

# PROFIL BRZINE STRUJANJA ZRAKA U ZRAČNOM TUNELU

---

**Matas, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:571130>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-09**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**ANTONIO MATAS**

**ZAVRŠNI RAD**

**PROFIL BRZINE STRUJANJA ZRAKA U ZRAČNOM  
TUNELU**

Split, rujan 2019.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstruktivno strojarstvo

**Predmet:** Mehanika fluida

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Antonio Matas

**Naslov rada:** Profil brzine strujanja zraka u zračnom tunelu

**Mentor:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

Split, rujan 2019.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Preddiplomski stručni studij „Konstrukcijsko strojarstvo“  
**Predmet:** Mehanika fluida  
**Nastavnik:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

## **ZAVRŠNI RAD**

### **ZADATAK**

**Kandidat:** Antonio Matas

**Naslov teme:** Profil brzine strujanja zraka u zračnom tunelu

U završnom radu potrebno je:

- uvodno se osvrnuti o problematici strujanja zraka u zračnim tunelima i primjeni zračnih tunela
- dati teoretski osvrt o profilima brzine strujanja zraka, utjecaju karakteristika stjenki/zidova i ventilatora na oblik i razvoj potpunog profila brzine strujanja zraka
- prikazati neke od praktičnih primjera problema razvoja potpunog profila brzine strujanja zraka i mogućih rješenja problema
- opisati postojeći laboratorijski zračni tunel s pripadajućom opremom (izgled i dimenzije zračnog tunela, aksijalni ventilator, jedreno platno, elementi za „smirivanje“ strujanja, frekventni pretvarač, anemometar, PLC)
- izvršiti mjerenje profila brzine strujanja zraka pri različitim protocima zraka kroz tunel, bez i s primjenom jedrenog platna
- grafički i analitički obraditi izmjerene vrijednosti brzina zraka, te dati preporuke u cilju postizanja što je moguće ravnomjernijeg i razvijenijeg profila brzine strujanja zraka
- iznijeti zaključke
- navesti literaturu i izvore podataka.

## Sažetak

Tema ovog rada je oblik profila brzine strujanja zraka kroz zračni tunel. U teoretskom djelu dan je osvrt na razvoj, probleme i uporabu zračnih tunela kroz povijest. Opisane su osnovne značajke strujanja zraka, te utjecaja stjenki na razvoj profila brzine strujanja zraka. Teoretski dio sadrži i osvrt o načinu rada aksijalnog ventilatora, te opis postojećeg zračnog tunela u laboratoriju „Lantherma“. U praktičnom dijelu rada izvršeno je mjerenje brzina strujanja zraka, a zatim i analiza dobivenih podataka pri različitim radnim uvjetima. Tablično i grafički su obrađeni podaci u svrhu prikaza i analize problema koja se javljaju pri strujanju zraka u tunelu, te su dane preporuke za rješenje uočenih problema.

**Ključne riječi:** zračni tunel, profil brzine strujanja zraka, mjerenje

## Summary (Air velocity profile in the wind tunnel)

The topic of this paper is the shape of the profile of an air flow velocity through an aerial tunnel. In theoretical part, the development, problems and usage of air tunnels throughout history is described. Basic characteristics of air flow are described, and the influence of the air tunnel wall on the development of air flow velocity profiles is explained. The theoretical part contains a description on how axial ventilator works, followed by the description of the existing air tunnel in the laboratory “Lantherma”. The air flow velocity was measured in the practical part of the paper, and then the data obtained were analysed at different operating conditions. The data were tabulated and graphically processed for the purpose of displaying and analysing the problems that occur in the air flow in the tunnel, while recommendations for the solution of the observed problems were given.

**Keywords:** air tunnel, airflow velocity profiles, measurement

**SADRŽAJ**

1. Uvod.....	9
1.1. Zračni tuneli.....	9
1.2. Strujanje zraka.....	12
1.3. Utjecaj karakteristika stjenki/zidova na oblik i razvoj potpunog profila brzine strujanja zraka.....	14
1.4. Ventilator.....	17
2. Praktični primjeri problematike razvoja punog profila strujanja zraka.....	18
3. Laboratorijski zračni tunel.....	21
3.1. Ventilator AXC 500-10/21°-2 (4,00 kW) S V1.....	23
3.2. Frekventni pretvarač VLT HVAC Basic Drive FC101.....	25
3.3. Senzor brzine zraka Siemens QVM 62.1.....	26
3.4. Programibilni logički kontroler Siemens LOGO! 8.....	27
3.5. Jedreno platno.....	28
3.6. Elementi za smirivanje strujanja.....	29
4. Analiza mjerenja.....	30
5. Zaključak.....	39
Literatura.....	41

**Popis slika**

Slika 1.1 - Jedan od prvih zračnih tunela Gustava Eiffela [1]	10
Slika 1.2 - Razvoj strujanja zraka u kanalnom sustavu zraka s stožastim ulazom[2]	14
Slika 1.3 - Prikaz utjecaja stjenki i vrste protoka na profil brzine strujanja zraka[3]	15
Slika 1.4 - Pojednostavljeni prikaz utjecaja Venturijeve cijevi i suženja na profil brzine strujanja zraka [4]	16
Slika 1.5 - Prikaz profila brzine pri aksijalnom ventilatoru [5]	17
Slika 2.1 - Shema zračnog tunela „UC Davis Aeronautical Wind Tunnel“ [6]	18
Slika 2.2 - Ispitni dio zračnog tunela „UC Davis Aeronautical Wind Tunnel“ [6]	19
Slika 2.3 - Elementi za smirivanje strujanja u zračnom tunela UC Davis [6]	19
Slika 2.4 - Prikaza utjecaja elemenata za smirivanje strujanja na strujanje zraka	20
Slika 3.1 - Fotografija laboratorijskog zračnog tunela	21
Slika 3.2 - Fotografija aksijalnog ventilatora AXC 500-10/21°-2	23
Slika 3.3 - Frekventni pretvarač VLT HVAC Basic Drive FC101 [8]	25
Slika 3.4 - Senzor brzine zraka Siemens QVM 62.1[9]	26
Slika 3.5 - Siemens LOGO! 8 [10]	27
Slika 3.6 - Jedreno platno	28
Slika 3.7 - Prikaz elemenata za smirivanje strujanja	29

**Popis tablica**

Tablica 1. Brzine strujanja zraka (m/s) u tunelu spojenim s ventilatorom

Tablica 2. Brzine strujanja (m/s) u tunelu s ventilatorom spojeni jedrenim platnom

Tablica 3. Usporedba brzine strujanja (m/s) pri frekvenciji 15 Hz

Tablica 4. Usporedba brzina strujanja (m/s) pri frekvenciji 25 Hz

Tablica 5. Usporedba brzina strujanja (m/s) pri frekvenciji 45 Hz

Tablica 6. Brzine strujanja (m/s) u tunelu s ventilatorom bez elemenata za smirivanje strujanja

Tablica 7. Brzine protoka (m/s) u tunelu spojenim s ventilatorom bez smirivanja protoka, sa smirivanjem protoka, te sa smirivanjem protoka i jedrenim platnom



## Popis dijagrama

Dijagram 1. Tunel spojen s ventilatorom

Dijagram 2. Tunel i ventilator spojeni jedrenim platnom

Dijagram 3. Usporedba pri frekvenciji 15 Hz

Dijagram 4. Usporedba pri frekvenciji 25 Hz

Dijagram 5. Usporedba pri frekvenciji 35 Hz

Dijagram 6. Tunel i ventilator bez elemenata za smirivanje strujanja

Dijagram 7. Tunel spojen s ventilatorom bez smirivanja, sa smirivanjem, te sa smirivanjem i s jedrenim platnom

# 1. Uvod

## 1.1. Zračni tuneli

Zračni tunel je postrojenje koje služi za fizičko simuliranje kretanja zraka. U zračnom tunelu strujanje zraka se proizvodi uz pomoć ventilatora ili kompresora kako bi se mjerili parametri strujanja zraka oko nekog objekta ili strujanja samog zraka kroz tunel. Izumljeni su krajem 19. stoljeća, a laboratoriji su se počeli razvijati početkom 20. stoljeća. Princip rada počiva na Newtonovom proučavanju fluida i njegovim zakonima iz područja fizike.

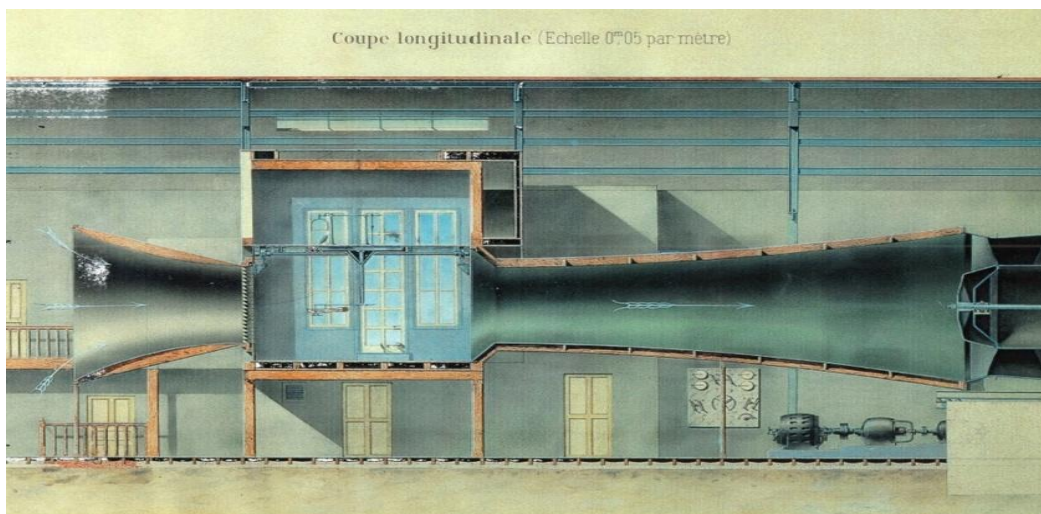
Prvi zračni tuneli nisu izgledali kao današnji i inženjeri i znanstvenici su tražili prava rješenja na razne načine. Strujanje zraka je bilo vertikalno i vodoravno, a ponekad i kombinirano. Isto tako izvor strujanja zraka, odnosno ventilator je mogao biti postavljen ispred ili iza objekta koji se proučava. Problematika samog strujanja zraka bio je ozbiljan problem koji se počeo rješavati paralelno s razvojem prvih zrakoplova. Upravo su prvi koraci napravljeni od strane vojnih inženjera i izumitelja poput braće Wright.

Neki od značajnih problema prvih zračnih tunela bili su: smanjenje gubitaka strujanja pri puhanju ventilatora, smirivanje zračnih turbulencija, smanjenje potrošnje energija, načini na koji se djelovanje zračne struje može uočiti okom budući da je zrak proziran, oblik samog tunela, mogućnost da se fizikalni procesi pobliže opišu budući da u vrijeme prvih zračnih tunela određena znanja iz aerodinamike nisu bila poznata. Konačno, i sam razvoj zračnih tunela doprinio je i boljim saznanjima iz tih područja.

Prvi značajniji korak naprijed bio je uvođenje kolektora koji se postavlja uzvodno od ispitnog dijela. Kolektor je sastavljen od konvergentnog dijela koji povećava brzinu u ispitnom dijelu prema zakonu o očuvanju protoka. Poboljšavanjem usisa osigurao se kvalitetniji protok zraka uz smanjene gubitke. Daljnji značajniji korak u razvoju zračnih tunela, a uz to i same aerodinamike, bila je primjena difuzora kojim se povećavao tlak ispred ventilatora, te primjena zatvorene pokusne komore u kojoj se stvara slobodan protok zraka. Difuzor je značajno smanjio potrebe za električnom energijom. To je bio izum francuskog fizičara i inženjera Gustava Eiffela, a njegov zračni tunel prikazan je na slici 1.1.

