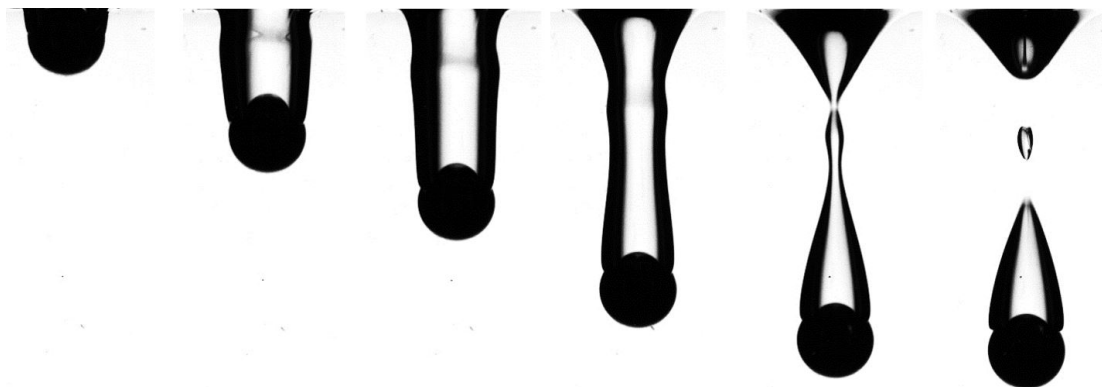

Interacțiunea dintre corpuri sferice și interfețe fluide în geometrii limitate

- rezumat -

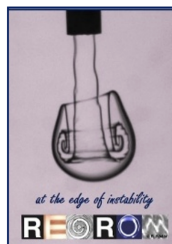
Doctorand: István Magos
Conducător: Prof. Corneliu Bălan



Lucrare înaintată în vederea obținerii
titlului de Doctor în științe ingineresti

către

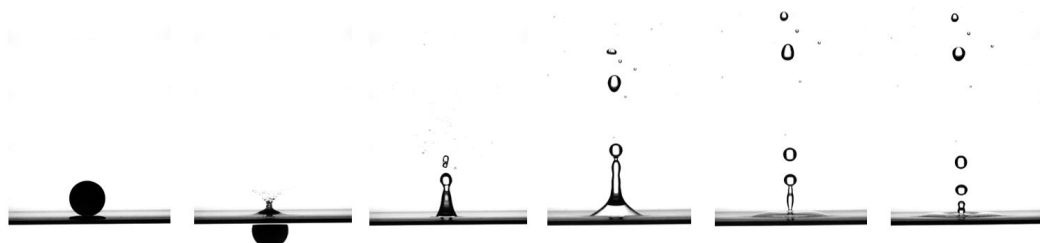
Școala Doctorală de Inginerie Energetică
Facultatea de Energetică
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
Politehnica București
București, România
2025



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
Politehnica București
Școala Doctorală de Inginerie Energetică
Facultatea de Energetică

TEZĂ DE DOCTORAT

Interacțiunea dintre corpuri sferice și interfețe fluide în geometrii limitate



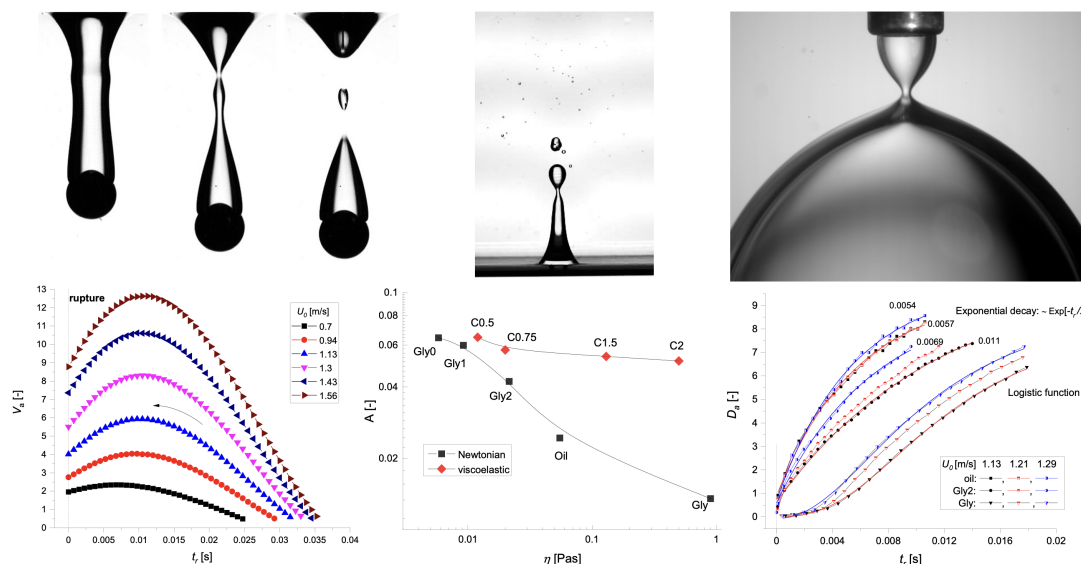
Doctorand: István Magos
Conducător: Prof. Corneliu Bălan

Comisia de doctorat

Președinte	Prof. dr. ing. Radu-Florin Porumb	de la	UNSTPB
Conducător	Prof. dr. ing. Corneliu Bălan	de la	UNSTPB
Referent	Prof. dr. ing. Ilinca Năstase	de la	UTCB
Referent	Prof. dr. ing. Emil-Ioan Slușanschi	de la	UNSTPB
Referent	Prof. dr. ing. Florin-Ioan Bode	de la	UTCN

București, 2025

Rezumat



Această teză contribuie la înțelegerea fenomenelor asociate impactului dintre sfere solide și suprafețe fluide, cu precădere pe formarea cavităților în fluide Newtoniene și viscoelastice. Utilizând metode numerice de prelucrare imagistică, sunt extrase contururile cavităților și corelate variabile precum viteza sferei, diametrul minim și volumul cavității. În prima parte, sunt revizuite principalele contribuții din literatură și sunt prezentate fundamentele teoretice ale experimentelor, incluzând ecuațiile și forțele relevante în dinamica sferelor imersate. A doua parte a tezei cuprinde studii experimentale privind hidrodinamica mișcării sferelor în fluide vâscoase și viscoelastice. Se analizează impactul acestora pe suprafețe fluide cu formare de cavitate de aer și legătura cu generarea picăturilor sferice. Sunt analizate efectele pereților și forțelor magnetice asupra deplasării sferelor în spații confinate, precum și formarea jeturilor Worthington la impactul sferelor hidrofile cu apa. A treia parte se axează pe caracterizarea experimentală, incluzând metode de măsurare a unghiului de contact pe suprafețe sferice, precum și detalii despre algoritmi utilizați pentru trasarea interfeței, calculul vitezelor sferelor și determinarea parametrilor cavităților. În final, este analizată evoluția volumului cavității de aer și a bulei rezultate după rupere, alături de cazuri asimetrice observate, oferind o perspectivă detaliată asupra influenței proprietăților fluidelor și a condițiilor de impact asupra formării și dinamicii cavităților. Rezultatele obținute contribuie la o mai bună înțelegere și caracterizare a interacțiunilor dintre un corp solid și o suprafață lichidă, respectiv a efectelor vâscozității și elasticității fluidelor asupra acestor procese. Precizăm că majoritatea studiilor experimentale prezentate au fost publicate în perioada 2019-2025.

Abstract

The thesis, **Interactions between spherical bodies and fluid interfaces in confined geometries**, contributes to the understanding of the phenomena associated with the impact between solid spheres and fluid surfaces, especially on the formation of cavities in Newtonian and viscoelastic fluids. Using numerical image processing methods, the contours of the cavities are extracted and variables such as the sphere velocity, the minimum diameter and the cavity volume are correlated. In the first part, the main contributions from the literature are reviewed and the theoretical foundations of the experiments are presented, including the relevant equations and forces in immersed sphere dynamics. The second part of the thesis includes experimental studies on the hydrodynamics of the movement of spheres in viscous and viscoelastic fluids. Their impact on fluid surfaces with air cavity formation and the connection with the generation of spherical droplets are analyzed. The effects of walls and magnetic forces on the movement of spheres in confined spaces are analyzed, as well as the formation of Worthington jets upon the impact of hydrophilic spheres with water. The third part focuses on the experimental characterization, including methods for measuring the contact angle on spherical surfaces, as well as details on the algorithms used for interface tracing, sphere velocities calculation and cavity parameters determination. Finally, the evolution of the air cavity volume and the resulting bubble after rupture is analyzed, along with observed asymmetric cases, providing a detailed perspective on the influence of fluid properties and impact conditions on the formation and dynamics of cavities. The results obtained contribute to a better understanding and characterization of the interactions between a solid body and a liquid surface, respectively of the effects of fluid viscosity and elasticity on these processes. We note that most of the experimental studies presented were published in the period 2019-2025.

Contribuții științifice

Articole WOS publicate în reviste internaționale recenzate

1. Magos, I., Bălan, C. (2025). Note on the sphere motion in confined geometry. *UPB Scientific Bulletin, Series B*, to be published;
2. Magos, I., Bălan, C. (2024). Experimental investigations of air-cavity formation in viscous and viscoelastic liquids. *Physics of Fluids*, **36(9)**. DOI:10.1063/5.0223547, WOS:001305883900017;
3. Broboana, D., Bratu, A. M., Magos, I., Patrascu, C., Balan, C. (2022). Kinematics of the viscous filament during the droplet breakup in air. *Scientific Reports*, **12(1)**, 1774. DOI: 10.1038/s41598-022-05839-y, WOS: 000750981100002.

Publicații WOS proceedings și BDI

1. Magos, I., Bălan, C. (2021). Contact Angles on Spherical Hydrophilic Surfaces. *12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425277, WOS: 000676164800125;
2. Botta, D., Magos, I., Bălan, C. (2021). Influence of Viscosity on Radial Diffusion of Fluids in Paper Substrates. *12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425224, WOS: 000676164800096;
3. Patrascu, C., Magos, I., Balan, C. (2019). Drop Dispensing From Non-Circular Nozzles. *2019 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 69-72). IEEE. DOI: 10.1109/CIEM46456.2019.8937690, WOS: 000630902700015;
4. Magos, I., Bălan, C. (2019). Motion of Magnetic Spheres inside Cylindrical Tubes filled with Newtonian and Viscoelastic Fluids. *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724922, WOS: 000475904500079;
5. Magos, I., Broboana, D., Balan, C. (2023). Modeling the fluid interface between immiscible liquids. *2023 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/CIEM58573.2023.10349782, INSPEC: 24309432;
6. Bran, A., Magos, I., Bălan, C. (2023). Fluid Interface Image Processing Using Artificial Intelligence. *2023 International Conference*

- on *ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/CIEM58573.2023.10349764, INSPEC: 24309478;
7. Botta, D., Magos, I., Balan, C. (2021). The Influence of Surface Tension on Radial Wicking in Paper. *2021 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614767, INSPEC: 21495976;
 8. Magos, I., Bălan, C. (2021). Impact of Solid Hydrophilic Spheres on Fluid Surfaces. *2021 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614856, INSPEC: 21382907;
 9. Rasuceanu, I., Patrascu, C., Magos, I., Trandas, N., Balan, C. (2021). Liquid-liquid capillary rise, *EENVIRO 2020*, in press. DOI: 10.1088/1755-1315/664/1/012002, INSPEC: 20846198;
 10. Botta, O. D., Magos, I., Balan, C. (2020). Experimental study on the formation and break-up of fluid bubbles. *INCAS BULLETIN*, Vol. 12, pp. 27-34. DOI:10.13111/2066-8201.2020.12.1.3.

Participare cu lucrări științifice la conferințe internaționale

1. EELISA, YRIS Community, Budapesta, 2024;
2. EELISA, YRIS Community, Madrid, 2023;
3. CIEM, București, 2023;
4. CIEM, București, 2021;
5. ATEE, București, 2021;
6. Caius Iacob București, 2019;
7. ATEE, București, 2019.

Membru în proiecte de cercetare

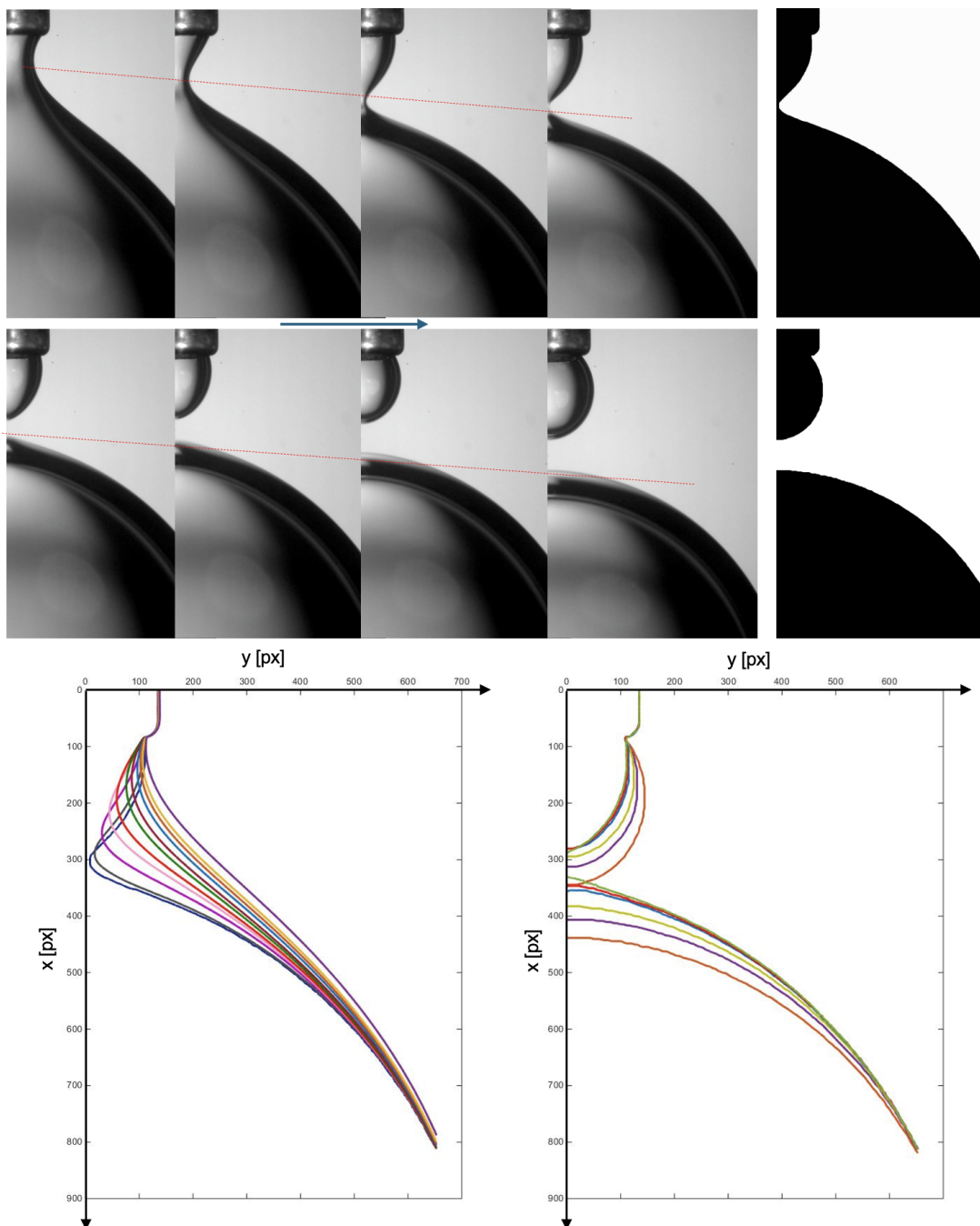
1. Multi-disciplinary Use Cases for Convergent new Approaches to AI explainability - MUCCA depus la Programul 3, Cooperare europeană și internațională organizată de UEFISCDI, PN III 206 - 2020 ERANET, etapa a I a, număr intern UPB: EN 06-20-07, 2020-2023;
2. European Regional Development Fund through Competitiveness Operational Program 2014-2020, Priority axis 1, Project No. P-36-611, MySMIS code 107066, Innovative Technologies for Materials Quality Assurance in Health, Energy and Environmental - Center for Innovative Manufacturing Solutions of Smart Biomaterials and Biomedical Surfaces – INOVABIOMED.

