

STUDIUL DISTRIBUȚIEI COEFICIENȚILOR DE PRESIUNE PENTRU UN PROFIL AERODINAMIC

11.1 Considerații teoretice

Necesitatea efectuării de încercări pe modele privind fenomenele complexe din ingineria vântului, au impus, încă de la sfârșitul secolului XIX-lea, conceperea și realizarea unor instalații experimentale specifice numite tunele aerodinamice sau suflerii.

Primul tunel aerodinamic a fost conceput și realizat de Francis Herbert Wenham în perioada 1867-1871. Au urmat tunelul cu injecție de abur utilizat de către Phillips în perioada 1884-1885 și tunelul aerodinamic realizat de Irmingen în anul 1893 în Danemarca. De asemenea, unul dintre primele tunele aerodinamice este tunelul utilizat de Gustave Eiffel pentru încercarea în vânt a construcțiilor proiectate de marele inginer, tunel care-i poarta numele.

Tunelul aerodinamic care servește la efectuarea prezentei lucrări de laborator, produs de firma Sangari și aflat în dotarea Laboratorului de Mecanica Fluidelor UTCN, este prezentat în figura 11.1 și figura 11.2.

În conformitate cu principalele criterii de clasificare ale tunelelor aerodinamice, acest tunel este considerat a fi:

- după arhitectură - tunel aerodinamic în circuit deschis.
- după tipul camerei de experiențe - tunel aerodinamic cu cameră de experiențe închisă sau se mai poate numi și tunel aerodinamic cu venă ghidată (limitată de pereți solizi).
- după valoarea vitezei maxime de referință (viteza din camera de experiențe) - tunel aerodinamic de viteză subsonică mică.
- după valoarea presiunii din camera de experiențe acesta este un tunel aerodinamic cu cameră de experiență în depresiune.



Figura 11.1 Tunel aerodinamic



Figura 11.2 Camera de experiențe

Profile aerodinamice

Un profil aerodinamic se obține prin efectuarea unei secțiuni drepte transversale printr-o aripă de avion, o pală a elicei de elicopter sau a unei palete de navă, a unei turbine eoliene sau a rotorului unei mașini hidraulice.etc. Forma profilului aerodinamic este alungită pe direcția de curgere a fluidului. Un profil aerodinamic este conceput astfel încât să se asigure un raport optim între portanța și rezistența generate de interacțiunea acestuia cu un fluid.

Elementele caracteristice unui profil aerodinamic sunt mărimi care definesc forma, modul de generare și unele aspecte funcționale.

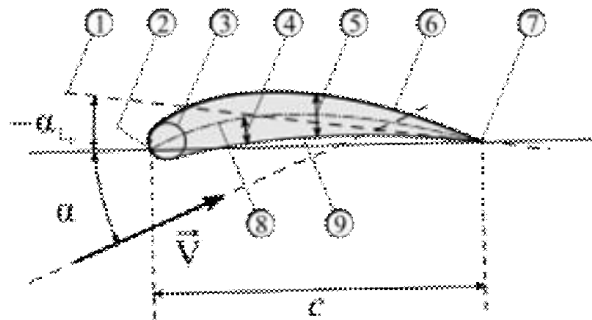


Figura 11.3 Elementele profilului aerodinamic

Conform figurii 11.3 elementele profilului aerodinamic sunt:

- **Bordul de fugă (7)**. Este bordul din spatele profilului.
- **Bordul de atac (2)**. Este bordul din fața profilului, definit drept punctul de tangență la profil al cercului cu centrul în bordul de fugă.
- **Coarda**. Este linia de referință aleasă arbitrar pentru definirea profilului și care se determină fie ca bitangență la intradosul profilului, fie ca raza cercului tangent la bordul de atac și cu centrul în bordul de fugă.
- **Axa profilului** este dreapta care unește bordul de atac cu bordul de fugă.
- **Extradosul (6)**. Este fața de deasupra a profilului unei aripi de avion. Fără a se face referire la poziție, prin extrados se înțelege partea mai bombată a profilului.
- **Intradosul (9)**. Este fața opusă extradosului. În caz că forma profilului este simetrică față de axă, teoretic nu se poate defini care față a profilului este intradosul și care extradosul. La aripile de avion prin intrados se înțelege întotdeauna partea de dedesubt a profilului aripii.
- **Profunzimea**. Este lungimea coardei, măsurată între două perpendiculare pe coardă, care încadrează profilul.
- **Linia de curbură medie (scheletul)**. Este linia trasată la mijlocul distanțelor dintre extrados și intrados.

