



NATIONAL UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY
POLITEHNICA BUCHAREST



COMOTI
ROMANIAN RESEARCH &
DEVELOPMENT INSTITUTE FOR
GAS TURBINES



DOCTORAL SCHOOL OF
AEROSPACE ENGINEERING



TEZĂ DE DOCTORAT

Proiectarea și Analiza Sistemelor de Propulsie cu Flux Intern Supersonic

Rezumat

Student Doctorand: Ing. Andrei Vlad COJOCEA

Conducător Doctorat: Prof. Dr. Ing. Daniel-Eugeniu CRUNȚEANU

București, 2025



NATIONAL UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY
POLITEHNICA BUCHAREST



COMOTI
ROMANIAN RESEARCH &
DEVELOPMENT INSTITUTE FOR
GAS TURBINES



DOCTORAL SCHOOL OF
AEROSPACE ENGINEERING



TEZĂ DE DOCTORAT

Proiectarea și Analiza Sistemelor de Propulsie cu Flux Intern Supersonic

Rezumat

Student Doctorand: Ing. Andrei Vlad COJOCEA

Conducător Doctorat: Prof. Dr. Ing. Daniel-Eugeniu CRUNȚEANU

Comisia de Evaluare a Tezei de Doctorat

Președinte	Prof. Dr. Ing. Teodor Lucian GRIGORIE	din partea	Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București
Conducător Doctorat	Prof. Dr. Ing. Daniel- Eugeniu CRUNȚEANU	din partea	Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București

București, 2025

Cuprins

CUPRINS	i
LISTĂ DE FIGURI	ii
LISTĂ DE TABELE	iii
LISTĂ DE PUBLICAȚII	iv
1. MOTIVAȚIE ȘI OBIECTIVE.....	1
1.1 Problema Fundamentală	1
1.2 Studiul Literaturii de Specialitate.....	2
1.3 Ipoteze de lucru	3
1.4 Obiective	4
1.5 Metodologia de Cercetare.....	5
2. SINTEZA REZULTATELOR. IMPLICATII.....	9
2.1 Investigatii Experimentale ale Camerei de Detonație Pulsatorie Alimentată cu Hidrogen	9
2.2 Comparatie Experimentală între Diferiți Oxidanti pentru Camera de Detonație Pulsatorie Alimentată cu Hidrogen	11
2.3 Explorarea Susținerii Detonației Pulsatorii în Amestecuri de Hidrogen-Aer și Hidrogen-Oxigen.....	14
2.5 Analiza Experimentală a Creșterii de Presiune a Motorului cu Detonație Pulsatorie	17
2.5 Analiza Experimentală a Tracțiunii și a Impulsului Specific aleCamerei de Detonație Pulsatorie	19
2.6 Măsurători Suplimentare de Performanță ai CDP	20
2.7 Investigatii Experimentale privind Impactul Orificiilor de Injecție a Hidrogenului în Camera cu Detonație Pulsatorie.....	22
2.8 Optimizarea Frecvenței de Operare a Camerei de Detonație Pulsatorie	25
2.9 Studiu Experimental privind Aprinderea și Obținerea Creșterii de Presiune în Condiții de Vid Redus pentru Camera de Detonație Pulsatorie	27
3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	32
3.1 Concluzii Generale	32
3.2 Valorile Maxime	32
3.3 Harta Operațională a Camerei	32
3.4 Analiza Statistică	34
3.5 Analiza datelor Schlieren	36
3.6 Îmbunătățirea Performanțelor.....	37
3.7 Testarea în vid.....	39
3.8 Contribuții Personale	39
BIBLIOGRAFIE	45

Listă de Figuri

1	Diagrama impulsul specific obținut pentru diverse arhitecturi de propulsie [3].....	1
2	Ciclul CDP vs ciclul Brayton.	3
3	Ansamblul general experimental și analitic pentru cercetarea CDP.	6
4	Modelul experimental al CDP [20].	10
5	Structura curgerii la ieșirea din țeava de evacuare: (a) Unda de șoc, (b) Structură disc Mach [20].	10
6	Presiune Statică Relativă pe Parcursul Unui Ciclu CDP [20].	11
7	(a) Influența presiunii de alimentare cu aer asupra repetabilității ciclului (b),(c),(d) Influența presiunii totale de alimentare cu aer asupra caracteristicilor de performanță [21].	12
8	Neuniformități ale ciclului în timpul funcționării cu hidrogen–oxigen [21].	13
9	Unda de șoc normală	14
10	Hartă 3D a regimurilor operaționale [22].	15
11	Vizualizarea curgerii în camera de amestec [21].	17
12	Diagrama de instrumentare. K1 și K2 marchează poziția celor doi senzori de presiune [23].	18
13	Exemplu al creșterii de presiune [23].	18
14	Schemă a instalației experimentale [24].	20
15	Selecția valorii maxime și medii a temperaturii. Exemplu: valoarea maximă este marcată cu punctul verde, iar valoarea medie cu linia roșie.	21
16	Sistemul aerodinamic al CDP: Diagrama procesului de amestec și secțiunea de injecție a combustibilului.	23
17	RHS și schema ajustărilor efectuate.	25
18	Exemplu al datelor de presiune la frecvență joasă.	26
19	Exemplu al datelor de presiune la frecvență înaltă.	26
20	Modelul CDP instalat în camera de vid [27].	28
21	Semnalele de presiune complete, în timpul testării CDP în vid: linia roșie – combustie, linia albastră – curgere la rece, linia verde – presiunea din interiorul camerei de vid. [27].	28
22	Semnalul de presiune din CDP în timpul aprinderii [27].	29
23	Semnalul de presiune din CDP în timpul funcționării [27].	30
24	Semnalul de presiune din CDP în timpul exploziei [27].	30
25	Imagini Schlieren ale curgerii la ieșirea din CDP în timpul funcționării în condiții de vid. (a) $-1.953\mu s$; (b) $-12.99\mu s$; (c) $0.00\mu s$; (d) $12.99\mu s$; (e) $25.58\mu s$; (f) $38.97\mu s$ [27].	31

Listă de Tabele

1	Indicatorii de performanță ai CDP în cadrul ciclurilor de detonație	2
2	Valorile Caracteristice Medii pentru Aer și Oxigen.....	13
3	Factorii și nivelele acestora din campania experimentală factorială completă.	15
4	Tablul Anova pentru presiunea maximă a ciclului pentru H_2/air	22
5	Centralizarea Valorilor Maxime Înregistrate.	33
6	Definițiile factorilor și răspunsurilor utilizați în analiza "ANOVA".....	34
7	Rezultatele "ANOVA" centralizate pentru campania H_2/aer	35
8	Rezultatele ANOVA centralizate pentru campania H_2/O_2	37
9	Valori medii ale caracteristicilor fluxului estimate din datele Schlieren.	37
10	Performanța de ieșire pentru geometria de bază și geometria optimizată.....	38
11	Frecvența de operare pentru geometria de bază și geometria optimizată.	39

Listă de Publicații

1. Publicații în Jurnale Indexate WOS în domeniul Tezei de Doctorat

- Bogoi, A., Cuciuc, T., **Cojoccea A.V.**, Gall, M., Porumbel, I. and Hrițcu, C.E., 2024. Experimental Pressure Gain Analysis of Pulsed Detonation Engine. *Aerospace*, 11(6), p.465, <https://doi.org/10.3390/aerospace11060465>, WOS:001254686900001, ISSN: 2226-4310
- **Cojoccea A.V.**, Porumbel, I., Gall, M. and Cuciuc, T., 2024. Experimental Thrust and Specific Impulse Analysis of Pulsed Detonation Combustor. *Applied Sciences*, 14(14), p.5999, <https://doi.org/10.3390/app14145999>, WOS:001276744300001, ISSN: 2076-3417
- **Cojoccea A.V.**, Porumbel, I., Gall, M. and Cuciuc, T., 2024. Experimental Investigations on the Impact of Hydrogen Injection Apertures in Pulsed Detonation Combustor. *Energies*, 17(19), p.4918, <https://doi.org/10.3390/en17194918>, WOS:001332231200001, ISSN: 1996-1073
- **Cojoccea A.V.**, Gall, M., Vrabie, G.I., Cuciuc, T., Porumbel, I., Ursescu, G. and Crunțeanu, D.E., 2024. Experimental Study on Ignition and Pressure-Gain Achievement in Low-Vacuum Conditions for a Pulsed Detonation Combustor. *Technologies*, 12(12), p.252, <https://doi.org/10.3390/technologies12120252>, WOS:001383722800001, ISSN: 2227-7080

2. Lucrări prezentate în cadrul Conferințelor indexate ISI în domeniul Tezei de Doctorat

- **Cojoccea A.V.**, Cuciuc, T., Porumbel, I., Gall, M., Gherman, B. and Crunțeanu, D.E., 2022. Experimental Investigations of Hydrogen Fuelled Pulsed Detonation Combustor. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 86007*, p. V03BT04A020, American Society of Mechanical Engineers, <https://doi.org/10.1115/GT2022-82393>, WOS:001215894300020, ISBN: 978-0-7918-8600-7
- **Cojoccea A.V.**, Gall, M., Porumbel, I., Vrabie, G., Cuciuc, T., and Crunțeanu, 2025. Experimental Analysis of Operating Frequency Enhancement and Pressure Characteristics in a Pulsed Detonation Combustor, In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. . In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers (în curs de publicare)

3. Publicații în Jurnale Indexate BDI în domeniul Tezei de Doctorat

- Vrabie, G.I., **Cojoccea A.V.**, Gall, M., Anton, C., Asoltanei, D.C. and Porumbel, I., 2024. Towards the development of an algorithm for automatic analysis and detection of shock waves in the schlieren visualization technique. *INCAS Bulletin*, 16(4), <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2024.16.4.12>, ISSN 2247-4528
- Vrabie, G.I., Asoltanei, D.C., **Cojoccea A.V.**, Gall, M., Cuciuc, T., Porumbel, I., 2023. Experimental Comparison for Different Oxidizers in Hydrogen Fuelled Pulsed Detonation Combustor. In *Turbo Scientific Journal, Vol.X(2)*, p. 37-53, <https://comoti.ro/wp-content/uploads/2024/01/Vol-X-No-2-2023.pdf>, ISSN: 2559-608X

4. Alte Publicații în domeniul Tezei de Doctorat

- **Cojoccea A.V.**, Cuciuc, T., Porumbel, I., Gall, M., Vrabie, G., Asoltanei, D., 2024. Exploring the Sustainability of Pulsed Detonation in Hydrogen-Air and Hydrogen-Oxygen Mixtures. In *9th Edition of Space Propulsion Conference*, Glasgow, Scotland, https://www.3af-spacepropulsion.com/images/DOCUMENTS/SP2024_PRELIMINARY_PROGRAMME.pdf

5. Publicații în domenii conexe Tezei de Doctorat

Vrabie, G.I., Asoltanei, D.C., **Cojoccea A.V.**, Gall, M., Porumbel, I., Crișan, A., 2025. Operation Regimes in a Rotating Detonation Combustor. In *INCAS Bulletin*, pp.75-84, <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2025.17.1.8>, ISSN 2247-4528

Motivație și Obiective

1.1 Problema Fundamentală

Sistemele de propulsie moderne se confruntă cu provocări semnificative atunci când se dorește obținerea unei eficiențe mai ridicate, îmbunătățirea economiei de combustibil și reducerea impactului asupra mediului. Motoarele tradiționale, cu combustie prin deflagrație, cum ar fi turbomotoarele (TM), care operează pe baza ciclului Brayton, sunt limitate de ineficiențele termodinamice inerente și de constrângerile operaționale stricte [1]. În contrast, sistemele de propulsie cu flux intern supersonic, în special cele cu Camera de Ardere pe bază de Detonație Pusatorie (CADP), oferă posibilitatea combustiei în care rezultă o creștere a presiunii, care poate îmbunătăți semnificativ eficiența ciclului și performanța [2].

Figura 1 ilustrează compromisurile de performanță ale sistemelor de propulsie, **evidențiind potențialul motoarelor cu detonație (MD) de a obține valori mai ridicate ale impulsului specific la diferite numere Mach, pentru diverși combustibili. Acest aspect plasează MD-urile, adică CADP într-o poziție competitivă pentru a avansa tehnologiile de propulsie de nouă generație.**

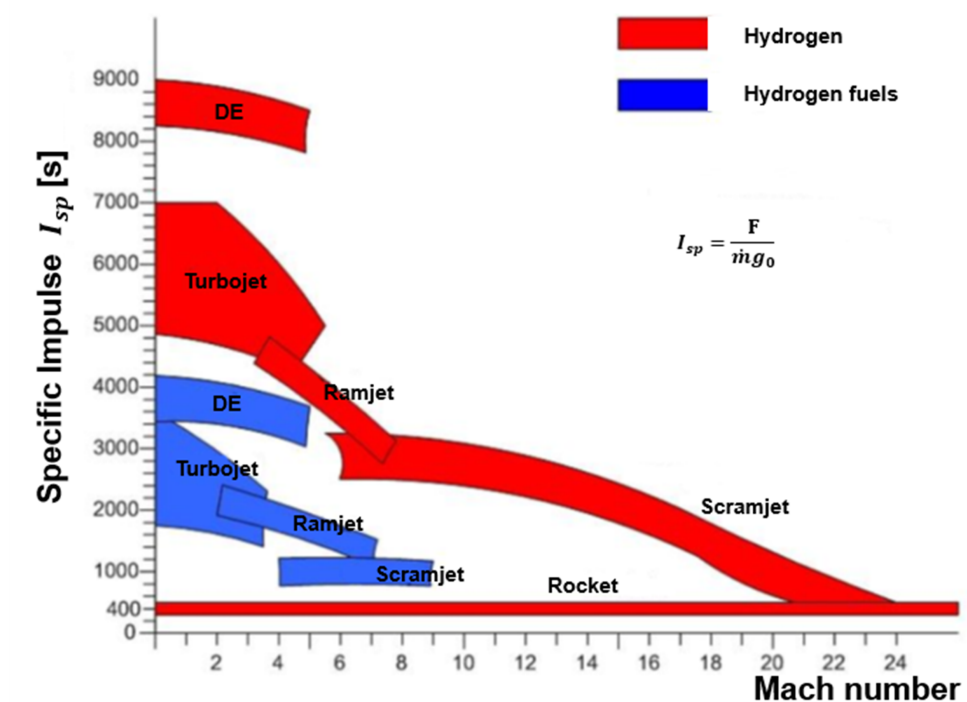


Figure 1: Diagrama impulsul specific obținut pentru diverse arhitecturi de propulsie [3].

La baza sa, această cercetare este motivată de necesitatea de a dezvolta sisteme de propulsie care să ofere un raport ridicat între tracțiune și greutate, funcționând eficient atât în condiții atmosferice, cât și în spațiu. Accentul global tot mai accentuat asupra reducerii emisiilor de carbon și atingerii neutralității climatice subliniază și mai mult importanța MD-urilor pe bază de hidrogen [4,2]. Mai mult, pe măsură ce cursa pentru misiuni interplanetare se intensifică, există o cerere tot mai mare pentru sisteme de propulsie capabile să reducă timpul de călătorie și să minimizeze expunerea echipajului uman la radiațiile cosmice [5,6]. Camera de Detonație Pusatorie (CDP), cu promisiunea sa de performanțe termodinamice superioare și adaptabilitate

la diferite amestecuri de combustibil-oxidant, reprezintă o soluție inovatoare pentru aceste provocări.