Stagii de pregătire

- ETH - Zurich, Soft Materials Group, Prof. Jan Vermant (2019)

Cuprins

Rezumat	i
Contribuții științifice	iii
Rezumat extins	1
Introducere	1
Aspecte teoretice	4
Studii experimentale	6
Caracterizare experimentală și metode numerice de trasare a interfeței fluid-fluid	12
Studii experimentale asupra dinamicii cavităților	17
Concluzii și Perspective	20
Referințe	24
Cuprinsul tezei	27



Serii de imagini capturate la 2000 fps surprinzând formarea unei picături de apă în ulei siliconic la un debit constant de 5 ml/min printr-un ac cu diametrul interior de 0.838 mm, precum și evoluția acesteia după desprindere, alături de contururile extrase.

Rezumat extins

Introducere

Interacțiunea corpurilor solide cu mediile fluide este un subiect principal de studiu în dinamica fluidelor și joacă un rol important atât în procesele naturale, cât și în aplicațiile industriale. Dinamica unei sfere în diferite tipuri de fluide prezintă o interacțiune complexă de forțe care depind atât de proprietățile fizice ale fluidului cât și de viteza sferei și de materialul corpului solid. Când o sferă cade într-un fluid apar o varietate de fenomene, inclusiv formarea unui jet de lichid în urma sferei (jet Worthington), dezvoltarea cavității de aer, generarea forței de rezistență la înaintare și disiparea energiei. Înțelegerea acestor fenomene este esențială pentru îmbunătățirea diferitelor sisteme de inginerie, în special în domeniile legate de transportul fluidelor, procesele de transfer și amestec ce implică interacțiunea corp solid - fluid.

Primele imagini ce surprind penetrarea unei interfețe aer-lichid de către corpuri sferice aflate în cădere verticală liberă au fost realizate la finalul secolului XIX. [1]. Studiile au cuprins fenomenul de închidere a interfeței după impact dar și cel de transport de aer (formare de cavitate de aer) ce poate să apară în spatele unei sfere ce cade într-un fluid [2]. S-a argumentat că apariția acestei cavități este proporțională cu eficiența adeziunii moleculelor de fluid la suprafața sferei. Trebuie menționat însă că o înălțime suficient de mare de lansare a unei sfere, chiar dacă netedă, va rezulta în apariția unei cavități. Acesta se explică prin faptul că inerția lichidului ce urcă pe lângă sferă când acesta se află deja în apă, va fi suficient de mare să învingă forțele de adeziune ce apar la suprafață.

Constantele de fluid, au și ele o importanță în formarea sau nu a cavității. Un fluid cu o densitate mai mică și o tensiune superficială mai mică, va facilita formarea cavității în spatele unei sfere la viteze de impact mai mici față de un fluid cu o densitate și tensiune superficială mai mari.

În Figura 1 (a) se poate observa cum în cazul impactului cu apa al unei sfere netede nu se va forma cavitate în spatele acesteia, iar în cazul unei sfere tot fără rugozitate, dar care cade într-un ulei cu densitate și tensiune superficială mai mică decât cea a apei, va avea loc transport de aer în spatele sferei, Figura 1 (b).

În prima jumătate a secolului XX, majoritatea studiilor au fost legate de aplicații militare, cum ar fi forțele ce acționează asupra hidroavioanelor la aterizare și alunecare [3], [4] sau dezvoltarea bombelor ce cad pe apă [5]. Apariția camerelor rapide a facilitat măsurători cantitative, precum studiul influenței presiunii atmosferice asupra intrării rachetelor în apă [6].

Până la sfârșitul secolului XX și începutul secolului XXI, studiile s-au concentrat pe efectele vâscozității și vâscoelasticității asupra dinamicii cavității formate de o sferă în cădere. Un studiu inițial a analizat accelerația unei sfere într-o soluție elastică de poliacrilamidă, evidențiind mișcarea tranzitorie și oscilațiile inițiale ale

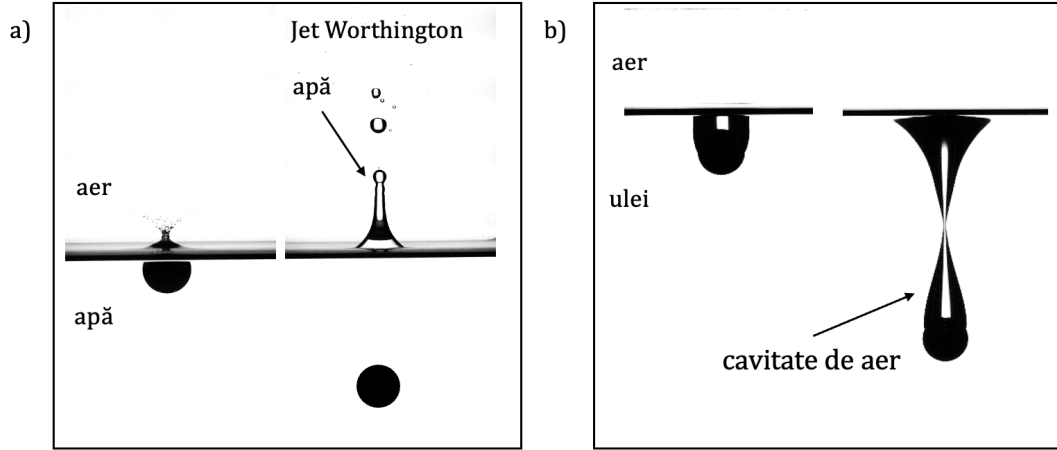


Figura 1: (a) Penetrarea interfeței aer-apă de către o sferă de oțel, netedă, cu viteza de impact $U_0 \approx 1.4m/s$. (b) Penetrarea interfeței aer-ulei de către o sferă de oțel, netedă, cu viteza $U_0 \approx 1.12m/s$.

vitezei [7]. Experimentele cu fluide vâscoelastice au arătat că elasticitatea acestora introduce o asimetrie în interfața cavității de aer și fluid, conducând la un model de rupere a cavității distinct față de fluidele Newtoniene [8]. Această asimetrie a fost observată și în cazul fluidelor slab vâscoase.

Studiile ulterioare au investigat interacțiunea dintre sferele rigide și fluidele stratificate, observându-se instabilități ce nu apar în cazul fluidelor unice [9]–[12].

Proprietățile suprafeței sferelor sau proiectilelor ce cad în fluide influențează semnificativ formarea cavităților de aer. Umectabilitatea suprafeței (hidrofilicitatea sau hidrofobicitatea) afectează morfologia cavității [13], [14]. În Figura 2 I. (a) se observă penetrarea interfeței aer-apă de către o sferă hidrofilă, iar în Figura 2 I. (b) de către una hidrofobă, cu aceeași viteză, $U_0 = 5m/s$, formându-se cavitatea în cazul celei hidrofobe. Figura 2 II ilustrează dependența dintre viteza de impact și unghiul static de contact pentru formarea cavității. Studiile numerice au arătat că suprafețele hidrofobe facilitează formarea cavității datorită mișcării timpurii a

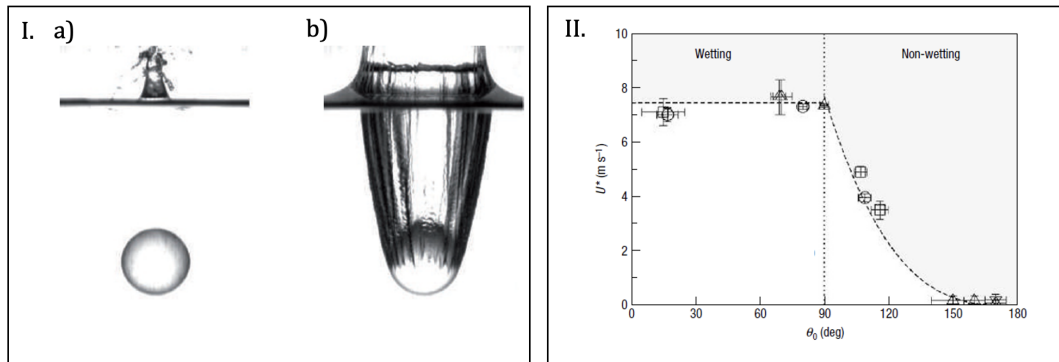


Figura 2: I. (a) Penetrarea interfeței aer-apă de către o sferă hidrofilă și (b) și de către una hidrofobă, cu aceeași viteză, $U_0 = 5m/s$. II. Dependența dintre viteza de impact, U^* , și unghiul de contact intrinsec static, θ_0 , în vederea formării sau nu a cavității la impactul unei sfere. Imagine preluată din [13].

filmului lichid, în timp ce sferile hidrofile generează un jet convergent în sus din cauza filmului lichid care urmează suprafața sferei [15].

Patru tipuri de cavități au fost definite pentru o sferă hidrofobă ce cade în apă: cavitare cvasistatică, cavitare "superficială" (shallow), cavitare "adâncă" (deep) și cavitare "cu închidere la suprafață" (surface seal) [16].

Aceste fenomene sunt relevante și în context geofizic și astrofizic. Impactul meteoritilor poate lichefia impactorul și ținta, având efecte similare cu impacturile solid-lichid la numere Reynolds mari, precum formarea craterelor [17]. Cavitățile joacă un rol esențial în deplasarea corpurilor la interfețele fluidelor [18], [19], iar insectele și păianjenii folosesc tensiunea superficială pentru susținerea greutății pe apă, având suprafețe hidrofobe. În cazul sportivilor ce sar în apă, forțele de impact pot fi studiate prin experimente similare [20].

Motivație

Alegerea subiectului este motivată de relevanța sa pentru aplicații în inginerie, protecția mediului și hidrodinamică. Fenomene precum modificarea formei suprafeței libere a apei, generarea cavităților și bulelor de aer sunt asociate cu impactul corpurilor solide.

Interacțiunea dintre interfața gaz-lichid și forțele ce acționează asupra corpurilor solide imersate, în special rezistența la înaintare, este importantă pentru domenii precum domeniul naval-militar [6], captarea energiei valurilor [21], reactoare cu apă fluidizată [22], schimbătoare de căldură [23] și turbine hidrodinamice [24], [25]. Aceste aplicații sunt relevante și în ingineria chimică [26], microfluidică [27], reologie [28], și biologie [29], implicând studiul modificării interfeței la impactul corpului solid sau lichid.

Teza propune două direcții principale:

1. Dezvoltarea unei proceduri de calcul a volumului de aer introdus într-un lichid prin impactul sferei pe suprafața acestuia.
2. Studiul influenței proprietăților reologice ale lichidului asupra dinamicii sferei și evoluției volumului de aer.

Scop

Scopul central al tezei este studiul experimental al fenomenelor generate de mișcarea sferei într-un lichid, examinând în mod specific impactul sferelor hidrofile în diferite medii fluide. Penetrarea unei interfețe lichide de către o sferă hidrofilă ce cade într-o geometrie limitată implică mai multe etape, și bineînțeles, depinde de proprietățile fluidelor utilizate.

În prezenta teză studiul experimental este axat cu precădere pe analiza influenței proprietăților reologice ale lichidelor asupra corpurilor (Capitolul 5). De asemenea se prezintă rezultate pentru formarea jetului Worthington în apă dar și pentru curgerea ce are loc în fluid după impact în Capitolul 3. Tot în Capitolul 3 se analizează influența pereților asupra mișcării sferei. Precizăm că toate aceste analize se bazează pe rezultatele prezentate în Capitolul 4 dedicat procedurii de extragere a interfeței lichid-aer pe baza analizei imagistice a vizualizărilor realizate.

Aspecte teoretice

Căderea maselor de diferite dimensiuni a fost mereu un subiect de interes pentru oamenii de știință. Cercetările și ecuațiile lui Galileo au pus bazele dezvoltărilor ulterioare ale fizicii, în special lucrările lui Isaac Newton și formularea legii atracției universale. Astfel, în teoriile lui Galileo, asupra unei sfere aflate în cădere liberă acționează doar forța de greutate. În cazul real, în care sfera cade prin aer, asupra sferei acționează și o forță de rezistență la înaintare. În cazul în care mișcarea se face într-un lichid cu densitate ρ_0 și vâscozitate η_0 , asupra sferei va acționa și forța Arhimedică.

Nevoia de a descrie mișcarea particulelor într-un fluid a condus la formularea ecuației Navier-Stokes, care reprezintă fundamentul matematic al dinamicii fluidelor. Această ecuație este derivată din principiul conservării impulsului, în care sunt considerate atât forțele inerțiale, cât și cele de presiune, vâscozitate și forțele externe (gravitația). Pentru o curgere laminară a unui fluid pur vâscos (Newtonian) incompresibil, forma ecuației Navier-Stokes este:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} \right) = \rho_0 \mathbf{b} - \nabla p + \eta_0 \Delta \mathbf{v} \quad (1)$$

unde, cu $\mathbf{v}$ s-a notat vectorul viteză, cu $\mathbf{b}$ forța masică, cu ρ_0 densitatea fluidului, cu η_0 vâscozitatea, iar cu p presiunea. Ecuația (1) împreună cu ecuația de continuitate, (2), formează un sistem de ecuații parțiale neliniare de ordinul 2, în care componentele de viteză $(\mathbf{v}(v_1, v_2, v_3))$ și presiunea sunt necunoscutele. Ecuația de continuitate în acest caz are expresia:

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0. \quad (2)$$

În situații care implică curgeri lente în jurul obiectelor mici sau în fluide foarte vâscoase, influența forțelor de inerție devine neglijabilă în comparație cu forțele vâscoase. Acest lucru se întâmplă atunci când numărul Reynolds este foarte mic ($Re \ll 1$). În astfel de cazuri, curgerea poate fi descrisă folosind aproximarea Stokes, care simplifică ecuația Navier-Stokes prin neglijarea termenilor inerțiali:

$$\nabla p = \eta_0 \Delta \mathbf{v}. \quad (3)$$

În cazul unei mișcări de tip Stokes într-un fluid infinit, pentru a obține forța de rezistență la înaintare ce acționează asupra unei sfere ce se deplasează cu viteza constantă pe direcția (ox) , se trece sistemul de ecuații format din (3) și (2) în coordonate sferice, se definesc condițiile la limită (aderența fluidului la sferă) și în final prin integrarea în jurul unei sfere a eforturilor se obține [30]:

$$F_x = 3\pi\eta_0 d v_0 \quad (4)$$

unde, F_x este forța de rezistență la înaintare, η_0 este vâscozitatea fluidului, d este diametrul sferei, iar v_0 este viteza curgerii în raport cu obiectul, egală cu viteza sferei când aceasta se deplasează într-un fluid în repaus. Relația (4) este unul dintre cele mai importante rezultate din mecanica fluidelor cu multiple aplicații, de exemplu,

a fost utilizată de către Einstein pentru a calcula coeficientul de difuzie al solutului într-un solvent [31].