- **Săgeata profilului (4).** Este distanța maximă dintre linia de curbură medie și coarda profilului (ordonata maximă a scheletului).
- **Grosimea profilului (5).** Este lungimea părții din perpendiculara pe coardă (sau axă) delimitată de intersecțiile cu extradusul și intradosul. Grosimea relativă este raportul dintre grosime și profunzime, exprimat în procente.
- **Cercul osculator din bordul de atac (3).** Este cercul tangent la bordul de atac, cu raza determinată de curbura profilului în bordul de atac.
- **Axa de portanță nulă (1).** Această axă indică direcția unui curent de fluid pentru care rezultanta forțelor de presiune asupra profilului în direcție perpendiculară pe această axă este nulă. La o aripă de avion, în poziția respectivă aripa nu oferă o forță care să susțină avionul în zbor.
- **Unghiul de incidență (unghiul de atac) (α).** Este unghiul la care este poziționat profilul față de direcția generală de curgere a fluidului.

Noțiuni generale privind curgerea peste profilele aerodinamice

Asupra unui corp supus acțiunii unui curent de aer se exercită o forță numită forță aerodinamică.

În figura 11.4 sunt prezentate componentele 2D ale forței aerodinamice R care se exercită asupra unui profil aerodinamic a cărei coardă face unghiul de incidență α cu direcția vitezei de curgere v_∞ (viteza curentului neperturbat în amonte de profil). Aceste componente au rezultat în urma dublei descompunerii a forței aerodinamice R după cum urmează:

$$F_p = F_z \cdot \cos \alpha - F_x \cdot \sin \alpha , \quad (11.1)$$

$$F_r = F_z \cdot \sin \alpha + F_x \cdot \cos \alpha , \quad (11.2)$$

unde:

F_p - forța portantă;

F_r - forța de rezistență la înaintare;

F_z - componenta lui R pe o direcție perpendiculară pe coarda c ;

F_x - componenta lui R pe o direcție paralelă cu coarda c ;

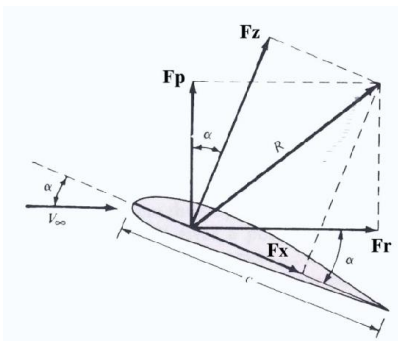


Figura 11.4 Forța aerodinamică rezultantă și componentele acesteia [1]

Forța rezultantă R care acționează asupra profilului depinde de parametrii acestuia (geometrie, lungime și gradul de prelucrare a suprafeței) și de calitățile curentului (numărul Reynolds și gradul de turbulență). Ea variază cu unghiul de incidență.

Evaluarea directă a componentelor F_p și, separat, F_r , necesită cunoștințe detaliate despre distribuția de presiuni și eforturi tangențiale de frecare pe întreaga suprafață a profilului studiat. Aceste distribuții se obțin extrem de dificil pe cale experimentală, pentru corpuri complexe din punct de vedere geometric.

Componentele F_p și F_r ale forței aerodinamice globale se pot evalua experimental în mod direct, cu ajutorul unei balanțe aerodinamice.

Caracteristicile aerodinamice ale profilelor sunt reprezentate de coeficienții adimensionali de portanță c_L , rezistență la înaintare c_R și moment c_M , definiți astfel (considerând o lungimea de referință a profilului $b = 1\text{ m}$):

$$c_L = \frac{F_p}{\frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2 c b} \quad (11.3)$$

$$c_R = \frac{F_r}{\frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2 c b} \quad (11.4)$$

$$c_M = \frac{M_0}{\frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2 c^2 b} \quad (11.5)$$

Acești coeficienți sunt caracteristici ale profilului și reprezintă criterii de similitudine ale mișcării în jurul profilului, având valori egale pentru toate profilele geometric asemenea.

Raportul dintre coeficientul de portanță și cel de rezistență la înaintare definește finețea profilului:

$$f = \frac{c_L}{c_R} \quad (11.6)$$

Conturul unui profil, este descris prin punctele $P(x, y)$ care definesc extradosul și intradosul, uzual în sistemul în care axa Ox este orientată pe direcția corzii, dinspre bordul de atac spre bordul de fugă, iar cea de a doua axă orientată înspre extrados. În cazul tridimensional al unei aripi, lungimea acesteia (distanța dintre capete) se numește anvergură și se notează cu b .