Cu toate acestea, în ciuda avantajelor teoretice, implementarea practică a CDP-urilor este împiedicată de dinamica complexă a detonației, precum: probleme legate de inițierea stabilă a detonației, sensibilitatea la geometria camerei și provocările adaptării sistemului la diferite amestecuri de combustibil-oxidant [7]. Problema fundamentală abordată în această teză este răspunderea la întrebări precum: cum să se proiecteze?, cum să se optimizeze? și cum să se valideze un sistem CDP?, care să atingă în mod fiabil procedeul susținut de detonație, folosind combustibili pe bază de hidrogen, oferind în același timp o eficiență și o performanță superioare atât în condiții atmosferice, cât și în vid.

Importanța acestei lucrări constă în potențialul său de a dezvolta tehnologia de propulsie către sisteme eficiente și versatile. Prin umplerea lacunelor din cunoașterea actuală a dinamicii detonației și aplicarea unor metodologii experimentale riguroase, această teză contribuie la proiectarea sistemelor de propulsie de nouă generație pentru aplicații terestre, atmosferice și spațiale.

1.2 Studiul Literaturii de Specialitate

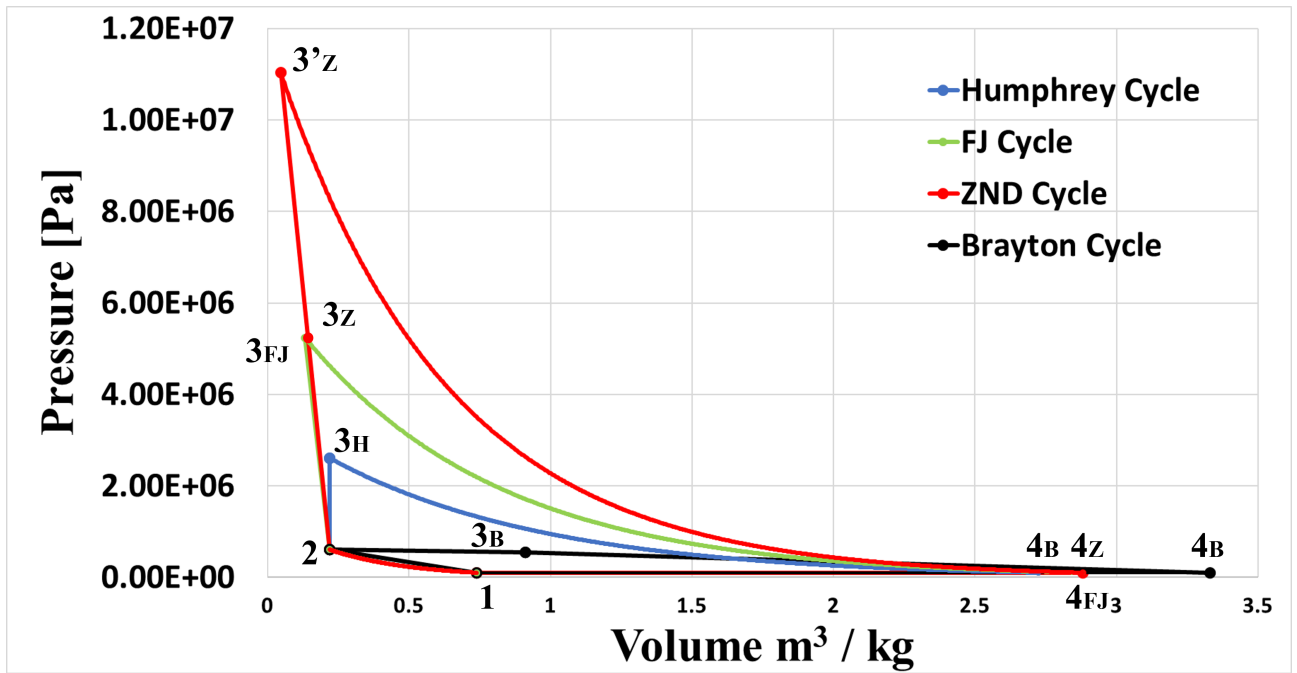
O revizuire aprofundată a literaturii relevă un vast corpus de lucrări care au modelat înțelegerea noastră asupra sistemelor de propulsie bazate pe detonație. Cercetările timpurii s-au concentrat în principal pe caracteristicile proceselor de combustie subsonică. Cu toate acestea, dorința obținerii unei eficiențe superioare a condus la explorarea combustiei supersonice, unde fenomenele de detonație sunt esențiale. Teoria Chapman–Jouguet (CJ) [8,9], împreună cu modelul Zeldovich–von Neumann–Döring (ZND) [10], oferă o bază fundamentală pentru înțelegerea undelor de detonație, detaliind zonele de inducție și reacție care însoțesc fenomenul de combustie la viteze mari.

Complementar modelelor dinamice, analiza ciclurilor termodinamice, precum ciclurile Humphrey și Fickett-Jacobs (FJ), oferă reprezentări simplificate ale proceselor bazate pe detonație. Aceste modele presupun, de regulă, un proces de combustie cu volum practic constant, care promite, în mod inherent, eficiențe de ciclu mai ridicate comparativ cu ciclurile de presiune constantă [11,12]. În teza de doctorat, se prezintă studii comparative ale ciclului termodinamic folosind diagrame de presiune - volum, $p - v$ și entalpie - entropie, $h - s$, pentru un amestec combustibil de H_2/O_2 la un raport de echivalență de 0.1. Aceste studii, ilustrate în **Figura 2**, subliniază faptul că motoarele bazate pe detonație pot obține îmbunătățiri notabile în eficiență și producerea de lucru mecanic (vezi **Tabelul 1**).

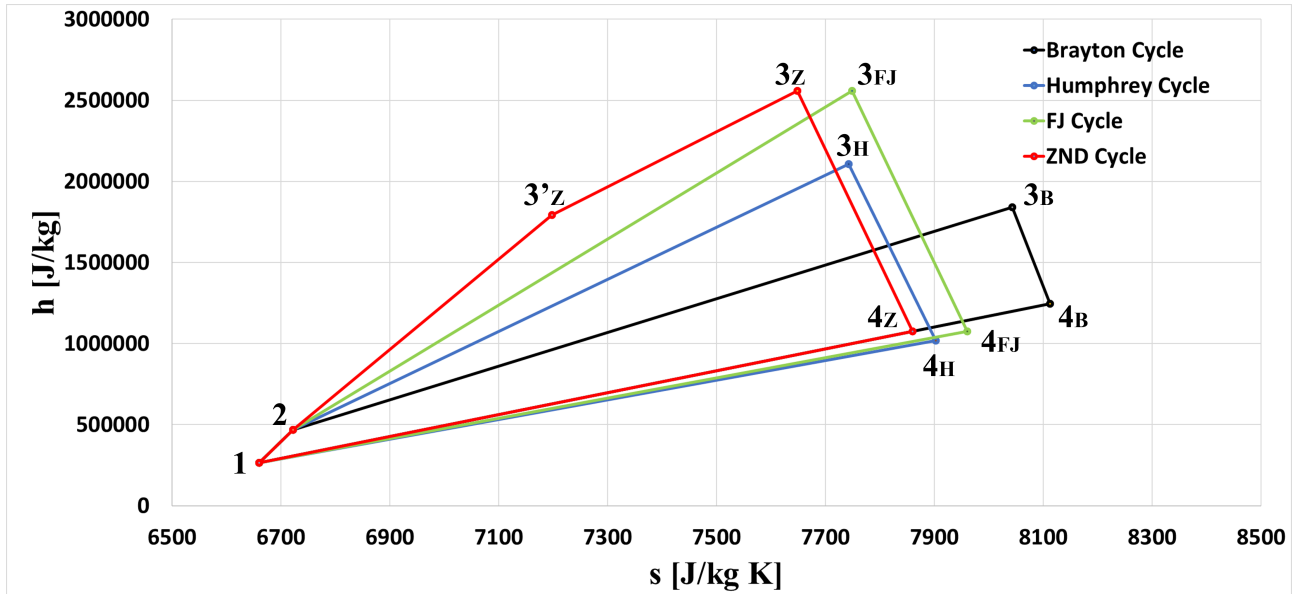
Table 1: Indicatorii de performanță ai CDP în cadrul ciclurilor de detonație

Ciclu	Lucru mecanic specific [J/kg]	Căldură specifică [J/kg]	Eficiență [%]
Humphrey	696.229,19	1.019.544,30	68,288
FJ	899.649,88	1.444.379,11	62,286
ZND	1.009.448,79	1.543.630,76	65,394

Cu toate acestea, realizarea aplicațiilor practice a tehnologiei CDP nu este o sarcină simplă. Fenomenele reale de detonație sunt intrinsec complexe, implicând interacțiuni tridimensionale ale undelor, apariția celulelor de detonație și dinamica punctelor triple, aspecte care pun în dificultate inițierea și menținerea stabilă a detonației [13,14,15]. Mai mult, deși combustia bazată pe detonație a fost studiată extensiv, adaptarea acestor sisteme pentru a funcționa fiabil pe aceeași geometrie CDP, cu amestecuri pe bază de hidrogen (atât hidrogen-aer, cât și



(a) $p - v$



(b) $h - s$

Figure 2: Ciclul CDP vs ciclul Brayton.

hidrogen–oxigen), rămâne o provocare semnificativă, mai ales atunci când sistemul trebuie să opereze în condiții variate, de la medii atmosferice la condiții de vid (asemănătoare spațiului).

1.3 Ipoteze de lucru

Această teză se bazează pe următoarea ipoteză: **CDP-urile alimentate cu hidrogen pot atinge o eficiență termică semnificativ mai ridicată, o creștere a presiunii mai accentuată și rapoarte tracțiune/greutate îmbunătățite în comparație cu motoarele convenționale de combustie la presiune constantă. Aceste îmbunătățiri pot fi realizate printr-o optimizare atentă a geometriei camerei de detonație și a tehnicilor de inițiere a detonației, combinate cu o înțelegere profundă a dinamicii fundamentale**

a detonației atât în condiții atmosferice, cât și în vid.

Această teză se bazează pe mai multe ipoteze interdependente privind performanța și aplicabilitatea Camerelor de Detonație Pulsatorie, alimentate cu hidrogen:

1. Performanța Detonației:

Ipoteza este că CDP-urile alimentate cu hidrogen pot atinge în mod constant viteze de detonație mai mari, creșteri de presiune accentuate și eficiențe termice îmbunătățite comparativ cu motoarele tradiționale de combustie la presiune constantă. Acest lucru se datorează avantajelor intrinseci ale combustiei pe baza creșterii de presiune, care permit o conversie mai eficientă a energiei chimice în energie cinetică. Analiza ciclului termodinamic (**Figura 2**) prevede o eficiență sporită. Mai mult, în condiții optimizate, propagarea undei de detonație în CDP-uri va manifesta indicatori de performanță superiori în comparație cu sistemele convenționale.

2. Adaptarea camerei pentru diferite amestecuri

O altă ipoteză de lucru este aceea că aceeași configurație fundamentală a camerei poate fi adaptată pentru a funcționa atât cu amestec de hidrogen-aer, cât și cu hidrogen-oxigen. Se preconizează că reactivitatea crescută a amestecurilor hidrogen-oxigen să influențeze dimensiunea celulei de detonație, întârzierea la aprindere și stabilitatea ciclului. Prin investigații experimentale riguroase, analize de date și modificări de design, se anticipează acomodarea acestor variații, pe aceeași configurație a camerei fără a compromite neapărat performanța.

3. Optimizarea topologică:

Această ipoteză de lucru are la bază modificări experimentale iterative ale geometriei camerei, care includ configurația injectorului, dimensiunile camerei și mecanismele de alimentare cu combustibil, care pot îmbunătăți semnificativ stabilitatea și repetabilitatea detonației. Prin optimizarea acestor parametri geometrici, CDP-urile pot funcționa la frecvențe mai mari, pot menține detonația pe o gamă mai largă de condiții și pot îmbunătăți indicatorii de performanță, cum ar fi creșterea presiunii, tracțiunea și impulsul specific.

4. Ipoteza Viabilității Operațiunilor în Vid:

În final, ultima ipoteză de lucru este: designul optimizat al CDP va fi capabil să susțină unde de creștere a presiunii prin combustie, în condiții de vid, condiții reprezentative pentru mediile de propulsie spațială. Obținerea unei detonații stabile în astfel de condiții este esențială pentru aplicabilitatea pe scară largă a CDP-urilor în domeniul aerospațial, în special pentru misiunile interplanetare, unde condițiile de mediu diferă semnificativ de cele de la nivelul mării.

În ansamblu, aceste ipoteze de lucru susțin că, prin combinarea tehnicilor de măsurare avansate și a analizei datelor cu o validare experimentală riguroasă, este posibil să se proiecteze un sistem CDP robust și cu performanțe ridicate, capabil să depășească limitările sistemelor convenționale de propulsie. Această cercetare va testa aceste ipoteze printr-o investigație sistematică a dinamicii detonației, optimizarea geometrică și cartografierea performanței pentru diferite amestecuri de combustibil și condiții de operare.

1.4 Obiective

Pentru testarea acestor ipoteze de lucru, teza de doctorat este organizată în jurul mai multor obiective specifice (OS):

SO1: Fezabilitatea Geometriei de Bază

Demonstrarea faptului că geometria de bază a CDP poate iniția și susține în mod fiabil ciclul de detonație folosind un amestec de hidrogen-aer la frecvența operațională de 100 Hz, desemnată din proiectare.

SO2: Adaptarea camerei pentru diferite amestecurile

Modificarea și adaptarea designului de bază pentru a funcționa eficient cu un amestec de hidrogen-oxigen, evaluând astfel impactul reactivității crescute a combustibilului asupra stabilității detonației și a performanței.

SO3: Cartografierea Performanței

Realizarea unor campanii experimentale extinse, complete factorial, folosind cei mai importanți parametri, cum ar fi presiunea gazelor alimentate, frecvența scânteii de aprindere și lungimea țevii de evacuare, pentru a cartografia harta operațională a CDP. Se vor utiliza programe automatizate de procesare a datelor pentru a extrage mediile și varianțele indicatorilor de performanță, iar o Analiză a Varianței (ANOVA) va fi folosită pentru a determina semnificația statistică a fiecărui parametru.

SO4: Optimizarea Geometrică și Creșterea Performanței

Refinarea iterativă a componentelor cheie ale geometriei camerei, inclusiv designul injectorului și dimensiunile camerei, pe baza feedback-ului experimental, pentru a îmbunătăți frecvența de operare, stabilitatea și performanța generală.

SO5: Validarea în Vid

Validarea designului optimizat în condiții de vid, simulând mediile de propulsie spațială, pentru a asigura aplicabilitatea sistemului în condiții similare spațiului și pentru misiuni spațiale.

Fiecare obiectiv este conceput pentru a crește progresiv Nivelul de Maturitate Tehnologică (NMT) al sistemului, vizând în final un nivel adecvat pentru aplicații aerospațiale practice.

Each objective is designed to progressively increase the Technology Readiness Level (TRL) of the system, ultimately targeting a level suitable for practical aerospace applications.

