

# Analiza densității fluidelor prin imagistică Schlieren

Stan George-Edward, Radu Sebastian Hristu

Cuvinte cheie: densitate, imagistică, schlieren, corelație, Python, dinamica fluidelor, vitezometru, senzor, procesare de imagine, optică, refracție, lumină, optimizare.

## Rezumat

În această lucrare, vom utiliza diverse instrumente de procesare a imaginii prin intermediul limbajului de programare Python, pentru a evidenția mici variații de densitate care apar ca urmare a unor fenomene fizice, precum modificarea densității unui fluid în funcție de viteză, temperatură sau compoziția chimică [1]. Cel mai frecvent exemplu abordat în cadrul lucrării va fi cel al candelii, a cărei flacără încălzește aerul din apropiere suficient încât să determine o variație a indicelui de refracție, ceea ce duce la o modificare subtilă a intensității luminii reflectate de fundal. De aici provine și denumirea metodei utilizate: "Schlieren orientat pe fundal" ("Background Oriented Schlieren" sau "BOS") [2]. Această abordare are numeroase aplicații, printre care testarea aerodinamică, vizualizarea proiectilelor balistice, verificarea eficienței măștilor de protecție, detecția scurgerilor de gaze, măsurarea vitezei, realizarea de senzori de mișcare într-un fluid sau chiar utilizarea în scop artistic[3].

## 1.Introducere

Imagistica Schlieren este în esență un mod non-intrusiv de a scoate în evidență gradientul densității pe baza variației indicelui de refracție. Denumită după cuvântul în germană pentru "dungă" sau pentru "urmă", imagistica Schlieren a fost prima oară pusă în evidență de fizicianul Robert Hooke în 1665 [4]. Totuși, această metodă a fost mai târziu descrisă de Jean Bernard Léon Foucault și într-un final popularizată de germanul August Toepler care a și denumit-o. Acesta a definit "Schlieren" ca fiind neomogenități optice produse în medii transparente.

Această metodă face parte din tipul imagisticilor de gaze non-intrusive precum vizualizarea cu umbre. Se numesc imagistici de tip non-intrusiv datorită faptului că fluidul nu este în contact cu instrumentele de detectare. Ambele folosesc în aceeași manieră micile variațiuni formate într-un fluid prin diversele moduri în care aerul poate să reprezinte un mediu refractiv, cum se observă în Fig.1 și Fig.2.

În această lucrare vom pune accentul în principal pe imagistica de tip Schlieren și pe diferitele moduri în care putem analiza fluxul aerului încălzit de o sursă de căldură. De asemenea, scopul lucrării este să punem în evidență gradul ridicat de utilitate a asemenea tehnici.

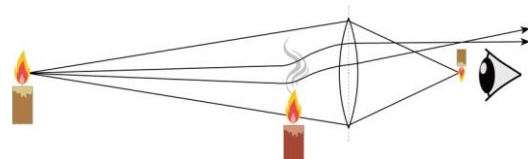


Fig.1 Abstractizarea sistemului pentru imagistică Schlieren utilizat de Robert Hooke în 1666

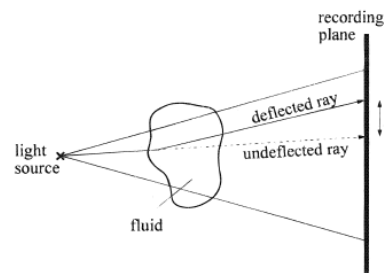


Fig.2 Abstractizarea unui sistem de vizualizare cu umbre

Vom utiliza această metodă pentru înțelegerea mecanicii fluidelor și pentru obținerea unor informații veritabile pe care le vom compara apoi cu valorile obținute din calcule teoretice. Atracția față de acest subiect vine odată cu valoarea sa experimentală. Ca orice imagistică, reușește să aducă la suprafață o nouă lume pe care o putem observa și trata ca pe un mediu propice pentru analiza fluidelor.

## 2.Schlieren clasic

Sistemul de imagistică Schlieren tradițional este relativ simplu de asamblat (Fig.3), fiind format la nivel fundamental din patru elemente: o cameră de filmat, o sursă de lumină, o oglindă sferică și un obstacol. Sistemul este format prin așezarea unei camere și a unei surse de lumină față în față cu oglinda sferică. Sursa de lumină trebuie să fie apropiată de obiectivul camerei pentru a captura punctul focal emergent din reflexia oglinzii sferice. După ce această setare a sistemului a fost efectuată și stabilitatea celor trei instrumente a fost realizată, urmează introducerea unui obstacol plasat în fața obiectivului. Deseori acest obstacol este format dintr-o lamă plasată în fața camerei până la obstrucționarea la jumătate din punctul focal. În experimentul descris în această lucrare s-a folosit un fir subțire cu o dimensiune comparabilă cu cea a punctului focal. Am plasat acest obstacol pe obiectiv.