Un alt coeficient adimensional utilizat în studiile de aerodinamică este coeficientul de presiune, c_p , definit de relația:

$$c_p = \frac{P_{loc} - P_\infty}{P_{din \infty}} \quad (11.7)$$

unde:

$P_{loc S}$ - presiunea statică locală măsurată într-un punct pe suprafața S ce interacționează cu curentul de aer;

P_{∞} - presiunea statică a curentului de aer neperturbat;

$P_{din \infty}$ - presiunea dinamică a curentului de aer neperturbat.

Pentru a caracteriza modul în care un solid interacționează cu aerul atmosferic, se construiesc diagrame ale variației coeficientului de presiune pe suprafețele acestuia, figura 5. C_{pe} reprezintă variația coeficientului de presiune pe extrados, iar C_{pi} reprezintă variația coeficientului de presiune pe intrados. Se poate remarca faptul că valorile negative ale coeficienților de presiune înregistrați pe extrados sunt reprezentate în cadranul I.

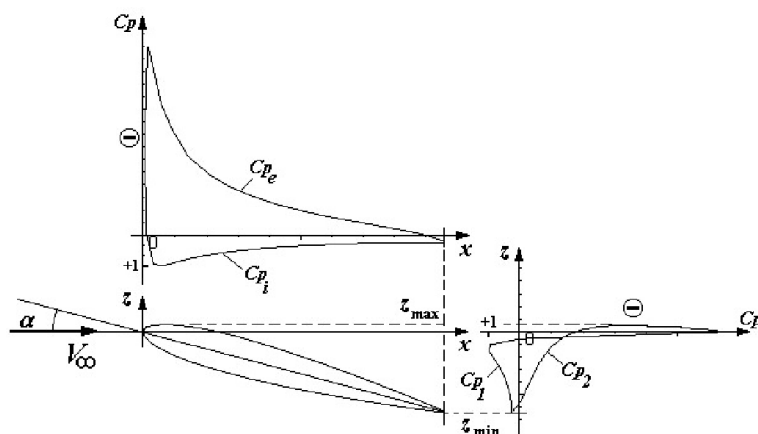


Figura 11.5 Distribuția coeficientului de presiune pe conturul unui profil aerodinamic [14]

Din perspectiva curentului de aer, forța aerodinamică globală se determină aplicând prima teoremă a impulsului (Euler) masei de aer cuprinsă într-un volum de control de mari dimensiuni din jurul solidului. În această direcție unul din rezultatele semnificative ale cercetărilor din domeniu a fost determinarea rezistenței la înaintare ca o consecință a trenei de vârtejuri care se formează în spatele corpului, ce își au originea în zonele de desprindere a stratului limită.

Fenomenul de desprindere a stratului limită este pus în evidență în figura 6 în care este prezentat spectrul liniilor de curent trasat pe baza rezultatelor experimentale obținute cu un profil aerodinamic NACA 4421, la diferite unghiuri de incidență α . Viteza curentului de aer neperturbat v_{∞} a fost în toate experimentele 8 m/s iar $Re = 2.1 \times 10^5$. În figura 11.6 coeficienții c_l reprezintă coeficienții de portanță măsurați experimental, lungimea săgeților reprezentând în fiecare caz un indicator al intensității forței portante.

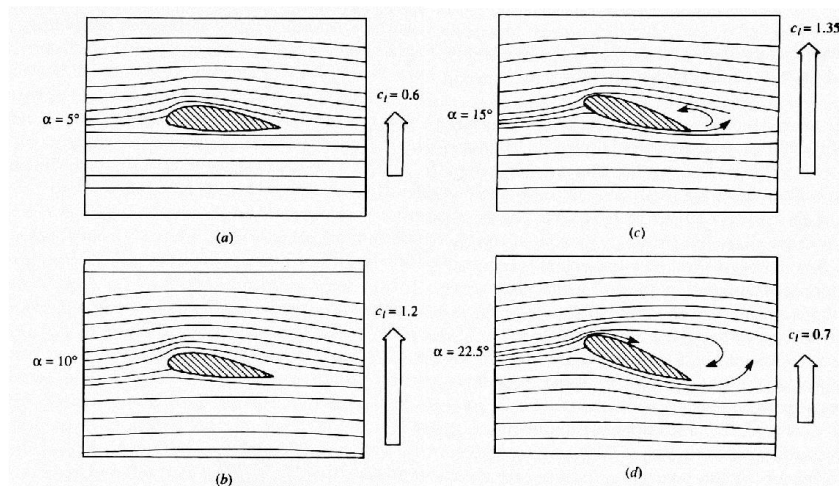


Figura 11.6 Desprinderea stratului limită la un profil NACA4421. [1]

Pentru un profil dat (funcționând într-o aripă de lungime infinită) portanța crește cu incidența până la o valoare maximă, corespunzând unor unghiuri de incidență de 10° până 15° , funcție de profil. La incidențe mai mari se produc desprinderi ale curentului de pe profil, care duc la o scădere a portanței și o creștere a rezistenței la înaintare.