Druga velika inovacija sastojala se u tome da se zrak cirkulira u zatvorenom krugu. Prvo takvo postrojenje izgrađeno je u Njemačkoj, a izradio ga je Ludwig Prandtl 1909. Nakon usisavanja zraka nizvodno od probnog odsječka, zrak se provlačio kroz četiri uzastopna

zavoja, a zatim ponovno slao uzvodno od kolektora. Ovakav način provođenja zraka dovodio je do bolje učinkovitosti goriva i omogućavao kontrolirane ispitne uvjete (tlak, temperatura, vlaga). Važno je napomenuti i jedan od prvih načina kojim je omogućeno da se vizualizira strujanje zraka i utjecaj strujanja na postavljeni objekt u tunelu, a to je bilo uz pomoć dima. To je bio prvi primjer vizualizacije strujanja u zračnom tunelu. U tom vremenu najvažnija dostignuća u razvoju zračnih tunela zasigurno su Prandtlova i Eiffelova inovacija: zatvoreni krug i jedan difuzor.



*Slika 1.1.- Jedan od prvih zračnih tunela Gustava Eiffela [1]*

To su bile preteče današnjih mnogo složenijih zračnih tunela. Nakon Prvog, a naročito Drugog svjetskog rata, razvoj tehnologije bio je gotovo eksponencijalan. Razvojem novih vrsta pogona te novih saznanja iz fizike poput koeficijenta povlačenja, Reynoldsova broja te brzina većih od brzina zvuka (Machov broj), omogućen je strelovit napredak u razvoju zračnih tunela. Danas postoje podzvučni i nadzvučni zračni tuneli diljem svijeta. Najviše ih ima u Francuskoj i SAD-u, a to su ujedno i države s najrazvijenijom zračnom industrijom.

Glavni dijelovi modernog zračnog tunela sa zatvorenim tokom strujanja su test sekcija, konvergentna mlaznica, umirivačka sekcija, difuzor, ventilator, motor, usmjerivači zraka te povratni vod. Test sekcija je najznačajniji dio aerodinamičnog tunela, gdje se postiže traženi oblik strujanja i izvode mjerenja. Kroz konvergentnu mlaznicu ubrzava se fluid do željene brzine uslijed sužavanja poprečnog presjeka mlaznice. U umirivačkoj sekciji postiže se traženi stupanj turbulencije ili laminarnost strujanja. Motor pokreće ventilator koji uzrokuje

strujanje zraka. Usmjerivači zraka postavljeni su u kutovima tunela i ublažavaju vrtloženje zraka.

Da bi se odredila potrebna snaga motora i karakteristike ventilatora za postizanje željene brzine fluida u test sekciji, potrebno je proračunati energetske gubitke tunela zbrajanjem gubitaka u pojedinim sekcijama. Dijelovi tunela se međusobno razlikuju po svojoj geometriji pa se proračun koeficijenata gubitaka razlikuje od sekcije do sekcije.

Današnji zračni tuneli se koriste prvenstveno za aeronautičke i astronautičke namjene, a potom i za niz drugih namjena kao što su: ispitivanje uslijed vjetra uslijed djelovanja vjetra na zgrade, mostove, dimnjake, antene, i tako dalje. Ispitivanje aerodinamičkih svojstava cestovnih vozila i brodova, balističkih projektila, iskorištavanje energije vjetra, ispitivanje aerodinamike zemljine površine, let ptica i kukaca, samo su dio od mnogobrojnih primjera upotrebe zračnih tunela.

Prema namjeni ili načinu rada, tuneli se još mogu dijeliti na: tunele s regulacijom tlaka, tunele s promjenljivom gustoćom radnog medija, tunele za ispitivanja prototipa u punoj veličini, tunele s dimom za vizualizaciju strujanja, tunele za ispitivanje slobodnog leta, tunele za ispitivanje spiralnih manevara, za ispitivanje stabilnosti leta i razne druge namjene koje se prvenstveno tiču aerodinamike.

## 1.2. Strujanje zraka

U mehanici fluida jedan od ključnih parametara pri proučavanju strujanja fluida je Reynoldsov broj. Taj broj označava da li će strujanja fluida, u ovom slučaju zraka, biti laminarno ili turbulentno. Brzina je jedan od glavnih elemenata koji utječe na strujanje tako da je Reynolds definirao brzinu kod koje nastaje turbulentno strujanje kritičnom brzinom. Pokusima je utvrđeno da prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje ovisi o brzini fluida i o njegovom viskozitetu. Isto tako je pokusima ustanovljeno da je za vrijednost Reynoldsovog broja manjeg od 2300 strujanje laminarno, dok za veće vrijednosti Reynoldsovog broja od 4000 strujanje je turbulentno. Područje od 2300 do 4000 definirano je kao prelazno područje gdje strujanje može biti ili laminarno ili turbulentno. Pri relativno malim brzinama strujanja i konstantnoj viskoznosti, Reynoldsov zakon ima oblik:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

gdje  $v$  označava brzinu strujanja fluida,  $\nu$  koeficijent kinematičkog viskoziteta, a  $D$  unutrašnji promjer cijevi kroz koju struji fluid.

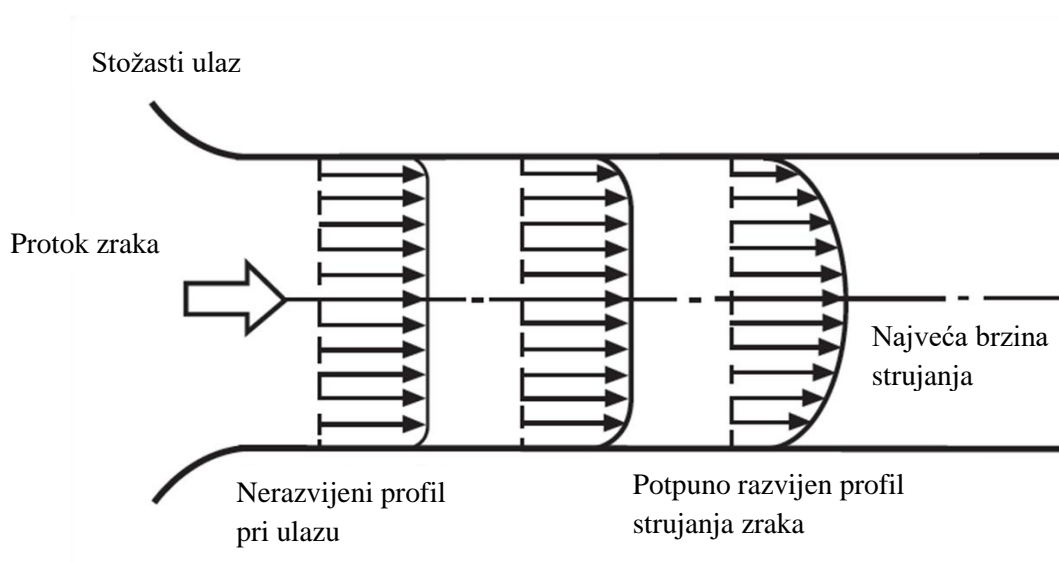
Strujanje je jedna od glavnih odlika svih fluida. Kod zraka ono je uzrokovano razlikom tlakova na putu na kojem zrak struji. Prema putanji, dvije glavne vrste strujanja su laminarno i turbulentno. Laminarno strujanje je relativno sporo i u njemu se čestice ne miješaju te putuju jednoliko dok kod turbulentnog strujanja, slojevi se miješaju, čestice imaju nepredvidivo gibanje te se fluid giba brže. Ovisno o stvaranju vrtloga razlikujemo vrtložno i potencijalno strujanje. Potencijalno strujanje prikazuje se uz pomoć potencijalne funkcije, to je slučaj bez stvaranja vrtloga. Po brzini strujanja može se još napraviti podjela na stacionarno strujanje u kojem je protok konstantan kroz presjek, te nestacionarno gdje je protok promjenjiv. Grana fizike koja se detaljnije bavi strujanjem zraka naziva se aerodinamika.

Za strujanje zraka važni su fizikalni principi očuvanja masa i zakon očuvanja energije. Očuvanje mase jednostavno kaže da se zračna masa ne stvara niti uništava. To znači da je količina zračne mase koja ulazi u spoj u sustavu vodova jednaka količini zračne mase koja napušta čvor, ili da je zbroj zračnih masa na svakom spajanju jednak nuli. U većini slučajeva pretpostavlja se da je zrak u kanalu neraspršiv, odnosno da promjena gustoće zraka nastaje kao rezultat gubitka tlaka i protoka u kanalu.

Zakon očuvanja energije kaže da energija ne može nestati, odnosno, pretvara se samo iz jednog oblika u drugi. To je osnova jednog od glavnih izraza aerodinamike, Bernoullijeve jednadžbe. Jednadžba se koristi za proračune tlakova, protoka i brzina fluida, a samim tim i zraka u zračnim tunelima.

### 1.3. Utjecaj karakteristika stjenki/zidova na oblik i razvoj potpunog profila brzine strujanja zraka

Pri konstrukciji zračnih tunela i ventilacijskih sustava koji funkcioniraju na principima zračnih tunela smatra se da će takve konstrukcije funkcionirati u skladu s njihovom svrhom. To često nije slučaj zbog raznih faktora koji utječu na samo strujanje zraka. Kada zrak prolazi kroz kanal ili tunel, neovisno o presjeku (najčešće se radi o pravokutnom ili kružnom presjeku), on nema jednoliku brzinu strujanja po poprečnom presjeku, već će imati određeni profil brzine. Profil će ovisiti o uzvodnom i dovodnom kanalu, njegovoj hrapavosti i obliku, te kvalitetama zraka. Ako zračni tok ulazi u tunel kroz zaobljeni dovod kao na slici 1.2., profil brzine će se razvijati po dužini tunela (duljina strelica je proporcionalna prosječnoj brzini strujanja). Tek na određenoj udaljenost nizvodnog kanala profil brzine će biti potpuno razvijen.

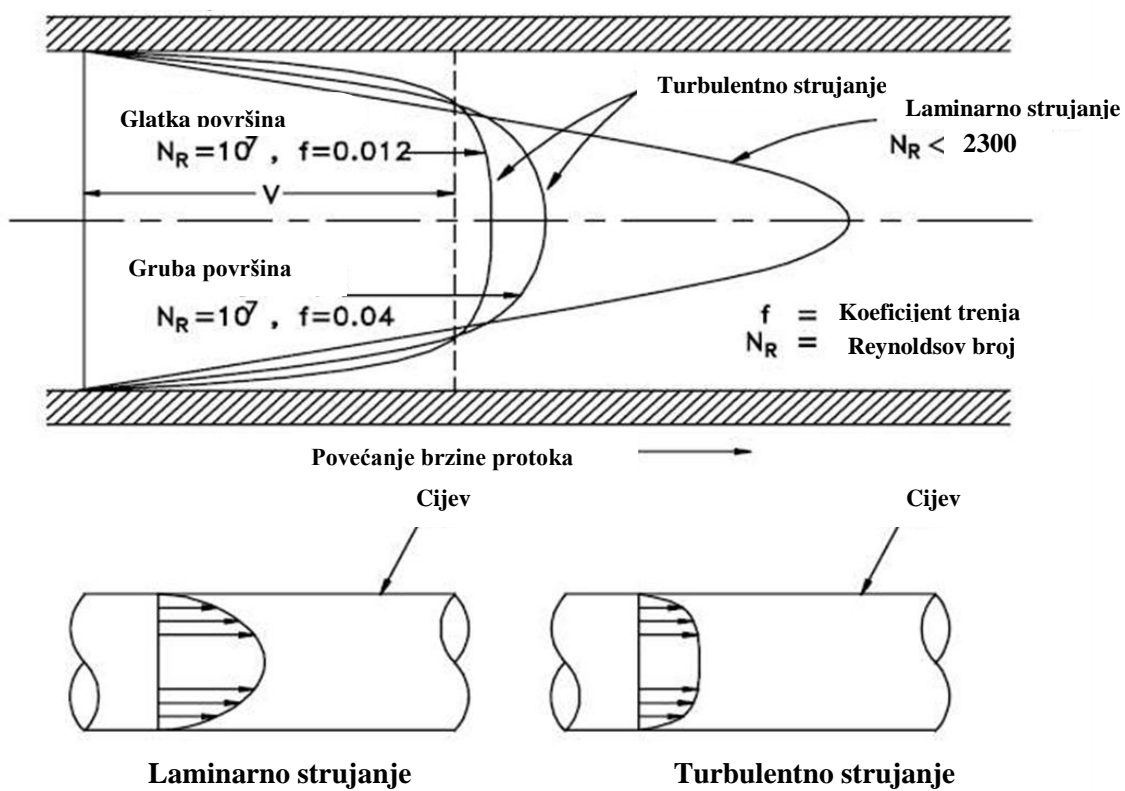


Slika 1.2.- Razvoj strujanja zraka u kanalnom sustavu zraka s stožastim ulazom[2]

