne mjerne vrijednosti i nalazi se u području 0,1 % do 1 %.

Prednost elektromehaničkih pretvornika u odnosu na hidrostatičke i mehaničke pretvornike je preciznije očitavanje od onoga koje je neposredno na skali i koje je podložno utjecaju pogrešnog očitavanja. Također, očitavanje je puno brže i lako se prenosi na veće udaljenosti i provodi se automatska obrada eksperimentalnih rezultata. Moguće je obavljanje mjerenja brzih prijelaznih procesa.

Elektromehanički se pretvornici u posljednjim desetljećima prošlog stoljeća brzo razvijaju i omogućuju pretvaranje tlaka i diferencijalnog tlaka u električnu izlaznu veličinu (struja ili napon) koja se može lako prenositi na veće udaljenosti, bilježiti, pohranjivati u memoriju i automatski obrađivati. Brza obrada rezultata mjerenja omogućuje skraćivanje trajanja eksperimenta i rano praćenje i otkrivanje eventualnih pogrešaka, čak i tijekom provođenja eksperimenta. Memorirani podaci su lako dostupni i mogu se obrađivati na razne načine. Nedostatak elektromehaničkih pretvornika je visoka cijena i potreba za pomoćnim izvorom energije (električnom), dok su hidrostatički i mehanički pretvornici potpuno pasivni i koriste energiju fluida.

Najčešće izvedbe elektromehaničkih pretvornika su kapacitivni, induktivni, otporni, frekventni, fiberoptički i slično<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Izvor [1]



### 3. SUSTAVI MJERENJA BRZINE ZRAKA U PODZVUČNIM AEROTUNELIMA

Najraniji aerotuneli izumljeni su krajem 19. stoljeća u počecima aeronautičkog istraživanja kada se težilo izumu zrakoplova težim od zraka<sup>11</sup>. Načelo rada aerotunela temelji se na principu relativnog gibanja gdje oko objekta koji se nalazi u stanju mirovanja struji fluid. Pritom se pomoću ventilatora ili kompresora proizvodi strujanje fluida oko objekta ili modela koji miruje.

Ovakve eksperimentalne metode imaju niz prednosti u odnosu na promatranje gibanja objekta kroz miran fluid, kao što su lakše mjerenje i univerzalnost primjene aerodinamičkih tunela. Osnovni cilj aerotunela je određivanje veličina stanja fluida (tlak, brzina, temperatura) u neposrednoj blizini objekta ili modela te sila i momenata kojim fluidna struja djeluje na objekt ili model direktnim mjerenjem.

Aerotuneli spadaju u glavne i osnovne alate u istraživanju aerodinamike i razumijevanju međudjelovanja čestica fluida (zraka). Omogućavaju provođenje eksperimenata u kontroliranim uvjetima i simuliraju okolnosti potrebne za određena istraživanja. Veliki napredak u tehnologiji načina prikupljanja i obrade podataka uvelike je poboljšao kvalitetu dobivenih podataka i omogućio velik broj mjerenja i provođenja eksperimenata u kratkom vremenu.

Svakako treba napomenuti da je od velike važnosti umjeravanje aerotunela kako bi se izbjegle nesigurnosti i pogrešne interpretacije dobivenih podataka. Najčešće pogreške nastupaju kod manjka ili točnosti informacija u pogledu toka fluidnog polja. To dovodi do pogrešnih analiza dobivenih podataka te su redovite kalibracije potrebne za održavanje aerotunela kako bi se poboljšala kvaliteta podataka.

Redovne kalibracije također mogu dati statističku kontrolu nad aerotunelom, odnosno razumijevanje varijacija nad stanjem aerotunela i kako te varijacije utječu na dobivene podatke. Pravilna kalibracija aerotunela nije samo umjeravanje parametara aerotunela već i opsežno razumijevanje kvalitete toka fluidnog polja. Aerotunela treba kalibrirati pravilno i precizno te održavati kalibraciju tokom životnog vijeka aerotunela<sup>12</sup>.

#### 3.1. Klasifikacija aerotunela

Aerotuneli se najčešće koriste za aeronautičke namjene. Postoje još i tuneli za ispitivanje opterećenja vjetrom (zgrada, mostova, dimnjaka, antena), za ispitivanje aerodinamike cestovnih vozila i brodova, balističke namjene, iskorištavanje energije vjetra, ispitivanje aerodinamike zemljine površine i slično. Aerotuneli za aeronautičke namjene mogu biti specijalizirani za još uža

---

<sup>11</sup> Izvor [6]

<sup>12</sup> Izvor [7]

područja primjene, poput strujanja s visokim Reynoldsovim brojevima, za vertikalno i kratko polijetanje i slijetanje, za slobodni pad, za spiralna gibanja, za ispitivanje stabilnosti zrakoplova, za ispitivanje propelera i pogonskih sustava, za ispitivanje uvjeta zamrzavanja na zrakoplovima<sup>13</sup>.

Osnovna podjela aerotunela za aeronautičke primjene je podjela prema brzini strujanja oko modela na podzvučne i nadzvučne aerotunele<sup>14</sup>. Ove se dvije vrste međusobno značajno razlikuju po konstrukciji, pogonu i drugim značajkama. Kod podzvučnih aerotunela nije moguće dostići brzinu strujanja veću od brzine zvuka zbog zagušenja strujanja, a kod nadzvučnih aerotunela postoji konvergentno-divergentna De Lavalova mlaznica kroz koju se strujanje ubrzava iznad brzine zvuka. Podjela prema brzini u ovisnosti o Machovom broju prikazana je u tablici 1.

**Tablica 1.** Podjela aerotunela prema Machovom broju

$0 < Ma < 0,5$	male podzvučne brzine
$0,5 < Ma < 0,8$	velike podzvučne brzine
$0,8 < Ma < 1,2$	krozzvučne brzine
$1,2 < Ma < 5$	nadzvučne brzine
$5 < Ma$	hiperzvučne brzine

Izvor [1]

Radna ili ispitna sekcija aerotunela je mjesto gdje se simuliraju uvjeti strujanja oko fiksiranog objekta ili makete. Kod podzvučnih aerotunela radna sekcija je smještena u najužem dijelu gdje se postižu najveće brzine, a kod nadzvučnih nizstrujno od grla De Lavalove mlaznice gdje je poprečni presjek aerotunela veći nego u grlu. U nastavku rada obrađuje se tematika vezana samo uz podzvučne aerotunele.

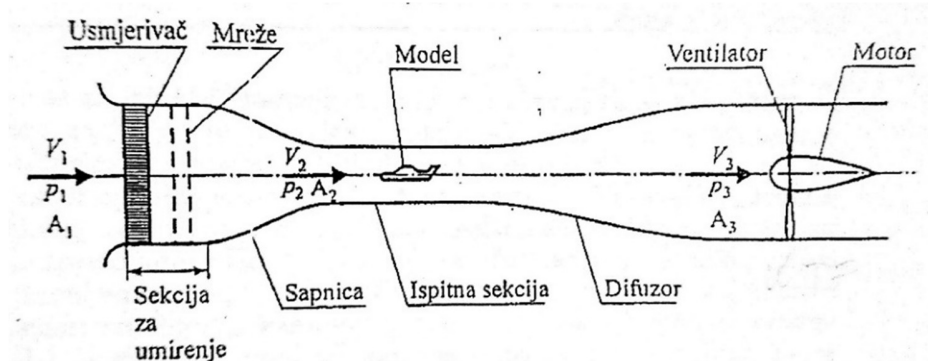
### 3.2. Komponente aerotunela

Prema obliku strujanja zraka postoje dvije osnovne vrste podzvučnih aerotunela, a to su otvoreni i zatvoreni aerotuneli.

Kroz otvorene aerotunele zrak slijedi pravocrtnu putanju od ulazne sekcije kroz konvergentnu mlaznicu do radne sekcije, potom kroz difuzor i preko pogonskog dijela van kroz izlaznu sekciju aerotunela. Kod otvorenih aerotunela nema povratnog strujanja zraka koji je prošao kroz aerotunel, nego na ulaz aerotunela uvijek dolazi svježiji zrak.

<sup>13</sup> Izvor [8]

<sup>14</sup> Izvor [2]



Slika 6. Otvoreni aerotunel

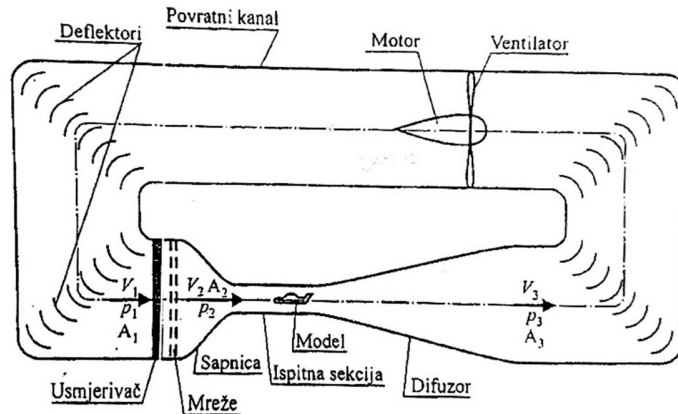
Izvor [1]

Na slici 6. prikazana je shema otvorenog aerotunela. Zrak određene temperature i tlaka usisava se iz prostorije u kojoj je smješten aerotunel ili iz okolne atmosfere izvan zgrade. Zrak prvo prolazi kroz sekciju usmjerivača gdje se zrak usmjerava u pravcu zidova cijevi i razbijaju se eventualno postojeći veliki vrtlozi. Poslije usmjerivača zrak prolazi kroz sukcesivni niz mreža malih otvora čija je funkcija daljnje razbijanje vrtloga i reduciranje intenziteta turbulentnosti nadolazeće struje. Nakon mreža dolazi relativno uniformni dio na koji se nastavlja sapnica ili mlaznica. Kod podzvučnih aerotunela sapnica je konvergentnog oblika i ima funkciju povećavanja brzine zraka do željene brzine  $V$  na ulazu u ispitnu sekciju. U ispitnoj sekciji postavlja se model, mjerna instrumentacija i dio sustava za pozicioniranje modela. Jedan ili dva nasuprotna zida aerotunela su optički transparentna radi promatranja vizualnih efekata strujanja i eventualnog laserskog mjerenja rasporeda brzina. U ispitnoj sekciji mjeri se položaj modela u prostoru, raspored tlaka na modelu, raspored brzina ispred, oko i iza modela, aerodinamičke sile i momenti, a zbog relativno male promjene temperature kod podzvučnih aerotunela mjeri se temperatura samo na ulazu u ispitnom sekciju.