Astfel, componentele forței aerodinamice globale se pot evalua, experimental, în mod indirect, prin măsurarea diferențelor de presiune care apar în două plane simetrice față de sistemul de referință raportat la direcția curentului de aer, ca de exemplu prin măsurarea diferenței de presiune dintre două plane perpendiculare pe direcția de curgere, din fața și din spatele structurii testate, pentru determinarea forței de rezistență la înaintare a acesteia.

Experimentele propuse, urmăresc doar determinarea experimentală a coeficienților de presiune locali și reprezentarea grafică a distribuției coeficienților de presiune pe conturul profilului aerodinamic analizat.

Prin integrare se pot obține, ulterior, coeficienții de presiune pe extradados, respectiv pe intrados, care nu fac obiectul lucrărilor propuse. Cu acești coeficienți se pot obține coeficienții forțelor F_x și F_z . Având în vedere că între coeficienții de portanță și de rezistență la înaintare și coeficienții forțelor F_x și F_z există aceleași relații ca și cele dintre forțe (rel. 1), se pot determina în final și coeficienții C_L și C_R , vezi [10].

11.2 Descrierea standului experimental

Standul tunel aerodinamic, figura 11.7, este compus din următoarele tronsoane:

- Tronson de intrare care la rândul lui este alcătuit din 3 componente (Confuzor/Colector aspirație, Fagure de uniformizare, Confuzor profilat-rectangular);
- Tronson de măsurare/testare 5, figura 11.7 (bloc paralelipipedic transparent, figura 8). În secțiunea mediană a acestui tronson este introdus profilul care urmează a fi testat și care

poate fi rotit la diferite unghiuri față de direcția curentului de aer. Tunelul este prevăzut cu un al doilea tronson de testare curb (cot) cu secțiunea transversală de 250x250mm, în care se poate studia curgerea peste o rețeaua de profile de tip NACA 8410, în venă experimentală la 90°.

- Tronson de ieșire, figura 7, compus din: difuzor în două trepte 6 - care realizează trecerea de la secțiune rectangulară la secțiune circulară și eliminarea prerotației în amonte de ventilatorul 7 cu motorul 8 și grilele de protecție 9, 10.

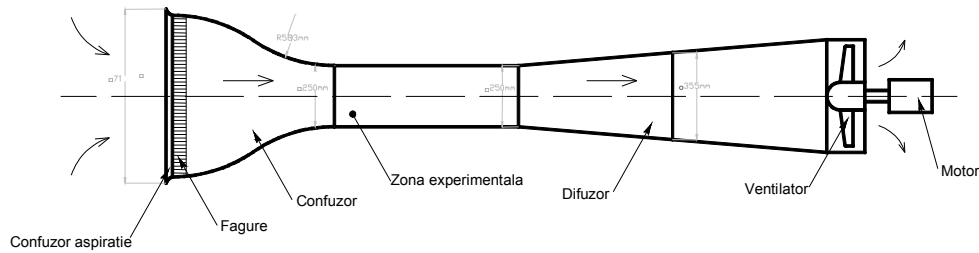


Figura 11.7 Tunel aerodinamic - schemă constructivă și funcțională de principiu

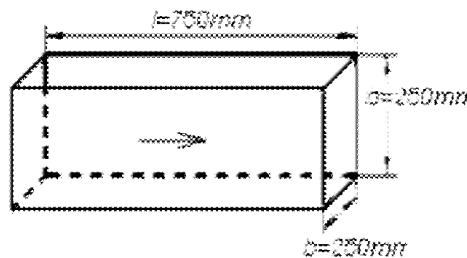


Figura 11.8 Tronsonul de testare

În dotarea standului există 2 tipuri de profile aerodinamice:

- NACA 8410 - prevăzut cu 8 prize de presiune statica, dintre care 4 situate pe intrados și 4 situate pe extrados;
- NACA 9410 - prevăzut cu 8 prize de presiune statica, 4 amplasate pe intrados și 4 pe extrados.

În figura 11.10 și in tabelul 11.1 este prezentată repartiția și poziția celor 8 prize de presiune în care se va măsura presiunea statică.