1.5 Metodologia de Cercetare

Metodologia de cercetare este concepută sistematic pentru a aborda obiectivele specifice (OS) și pentru a valida ipotezele propuse. Prin integrarea abordărilor analitice și experimentale, această cercetare își propune să avanseze înțelegerea și performanța CDP-urilor pentru sisteme de propulsie cu eficiență ridicată. În plus, metodologiile prioritizează valorificarea cunoștințelor existente, identificarea lacunelor și dezvoltarea cercetărilor anterioare printr-o revizuire minuțioasă a literaturii și prin tehnici experimentale de ultimă generație. Ansamblul general de lucru este prezentat în **Figura 3**.

Abordare Generală Metodologică

1. Revizuirea Literaturii și Sinteza Cunoștințelor:

- Se efectuează o revizuire cuprinzătoare a publicațiilor factor de impact ridicat, care include articole din reviste Q1/Q2 (precum *Journal of Propulsion and Power*, *Shock Waves*, *Aerospace*, *Acta Astronautica* etc.) și lucrări prezentate în cadrul conferințelor A+/A (precum cele ale *ASME*, *AIAA*, etc.), folosind motoare de căutare precum *Google Scholar*, *Scopus* și *Web of Science*. Se aplică filtre legate de anul publicării, numărul de citări și reputația jurnalului pentru a asigura relevanța și calitatea referințelor.

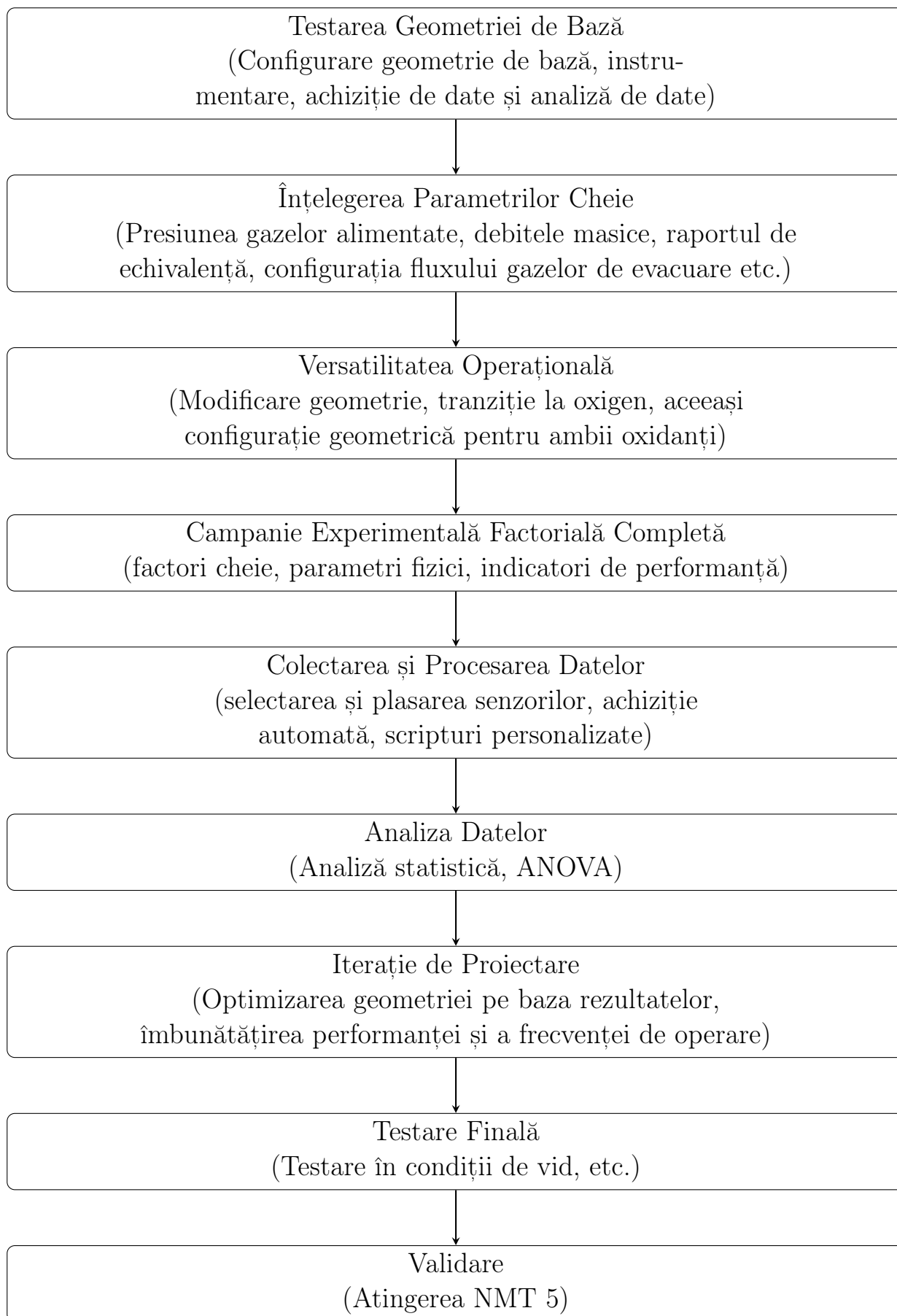


Figure 3: Ansamblul general experimental și analitic pentru cercetarea CDP.

- Accentul se pune pe identificarea realizărilor în domeniul cercetării CDP, analizarea lacunelor în acest domeniu, și înțelegerea acestora. Se va determina modul în care această teză poate contribui la completarea acestor lacune.
- Prin examinarea metodologiilor, constatărilor și recomandărilor din studiile anterioare, această cercetare se bazează pe fundația stabilită de experții din domeniu, abordând totodată provocări specifice acestei teze.

2. Instrumentare și Diagnostică:

- Se selectează cu atenție instrumentele de măsură pentru a asigura măsurători precise și fiabile. Se utilizează tehnici precum vizualizarea Schlieren, senzori cu rată mare de achiziție, de presiune și de temperatură, precum și fotodiode pentru monitorizarea propagării undei de detonație, temperaturilor, repetabilității aprinderii și frecvenței de operare.
- Calibrarea senzorilor se realizează riguros pentru a minimiza incertitudinile de măsurare și pentru a asigura consistența datelor între teste.

3. Proiectare și Testare Iterativă:

- Cercetarea adoptă o abordare iterativă, în care rezultatele experimentale stau la baza îmbunătățirilor ulterioare ale designului. Acest ciclu de proiectare, testare și rafinare este esențial pentru atingerea indicatorilor de performanță doriți.

4. Procesare și Analiză a Datelor:

- Se dezvoltă scripturi automate personalizate pentru a gestiona seturile mari de date generate în cadrul campaniilor experimentale, extrăgând parametri fizici și cinematici cheie precum presiunea, temperatura, viteza și indicatori de performanță precum tracțiunea, impulsul specific și creșterea presiunii prin combustie.
- Se utilizează instrumente matematice de statistică, cum ar fi *"Design of Experiments"* (DoE), extragerea mediilor și a varianțelor, precum și *"Analiza Variantei"* (ANOVA), pentru a cuantifica impactul parametrilor operaționali asupra performanței.

Metodologii pentru atingerea Obiectivelor Specifice

1. Obiectivul 1: Obținerea detonației pentru geometria de bază pentru amestecul de H_2 /aer (NMT 3):

- **Abordare:** Se efectuează teste experimentale pentru a valida capacitatea geometriei de bază de a iniția și susține detonația. Se utilizează tehnica de vizualizarea Schlieren și senzori de presiune cu rată mare de achiziție, pentru a observa formarea și propagarea undei de detonație.
- **Rezultate:** Pe baza observațiilor inițiale, se introduc modificări la duzele de admisie a oxidantului pentru a intensifica intensitatea vortexului și a asigura o detonație robustă.

2. Obiectivul 2: Adaptarea geometriei de bază pentru amestecul de H_2/O_2 (NMT 3):

- **Abordare:** Se testează multiple modele de plăci de injecție pentru a acomoda reactivitatea crescută a amestecului de H_2/O_2 . Se fac testări iterative și evaluarea performanței pentru a identifica configurația optimă.

- **Rezultate:** Obținerea cicluri de detonație repetitive pentru amestecurile H_2/O_2 , demonstrând adaptabilitatea sistemului.
3. **Obiectivul 3:** Cartografierea performanței prin campanii experimentale factoriale complete (NMT 4):
- **Abordare:** Se proiectează o matrice de testare factorială, completă pentru a evalua impactul presiunii oxidantului și combustibilului, frecvenței scânteii de aprindere și lungimii țevii de evacuare asupra performanței. Fiecare parametru are patru niveluri de variație, rezultând un total de 512 de teste.
 - **Interpretare:** Scripturi automate de procesare a datelor extrag mediile și varianțele indicatorilor de performanță, iar ANOVA este utilizată pentru a determina semnificația statistică a fiecărui parametru.
 - **Rezultate:** Se dezvoltă o hartă operațională amplă a CDP-ului, evidențiind tendințele și sensibilitățile cheie ale performanței.
4. **Obiectivul 4:** Optimizarea geometriei PDC pentru performanțe și frecvență sporite (NMT 4):
- **Abordare:** Informațiile obținute din cartografierea performanței sunt utilizate pentru optimizări geometrice, incluzând ajustări ale geometriei camerei.
 - **Validare:** Configurațiile optimizate sunt testate experimental pentru a confirma îmbunătățirile de performanță.
 - **Rezultate:** Se obțin o frecvență operațională și o creștere a presiunii îmbunătățite.
5. **Obiectivul 5:** Demonstrarea creșterii presiunii prin combustie în condiții de vid (NMT 5):
- **Abordare:** Se implementează modificările necesare pentru a aborda provocările din mediile de vid.
 - **Validare:** Testarea într-o cameră de vid simulează condiții similare cu cele din spațiu, monitorizându-se indicatorii de performanță pentru a evalua sustenabilitatea detonației.
 - **Rezultate:** Creșterea de presiune prin combustie este demonstrată cu succes în condiții de vid.

Această teză se bazează pe studii anterioare prin adaptarea metodologiilor consacrate pentru a aborda provocările unice asociate cu CDP. De exemplu, baza de date privind dimensiunea celulei de detonație [16] este utilizată pentru a estima dimensiunile critice necesare pentru susținerea eficientă a undelor de detonație. În plus, cercetările anterioare privind intensificarea turbulenței [17,18,19] stau la baza proiectării obstacolelor din curgere, având ca scop reducerea lungimii de tranziție de la deflagrație la detonație (LDD) și, astfel, îmbunătățirea performanței generale a sistemului.

Dincolo de valorificarea cercetărilor existente, această teză aduce contribuții noi în domeniu. Ea explorează domenii mai puțin studiate, cum ar fi performanța detonației în condiții de vid, un factor critic pentru propulsia spațială, introduce metode de optimizare pentru CDP alimentate cu hidrogen și identifică un efect nou, prezentat în **Capitolul de Concluzii**. Aceste progrese extind înțelegerea actuală a principiilor de funcționare a CDP-urilor și deschid calea către sisteme de propulsie mai eficiente pentru aplicații terestre, atmosferice și spațiale.

2. Sinteza Rezultatelor. Implicații

În acest capitol de sinteză, rezultatele tezei de doctorat sunt sintetizate pentru a ilustra cadrul de lucru iterativ care a ghidat cercetarea în atingerea fiecărui obiectiv specific. Prin compararea și contrastarea rezultatelor diseminate în articolele individuale, se evidențiază modul în care etapele secvențiale de modelare, validare experimentală și optimizare a designului se interconectează pentru a avansa tehnologia CDP alimentată cu hidrogen. Această discuție integrată nu doar că întărește cadrele teoretice și abordările experimentale stabilite în **Capitolul 1**, dar subliniază și procesul sistematic prin care au fost abordate fiecare dintre obiectivele de cercetare. Mai mult, urmărind evoluția metodologiei și a rezultatelor, sunt identificate tendințele cheie, interrelațiile și provocările rămase, care indică direcții promițătoare pentru cercetări viitoare.

Este de reținut că figurile și tabelele incluse în acest rezumat, precum și descrierile acestora, sunt sintetizate sau adaptate selectiv pentru a prezenta ideile principale, iar unele detalii pot fi omise pentru claritate și concizie.

2.1 Investigații Experimentale ale Camerei de Detonație Pulsatorie Alimentată cu Hidrogen

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Capitolul 2 al Tezei de Doctorat** și reprezintă articolul [20]. Acestea sunt sintetizate mai jos.

Investigațiile experimentale asupra CDP-ului alimentat cu hidrogen prezentate în această secțiune se adresează în principal **OS1: Fezabilitatea Geometriei de Bază**. Obiectivul este de a demonstra că geometria de bază a CDP poate iniția și susține în mod fiabil ciclurile de detonație folosind un amestec de hidrogen-aer, la frecvența operațională desemnată de 100 Hz. Studiul se concentrează pe validarea indicatorilor de performanță ai camerei, în condiții experimentale controlate, oferind dovezi privind sustenabilitatea unei de detonație, consistența ciclului și caracteristicile operaționale fundamentale necesare pentru a îndeplini criteriul de fezabilitate de bază.

Hidrogenul este selectat drept combustibil principal datorită susceptibilității bine documentate la detonație, gamei largi de inflamabilitate și a temperaturii scăzute de autoaprindere, ceea ce îl face un candidat foarte eficient pentru combustia cu creștere de presiune. Cu toate acestea, densitatea sa scăzută și difuzivitatea ridicată prezintă provocări în stocare și injecție controlată. Designul experimental își propune să depășească unele dintre aceste provocări și să valideze capacitatea CDP de a obține cicluri stabile de detonație, folosind hidrogen.

Inovația remarcabilă constă în utilizarea generatoarelor de unde Hartmann-Sprenger pentru a intensifica amestecarea combustibil-oxidant în sistemul aerodinamic al CDP-ului. Prin generarea unor vortexuri cu rotație oscilatorie, acest concept de valvă aerodinamică elimină necesitatea restricțiilor mecanice impuse în curgere, permițând o amestecare eficientă și uniformă. Designul (**Figura 4**) facilitează funcționarea fără valve, caracteristica esențială a geometriei de bază, asigurând astfel cicluri de detonație robuste și consistente.

Rezultatele confirmă inițierea și menținerea cu succes a unui regim oscilator auto-susținut în CDP. Viteza undei de șoc (**Figura 5(a)**) este măsurată la $2215 \text{ m/s} \pm 419 \text{ m/s}$, oferind dovezi clare ale propagării stabile a detonației. Un rezultat cheie este identificarea unei structuri de tip disc Mach, în curgerea gazelor arse, la ieșirea din țeava de evacuare (**Figura 5(b)**), care confirmă natura supersonică a fluxului și susține capacitatea camerei de a opera în condiții de creștere a presiunii.