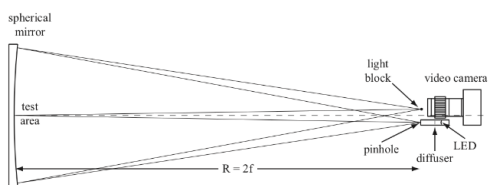


Fig.3 Schema unui sistem Schlieren clasic unde se poate observa așezarea instrumentelor necesare

Datorită diferenței de densitate de la un punct la altul al fluidului studiat între oglindă și obiectiv, anumite raze care normal ar fi

blocate de obiectiv devin vizibile și sunt receptate de senzorul camerei. Reciproca se poate lua în considerare atunci când un gaz refractă o rază care în mod normal ar trece prin obiectiv.

În cele ce urmează voi prezenta parametrii acestor patru elemente necesare, cum acestea afectează calitatea experimentului și ce fel de valori au fost utilizate în întreprinderea acestei lucrări.

Pentru oglindă, după cum se poate observa și în Fig.3, distanța la care aceasta este plasată față de cameră și sursă este chiar raza oglinzii sferice după formula [5]:

$$R = 2f \quad (1)$$

Unde:

- R este raza de curbură a oglinzii;
- f este distanța focală.

În sistemul nostru  $f=40\text{cm}$ , rezultând că  $R=80\text{cm}$ .

Camera utilizată este cea incorporată în telefonul Samsung Galaxy A54 cu 50 de mega pixeli și mărimea obiectivului de  $f/1.8$ . Parametrii acesteia sunt următorii:

- Focus, manual setat astfel încât oglinda sa fie focalizată. Scopul acestei reglări este clarificarea razelor de lumină cu originea în sursă, fiind astfel mai ușor de observat variația imaginii.
- Timpul în care obiectivul stă deschis este setată la  $1/6000$  s. Această reglare face posibilă observarea schimbării rapide de intensitate a luminii.
- Numărul de cadre pe secundă este setat la 60. Această valoare, pe lângă motivul parametrului anterior, face mai fluidă procesarea de imagine din capitolul următor al lucrării.
- ISO, reprezintă cât de sensibilă este camera la lumină. Acest parametru

trebuie dat la minim pentru a elimina “zgomotul” care vine odată o sensibilitate sporită

Sursa de lumină utilizată trebuie să fie suficient de puternică pentru ca lumina să fie capturată de cameră atunci când timpul în care obiectivul stă deschis este foarte mic. Un LED standard poate să fie utilizat, însă, deoarece sursa de lumină trebuie să fie apropiată de obiectiv, am utilizat sursa de lumină LED de 2.5W incorporat în dispozitiv ca sursă de lumină a sistemului. Preferabilă este trecerea acesteia printr-o fantă de dimensiuni milimetrice scade dimensiunea imaginii focalizate suficient cât să fie comparabilă cu obstacolul. Din aceste două mărimi ajungem la creșterea sensibilității sistemului la mișcări.

Trebuie menționată o consecință a mărimii non-punctiform care caracterizează sursa de lumină. Imaginea focalizată va avea maxim înălțimea reală a sursei înmulțită cu mărirea oglinzii. Mărirea reiese din formula:

$$m = -\frac{v}{u} \quad (2)$$

Unde:

- $m$  este mărirea;
- $v$  este distanța de la oglindă la imagine;
- $u$  este distanța de la oglindă la obiect.

Deoarece  $v = u$  pentru oglinda noastră, aceasta doar inversează imaginea sursei de lumina. Acest lucru nu ne preocupă deoarece imaginea pe care noi vrem să o capturăm se formează după ce razele de lumina trec de oglindă.

Însă, trebuie luat în considerare că orice parte din această imagine focalizată care ajunge în obiectiv va reprezenta imaginea completă dintre oglindă și obiectiv, cât de mult din imaginea focalizată ajunge la obiectiv reprezintă luminozitatea imaginii. Acest lucru

reiese de la aproximarea sursei noastre de lumina cu o infinitate de surse punctiforme. De aici putem deduce că obstacolul nu are rolul unui blocator de imagine și că nu se va observa pe filmarea finală.

Luând în considerare cele spuse despre imaginea focalizată, putem afirma că obstacolul, firul în cazul nostru, face posibilă vizualizarea gradientului de densitate prin formarea pe obiectiv a unor zone de luminozitate ridicată/scăzută care ies în evidență față de lumina de fundal.