Iako se zrak često shematski prikazuje kao skup paralelnih tokova u obliku strelica kao na slici 2, zbog čega se može zaključiti da se radi o laminarnom strujanju, to nije u potpunosti točno. S obzirom na brzine zraka u tunelu ili ventilacijskoj mreži može se zaključiti da će strujanje biti turbulentno. To znači da, iako se najveći dio zraka kreće naprijed s prosječnom brzinom, postoji kontinuirano vrtloženje i miješanje unutar toka zračne struje. Vrijednosti

Reynoldsova broja u praksi su značajno veće od granične vrijednosti za turbulentno strujanje (4000) te su reda veličine  $10^5$ .

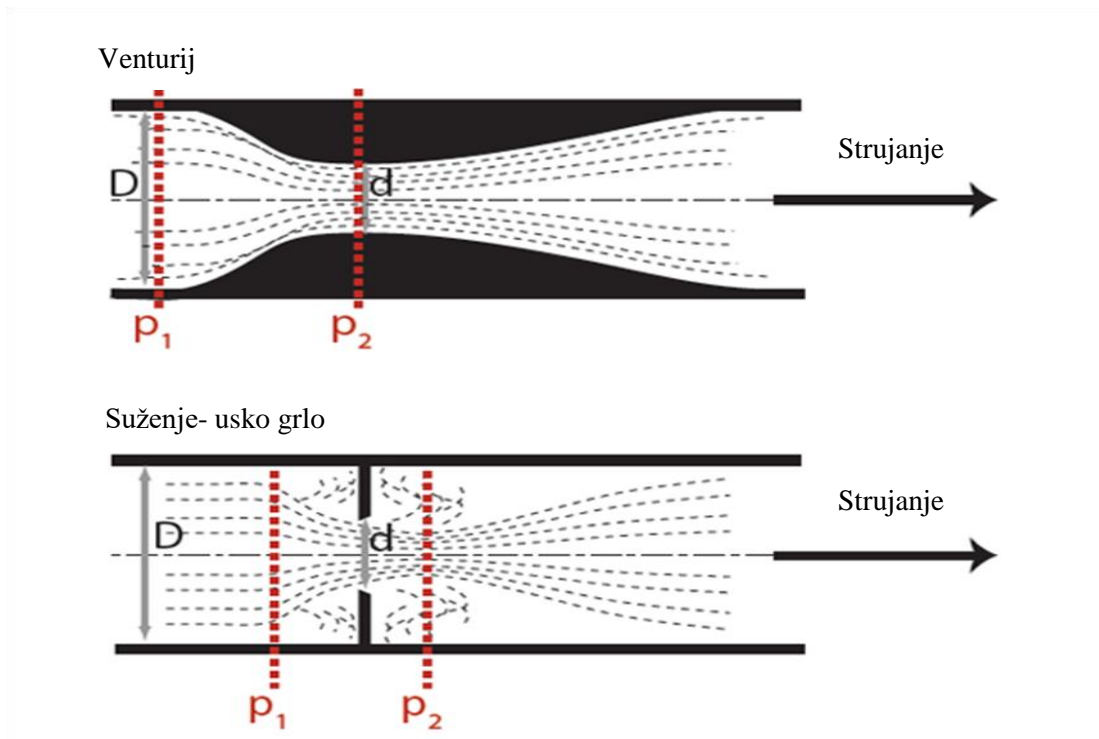
Proučavanjem naprezanja na stjenke zračnog tunela potvrđena je povezanost brzine protoka i profila strujanja zraka s materijalima i oblicima stjenki. Utvrđeno je da zidovi i stjenke zračnog tunela izravno utječu na protok zraka i koeficijente podizanja i povlačenja. Ne putuju sve čestice zraka jednakom brzinom po poprečnom presjeku zračnog tunela. Oblik krivulje brzine (profil brzine strujanja na bilo kojoj duljini tunela) ovisi o tome da li je protok laminaran ili turbulentan. Ako je protok u tunelu laminaran, raspodjela brzine u jednom presjeku bit će parabolična oblika, pri čemu će maksimalna brzina u središtu biti do dva puta veća od prosječne brzine u tunelu. U turbulentnom protoku, prilično ravnomjerna raspodjela brzina postoji na cijelom odjeljku presjeka, što rezultira time da cjelokupni fluid teče skoro pa jednolično. Brzina fluida u dodiru sa stjenkom tunela je jednaka nuli i povećava se udaljavanjem od stjenke. Na slici 1.3. se vidi da profil brzine strujanja ovisi o stanju površine stjenke cijevi. Glatkiji zid rezultira ujednačenijim profilom brzine od grube stjenke. To pokazuje i da materijal i površinska obrada zidova zračnog tunela ima svoj utjecaj na razvoj profila brzine strujanja.



Slika 1.3.- Prikaz utjecaja stjenki i vrste protoka na profil brzine strujanja zraka[3]



Fizička prepreka koja se nalazi u tunelu, a na putanji strujanja zraka, uzrokovat će pad tlaka zraka do kojeg dolazi zbog trenja, turbulencije i promjene površine poprečnog presjeka. Karakteriziranjem prepreke i kalibracijom pada tlaka u odnosu na poznate brzine protoka, vrijednost razlike tlaka može se koristiti za određivanje brzine protoka zraka. Za zračne sustave, takvi mjerni uređaji uključuju Venturijevu cijev i usko grlo s otvorom kao što je prikazano na slici 1.4. Osim što mogu služiti kao mjerni mehanizmi za protok zraka, sa suženjem u stilu Venturijeve cijevi mogu se poništiti vrtloženje zraka i dobiti razvijeniji profil laminarnog strujanja.



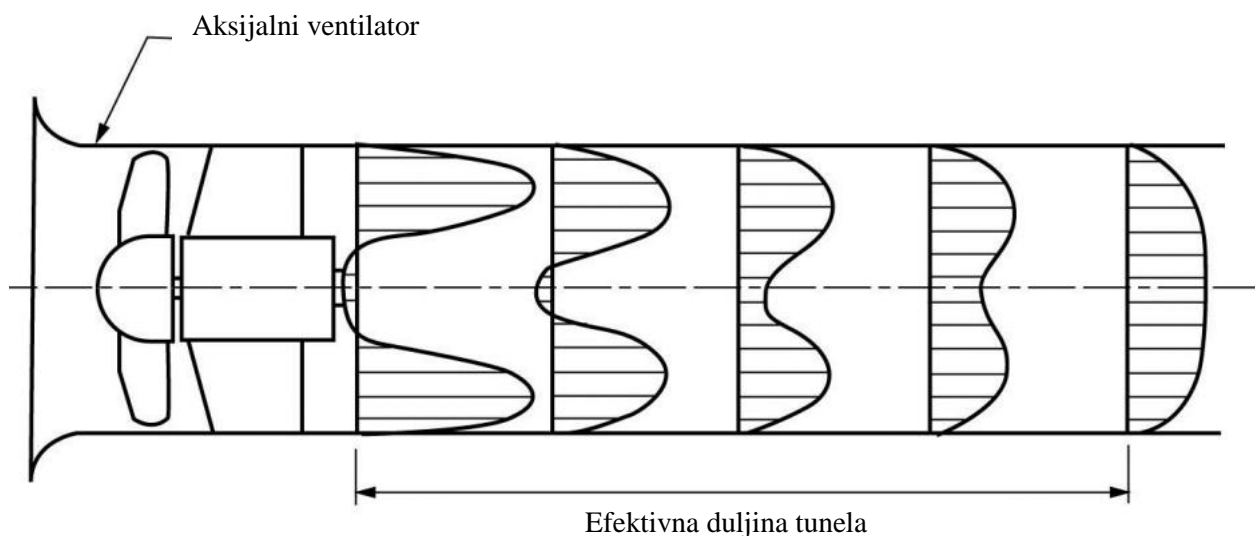
Slika 1.4.- Pojednostavljeni prikaz utjecaja Venturijeve cijevi i suženja na profil brzine strujanja zraka[4]

## 1.4. Ventilator

Ventilator je električni uređaj koji uz pomoć lopatica proizvodi zračnu struju. Njihova proizvodnja započela je u 19. stoljeću. Ventilatori imaju raznoliku primjenu, od kućanstva do velikih industrijskih postrojenja i znanstvenih laboratorija. Tri su glavne vrste ventilatora: aksijalni, centrifugalni (radijalni) i poprečno protočni (tangencijalni). U ovom radu razmatrat će se isključivo aksijalni ventilatori jer se on koristi u zračnom tunelu koji će biti predmetom mjerenja.

Aksijalni ventilator uzrokuje strujanje zraka u aksijalnom smjeru paralelno s osovinom oko koje se lopatice vrte. Ventilator uz pomoć lopatica proizvodi razliku tlakova što uzrokuje protok zraka odnosno umjetno stvaranje strujanja zraka. Komponente aksijalnog ventilatora dizajnirane su tako da omogućuju glatki laminarni protok zraka na lopaticu rotora. Laminarni protok će povećati učinkovitost ventilatora premještanjem zraka iz usisne na tlačnu stranu radne lopatice. Na tlačnoj strani lopatice rotora, protok će postati turbulentan ako se ne koriste uređaji za ispravljanje protoka. Dizajn ventilatora može značajno utjecati na njegove radne parametre, a samim tim i na profil brzine strujanja.

Aksijalni ventilator stvara specifični profil brzine strujanja zraka, kao što je prikazano na slici 5. Najviša vrijednost brzine strujanja zraka pojavljuje se u području polovine visine lopatica, dok se specifični minimum pojavljuje u samoj simetrali osovine rotora. Kako bi se postigao razvijeni profil strujanja potrebno je da zračni tunel bude dovoljno dug, kao što je prikazano na slici 1.5.