Prin analiză dimensională se poate ajunge la o altă formă a forței de rezistență la înaintare ce are forma [32], [33]:

$$F_x = \frac{c_x}{2} \rho_0 v_0^2 A \quad (5)$$

unde c_x , coeficientul de rezistență la înaintare se poate obține prin integrări exacte ale sistemului de ecuații sau prin teste experimentale și depinde atât de geometria obiectului cât și de numărul Reynolds.

Egalând ecuațiile (4) și (5) se obține coeficientul de rezistență la înaintare în cazul unei sfere având secțiunea transversală $A = \pi R^2$ care depinde exclusiv de numărul Reynolds ($Re = \frac{\rho d v_0}{\eta_0}$):

$$c_{x0} = \frac{24}{Re} \quad (6)$$

în cazul unui domeniu infinit, departe de orice perete. Acest rezultat a fost obținut de Stokes [34]–[36], pentru $Re \ll 1$.

Pentru cazul în care $Re \approx 1$, cu aproximația Stokes nu se mai obțin valori acceptabile ale coeficientului de rezistență la înaintare. În aceste cazuri, efectele inerțiale, deși mici în comparație cu forțele vâscoase, nu pot fi ignorate complet. Ecuațiile Oseen oferă o aproximare îmbunătățită prin încorporarea efectelor inerțiale de ordinul întâi în ecuațiile Navier-Stokes [36], [37].

Astfel, forța de rezistență la înaintare ce acționează asupra unei sfere, la numere Reynolds mici și moderate are forma ($Re \approx 1$):

$$F_x = 3\pi\eta_0 d v_0 \left(1 + \frac{3}{16} Re\right), \quad (7)$$

iar pentru coeficientul de rezistență la înaintare se obține:

$$c_{xO} = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re\right). \quad (8)$$

Măsura cantitativă a forței de rezistență la înaintare este coeficientul de rezistență la înaintare, c_x . Ecuațiile (6) și (8) se obțin pentru curgeri într-un mediu infinit, departe de pereții domeniului. Când o sferă se mișcă în apropierea unui perete, perturbația pe care o generează în fluidul înconjurător interacționează cu peretele, modificând viteza și distribuția presiunii în jurul sferei. Această interacțiune limitează capacitatea curgerii de a se mișca liber în jurul sferei și provoacă o creștere a forței de rezistență la înaintare. Astfel, în cazul unui fluid finit (pereții domeniului au influență asupra mișcării, $d \sim a$, $d < a$, a fiind dimensiunea caracteristică a recipientului - latura pătratului sau diametrul tubului) coeficientul de rezistență la înaintare depinde de numărul Reynolds și de configurația domeniului (Figura 3 (b)) [38]:

$$c_x(Re, \frac{d}{a}, \frac{\delta}{a}, \frac{\varepsilon}{a}) \quad (9)$$

unde, δ este excentricitatea sferei și ε este distanța dintre sferă și fundul vasului.

În cazul mișcării unei sfere de diametru d într-un tub infinit ($\varepsilon \rightarrow \infty$) de diametru D , iar sfera se deplasează la o distanță δ față de axa de simetrie a tubului,

forța de rezistență la înaintare depinde de o funcție legată de raportul dintre δ și R ($f(\frac{\delta}{R})$), precum și de raportul dintre d și D ($\frac{d}{D}$). Valorile funcției $f(\frac{\delta}{D})$ se găsesc în literatură [38].

Considerând o sferă ce cade lent ($Re < 1$) într-un fluid vâscos, asupra sa, pe lângă forța de greutate (F_G), vor acționa forțe de presiune (forța arhimedică, $F_A = \rho_0 V_s g$) și de rezistență la înaintare F_x . Astfel, într-o mișcare cvasi-staționară într-un mediu fluid Newtonian infinit, sfera se deplasează sub acțiunea greutății proprii, F_G , cu viteza constantă, v_0 , relația de echilibru a forțelor pe direcția deplasării fiind:

$$F_x = F_G - F_A \quad (10)$$

Ecuția de echilibru (10) în prezența inerției devine mult mai complicată [39]:

$$\rho_s V_s \dot{v} = F_G - F_A - F_x - F_{ma} - F_B \quad (11)$$

unde, termenul din partea stângă a relației este forța de inerție ma , iar F_{ma} și F_B sunt forța generată de așa numita masă adițională, respectiv, forța Basset.

Studii experimentale

În acest capitol se prezintă câteva studii experimentale efectuate în prima parte a perioadei de doctorale. Ele au fost axate pe investigații experimentale legate de hidrodinamica generată în fluide vâscoase și viscoelastice de mișcarea unui corp sferic (solid sau fluid). Cu precădere, cercetările s-au concentrat pe analiza experimentală a dinamicii sferei solide imersate în lichide aflate în spații limitate. Rezultatele au pus în evidență influența pereților dar și a forței magnetice asupra deplasării unei sfere solide în lichide. Totodată, s-a studiat experimental și numeric efectul deplasării unui corp într-un mediu fluid, urmărindu-se atât dinamica vârtejurilor formate, cât și evoluția interfeței de separare lichid-aer. În final s-au pus în evidență fenomene legate de impactul unei sfere solide pe suprafața liberă a unui lichid. Formarea cavităților de aer după impactul sferei solide pe o suprafață lichidă va constitui principalul studiu al prezentei teze de doctorat.

Influența peretelui vasului asupra mișcării sferei

Pentru a studia influența peretelui vasului asupra mișcării unei sfere, s-a utilizat o sferă de oțel cu diametrul $d = 10 \text{ mm}$ și masa $m = 4.08 \text{ g}$. Sfera este lăsată să cadă sub acțiunea greutății sale proprii, pornind din repaus ($v_0 = 0$), când sfera se află deja sub interfața de separare dintre aer și fluid. Fluidul de lucru este un ulei foarte vâscos ce are densitatea $\rho_0 = 960 \text{ kg/m}^3$, vâscozitatea $\eta_0 = 0.98 \text{ Pas}$ (la temperatura de 23°C) și se află într-un recipient de sticlă cu secțiunea pătrată de latură $a = 50 \text{ mm}$. Sfera este lăsată să cadă la distanțe δ diferite față de perete și se urmărește variația distanței H pe care o parcurge sfera în intervalul $z \in [80, 130] \text{ cm}$ ($H \in [0, 50] \text{ cm}$), Figura 3 (a). Schema configurației experimentale este prezentată în Figura 3 (b). În vederea realizării măsurătorilor, imaginile au fost surprinse cu o cameră rapidă.

În cadrul experimentelor s-au considerat patru distanțe față de perete, $\delta \in \{0; 2; 11; 20\} \text{ mm}$, unde $\delta = 0 \text{ mm}$ înseamnă că sfera s-a lansat chiar în colțul recipientului. Variația H și v în timp pentru cele patru distanțe considerate se observă

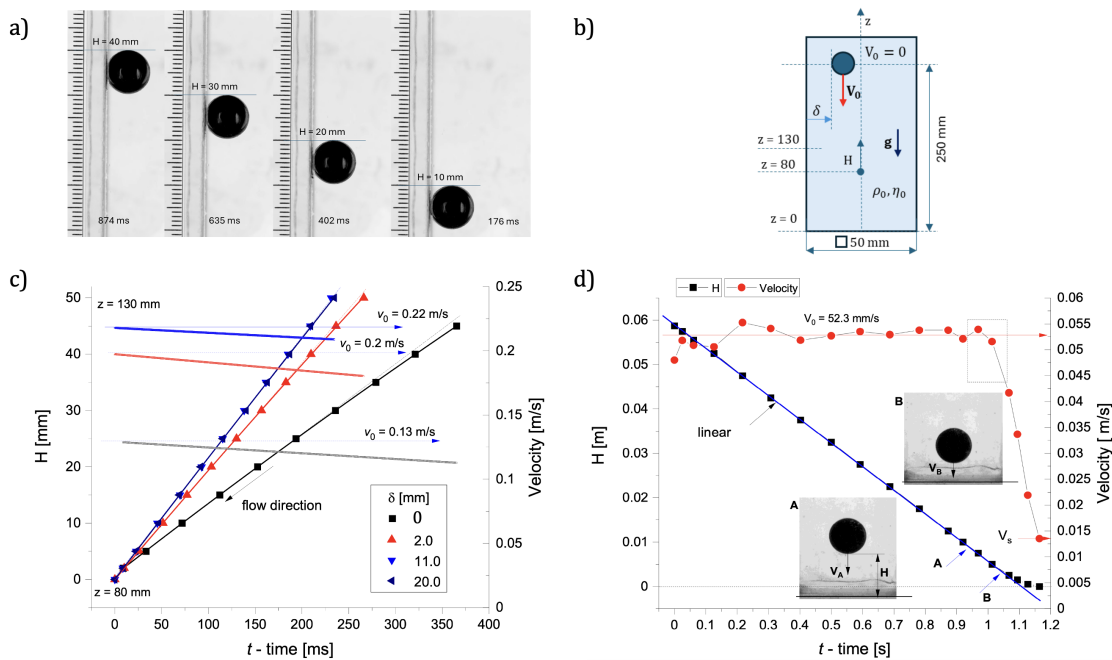


Figura 3: (a) Serii de fotografii ale sferei în cădere în imediata vecinătate a peretelui, corespunzătoare pentru diferite înălțimi H și la timpi t (sfera alunecând la colțul vasului, cazul $\delta = 0 \text{ mm}$). (b) Schema configurației experimentale pentru punerea în evidență a influenței peretelui ce acționează asupra unei sfere ce cade sub greutatea proprii într-un fluid vâcos. (c) Variația distanței parcurse, H , și a vitezei v pentru cele patru puncte de lansare, aflate la distanțe δ față de perete. Viteza sferei are o mică creștere de la $H = 50 \text{ mm}$ la $H = 0 \text{ mm}$, unde atinge viteza constantă v_0 . Dependența liniară $H(t)$ este marcată de liniile punctate. (d) Variația în timp a distanței dintre sferă și capătul vasului, H , și a vitezei sferei, v , respectiv a accelerației, a . O mică creștere a vitezei este înregistrată înainte de apariția efectului de capăt care reduce viteza de la v_0 la v_s .

în Figura 3 (c), unde viteza s-a obținut prin derivarea grafică a datelor măsurate $H(t)$. Dependențele $H(t)$ sunt aproape liniare, vitezele crescând ușor odată cu descreșterea coordonatei z . Cu o aproximare corectă se poate considera regimul de curgere în intervalul înregistrat ca, cvasi-staționar.

În experimentele prezentate se evidențiază influența semnificativă a peretelui asupra mișcării sferei, atât prin reducerea vitezei la distanțe mici față de perete, cât și prin creșterea coeficientului de rezistență la înaintare. Această observație este așteptată și bine cunoscută [38], [40]–[43], însă rezultate bazate pe experimente efectuate în geometrii limitate cu secțiune transversală pătrată nu au fost raportate în literatură. Pentru un raport d/a (în cazul geometriei pătrate), coeficientul de rezistență la înaintare prezintă o creștere comparabilă cu cea observată pentru un raport d/D (în cazul geometriei circulare) în raport cu coeficientul de rezistență la înaintare calculat pentru un mediu infinit. Această similitudine indică faptul că influența confinării asupra mișcării sferei este determinată în principal de raportul dintre dimensiunea sferei și dimensiunea caracteristică a secțiunii transversale, indiferent de forma acesteia (pătrată sau circulară) pentru numărul Reynolds considerat.

Influența efectului de capăt asupra mișcării sferei

Pentru a pune în evidență efectul de capăt (atunci când sfera se apropie de fundului vasului) asupra mișcării unei sfere s-a considerat un set-up experimental similar cu cel utilizat în secțiunea 3 (b). S-a utilizat aceeași sferă ($d = 10\text{ mm}$) și același ulei foarte vâcos ($\rho_0 = 960\text{ kg/m}^3$, $\eta_0 = 0.98\text{ Pas}$), dar recipientul utilizat de data aceasta avea o secțiune pătrată de latură $a = 30\text{ mm}$. Sfera este lansată de la înălțime în centrul vasului (la distanță egală de ambii pereți) și cade sub acțiunea greutății proprii, pătrunzând în fluid cu viteza de impact $U_0 = 1.4\text{ m/s}$. Se urmărește variația dintre sferă și capătul vasului în intervalul $z \in [0, 60]\text{ mm}$ (unde $z = 0\text{ mm}$ reprezintă capătul vasului).

În Figura 3 (d) este reprezentată variația în timp a distanței dintre sferă și capătul vasului și a vitezei sferei. Se poate observa că variația vitezei este una nemonotonă, putând fi definite trei zone: (i) zonă cu curgere staționară; (ii) zonă de tranziție; (iii) zonă de decelerare.

Rezultatele confirmă influența semnificativă a efectului de capăt asupra mișcării sferei în apropierea capătului vasului, manifestată printr-o decelerare bruscă, o scădere a numărului Reynolds și o creștere a coeficientului de rezistență la înaintare. Identificarea celor trei regimuri distincte de mișcare evidențiază complexitatea fenomenului și importanța confinării asupra dinamicii sferelor.

Dinamica interfețelor fluide și formarea vortexurilor

În acest subcapitol, prin utilizarea tehnicii de măsurare PIV, s-a analizat câmpul de curgere generat de o sferă care cade într-un vas în care se află ulei de floarea soarelui. Tehnica de măsurare PIV (Particle Image Velocimetry) este o tehnică de măsurare optică, neinvazivă, utilizată pentru a captura și analiza curgerea fluidelor. În Figura 4 (a) este prezentată schema set-up-ului experimental, utilizat pentru a analiza curgerea din jurul unei sfere după impactul cu o suprafață fluidă. Tehnica oferă informații detaliate despre viteza și direcția particulelor ce se află în suspensie într-un fluid prin captarea unor imagini de mare viteză ale particulelor trasoare introduse în flux [44]. Datorită simetriei interfeței, curgerea în jurul cavității este una simetrică, se identifică zone de recirculare și structuri de tip vortex Figura 4 (c). Tehnica PIV oferă posibilitatea de a determina experimental, atât calitativ cât și cantitativ, structurile de curgere generate de sfere ce cad în diferite fluide.