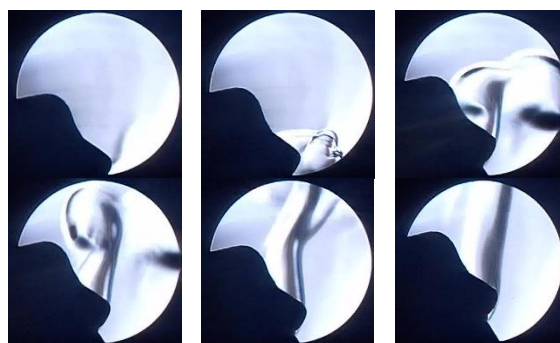


Fig.4 Analiza unei surse de căldură prin imagistică Schlieren clasică

Putem observa în Fig.4 rezultatul metodei Schlieren clasice așa cum a fost descrisă până acum. Cele șase cadre prezentate mai sus reprezintă folosirea unui aprinzător cu gaz. După cum se poate observa fluxul gazului ajunge din a fi turbulent în a se stabiliza într-un flux laminar ușor turbulent spre vârf. De asemenea, se poate deduce cum imaginea pe care o capturăm poate avea maxim aria oglinzii sferice utilizate.

Ne putem forma mai departe o perspectivă asupra fenomenului dacă pe obiectiv atașăm două filtre transparente de culori diferite, în acest caz roșu și verde (Fig.5), pentru a observa fenomenul pe care îl provoacă aerul cald venit din jurul aceleiași surse de căldură.

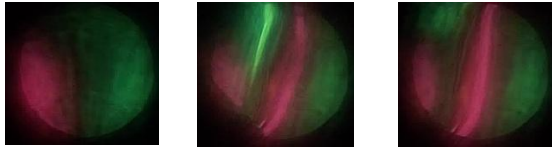


Fig.5 Același experiment ca cel precedent cu două filtre colorate atașate pe lateralele obstacolului

Pentru a explica acest fenomen de inversare a culorilor pe față de axa verticală putem aproxima zona mai caldă cu o lentilă convexă foarte subțire de densitate ridicată conform formulei dedusă din legea gazelor ideale:

$$\rho = \frac{M P}{R T} \quad (3)$$

Unde:

- $\rho$  este densitatea aerului cald;
- $M$  este masa molară;
- $P$  este presiunea atmosferică;
- $R$  este constanta gazului ideal.

Putem simula această aproximare pentru a ne explica fenomenul de schimbare a culorilor [6].

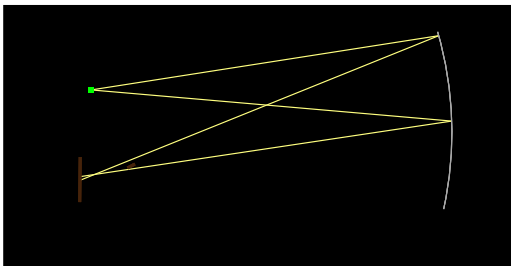


Fig.6.1

În Fig.6.1 avem cazul normal, observat de deasupra, fără dungii de aer care să varieze densitatea. Putem observa cum pe obiectiv cad razele provenite din sursă, acestea fiind inversate. Pe de altă parte, Fig.6.2 ne prezintă fenomenul de inversare a culorilor prin aproximarea secțiunii de gaz cald cu o lentilă divergentă.

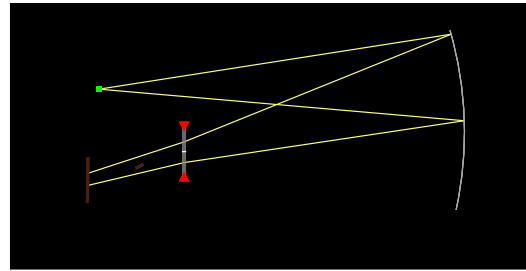


Fig.6.2

Din acest rezultat putem presupune că aproximarea unei porțiuni reci de aer este o lentilă convergentă. Vedem cum în figura 6.3, care simulează acest caz, razele de lumină nu se inversează, ci sunt deviate mai accentuat una spre cealaltă. Se poate observa că realitatea verifică simularea și deviația accentuată este reprezentată de alungiri reciproce ale secțiunilor colorate spre poziția sursei reci, în acest caz ea fiind reprezentată de un cub de gheață (Fig.7).

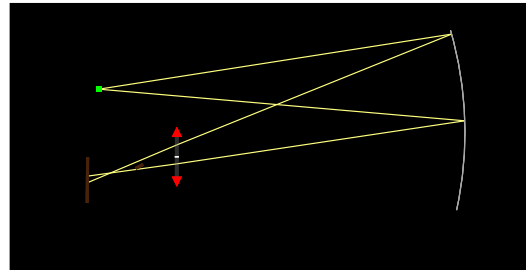


Fig.6.3



Fig.7

### 3.Schlieren orientat pe fundal

În acest capitol vom aborda procesarea de imagine prin intermediul limbajului de programare Python [7]. Vom explica scopul instrumentelor folosite pentru realizarea imagisticii Schlieren orientate pe fundal în cazul unei candelă care datorită sursei de căldură concentrate creează o variație a densității propice pentru vizualizarea imagisticii prezentate și pentru calculul vitezei gazului prin fluctuații de luminozitate a pixelor.