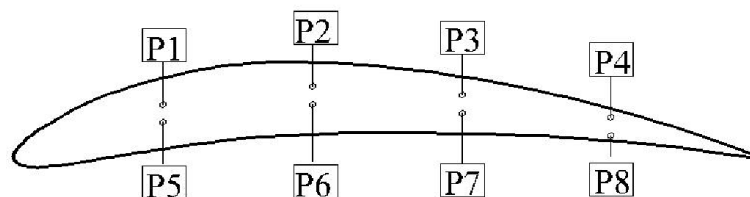


Figura 11.10 Repartiția prizelor de presiune pe profilul aerodinamic

Tabel 11.1 Coordonatele punctelor de măsură a presiunilor pe profil

Prize pres. ϕ 0,8	Extrados					Intrados		
	1	2	3	4	5	6	7	8
x_i mm]	17	33	50	67	17	33	50	67

11.3 Modul de operare al standului experimental

Standul poate fi accesat local cu ajutorul interfeței om - mașină sau de la distanță, conectarea realizându-se prin intermediul paginii web: www.piif.ro secțiunea "Laboratoare virtuale". În ambele cazuri punerea sub tensiune se face local de către un reprezentant al deținătorului standului experimental care va cupla dispozitivul pentru modul de "Acționare de la distanță", figura 11.11. Câtă vreme butonul este în poziția "Acționare locală" nu se pot trimite online comenzi către stand.

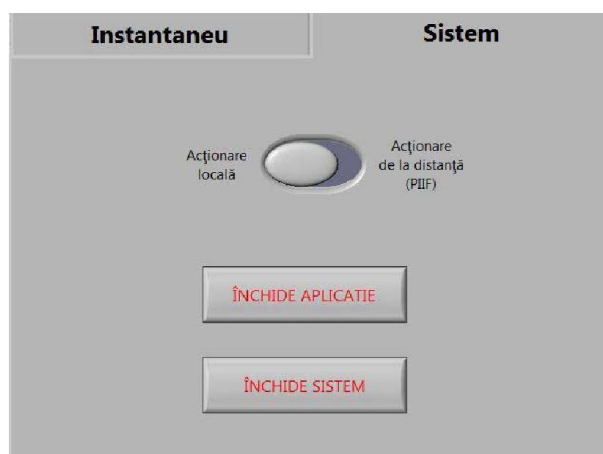


Figura 11.11 Interfața locală de conectare.

Pentru a porni aplicația, figura 11.12, fiecare utilizator va avea cont pe platforma Client2X, studenții vor folosi conturi "generice" de tip „student”. În principiu, un utilizator "Student" nu poate avea control asupra comenzilor standului decât cu acordul unui utilizator "Profesor".