Iz ispitne sekcije zrak ulazi u difuzor. To je strujni element u kojemu je brzina strujanja iz sapnice snižava povećanjem protočnog presjeka. Protočni presjek se povećava malim gradijentom da se spriječi odvajanje struje od zidova. Ventilator aksijalnog ili radijalnog tipa povlači zrak iz difuzora i izbacuje ga u okolinu. Energija zraka koja izlazi iz ventilatora u okolinu je osnovni gubitak mehaničke energije u aerotunelu. Ventilator je osnovni izvor energije za fluid. Brzinom strujanja  $V$  i Reynoldsovim brojem upravlja se promjenom broja okretaja motora ventilatora.

U zatvorenim aerotunelima (Slika 7.) zrak struji u zatvorenoj putanji s vrlo malom ili nikakvom izmjenom zraka s okolinom. Kod ovakvih aerotunela postoji jedan ili više povratnih vodova kojima se upotrijebljeni zrak ponovno vraća u zatvorenom krugu kroz aerotunel. Zatvoreni aerotuneli se dalje dijele prema broju odnosno obliku povratnih vodova na aerotunel s jednim povratnim vodom, s dva povratna voda i s prstenastim ili obuhvatnim povratnim vodom. Najčešće se koriste

aerotuneli s jednim povratnim vodom jer su najjednostavniji i daju ujednačenu i umirenu struju zraka kroz radnu sekciju.



Slika 7. Zatvoreni aerotunel

Izvor [1]

Kroz zatvoreni aerotunel cirkulira uvijek isti zrak u zatvorenoj petlji. Elementi zatvorenih aerotunela su usmjerivač, mreže za redukciju intenziteta turbulentnosti, sapnica, ispitna sekcija, difuzor, ventilator koji je pomaknut u paralelni povratni kanal. Zrak se iz difuzora vodi u koljeno u koje su ugrađeni usmjerivači koji skreću struju zraka za  $90^\circ$  s malim gubicima mehaničke energije.

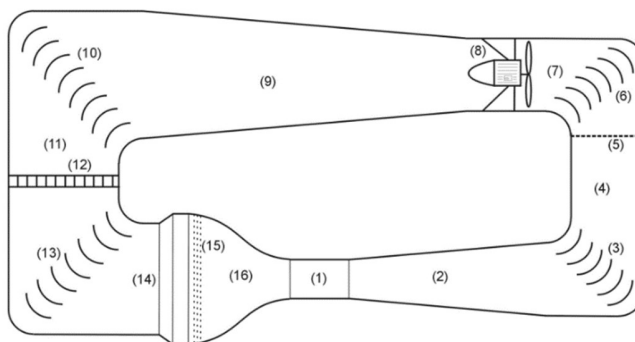
Obje vrste aerotunela imaju svoje prednosti i nedostatke. Prednost otvorenih aerotunela su prije svega manji troškovi izgradnje, dok su najveći problem kod zatvorenih aerotunela viši investicijski troškovi zbog povratnog voda i kutnih sekcija sa zakretnim lopaticama.

Nedostatak otvorenih aerotunela je potreba za zaštitom ulazne i izlazne sekcije od eventualnog usisavanja tvrdih čestica, prašine, kapi vode ili drugih nečistoća, te za zaštitom od atmosferskih utjecaja vjetera i hladnog vremena. Otvoreni aerotuneli stvaraju veću razinu buke, koja može predstavljati ozbiljan problem i moguća je potreba za zvučnom izolacijom aerotunela i okolnih prostorija.

Prednosti zatvorenih aerotunela su niža razina buke i manja potrebna snaga za pogon kojom se postiže jednaka brzina strujanja u ispitnoj sekciji i jednaki protočni presjek sekcije. Kvaliteta strujanja može se dobro kontrolirati upotrebom zakretnih lopatica za usmjeravanje struje zraka te upotrebom mreža i ne ovisi o atmosferskim utjecajima. Karakteristične zračne struje na ulazu u ispitnu sekciju su također bolje te je moguće simuliranje različite nadmorske visine.

U praksi, većina razvojnih eksperimenata provedena je u aerotunelima s radnom sekcijom širine od 3 do 6 metara. Gotovi svi mali istraživački aerotuneli izrađuju se kao otvoreni zbog manjih investicijskih troškova. Većina velikih aerotunela je zatvorenog tipa s jednim povratnim vodom. Sve rjeđe se koriste dvostruki ili prstenasti povratni vodovi.

Dijelovi standardnog zatvorenog aerotunela u tipičnoj konfiguraciji prikazani su na slici 8.



*Slika 8. Komponente zatvorenog aerotunela*

Izvor [8]

To su:

1. radna sekcija (može biti otvorena, zatvorena, djelomično zatvorena, promjenjive geometrije ili izmjenjiva)
2. prvi difuzor (duljina mora biti najmanje 3 ili 4 puta veća od duljine radne sekcije, poželjni su što manji kutovi širenja)
3. prva kutna sekcija s lopaticama za skretanje struje zraka
4. prva poprečna sekcija (najčešće konstantnog poprečnog presjeka)
5. mreža (sprječava da slučajno slomljeni dijelovi modela ili drugi nepoželjni objekti udare i oštete ventilator)
6. druga kutna sekcija s lopaticama za skretanje struje zraka
7. prijelazna sekcija (kod aerotunela pravokutnog poprečnog presjeka, pravokutni presjek mijenja se u kružni)
8. pogonska sekcija (pogonski motor i ventilator)
9. povratni difuzor (kod aerotunela pravokutnog poprečnog presjeka, u njegovom početnom dijelu izvodi se prijelaz kružnog u pravokutni presjek)
10. treća kutna sekcija s lopaticama za skretanje struje zraka
11. druga poprečna sekcija (najčešće konstantnog poprečnog presjeka)
12. izmjenjivač topline
13. četvrta kutna sekcija s lopaticama za skretanje struje zraka
14. širokokutni difuzor s mrežama s mrežama za kontrolu odvajanja struje zraka
15. umirivačka sekcija (može uključivati saća i mreže za smanjivanje turbulencije)
16. konvergentna mlaznica (radni medij se ubrzava na željenu brzinu uslijed suženja poprečnog presjeka)<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Izvor [2]

### 3.2.1. Radna sekcija

Kod konstrukcije aerotunela vrlo je važno odabrati oblik i veličinu radne sekcije. Najvažniji faktor je raspon Reynoldsovih brojeva u radnoj sekciji ovisno o vrsti istraživanja koje se provodi. Kod aerotunela za ispitivanje modela zrakoplova maksimalni raspon krila na modelu treba biti manji od 80 % širine radne sekcije sa čvrstim stjenkama. Radna sekcija treba biti dovoljno velika da bi se detalji na modelu izradili i promatrali. Omjeri raspona krila i duljine zrakoplova kod većine konvencionalnih zrakoplova kreću se od 1 do 1,5, pa je omjer duljine radne sekcije u odnosu na širinu također u tom rasponu.

Kod manjih istraživačkih i edukativnih aerotunela često je nemoguće postizanje Reynoldsovih brojeva koji se pojavljuju na prototipu. U radnim sekcijama malih dimenzija javlja se problem precizne izrade detalja na modelu. Takvi aerotuneli su vrlo korisni za promatranje osnovnih pojava u strujanju fluida i kalibraciju mjernih instrumenata, ali su gotovo neupotrebljivi za ozbiljna istraživanja osim onih s vrlo niskim Reynoldsovim brojevima.

Poprečni presjek radne sekcije može biti kružni, eliptični, kvadratni, pravokutni, šesterokutni, osmerokutni, pravokutni sa zaobljenim kutovima, zaobljene sekcije s ravnim dnom i slično. Razlike u gubicima energije uslijed oblika radne sekcije su zanemarive, pa se oblik određuje na osnovi aerodinamičkih karakteristika modela koji se namjeravaju ispitivati i tako da bude što jednostavniji za korištenje. Radne sekcije s ravnim stjenkama su najbolje sa stajališta postavljanja i izmjene modela i opreme, postavljanja ravnine tla, umjeravanja vanjskih vaga, postavljanja razdjelnih ploča za ispitivanje polovice simetričnih modela te ugradnje prozora za promatranje i snimanje tijekom eksperimenta. Kružni i eliptični presjeci radne sekcije rjeđe se koriste.