Vom menționa mai întâi instrumentele cu care s-au capturat cadrele de mai jos (Fig.9 și Fig.10). O primă diferență care face acest tip de metodă mai accesibilă este faptul că nu se va mai folosi oglinda sferică din capitolul precedent. Așa cum reiese și din denumire, modalitatea aceasta se bazează pe un fundal. Cel pe care l-am utilizat pentru această lucrare (fig.8) este format din static alb-negru.

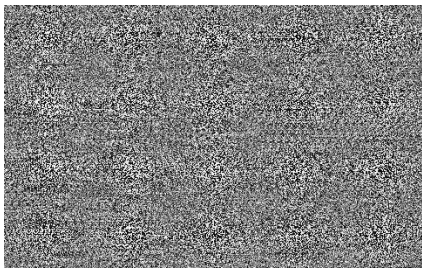


Fig.8

Acest fundal a fost expus în spatele sursei de căldură în două moduri:

- Imprimat pe o foaie A3, iluminat cu ajutorul unei surse de lumină de 5W.
- Redat pe un ecran de tip L.E.D. folosindu-ne de iluminarea intrinsecă.

Vom analiza acum diferențele de vizualizare dintre cele două tipuri de fundal, începând cu fundalul imprimat.

După cum se poate observa, acest fundal prezintă puțin zgomot, însă stabilitatea sistemului este precară din cauza

susceptibilității acestuia la mișcări în urma micilor vibrații mecanice și a curenților slabi de aer din timpul experimentului. De asemenea, acesta nu este uniform iluminat din cauza lipsei unei surse de lumină potrivite.

Analizând rezultatele obținute prin utilizarea unui fundal proiectat pe un ecran cu iluminare proprie putem observa cum acesta este uniform iluminat. Singura limitare a acestui sistem este formată de tendința dispozitivului pe care este proiectat fundalul de a își reîncărca pixelii. Din această reîncărcare se poate acumula “zgomot” care diminuează calitatea vizualizării.

Setările camerei utilizate sunt asemănătoare cu cele din capitolul precedent: focusarea este realizată manual pentru a clarifica fundalul, timpul în care obiectivul stă deschis trebuie setat suficient de mic încât să fie vizibile schimbările de densitate, dar nu atât să devină imposibilă capturarea de lumină. Din experiment reiese pentru sistemul Schlieren de față un timp de  $1/1000$  s pentru fundalul cu iluminare proprie, iar pentru cel imprimat cu iluminare externă se alege un timp mai mare, în valoare de  $1/400$  s.

Fundalul și o cameră stabilă reprezintă singurele instrumente necesare pentru realizarea acestei metode. Principalul efort al imagisticii orientate pe fundal vine odată cu procesarea de imagine și scoaterea în evidență a informației legate de gaz.

Pentru a evidenția și a putea analiza apoi cât mai riguros trăsăturile gazului procesarea imaginii a avut patru pași principali:

- a) Primul pas este alegerea scopului vizualizării. Dacă vrem măsurarea calitativă a vitezei, preferăm comparația dintre cadrul curent și cadrele adiacente. Totodată, dacă dorim vizualizarea cât mai precisă a schimbărilor de densitate, se va compara cadrul curent cu un cadru de referință. Se face acest lucru deoarece

pentru o curgere laminară a aerului încălzit, un program care compară ultimele cadre între ele va ignora părțile constante ale imaginii, așa că fluxul constant de aer cald va fi ignorat. În analiza vitezei este preferată prima metodă de comparație deoarece calculul schimbării de intensitate a pixelilor se realizează prin comparație între două stări diferite ale sistemului, fluxul laminar fiind ignorat din același motiv. Următorii pași vor reprezenta metoda utilizată în măsurarea vitezei deoarece metoda vizualizării fluxului laminar are ca diferență doar modul de comparație și lipsa algoritmului de măsurare a vitezei. Totuși, metoda fluxului laminar prezintă posibilitatea schimbării cadrului de referință cu cadrul curent atunci când este apăsată tasta *space*. S-a implementat acest lucru pentru a scăpa de zgomotul acumulat.