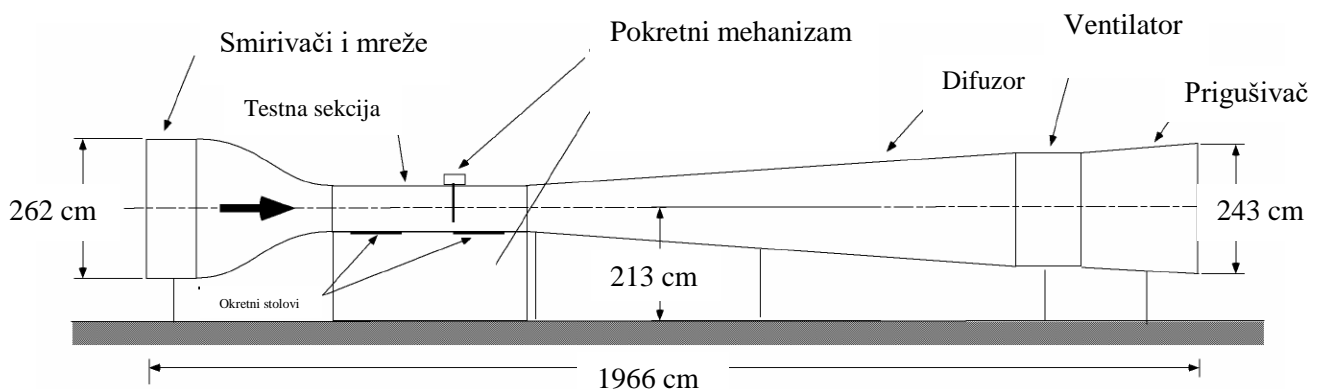


Slika 1.5.- Prikaz profila brzine pri aksijalnom ventilatoru [5]

## 2. Praktični primjeri problematike razvoja punog profila strujanja zraka

Pun profil strujanja zraka kao što je navedeno nije lako dobiti ni održati. Profil strujanja vrlo je osjetljiv i često se događaju vrtloženja i turbulencije. Osim zračnih tunela, ta svojstva su vrlo važna u svakodnevnom životu, najviše u sustavima hlađenja, grijanja te ventilaciji.

Zračni tuneli koriste se za potrebe različitih istraživanja i testiranja. Mnogi se mogu pronaći i na sveučilištima, a jedan od takvih je i zračni tunel na Kalifornijskom Sveučilištu UC Davis u SAD-u. Shema tunela prikazana je na slici 2.1. Tunel koristi motor snage 92 kW koji može proizvesti najveću brzinu od 266 kilometara na sat kroz testnu sekciju. Ispitni dio je konstruiran s paralelnim stranama umjesto uobičajene prakse odvajanja dviju strana kako bi se omogućio rast graničnog sloja.



Slika 2.1.- Shema zračnog tunela „UC Davis Aeronautical Wind Tunnel“ [6]

Četiri konična fileta ugrađena su u ispitni dio radi kompenzacije suženja protočnog kanala i zbog rasta graničnog sloja, te postizanja konstantnog statičkog tlaka u cijelom ispitnom dijelu koji je prikazan na slici 2.2. Pod i strop su napravljeni od aluminijske ploče. Bočni zidovi su prozirni paneli od pleksi stakla koji su osigurani na vrhu. Vrata se po potrebi mogu skinuti i zamijeniti posebnim staklenim vratima. Ugrađeno je i posebno ultraljubičasto svjetlo u jednu od donjih ploča koje može osvijetliti testni dio za fluorescentnu primjenu vizualizacije strujanja zraka. Osvjetljenje pružaju dvije fluorescentne cijevi postavljene u gornji dio tunela.



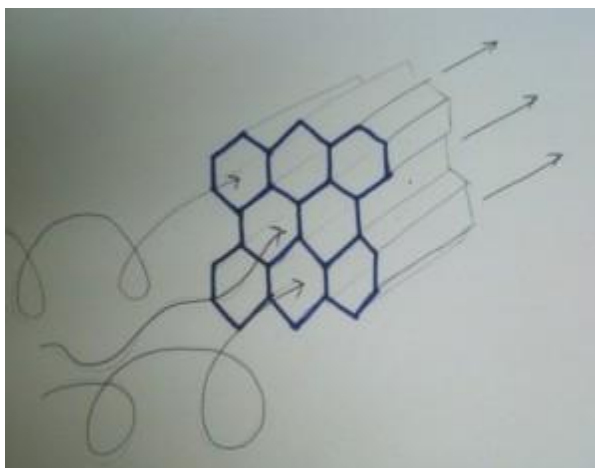
*Slika 2.2.- Ispitni dio zračnog tunela „UC Davis Aeronautical Wind Tunnel“ [6]*

Najvažnija problematika zračnog tunela je dobivanje jednolikog protoka strujanja zraka bez turbulencija i vrtloženja. Ovaj tunel koristi sofisticiran sustav prepreka, mreža i „saćaste“ strukture kako bi dobio što uniformniji profil brzina strujanja zraka te na taj način omogućio da u testnoj sekciji mogu biti idealni uvjeti za proučavanje utjecaja zračnog strujanja na objekte koji se testiraju.

Sekcija za smirenje vrtloženja prikazana na slici 2.3. sastoji se od aluminijske „saćaste“ strukture, te čeličnih mreža za razbijanje turbulencija. „Saće“ su konstruirane na način da se turbulentna struja zraka prolaskom kroz uske profile određene dužine, odnosno suženja koja izgledaju poput pčelinjih saća, smiri te uklone vrtloženja. Skica načina rada „saćaste“ strukture prikazana je na slici 2.4.



*Slika 2.3.- Elementi za smirivanje strujanja u zračnom tunelu UC Davis [6]*

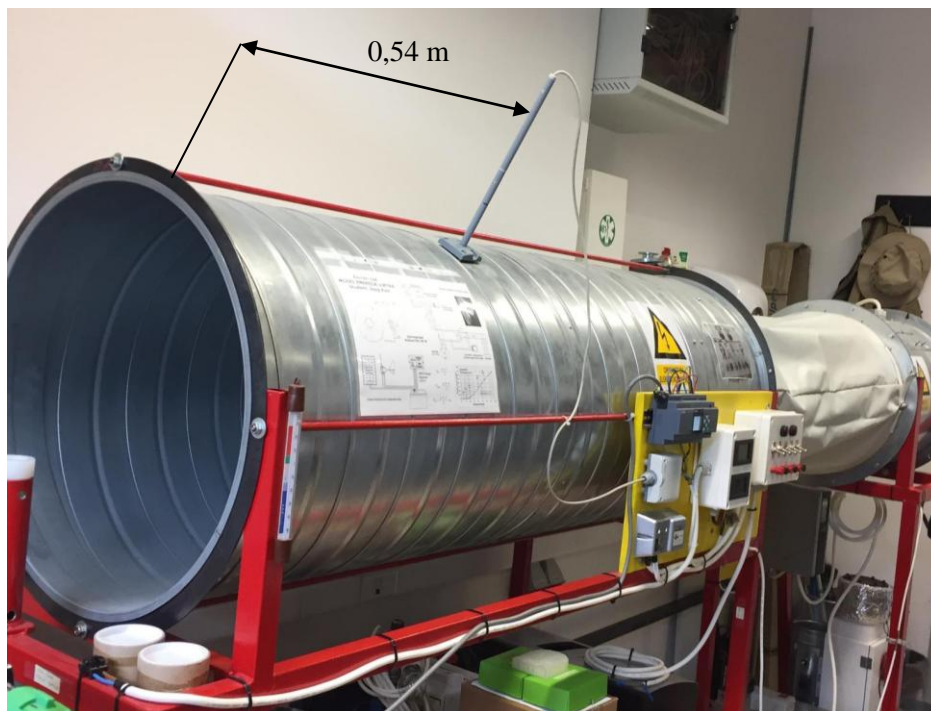


*Slika 2.4.- Prikaza utjecaja elemenata za smirivanje strujanja na strujanje zraka*

### 3. Laboratorijski zračni tunel

U sklopu laboratorija „LANTHERMA“ nalazi se i laboratorijski zračni tunel (Slika 3.1.). Konstruiran je i izgrađen u okviru završnog rada s ciljem izrade „Modela energije vjetra“. Zračni tunel funkcionira na istom principu kao i većina zračnih tunela, te koristi aksijalni ventilator za generiranje strujanja zraka željene brzine. Zračni tunel izrađen je iz spiro cijevi.

Duljina tunela iznosi 1,54 metra, a promjer cijevi iznosi 0,56 m. Tijekom gradnje željena duljina tunela bila je ograničena raspoloživim prostorom u laboratoriju, te je naknadno dodana mogućnost „produženja“ zračnog tunela jedrenim platnom dužine 1 m, što daje ukupnu dužinu zračnog tunela od 2,54 m (ne računajući dužinu ventilatorske sekcije).



Slika 3.1.- Fotografija laboratorijskog zračnog tunela

Zračni tunel opremljen je s opremom za upravljanje njegovim radom, pri čemu se kroz zračni tunel može postići i održavati željena brzina strujanja zraka. Dosadašnjom uporabom zračnog tunela uočeni su problemi vezani za izgled profila brzine strujanja koji s obzirom na duljinu zračnog tunela nije u potpunosti razvijen. Samim time otežano je postizanje zadovoljavajuće preciznosti vrijednosti željene brzine strujanja zraka.

Anemometar koji služi za mjerenje brzine protoka zračne struje postavljen je na plaštu zračnog tunela u radijalnom smjeru tako da se može pomicati i mjeriti vrijednost brzine od simetrale do zida (stjenke) zračnog tunela. Postavljen je na udaljenosti od 1 m od priključne pribornice na koju se spaja ventilatorska sekcija, kao što je prikazano na slici 3.1.

Na priključnom dijelu tunela naknadno su instalirana dva elementa za smirivanje strujanja zraka, i to u obliku „saćaste“ strukture te limene ploče postavljene radijalno.

Glavni dijelovi zračnog tunela prikazanog na slici 3.1. su:

- aksijalni ventilator
- frekventni pretvarač
- senzor brzine zraka (anemometar)
- programibilni logički kontroler (PLC)
- jedreno platno
- elementi za smirivanje strujanja.

### 3.1. Ventilator AXC 500-10/21°-2 (4,00 kW) S V1

Ventilator spada u srednje tlačne aksijalne ventilatore s dugim kućištem za izravno postavljanje u cijevne sustave (Slika 3.2.). Kućište mu je izrađeno od pocinčanog čelika prema DIN EN ISO 1461 standardu. Aksijalni aerodinamični rotor napravljen je od lijevanog aluminijskog i ima 10 lopatica te mu je kut nagiba podesiv kako bi imao maksimalnu učinkovitost. Pokreće ga trofazni motor prema IE3 standardu sa zaštitom IP55, izolacijskom klasom F, prema EN 60034-5/IEC normi. Brzinom motora upravlja se preko frekventnog pretvarača. Opremljen je PTC termistorima za optimalnu zaštitu motora. Pogodan je za radne temperature do 55°C. Može se koristiti za dovod ili odvod zraka. Ispitivanje ventilatora izvedeno je u skladu s DIN ISO 5801, DIN 24163 i Amca 201-99 normama [7].



Slika 3.2.- Fotografija aksijalnog ventilatora AXC 500-10/21°-2

Tehnički podaci:

- motor: AC-motor

- napon/frekvencija: 400/690 V D/Y 50 Hz



- snaga motora (P2): 4,00 kW IE3
- nazivna struja (In): 7,45/4,32 A
- nazivna brzina: 2905 o/min
- $\cos \rho$ : 0,88
- izolacija/klasa zaštite: F/IP55
- maksimalna temperatura: 55°C
- kut lopatica: 21°
- priključak-prirubnica, Du = 500 mm

### 3.2. Frekventni pretvarač VLT HVAC Basic Drive FC101

VLT HVAC Basic Drive FC101 je namjenski frekventni pretvarač za jednostavnije aplikacije pogona crpki i ventilatora (Slika 3.3.). Koristi se za pokretanje aksijalnog ventilatora te promjenu frekvencije rada motora, a time i broja okretaja rotora. Pretvarači snage do 22 kW rade na bazi VLR® Micro Drive, dok oni sa snagama između 30 kW i 90 kW rade na bazi VLT HVAC drive [8].