Complementar analizei PIV, s-a analizat numeric formarea unei picături sferice de ulei vâcos în aer Figura 4 (b). Cazul studiat este definit de următoarele condiții: uleiul siliconic cu proprietățile $\rho = 870\text{ kg/m}^3$, $\eta = 0.2\text{ Pas}$ și $\sigma = 0.025\text{ N/m}$, curge în aer printr-un tub cu diametrul $d = 2.21\text{ mm}$ cu o viteză de $v_0 = 10\text{ mm/s}$, corespunzătoare regimului de picurare.

Fenomenul formării cavității în urma impactului unei sfere cu o suprafață fluidă prezintă similitudini semnificative cu procesul de generare a picăturilor, ambele fiind guvernate de dinamica interfeței fluidului și de interacțiunea dintre forțele de inerție, vâscozitate și tensiune superficială. În cazul impactului sferei, deformarea inițială a suprafeței fluide și colapsul cavității generează structuri complexe de curgere, care pot fi comparate cu cele observate în jurul picăturilor în procesul de desprindere. În acest caz corpul lichid (picătura) deformează fluidul (aerul) în care este imersat.

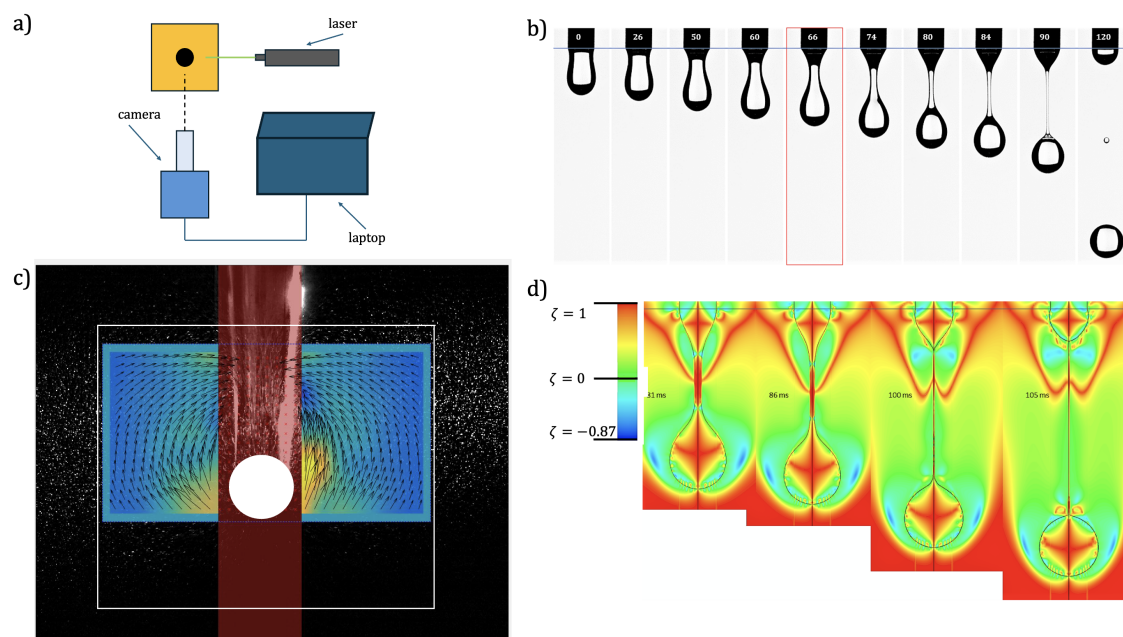


Figura 4: (a) Schema set-up-ului experimental utilizat pentru a pune în evidență curgerea ce are loc în jurul unui sferă după impactul cu o suprafață fluidă. (b) Dinamica picăturii de la formare la desprindere (ulei siliconic în aer). (c) Curgerea în jurul cavității de aer ce se formează la impactul unei sfere în ulei de floarea soarelui. (d) Distribuția coeficientului ζ în interiorul picăturii și în vecinătatea acesteia.

Dacă la impactul sferei solide în lichid se generează un filament de aer în lichid, în cazul formării picăturii, filamentul este lichid în aer.

Atât în studiile experimentale (PIV), cât și în cele numerice, apariția și comportamentul structurilor vorticiale relevă asemănări. În cazul sferei care impactează suprafața fluidului, măsurătorile PIV arată formarea de vortexuri în lichid în apropierea sferei și în vecinătatea cavității generate în urma impactului. În mod similar, în timpul formării picăturii, rezultatele numerice ilustrează prezența vortexurilor în aer în apropierea picăturii și de-a lungul filamentului Figura 4 (d), dinamica acestora fiind influențată de interacțiunea dintre inerție, capilaritate și vâscozitate. Ambele fenomene evidențiază rolul deformării interfeței lichid-aer sau aer-lichid în generarea și menținerea regiunilor în care apar vortexuri, fie în jurul unui corp solid care interacționează cu un lichid, fie în jurul unui filament lichid care interacționează cu aerul. Aceste paralele subliniază universalitatea dinamicii curgerii generate într-un fluid (aer sau lichid), guvernată de principii fizice similare, în ciuda diferențelor de geometrie și regim de curgere.

Mișcarea sferelor într-un tub sub acțiunea forțelor magnetice

Studiul prezentat în acest subcapitol are ca scop analiza dinamicii sferelor ce se deplasează sub acțiunea forțelor gravitaționale și magnetice în tuburi cilindrice cu diametre apropiate de cele ale sferelor. Se urmăresc două fenomene: (i) apariția mișcărilor secundare induse sferei datorită influenței pereților (curgerea fluidului dizlocat de sferă în căderea sa are loc în spații mici, raportul dintre diametrul sferei d și al tubului D fiind în domeniul $d/D \in [0.75, 0.96]$); (ii) deplasarea accelerată a

sferei în apropierea punctului de impact datorită efectului indus de forțele magnetice.

Configurația experimentală a constat din doi cilindri de sticlă umpluți cu fluidele de test (Figura 5 (a)), având diametrele de $D_1 \approx 26 \text{ mm}$ (lungimea $l = 1.5 \text{ m}$) și respectiv $D_2 = 6.5 \text{ mm}$ (tub calibrat). Au fost utilizate trei seturi de sfere: (i) sfere magnetice de turmalină cu diametre medii în domeniul $d_M \in (24.35 - 25.4) \text{ mm}$, (ii) sfere magnetice de fier cu diametrul de $d_m = 4.87 \text{ mm}$ și sfere de fier cu diametrele $d \in \{7; 8.08; 10; 14.3; 17.98; 19.93; 22.2\} \text{ mm}$. Densitatea turmalinei este de aproximativ 3000 kg/m^3 , iar densitatea fierului este de 7830 kg/m^3 . S-au realizat filmări cu trei camere în funcție de scala temporală caracteristică fenomenului. În timpul experimentelor au fost utilizate fluide Newtoniene dar și viscoelastice.

Experimentele cu sfere magnetice în tuburi au evidențiat mișcări secundare, precum oscilații (Figura 5 (b)) sau rotația sferei, care apar în aceste configurații. Aceste mișcări depind atât de excentricitatea sferei, cât și de raportul dintre raza sferei și raza tubului. Frecvența oscilațiilor este influențată de vâscozitatea fluidului: în cazul X-fluid, frecvența oscilațiilor este mai mică decât în cazul apei.

Mișcarea sferei care cade în interiorul tubului când în capătul tubului se află o altă sferă magnetică poate fi împărțită în patru zone: (1) cădere liberă cu viteză constantă, (2) cădere accelerată, cu viteza $v(t)$, datorită forței magnetice, (3) impact și (4) cădere decelerată a sferelor cuplate în urma impactului, Figura 5 (c). Pentru o anumită configurație de test, vâscozitatea fluidului nu influențează semnificativ accelerația sferei și variația acesteia în timp.

În unele cazuri, sfera aflată inițial în repaus la bază începe să se ridice în interiorul tubului sub influența forței magnetice, pe măsură ce sfera care cade se apropie. Impactul are loc la o anumită distanță față de bază, distanță care este

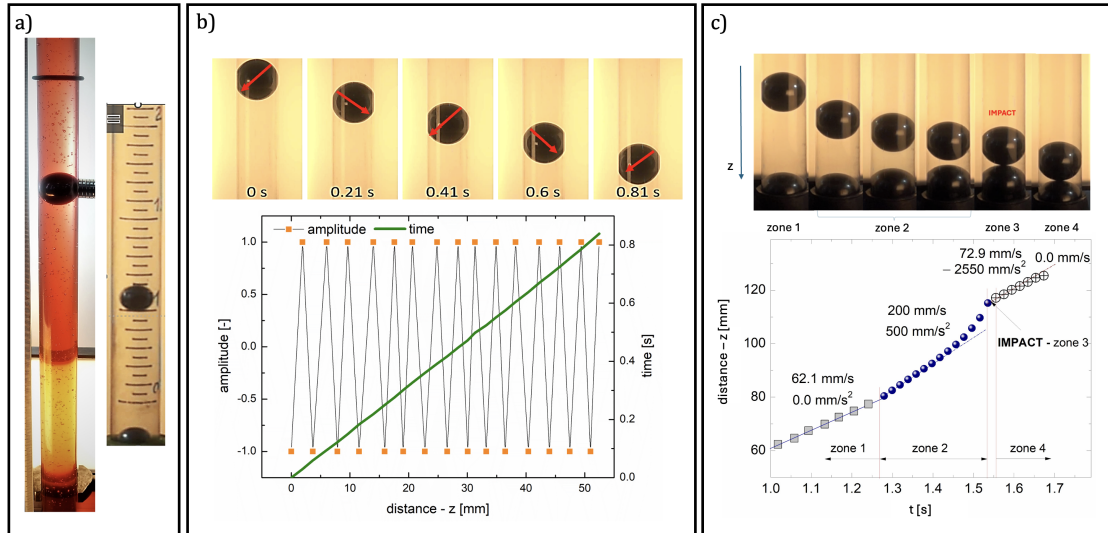


Figura 5: (a) Instalația experimentală formată din cilindru de sticlă cu diametrul $D_1 \approx 26 \text{ mm}$ și tubul calibrat cu diametrul $D_2 = 6.5 \text{ mm}$. (b) Reprezentare schematică a oscilațiilor pentru o sferă din turmalină cu diametrul $d = 25 \text{ mm}$, în tubul cu diametru $D_1 \approx 26 \text{ mm}$ și variația amplitudinii adimensionale în funcție de distanța parcursă de sferă, respectiv variația distanței în timp. (c) Cele patru zone a mișcării sferei în tub (apă, sferă de turmalină, $d_M = 25 \text{ mm}$, $D_1 \approx 26 \text{ mm}$).

direct proporțională cu vâscozitatea fluidului și invers proporțională cu viteza de cădere liberă v_0 .

Experimentele efectuate cu diferite fluide și sfere dezvăluie același tipar al variației vitezei $v(z) \equiv \dot{z}$ de-a lungul tubului, de la viteza constantă v_0 până la valoarea maximă v_s (la impactul cu a doua sferă). Se remarcă că vitezele v_0 și v_s scad cu creșterea vâscozității fluidelor, ceea ce era de așteptat.

Formarea jetului Worthington

Formarea jeturilor Worthington este un fenomen ce poate fi observat atunci când o picătură sau un corp lovește o suprafață lichidă, impactul creând un jet vertical de lichid care se ridică deasupra suprafeței inițiale de separare aer-fluid. Ruperea jetului Worthington în picături este parțial guvernată de instabilitatea Rayleigh-Plateau. Acest efect explică de ce o coloană de lichid tinde să se rupă în picături [45].

Cazul unei sfere hidrofile care cade în apă cu o viteză sub pragul necesar pentru a forma o cavitate este ilustrată în Figura 6 (a). În cadrul acestor impacturi apar două fenomene: (i) sfera începe să pătrundă în apă, iar în urma ei are loc o stropire sau un jet subțire, în funcție de viteza impactului ($t = 4\text{ ms}$), și (ii) pe măsură ce sfera traversează interfața aer-apă, se formează un al doilea jet, mai gros, care în final se descompune în picături ($t = 11.5\text{ ms}$). Trebuie menționat că viteza acestui jet din urmă este mai mică față de primul. În Figura 6 (a) cu $H'(t)$ s-a notat înălțimea jetului secund.

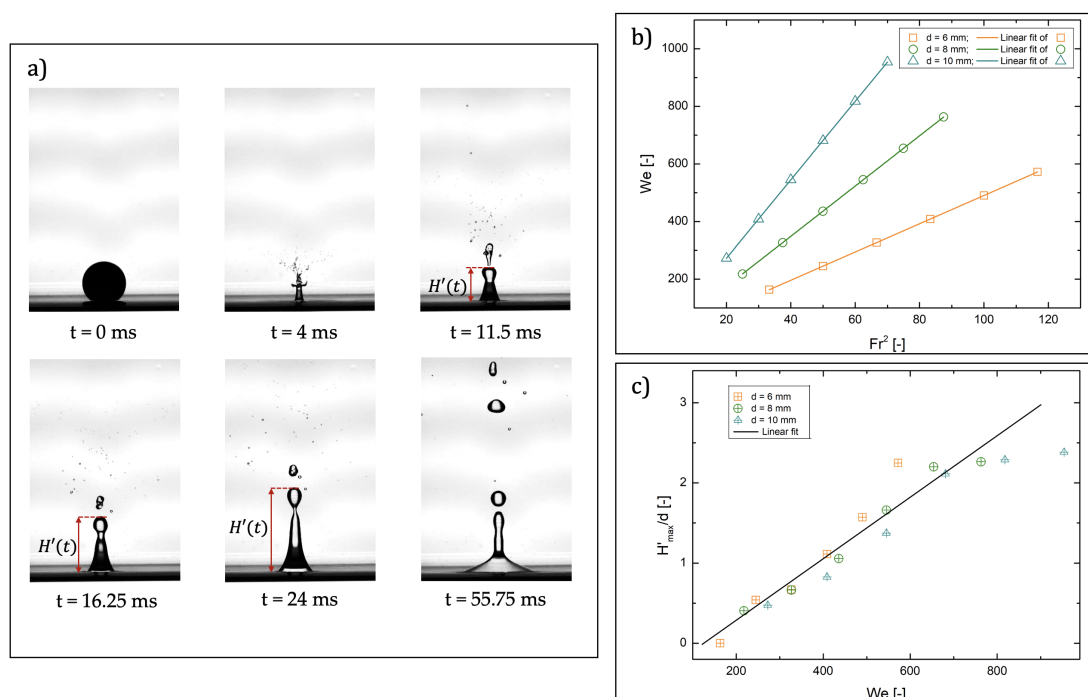


Figura 6: (a) Căderea unei sfere hidrofile de oțel ($d = 10\text{ mm}$) într-un vas în care se află apă cu viteza de impact $U_0 = 2.62\text{ m/s}$. (b) Numărul Weber care descrie cel de-al doilea jet Worthington în cazul sferelor hidrofile reprezentat în raport cu pătratul numărului Froude. (c) Variația raportului dintre înălțimea maximă a jetului Worthington, H'_{max} și a diametrului sferei, d , cu numărul Weber.