- b) Al doilea pas este selectarea unei regiuni de interes. Această regiune va reprezenta aria în care se va calcula viteza obiectului din imagine, în acest caz viteza gazului. Se dorește ca această arie să fie foarte subțire pentru a ajunge la o măsurare calitativă a vitezei. Dacă aria este prea mare, se poate ca fluctuațiile măsurate în această arie să fie infime și să nu reprezinte valorile dorite.
- c) Această etapă reprezintă esența măsurătorii. Se salvează primul cadru al materialului pe care dorim să îl procesăm. După ce se salvează acest cadru, pe care îl vom numi cadrul precedent, se salvează un al cadru pe care îl vom numi cadrul curent. Ambele aceste cadre vor fi transformate în poze alb negru pentru a se realiza comparația intensității luminoase mai ușor. Valoarea

fluctuațiilor reprezintă variația pixelilor într-un interval de timp. Pentru a ajunge la o valoare reală a vitezei, se înmulțește valoarea calculată cu numărul de cadre pe secundă conform formulei:

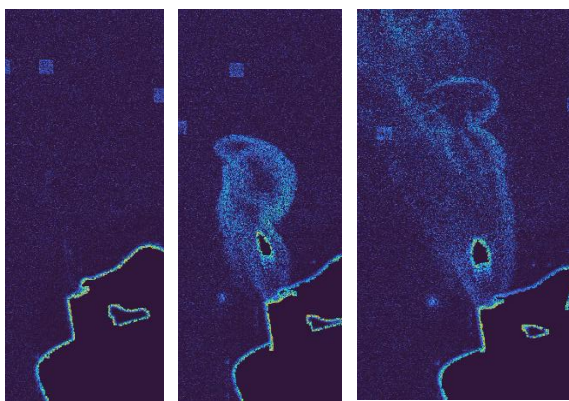
$$V = v_f F_{ps} \quad (4)$$

Unde:

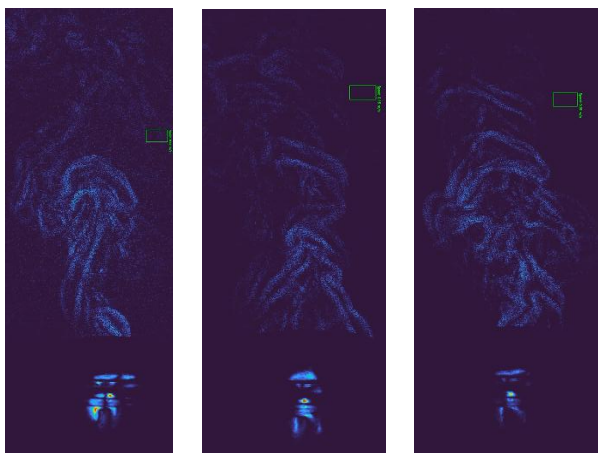
- $V$  reprezintă viteza reală a gazului;
  - $v_f$  este viteza cu care pixelii fluctuează în intensitate;
  - $F_{ps}$  este notat după denumirea în engleză (*frames per second*) și reprezintă numărul de cadre pe secundă.
- d) După ce se calculează viteza gazului, se aplică un cadran verde cu valoarea vitezei reale în metri pe secundă. Totodată, se aplică mai multe tehnici de creștere a contrastului și a vizualizării mai calitative precum corectare gamma, amplificare de contrast, amplificare de culori și egalizare adaptabilă de contrast limitat a histogramei (*CLAHE*). Pentru a se observa doar gazul în loc de alte obiecte precum sursa de căldură, s-a utilizat un algoritm de recunoaștere a perimetrelor și s-a mascat orice obiect prezenta o arie prea mare (mai mult de 250 de pixeli). La final rezultatul procesat este pus deasupra materialului original cu un grad alpha de opacitate. Toate valorile pot fi alese de utilizator după propriul său scop.

După ce am explicat conceptual metoda de procesare a imaginii, putem observa cele doua tipuri de comparație: cadru de referință fixat (Fig.9) și cadru de referință variat odată cu cel curent (Fig.10).



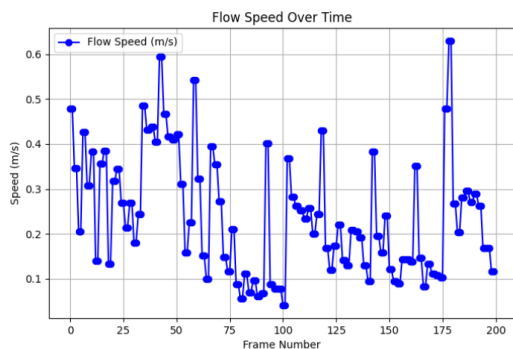


*Fig.9 Vizualizarea unui aprinzător prin Schlieren orientat pe fundal, cadru de referință fixat*



*Fig.10 Vizualizarea vitezei unei candelă prin metoda comparației între ultimele cadre.*