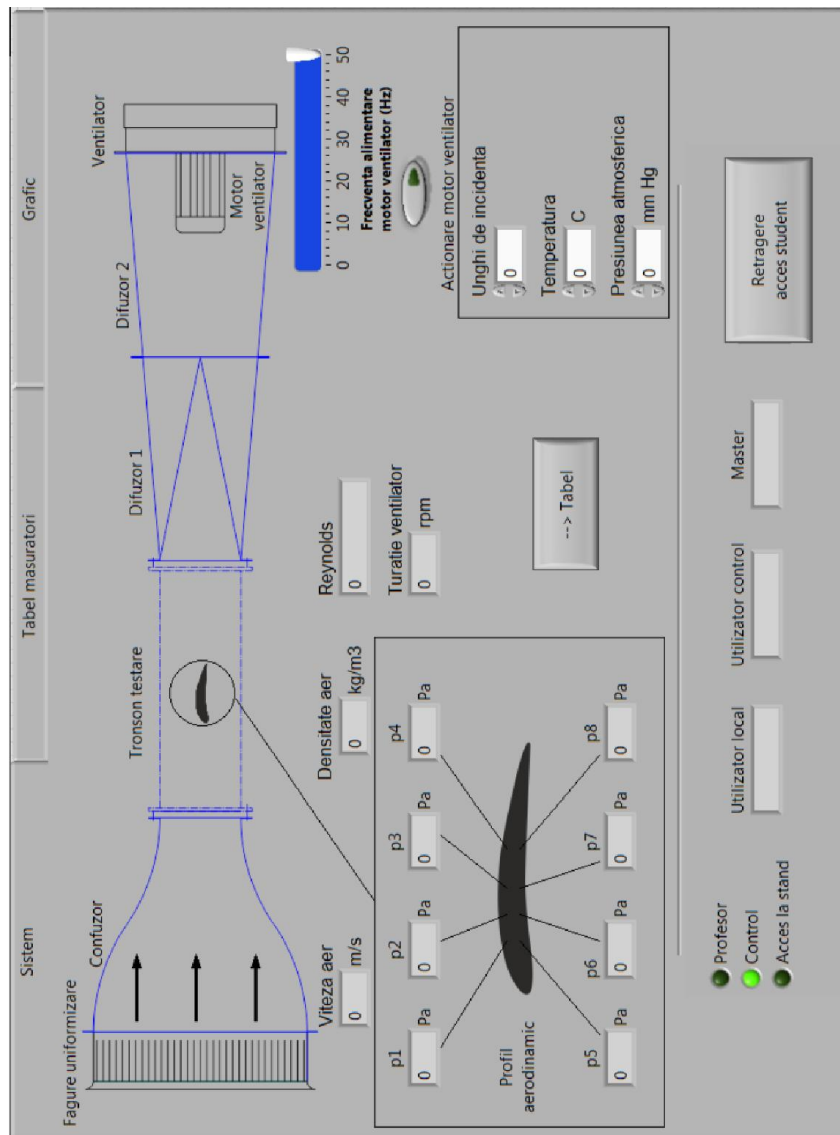


Figura 11.12 Interfața de lucru a tunelului

Indicatorii prezentați în figura 12, partea de jos, sunt:

- **Profesor** - utilizatorul conectat are drept de a acorda control unui utilizator "Student"
- **Control** - arată că instanța respectivă deține controlul asupra standului
- **Acces la stand** - indică posibilitatea comenzilor de la distanță, prin aprinderea semnalelor luminoase verzi
- **Utilizator local** – indică numele utilizatorului care rulează aplicația
- **Utilizator control** – indică numele utilizatorului care deține controlul standului
- **Master** - apare în cazul în care un utilizator "Profesor" transmite controlul către un utilizator "Student"

Calibrarea tunelului aerodinamic

Într-o etapă premergătoare efectuării lucrărilor experimentale de laborator trebuie realizată calibrarea tunelului aerodinamic. Această operație se realizează în absența modelului din zona de testare, se poate realiza doar de către un operator local.

Fazele operației de calibrare sunt:

1. Verificarea uniformității vitezei curentului de aer în zona de testare prin intermediul tubului Pitot-Prandl.

Tubul Pitot-Prandl, figura 11.13, permite măsurarea diferenței Δp dintre presiunea totală și presiunea statică p_{st} și, pe baza valorii măsurate, determinarea vitezei v_∞ a curentului neperturbat, conform relației:

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_\infty}} \quad (11.8)$$

În relația de mai sus:

$$\rho_\infty = \frac{p_{atm}}{R \cdot T_{atm}} = \frac{p_{atm}}{R(273,15 + \theta_{atm})} \quad (11.9)$$

și reprezintă densitatea aerului din tunel considerată aceeași cu a aerului din laborator, iar p_{atm} și θ_{atm} sunt presiunea și temperatura din laborator, măsurate în prealabil, iar constanta R are pentru aer valoarea $287,053 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$.

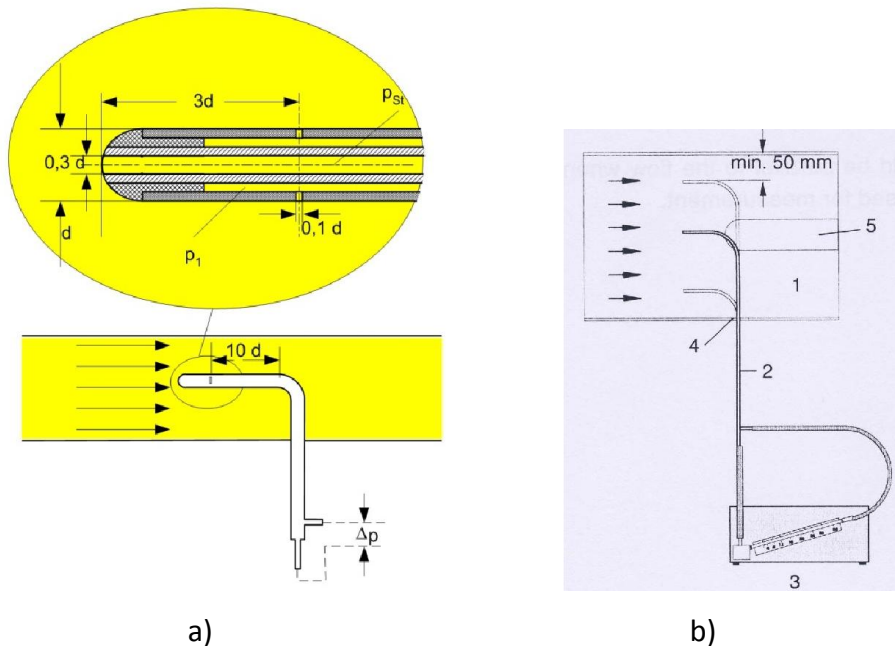


Figura 11.13 Tub Pitot-Prandl, schema de principiu [4]

Determinările de viteză s-au efectuat prin baleierea zonei de testare, pe două direcții perpendiculare, pentru a se verifica, uniformitatea vitezei curentului de aer, figura 11.13 b), în dreptul secțiunii în care va fi introdus profilul aerodinamic.