În cadrul experimentelor realizate pentru a studia înălțimea maximă a jeturilor Worthington generate de impactul sferelor hidrofile cu apă, s-au utilizat un vas cu secțiune pătrată, având latura $a = 10\text{ cm}$. Pe parcursul experimentelor, s-au folosit sfere de oțel cu trei diametre diferite, $d \in \{6; 8; 10\}\text{ mm}$. S-au considerat șase viteze de impact în intervalul $U_0 \in [1.4, 2.62]\text{ m/s}$. Similar cu situația unei picături ce cade într-un fluid, inerția sferei și tensiunea interfacială influențează puternic dinamica impactului. Astfel, două numere adimensionale esențiale în explicarea fenomenului sunt numerele Froude și Weber.

Variația liniară observată între numărul Weber și pătratul numărului Froude (Figura 6 (b)) sugerează o interacțiune puternică între forțele de inerție, gravitaționale și de tensiune superficială în determinarea dinamicii jetului. Se observă că panta relației crește odată cu diametrul sferei, ceea ce indică faptul că sferele mai mari amplifică efectul forțelor de inerție în raport cu tensiunea superficială și gravitația. Acest lucru se datorează faptului că sferele mai mari generează perturbații mai puternice la impact, ceea ce duce la formarea unor jeturi mai pronunțate. Variația H'_{max} cu numărul Weber este una liniară fără ca dimensiunea sferei să reprezinte un factor în ceea ce privește variația (Figura 6 (c)).

Caracterizare experimentală și metode numerice de trasare a interfeței fluid-fluid

Măsurarea unghiurilor de contact pe suprafețe sferice

Caracterul hidrofil sau hidrofob al sferelor/ proiectilelor are implicații majore în dinamica acestora când impactează suprafețe fluide. Această proprietate este strâns legată de fenomenul de transport de aer (formare de cavitare) în lichide la intrarea corpurilor solide [13], [46], [47]. Astfel, este esențial să cunoaștem cu precizie proprietatea de umectabilitate a suprafețelor solide, proprietate caracterizată prin unghiul de contact al picăturii de lichid cu suprafața respectivă.

O suprafață hidrofilă este definită ca având un unghi de contact intrinsec mai mic de 90° ($\theta' < 90^\circ$) pentru o picătură de apă aflată pe o suprafață plană, în timp ce o suprafață hidrofobă va genera un unghi de contact mai mare de 90° ($\theta' > 90^\circ$).

Pe lângă această abordare statică descrisă mai sus (Figura 7 (a)), există și o abordare dinamică a unghiurilor de contact. Astfel, se poate vorbi despre unghiul de contact aparent de avans, care apare atunci când se adaugă lichid la picătura inițială [48].

Dacă se adaugă apă pe o suprafață plană care are margini ascuțite la ambele capete, după ce volumul de apă începe să acopere întreaga zonă, unghiul de contact la margini va crește. Acesta este definit ca unghiul de contact aparent de avans (θ_a):

$$\theta_a = \theta + (\pi - \omega), \quad (12)$$

unde θ este unghiul de contact intrinsec de avans și ω este unghiul de la marginea suprafeței solide [49]. Astfel, în caz static, se vorbește despre unghiul de contact intrinsec, θ' , iar în caz dinamic, despre unghiul de contact intrinsec de avans, θ .

Unghiul de contact de avans se poate măsura și pe suprafețe sferice folosind aceeași metodă prin care se adaugă lichid la picătura inițială. În Figura 7 (b)

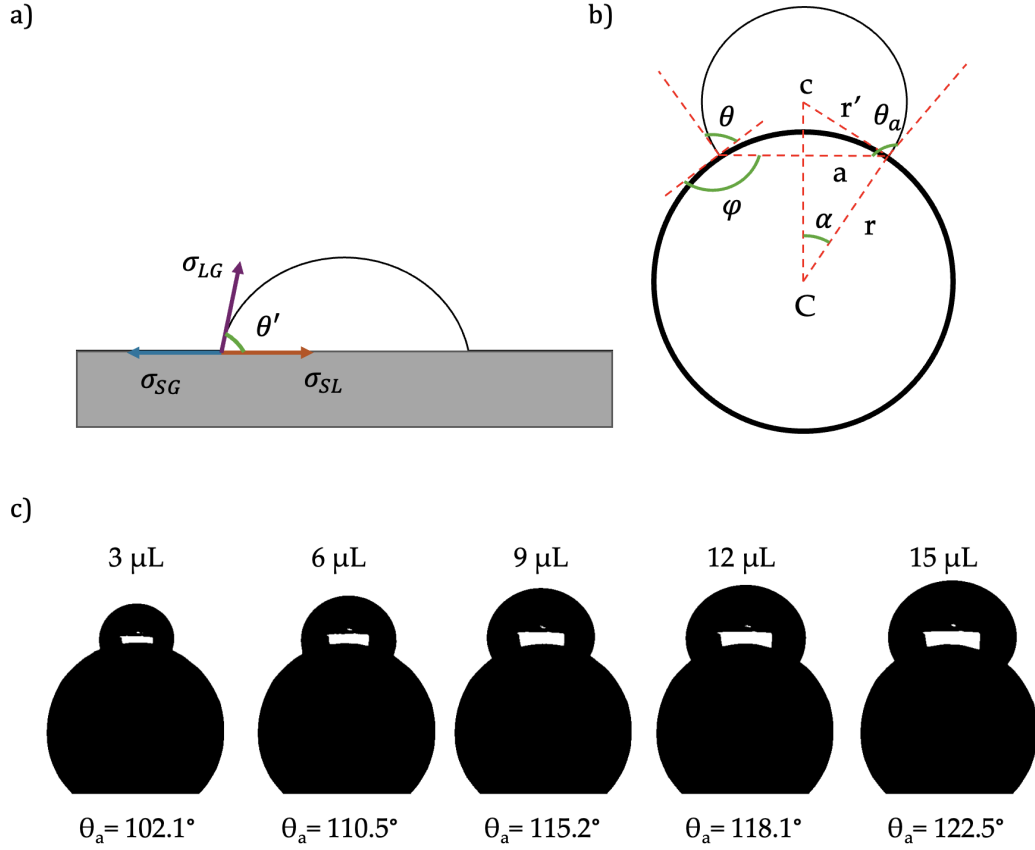


Figura 7: (a) Reprezentarea schematică al unei picături pe o suprafață plană ($\sigma_{LG} \equiv \sigma$ tensiunea superficială) în caz static și (b) pe o suprafață sferică în caz dinamic (picăturii inițiale se mai adaugă lichid). (c) Volume de apă depuse în pași incrementali pe o sferă din neodim cu diametrul $d = 5\text{mm}$. Unghiul de contact aparent de avans crește la fiecare pas pe măsură ce volumul de apă se răspândește pe suprafața sferică.

este ilustrată o picătură aflată pe suprafața unei sfere, care formează în contact cu suprafața sferică, unghiul de contact de avans θ . Măsurarea manuală a unghiului θ poate fi extrem de dificilă în această configurație, astfel s-au propus două ecuații care pot fi utilizate pentru calcularea unghiului θ . În ecuațiile următoare, a reprezintă jumătate din distanța dintre cele două puncte extreme ale picăturii pe sferă, r este raza sferei, iar r' este raza estimată a picăturii:

$$\theta = \theta_a - \arcsin \frac{a}{r}, \quad (13)$$

$$\theta_a = \arctan \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta - \frac{r'}{r}} \right). \quad (14)$$

Apă ultrapură cu o vâscozitate de $\eta \approx 1\text{mPas}$, densitate de $\rho \approx 997\text{kg/m}^3$ și tensiune superficială de $\sigma = 72\text{mN/m}$, a fost utilizată pentru a măsura unghiurile de contact intrinseci de avans pe suprafețe plane și unghiurile de contact aparente de avans pe suprafețe sferice.

În timpul experimentelor, s-au folosit patru sfere de neodim placate cu nichel, având diametre de 5 mm, 8 mm, 10 mm și 12.7 mm, și trei bile de rulmenți (sfere) din oțel placate cu crom, cu diametre de 6 mm, 8 mm și 10 mm. Ambele tipuri de sfere au fost menținute imobilizate în timpul experimentelor utilizând un magnet plat. De asemenea, au fost utilizate două suprafețe plane din aceleași materiale pentru a măsura unghiurile de contact intrinseci și a compara valorile obținute cu cele calculate folosind ecuațiile (13) și (14).

Volume de apă au fost depuse pe suprafețele menționate anterior după cum urmează: la început, o picătură de $1\mu L$ a fost depusă pe vârful sferei (sau pe suprafața plană), apoi s-au adăugat $2\mu L$; ulterior, s-au adăugat în pași de câte $3\mu L$ apă ultrapură până s-a atins volumul de $15\mu L$. La fiecare volum de lichid adăugat s-a capturat o imagine. Pentru a ne asigura că volumele depuse la fiecare pas sunt exacte, s-a utilizat o seringă de sticlă Hamilton de $10\mu L$, considerată standard pentru măsurători de mare precizie. În Figura 7 (c) sunt prezentate imaginile capturate în timpul depunerii apei pe sfera de neodim cu diametrul $d = 5mm$. La fiecare pas, unghiul de contact aparent de avans (θ_a) crește din cauza curburii suprafeței.

Următoarele concluzii se pot trage: (i) unghiul de contact aparent de avans crește odată cu volumul de apă depus pe suprafețele curbe (Figura 8 (a)); (ii) în cazul suprafețelor realizate din același material, un diametru mai mare duce la un unghi de contact aparent de avans mai mic, comparativ cu un diametru mai mic (Figura 8 (a)); (iii) variațiile unghiului de contact aparent de avans sunt mai semnificative în cazul sferelor cu diametre mai mici (Figura 8 (a)); (iv) sferele din oțel sunt mai hidrofile comparativ cu sferele din neodim (Figura 8 (b)); (v) valorile obținute pentru unghiul de contact de avans cu ecuațiile (13) și (13) sunt aproximativ egale (Figura 8 (c)).

Valorile calculate cu ecuațiile (13) și (14) corespund într-un grad ridicat cu unghiurile de contact intrinseci de avans măsurate pe suprafețe plane orizontale (Figura 8 (d)). Având în vedere costurile ridicate ale echipamentelor care pot măsura unghiurile de contact atât pe suprafețe sferice, cât și pe cele plane, procedura prezentată în acest studiu poate constitui o alternativă utilă pentru obținerea unor rezultate precise.

Analiza cantitativă a datelor experimentale cu MATLAB

Calitatea imaginilor utilizate în această teză este esențială pentru măsurători și analize precise ale sferelor în cădere și pentru trasarea interfețelor fluide lichid-aer. Achiziția imaginilor a fost realizată utilizând două camere de mare viteză, Fastcam Mini UX cu un obiectiv macro (Tamron SP AF 90 mm f/2.8) și Phantom VEO-E 340L, la viteze de achiziție între 2.800 fps și 6.250 fps. Aceste viteze mari de achiziție au asigurat capturarea mișcării sferei, respectiv a interfeței cavității ce se formează în sîjalul sferei, fără a pierde informații spatio-temporale, în timp ce precizia optică a obiectivului macro și iluminarea controlată au îmbunătățit acuratețea spațială.

Pentru a asigura o calitate optimă a imaginilor, a fost utilizată o sursă de lumină Dolan Jenner Industries Fiber-Lite Mi-150. Iluminarea adecvată este crucială în imagistica de mare viteză, deoarece minimizează estomparea ("blur") cauzată de mișcare și îmbunătățește vizibilitatea conturului sferei, aspect esențial pentru măsurători precise. Utilizarea unor condiții de iluminare controlate a redus zgomotul imaginii, a asigurat un contrast constant și a ajutat la delimitarea sferei de fundal,

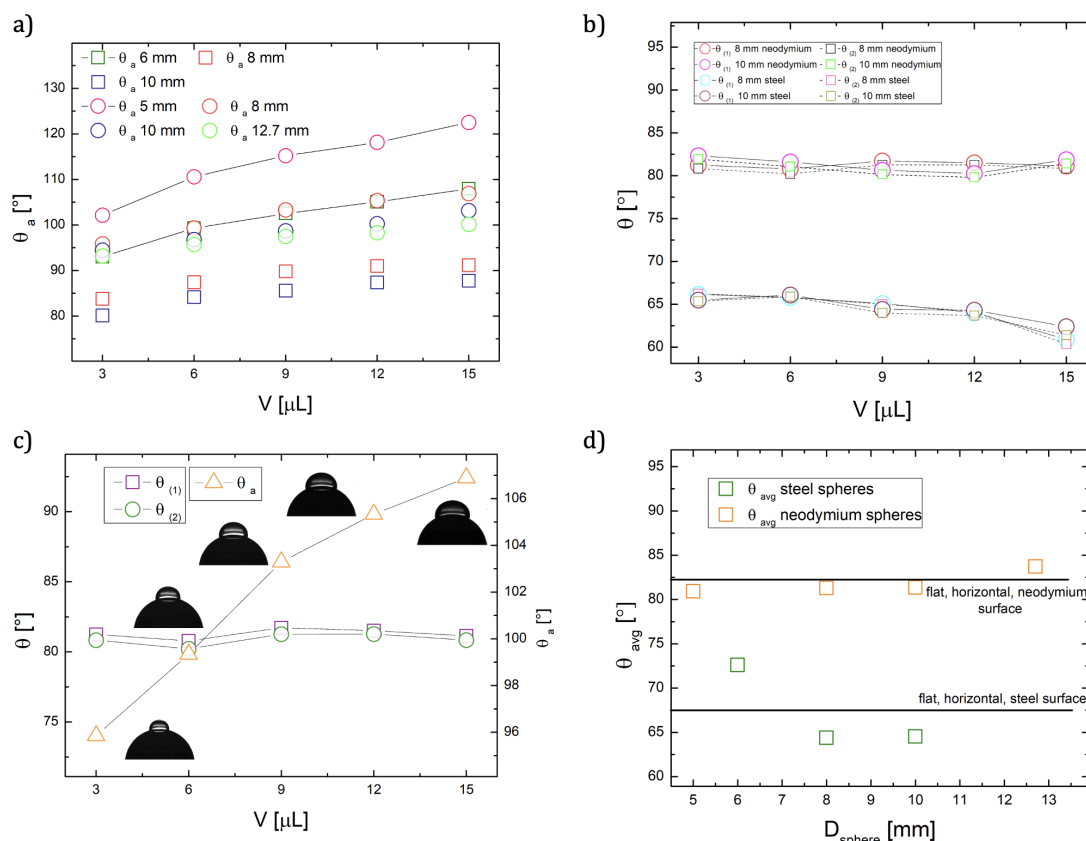


Figura 8: (a) Măsurători experimentale ale unghiului de contact aparent de avans în funcție de volumul de apă depus pe sfere din oțel (simbol pătrat) și neodim (simbol cerc). (b) Valorile unghiului de contact intrinsec de avans calculate pentru sferele de oțel și neodim cu diametre de 8 mm și 10 mm utilizând ecuațiile (13) și (14), în funcție de volumul de apă. (c) Variația unghiului de contact intrinsec de avans calculat cu ecuațiile (13) și (14) și a unghiului de contact aparent de avans măsurat pentru sfera de neodim cu diametrul de 8 mm. Pentru fiecare volum adăugat, imaginile capturate sunt prezentate. (d) Valorile medii ale unghiului de contact intrinsec pentru fiecare sferă comparate cu unghiul de contact intrinsec măsurat pe o suprafață plană orizontală pentru ambele materiale.

chiar și la viteze mari de achiziție.