Važan detalj pri konstruiranju radne sekcije je ugradnja dovoljno prozora za promatranje modela koje može biti potrebno iz više smjerova (sa strana, odozgora, odozdo, sprijeda). Zbog sigurnosnih razloga prozori moraju biti od materijala otpornog na udarce. Posebnu pozornost treba posvetiti čvrstoći prozora prilikom ispitivanja propelera ili rotora. Odgovarajuće osvjetljenje radne sekcije značajno je za uspješno fotografiranje i snimanje modela<sup>16</sup>.

### 3.2.2. Difuzori

Difuzorom se smatraju sekcije aerotunela od izlaza iz radne sekcije do treće kutne sekcije. Zapravo se radi o dva difuzora, prvi od izlaza iz radne sekcije do prve kutne sekcije i drugi od pogonske sekcije do treće kutne sekcije. Drugi difuzor naziva se još i povratni vod ili povratni prolaz. U povratnom vodu mora se osigurati pristup pogonskoj sekciji radi izmjene ili postavljanja ventilatorskih lopatica te pregleda ili izmjene motora. Namjena difuzora je smanjivanje brzine strujanja radnog medija, a time i gubitaka snage koji su proporcionalni s trećom potencijom brzine. Poželjno je smanjivanje brzine u što moguće kraćoj duljini bez pojave odvajanja struje. Kvalitetnim oblikovanjem difuzora postiže se dobra djelotvornost aerotunela i smanjivanje

---

<sup>16</sup> Izvor [8]

troškova konstrukcije. Difuzori su osjetljivi na odvajanje ili separaciju struje što može prouzročiti vibracije, promjenjivo opterećenje ventilatora, oscilacije brzine u radnoj sekciji i povećanje gubitaka snage<sup>17</sup>.

Osnovni parametri difuzora su ekvivalentni kut širenja konusa, duljina te omjer izlazne i ulazne površine. Većina difuzora u aerotunelima nije konusnog oblika, nego pravokutnog ili približno pravokutnog, jednako kao radne sekcije s ravnim stjenkama.

Ekvivalentni kut konusa mora biti dovoljno malen da ne dođe do odvajanja turbulentnog graničnog sloja. Vrtlozi u struji fluida koji nastaju u radnoj sekciji oko modela i utjecaj lopatica za skretanje struje u kutnoj sekciji nepovoljno djeluju jer potiču odvajanje. Ekvivalentni kut konusa trebao bi biti manji od  $3^\circ$ , a tipični omjer površina treba biti oko 3. Gradijent tlaka u difuzoru, a time i mogućnost odvajanja struje, ovise i o kutu konusa i o omjeru površina. Ukoliko se koristi dugački difuzor sa zadovoljavajućim kutom konusa da bi se postigao dovoljno velik omjer površina, postoji opasnost od odvajanja struje zbog duljine difuzora. Stoga kut konusa ograničava omjer površina na najviše 5:1 do 6:1<sup>18</sup>.

### 3.2.3. Kutne sekcije

Kutne sekcije su opremljene lopaticama za skretanje struje zraka kako bi se smanjili gubici i održalo paralelno strujanje koje slijedi zatvorenu putanju kroz aerotunel. Imaju obično konstantnu površinu poprečnog presjeka, ali mogu biti i ekspandirajuće. Oblik zakretnih lopatica varira od savijenih ploča do visoko zakrivljenih aeroprofila.

Kod velikih aerotunela zakretne lopatice moraju imati mogućnost regulacije kako bi se postiglo optimalno zakretanje struje fluida. To se postiže zakretanjem cijele lopatice ili pomoću zakrilaca na izlaznom rubu lopatice. Prve dvije kutne sekcije su kritičnije u pogledu gubitka snage zbog višeg dinamičkog tlaka, kao i u pogledu potrebe postizanja jednolike struje prije ulaska u ventilator. Gubici u kutnim sekcijama mogu se smanjiti izborom odgovarajućeg poprečnog presjeka zakretnih lopatica i korištenjem najboljeg omjera duljine tetive lopatica i širine procjepa između njih. Lopatice od zakrivljenih profila s relativno tupim prednjim rubom manje su osjetljive na kutno odstupanje struje zraka od lopatica s oštrim prednjim rubom.

### 3.2.4. Saće i mreže

Saće i mreže se koriste za poboljšanje kvalitete struje zraka, odnosno čine struju zraka jednolikom. Postiže se veća paralelnost strujnica i smanjuju se vrtloženja. Konstruktivni parametri za proračun i izradu saća su omjer duljine saća u smjeru struje prema hidrauličkom promjeru ćelije, poroznost odnosno popunjenost saća i Reynoldsov broj izračunat na temelju hidrauličkog promjera jedne ćelije. Karakteristični omjeri duljine saća prema hidrauličkom promjeru ćelije su

---

<sup>17</sup> Izvor [2]

<sup>18</sup> Izvor [8]

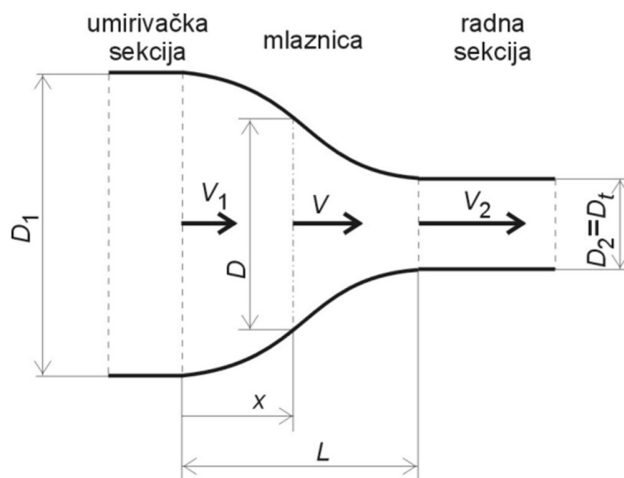
u rasponu od 6 do 8. Poroznost saća ili mreža je funkcija debljine stjenke ćelije ili debljine žice kod mreža i gustoće ili frekvencije ćelija.

Saće se sve rjeđe koriste jer ne mogu u potpunosti ukloniti nejednolikosti u struji. U tom pogledu bolje rezultate daju mreže. Uobičajeno se postavljaju jedna ili dvije mreže, a kod aerotunela s niskim stupnjem turbulencije može ih biti pet ili više. Mreže koje se koriste za smanjivanje stupnja turbulencije trebaju imati poroznost veću od 0,57.

Mreže i saće stvaraju otpor strujanju i povećavaju gubitke snage, pa je potrebno balansirati između veće djelotvornosti aerotunela i bolje kvalitete struje zraka. Osim za regulaciju turbulencije ili sprječavanje odvajanja struje u širokokutnim difuzorima, mreže se postavljaju i kao zaštita ispred ventilatora<sup>19</sup>.

### 3.2.5. Konvergentna mlaznica

Mlaznica služi za ubrzavanje radnog medija iz umirivačke sekcije do radne sekcije. Omjer izlazne i ulazne brzine u mlaznici je u rasponu od 6 do 10. Primjena jednadžbe kontinuiteta i Bernoullijeve jednadžbe na uobičajeni oblik mlaznice prikazane na slici 9 pokazuje konstantan pad tlaka od ulaza prema izlazu iz mlaznice.



Slika 9. Presjek konvergentne mlaznice

Izvor [8]

Koeficijent tlaka je približno 1 na ulazu u mlaznicu i opada prema 0 do izlaza iz mlaznice. Takav raspored tlaka je povoljan u pogledu stabilnosti graničnog sloja.

Često se pri konstruiranju aerotunela izrađuje umanjeni model cijelog aerotunela ili modeli pojedinih komponenti aerotunela kako bi se provjerile njegove karakteristike. Iako se prilikom

<sup>19</sup> Izvor [8]



ispitivanja modela aerotunela javljaju problemi zbog različitih dimenzija, brzina, Reynoldsovih brojeva i drugačijeg razvoja graničnog sloja, izrada modela pokazuje se kao vrlo korisna za provjeru karakteristika aerotunela, a i kao malo postrojenje pogodno za provođenje određenog broja eksperimenata manjeg obujma. Budući da je mlaznica ključna komponenta koja određuje kvalitetu struje u radnoj sekciji, često se izrađuje model mlaznice koji uključuje i četvrtu kutnu sekciju sa zaobljenim ulaznim dijelom, umirivačku sekciju, mlaznicu, radnu sekciju i prvi difuzor. Ispitivanjem takvog modela mogu se dobiti važni podaci o strujanju kroz mlaznicu<sup>20</sup>.

### 3.2.6. Pogonska sekcija

Pogonska sekcija aerotunela sastoji se od pogonskog motora koji pogoni ventilator i ventilatora koji pokreće struju zraka. Potisak koji stvara ventilator i otpor pojedinih komponenti aerotunela mijenjaju se s kvadratom broja okretaja ventilatora iz čega proizlazi da se regulacija brzine strujanja u aerotunelu može bolje ostvariti upravljanjem broja okretaja ventilatora nego promjenom napadnog kuta lopatica ventilatora. Mnogi veliki aerotuneli koji imaju obje mogućnosti upravljanja često koriste metodu promjene napadnog kuta jer je brža i jednostavnija.