2. Verificarea uniformității vitezei curentului de aer în zona de testare cu ajutorul unui anemometru cu fir cald.

3. Trasarea diagramei de variație a vitezei curentului de aer funcție de frecvența motorului ventilatorului (turației), pe baza valorilor determinate prin cele două metode prezentate anterior, anexa 4.

Se remarcă variația liniară a vitezei cu frecvența, diferențele între valorile obținute prin cele două metode fiind foarte mici (anexa 4).

După efectuarea operației de calibrare prin fiecare din cele două metode și îndepărtarea tubului Pitot, respectiv a anemometrului, în zona de testare se va introduce profilul aerodinamic NACA 8410.

Efectuarea măsurătorilor

1. Se măsoară de către operatorul local valorile temperaturii și presiunii aerului din laborator, care se vor comunica utilizatorului. Valorile măsurate de către operatorul local se introduc în interfața de lucru, prezentată în figura 11.12.

Presiunea aerului din laborator va fi considerată presiune de referință în zona de testare, valorile densității și viscozității vor fi calculate de aplicație.

2. Se reglează de către operatorul local unghiul de incidență α , a cărui valoare va fi introdusă în interfață, (figura 11.12).

3. Se setează frecvența de alimentare a motorului ventilatorului, în funcție de care se calculează automat turația ventilatorului, valorile vitezei curentului neperturbat și cifra Reynolds calculată pentru o lungime a corzii de 83 mm.

4. Se pornește ventilatorul, de la butonul "Acționare motor ventilator".

5. Se urmăresc pe interfață valorile măsurate ale diferențelor de presiune Δp_i pentru fiecare din cele 8 prize de presiune.

6. Pentru memorarea mărimilor măsurate și a celor calculate de către aplicație se acționează butonul „-->Tabel” din interfața din figura 11.12. Se salvează fișierul de date, prin acționarea butonului "Salvează tabel" din fereastra tabel măsurători, pentru obținerea unui tabel de valori de forma prezentată în figura 11.14. Extensia fișierului va fi *.csv.