Principalele etape de preprocesare au inclus: (i) decupare, (ii) reducerea zgomotului și (iii) îmbunătățirea conturului. Diferite tehnici au fost aplicate selectiv, în funcție de calitatea inițială a imaginilor, asigurând un echilibru optim între îmbunătățirea vizibilității interfeței și evitarea introducerii de artefacte.

Pentru a converti măsurătorile din pixeli în unități fizice, calibrarea a fost realizată utilizând software-ul Fiji (o distribuție a ImageJ). În fiecare set de imagini, diametrul sferei (cunoscut din măsurători anterioare) a servit drept referință pentru calibrare. Pentru fiecare set de imagini, au fost efectuate 6–8 măsurători ale diametrului sferei și s-a calculat media acestora.

În ansamblu, această abordare a procesării și calibrării imaginilor a asigurat că datele obținute sunt robuste și de încredere, formând baza pentru măsurători precise. Erorile, de ordinul a 50-150 micrometri, sunt bine încadrate în limitele acceptabile pentru scopurile studiului și contribuie la acuratețea generală a rezultatelor experimentale.

S-au scris coduri MATLAB în vederea urmăririi variației (i) adâncimii sferei, (ii) diametrului minim al cavității și (iii) volumelor cavităților. Urmărirea acestor variații au la bază o tehnică de segmentare bine definită, prin care conturul interfeței poate fi detectat cu o precizie ridicată. Pentru a calcula volumul cavității, respectiv a bulei ce se menține de sferă după ruperea cavității, conturul detectat se rotește pentru a putea fi aproximat cu un polinom, după care are loc reconstituirea 3D și calculul volumului, Figura 9.

S-a constatat că erorile potențiale generate de segmentarea imaginilor sunt de aproximativ $\pm 2.5\%$. Această variație este considerată acceptabilă, ceea ce confirmă că metoda de binarizare aleasă rămâne fiabilă în limitele toleranței experimentale.

Utilitatea acestor coduri depășește aplicațiile directe menționate. Metodele și algoritmi utilizați pot fi adaptați pentru alte analize semnificative, oferind perspective valoroase asupra dinamicii cavității și nu numai:

- i. Determinarea și modelarea interfeței dintre două fluide imiscibile: Aceasta oferă informații despre geometria interfeței în timpul mișcării, permițând analiza unor procese fizice fundamentale (Figura 10 (a));
- ii. Calculul curburii unei suprafețe: Astfel se pot analiza caracteristicile geometrice locale ale cavității. Totodată, descriptori diferiți ai cavității (volum, diametru minim, curbura, etc.) pot fi combinați în ideea descrierii fluidelor (Figura 10 (b));
- iii. Variația interfeței lichid-aer la impactul unei sfere pe o suprafață lichidă în repaus: Prin monitorizarea dinamicii razei orificiului creat de cavitate, se definesc două regimuri ce pot fi approximate foarte bine ($R^2 > 0.99$) cu polinoame de grad 1 (în cazul impactului în ulei de floarea soarelui): primul regim (I) din momentul penetrării interfeței până când cavitatea începe să se subțieze și regimul al doilea (II) din momentul în care cavitatea începe să piardă din volumul maxim (V_{max}), până în momentul ruperii acesteia (Figura 10 (c)).

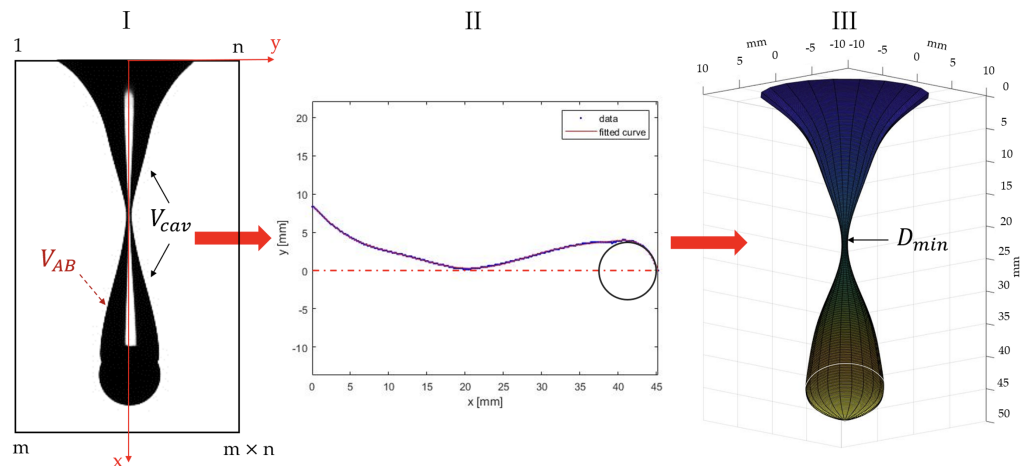


Figura 9: Ilustrarea celor trei etape principale din MATLAB: (I) Procesarea imaginii, binarizare și detectarea conturului; (II) Rotirea conturului și aproximarea polinomială; (III) Reconstituirea 3D și calculul volumului. Aici, V_{cav} este volumul cavității de aer înainte de rupere, V_{AB} volumul aerului atașat sferei după rupere, iar D_{min} diametrul minim al cavității.

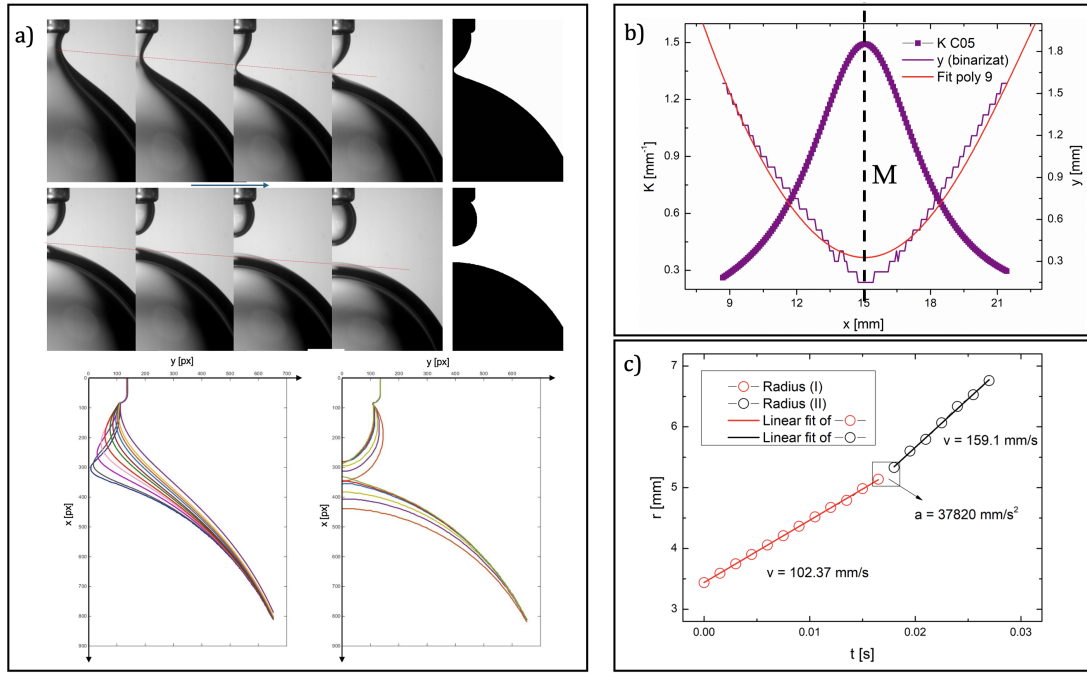


Figura 10: (a) Serii de imagini capturate la 2000 de fps în timpul formării/ desprinderii unei picături de apă în ulei siliconic la un debit constant de 5 ml/min printr-un ac având diametrul interior de 0.838 mm și contururile extrase. (b) Variația curburii în vecinătatea diametrului minim (M) al cavității ce se formează în cazul în care o sferă de diametru $d = 8\text{ mm}$ cade în fluidul de test C05, cu viteza de impact $U_0 = 1.13\text{ m/s}$. Cu r_0 s-a notat raza orificiului cavității. (c) Variația razei orificiului creat de cavitate pentru cazul în care o sferă de diametru $d = 6\text{ mm}$ cade în ulei de floarea soarelui cu viteza de impact $U_0 = 1.21\text{ m/s}$.

Studii experimentale asupra dinamicii cavităților

Experimentele din acest capitol își propun să ofere o înțelegere mai bună a fenomenelor asociate cu formarea cavităților în lichide vâscoase și viscoelastice la impactul cu un corp solid. Dinamica cavității de aer și ruperea acesteia în diferite fluide sunt analizate folosind vizualizări directe și tehnici de procesare a imaginilor descrise în capitolul anterior. Informațiile obținute din această investigație îmbunătățesc cunoștințele noastre despre evoluția interfeței aer-lichid și au aplicații potențiale în domenii științifice și ingineresti, de la dinamica fluidelor până la locomoția biologică.

Configurația experimentală este compusă din cinci componente principale: rezervorul de sticlă, sursa de lumină, electromagnetul, camera de mare viteză și un PC desktop. În cadrul experimentelor s-au utilizat sfere de oțel hidrofile având diametrele $d \in \{6; 8; 10\}$ mm, cu $d = 2R_0$. Sferele au fost lăsate să cadă de la înălțimi cuprinse între $H \in [2.5 - 12.5]\text{ cm}$ ce au rezultat în viteze de impact $U_0 \in [0.7 - 1.56]\text{ m/s}$.

În cadrul experimentelor s-au utilizat o gamă variată de fluide Newtoniene pur vâscoase, precum și fluide viscoelastice nenewtoniene (dilatante), pentru a investiga comportamentele diverse ale fluidelor. Fluidele Newtoniene au inclus ulei de floarea-soarelui (denumit Oil în grafice), glicerină (Gly) și trei soluții de glicerină-apă cu vâscozitate scăzută, identificate ca Gly0, Gly1 și Gly2. Aceste soluții de

glicerină-apă au fost preparate prin varierea concentrației de glicerină. Uleiul de floarea-soarelui a servit drept fluid de referință, cu proprietăți stabile. Glicerina, cunoscută pentru vâscozitatea sa ridicată a fost selectată pentru a studia efectele creșterii vâscozității, în timp ce soluțiile de glicerină-apă au oferit profiluri specifice de vâscozitate, asigurând astfel acoperirea unei game largi de vâscozități ale fluidelor Newtoniene.

Figura 11 prezintă o serie de imagini pentru fiecare fluid de test. Se observă că în fiecare fluid se formează forme distincte ale cavității de aer. Cadrul inițial, marcat ca $t = 0s$, reprezintă momentul în care sfera pătrunde complet sub suprafața liberă. Penultimul cadru al fiecărei serii precede ruperea cavității, iar cadrul final surprinde momentul imediat după ruperea (colapsul) acesteia.

Formarea cavității de aer la impactul unei sfere solide în lichide relevă perspective semnificative asupra corelației dintre proprietățile fluidelor și dinamica interfeței. Vizualizările și rezultatele procesării imaginilor sunt utilizate pentru a analiza variația temporală a volumului de aer, de la formarea cavității până la rupere, în fluide vâscoase și viscoelastice. Studiul se extinde asupra investigării ruperii filamentului de aer și a formării bulei de aer care rămâne atașată sferei în cădere.

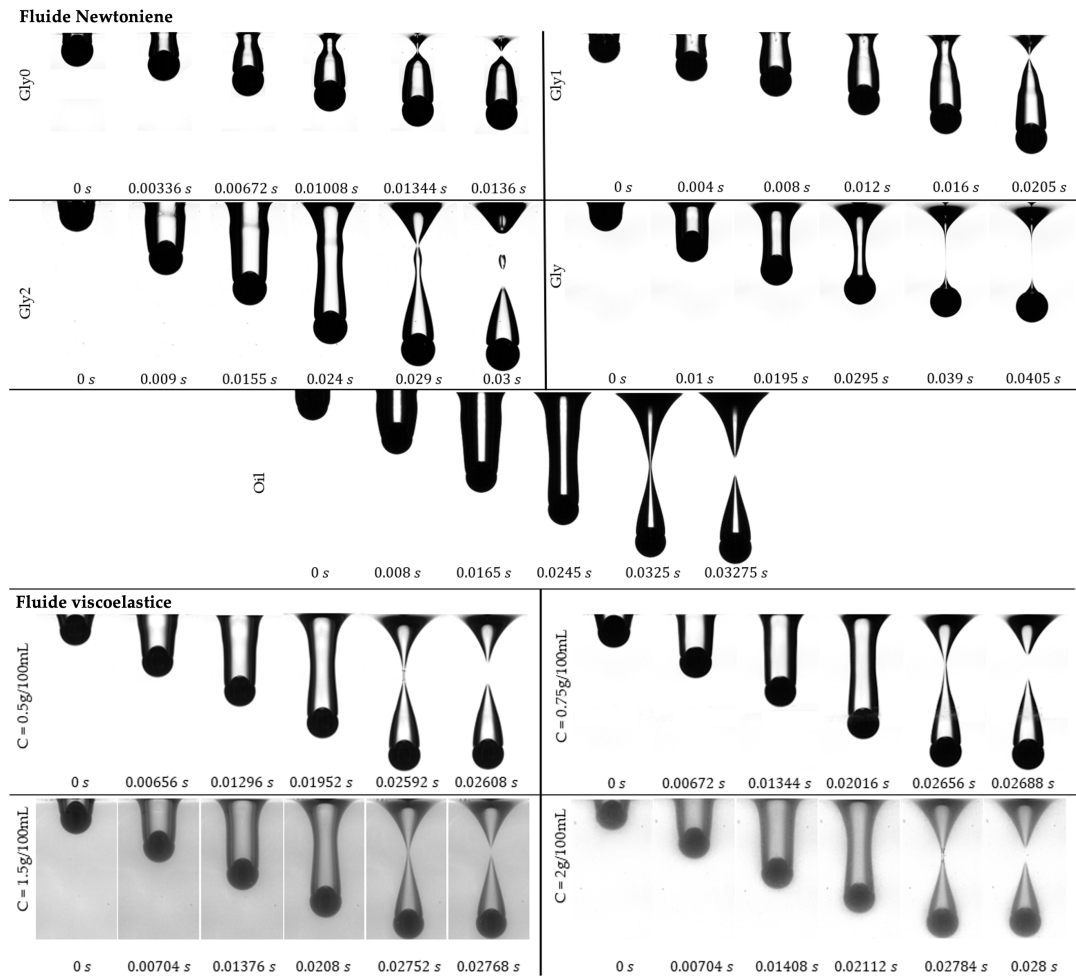


Figura 11: Serii de imagini pentru fluidele de test Newtonian și viscoelastic ($d = 8mm$, $U_0 = 1.13m/s$). Timpul corespunzător fiecărui cadru este indicat.