Slika 3.3.- Frekventni pretvarač VLT HVAC Basic Drive FC101 [8]

Osnovne karakteristike:

- snaga: 0,37 kW do 90 kW
- stupanj mehaničke zaštite: IP 20/21, IP54
- pogodni za terete s varijabilnim momentima karakteristike
- imaju ugrađen RSO filter i DC prigušnice
- ima procesno PID upravljanje
- uklonjiv dvoredni alfanumerički upravljački panel
- ugrađen SLC (smart logic controller)

### 3.3. Senzor brzine zraka Siemens QVM 62.1

Siemens QVM 62.1 je senzor brzine zraka koji se koristi za kontrolu brzine zraka konstantnih vrijednosti, balansiranje oscilacija tlaka zraka ili za kontrolu protoka zraka u zračnim tunelima (Slika 3.4.). Princip rada anemometra temelji se na tome da mjeri brzinu protoka zraka te izmjerenu vrijednost pretvara u aktivni DC 0-10 V ili 4-20 mA izlazni signal. Posjeduje tri mjerna područja: 0-5 m/s, 0-10 m/s i 0-15 m/s [9].



Slika 3.4.- Senzor brzine zraka Siemens QVM 62.1 [9]

Tehnički podaci:

- Napajanje: radni napon: AC/DC 24 V  $\pm 20\%$ , frekvencija: 50/60 Hz
- Mjerni podaci: raspon mjerenja: 0-5 m/s, 0-10 m/s, 0-15 m/s, dozvoljena brzina: 20 m/s
- Točnost mjerenja na 25 °C, 45 % v.z., tlak 1013 hPa
  - 0-5 m/s      ( $\pm 0.2$  m/s + 3 % od izmjerene vrijednosti )
  - 0-10 m/s    ( $\pm 0.2$  m/s + 3 % od izmjerene vrijednosti )
  - 0-15 m/s    ( $\pm 0.2$  m/s + 3 % od izmjerene vrijednosti )
- Izlazni signal: naponski izlaz: DC 0-10 V,  $\pm 1$  mA, strujni izlaz: DC 0-4 mA, 0-500  $\Omega$

### 3.4. Programibilni logički kontroler Siemens LOGO! 8

Programibilni logički kontroler Siemens LOGO! prikazan na slici 3.5., osmišljen je za manje aplikacije koje zahtijevaju automatizaciju radnih procesa. Uglavnom se koristi u industriji i kućnoj automatizaciji te je dostupan u izvedbama za različite napone (12/24 V DC ili 230 V AC). Ovisno o tipu PLC-a može imati relejni ili tranzistorski izlaz, te korištenjem modula za proširenje može imati više ulaza i izlaza (20 digitalnih i 8 analognih). U modelu energije vjetra koristi se PLC Siemens LOGO!8 s ulazom od 230 V i dodatnim modulom s analognim izlazima za upravljanje radom frekventnog pretvarača [10].



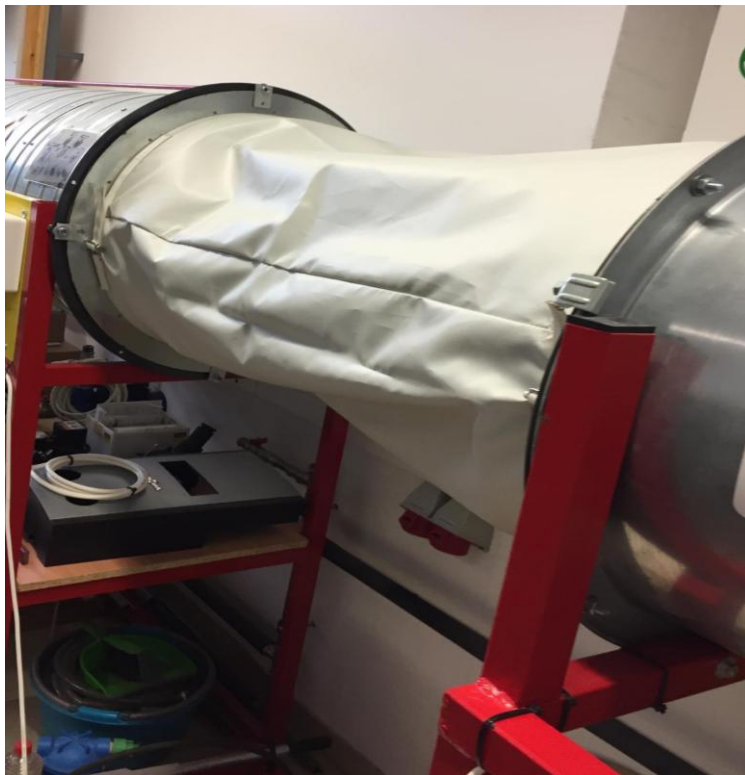
Slika 3.5.- Siemens LOGO! 8 [10]

Tehnički podaci:

- broj ulaza: 8
- radni/ulazni napon: 115-230 V AC/DC
- izlaz: 4, relejni
- zaštita od kratkog spoja: potreban vanjski osigurač
- vrijeme ciklusa: < 0,1 ms/funkciji
- temperatura okoline: 0-55 °C
- temperatura skladištenja: -40-70 °C
- programski kabel: Ethernet
- maksimalna memorija programa: 400 blokova

### 3.5. Jedreno platno

Jedreno platno koristi se kako bi se povećala duljina zračnog tunela za 1 m (Slika 3.6.). Jedrenim platnom povezuje se zračni tunel preko posebno izrađenih prirubnica s ventilatorskom sekcijom. Izrađeno je od elastičnog, rastezljivog materijala, te ima glatku površinu kako ne bi negativno utjecao na strujanje zraka. Uporaba jedrenog platna ima za cilj efektivno povećanje duljine zračnog tunela te postizanje ravnomjernijeg i razvijenijeg profila strujanja.



*Slika 3.6.- Jedreno platno*

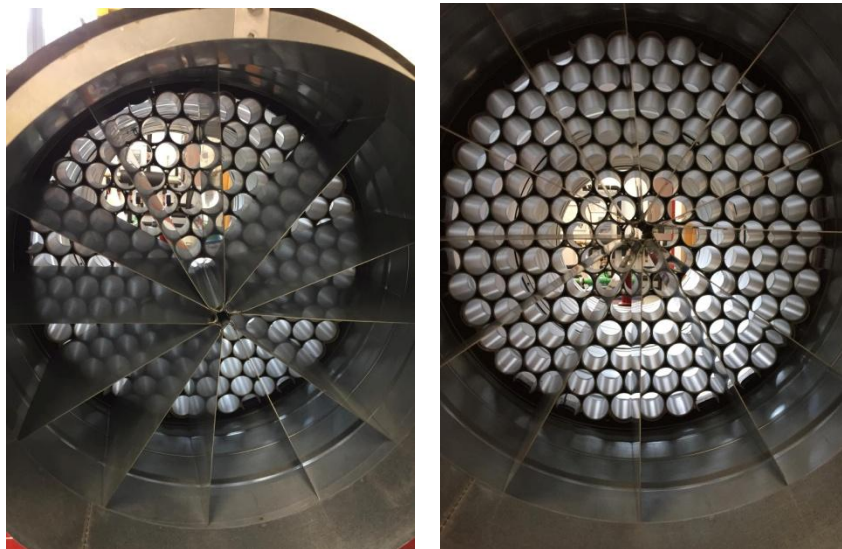
### 3.6. Elementi za smirivanje strujanja

Kao što je već pokazano u poglavlju 2, u zračnim tunelima koriste se raznovrsni elementi kako bi se umirilo strujanje te postigao željeni profil brzine strujanja. S obzirom na već navedene nedostatke predmetnog zračnog tunela, nakon ventilatorske sekcije, na priključnoj pribudnici tunela, postavljena su dva elementa za smirivanje zračne struje.

Prvi element sastoji se od „saćaste“ strukture izrađene od PP cijevi promjera 40 mm i dužine 120 mm, kao što je prikazano na slici 3.7. Svrha „saćaste“ strukture je prisiliti prolazak vrtložne struje zraka kroz veći broj uskih cijevi kako bi se smanjio intenzitet vrtloženja. Obično je „saćasta“ struktura izgrađena od okruglih, kvadratnih, pravokutnih, šesterokutnih ili osmerokutnih ćelija/cijevi čija duljina je 5 do 10 puta veća od širine/promjera. Iz navedenog proizlazi da je dužina „saćaste“ strukture trebala biti veća.

Drugi element sastoji se od 12 limenih ploča postavljenih u radijalnom smjeru (Slika 3.7.), a kako bi se umanjio intenzitet vrtloga kojeg generira aksijalni ventilator.

Utjecaj elemenata za smirivanje strujanja biti će demonstriran kroz prikaz izmjerenih vrijednosti brzina strujanja zraka po poprečnom presjeku zračnog tunela.



*Slika 3.7.- Prikaz elemenata za smirivanje strujanja*

## 4. Analiza mjerenja

U okviru laboratorija izvršena su mjerenja brzina strujanja zraka po poprečnom presjeku zračnog tunela i to pri različitim protocima zraka i pri različitim uvjetima s obzirom na primjenu elemenata za smirivanje strujanja i primjenu jedrenog platna.

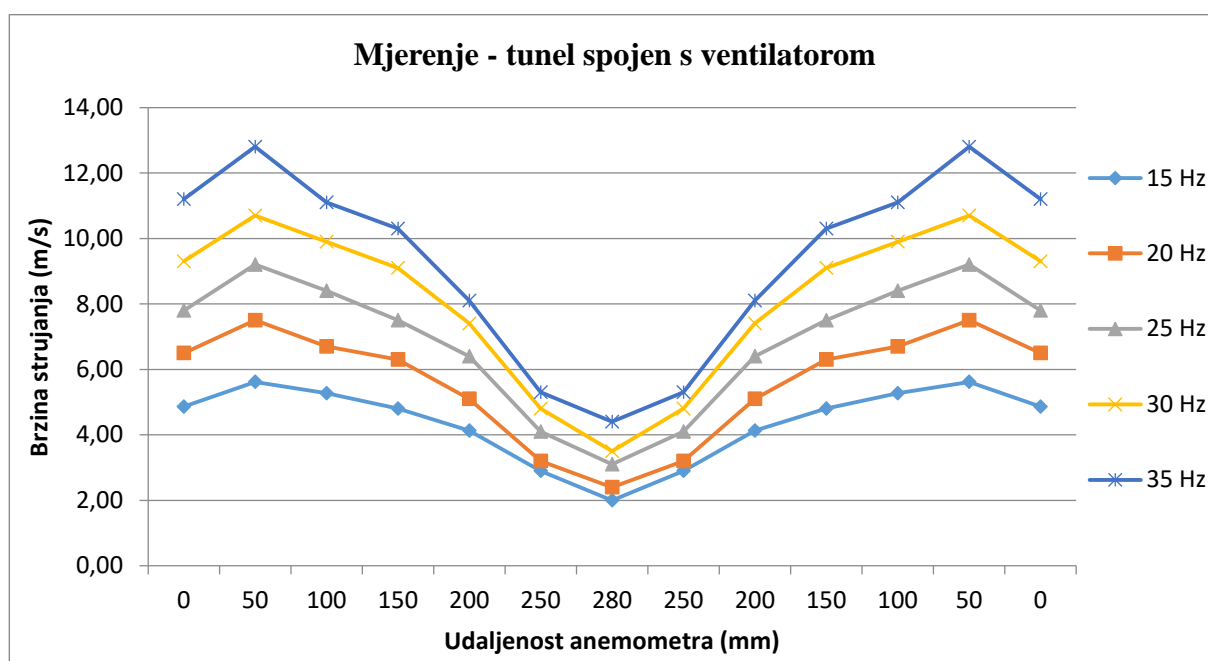
Promjena protoka zraka kroz tunel postignuta je promjenom broja okretaja ventilatora. Promjena broja okretaja ventilatora upravljana je i regulirana pomoću frekventnog regulatora pri različitom rasponu frekvencija. Mjerenja su prvo izvršena bez jedrenog platna, a zatim su ponovljena s jedrenim platnom kako bi se vidio utjecaj povećanja dužine zračnog tunela na promjenu profila brzine strujanja zraka. Mjerenja brzine strujanja zraka vršena su pomoću anemometra, pri čemu je anemometar radijalno pomican u nekoliko specifičnih položaja kako bi se očitale vrijednosti brzine od simetrane do stjenke zračnog tunela. Na taj način dobiven je uvid u izgled profila brzine strujanja, pri čemu su izmjerene vrijednosti zrcaljane kako bi se prikazao izgled profila brzine po cijelom presjeku tunela. S obzirom na simetričnost strujanja navedeni pristup je prihvatljiv. Na temelju izvršenog mjerenja obavljena je analiza te grafički prikaz dobivenih rezultata.