Postoje različite vrste pogonskih motora koji se koriste u aerotunelima. U novijim aerotunelima uglavnom se koriste elektronički upravljani elektromotori istosmjerne struje ili elektromotori izmjenične struje s upravljanjem promjenom frekvencije.

Drugi najvažniji dio pogonske sekcije je ventilator, ali osim njega tu pripadaju i kućište motora, statorske lopatice i lopatice za izravnavanje struje zraka iza ventilatora. Zadatak ove sekcije je preuzimanje ulazne struje za koju se pretpostavlja da je jednolika te stvaranje izlazne struje koja također treba biti jednolika s povećanim zaustavnim tlakom. Povećanje zaustavnog tlaka mora balansirati ukupne gubitke tlaka kroz sve ostale komponente aerotunela.

Uobičajeni položaj ventilatora u aerotunelu je nizstrujno iza druge kutne sekcije, a rjeđe se smješta između prve i druge kutne sekcije. Ventilator daje najveću iskoristivost ako je smješten u području relativno visokih brzina strujanja, zbog čega su širi dio povratnog voda i područje umirivačke sekcije nepovoljni za smještaj ventilatora. Položaj ventilatora u prvom difuzoru je također nepovoljan zbog opasnosti od udara dijelova slomljenog modela i zbog slabije kvalitete struje. Ventilator bi trebao biti smješten što je moguće dalje od radne sekcije, na taj način smanjuje se buka koju proizvodi. Položaj ventilatora nizstrujno od druge kutne sekcije je također povoljan zbog prolaska zraka kroz sekcije konstantne ili približno konstantne površine prije ventilatora, što pridonosi jednolikosti struje koja ulazi u ventilator, a brzina je pritom još uvijek dovoljno visoka<sup>21</sup>.

---

<sup>20</sup> Izvor [8]

<sup>21</sup> Izvor [8]

### 3.3. Metode mjerenja brzine zraka

Kod mjerenja brzine fluida (prosječne brzine strujanja) najčešće se posredno određuje volumni ili maseni protok fluida kroz cijevi ili kanale. Određivanje brzine strujanja fluida izvodi se posredno preko mjerenja nekih drugih fizikalnih veličina kao što su vrijeme potrebno da se prijeđe put poznate duljine, dinamički tlak struje fluida, razlika tlaka prije i poslije mjerne blende, te promjena struje ili otpora kao funkcije promjene temperature osjetnog elementa koja ovisi o brzini strujanja (anemometar s toplom niti)<sup>22</sup>.

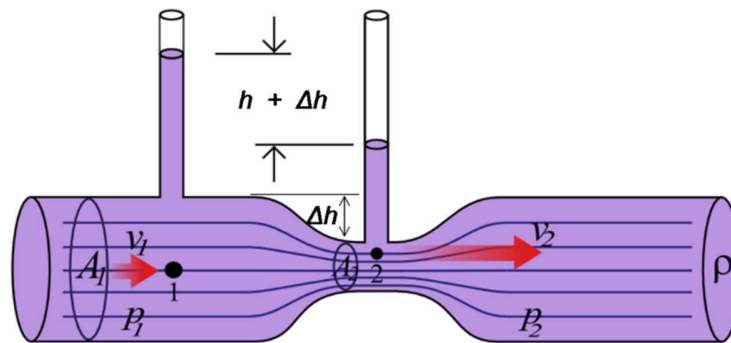
Ovisno o namjeni mjerenja potrebno je odabrati prikladnu metodu, kojom se može provesti mjerenje na najjednostavniji način, a da rezultati mjerenja budu dovoljno točni.

Najčešći načini određivanja brzine strujanja fluida su:

- Venturijeva cijev
- Pitot-Prandtlova cijev
- anemometar s toplom žicom
- laser-Dopplerov anemometar

#### 3.3.1. Venturijeva cijev

Venturijeva cijev (Slika 10.) je uređaj za mjerenje brzine strujanja fluida. Sastoji se od stožastog ulaznoga dijela koji vodi do uskoga grla, nakon kojega slijedi izlazni dio cijevi, a tlakovi se mjere prije suženja i u suženju.



Slika 10. Venturijeva cijev

Izvor [10]

Tlak u prvoj mjernoj točki u cijevi je viši nego u drugoj, a brzina fluida u prvoj mjernoj točki je niža nego u drugoj mjernoj točki, jer je poprečni presjek u točki 1 veći nego u točki 2.

<sup>22</sup> Izvor [9]

Prema Bernoullijevoj jednadžbi, ukupni tlak u fluidu u gibanju je manji što je brzina strujanja veća. Obrnuto, iz poznavanja razlike tlaka u mirnom fluidu i fluidu koji struji može se izračunati brzina strujanja, odnosno brzina objekta koji je to strujanje izazvao. Na tom se načelu temelji Venturijeva cijev. U širem dijelu cijevi fluid struji sporije nego u uskom dijelu pa je u širem dijelu tlak veći. Razlika tlakova (8) mjeri tada i brzinu strujanja<sup>23</sup>.

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} * (V_2^2 - V_1^2) \quad (8)$$

Iz razlike tlakova se dalje računa brzina strujanja fluida po sljedećoj jednadžbi (9):

$$V_2 = \sqrt{\frac{2A_2^2 \Delta p}{\rho * (A_2^2 - A_1^2)}} \quad (9)$$

### 3.3.2. Pitot-Prandtlova cijev

Za mjerenje brzine fluida najčešće se koristi kombinacija Pitot cijevi koja mjeri zaustavni tlak  $p_z$  i Prandtlove cijevi koja mjeri statički tlak  $p$ . Nos cijevi oblikovan je tako da se postigne minimalna osjetljivost na nekolinearnost vektora brzine i pravca osi cijevi. Centralni otvor s prednje strane nosa vezan je s unutrašnjom cijevi i mjeri zaustavni tlak, a otvori na vanjskoj cijevi mjere statički tlak<sup>24</sup>.

Pitot-Prandtlova cijev spada u jednu od najrasprostranjenijih metoda za mjerenje brzine strujanja. Dinamički tlak  $p_d$  i brzina strujanja  $V$  računaju se po formulama:

$$p_d = p_z - p \quad (10)$$

$$V = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (11)$$

Pitot-Prandtlova cijev postavlja se tako da se usmjeri svojim otvorom prema struji fluida i na tom čeonom otvoru (zaustavnoj točki) koji je spojen sa jednim krajem diferencijalnog manometra mjeri veličinu totalnog tlaka, a bočni otvori koji su okomiti na struju fluida spojeni su na drugi kraj diferencijalnog manometra koji mjeri veličinu statičkog tlaka koji vlada u struji fluida i koji ne ovisi o brzini fluida (Slika 11.). Tako spojen manometar pokazuje tlak koji je razlika totalnog i statičkog tlaka tj. manometar pokazuje upravo dinamički tlak koji se javlja kao posljedica pretvaranja kinetičke energije struje u potencijalnu energiju koja se manifestira porastom dinamičkog tlaka<sup>25</sup>.

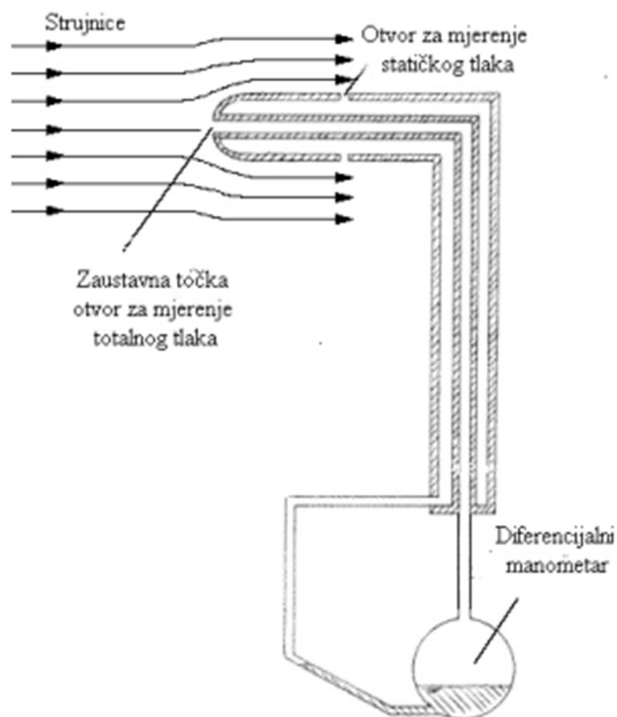
Glavne prednosti Pitot-Prandtlove cijevi su njena neosjetljivost, robusnost i relativno niska cijena u odnosu na druge metode i instrumente mjerenja brzine strujanja, jednostavno rukovanje

<sup>23</sup> Izvor [11]

<sup>24</sup> Izvor [1]

<sup>25</sup> Izvor [9]

i montaža na mjesto, pogodna je za mjerenja u vrtložnim strujanju, relativno velika osjetljivost kod malih brzina strujanja, no pri brzinama manjim od 3 m/s dolazi do velikih poteškoća<sup>26</sup>.