Vâscozitatea fluidului joacă un rol crucial în determinarea formei și comportamentului cavitației. În fluidele Newtoniene, vâscozitățile mai mari duc la timpi mai lungi de rupere și la formarea unor filamente subțiri înainte de colaps (ex. Gly). În fluidele viscoelastice, creșterea concentrației de polimeri rezultă în interfețe ale cavitației mai înguste și o opacitate mai mare a fluidului, complicând procesarea imaginilor. Glicerina foarte vâscoasă prezintă cei mai lungi timpi de rupere datorită vâscozității sale, în timp ce fluidele cu vâscozitate mică, precum Gly0, prezintă rupturi ale cavitației aproape de suprafața liberă, formând cavitații mai mici. Soluțiile de glicerină cu vâscozitate medie afișează volume ale cavitației mai mari odată cu creșterea concentrației.

Volumul cavitației crește cu viteza de impact, atingând un maxim înainte de a scădea treptat până la rupere, un comportament similar în diferite fluide, Figura 12 (a). Rata de variație a volumului cavitației urmează o tendință aproape liniară înainte de rupere, confirmată pentru diverse viteze de impact. Parametrul de pierdere relativă a volumului (RVL), care indică reducerea relativă a volumului cavitației, rămâne independent de viteza de impact în uleiul de floarea-soarelui, dar scade odată cu creșterea diametrului sferei.

Asimetria în formarea cavitației scade odată cu creșterea vâscozității, în timp ce prezența elasticității în fluidele viscoelastice amplifică asimetria Figura 12 (b). Elas-

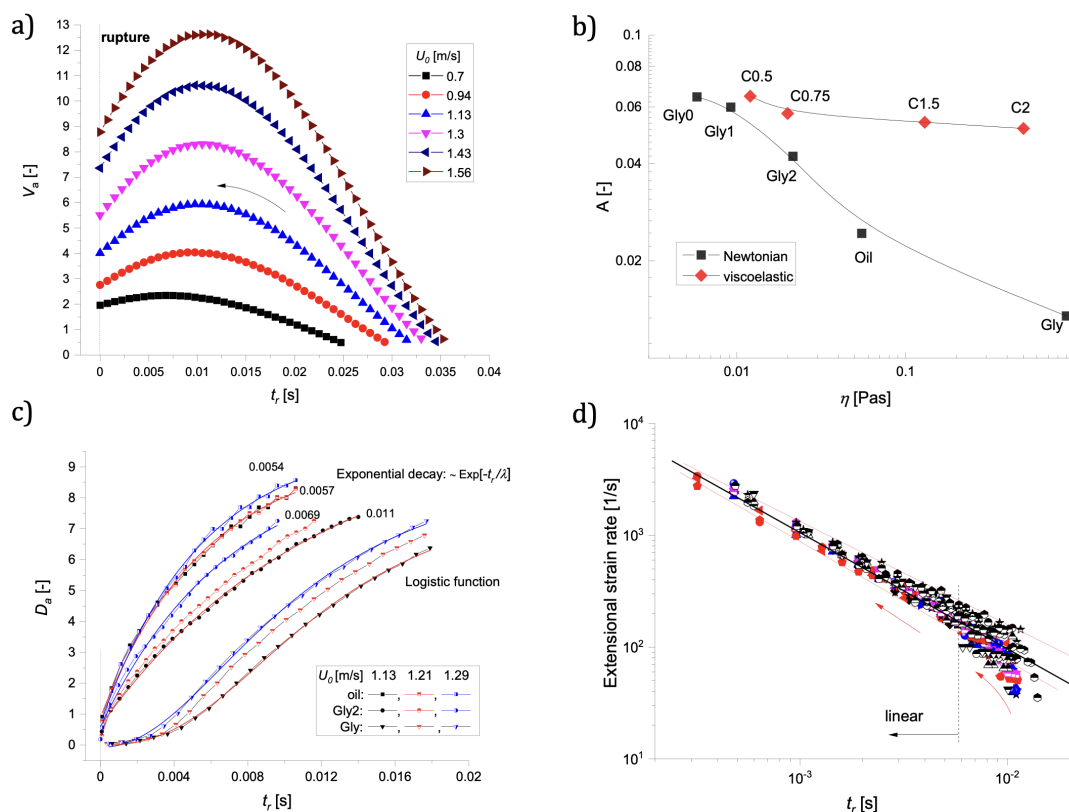


Figura 12: (a) Variația temporală a volumului cavitației V_a . (b) Variația constantei de asimetrie în funcție de vâscozitatea fluidelor de test. (c) Variația temporală a D_a pentru (a) trei fluide Newtoniene (Gly, Gly0 și Oil). (d) Creșterea ratei de deformare extensională $\dot{\epsilon}_D$ pe măsură ce interfața se apropie de colaps pentru toate fluidele testate: ulei de floarea soarelui, soluțiile de glicerină și de PEO.

ticitatea afectează, de asemenea, dinamica cavității, rezultând în volume maxime mai mari și comportamente distincte de rupere comparativ cu fluidele pur vâscoase. Fluidele viscoelastice sunt mai puțin sensibile la schimbările de viteză de impact în variația diametrului minim al cavității, afișând o scădere exponențială similară cu cea a fluidelor Newtoniene. Rata de variație a volumului și diametrului cavității este liniară până la rupere, cu faze liniare similare în cazul fluidelor viscoelastice, în timp ce ratele fluidelor newtoniene se scalează cu vâscozitatea și viteza de impact.

Cercetarea de față a implicat nu doar măsurători ale volumelor cavităților de aer generate prin impactul sferei în diverse fluide, ci și investigarea dinamicii acestora în vecinătatea colapsului cavității și subțierea corespunzătoare a filamentului aer-lichid, înainte de rupere, Figura 12 (c).

Viteza specifică de deformare extensională la diametrul minim al cavității este minim influențată de proprietățile fluidului în apropierea rupei, indicând un comportament comun al deformării în diferite fluide. Analizând datele din Figura 12 (d) se poate remarca faptul că $\epsilon_D * t_r \cong 1$. Dacă acest rezultat este confirmat de experimente efectuate cu sfere și fluide diferite, dinamica prezentată oferă o metodă alternativă pentru determinarea elasticității în mișcările extensionale.

După rupere, volumul de aer atașat sferei variază cu numărul capilarității (Ca), scăzând odată cu creșterea Ca în lichidele foarte vâscoase, cu efecte mai pronunțate în fluidele Newtoniene comparativ cu soluțiile viscoelastice.

Acest studiu introduce o abordare inovatoare pentru măsurarea precisă a volumului cavității de aer și a bulei de aer după ruperea cavității într-un fluid, în urma pătrunderii unei sfere prin interfața lichid-aer. Măsurarea precisă a formelor cavității, a dinamicii volumului și a asimetriei oferă o bază solidă pentru cercetări și aplicații viitoare. Rezultatele oferă o înțelegere cuprinzătoare a modului în care proprietățile fluidelor și condițiile de impact influențează formarea, dinamica și comportamentul la rupere al cavităților, contribuind cu perspective valoroase asupra mecanicii interacțiunilor fluidelor și a rolului vâscozității și elasticității în aceste procese.

Concluzii și Perspective

Principalele contribuții ale tezei

Investigațiile experimentale și metodele numerice prezentate în acest studiu oferă o analiză detaliată a comportamentului sferelor solide în fluide vâscoase și viscoelastice, concentrându-se pe mișcarea acestora în spații confinante, interacțiunile sferă-fluid și dinamica cavităților. Studiul evidențiază efecte hidrodinamice fundamentale, cum ar fi rezistența indusă de pereți, decelerarea la contactul cu peretele inferior, formarea vortexurilor și impactul forțelor externe asupra dinamicii sferelor. Rezultatele obținute aduc contribuții în mecanica fluidelor și au aplicații potențiale în inginerie, sisteme energetice și cercetare biomedicală.

Un aspect important al acestei cercetări a fost studiul mișcării sferei în geometrii limitate, unde datele experimentale au confirmat o creștere semnificativă a coeficientului de rezistență la înaintare datorată mișcării în apropierea peretelui. Urmărind căderea sferelor de oțel într-un ulei foarte vâscos, s-a observat că fluxul de fluid restricționat în apropierea peretilor crește forța de rezistență, reducând vi-

teza. S-a descoperit că coeficientul de rezistență a crescut de aproape trei ori atunci când sfera era aproape de pereți, iar acest efect a urmat un model similar cu cel observat în geometriile circulare. Aceste rezultate sugerează că efectele de confinare sunt guvernate în primul rând de raportul dintre diametrul sferei și lățimea vasului, indiferent de forma containerului.

Un alt aspect important ce este legat similar de confinare, a fost influența efectelor de capăt asupra mișcării sferelor. Pe măsură ce sfera s-a apropiat de capătul vasului, a fost înregistrată o decelerare bruscă din cauza creșterii presiunii locale. S-au identificat trei faze distincte în mișcarea sferei: o coborâre cu viteză constantă, o zonă de tranziție cu fluctuații minore de viteză și o fază finală de decelerare rapidă. Rezultatele obținute arată că în sistemele de sedimentare și transport care implică particule solide în medii fluide închise efectele confinării trebuie luate în considerare în momentul proiectării acestora.

Pe lângă coeficientul de rezistență la înaintare și efectele de confinare, în teza de față s-a examinat dinamica vortexului în jurul sferelor utilizând tehnica Particle Image Velocimetry (PIV). Această tehnică a confirmat formarea de structuri de vortex simetrice în jurul sferelor care impactează o suprafață fluidă. Aceste vârtejuri au evoluat dinamic, disipându-se în timp pe măsură ce energia cinetică a fost transferată în fluidul din jur. Rezultatele numerice au arătat că vortexuri similare se obțin și în cazul formării picăturilor în aer. În cazul impactului solid-fluid, prăbușirea cavității de aer din spatele sferei a declanșat structuri vortex secundare, care influențează amestecarea fluidelor și stabilitatea. Aceste rezultate au aplicabilitate în curgerile cu particule suspendate (aer poluat) sau controlul turbulenței.

Un alt set de experimente s-a concentrat pe impactul forțelor magnetice asupra mișcării sferei în tuburi având dimensiuni apropiate de diametrul sferelor utilizate. Sferele în cădere au fost accelerate atunci când sfere magnetice erau plasate în partea de jos a tubului, atingând viteze de până la 5 m/s. Experimentele au confirmat că forțele magnetice domină asupra rezistenței vâscoase în această configurație, ceea ce duce la o creștere exponențială a vitezei în apropierea impactului. Totodată s-a observat că sferele plasate în capătul tubului înainte de impact se ridică la o înălțime proporțională cu vâscozitatea fluidului. În plus, au fost detectate oscilații laterale ale sferelor. Aceste rezultate sunt relevante pentru aplicațiile microfluidice care necesită un control precis al traiectoriilor particulelor, iar forțele magnetice fiind frecvent utilizate în aceste aplicații pentru transport sau separare de particule aflate în suspensie.

După impactul în apă al sferelor hidrofille la viteze sub pragul de formare a cavității de aer, se formează jeturi Worthington. S-a observat că inițial se formează un jet subțire, care se propagă rapid, urmat imediat de un jet secundar mai gros. Variațiile înălțimii al jetului secund au fost urmărite, iar aceste variații pot fi scalate folosind numere adimensionale.

Pentru a forma o cavităte de aer după impactul unei sfere într-un fluid, este necesar fie ca viteza să fie suficient de mare, fie ca fluidul să aibă o vâscozitate specifică, fie ca sfera să fie hidrofobă. Viteza, respectiv vâscozitatea fluidelor se pot controla relativ ușor. Dar, având în vedere importanța proprietății de hidrofobicitate/ hidrofilicitate în formarea cavităților, a fost dedicată o secțiune caracterizării interfeței fluid-fluid și măsurării unghiului de contact pe suprafețele sferice.

Scopul final al acestei teze a fost urmărirea dinamicii cavităților în diferite fluide ce se formează după căderea sferelor prin interfața fluid-aer. Astfel, o componentă

esențială a studiului a fost urmărirea evoluției cavității folosind tehnici de procesare a imaginilor bazate pe MATLAB. Algoritmii dezvoltați au automatizat cu succes extragerea parametrilor cheie ai cavității, cum ar fi adâncimea cavității, diametrul minim și volumul, cu o precizie ridicată. S-au prezentat și diverse aplicații ale algoritmilor cum ar fi trasarea exactă a interfețelor, măsurarea curburii sau calcularea variației orificiului cavității. Rezultatele au confirmat că, curbura crește pe măsură ce cavitatea se contractă, valoarea curburii fiind maximă chiar înainte de rupură. În cazul variației orificiului cavității s-au identificat două regimuri de creștere distincte: o expansiune inițială lentă urmată de o accelerare rapidă înainte de rupere. Folosind aceste date extrase, există posibilitatea ca algoritmi de machine learning să fie antrenați pentru identificarea proprietăților fluidelor, fără a mai fi nevoie de echipamente scumpe, cum ar fi un reometru.

Formarea cavităților de aer la impactul unei sfere în lichide oferă informații relevante despre corelația dintre proprietățile fluidelor și dinamica interfeței. S-a analizat evoluția volumului de aer, de la formarea cavității până la rupere, în fluide vâscoase și viscoelastice, folosind vizualizări și procesarea imaginilor. Vâscozitatea influențează comportamentul cavității: în fluidele Newtoniene, vâscozitățile mari duc la timpi mai lungi de rupere și filamente subțiri, iar în fluidele viscoelastice, concentrația de polimeri reduce lățimea interfeței și opacizează fluidul.

Volumul cavității crește cu viteza de impact și atinge un maxim înainte de a scădea treptat, iar rata de variație a volumului este liniară la rupere. În fluidele viscoelastice, elasticitatea amplifică asimetria și crește volumele maxime, iar volumul și diametrul cavității se modifică liniar, fiind independente de vâscozitate și viteza de impact. Viteza specifică de deformare extensională este similară în diverse fluide, iar volumul bulei de aer ce se menține de sferă după rupere depinde de numărul capilarității, scăzând în lichidele Newtoniene. Acest studiu aduce o metodă inovativă pentru măsurarea precisă a volumului cavității de aer și a bulei atașate sferei după ruperea cavității, oferind informații asupra influenței vâscozității și elasticității asupra comportamentului cavităților în diverse fluide.

Această teză oferă o analiză experimentală detaliată a interacțiunilor solid-fluid, concentrându-se pe mișcarea sferei confinate, efectele magnetice, formarea vortexului și evoluția cavității. Metodele numerice propuse pot fi aplicate în diverse domenii, permițând extragerea de informații relevante. Rezultatele au implicații semnificative pentru aplicații științifice și industriale, cum ar fi microfluidica, curgerile cu transport de particule, ingineria aerospațială și cercetarea biomedicală. Combinația între imagistica de mare viteză, tehnicile PIV și metodele numerice a permis o caracterizare aprofundată a fenomenelor fluide complexe, contribuind la o mai bună înțelegere a dinamicii impactului și a interacțiunilor fluid-interfață.

Perspective de cercetare

Un domeniu propus pentru cercetările viitoare este studiul dinamicii impacturilor în fluide foarte vâscoase, influența aerului reținut în fluid asupra cavității și efectele sistemelor multifazice asupra formării cavității și transportului de fluid, Figura 13. Aceste studii pot avea aplicații în domenii variate, de la știința materialelor și mecanica fluidelor până la penetrarea membranelor biologice și sistemele de livrare a medicamentelor (drug delivery systems).