U tablici 1. prikazane su vrijednosti izmjerenih brzina strujanja zraka u zračnom tunelu za različite vrijednosti frekvencija (u rasponu od 15 do 35 Hz) i različite položaje anemometra (u rasponu od 0 do 280 mm, pri čemu je 0 mm uz samu stjenku tunela a 280 mm u simetrali tunela). Ovo mjerenje obavljeno je direktnim spajanjem ventilatorske sekcije sa zračnim tunelom (bez jedrenog platna), dok su u zračnom tunelu postavljeni elementi za smirivanje strujanja. Kao što je već navedeno, s obzirom na simetričnost strujanja rezultati mjerenja su zrcaljani kako bi se dobio grafički prikaz profila brzine na cijelom presjeku zračnog tunela.

Tablica 1. Brzine strujanja zraka (m/s) u tunelu spojenim s ventilatorom

Frekvencija (Hz)	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
15 Hz	4,86	5,62	5,27	4,80	4,13	2,90	2,00
20 Hz	6,50	7,50	6,70	6,30	5,10	3,20	2,40
25 Hz	7,80	9,20	8,40	7,50	6,40	4,10	3,10
30 Hz	9,30	10,70	9,90	9,10	7,40	4,80	3,50
35 Hz	11,20	12,80	11,10	10,30	8,10	5,30	4,40

Dijagram 1. pokazuje grafički prikaz izmjerenih vrijednosti brzina strujanja. Na dijagramu se može uočiti specifičan minimum vrijednosti brzine strujanja u simetrali zračnog tunela, koji je rezultat rada aksijalnog ventilatora (minimalna brzina u osi osovine ventilatora). Povećanjem frekvencije motora ventilatora povećava se protok zraka kroz tunel a time i brzina strujanja zraka. Time više dolazi do izražaja i specifični profil brzine strujanja aksijalnog ventilatora, s najvišim vrijednostima brzine u području polovice visine lopatica ventilatora. Pretpostavka je da su ili uslijed centrifugalne sile specifične maksimalne vrijednosti brzine još više pomaknute prema samom zidu zračnog tunela, ili možda uslijed samog oblika lopatica ventilatora. Specifična maksimalna izmjerena vrijednost brzine strujanja zraka nalazi se na 50 mm od samog zida zračnog tunela.



*Dijagram 1. Izgled profila brzina strujanja zraka u ovisnosti o frekvenciji motora ventilatora - tunel spojen s ventilatorom*

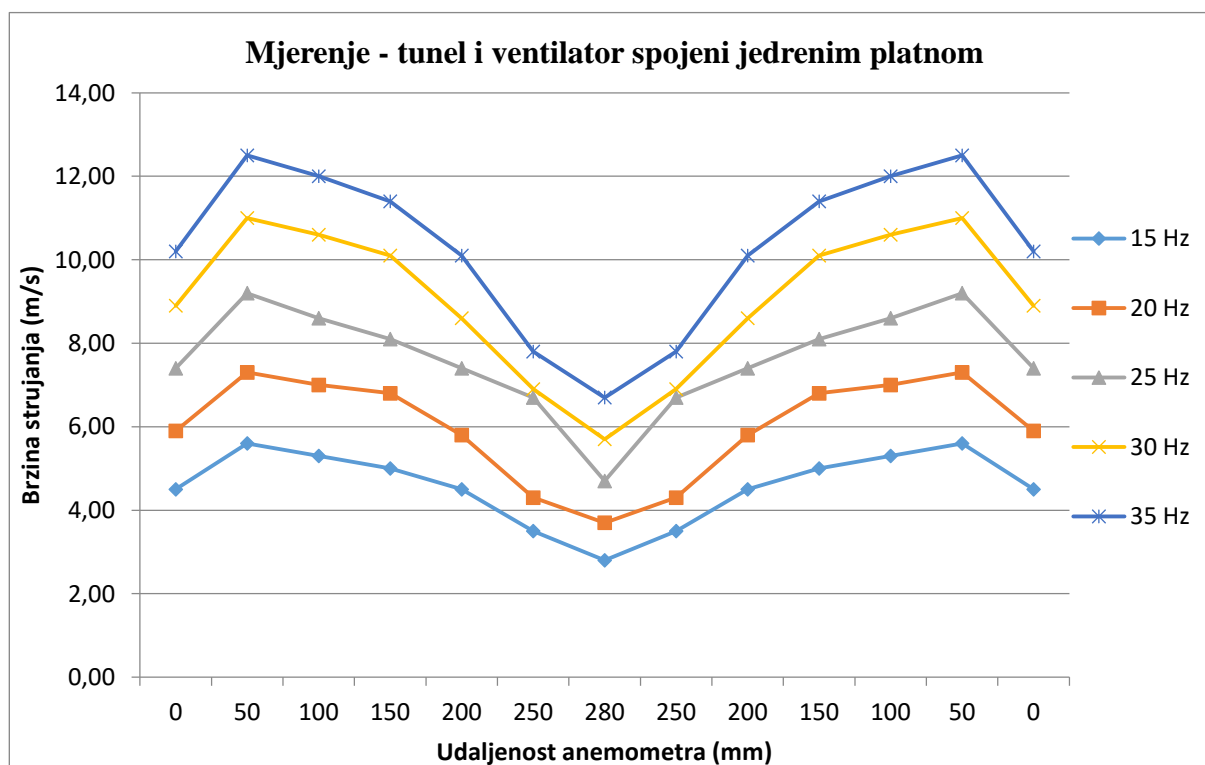
U tablici 2. prikazani su rezultati drugog mjerenja koje je obavljeno s istim rasponom frekvencija i istim položajima anemometra kao u prvom mjerenju. Razlika je u tome što je pri drugom mjerenju između zračnog tunela i ventilatora postavljeno jedreno platno dužine 1 m, a kako bi se analizirao utjecaj veće dužine tunela na oblik profila brzine strujanja zraka.



Tablica 2. Brzine strujanja (m/s) u tunelu s ventilatorom spojenim jedrenim platnom

Frekvencija (Hz)	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
15 Hz	4,50	5,60	5,30	5,00	4,50	3,50	2,80
20 Hz	5,90	7,30	7,00	6,80	5,80	4,30	3,70
25 Hz	7,40	9,20	8,60	8,10	7,40	6,70	4,70
30 Hz	8,90	11,00	10,60	10,10	8,60	6,90	5,70
35 Hz	10,20	12,50	12,00	11,40	10,10	7,80	6,70

U tablici 2. kao i dijagramu 2. evidentno je da su brzine strujanja sveukupno nešto viših vrijednosti u odnosu kada je mjerenje izvršeno bez uporabe jedrenog platna. Trend razvoja specifičnog oblika profila strujanja zraka s povećanjem frekvencije motora, odnosno povećanjem protoka, ostao je sličan kao i u prvom mjerenju bez jedrenog platna. I dalje je evidentan specifičan maksimum vrijednosti brzine strujanja pri 50 mm udaljenosti od zida zračnog tunela. U nastavku će biti prikazana usporedba dvaju profila brzina izmjerenih pri istim frekvencijama motora (isti protok) ali bez i sa upotrebom jedrenog platna, čime će biti demonstriran utjecaj veće duljine tunela na oblik profila brzine strujanja zraka.

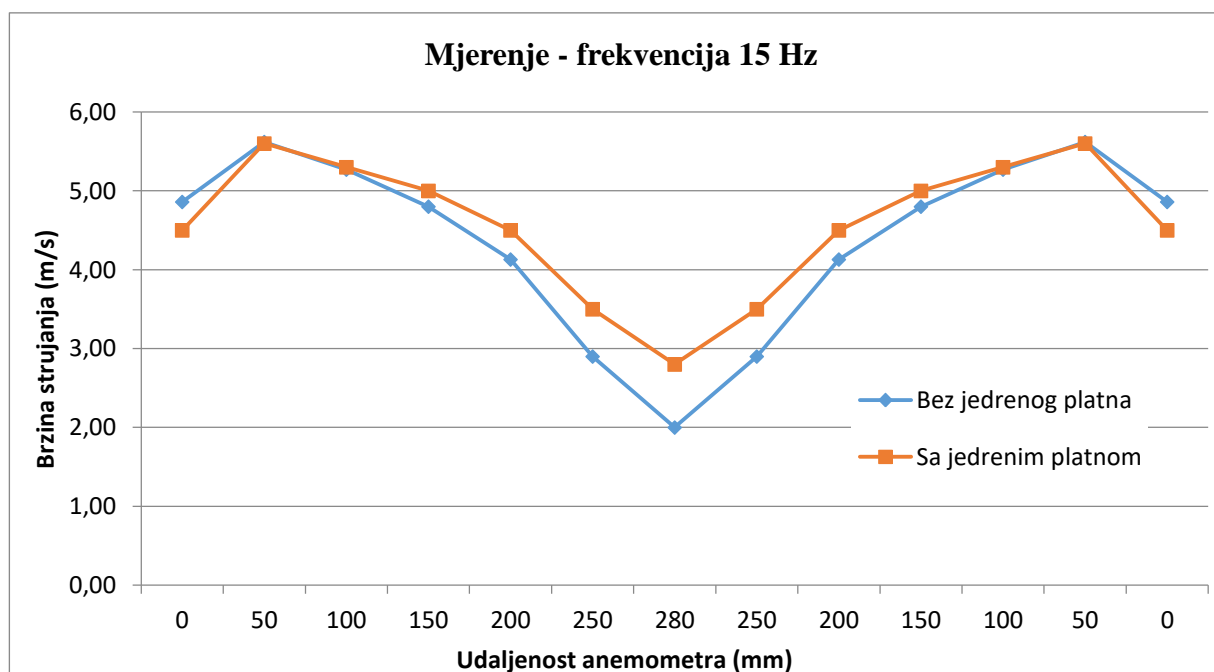


Dijagram 2. Izgled profila brzina strujanja zraka u ovisnosti o frekvenciji motora ventilatora - tunel i ventilator spojeni jedrenim platnom

Tablice 3, 4, i 5 pokazuju izravnu usporedbu izmjerenih vrijednosti brzina strujanja zraka strujanja bez jedrenog platna i s jedrenim platnim pri tri različite frekvencije. Rezultati mjerenja su prikazani grafički u dijagramima 3, 4, 5.