*Slika 11. Pitot-Prandtlova cijev*

Izvor [12]

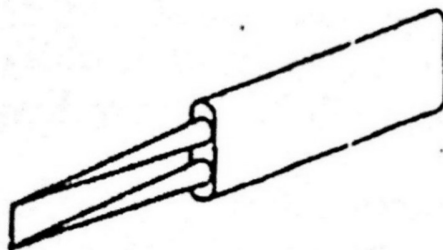
### 3.3.3. Anemometar s toplom žicom

Princip rada anemometra s toplom žicom kojim se mjeri brzina u fluidnom polju temelji se na promjeni intenziteta hlađenja provodnika, koji se zagrijava prolaskom električne struje, u zavisnosti od brzine strujanja. Brzina odvođenja topline s provodnika ovisi o njegovim geometrijskim i fizikalnim karakteristikama, temperaturi i veličinama stanja fluida (brzine, gustoće, temperature). U uvjetima strujanja unutar aerodinamičkih tunela gustoća i temperatura fluida ostaju konstantne pa se promjena električnih karakteristika provodnika može dovesti u funkciju brzine fluida. Funkcionalna ovisnost određuje se eksperimentalno za što je potrebno imati poznati izvor brzine fluida.

---

<sup>26</sup> Izvor [1]

Izgled osjetila anemometra s toplom žicom prikazan je na slici 12.



Slika 12. Osjetilo anemometra s toplom žicom

Izvor [1]

Kroz čelo držača izrađenog od električni neprovodnog materijala izlaze dva nosača između čijih vrhova je razapeta tanka žica izrađena od volframa, platine ili nikla. Promjer žice je od 5  $\mu\text{m}$  do 150  $\mu\text{m}$ , a dužina 2 mm do 12 mm, a njezin osjetilni dio može biti samo 0,5 mm<sup>27</sup>. Podužna os žice postavlja se okomito na pravac vektora brzine. Mali gabariti osjetila uzrokuju minimalni poremećaj struje fluida i daju izuzetne dinamičke karakteristike što omogućava mjerenje neustaljene brzine i turbulentnih karakteristika polja.

Tanka nit položena u struju fluida zagrijava se električnim putem. Zagrijana nit odaje određenu količinu topline koja se može opisati ukupnim toplinskim tokom, dok brzina struje fluida utječe na toplinu izmijenjenu konvekcijom između osjetnika i fluida. Mjereći ovaj toplinski tok (posredno preko električnog otpora i jakosti struje) može se odrediti brzina fluida. Pri tome vrijedi sljedeći izraz za toplinski tok izražen preko razlike temperatura i brzine fluida:

$$q = (a + b * V^{0,5}) * (T_w - T) \quad (12)$$

U izrazu (12)  $q$  označava ukupni toplinski tok sa osjetne niti na struju fluida,  $V$  je brzina fluida,  $T_w$  temperatura zagrijane niti,  $T$  temperatura struje fluida podalje od mjesta mjerenja, dok su  $a$  i  $b$  konstante dobivene kalibracijom uređaja<sup>28</sup>.

Osobita prednost ove metode mjerenja brzine fluida je u visokoj točnosti kao i mogućnosti određivanja profila brzine fluida po presjeku strujne cijevi. Zbog toga je ovo najviše korištena metoda mjerenja pri analizi polja brzina u strujanjima plinova i tekućina, te osobito prilikom određivanja malih fluktuacija brzine strujanja.

Osim osjetila s žicom upotrebljavaju se i osjetila s tankim filmom koji imaju lošije dinamičke karakteristike. Tanki film provodnika debljine 0,1  $\mu\text{m}$  nanosi se tankoslojnom depozicijom na

---

<sup>27</sup> Izvor [1]

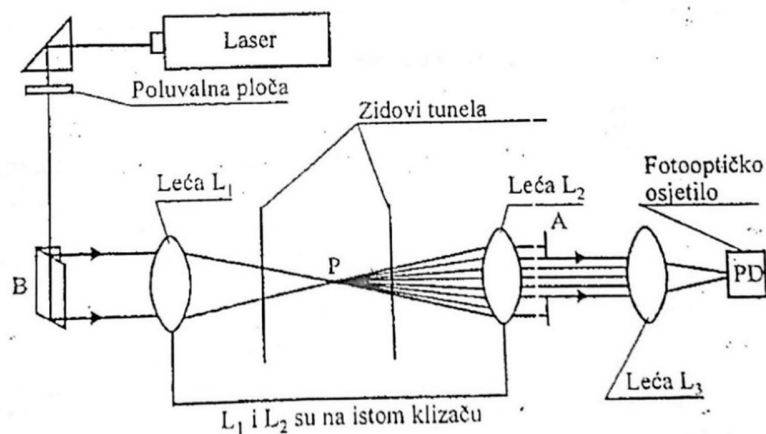
<sup>28</sup> Izvor [9]

električno i toplinski izoliranu podlogu (obično kvarc) raznih oblika (cilindar, klin, konus). Tankoslojni provodnik vezan je debeloslojnim provodnikom nosačima. Mjerenje brzine električnim provodnih fluida može se obavljati anemometrom s filmom na koji je nanesen dodatni kvarcni izolacijski sloj<sup>29</sup>.

### 3.3.4. Laser-Dopplerov anemometar

Laser-Dopplerov anemometar (LDA) je metoda mjerenja brzine fluida mjerenjem Dopplerove razlike frekvencija  $f_1$  izvorne svjetlosne zrake i frekvencije  $f_2$  zrake koja je reflektirana od malih čestica koje nosi fluid. Ovo mjerilo brzine fluida približava se idealnom mjerilu jer ne unosi poremećaje u fluidnu struju, iako zahtjeva postojanje mikročestica dimenzija  $0,1 \mu\text{m}$  do  $10 \mu\text{m}$  u fluidnoj struji koje se gibaju jednakom brzinom kao i fluid. Kada se proučava strujanje zraka dovoljno je postojanje nečistoća u obliku prašine koju zrak sadrži u sebi<sup>30</sup>.

Tipična shema LDA s prolaznim zrakama prikazana je na slici 13. Laser<sup>31</sup> je monokromatski izvor svjetlosti. Zrak iz lasera prolazi kroz poluvalnu ploču i dolazi do djelatelja u obliku prizme B koja generira dvije paralelne zrake. Intenziteti paralelnih zraka se izjednačavaju zakretanjem poluvalne ploče. Leća  $L_1$  fokusira dvije paralelne zrake u točku P u kojoj se mjeri brzina. Od fluidnih čestica zrake svjetlosti se reflektiraju u svim pravcima s različitom frekvencijom od frekvencije dolazne zrake. Pomoću leće  $L_2$  prikupljaju se prolazne zrake i frekventno modulirane zrake, propuštaju kroz filter A i preko leće  $L_3$  fokusiraju se na fotooptičko osjetilo PD. Izlaz iz fotooptičkog osjetila proporcionalan je Dopplerovoj frekvenciji. Leće  $L_1$  i  $L_2$  vezane su na istom klizaču tako da se njegovim pomicanjem može skenirati cijeli protočni presjek.



Slika 13. Shema laser-Dopplerovog anemometra

Izvor [1]

<sup>29</sup> Izvor [1]

<sup>30</sup> Izvor [1]

<sup>31</sup> LASER - Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation

Veza između Dopplerove frekvencije  $f_D = f_2 - f_1$  i brzine fluida dana je jednadžbom:

$$f_D = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} V \quad (13)$$

Oznaka  $\lambda$  predstavlja valnu dužinu laserske zrake, kut  $\theta$  je kut fokusiranja, a  $V$  je brzina fluida. Laser-Dopplerovim anemometrom mjeri se brzina strujanja fluida u mjernom volumenu (mjernoj točki) u jednom trenutku, odnosno određuje se trenutna brzina fluida u jednoj točki. Ovim načinom mjerenja brzine struje fluida ne ometa se tok struje fluida. Mjerenje je neovisno o gustoći, tlaku i temperaturi fluida. LDA pruža mogućnosti mjerenja i daje precizne rezultate u nestacionarnom i turbulentnom režimu strujanja fluida.

Nedostatak je da se LDA metodom mogu mjeriti brzine strujanja samo transparentnih medija za zrake laserskog svjetla, odnosno postoji zahtjev za optički transparentnim zidovima kroz koje se propuštaju svjetlosne zrake, kao i činjenica da ne daje kontinuirani mjerni signal izmjerene brzine.

## 4. IZVORI MJERENE NESIGURNOSTI

Cilj mjerenja je odrediti neko svojstvo pod određenim tehničkim uvjetima. Zbog toga je potrebno definirati karakteristike mjernog pretvornika i postupka, posebice točnost rezultata mjerenja. Osnovna karakteristika nekog mjernog pretvornika je točnost koja je definirana brojčano kao granica pogreške mjerne veličine u referentnim uvjetima. Brojčane vrijednosti se izražavaju u mjernim jedinicama mjerne veličine, postocima od vrijednosti mjerne veličine ili postocima od maksimalne vrijednosti mjerne veličine. Stvarno značenje termina točnost je zapravo netočnost mjernog pretvornika. Definicija točnosti implicira postojanje istinite vrijednosti mjerne veličine, a ona zapravo ostaje nepoznata<sup>32</sup>.

Elektronski mjerni pretvornici omogućavaju da se vrijednost mjerne veličine očita s tri ili više znamenki, ali je pogrešno misliti da je pogreška definirana rezolucijom zadnje znamenke.