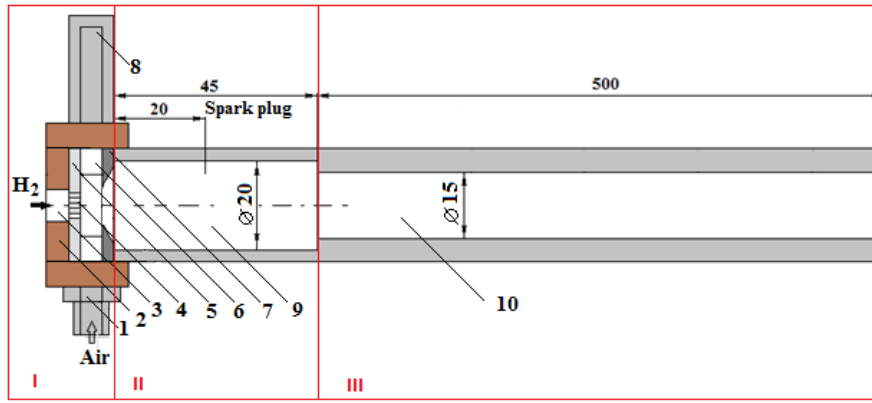


Figure 4: Modelul experimental al CDP [20].

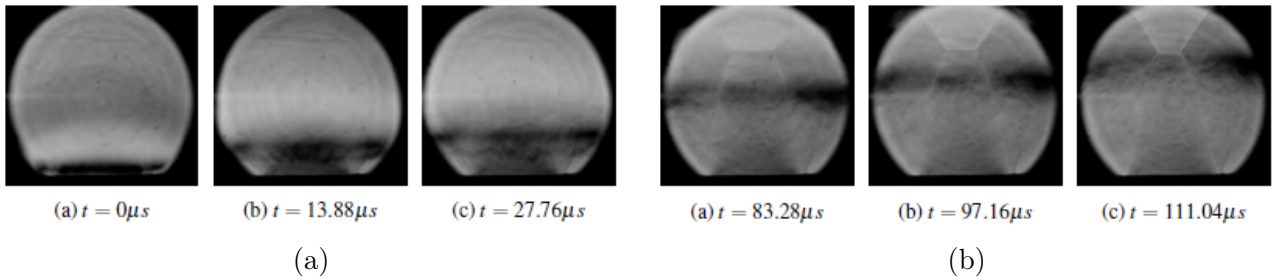


Figure 5: Structura curgerii la ieșirea din țeava de evacuare: (a) Unda de șoc, (b) Structură disc Mach [20].

În urma campaniei experimentale s-au identificat patru faze distincte în cadrul ciclului CDP:

1. **Detonția:** O creștere rapidă a presiunii urmată de o scădere bruscă, corespunzătoare propagării undei de detonație.
2. **Antrenarea:** Inversarea fluxului determină ingestia aerului din mediul ambiant și al gazelor de combustie în interiorul camerei.
3. **Evacuarea faza 1:** Expulzarea gazelor din sistem.
4. **Evacuarea faza 2:** Evacuarea gazelor de ardere rămase sunt expulzate, resetând sistemul pentru următorul ciclu.

Aceste faze sunt observate în mod constant pentru toate condițiile operaționale, validând suplimentar fiabilitatea geometriei de bază în obținerea creșterii de presiune prin combustie (a se vedea **Figura 6**).

Camera a atins o frecvență operațională de $100.3 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$, corespunzătoare frecvenței de bază definită în **OS1**. Această consistență a frecvenței este esențială pentru aplicațiile practice, deoarece asigură cicluri de combustie previzibile și repetabile. În plus, viteza medie a fluxului în timpul fazei de detonație a fost măsurată la 706 m/s , iar numărul Mach maxim al fluxului de evacuare a fost estimat la $1,05 \pm 0,02$. Aceste constatări se aliniază cu performanțele așteptate pentru geometria de bază.

Tehnica de vizualizare Schlieren, combinată cu măsurătorile de presiune statică, oferă informații valoroase despre dinamica curgerii în CDP. Imaginile Schlieren secvențiate în timp surprind dezvoltarea undelor de șoc, undelor de expansiune și tranziția fluxului către un regim

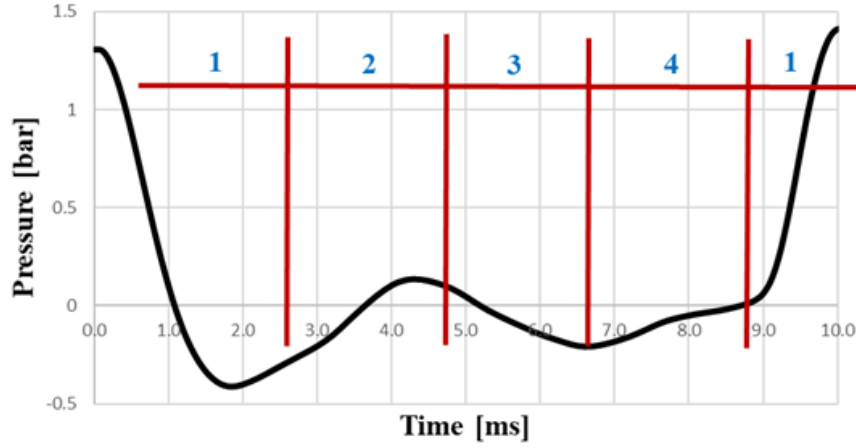


Figure 6: Presiune Statică Relativă pe Parcursul Unui Ciclu CDP [20].

subsonic. Aceste vizualizări confirmă suplimentar capacitatea camerei de a îndeplini cerințele din **OS1**.

Rezultatele prezentate în această secțiune susțin atingerea obiectivului **OS1: Fezabilitate de Bază**, validând capacitatea CDP-ului de a iniția și menține în mod fiabil cicluri de detonație în condițiile specificate. Integrarea metodelor de control aerodinamic pentru pre-amestecarea produșilor de ardere, împreună cu robustețea geometriei de bază, constituie o fundație solidă pentru explorarea și optimizarea ulterioară a sistemelor de combustie cu creștere a presiunii.

Un rezultat important al acestui articol [20] recomandă explorarea potențialului pentru frecvențe operaționale mai ridicate decât frecvența de bază de 100 Hz . Aceste progrese vor contribui la dezvoltarea unor arhitecturi de propulsie bazate pe detonație, mai eficiente și scalabile.

2.2 Comparație Experimentală între Diferiți Oxidanți pentru Camera de Detonație Pulsatorie Alimentată cu Hidrogen

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Capitolul 3 al Tezei de Doctorat**. Acestea corespund articolului [21] și sunt sintetizate în cele ce urmează.

Acest studiu se bazează pe cercetările anterioare ale CDP-ului alimentat cu hidrogen (**OS1**) și are ca scop evaluarea efectelor diferiților oxidanți, aer și oxigen pur, asupra procesului de detonație. Obiectivul este de a explora modul în care eliminarea azotului, componentă esențială a aerului, influențează LDD-ul, stabilitatea combustiei și performanța generală a ciclului. Deoarece azotul acționează ca diluant, absența sa în ciclurile alimentate cu oxigen conduce la caracteristici diferite ale detonației, necesitând ajustări în ceea ce privește injecția combustibilului și în pregătirea amestecului. Această cercetare se aliniază cu **OS2: Adaptarea Geometriei de Bază pentru Amestecuri de H_2/O_2** , prin evaluarea capacității CDP, alimentate cu hidrogen, de a susține cicluri de detonație stabile pentru diferiți oxidanți, pe aceeași geometrie. Mai mult, în acest studiu sunt raportate constatări privind evoluția variabilă a CDP, în funcție de oxidantul ales, pentru aceeași geometrie a camerei.

Experimentele sunt efectuate pe standul de detonație modificat, proiectat să livreze ambii oxidanți (aer și oxigen) pe o singură linie de alimentare, pentru a asigura similitudinea condițiilor de intrare în CDP. Studiul compară comportamentul amestecurilor hidrogen-aer și hidrogen-oxigen prin analizarea aprinderii, propagării detonației și performanței ciclului.

Configurația experimentală include tehnica de vizualizare Schlieren pentru a capta mișcarea undelor de șoc și a fronturilor de detonație la ieșirea din țeava de evacuare, oferind informații valoroase despre dinamica curgerii.

Performanțele obținute pentru amestecul de Hidrogen - Aer

În secțiunea anterioară, CDP-ul este evaluat în regimul său optim de funcționare, adică la regimul de proiectare. În cazul în care aerul este folosit drept oxidant, ciclurile de detonație stabile sunt obținute pentru rapoarte de echivalență cuprinse între 0.45 și 0.63. În acest interval, camera atinge constant cicluri de detonație repetabile, asigurând o combustie eficientă și o performanță controlată a ciclului. Pentru a evalua suplimentar performanța CDP-ului și pentru a facilita tranziția la utilizarea oxigenului drept oxidant, sunt identificate și experimentate puncte de operare adiacente regimului de proiectare. În afara intervalului optim de raport de echivalență, sistemul prezintă neomogenități semnificative, inclusiv o incidență mai mare a aprinderilor ratate și incapacitatea de a menține detonația. Mai mult, creșterea presiunii de alimentare a aerului care conduce la o amestec de produși de reacție mai puțin eficient, este responsabilă pentru aceste aprinderi ratate mai frecvente și astfel conduce la o frecvență operațională redusă (vezi **Figura 7**).

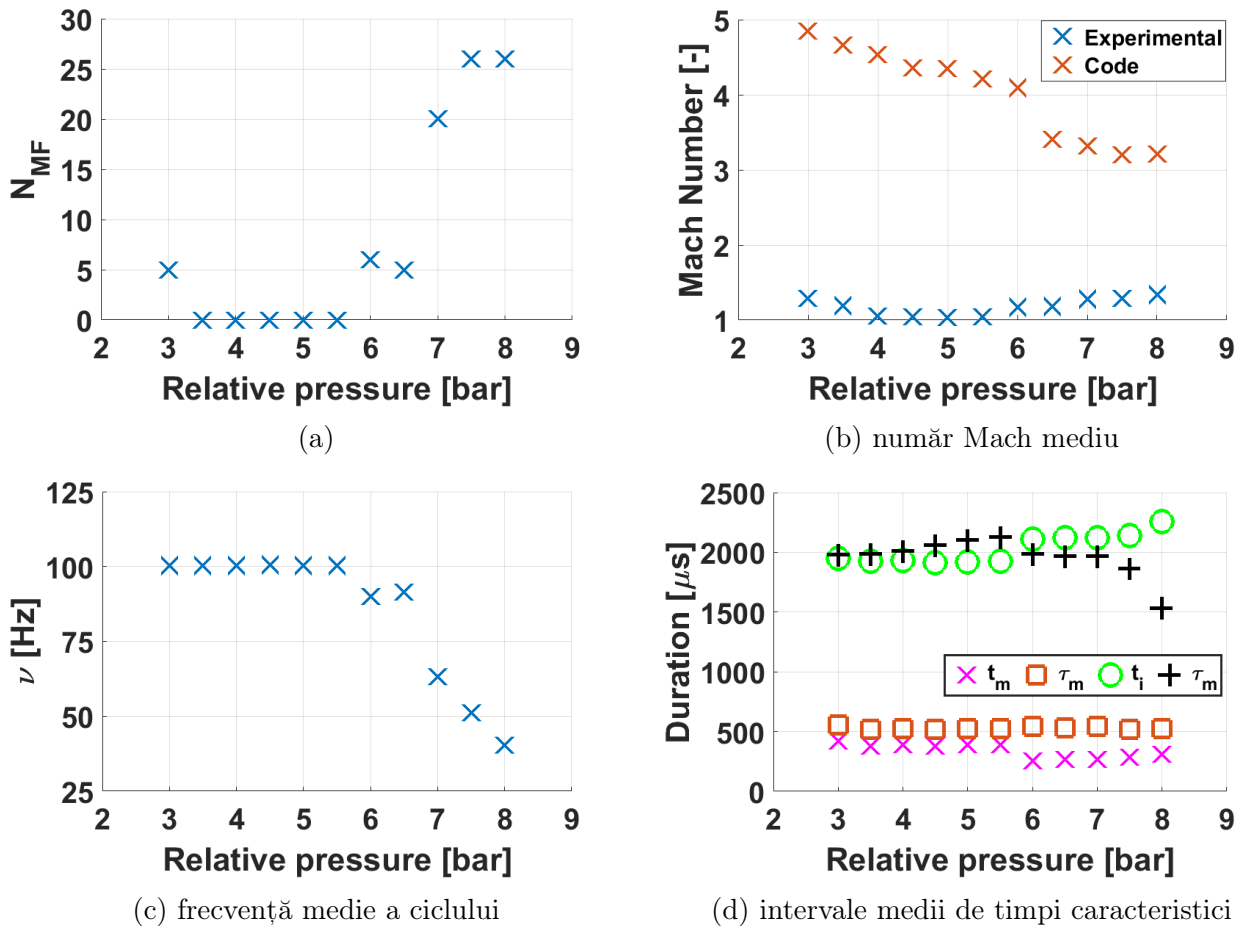


Figure 7: (a) Influența presiunii de alimentare cu aer asupra repetabilității ciclului (b),(c),(d) Influența presiunii totale de alimentare cu aer asupra caracteristicilor de performanță [21].

Tranziția la Oxigen

Trecerea la oxigen pur drept oxidant introduce noi provocări. Testele inițiale pe configurația de bază a CDP au condus la un comportament instabil al detonației, indicând faptul că reactivitatea crescută a oxigenului modifică condițiile necesare pentru o tranziție de succes a LDD. Pentru a remedia această situație, sunt efectuate modificări la sistemul de injecție a combustibilului, optimizând structura curgerii pentru a acomoda modificarea reacțiilor chimice, din punct de vedere cinetic. Aceste ajustări duc la obținerea unor produși de combustie mai rapid, dar și la o fază de antrenarea a aerului din mediul ambiant mai scurtă, rezultând într-un număr mai mare de aprinderi ratate și o frecvență operațională redusă în comparație cu experimentele cu aer (a se vedea **Figura 8**).

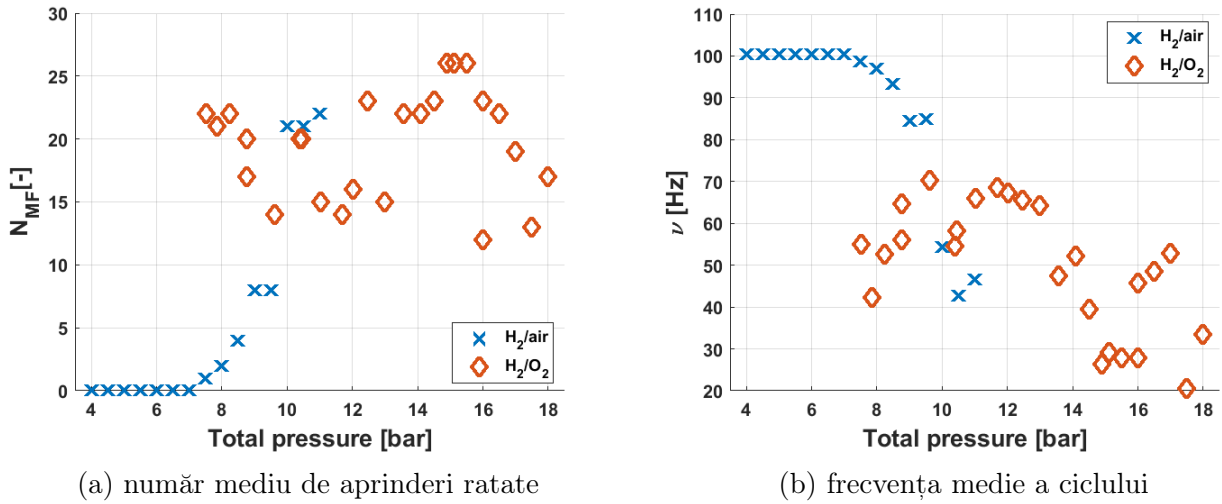


Figure 8: Neuniformități ale ciclului în timpul funcționării cu hidrogen-oxigen [21].