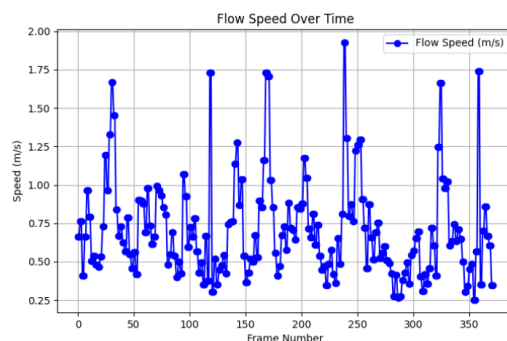
Din rezultatul ultimei figuri am extras următorul grafic al vitezei (Fig.10) prin metoda fluxului optic:



*Fig.11 Graficul vitezei în funcție de numărul cadrelor*

Din analiza mai multor grafice (Fig.12) s-a observat apariția mai multor erori în intervale fixe de cadre. Chiar dacă pe materialul neprocesat acest fenomen este practic invizibil, în rezultatul final se poate observa rata de adaptare a intensității ca o aprindere a unei arii considerabile de pixeli într-un timp foarte scurt. Am dedus originea acestui fenomen ca fiind chiar rata de afișaj a dispozitivului pe care l-am utilizat ca o cameră video. Cauza acestei teorii vine de la faptul că acest interval de erori nu se schimbă niciodată, fie că schimbăm fundalul sau sursa de lumină pentru fundalul printat. La fiecare 60 de cadre, din cauza iluminării spontane a imaginii procesate, măsurătoarea avea de suferit.

Pentru a rezolva această problemă, puteam ignora sau chiar înlocui acel cadru cu media cadrelor vecine. Însă, am ales să rezolv două probleme în același timp prin alegerea unei zone de control separată de regiunea de interes unde să se calculeze fluctuațiile de intensitate, iar apoi să se scadă din fluctuațiile măsurate în zona de interes. Această metodă de control elimină de asemenea zgomotul ce poate fi interpretat ca variațiuni a intensității (Fig.12).



*Fig.12 Graficul reprezentând erorile spontane la intervale fixe de 60 de cadre pe secundă*

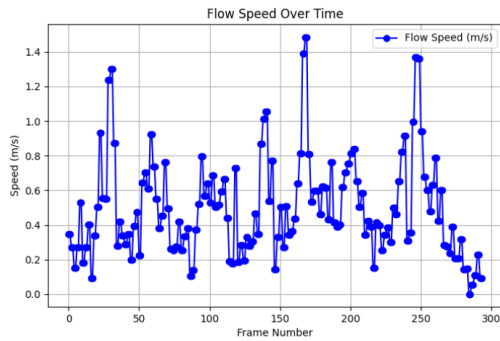


Fig.13 Graficul după ce am introdus zona de control

#### 4.Verificare matematică și analiză aprofundată

i)

Pentru a afirma dacă măsurătorile prezentate în capitolul precedent au caracter veridic sau verosimil, trebuie să ajungem la concluzii similare prin calcule matematice.

Vom utiliza aproximarea gaussiană pentru viteza aerului, cauzată de căldura emanată de o sursă punctiformă. Putem să extragem astfel viteza din următoarea formulă [8]:

$$u_c(z) = C \cdot \left( \frac{g \cdot \beta \cdot Q}{\rho_0 \cdot C_p \cdot T_0} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot z^{-1/3} \quad (5)$$

Unde:

- $u_c(z)$  este viteza aerului la o înălțime  $z$  deasupra sursei de lumină;
- $C$  este o constantă empirică (aproximativ 3.4 pentru o sursă punctiformă)
- $g$  este accelerația gravitațională ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
- $\beta$  este coeficientul aerului de expansiune termică ( $\approx \frac{1}{T}$  pentru aproximarea gazelor ideale,  $T = T_0$ )
- $Q$  este căldura pe care o emană sursa în unitatea de timp (o aproximăm la 60W)

- $\rho_0$  este densitatea aerului neîncălzit ( $1.2 \text{ kg/m}^3$  la  $20^\circ\text{C}$ )
- $C_p$  este căldura specifică a aerului ( $\approx 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ )
- $z$  este înălțimea la care măsurăm deasupra sursei

Din acest calcul reiese viteza în centrul coloanei de aer cald la o înălțime de  $z = 2 \text{ cm}$  aproximativ egală cu  $u_c(2 \text{ cm}) = 0.298 \text{ m/s}$ .

Comparăm această valoare cu graficul făcut de programul descris în capitolul precedent cu regiunea de interes la aceeași înălțime deasupra flăcării (Fig.14) și observăm cum valorile noastre respectă teoria.