Danas je u analizi rezultata mjerenja prihvaćen statistički način interpretiranja rezultata. Na taj način se na pogrešku više ne gleda kao na razliku između vrijednosti mjerne veličine i istinite vrijednosti mjerne veličine (koja ostaje nepoznata), već se daje procjena pogreške mjerenja kao mjerna nesigurnost vrijednosti mjerne veličine. Osnovni parametri statističke analize i  $n$  mjerenja vrijednosti mjerne veličine  $Y_i$  su srednja vrijednost mjerne veličine  $\bar{Y}$  (14) i standardna devijacija  $s$  (15).

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (14)$$

$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{(n - 1)} \right]^{1/2} \quad (15)$$

Standardna devijacija  $s$  prema (15) određena je prema konačnom broju mjerenja i samo je procjena za istinsku vrijednost standardne devijacije. Kada  $n$  teži u beskonačnost, standardna devijacija  $s$  teži svojoj istinitoj vrijednosti.

Kao osnovna karakteristika mjerenja koristi se pojam mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost se definira kao područje unutar kojeg se može očekivati da leži istinita vrijednost mjerne veličine s određenom vjerojatnosti, odnosno razinom pouzdanosti. Mjerna nesigurnost mora se definirati zajedno s vjerojatnošću kojom je bila odrađena. Za jedan skup vrijednosti mjerne veličine veća vrijednost mjerne nesigurnosti povezana je s većom vjerojatnošću i obrnuto, manja vrijednost mjerne nesigurnosti povezana je s manjom vjerojatnošću.

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji karakterizira rasipanje vrijednosti koje bi razumno mogle opisati mjernu veličinu. Ukazuje na raspon u kojemu se s

---

<sup>32</sup> Izvor [1]



određenom vjerojatnošću, odnosno uz određenu razinu pouzdanosti, nalazi točna vrijednost rezultata. Mjerenja nisu savršena, kako zbog djelovanja slučajnih utjecaja (trenutna promjena temperature, tlaka i vlage, nesavršenost uređaja i osjetila) tako i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenta između dva umjeravanja, utjecaj mjeritelja pri očitavanju analogne skale) Mjerna nesigurnost je upravo posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja.

Ako rasipanje rezultata mjerenja odgovara normalnoj distribuciji<sup>33</sup>, tada je veza između nesigurnosti i tražene vjerojatnosti jednoznačno definirana s pomoću vrijednosti standardne devijacije. Vrijednosti mjerne nesigurnosti za nekoliko razina vjerojatnosti (razina pouzdanosti) prikazana je u tablici 2.

*Tablica 2. Intervali nesigurnosti za razne vjerojatnosti*

nesigurnost	vjerojatnost
±0,674	0,50
±0,954	0,66
±1,960	0,95
±2,576	0,99

Izvor [1]

Iz tablice 2. se vidi da kod normalne distribucije intervalu nesigurnosti  $\bar{Y} = \pm 1,960\sigma$  odgovara vjerojatnost od 95 % svih podataka, a intervalu  $\bar{Y} = \pm 2,576\sigma$  odgovara vjerojatnost od 99 % svih podataka. To znači da ako poznamo standardnu devijaciju i obavimo samo jedno mjerenje mjerne veličine, postoji vjerojatnost od 5 % da ta vrijednost nije u intervalu  $\bar{Y} = \pm 1,960\sigma$ .

U tehnici mjerenja brzine fluida mjerna nesigurnost izražava se vjerojatnošću od 95 %<sup>34</sup>.

Rasipanje pojedinačnih vrijednosti u skladu je sa zakonima vjerojatnosti i obično se predstavlja u obliku Gaussove distribucije podataka. Takva distribucija definirana je na standardnoj devijaciji  $\sigma$  skupine s beskonačno mnogo uzoraka i daje učestalost pojavljivanja pojedinih rezultata. Slučajne pogreške mogu poprimiti bilo koju vrijednost, a veća je vjerojatnost malih pogrešaka.

Nesigurnost u vrijednost mjerne veličine posljedica je mogućih pogrešaka mjernog sustava, umjeravanja i metoda. Prema porijeklu nastanka razlikuju se grube, slučajne, stalne sustavne i promjenljive sustavne pogreške<sup>35</sup>.

<sup>33</sup> Gaussova distribucija

<sup>34</sup> Izvor [1]

<sup>35</sup> Izvor [1]

Grube pogreške su posljedica ljudske pogreške ili otkazivanja rada instrumenata. Tako je primjerice pogrešno očitavanje vrijednosti mjerne veličine ili pogrešno prepisivanje tipična ljudska pogreška. Grube pogreške treba eliminirati iz daljnje analize rezultata mjerenja.

Slučajne pogreške su pogreške koje uzrokuju različito očitavanje vrijednosti mjerne veličine kada se očitavanja ponavljaju u kratkom periodu, a pri tome se mjerna veličina ne mijenja. One nastaju kao posljedica brojnih malih i neovisnih utjecaja koji sprječavaju dobivanje jednakih vrijednosti mjerne veličine. Slučajne pogreške dovode do rasipanja rezultata mjerenja.

Stalne sustavne pogreške su prisutne u svim mjerenjima u istim uvjetima, ali mogu varirati ovisno o vrijednosti mjerne veličine. Ovakve pogreške mogu nastati tijekom umjeravanja mjernog pretvornika. Promjenljive sustavne pogreške su posljedica promjene uvjeta eksperimenta. Primjerice mjerni pretvornik tlaka je umjeren na referentnoj temperaturi, ali se u stvarnom eksperimentu temperatura mijenja što uzrokuje promjenljivu sustavnu pogrešku. Ako su sustavne pogreške poznate, ispravljaju se putem korekcije.

## 5. UMJERAVANJE BRZINE ZRAKA S FREKVENCIJOM RADA MOTORA U AEROTUNELU AT-1

Proces umjeravanja ili kalibracije uključuje bilo koji izmjereni parametar fluidnog polja koji se koristi ili za definiranje operativnih uvjeta u radnoj sekciji ili za korigiranje podataka dobivenim mjerenjem. Kalibracija aerotunela je definirana kao prosječna vrijednost raznih parametara fluidnog polja na ili oko modela koji se nalazi u radnoj sekciji. Ti parametri trebaju uključivati ukupni, statički i dinamički tlak, kao i ukupnu i statičku temperaturu i brzinu strujanja. Raspored statičkog tlaka oko modela i vlažnost aerotunela (točka rosišta) također se smatraju kalibracijskim parametrima jer su potrebni za korigiranje podataka.

Informacije o kvaliteti strujnog polja se ne koriste direktno za korigiranje podataka, no mogu biti korisne za razumijevanje anomalija prilikom mjerenja. To su najčešće informacije o razinama turbulencije strujnog polja, graničnom sloju, akustičkim karakteristikama aerotunela te Reynoldsovim brojevima<sup>36</sup>.

Najjednostavnije rečeno, kalibracija aerotunela daje stvarne operativne uvjete rada radne sekcije za danu konfiguraciju aerotunela i ulaznim kontrolnim parametrima. Postoje dvije osnovne vrste kalibracije, potpuna i kontrolna. Potpuna kalibracija daje veoma precizna mjerenja dok je kontrolna kalibracija zapravo kratko mjerenje kojim se pokazuje ispravnost aerotunela.

Potpune kalibracije zahtijevaju veće operativne troškove i potrebno je više vremena da bi se izmjerili svi parametri. Stoga su češće kontrolne kalibracije.

Iz statističkih podataka aerotunela moguće je odrediti kalibracijske parametre na koje treba posvetiti posebnu pažnju prilikom kalibracije. Također je moguće postaviti standardni kalibracijski model u radnu sekciju za kontroliranje odabranih parametara. Takav model se naziva standardni kontrolni model. Svaka promjena strujanja oko kontrolnog modela u zadanoj konfiguraciji aerotunela uočava se promjenom aerodinamičkih koeficijenata modela.

Parametri kalibracije moraju uključivati mjerenje ukupnog, statičkog i dinamičkog tlaka, ukupne temperature, promjenu u smjeru strujanja fluida, varijaciju rasporeda statičkog tlaka te vlažnost odnosno točku rosišta<sup>37</sup>.

---

<sup>36</sup> Izvor [7]

<sup>37</sup> Izvor [7]

## 5.1. Karakteristike aerotunela AT-1

Aerotunel Laboratorija za aerodinamiku je zatvoreni tip tunela izrađen od iverice s dvostrukim stjenkama između kojih su postavljena rebra. Radni medij je zrak, a u radnoj sekciji postižu se brzine strujanja do 50 m/s i Reynoldsovi brojevi do  $10^6$ .

Aerotunel je kružnog poprečnog presjeka, osim radne sekcije, izlaznog dijela mlaznice i ulaza u prvi difuzor koji su eliptični. Radna sekcija otvorena je sa bočnih strana. Dimenzije radne sekcije su 0,352 m x 0,310 m, duljine 0,450 m. Ukupna snaga potrebna za pogon tunela, odnosno prirast tlaka izražava se kroz mjeru djelotvornosti tunela,  $ER$  i zavisi od brzine strujanja zraka. Pogonska sekcija (asinkroni motor i ventilator) nalazi se u metalnom kućištu postavljenom na zasebnom nosaču. Motor ima upravljanje frekvencijom tako da je frekvencija nezavisni parametar za koji se određuju ostale veličine. Maksimalna frekvencija motora je 50 Hz, snaga motora je 4 kW, a brzina vrtnje 2900 okretaja po minuti. Brzina struje zraka određena je s obzirom na frekvenciju motora<sup>38</sup>.