Aceste studii pot analiza impactul sferelor în fluide foarte vâscoase, cum ar fi mierea, pentru a înțelege mecanismele similare cu penetrarea nanoparticulelor prin

membrane biologice, având implicații în livrarea medicamentelor și biosenzori Figura 13 (a). Se pot investiga și influența bulelor de aer asupra formării cavitațiilor, atât pentru bulele mici dispersate, Figura 13 (b), care afectează vâscozitatea și tensiunea superficială, cât și pentru bulele mari la interfață, care pot modifica traiectoria sferei, Figura 13 (c). De asemenea, se pot studia sistemele multifazice, analizând interacțiunea dintre un strat viscoelastic și miere, evidențiind diferențele dintre un strat subțire, Figura 13 (d) și unul gros, Figura 13 (e), în ceea ce privește penetrarea și transportul fluidului. Aceste fenomene au aplicații în industrie, biologie și dinamica picăturilor în medii complexe.

Cercetările viitoare, pe lângă cele menționate, se pot axa pe numeroase subiecte asociate unor studii fundamental aplicative, de exemplu: (i) impactul sferei în lichide în mișcare [50]; (ii) dinamica sferelor (hidrofile sau hidrofobe) cu densități apropiate de cele ale lichidului [51]; (iii) impactul picăturilor sferice pe o suprafață lichidă [52].

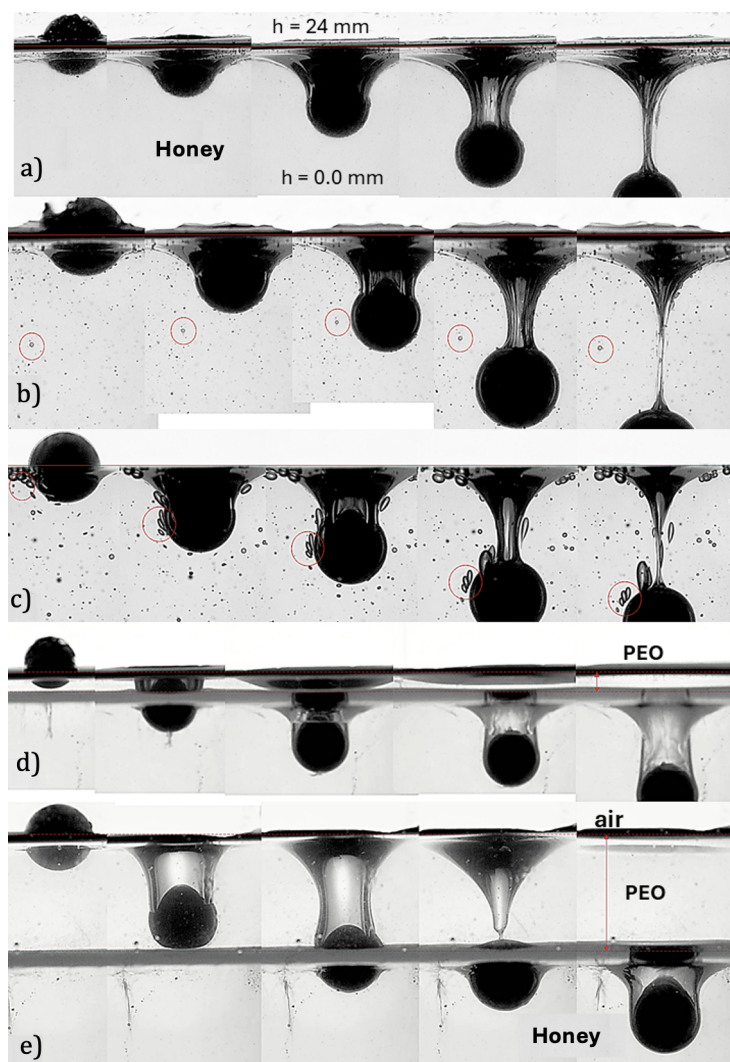


Figura 13: Impactul unei sfere cu diametrul de 10 mm, cu viteza de impact, $U_0 = 0.7 \text{ m/s}$, într-un fluid foarte vâscos (miere) în 5 condiții distincte: (a) nu sunt bule de aer, (b) bule de aer mici, (c) bule de aer mari, (d) mierea este acoperită de un strat subțire de soluție de polimer și (e) de un strat gros.

Referințe

- [1] A. Worthington și R. S. Cole, “Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, vol. 189, pp. 137–148, 1897.
- [2] A. M. Worthington și R. S. Cole, “Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography: paper 2,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, vol. 194, pp. 175–199, 1900.
- [3] T. von Kármán, “The impact on seaplane floats during landing,” *Tech. Rep.*, NACA, vol. 321, 1929.
- [4] H. Wagner, “Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces,” *ZAMM (Journal of Applied Mathematics and Mechanics)*, vol. 12, pp. 193–235, 1932.
- [5] *Bouncing bomb*. adresa: https://en.wikipedia.org/wiki/Bouncing_bomb.
- [6] D. Gilbarg și R. A. Anderson, “Influence of Atmospheric Pressure on the Phenomena Accompanying the Entry of Spheres into Water,” *Journal of Applied Physics*, vol. 19, pp. 127–139, 1948.
- [7] M. T. Arigo și G. H. McKinley, “The effects of viscoelasticity on the transient motion of a sphere in a shear-thinning fluid,” *Journal of Rheology*, vol. 41, nr. 1, pp. 103–128, 1997.
- [8] T. Podgorski și A. Belmonte, “Surface folds during the penetration of a viscoelastic fluid by a sphere,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 460, pp. 337–348, 2002.
- [9] B. C.-W. Tan, J. Vlaskamp, P. Denissenko și P. Thomas, “Cavity formation in the wake of falling spheres submerging into a stratified two-layer system of immiscible liquids,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 790, pp. 33–56, 2016.
- [10] B. C.-W. Tan și P. J. Thomas, “Influence of an upper layer liquid on the phenomena and cavity formation associated with the entry of solid spheres into a stratified two-layer system of immiscible liquids,” *Physics of Fluids*, vol. 30, nr. 6, 2018.
- [11] B. C.-W. Tan, “Cavity emergence and the increase in drag following the entry of solid spheres into a stratified, two-layer system of immiscible liquids,” *Physics of Fluids*, vol. 31, nr. 2, 2019.
- [12] L. B. Smolka și C. K. McLaughlin, “Sphere entry through an oil lens floating on water,” *Physical Review Fluids*, vol. 4, nr. 4, p. 044 001, 2019.
- [13] C. Duez, C. Ybert, C. Clanet și L. Bocquet, “Making a splash with water repellency,” *Nature physics*, vol. 3, nr. 3, pp. 180–183, 2007.
- [14] H. Chen, H.-R. Liu, X.-Y. Lu și H. Ding, “Entrapping an impacting particle at a liquid–gas interface,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 841, pp. 1073–1084, 2018.

- [15] C.-y. Guo, Y.-y. Wu, Y. Han, M.-l. Ji, Y.-h. Wang și Y.-f. Kuai, “Numerical investigation of the influence of surface wettability on water entry of spheres,” *Physics of Fluids*, vol. 35, nr. 6, 2023.
- [16] J. M. Aristoff și J. W. Bush, “Water entry of small hydrophobic spheres,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 619, pp. 45–78, 2009.
- [17] H. Melosh, “Cratering mechanics-observational, experimental, and theoretical,” *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 8, p. 65-93 (1980)., vol. 8, pp. 65–93, 1980.
- [18] J. Glasheen și T. McMahon, “A hydrodynamic model of locomotion in the basilisk lizard,” *Nature*, vol. 380, nr. 6572, pp. 340–342, 1996.
- [19] J. W. Bush și D. L. Hu, “Walking on water: biolocomotion at the interface,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, nr. 1, pp. 339–369, 2006.
- [20] S. M. Harrison, R. C. Cohen, P. W. Cleary, S. Barris și G. Rose, “Forces on the body during elite competitive platform diving,” în *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, 2012, pp. 10–12.
- [21] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction,” *Marine structures*, vol. 20, nr. 4, pp. 185–201, 2007.
- [22] D. Kunii și O. Levenspiel, *Fluidization engineering*. Elsevier, 2013.
- [23] N. E. Todreas și M. S. Kazimi, *Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals*. CRC press, 2021.
- [24] C. Trivedi, M. J. Cervantes și O. G. Dahlhaug, “Experimental and numerical studies of a high-head Francis turbine: A review of the Francis-99 test case,” *Energies*, vol. 9, nr. 2, p. 74, 2016.
- [25] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe și E. Bossanyi, *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2011.
- [26] D. Bagster și D. Tomi, “The stresses within a sphere in simple flow fields,” *Chemical Engineering Science*, vol. 29, nr. 8, pp. 1773–1783, 1974.
- [27] C. Liu, C. Xue, J. Sun și G. Hu, “A generalized formula for inertial lift on a sphere in microchannels,” *Lab on a Chip*, vol. 16, nr. 5, pp. 884–892, 2016.
- [28] K. van der Vaart, Y. Rahmani, R. Zargar, Z. Hu, D. Bonn și P. Schall, “Rheology of concentrated soft and hard-sphere suspensions,” *Journal of Rheology*, vol. 57, nr. 4, pp. 1195–1209, 2013.
- [29] S. Fluidics, “Improved synthetic biology research through microfluidics,”
- [30] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th. McGraw-Hill, 2011.
- [31] A. Einstein et al., “On the motion of small particles suspended in liquids at rest required by the molecular-kinetic theory of heat,” *Annalen der physik*, vol. 17, nr. 549-560, p. 208, 1905.
- [32] D. G. Ionescu, *Introduce în mecanica fluidelor*. Editura Tehnica, 2005.
- [33] L. Rayleigh, “LIII. On the resistance of fluids,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 2, nr. 13, pp. 430–441, 1876.

- [34] G. G. Stokes et al., “On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums,” 1851.
- [35] H. Lamb, *Hydrodynamics*. University Press, 1924.
- [36] T. Oroveanu, “Mecanica fluidelor viscoase,” *Ed. Academiei Bucuresti*, 1967.
- [37] P. Mazur și A. Weisenborn, “The Oseen drag on a sphere and the method of induced forces,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 123, nr. 1, pp. 209–226, 1984.
- [38] J. Happel și H. Brenner, *Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media*. Springer Science & Business Media, 2012, vol. 1.
- [39] F. Odar și W. S. Hamilton, “Forces on a sphere accelerating in a viscous fluid,” *Journal of fluid mechanics*, vol. 18, nr. 2, pp. 302–314, 1964.
- [40] P. P. Brown și D. F. Lawler, “Sphere drag and settling velocity revisited,” *Journal of environmental engineering*, vol. 129, nr. 3, pp. 222–231, 2003.
- [41] J. Guo, “Motion of spheres falling through fluids,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 49, nr. 1, pp. 32–41, 2011.
- [42] R. van Der Sman, “Drag force on spheres confined on the center line of rectangular microchannels,” *Journal of colloid and interface science*, vol. 351, nr. 1, pp. 43–49, 2010.
- [43] S. Faroughi, C. Fernandes, J. M. Nóbrega și G. McKinley, “A closure model for the drag coefficient of a sphere translating in a viscoelastic fluid,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 277, p. 104218, 2020.
- [44] R. J. Adrian și J. Westerweel, *Particle image velocimetry*. Cambridge university press, 2011.
- [45] L. Rayleigh, “On the instability of jets,” *Proceedings of the London mathematical society*, vol. 1, nr. 1, pp. 4–13, 1878.
- [46] M. Do-Quang și G. Amberg, “The splash of a solid sphere impacting on a liquid surface: numerical simulation of the influence of wetting,” *Physics of Fluids*, vol. 21, nr. 2, 2009.
- [47] N. B. Speirs, M. M. Mansoor, J. Belden și T. T. Truscott, “Water entry of spheres with various contact angles,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 862, R3, 2019.
- [48] R. Tadmor, “Line energy and the relation between advancing, receding, and young contact angles,” *Langmuir*, vol. 20, nr. 18, pp. 7659–7664, 2004.
- [49] J. W. Gibbs, “On the equilibrium of heterogeneous substances,” 1879.
- [50] L. Yi, S. Li, H. Jiang, D. Lohse, C. Sun și V. Mathai, “Water entry of spheres into a rotating liquid,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 912, R1, 2021.
- [51] D. Nie, J. Wang, S. Li și J. Lin, “Freely rising or falling of a sphere in a square tube at intermediate Reynolds numbers,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 1000, A82, 2024.
- [52] R. Dandekar, N. Shen, B. Naar și L. Bourouiba, “Splash on a liquid pool: coupled cavity–sheet unsteady dynamics,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 1002, A13, 2025.

Cuprinsul tezei

Mulțumiri	i
Rezumat	ii
Contribuții științifice	vi
Listă de figuri	viii
Listă de tabele	xiv
Listă de simboluri	xv
1 Introducere	1
1.1 Stadiul actual al cercetărilor în domeniu	1
1.2 Motivație	6
1.3 Scop	7
2 Aspecte teoretice	9
3 Studii experimentale	16
3.1 Influența peretelui vasului asupra mișcării sferei (i)	16
3.2 Influența efectului de capăt asupra mișcării sferei	19
3.3 Dinamica interfețelor fluide și formarea vortexurilor	21
3.3.1 Studiarea curgerii în jurul sferei cu tehnica PIV	21
3.3.2 Structuri de curgere asociate picăturilor imersate (ii)	26
3.4 Mișcarea sferelor într-un tub sub acțiunea forțelor magnetice (iii)	29
3.5 Formarea jetului Worthington (iv)	37
3.6 Concluzii	41
4 Caracterizare experimentală și metode numerice de trasare a interfeței fluid-fluid	42
4.1 Măsurarea unghiurilor de contact pe suprafețe sferice (v)	42
4.2 Analiza cantitativă a datelor experimentale cu MATLAB	49
4.2.1 Achiziția imaginilor și îmbunătățirea calității	50
4.2.2 Scalarea imaginilor utilizând Fiji (ImageJ)	51
4.2.3 Codul MATLAB utilizat pentru a urmări variația adâncimii sferei	52
4.2.4 Codul MATLAB utilizat pentru a urmări variația diametrului minim al cavității	53
4.2.5 Codul MATLAB utilizat pentru a urmări variația volumelor cavităților	54
4.2.6 Segmentarea imaginilor	56
4.2.7 Aplicații	57
4.2.7.1 Detectia și obținerea conturilor	58
4.2.7.2 Calculul curbării de-a lungul conturului cavității	62

4.2.7.3	Variația razei orificiului cavității	65
4.3	Concluzii	67
5	Studii experimentale asupra dinamicii cavităților	68
5.1	Investigații experimentale asupra formării cavităților de aer în fluide vâscoase și viscoelastice (vi)	68
5.2	Mișcarea sferei în prezența suprafeței libere și efectului de capăt (vii)	80
6	Concluzii și Perspective	84
6.1	Principalele contribuții ale tezei	84
6.2	Perspective de cercetare	86
A	Configurații experimentale	90
B	Fluidele de lucru	92
C	Numere adimensionale	94
D	Coduri MATLAB	96
D.1	Variația adâncimii sferei	96
D.2	Variația diametrului minim al cavității	96
D.3	Variația volumului cavității	98
D.4	Funcția de segmentare a imaginilor	100
	Referințe	101