Media noastră fiind la o valoare de aproximativ  $V_{\text{măsurat}} = 0.37 \text{ m/s}$ . Eroarea ce reiese din această măsurătoare este de  $\epsilon = 24.16\%$  după următoarea formulă:

$$\epsilon = \frac{|V_{\text{măsurat}} - u_c(2 \text{ cm})|}{u_c(2 \text{ cm})} \quad (6)$$

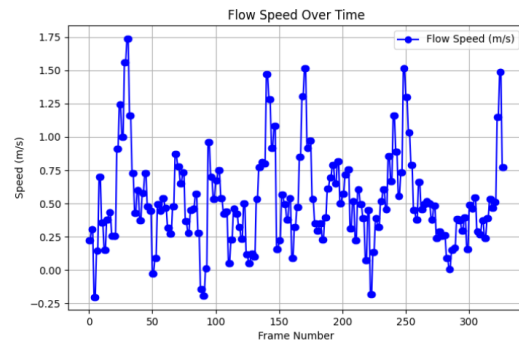


Fig.14 Graficul vitezei pentru regiunea de interes la aproximativ 2cm deasupra sursei de căldură

ii)

Valoarea de 2cm s-a ales cu scopul de a se afla numărul lui Reynolds specific aerului încălzit la ieșirea din candelă și de a se interpreta valoarea acestuia bazat pe tipul de curgere pe



care îl putem observa la acea înălțime [9]. Putem utiliza următoarea formulă pentru calcul:

$$R_e = \frac{u_c(z) \cdot b(z)}{\mu} \quad (7)$$

Unde:

- $R_e$  reprezintă numărul lui Reynolds
- $b(z)$  reprezintă grosimea caracteristică a fluxului de gaz (în acest caz diametrul candeliei  $D = 8 \text{ cm}$ )
- $\mu$  reprezintă vâscozitatea aerului (la parametri nominali  $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Valoarea calculată este de  $R_e = 1324$  care reprezintă un flux instabil al fluidului, plasat între laminar și turbulent. Această afirmație se poate confirma dacă revizuim Fig.9.

iii)

În ultima secvență de calcul matematic ne vom concentra pe metoda Schlieren originală și vom confirma formula dedusă de fizicianul G.S. Settles în cartea sa despre imagistică de tip Schlieren. Formulele propuse de el pentru sisteme de tip clasic sunt următoarele:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \frac{dn}{dx} \quad (8.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \frac{dn}{dy} \quad (8.2)$$

Care, alături de următoarea:

$$n - 1 = k \cdot \rho \quad (9)$$

Devin:

$$\varepsilon_x = L \cdot k \cdot \frac{d\rho}{dx} \quad (10.1)$$

$$\varepsilon_y = L \cdot k \cdot \frac{d\rho}{dy} \quad (10.2)$$

Unde:

- $\varepsilon_x/\varepsilon_y$  reprezintă unghiul de deflecție cauzat de micile schimbări ale indicelui de refracție
- $L$  reprezintă lungimea pe parcursul căreia raza de lumină a fost refractată
- $n_0$  reprezintă indicele de refracție al aerului (aproximativ egal cu 1)
- $n$  reprezintă indicele de refracție al zonelor unde densitatea se schimbă
- $k$  reprezintă constanta Gladstone-Dale
- $\rho$  reprezintă densitatea

Din formula (10.2) putem deduce că un sistem Schlieren clasic măsoară variația densității. Pentru a vedea graficul densității trebuie să vedem graficul intensității luminoase a pixelilor pe o linie perpendiculară cu fluxul aerului în funcție de poziția pixelilor pe această linie (Fig.15) pentru o imagine cu un aprinzător capturată prin metoda Schlieren [10].

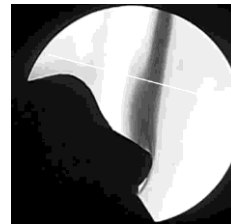


Fig.15 Linia albă reprezintă unde este măsurată intensitatea pixelilor

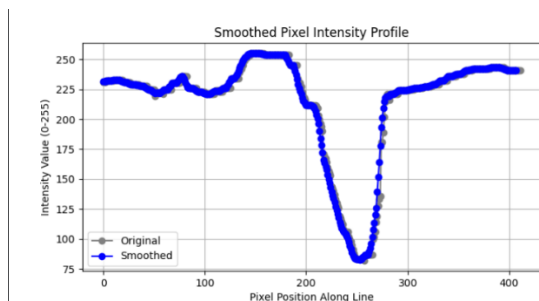


Fig.16 Graficul intensității bazat pe imaginea precedentă

Putem aproxima graficul format (Fig.16) cu un grafic ideal la care acesta tinde. Cea mai simplă aproximare la acest grafic real este o distribuție normală negativă și adunată cu valoarea maximă (Fig.17). Din acest grafic ideal putem reprezenta derivata acestuia, reprezentând funcția densității, punctul 0 al axei X fiind centrul coloanei de aer cald (Fig.18).