Tablica 3. Usporedba brzine strujanja (m/s) pri frekvenciji 15 Hz

Frekvencija 15 Hz	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
Bez jedrenog platna	4,86	5,62	5,27	4,80	4,13	2,90	2,00
S jedrenim platnom	4,50	5,60	5,30	5,00	4,50	3,50	2,80



Dijagram 3. Usporedba pri frekvenciji 15 Hz

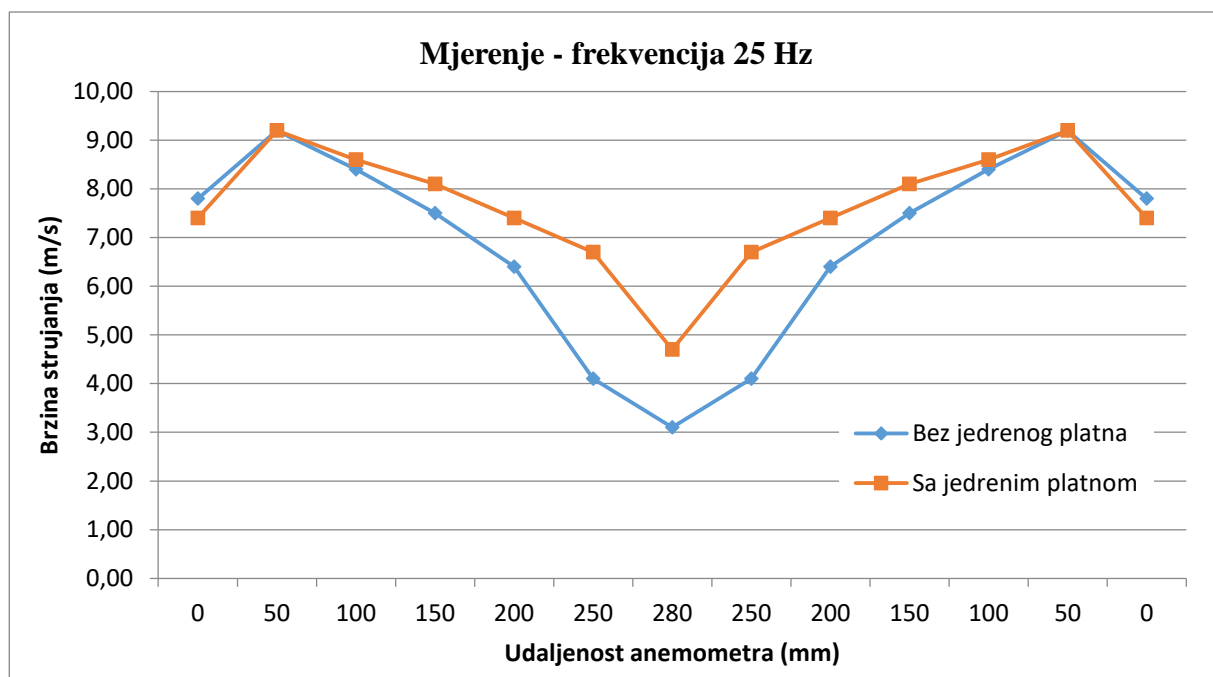
Tablica 3 prikazuje izmjerene vrijednosti brzine pri radu motora ventilatora na frekvenciji od 15 Hz, dok je grafički prikaz dan Dijagramom 3. Uslijed povećanja dužine zračnog tunela za dužinu jedrenog platna (1 m), izmjerene su jednake vrijednosti brzine strujanja zraka u specifičnom maksimumu profila, pri udaljenosti od 50 mm od stjenke tunela. Uz samu stjenku tunela evidentno je smanjenje brzine zraka što je rezultat utjecaja veće dužine zida tunela pri uporabi jedrenog platna. Ostale vrijednosti brzina pokazuju nešto veće vrijednost pri uporabi

jedrenog platna, pogotovo u samoj simetrali zračnog tunela. Povećanjem dužine zračnog tunela sam profil brzine pokazuje trend razvoja oblika strujanja u tunelu. Proizlazi da bi se dodatnim produženjem zračnog tunela mogao postići željeni profil brzine strujanja zraka.

Tablica 4 prikazuje izmjerene vrijednosti brzine pri radu motora ventilatora na frekvenciji od 25 Hz, dok je grafički prikaz dan dijagramom 4. Pri povećanju frekvencije motora, odnosno protoka zraka, mogu se donijeti isti zaključci kao i pri frekvenciji od 15 Hz, s time što pri nešto većem protoku još više dolazi do izražaja utjecaj povećanja duljine zračnog tunela na oblik profila brzine strujanja zraka. Porast brzine strujanja zraka još je izraženiji, a pogotovu u simetrali zračnog tunela. Pri zidu zračnog tunela nije došlo do značajnijih promjena uporabom jedrenog platna.

Tablica 4. Usporedba brzina strujanja (m/s) pri frekvenciji 25 Hz

Frekvencija 25 Hz	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
Bez jedrenog platna	7,80	9,20	8,40	7,50	6,40	4,10	3,10
S jedrenim platnom	7,40	9,20	8,60	8,10	7,40	6,70	4,70

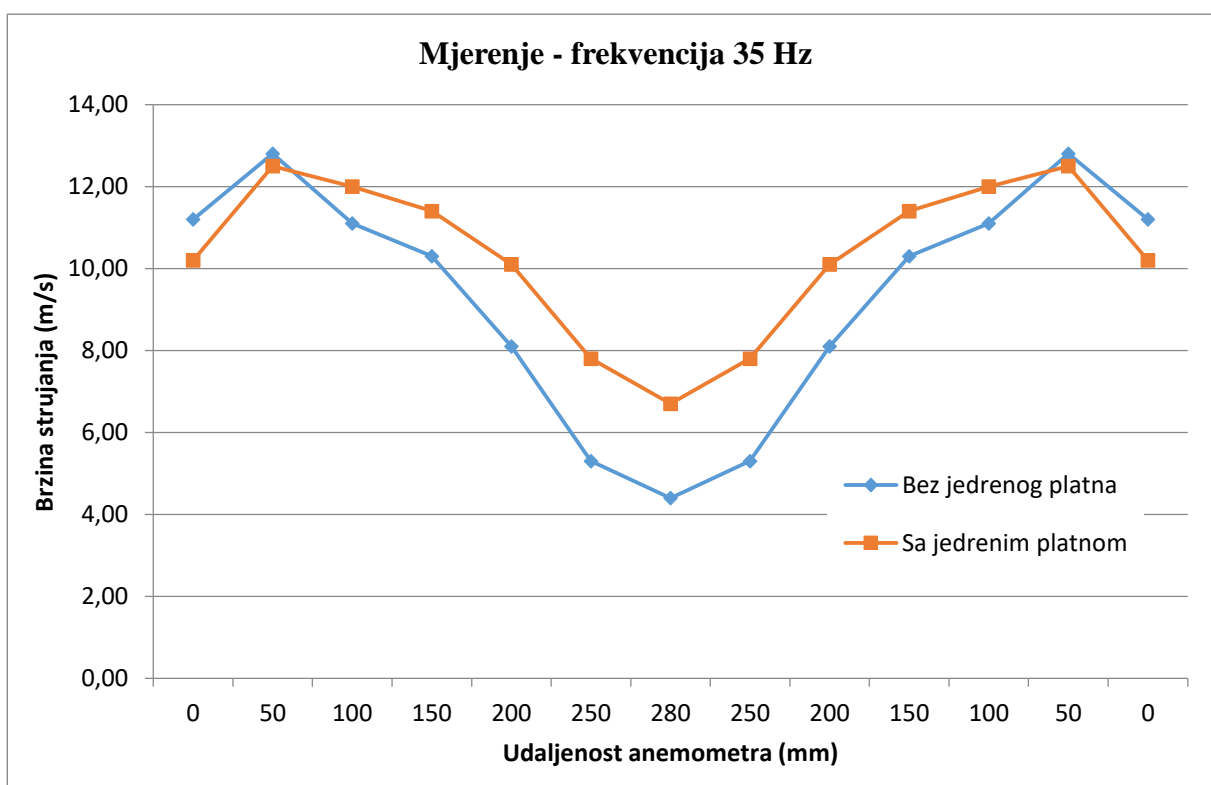


Dijagram 4. Usporedba pri frekvenciji 25 Hz

Tablica 5 prikazuje izmjerene vrijednosti brzine pri radu motora ventilatora na frekvenciji od 35 Hz, dok je grafički prikaz dan dijagramom 5. Pri dodatnom povećanju frekvencije motora, odnosno protoka zraka, dolazi i do malog smanjenja izmjerene vrijednosti brzine u specifičnom maksimumu, dok se vrijednost brzine uz sami zid tunela još značajnije smanjuje i pokazuje trend promjene profila ka potpuno razvijenom obliku strujanja (vidi Sliku 5). Povećanjem duljine zračnog tunela sam profil brzine se brže razvija uz smanjenje razlike između specifičnog maksimuma i vrijednosti u simetrali tunela.

Tablica 5. Usporedba brzina strujanja (m/s) pri frekvenciji 35 Hz

Frekvencija 35 Hz	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
Bez jedrenog platna	11,20	12,80	11,10	10,30	8,10	5,30	4,40
S jedrenim platnom	10,20	12,50	12,00	11,40	10,10	7,80	6,70

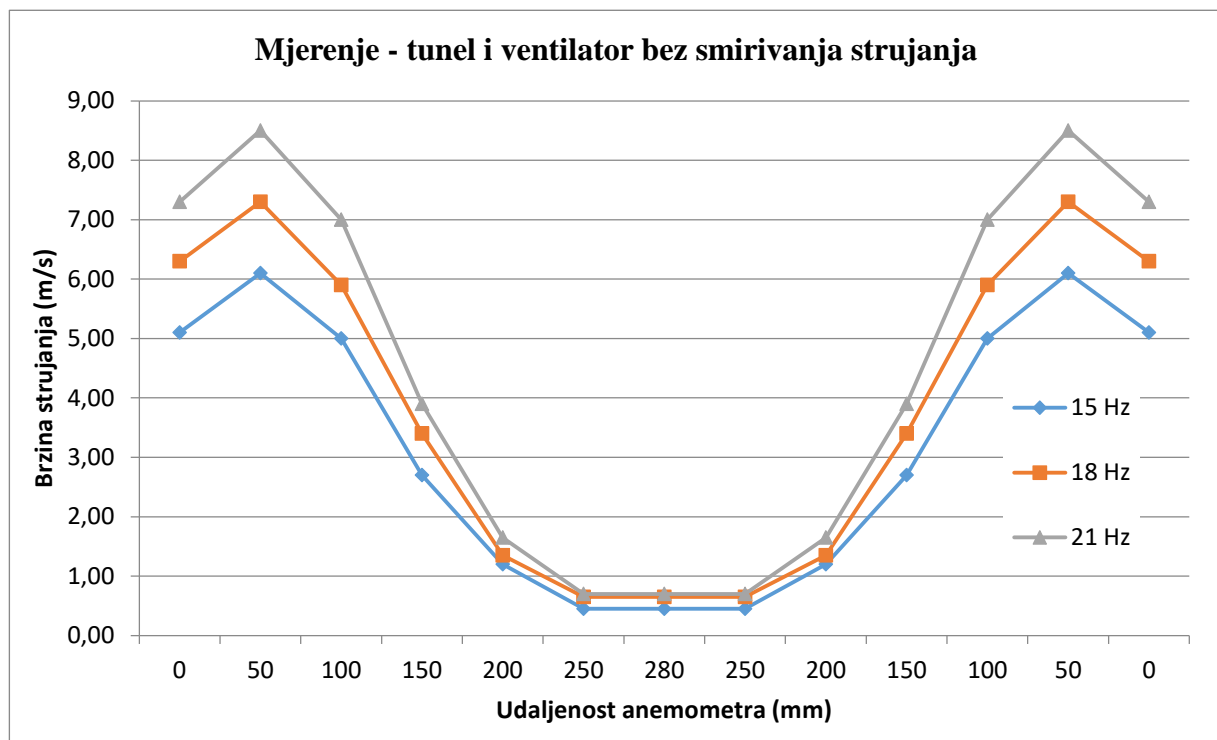


Dijagram 5. Usporedba pri frekvenciji 35 Hz

U tablici 6 prikazane su vrijednosti izmjerenih brzina strujanja zraka u zračnom tunelu za tri različite frekvencije (15, 18 i 21 Hz) i karakterističnim položajima mjerenja anemometra, kao i u do sadašnjim mjerenjima, ali bez uporabe elemenata za smirivanje strujanja i bez uporabe jedrenog platna. Bez uporabe elemenata za smirivanje strujanja profil brzine strujanja zraka u tunelu ima značajno nepovoljniji oblik s izraženim minimalnim vrijednostima brzine zraka u simetrali tunela. Može se zaključiti da je sva količina zraka koji struji kroz tunel koncentrirana uz sam zid tunela, te se povećanjem protoka zraka (povećanjem frekvencije motora) situacija još više pogoršava. Sve to skupa rezultat je snažnog vrtloženja zraka uslijed rada aksijalnog ventilatora.