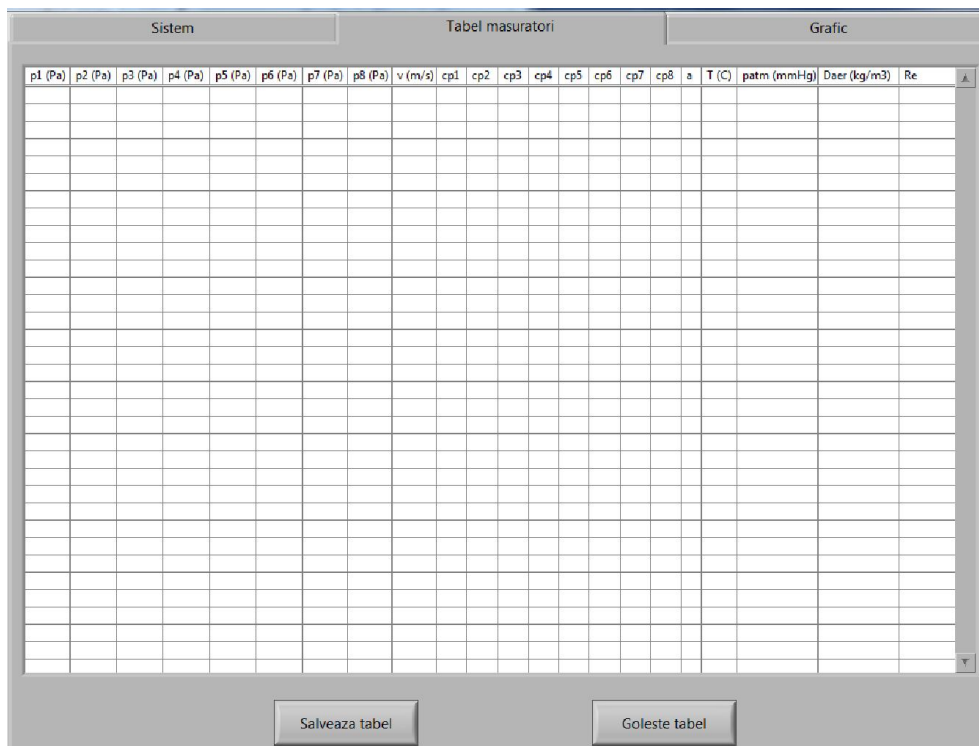


Figura 11.14 Tabel măsurători

7. Vizualizarea grafică a coeficienților de presiune locali c_{pi} pentru fiecare priză de presiune, se poate face în timpul măsurătorilor în interfața prezentată în figura 11.12, prin accesarea ferestrei „Grafic” prezentată în figura 11.15.

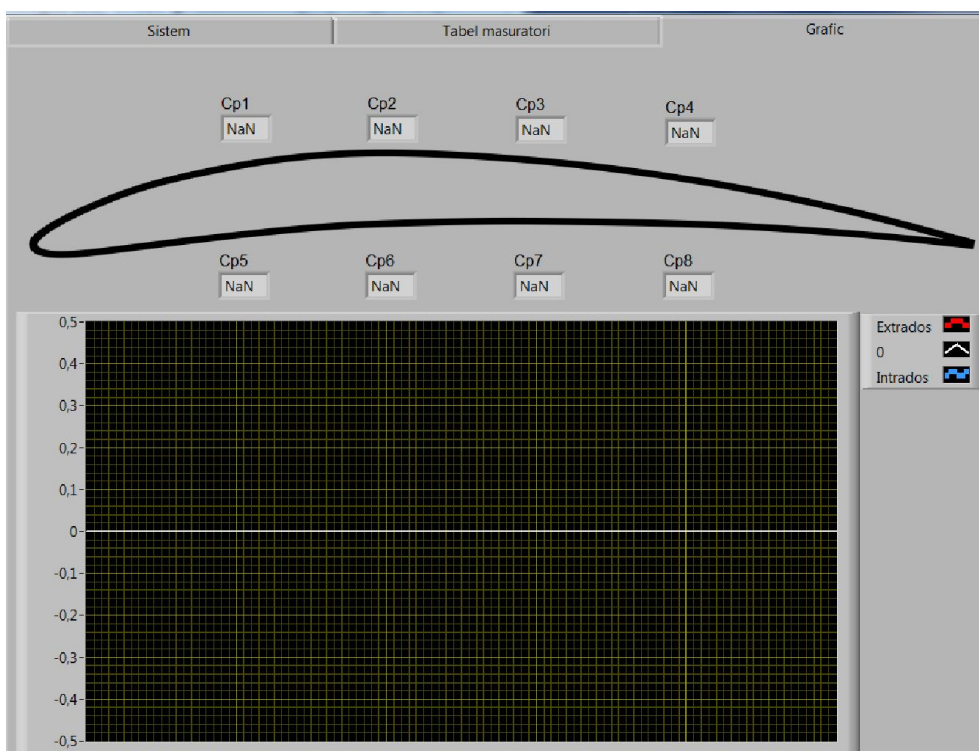


Figura 11.15 Reprezentarea grafică a coeficienților de presiune

11.4 Prelucrarea și interpretarea datelor măsurate

Caz 1

Pentru a pune în evidență influența unghiului de incidență asupra distribuției coeficienților de presiune, după efectuarea primei măsurători aferente unghiului de incidență reglat, se va apela operatorul local în vederea reglării unui alt unghi de incidență în limita $- 15^\circ \dots + 25^\circ$. Se recomandă incrementări de 5° . Se repetă pașii 3-7.

Cu ajutorul fișierului cu date, se vor reprezenta grafic coeficienții de presiune pentru fiecare valoare a unghiului de atac.

Se vor analiza comparativ rezultatele obținute.

Caz 2

Pentru a pune în evidență influența numărului Reynolds asupra distribuției coeficienților de presiune, după efectuarea primei măsurători aferente unghiului de incidență reglat și turației stabilite la pasul 4, se va seta o nouă valoare a frecvenței/turației ventilatorului. Pentru fiecare valoare a frecvenței reglate se repetă pașii 4-7. Se recomandă ca pentru un unghi de incidență de 5° , frecvențele reglate să fie de 5Hz, 25 Hz și 50 Hz.

Valorile vitezei curentului de aer neperturbat și a cifrei Reynolds calculată cu aceasta vor fi afișate.

Cu ajutorul fișierului cu date, se vor reprezenta grafic coeficienții de presiune pentru fiecare valoare a cifrei Reynolds.

Se vor analiza comparativ rezultatele obținute.