U tablici 3. navedene su dimenzije ispitne sekcije i karakteristike struje zraka podzvučnog aerotunela AT-1.

Tablica 3. Svojstva radne sekcije aerotunela AT-1

svojstvo/dimenzije	vrijednost
unutrašnji poprečni presjek radne sekcije	0,352 m x 0,310 m
dužina radne sekcije	0,450 m
maksimalna brzina struje zraka	56 m/s
minimalni intenzitet turbulencije	< 1 %

Izvor [13]

## 5.2. Određivanje brzine strujanja u aerotunelu AT-1

U praktičnom dijelu rada računat će se brzina strujanja u ovisnosti o frekvenciji rada motora aerotunela AT-1. U prostoriji u kojoj se nalazi aerotunel izmjerene su sve poznate karakteristike zraka: gustoća, temperatura i tlak vlažnog zraka te relativna vlažnost.

U izračun je vrlo važno ubaciti vlažnost zraka jer ona mijenja gustoću zraka. Vlažni zrak je smjesa suhog zraka i vodene pare. Gustoća vlažnog zraka  $\rho_{VZ}$  jednaka je:

$$\rho_{VZ} = \rho_z + \rho_p \quad (16)$$

gdje  $\rho_z$  označava gustoću suhog zraka, a  $\rho_p$  gustoću vodene pare. Pojedina gustoća dobiva se iz jednadžbe stanja za savršeni plin na promatranoj temperaturi  $T$  sobe aerotunela:

$$\rho_z = \frac{p_z}{R_n T} \quad (17)$$

<sup>38</sup> Izvor [14]

$$\rho_p = \frac{p_p}{R_p T} \quad (18)$$

gdje  $p_z$  označava parcijalni tlak suhog zraka, a  $p_p$  je parcijalni tlak vodene pare, dok su  $R_n$  i  $R_p$  plinske konstante suhog zraka i vodene pare, respektivno.

Tlak vlažnog zraka  $p_a$  jednak je zbroju parcijalnih tlakova suhog zraka  $p_z$  i vodene pare  $p_p$ :

$$p_a = p_z + p_p \quad (19)$$

Relativna vlažnost zraka  $\varphi$  (20) je odnos parcijalnog tlaka vodene pare  $p_p$  i tlaka zasićenja vodene pare  $p_{pz}$  koji ovisi o temperaturi  $T$  i iščitavamo ga iz poznatih tablica.

$$\varphi = \frac{p_p}{p_{pz}} \quad (20)$$

Izračunata gustoća zraka  $\rho_{VZ}$  u prostoriji uzima se u obzir prilikom izračuna brzine strujanja  $V$ . Razliku ukupnog i statičkog tlaka, odnosno dinamički tlak, iščitavamo sa manometra spojenog na Pitot-Prandtlovu cijev koja se nalazi u radnoj sekciji aerotunela. Razlika tlaka  $\Delta p$  ovisi o brzini frekvencije rada motora, a time dobijemo brzinu strujanja zraka  $V$ :

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{VZ}}} \quad (21)$$

Pitot-Prandtlova cijev korištena u određivanju brzine strujanja zraka prikazana je na slici 14. Na slici 15 prikazan je položaj Pitot-Prandtlove cijevi u radnoj sekciji aerotunela.

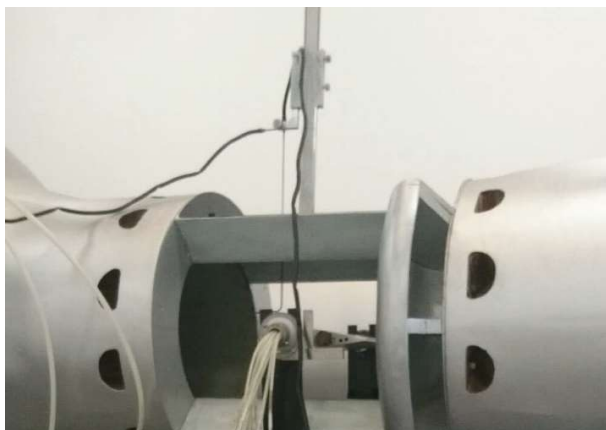


**Slika 14.** Pitot-Prandtlova cijev



**Slika 15.** Položaj Pitot-Prandtlove cijevi u radnoj sekciji aerotunela

Pitot-Prandtlova cijev spojena je cijevima do manometra koji očitava razliku ukupnog i statičkog tlaka. Na slici 16 prikazane su dvije crne cijevi spojene na Pitot-Prandtlovu cijev, jedna za statički, a druga za ukupni tlak.



*Slika 16. Cijevi spojene na Pitot-Prandtlovu cijev koje vode do manometra*

Tlak vlažnog zraka, odnosno tlak zraka u prostoriji, kao i relativnu vlažnost, očitavamo sa radiostanice prikazane na slici 17.



*Slika 17. Lokalna radiostanica*

Temperatura zraka očitana je sa sobnog termometra. Manometar spojen na Pitot-Prandtlovu cijev prikazan je na slici 18.



*Slika 18. Manometar*

Manometar korišten u eksperimentu je Dwyer SERIES 475 Mark III Handheld Digital Manometer. Ovaj manometar mjeri razliku tlakova, odnosno diferencijalni tlak zraka i ostalih nezapaljivih, nekorozivnih plinova u rasponu od 249 Pa do 1 034 000 Pa. Radna temperatura manometra je od 0°C do 40°C<sup>39</sup>.

Radna frekvencija motora aerotunela odabire se na štimeru radne frekvencije koja je prikazana na slici 19.



*Slika 19. Štimer frekvencije motora aerotunela*

---

<sup>39</sup> Izvor [15]

## 6. REZULTATI

Prilikom mjerenja brzine strujanja u aerotunelu odabiremo različite frekvencije rada motora aerotunela u rasponu od 5 Hz do 40 Hz.

Najprije očitavamo tlak vlažnog zraka u prostoriji, relativnu vlažnost i temperaturu. U eksperimentu je očitani tlak zraka u prostoriji  $p_a = 101\,290$  Pa, relativna vlažnost  $\varphi = 54\%$  te temperatura  $T = 24,9^\circ\text{C} = 298,05$  K.

Tlak zasićenja vodene pare  $p_{pz}$  za danu temperaturu iznosi  $p_{pz} = 3\,148$  Pa.

Po formuli (20) računamo tlak parcijalne komponente vodene pare  $p_p$ :

$$p_p = \varphi * p_{pz} = 0,54 * 3148 = 1\,700 \text{ Pa}$$

Parcijalni tlak suhog zraka  $p_z$  dobijemo po formuli (19):

$$p_z = p_a - p_p = 101\,290 - 1\,700 = 99\,590 \text{ Pa}$$

Sada računamo po (17) i (18) gustoću suhog zraka i vodene pare:

$$\rho_z = \frac{p_z}{R_n T} = \frac{99\,590}{287,053 * 298,05} = 1,1640 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_p = \frac{p_p}{R_p T} = \frac{1\,700}{461,600 * 298,05} = 0,0124 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Naposljetku dobivamo gustoću vlažnog zraka  $\rho_{vz}$  po formuli (16):

$$\rho_{vz} = \rho_z + \rho_p = 1,1640 + 0,0124 = 1,1764 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ovu gustoću upotrebljavamo za izračun brzine strujanja zraka  $V$  po (21).

Ukoliko ne uzmemo u obzir vlažnost zraka, gustoću zraka  $\rho_{sz}$  računamo iz očitanih tlaka zraka  $p_a$  koristeći plinsku konstantu suhog zraka  $R_n$ :

$$\rho_{sz} = \frac{p_a}{R_n T} = \frac{101\,290}{287,053 * 298,05} = 1,1839 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

U tablici 4. navedene su odabrane frekvencije rada motora aerotunela, očitane razlike tlakova te izračunate brzine strujanja po formuli (21), kao i izračunata brzina strujanja ako ne uzimamo u obzir vlažnost zraka.