Compararea performanței între Aer și Oxigen

O comparație directă a caracteristicilor ciclului de detonație evidențiază diferențe cheie între cei doi oxidanți. Configurația hidrogen-oxigen demonstrează numere Mach mai mari, adică o propagare mai rapidă a detonației. De asemenea, se observă o întârziere a apariției curgerii inversate (ingestia aerului din mediul ambiant), indicând o retenție mai mare a impulsului în fluxul de evacuare. Cu toate acestea, se înregistrează o rată mai mare de aprinderi ratate, subliniind necesitatea unor optimizări suplimentare pentru a asigura o performanță consistentă a ciclului. Rezultatele sunt sintetizate în **Tabelul 2**, în timp ce un exemplu de vizualizare Schlieren este prezentat în **Figura 9**.

Table 2: Valorile Caracteristice Medii pentru Aer și Oxigen

Parametru	O ₂		Aer	
	Valoare Medie	C.I.	Valoare Medie	I.C.
$\mu[^\circ]$	53.457	13.630	65.714	9.959
M	1.26851	0.20982	1.10530	0.09632
$t_m[\mu s]$	217.204	136.332	149.462	65.063
$t_i[\mu s]$	2310.753	474.511	1597.849	99.322
$\tau_i[\mu s]$	1331.183	613.792	1705.376	96.151

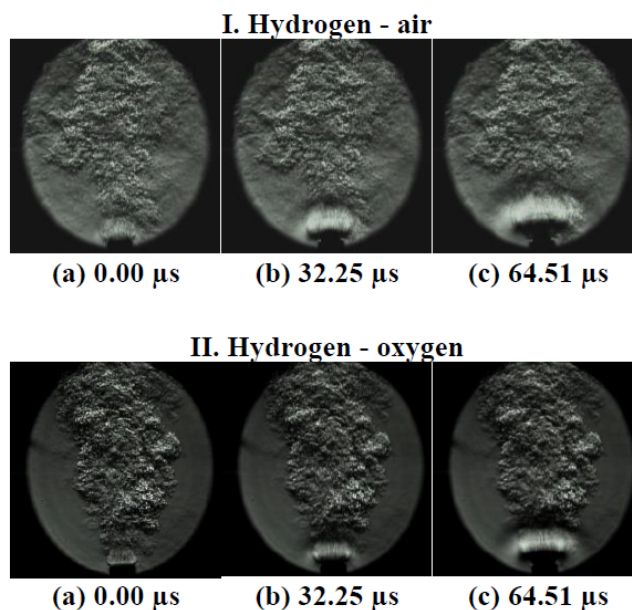


Figure 9: Unda de șoc normală

2.3 Explorarea Sustinerii Detonației Pulsatorii în Amestecuri de Hidrogen-Aer și Hidrogen-Oxigen

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Capitolul 4 al Tezei de Doctorat** și corespund articolului [22]. Acestea sunt sintetizate în ceea ce urmează. Constatările fac parte din campania experimentală factorială completă, care își propune să ridice CDP-ul la NMT 4, conform obiectivului **OS3: Cartografierea Performanței prin Campanie Experimentală Factorială Completă**.

Pe baza constatărilor anterioare de testare atât asupra regimului de proiectare, cât și asupra punctelor adiacente, pentru ambii oxidanți, al treilea articol analizează stabilitatea detonației CDP folosind amestecuri de hidrogen-aer și hidrogen-oxigen, urmărind să definească limitele operaționale ale detonației (adică harta de operare). Motivația principală din spatele acestei cercetări este de a aprofunda înțelegerea asupra factorilor care influențează repetabilitatea și eficiența ciclului de detonație, în special pentru aplicațiile destinate propulsiei spațiale. Studiul evaluează modul în care alegerea oxidantului, presiunea gazelor alimentate, configurația țevii de evacuare și frecvența de aprindere afectează harta operațională a camerei, reprezentând o parte esențială a eforturilor continue de îmbunătățire a tehnologiei CDP. Datele experimentale asociate acestor teste experimentale vor fi prezentate în **Secțiunile 2.4, 2.5 și 2.6**.

O serie de experimente controlate sunt efectuate utilizând sisteme de alimentare cu combustibil și oxidant la presiune înalte, împreună cu un sistem de aprindere cu frecvență variabilă integrat la prototipul CDP. În plus, țeava de evacuare a CDP a fost modificată într-o configurație modulară, pentru a permite adaptarea lungimii. S-a realizat o campanie experimentală factorială completă (patru factori, fiecare cu patru nivele – **Tabelul 3**), cuprinzând 256 de cazuri de test unice, concepute pentru a explora impactul diferiților parametri operaționali. Hărțile 3D operaționale pentru fiecare combinație de combustibil - oxidant sunt prezentate în **Figura 10**.

Rezultatele indică faptul că ciclurile de detonație cu hidrogen-oxigen prezintă o fereastră de stabilitate mai largă în ceea ce privește raportul de echivalență pentru susținerea detonațiilor repetabile. În contrast, amestecurile hidrogen-aer demonstrează o marjă de stabilitate mai îngustă, însă în detrimentul unei eficiențe globale a detonației mai reduse. Analize suplimentare ale efectelor presiunii combustibilului și a oxidantului evidențiază tendințe cheie în menținerea ciclului. Se observă că presiunea maximă necesară pentru a obține o detonație stabilă este mai

Table 3: Factorii și nivelele acestora din campania experimentală factorială completă.

Factor	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Exhaust pipe length	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
Spark plug frequency	100 Hz	133 Hz	233 Hz	350 Hz
Hydrogen pressure	5.5 bara	7 bara	8.5 bara	10 bara
Oxidizer pressure	9 bara	7.5 bara	6 bara	4.5 bara

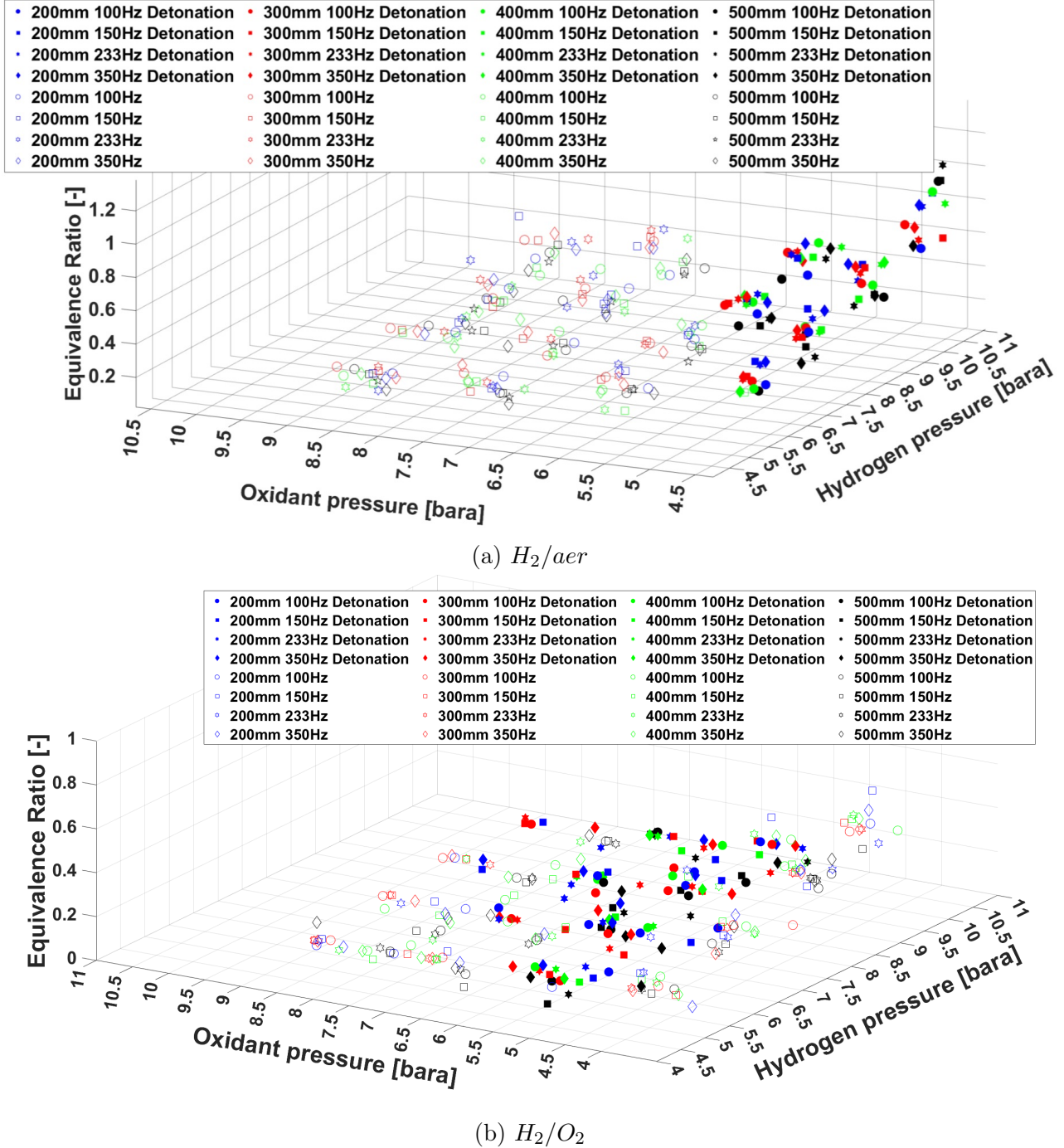


Figure 10: Hartă 3D a regimurilor operaționale [22].

mare în ciclurile alimentate cu oxigen comparativ cu cele alimentate cu aer. În regimurile cu presiuni scăzute ale oxidantului, combustia trece frecvent în deflagrație, nereușind să se atingă o detonație susținută.

Pentru amestecul cu aer, influența presiunii liniei de alimentare cu oxidant joacă un rol central în determinarea menținerii ciclurilor de detonație pulsatorii. Se constată că atunci când presiunea aerului depășește 6.5 bar, nu se poate atinge un regim de detonație susținut. În mod similar, la celălalt capăt, atunci când presiunea aerului scade sub 5 bar, detonația devine imposibilă în majoritatea cazurilor, cu o singură excepție. Este de remarcat că testul cu cel mai scăzut raport de echivalență înregistrat, 0.319, eșuează de asemenea în menținerea detonației, evidențiind importanța atât a presiunii aerului, cât și a compoziției amestecului pentru stabilitatea ciclului.

Pe lângă presiunea aerului, presiunea hidrogenului rezultă ca al doilea cel mai important factor care influențează detonația susținută. Datele arată că atunci când presiunea hidrogenului depășește 8 bar, ciclurile de detonație sunt obținute constant. Această relație poate fi explicată prin interacțiunea dintre dinamica combustibilului și a oxidantului. Presiunea aerului mai ridicată contribuie la formarea unui vârtej mai puternic în camera de preamestec, îmbunătățind uniformitatea amestecului combustibil-aer. În același timp, presiunea mai ridicată a combustibilului îmbunătățește capacitatea jetului de hidrogen de a penetra valva aerodinamică formată de vârtej, asigurând o amestecare eficientă și o inițiere a detonației îmbunătățită.

Pentru oxigen, influența presiunii liniei de alimentare cu oxidant manifestă același comportament în definirea hărții operaționale pentru ciclurile de detonație susținute. În intervalul de presiune de la 4.8 la 5.4 bar, toate cazurile testate demonstrează detonație susținută, indicând un regim stabil în care combustia poate fi menținută fiabil. Pe măsură ce presiunea crește în intervalul de la 5.4 la 6.4 bar, majoritatea cazurilor continuă să prezinte detonație susținută, deși se observă unele deviații. Totuși, atunci când presiunea aerului este ridicată suplimentar la intervalul de la 6.4 la 7.3 bar, presiunea pe linia de combustibil devine factorul determinant pentru stabilitatea detonației. În acest interval, nu se obține detonație pentru cazurile în care presiunea hidrogenului este sub 7 bar. Peste 7.3 bar, doar anumite regimuri de operare susțin detonația repetabilă, iar acestea sunt limitate la rapoarte de echivalență peste 0.069, ceea ce sugerează că sunt necesare amestecuri mai bogate pentru a compensa debitul crescut de oxidant.

Pe lângă presiunea oxidantului, presiunea hidrogenului se remarcă ca al doilea cel mai important factor care afectează susținerea detonației. Atunci când presiunea hidrogenului scade sub 4.8 bar, sistemul trece în mod constant în deflagrație, datorită intensității reduse a vârtejului aerodinamic care controlează admisia combustibilului. Această lipsă de impuls împiedică o amestecare corespunzătoare a combustibilului cu oxigenul și inhibă eliberarea rapidă de energie necesară pentru detonație. În schimb, pentru presiuni ale hidrogenului peste 10 bar, toate cazurile conduc la detonație susținută, confirmând că o penetrare adecvată a jetului de combustibil și o intensitate corespunzătoare a vârtejului sunt esențiale pentru menținerea ciclurilor de detonație stabile.

Fenomenul care are loc în dispozitivul aerodinamic de preamestecare al CDP-ului este explicat în **Figura 11**. Capacitatea de a menține un ciclu de detonație repetabil este strâns legată de presiunea de alimentare cu oxidant, care influențează direct viteza jetului în camera de preamestec. Această viteză a jetului, la rândul său, dictează viteza de rotație a vârtejurilor responsabile pentru amestecarea combustibil-oxidant, acționând efectiv ca o valvă aerodinamică ce controlează admisia combustibilului și omogenitatea amestecului. Când intensitatea vârtejului este scăzută, procesul de injecție a combustibilului devine necontrolat, conducând la o amestecare incompletă și determinând trecerea camerei în deflagrație, ceea ce împiedică obținerea unei detonații susținute.

Menținerea ciclurilor de detonație pulsatorie este reglementată în principal de presiunile de alimentare ale combustibilului și oxidantului, cu influențe secundare din partea lungimii țevii de evacuare și a frecvenței de aprindere. Aceste constatări subliniază echilibrul delicat dintre dinamica oxidantului, formarea vârtejurilor și sincronizarea injecției de combustibil, toate

ducând un rol esențial în obținerea și menținerea unui ciclu de detonație pulsatoriu repetabil.

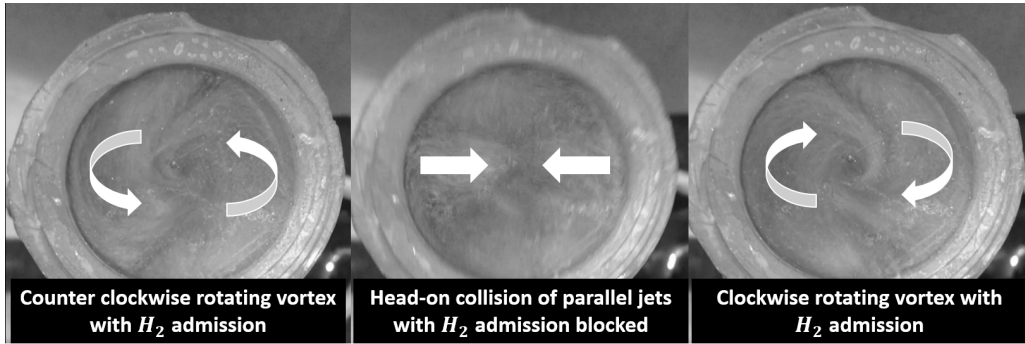


Figure 11: Vizualizarea curgerii în camera de amestec [21].