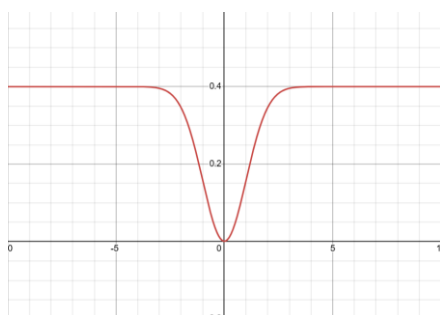


Fig.17

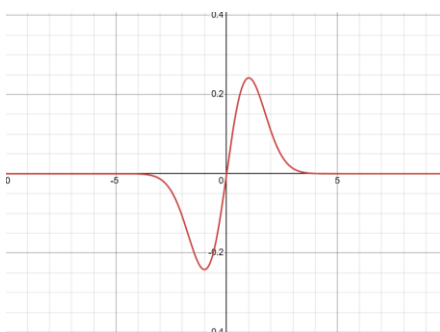


Fig.18

## 5.Concluzii

Pe parcursul acestei lucrări am aprofundat diferitele moduri în care imagistica Schlieren poate sa fie utilă ca instrument non-intrusiv de vizualizare a schimbărilor de densitate și ca metodă de analiză a mecanicii fluidelor.

Chiar dacă vizualizarea prin intermediul programului format în limbajul Python este satisfăcător, o imagine mult mai bună și mult mai științifică poate fi formată prin utilizarea unor instrumente mai performante. De exemplu: se pot utiliza metode de procesare mai costisitoare din punct de vedere hardware dacă am utiliza dispozitive construite special pentru procesare grafică, camera utilizată ar putea avea un senzor de lumină mult mai sensibil și mai mare pentru a minimiza erorile și a maximiza sensivitatea sistemului.

Metode cu care tehnica orientată pe fundal poate fii îmbunătățită în viitor sunt: utilizarea fluxului optic pentru vizualizarea gazului, utilizarea inteligenței artificiale pentru a izola gazul de fundal și prin explorarea acestei metode în alte medii precum aplicații în domeniul astrofizicii cu scopul vizualizării refracției cauzate de câmpuri gravitaționale (Fig19) [11].

Luând în considerare toate argumentele date putem spune cu certitudine că imagistica Schlieren are un potențial ridicat în orice mediu științific și continuă încă din 1665 până în prezent să ne arate invizibilul.



Fig.19 Deflecția razelor de lumină în câmp gravitațional, fenomen ce poate fi analizat cu ajutorul imagisticii Schlieren.

## Bibliografie

[1] E. Traldi *et al.*, “Schlieren imaging: a powerful tool for atmospheric plasma diagnostic,” *EPJ Techniques and Instrumentation*, vol. 5, no. 1, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-018-0045-1>

[2] G. S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56640-0>

[3] M. Raffel, “Background-oriented schlieren (BOS) techniques,” *Experiments in Fluids*, vol. 56, no. 3, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1927-5>

[4] R. Hooke, *Micrographia*. Weinheim, Cramer, 1665.

[5] F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*. Cambridge University Press, 2017.

[6] Y. T. Tu, “Simulator - Ray Optics Simulation,” *phydemo.app*, Dec. 2022. Available: <https://phydemo.app/ray-optics/simulator/>

[7] EdyStan42, “GitHub - EdyStan42/Project\_Schlieren\_1: Analysis of fluids using Schlieren methods,” *GitHub*, 2025. Available: [https://github.com/EdyStan42/Project\\_Schlieren\\_1](https://github.com/EdyStan42/Project_Schlieren_1). [Accessed: May 04, 2025]

[8] R. Eichhorn, “Book Reviews: Bouyancy-Induced Flows and Transport - B. Gebhart, Y. Jaluria, R. L. Mahajan, and B. Sammakia,” *AIAA Journal*, vol. 28, no. 2,

pp. 381–381, Feb. 1990, doi: <https://doi.org/10.2514/3.48863>

[9] R. W. Fox, A. T. McDonald, and P. J. Pritchard, *Introduction to fluid mechanics*. Hoboken, N.J.: Wiley & Sons, 2010.

[10] A. Crockett and W. Rueckner, “Visualizing sound waves with schlieren optics,” *American Journal of Physics*, vol. 86, no. 11, pp. 870–876, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1119/1.5042245>

[11] A. O. Petters, H. Levine, and J. Wambsganss, *Singularity Theory and Gravitational Lensing*. Springer Science & Business Media, 2012.