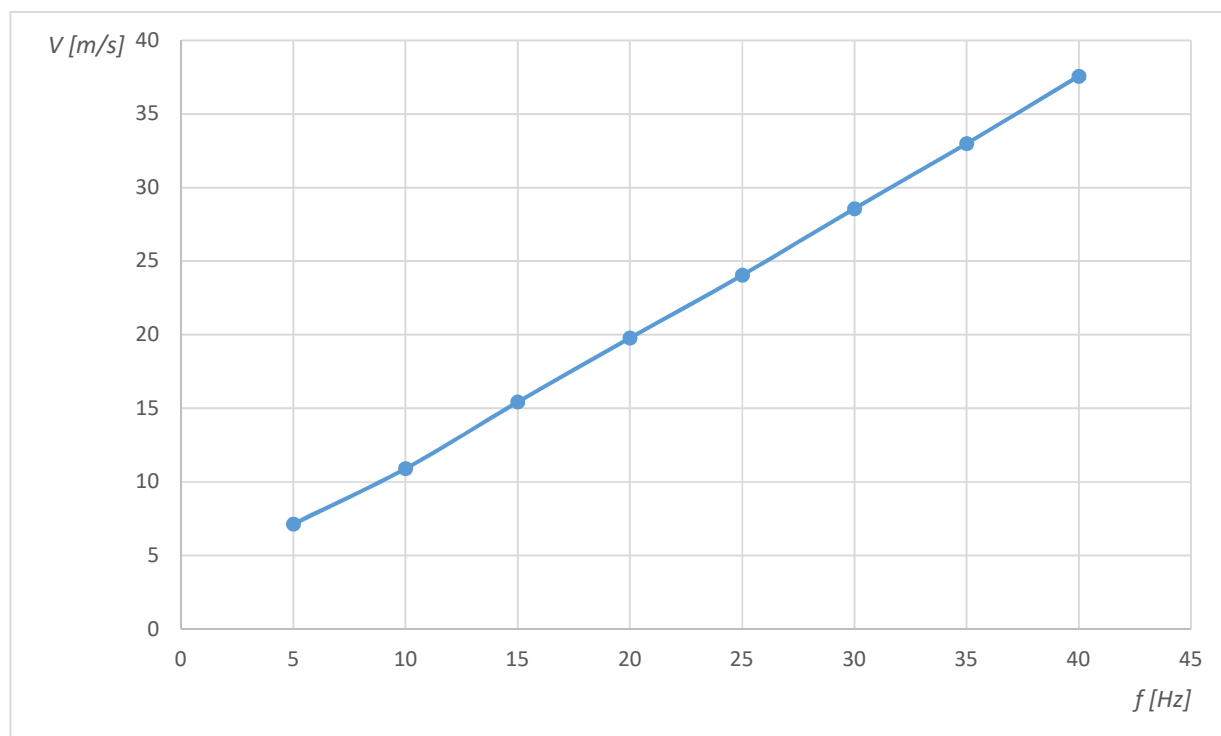


Iz tablice 4. vidljivo je da vlažnost ima vrlo mali utjecaj na brzinu strujanja  $V$ .

**Tablica 4.** Rezultati mjerenja

frekvencija [Hz]	razlika tlakova [Pa]	brzina strujanja [m/s]	brzina strujanja bez vlažnosti [m/s]
5	30	7,14	7,12
10	70	10,91	10,87
15	140	15,43	15,38
20	230	19,77	19,71
25	340	24,04	23,97
30	480	28,57	28,48
35	640	32,99	32,88
40	830	37,56	37,44

Iz grafikona 1. vidljiva je približno linearna zavisnost frekvencije rada motora aerotunela  $f$  i brzine strujanja zraka u radnoj sekciji  $V$ .



**Grafikon 1.** Ovisnost brzine strujanja o frekvenciji rada motora

## 7. ZAKLJUČAK

Brzina strujanja je jedan od osnovnih parametara koji određuju gibanje fluida. U radu su navedene metode koje se najčešće koriste pri određivanju brzine zraka u podzvučnim aerotunelima. Opisani su principi rada mjernih uređaja i definiran je pojam aerotunela.

Aerotuneli su uvelike olakšavali mjerenje i ispitivanje aerodinamičkih karakteristika modela zrakoplova ili krila i određivanje veličina stanja fluida u blizini modela. Omogućili su razna istraživanja i eksperimente pomoću kojih se postiglo bolje razumijevanje ponašanja fluida i njegovih karakteristika. Uporabom aerotunela možemo simulirati razne scenarije koje bi u stvarnosti bilo teško ili čak i opasno istraživati. Prednost takvih eksperimenata je svakako lakše mjerenje i univerzalnost primjene aerotunela. Veliki napredak u tehnologiji načina prikupljanja i obrade podataka uvelike je poboljšao kvalitetu dobivenih podataka i omogućio velik broj mjerenja i provođenja eksperimenata u kratkom vremenu.

Aerotuneli imaju ogromnu ulogu u istraživanju i razvoju zrakoplova i drugih letjelica. Koriste se još u ispitivanju opterećenja vjetrom raznih građevina, aerodinamike cestovnih vozila i brodova, balističke namjene, iskorištavanju energije vjetra, pa čak i istraživanjem leta ptica i kukaca.

U praktičnom dijelu rada prikazana je ovisnost brzine strujanja zraka u aerotunelu o frekvenciji rada motora. Dobiveni podaci olakšavaju rad u aerotunelu jer odabirom frekvencije rada direktno imamo određenu brzinu struje u radnoj sekciji. Brzina strujanja jedan je od osnovnih parametara koji određuju svojstva i osobine zraka. Također je prikazan utjecaj vlage u zraku na brzinu strujanja.

## Literatura

- [1] Kesić P.: *Osnove aerodinamike*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [2] Barlow J. B., Rae W. H., Pope A.: *Low-speed wind tunnel testing*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [3] URL: [https://www.fsb.unizg.hr/zbrodo/pokus/upload/others/8\\_MFIIB.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/zbrodo/pokus/upload/others/8_MFIIB.pdf), (rujan, 2016.)
- [4] URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7186>, (rujan, 2016.)
- [5] URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev>, (rujan, 2016.)
- [6] AIAA: *Calibration of Subsonic and Transonic Wind Tunnels*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [7] Mitchell M.: *Measuring the Air Speed Created in a Wind Tunnel*, Pomona College, 2013.
- [8] Franjković, D.: *Razvoj sustava za eksperimentalno određivanje aerodinamičkih karakteristika s posebnim osvrtom na zrakoplove*, magistarski znanstveni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2002.
- [9] URL: [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/nas/laboratorijske\\_vjezbe\\_%2007/5\\_brzina\\_strujanja.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%2007/5_brzina_strujanja.pdf), (rujan, 2016.)
- [10] URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Venturijeva\\_cijev](https://hr.wikipedia.org/wiki/Venturijeva_cijev), (rujan, 2016.)
- [11] URL: [http://marjan.fesb.hr/~suri/ktf/predavanja/predavanje\\_09\\_Dinamika\\_fluida.pdf](http://marjan.fesb.hr/~suri/ktf/predavanja/predavanje_09_Dinamika_fluida.pdf), (rujan, 2016.)
- [12] URL: [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/nas/laboratorijske\\_vjezbe\\_%2007/2\\_tlak.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%2007/2_tlak.pdf), (rujan, 2016.)
- [13] Krajček K.: *Priručnik za laboratorijske vježbe u aerotunelu AT-1*, Zagreb, 2015.
- [14] URL: <http://static.fpz.hr/FPZWeb/files/katalog-laboratorijske-opreme/Laboratorij-za-aerodinamiku.pdf>, (rujan, 2016.)
- [15] <http://www.dwyer-inst.com/Product/Manometers/Digital/Series475>, (rujan, 2016.)

## Popis slika

<b>Slika 1.</b> Laminarno strujanje .....	4
<b>Slika 2.</b> Turbulentno strujanje .....	4
<b>Slika 3.</b> Mjerenje površinskog tlaka .....	6
<b>Slika 4.</b> Mjerenje statičkog tlaka u fluidnom polju .....	7
<b>Slika 5.</b> Pitot cijev .....	7
<b>Slika 6.</b> Otvoreni aerotunel .....	12
<b>Slika 7.</b> Zatvoreni aerotunel .....	13
<b>Slika 8.</b> Komponente zatvorenog aerotunela .....	14
<b>Slika 9.</b> Presjek konvergentne mlaznice.....	17
<b>Slika 10.</b> Venturijeva cijev .....	19
<b>Slika 11.</b> Pitot-Prandtlova cijev .....	21
<b>Slika 12.</b> Osjetilo anemometra s toplom žicom .....	22
<b>Slika 13.</b> Shema laser-Dopplerovog anemometra .....	23
<b>Slika 14.</b> Pitot-Prandtlova cijev .....	30
<b>Slika 15.</b> Položaj Pitot-Prandtlove cijevi u radnoj sekciji aerotunela.....	30
<b>Slika 16.</b> Cijevi spojene na Pitot-Prandtlovu cijev koje vode do manometra.....	31
<b>Slika 17.</b> Lokalna radiostanica .....	31
<b>Slika 18.</b> Manometar .....	32
<b>Slika 19.</b> Štimer frekvencije motora aerotunela .....	32

## Popis tablica

<b>Tablica 1.</b> Podjela aerotunela prema Machovom broju .....	11
<b>Tablica 2.</b> Intervali nesigurnosti za razne vjerojatnosti .....	26
<b>Tablica 3.</b> Svojstva radne sekcije aerotunela AT-1.....	29
<b>Tablica 4.</b> Rezultati mjerenja.....	34

## Popis grafikona

**Grafikon 1.** Ovisnost frekvencije rada motora i brzine strujanja.....34

## METAPODACI

**Naslov rada:** Mjerenje brzine strujanja u podzvučnom aerotunelu AT-1

**Student:** Matej Petrović

**Mentor:** dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

**Naslov na drugom jeziku (engleski):** Airspeed Measuring in Subsonic Wind Tunnel AT-1

**Povjerenstvo za obranu:**

- Doc. dr. sc. Anita Domitrović \_\_\_\_\_ predsjednik
- Dr. sc. Karolina Krajček Nikolić \_\_\_\_\_ mentor
- Mr. sc. Davor Franjković \_\_\_\_\_ član
- Prof. dr. sc. Ernest Bazijanac \_\_\_\_\_ zamjena

**Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj:** Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

**Zavod:** Zavod za aeronautiku

**Vrsta studija:** Preddiplomski

**Studij:** Aeronautika

**Datum obrane završnog rada:** 13.09.2016.



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom **Mjerenje brzine strujanja u podzvučnom aerotunelu AT-1**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 6.9.2016 \_\_\_\_\_

Student/ica:

*Petrović*

\_\_\_\_\_  
(potpis)