2.5 Analiza Experimentală a Creșterii de Presiune a Motorului cu Detonație Pulsatorie

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Capitolul 5 al Tezei de Doctorat**, care corespunde articolului [23]. Acest articol contribuie la **OS3: Cartografierea Performanței prin Campanie Experimentală Factorial Completă** definite în teza de doctorat, prin investigațiile asupra caracteristicilor creșterii de presiune a CDP pentru ambele amestecuri.

Obiectivul principal este de a determina regimurile operaționale care generează presiunea maximă, presiunea medie a ciclului și creșterea de presiune. Pentru a se atinge acest scop, se adoptă aceeași campanie experimentală factorial completă (**Tabelul 3**), prin variația sistematică a parametrilor, precum: presiunea oxidantului, presiunea combustibilului, lungimea țevii de evacuare și frecvența scânteii de aprindere. Se analizează efectele acestora asupra caracteristicilor de presiune ale detonației. Pentru a asigura o achiziție de date de frecvență înaltă, sunt utilizați doi senzori de presiune Kulite ETM-HT-375 (K1 și K2), care operează la cu o rată de achiziție de 20 kHz, pentru a captura comportamentul ciclului. Amplasarea senzorilor este ilustrată în **Figura 12**. În plus, tehnica de vizualizare Schlieren este utilizată pentru a vizualiza configurația curgerii la ieșirea din țeava de evacuare și pentru a completa datele obținute de la senzori.

Un algoritm de post-procesare a fost dezvoltat pentru analiza semnalului brut al senzorilor de presiune. Se aplică un filtru pentru a elimina zgomotul nedorit, păstrând în același timp fluctuațiile de presiune relevante asociate ciclurilor de detonație. Odată ce datele sunt filtrate, algoritmul identifică valorile maxime ale presiunii în cadrul fiecărui ciclu de detonație, utilizând o metodă de detecție pe baza unui prag pentru a separa vârfurile de detonație valide, de zgomotul captat de senzori, precum cel al bujiei. Acest lucru permite măsurarea precisă a presiunii maxime, a presiunii medii, a frecvenței dominante și a creșterii de presiune a ciclului. Creșterea de presiune este calculată prin compararea nivelurilor de presiune la începutul și la sfârșitul fiecărui ciclu de detonație. Ulterior, se aplică un al doilea filtru care identifică media pentru a evidenția tendințele generale ale caracteristicilor de presiune. Un exemplu de rezultat, obținut în urma achiziției semnalului cu senzorii de presiune, este prezentat în **Figura 13**.

În plus, algoritmul ajută la evaluarea stabilității ciclului, prin măsurarea variațiilor presiunilor maxime pe parcursul evenimentelor de detonație succesive. Această analiză evidențiază condițiile operaționale care conduc la cicluri de detonație stabile sau instabile, oferind informații valoroase despre influența presiunii oxidantului, a lungimii țevii de evacuare și a raportului de echivalență asupra consistenței obținerii detonației.

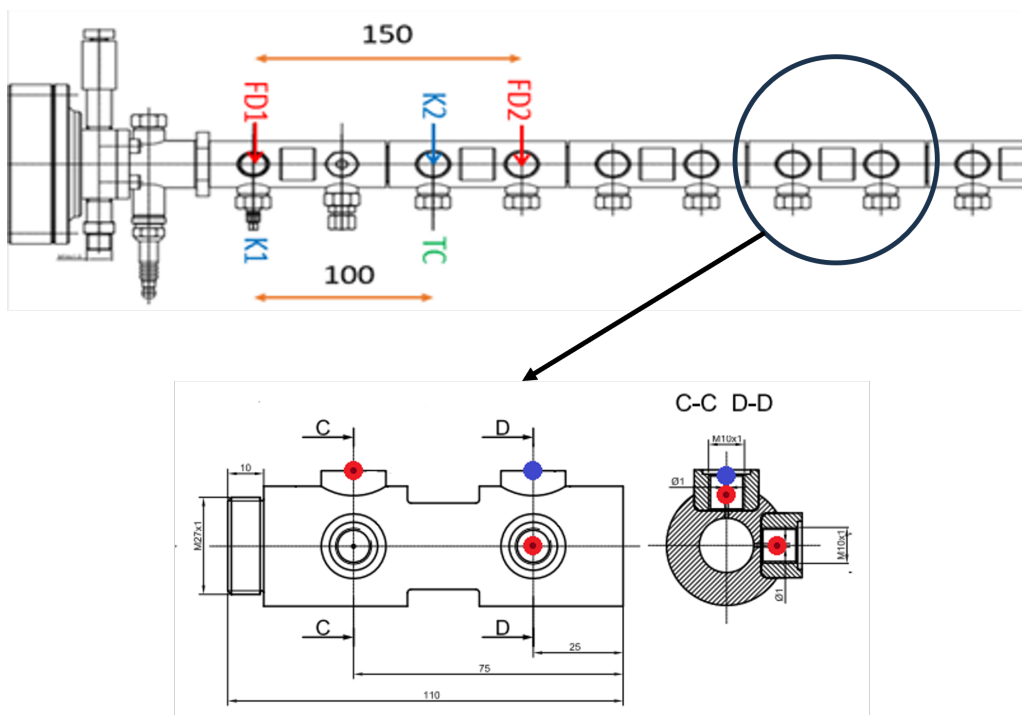


Figure 12: Diagrama de instrumentare. K1 și K2 marchează poziția celor doi senzori de presiune [23].

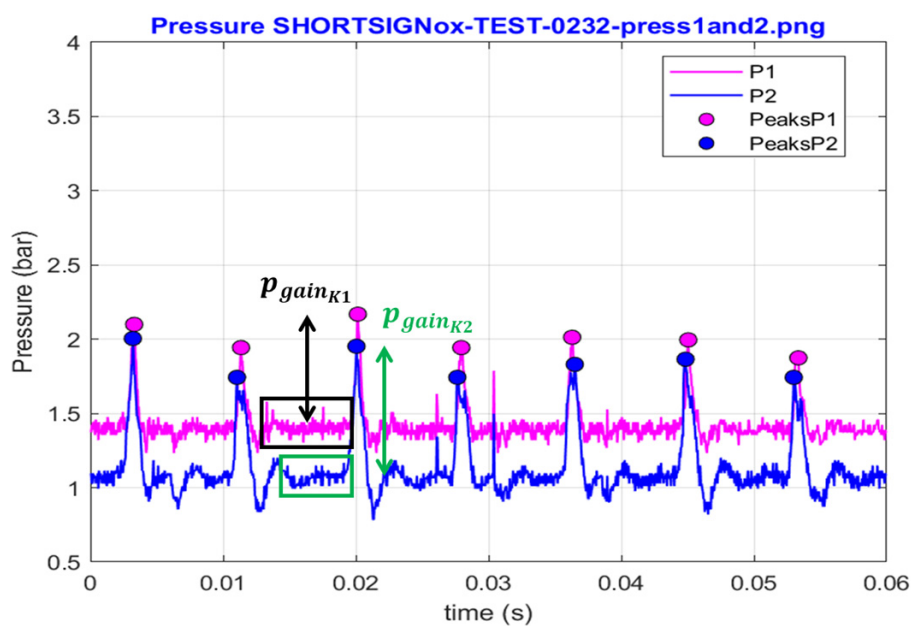


Figure 13: Exemplet al creșterii de presiune [23].

Rezultatele indică că CDP atinge cele mai ridicate valori ale presiunii maxime și medii ale ciclului atunci când presiune liniei de oxidant este menținută la o presiune totală de 6 bar, iar presiunea liniei de combustibil la 10 bar. Acest aspect rămâne valabil atât pentru aer, cât și pentru oxigen. Mai mult, lungimea optimă a țevii de evacuare diferă între oxidanți: 500 mm pentru aer și 300 mm pentru oxigen. Analiza datelor privind frecvența de operare arată că setarea frecvenței bujiei la 100 Hz generează performanțe optime în ambele cazuri.

Pentru experimentele realizate la un raport de echivalență fix, se observă că creșterea lungimii țevii de evacuare sau a presiunii oxidantului duce la creșterea presiunilor medii și maxime, în timp ce modificările ale frecvenței bujiei au efect minim. În mod specific, la pre-

siuni mai mici ale oxidantului, există un raport de echivalență optim care scade pe măsură ce lungimea țevii de evacuare este extinsă, cu praguri de presiune măsurate la 4.5 bar pentru aer și 6.0 bar pentru oxigen. La presiuni ridicate ale oxidantului, însă, această tendință se inversează, la un anumit raport de echivalență, care corespunde valorilor minime observate atât pentru presiunea medie, cât și pentru cea maximă. Acest aspect sugerează că sunt necesare investigații suplimentare pentru a înțelege comportamentul CDP-ului la debite masice de combustibil scăzute.

Mai mult, frecvența de operare a camerei este determinată în principal de frecvența bujiei, deși aprinderile ratate în timpul inițierii detonației duc adesea la frecvențe efective mai mici decât cele la care este setată bujia. Așa cum este de așteptat, frecvența de proiectare de 100 Hz minimizează apariția aprinderilor ratate. La regimuri de funcționare adiacente regimului de proiectare, datele indică faptul că, atunci când aerul este utilizat ca oxidant, sistemul poate atinge ocazional o frecvență de funcționare de 150 Hz. În alte scenarii, deși scânteia poate fi declanșată peste frecvența de proiectare, aprinderile ratate împiedică sistemul să atingă efectiv acea frecvență, datorită frecvenței operaționale nealiniată a sistemului aerodinamic. În final, rapoartele de echivalență scăzute sunt asociate cu o incidență mai ridicată a aprinderilor ratate, în ambele campanii experimentale. Notabil, o țeava de evacuare mai scurtă tinde să reducă apariția aprinderilor ratate atunci când se utilizează aer și la presiuni ridicate de oxigen, în timp ce o țeava de evacuare mai lungă performează mai bine în condiții de presiune scăzută a oxigenului.

2.5 Analiza Experimentală a Tracțiunii și a Impulsului Specific aleCamerei de Detonație Pulsatorie

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Capitolul 6 al Tezei de Doctorat**, care corespunde articolului [24]. Acest articol diseminează rezultatele privind tracțiunea și impulsul specific, obținute în campania experimentală factorială completă a CDP (descrisă în **Tabelul 3**), pentru ambele amestecuri. Aceste constatări fac parte din **OS3: Cartografierea Performanței prin Campanie Experimentală Factorială Completă**.

Configurația experimentală include un sistem care încorporează un senzor de măsurare a forței, conceput pentru a măsura tracțiunea camerei (**Figura 14**). În plus, achiziția datelor de la debitmetre, care furnizează parametri fizici ai gazelor de alimentare, ajută la corelarea detonației cu generarea de impuls.

Rezultatele demonstrează că valorile medii ale tracțiunii și ale impulsului specific sunt mai mari atunci când se utilizează un amestec de hidrogen-aer în comparație cu hidrogen-oxigen. Acest rezultat se datorează în principal designului inițial al CDP, care a fost optimizat pentru aer ca oxidant. La trecerea către hidrogen-oxigen, au fost efectuate doar modificări minore, în principal ajustări ale sistemului de injecție a combustibilului, pentru a menține o configurație de bază capabilă să susțină regimuri de detonație la frecvență înaltă.

Frecvența de operare a camerei este determinată în mare parte de frecvența bujiei, deși aprinderile ratate în timpul inițierii detonației conduc adesea la frecvențe mai mici decât cele așteptate. Așa cum este de așteptat, o frecvență a bujiei de 100 Hz minimizează erorile de aprindere. La regimuri adiacente celui de proiectare, rezultatele experimentale indică faptul că, atunci când aerul este folosit ca oxidant, CDP poate atinge ocazional 150 Hz. Totuși, în alte cazuri, frecvențe peste valoarea de proiectare sunt atinse sporadic, dar nu corespund niciodată pe deplin frecvenței scânteii, din cauza erorilor de aprindere.

Indicatorii de performanță pentru amestecul hidrogen-oxigen prezintă, în general, valori mai scăzute, în special în ceea ce privește tracțiunea și impulsul specific total, deoarece acești parametri sunt influențați semnificativ de frecvența aprinderilor ratate.

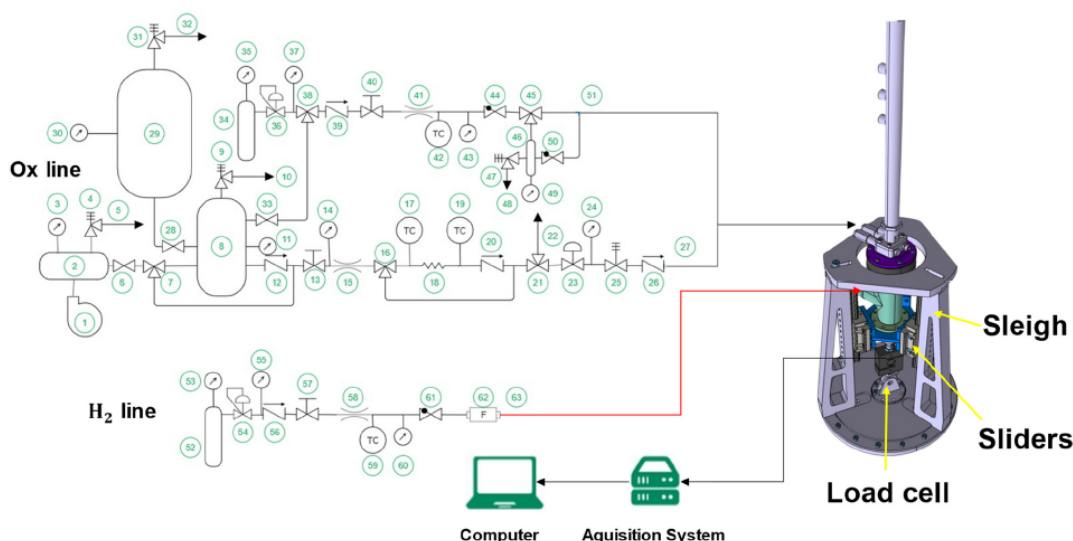


Figure 14: Schemă a instalației experimentale [24].

În cazul amestecului hidrogen-aer, valorile medii ale tracțiunii cresc atât odată cu raportul de echivalență, cât și cu presiunea oxidantului. Optimumul se obține la o lungime a țevii de evacuare de 400 mm, care generează cele mai ridicate valori ale tracțiunii la diferite niveluri de presiune a oxidantului, cu excepția cazului în care frecvența bujiei este de 233 Hz. O tendință similară se observă atât pentru impulsul specific total, cât și pentru cel specific combustibilului, unde performanța maximă este, de asemenea, asociată cu lungimea de 400 mm a țevii de evacuare, cu aceeași excepție. Acest comportament se atribuie decuplării sistemului aerodinamic de amestec, de frecvența de aprindere.