Tablica 6. Brzine strujanja (m/s) u tunelu s ventilatorom bez smirivanja strujanja

Frekvencija (Hz)	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
15 Hz	5,10	6,10	5,00	2,70	1,20	0,45	0,45
18 Hz	6,30	7,30	5,90	3,40	1,35	0,65	0,65
21 Hz	7,30	8,50	7,00	3,90	1,65	0,70	0,70



Dijagram 6. Tunel i ventilator bez elemenata za smirivanje strujanja

Konačno, kako bi se izvršila usporedba gore navedenih mjerenja, u tablici 7 prikazani su podaci o izmjerenim vrijednostima brzine strujanja zraka kroz zračni tunel pri frekvenciji motora ventilatora od 15 Hz, i to za slijedeće uvjete:

- pri radu zračnog tunela bez uporabe elemenata za smirivanje strujanja i bez uporabe jedrenog platna
- pri radu zračnog tunela s uporabom elemenata za smirivanje strujanja i bez uporabe jedrenog platna
- pri radu zračnog tunela s uporabom elemenata za smirivanje strujanja i s uporabom jedrenog platna

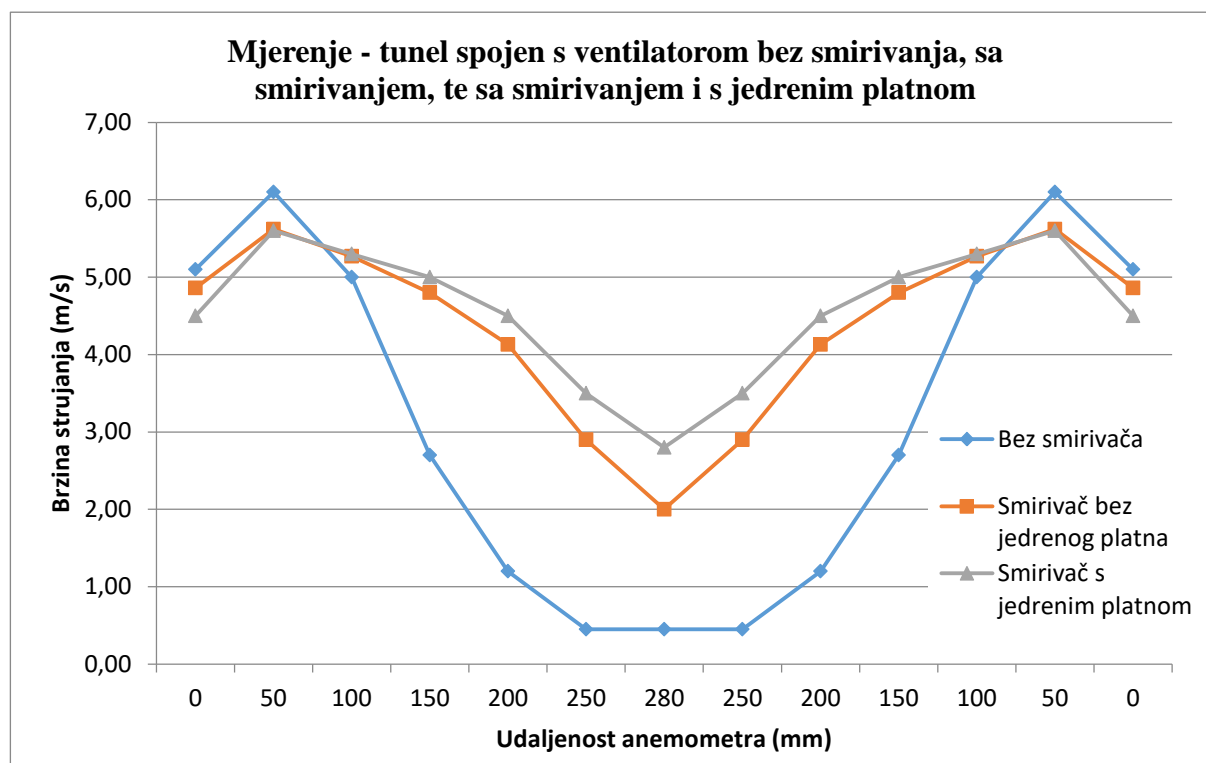
S obzirom da je za sva tri slučaja bila odabrana ista frekvencija motora od 15 Hz, dijagram 7 prikazuje promjenu oblika profila brzine strujanja zraka za gore definirana tri različita radna uvjeta.

Iz dijagrama proizlazi da su primijenjeni elementi za smirivanje strujanja značajno i pozitivno utjecali na profil brzine strujanja, smanjujući utjecaj snažnog vrtloženja zraka aksijalnog ventilatora.

Uporabom jedrenog platna zajedno s elementima za smirivanje strujanja, odnosno povećanjem dužine zračnog tunela, profil brzine strujanja zraka dobiva još povoljniji izgled ka razvijenijem profilu (vidi Sliku 5). Povećava se vrijednost brzine strujanja u simetrali tunela, specifični maksimum na pola visine lopatica se pomalo smanjuje dok se vrijednost brzine strujanja zraka uz sami zid tunela smanjuje uslijed utjecaja same stjenke.

*Tablica 7. Brzine protoka (m/s) u tunelu spojenim s ventilatorom bez smirivanja protoka, sa smirivanjem protoka, te sa smirivanjem protoka i jedrenim platnom*

Frekvencija 15 Hz	Udaljenost anemometra (mm)						
	0	50	100	150	200	250	280
Bez smirivanja	5,10	6,10	5,00	2,70	1,20	0,45	0,45
Smirivanje, bez jedrenog platna	4,86	5,62	5,27	4,80	4,13	2,90	2,00
Smirivanje, s jedrenim platnom	4,50	5,60	5,30	5,00	4,50	3,50	2,80



*Dijagram 7. Tunel spojen s ventilatorom bez smirivanja, sa smirivanjem, te sa smirivanjem i s jedrenim platnom*

Iz izgleda profila brzine strujanja zraka u zračnom tunelu pri povećanju njegove dužine, može se zaključiti da bi se dodatnim produženjem zračnog tunela mogao postići potpuno razvijeni oblik profila brzine u zračnom tunelu. Predlaže se povećanje dužine jedrenog platna na 2 ili 3 m te ponovno mjerenje vrijednost brzina strujanja zraka u tunelu kao što je prikazano u okviru ovog završnog rada.

Utjecaj elemenata za smirivanje strujanja može se dodatno povećati zamjenom postojeće „saćaste“ strukture s novom koja će imati veću dužinu „saća“ a po mogućnosti i manji nazivni promjer.

Konačno, problem se može pokušati riješiti i rekonstrukcijom zračnog tunela, tako da aksijalni ventilator usisava zrak kroz tunel umjesto da ga tlači kao što je primijenjeno u predmetnom zračnom tunelu. Elementi za smirivanje strujanja zraka mogu se u tom slučaju postaviti na slobodnu, usisnu stranu zračnog tunela.

## 5. Zaključak

Uvidom u prikazane rezultate mjerenja vrijednosti brzina strujanja zraka i izgleda profila brzine strujanja zraka u zračnom tunelu laboratorija „Lantherma“ mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Svi prikazani profili brzina strujanja zraka u zračnom tunelu imaju karakterističan oblik profila koji nastaje pri uporabi aksijalnog ventilatora.
- Mjerenjem je dokazano da zračni tunel nema dovoljnu dužinu kako bi se strujanje zraka u tunelu razvilo u potpuni profil karakterističnog oblika parabole za turbulentno strujanje.
- Prilikom rada zračnog tunela bez primjene elemenata za smirivanje strujanja („saćasta“ struktura i limene ploče postavljene u radijalnom smjeru) profil brzine strujanja zraka u tunelu ima značajno nepovoljniji oblik s izraženim minimalnim vrijednostima brzine zraka u simetrali tunela. Također, sva količina zraka uslijed rada aksijalnog ventilatora koncentrirana je uz sam zid tunela, što ima za rezultat veoma izraženu maksimalnu vrijednost brzine u zoni blizu zida tunela.
- Primjena elemenata za smirivanje strujanja pozitivno utječe na oblik profila brzine strujanja zraka, smanjujući utjecaj snažnog vrtloženja zraka uslijed rada aksijalnog ventilatora. Vrijednosti brzina strujanja u središnjem dijelu tunela su viših vrijednosti, dok je specifična maksimalna vrijednost brzine u blizini zida tunela niže vrijednosti.
- Povećanjem dužine zračnog tunela (uporabom jedrenog platna) profil brzine strujanja zraka dobiva još povoljniji izgled razvijenijeg profila. Još više se povećavaju vrijednosti brzine strujanja u središnjem dijelu tunela, a specifični maksimum brzine u blizini zida tunela se dodatno smanjuje. Vrijednost brzine strujanja zraka uz sami zid tunela smanjuje se uslijed utjecaja same stjenke tunela.

S obzirom da u postojećem zračnom tunelu nije moguće postići potrebni oblik profila brzine strujanja zraka, kako bi se riješio navedeni problem predlaže se sljedeće:

- Povećati dužinu zračnog tunela uporabom dužeg jedrenog platna ili produženjem konstrukcije tunela.
- Zamijeniti postojeću „saćastu“ strukturu s novom koja će imati veću dužinu „saća“ a po mogućnosti i manji nazivni promjer.



- Ugradnja metalne mreže u zračni tunel. Mreže su se pokazale čak i bolje riješene od „saća“ za razbijanje vrtloženja. Ako se mreže ugrađuju u već postojeći tunel, postavljaju se u obodni prsten koji se vijcima pričvršćuje za stjenku tunela. Rješenje pri konstrukciji novog tunela je izrada mreža na posebnim okvirima koji se mogu jednostavno bočno umetati i vaditi. Pri tome je potrebno osigurati dobro brtvljenje na spojevima između okvira s mrežama i ostalih dijelova tunela.
- Ugradnja Venturijske cijevi unutar tunela kako bi se pomoću promjene tlakova umanjila vrtloženja turbulentnog strujanja, te dobio razvijeni profil brzine strujanja zraka.
- Rekonstrukcija zračnog tunela, tako da aksijalni ventilator usisava zrak kroz tunel umjesto da ga tlači, dok se elementi za smirivanje strujanja zraka mogu postaviti na slobodnu, usisnu stranu zračnog tunela.

## Literatura

1. Comptes Rendus Mécanique Volume 345, Issue 8, August 2017, Pages 581-594  
[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
2. Legg, R.C., Air-conditioning systems – designing commissioning and maintenance, Batsford, 1991.
3. Module 61: Continuous airflow measurement in ventilation and air conditioning systems  
<https://www.myodesie.com/portal>
4. Continuous airflow measurement in ventilation and air conditioning systems  
<https://www.cibsejournal.com/>
5. Fan Performance By: Mark Stevens AMCA International Deputy Executive Director—  
Technical Affairs  
<http://www.wanderlodgегurus.com/database/Theory/Fan%20Performance%20Static%20Pressure.pdf>
6. Aeronautical Wind Tunnel Specifications and Schematics  
<https://flight.engr.ucdavis.edu/facilities/aeronautical-wind-tunnel/>
7. Fans and accessories <https://www.systemair.com/hr/Croatia>
8. Design Guide VLT® HVAC Basic Drive FC 101
9. Air Velocity sensor Siemens QVM 62.1 <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=20115>
10. LOGO! Basic Modules  
<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/logo/logo-basic-modules.html#BasicModuleswithdisplay>