În contrast, pentru amestecul hidrogen-oxigen, cea mai mare tracțiune medie este înregistrată la o țevă de evacuare de 200 mm. Acest lucru se datorează eliberării de energie mai ridicate a reacției hidrogen-oxigen, care este mai puternic afectată de transferul de căldură către pereții țevii de evacuare. În consecință, țevile de evacuare mai scurte reduc disiparea energiei, conducând la niveluri de tracțiune mai ridicate.

Pentru ambii oxidanți, creșterea raportului de echivalență îmbunătățește performanța. Cu toate acestea, interacțiunile dintre presiunea oxidantului, frecvența bujiei și lungimea țevii de evacuare diferă. Pentru aer, presiunile scăzute ale oxidantului și țeava de evacuare mai scurtă conduc la o performanță superioară la frecvențe de aprindere mai ridicate, în timp ce presiunile mai ridicate ale oxidantului și țeava de evacuare mai lungă sunt mai eficiente la frecvențe mai joase. Pentru oxigen, nivelurile de tracțiune tind să fie mai ridicate la presiuni mai scăzute ale oxidantului atunci când sunt asociate cu o lungime a țevii de evacuare mai mică și frecvențe de aprindere mai joase. Între timp, impulsul specific total se îmbunătățește odată cu creșterea presiunii oxidantului și a lungimii țevii de evacuare. Cel mai ridicat impuls specific dat de combustibil este obținut constant cu o țevă de evacuare de 500 mm, pentru toate condițiile testate.

2.6 Măsurători Suplimentare de Performanță ai CDP

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Anexa C a Tezei de Doctorat**. Aceste rezultate completează și încheie **OS3** prin analizarea detaliată a parametrilor suplimentari de performanță, care nu au fost tratați în **Capitolele 5 și 6** ale tezei. Aceste rezultate nu sunt incluse în capitolele tezei, deoarece nu au fost încă publicate, dar sunt planificate pentru publicări viitoare. Ele includ vitezele undelor, temperaturile ciclului și analiza statistică a

influențelor factorilor operaționali asupra performanței CDP. Figurile și tabelele prezentate în această secțiune sunt selective pentru a evidenția concluziile cheie, unele detalii fiind omise pentru claritate și concizie.

Pentru a completa evaluarea performanței ciclului CDP și pentru a avansa CDP la **NMT 4**, se înregistrează un set complet de parametri, incluzând presiunile oxidantului și combustibilului, debitele masice ale gazelor de alimentare, raportul de echivalență, temperatura maximă și medie a ciclului, viteza undei de șoc, viteza undei de combustie, tracțiunea (**Secțiunea 5**), precum și presiunea maximă și medie a ciclului și frecvența de operare (**Secțiunea 4**). În timp ce **Capitolele 5 și 6 ale Tezei** detaliază presiunea, frecvența de operare și tracțiunea, **Anexa C** extinde analiza prin includerea unor parametri suplimentari care caracterizează în detaliu procesul de detonație.

Analiza Temperaturii Ciclului

Temperaturile maxime și medii ale ciclului sunt înregistrate cu ajutorul un senzor de temperatură cu rată mare de achiziție, instalat pe țeava de evacuare (denumit TC în **Figura 12**). Cu toate acestea, datorită ratei de încălzire crescute a senzorului, măsurătorile de temperatură sunt limitate la un număr restrâns de cicluri. Acest aspect poate fi observat în **Figura 15**.

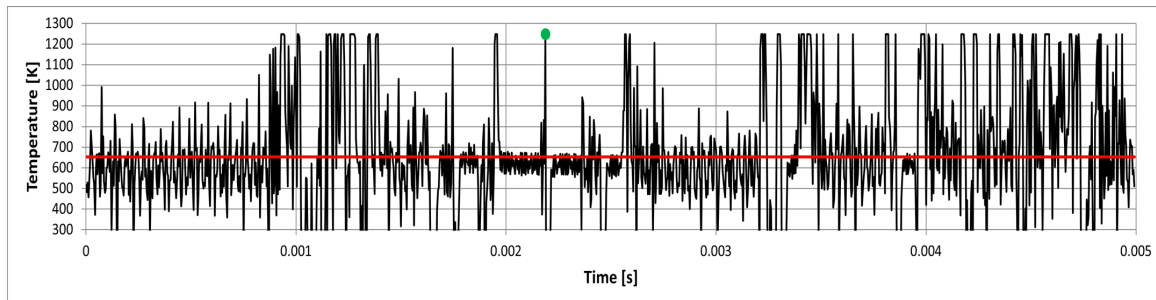


Figure 15: Selecția valorii maxime și medii a temperaturii. Exemplu: valoarea maximă este marcată cu punctul verde, iar valoarea medie cu linia roșie.

Pentru hidrogen-aer, temperatura maximă înregistrată este de 1247 K, obținută pentru o țeavă de evacuare de 500 mm la o frecvență de aprindere de 233 Hz. Pentru hidrogen-oxigen, temperatura maximă înregistrată este de 1266 K, măsurată pentru o țeavă de evacuare de 400 mm, la aceeași frecvență de 233 Hz.

Profilurile de temperatură evidențiază tendințe distincte în funcție de lungimea țevii de evacuare, presiunea oxidantului și raportul de echivalență, cu tendința ca țeava de evacuare mai lungă să conducă, în general, la temperaturi maxime reduse la presiuni ridicate ale oxidantului.

Analiza Vitezei Undelor

Viteza undei de șoc (W_s) și viteza undei de combustie (W_c) sunt determinate utilizând senzori de presiune și, respectiv, fotodiode (denumite FD1 și FD2 în **Figura 12**). Acești senzori sunt poziționați de-a lungul țevii de evacuare pentru a măsura diferența de timp dintre semnalele maxime ale celor două seturi de senzori și pentru a calcula viteza undelor. Rezultatele arată că presiunea oxidantului și raportul de echivalență joacă roluri dominante în influențarea acestor viteze.

Datele indică faptul că viteza undei de șoc crește în general odată cu creșterea raportului de echivalență, până la atingerea unei valori maxime, după care se stabilizează sau scade ușor. Presiunile mai ridicate ale oxidantului duc la viteze ale undei de șoc mai reduse, dar la viteze ale undei de combustie mai mari, îmbunătățind cuplarea undelor și intensitatea detonației. De

asemenea, țeava de evacuare mai lungă contribuie la o cuplare mai puternică a undelor prin reducerea diferenței de viteză dintre cele două unde.

Analiza Statistică a Influenței Parametrilor

O analiză "ANOVA" cu patru factori [25] este utilizată pentru a cuantifica influența lungimii țevii de evacuare, frecvenței bujiei, presiunii combustibilului și presiunii oxidantului asupra principalilor indicatori de performanță. Această metodă statistică permite estimarea efectelor factorilor cheie asupra unui set specific de răspunsuri. Rezultatele complete și implementarea analizei "ANOVA" sunt detaliat descrise în **Anexa C a Tezei de Doctorat**. Un exemplu al studiului "ANOVA" este prezentat în **Tabelul 4**.

O scurtă sinteză pentru ambii oxidanți arată că tracțiunea este influențată în principal de lungimea conductei de evacuare și de presiunea oxidantului, cu contribuții minore din partea frecvenței bujiei. Presiunea maximă și presiunea medie ale ciclului sunt, în mare măsură, dictate de presiunea oxidantului și de raportul de echivalență, cu contribuții mai reduse din partea presiunii combustibilului. Tendințele temperaturii ciclului urmează influențe similare, presiunea oxidantului fiind factorul dominant. Viteza undei de șoc este determinată în principal de presiunea oxidantului și de raportul de echivalență, în timp ce viteza undei de combustie este cel mai mult afectată de interacțiunile dintre presiunea oxidantului și cea a combustibilului.

Table 4: Tablul Anova pentru presiunea maximă a ciclului pentru H_2/air .

Factor	SS	DF	MS	Test	F	Resultat	% SS
F1: Length	0.213	3	0.071	1.69	2.717	N	0.042
F2: Frequency	0.178	3	0.059	1.41	2.717	N	0.035
F3: Fuel pressure	55.311	3	18.437	437.36	2.717	Y	10.774
F4: Oxidizer pressure	345.885	3	115.295	2734.97	2.717	Y	67.378
F1 × F2	0.215	9	0.072	1.998	1.998	N	0.042
F1 × F3	0.648	9	0.072	1.998	1.998	N	0.126
F1 × F4	0.978	9	0.108	1.998	1.998	N	0.190
F2 × F3	0.428	9	0.048	1.998	1.998	N	0.082
F2 × F4	0.619	9	0.034	1.998	1.998	N	0.120
F3 × F4	101.735	3	33.104	268.14	2.717	Y	19.818
F1 × F2 × F3	1.383	27	0.051	1.624	1.624	N	0.268
F1 × F2 × F4	1.451	27	0.052	1.624	1.624	N	0.281
F1 × F3 × F4	1.122	27	0.041	1.624	1.624	N	0.217
F2 × F3 × F4	1.381	27	0.051	1.624	1.624	N	0.265
Error	8.315	81	0.042	-	-	-	0.665
Total	513.351	255					99.335

2.7 Investigații Experimentale privind Impactul Orificiilor de Injecție a Hidrogenului în Camera cu Detonație Pulsatorie

Rezultatele discutate în această secțiune sunt detaliat în **Capitolul 7 al Tezei de Doctorat** și corespund articolului [26]. Acest articol, împreună cu **Secțiunea 8**, abordează **OS4: Optimizarea Geometriei CDP pentru Îmbunătățirea Performanței și a Frecvenței**.

Pe baza constatărilor din OS3, următorul pas în atingerea NMT 5 este explorarea strategiilor pentru îmbunătățirea suplimentară a performanței CDP.

Sistemul aerodinamic se bazează pe două concepte aerodinamice: tehnica Jet in Cross-Flow (JICF) și pe generatoarele de unde Hartmann-Sprenger. Acest studiu explorează primul concept, investigând impactul mărimii orificiului de injecție a hidrogenului asupra performanței CDP, pentru ambele amestecuri. Cercetarea se concentrează pe modul în care variațiile diametrului orificiului injectorului de combustibil influențează parametrii cheie ai combustiei, cum ar fi presiunea maximă și medie a ciclului, creșterea de presiune, tracțiunea și impulsul specific. Prin evaluarea acestor variabile, studiul își propune să rafineze strategiile de amestec a combustibilului cu oxidantul și să îmbunătățească performanța globală a camerei.

În această campanie experimentală, sunt evaluate trei dimensiuni ale orificiului injectorului (**Figura 16**): 0.7 mm, 0.8 mm și 0.9 mm, variind în același timp presiunea oxidantului (4.5–9.0 bar) și presiunea combustibilului (5.5–10.0 bar). Această selecție a parametrilor se bazează pe concluziile obținute în OS3.

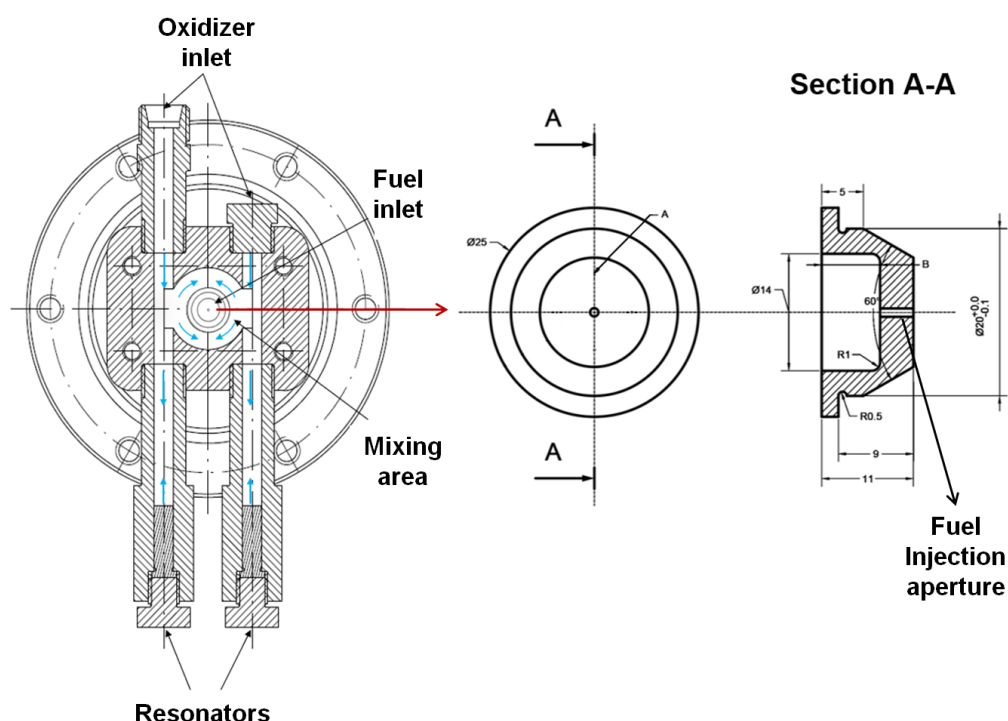


Figure 16: Sistemul aerodinamic al CDP: Diagrama procesului de amestec și secțiunea de injecție a combustibilului.

Achiziția datelor se face cu aceiași senzori de presiune (așa cum sunt descriși în **Secțiunea 4**) poziționați de-a lungul canalului de detonație și cu același sistem de măsură al tracțiunii (așa cum este descris în **Secțiunea 5**). Sistemul de aprindere este menținut la o frecvență constantă de 100 Hz, asigurând consistența tuturor testelor.

Experimentele demonstrează că dimensiunea orificiului are un impact semnificativ asupra presiunii maxime generate în timpul detonației. La presiuni scăzute ale oxidantului, deschiderile mai mici (0.7 mm) conduc la obținerea unor presiuni maxime mai ridicate, deoarece acestea favorizează o mai bună antrenare a combustibilului în vârtej, optimizând astfel amestecul. În contrast, injectoarele cu orificu mai mare tind să producă amestecuri excesiv bogate în combustibil în aceste condiții, ceea ce duce la deflagrație în loc de detonație. Pe măsură ce presiunea oxidantului crește, efectul JICF devine mai pronunțat și este necesară utilizarea injectoarelor cu orificu mai mare (0.9 mm) pentru a asigura un debit suficient de combustibil

și un amestec eficient. La presiuni ridicate (7.5 și 9 bar), intensitatea vârtejului (mare) impune un debit mai mare de combustibil pentru a atinge detonația, caz în care injectoarele de 0.9 mm livrează cele mai mari debite. Această tendință subliniază importanța tot mai crescută a unui amestec eficient a combustibilului și a oxidantului pe măsură ce presiunea oxidantului crește.

Datele despre presiunea medie a ciclului evidențiază efectul JICF și anume influență majoră asupra fazelor ciclului de detonație, în afara celei de propagare a detonație, cum ar fi etapele de umplere și amestec. La presiuni scăzute, dimensiunea injectorului este critică pentru a asigura un amestec eficient. Totuși, pe măsură ce presiunea oxidantului crește, influența dominantă a efectului JICF înseamnă că dimensiunea injectorului devine mai puțin semnificativă. Mai mult, creșterea de presiune, definită ca raportul dintre presiunea maximă și cea medie, crește odată cu raportul de echivalență, în special atunci când se utilizează injectoare mai mari la presiuni ridicate ale oxidantului. În timp ce injectoarele de 0.7 mm și 0.8 mm demonstrează o creștere modestă de presiune, acestea nu ating performanța injectorului de 0.9 mm, indicând că injectoarele mai mici nu pot menține un amestec optim pe măsură ce presiunea oxidantului crește.

Valorile tracțiunii mediate în timp nu reflectă întotdeauna tendințele observate la nivelul presiunilor. Prezența aprinderilor ratate, adică a ciclurilor de detonație nereușite, introduce o variabilitate semnificativă; chiar și atunci când presiunile maxime sunt ridicate, aprinderile ratate frecvente reduc tracțiunea medie a testului. Acest fenomen este deosebit de evident la presiuni ridicate ale oxidantului, unde un amestec corespunzător și detonația sunt mai sensibile la performanța injectorului. Deoarece tracțiunea este direct legată de schimbarea impulsului produsă în timpul combustiei, o incidență mai mare a aprinderilor ratate conduce la o tracțiune medie mai scăzută pe parcursul unui test.

Relația dintre impulsul specific total și comportamentul JICF este, de asemenea, clară. La presiuni scăzute, vârtejul mai slab permite injectoarelor cu orificiu mai mic (0.7 mm) să obțină un impuls specific total mai ridicat, prin penetrarea eficientă a fluxului și asigurarea unui amestec optim. Totuși, pe măsură ce presiunea oxidantului crește și vârtejul se intensifică, devin necesare orificii mai mari (0.9 mm) pentru a menține o admisie eficientă a combustibilului și o combustie optimă. Injectoarele care nu pot satisface cerințele impuse de un vârtej mai puternic înregistrează o scădere a impulsului specific total, datorită unui amestec deficitar și a unei utilizări ineficiente a combustibilului.

Similar, rezultatele privind impulsul specific dat de combustibil subliniază importanța selectării dimensiunii corecte a orificiului injectorului în funcție de presiunea oxidantului. Odată cu creșterea presiunii, injectoarele cu orificii mai mari facilitează un amestec mai eficientă, esențial pentru convertirea energiei chimice a combustibilului în tracțiune. În schimb, injectoarele cu orificii mai mici întâmpină dificultăți în condiții de presiune ridicată, ceea ce conduce la o scădere semnificativă a impulsului specific dat de combustibil și a performanței globale.

Atunci când se analizează impactul global al procesului JICF asupra performanței CDP se descoperă un compromis. La presiuni scăzute ale oxidantului, injectorul cu cel mai mic orificiu (0.7 mm) oferă performanțe favorabile în ceea ce privește creșterea de presiune și tracțiunea, datorită necesității reduse de a debitului masic. Mai mult, este un avantaj în aplicațiile spațiale, unde minimizarea masei de combustibil este esențială. În contrast, la presiuni ridicate ale oxidantului, injectorul cu orificiul cel mai mare (0.9 mm) asigură performanțe îmbunătățite în ceea ce privește creșterea de presiune și tracțiunea, deși acest beneficiu vine cu necesitatea unor debite masice mai mari, ceea ce poate crește masa totală a sistemului și costurile aferente.

2.8 Optimizarea Frecvenței de Operare a Camerei de Detonație Pulsatorie

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Anexa E a Tezei de Doctorat** și reprezintă un articol depus la "*Proceedings of ASME Turbo Expo 2025 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*", cu ID: GT2025 – 152698, intitulat „EXPERIMENTAL ANALYSIS OF OPERATING FREQUENCY ENHANCEMENT AND PRESSURE CHARACTERISTICS IN A PULSED DETONATION COMBUSTOR”, având următorii autori: **Andrei Vlad Cojoccea**, Mihnea Gall, Ionuț Porumbel, George Vrabie, Tudor Cuciuc și Daniel Eugeniu Crunțeanu. Deoarece lucrarea se află în faza de revizuire, nu poate fi inclusă integral aici, din motive de copyright. Nu sunt așteptate modificări suplimentare, iar constatările reflectă scopul tezei.

Studiul completează **OS4: Optimizarea Geometriei CDP pentru Îmbunătățirea Performanței și a Frecvenței** și este suplimentar articolului rezumat în **Secțiunea 7**. Cercetarea investighează îmbunătățirea frecvenței de operare și a caracteristicilor de presiune ale CDP prin reglaje aerodinamice, realizate prin modificări geometrice. Obiectivul principal este de a determina modul în care ajustările lungimii rezonatoarelor Hartmann-Sprenger (RHS), prezentate în **Figura 17**, și ale țevii de evacuare influențează frecvența ciclului de detonație, raportul de presiune al ciclului și creșterea de presiune. Prin varierea sistematică a acestor parametri, studiul își propune să optimizeze performanța CDP pentru aplicații de propulsie la frecvențe înalte.

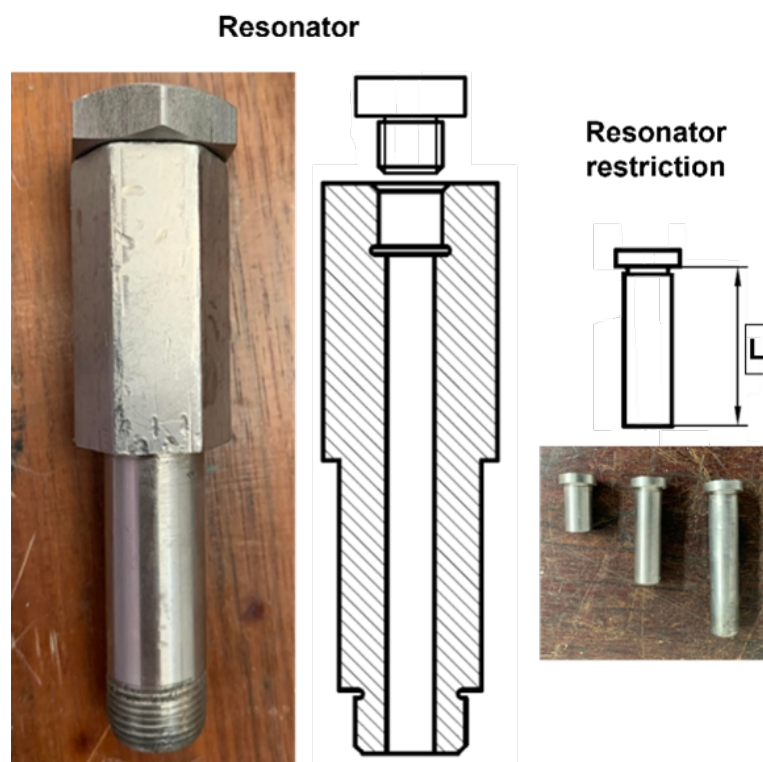


Figure 17: RHS și schema ajustărilor efectuate.

Aceiași senzori de presiune cu rată mare de achiziție, Kulite ETM-HT-375, sunt utilizați pentru a înregistra caracteristicile ciclului de detonație, capturând presiunile maxime și medii ale ciclului, frecvența de operare și creșterea de presiune. Pe parcursul campaniei experimentale, frecvența bujiei este menținută constant la 100 Hz. În plus, pentru a izola efectele modificărilor geometrice, presiunile gazelor alimentate sunt, de asemenea, menținute constante (10 bara pentru combustibil și 4 bara pentru oxidant).

După filtrarea și identificarea precisă a vârfurilor de presiune ale detonației, semnalele de presiune sunt supuse analizei statistice (vezi **Figurile 18, 19**). La operațiuni de frecvență joasă (**Figura 18(a)**), toate caracteristicile ciclului CDP sunt clar distincte. Cu toate acestea, la operațiuni de frecvență înaltă (**Figura 19(a)**), faza de reumplere devine aproape imperceptibilă, iar semnalul de presiune se transformă într-un tipar asemănător cu un tren de unde de șoc, care poate fi interpretat ca efectul unui spirale Schlegin aerodinamice.

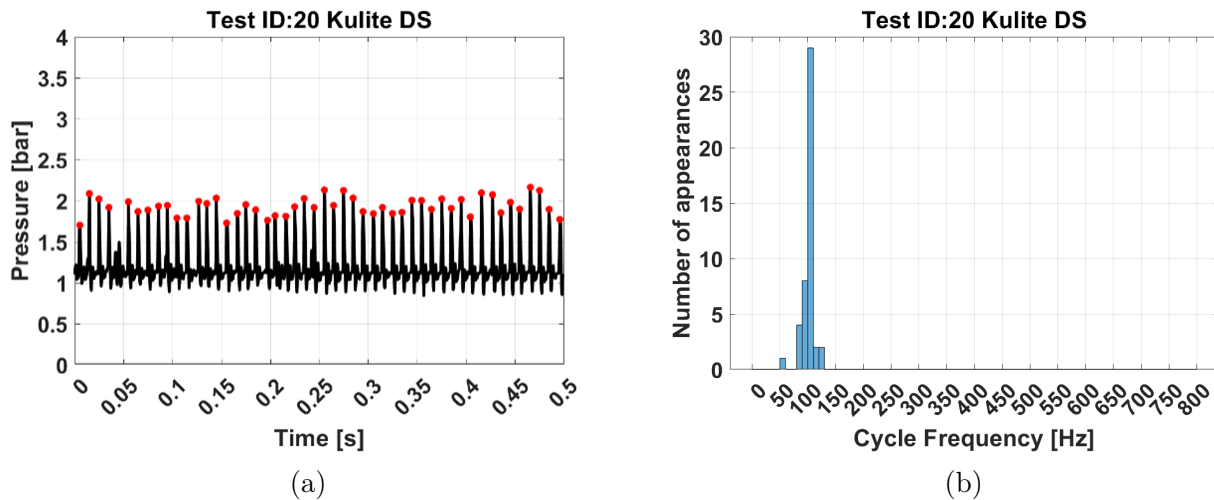


Figure 18: Exemplu al datelor de presiune la frecvență joasă.

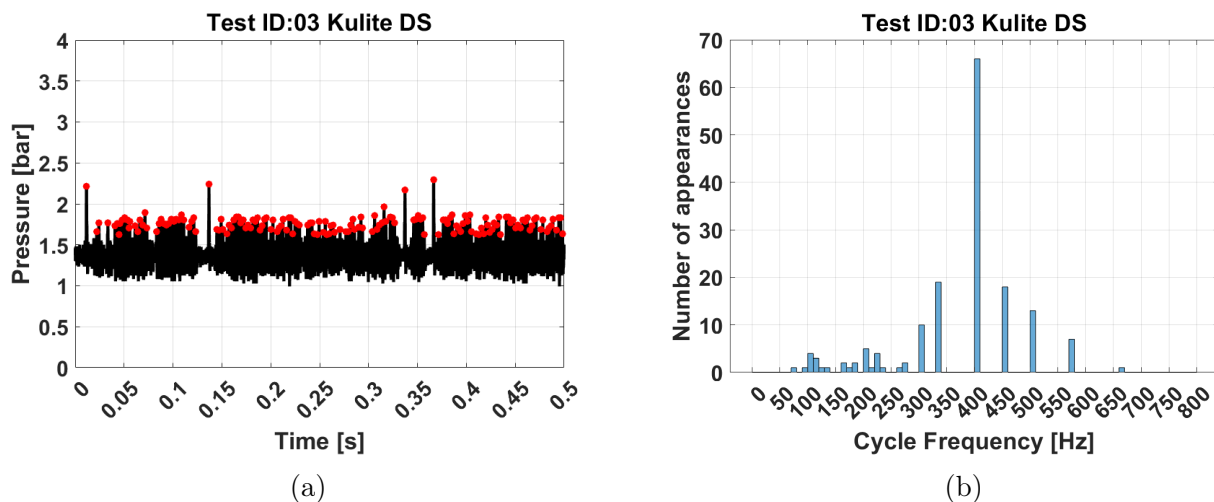


Figure 19: Exemplu al datelor de presiune la frecvență înaltă.

Studiul demonstrează că reglajul geometric al rezonatoarelor și modificările țevii de evacuare poate îmbunătăți semnificativ frecvența de operare și performanța de presiune a modelului experimental CDP, transformându-l într-un candidat promițător pentru propulsia aerospațială avansată și sistemele energetice. În experimentele cu aer, timpul de rezidență al undei de detonație în țeava de evacuare se dovedește a fi critic: o țeavă prea scurtă duce la o combustie incompletă, în timp ce o conductă excesiv de lungă reduce frecvența de operare. Pentru oxigen, însă, lungimile scurte ale țevii de evacuare sunt suficiente pentru a extrage energia maximă, datorită ratelor mai rapide ale reacției.

Rezultatele arată că presiunea maximă, raportul de presiune al ciclului și creșterea de presiune cresc în general odată cu lungimea țevii de evacuare, măsurate la senzorul din aval, pentru ambii oxidanți, deși tendințele de presiune în aval diferă. Lungimea rezonatoarelor

este, de asemenea, crucială: se obține un câștig optim de presiune la o lungime normalizată a rezonatoarelor de 0.8, cu efecte contrastante asupra presiunilor medii și maxime între testele cu aer și cele cu oxigen. Reducerea lungimii rezonatoarelor conduce, în general, la creșterea frecvenței de operare, în special atunci când este combinată cu modificări ale lungimii țevii de evacuare în cazul testelor cu aer. Pentru oxigen, ambii parametri trebuie ajustați pentru a obține o creștere semnificativă a frecvenței. Deși obiectivul de 1000 Hz nu este atins, majoritatea configurațiilor conduc la o creștere generală a frecvenței. Pentru testele cu aer, frecvența maximă obținută este de 300 Hz, iar pentru oxigen de 400 Hz.

De asemenea, constatările evidențiază că odată cu creșterea frecvenței de operare, timpul de reumplere al ciclului se scurtează, transformând procesul de detonație pulsatorie într-un regim mai continuu, însă cu un compromis al presiunii maxime reduse, ceea ce afectează negativ atât raportul de presiune al ciclului, cât și creșterea de presiune. Optimizarea simultană a acestor parametri rămâne o provocare.

2.9 Studiu Experimental privind Aprinderea și Obținerea Creșterii de Presiune în Condiții de Vid Redus pentru Camera de Detonație Pulsatorie

Rezultatele acestei secțiuni sunt prezentate în **Capitolul 9 al Tezei de Doctorat** și corespunde articolului [27]. Aceste constatări se bazează pe toate reperele anterioare și culminează în atingerea obiectivului **OS5: Demonstrarea Obținerii Creșterii de Presiune prin Combustie în Condiții de Vid Redus**, ducând astfel la atingerea nivelului **NMT 5**.

Acest studiu investighează fezabilitatea operării CDP în condiții apropiate de vid, concentrându-se pe stabilitatea aprinderii, tendințele creșterii de presiune și propagarea undelor de șoc. Având în vedere că obiectivul final al acestei teze de doctorat este dezvoltarea unui CDP pentru propulsie spațială, este esențial să se determine performanța sa în medii de presiune redusă.

Pe baza informațiilor din **Secțiunile 4–6**, care definesc harta operațională a CDP, și din **Secțiunile 8 și 9**, în care sunt identificate strategii pentru îmbunătățirea combustiei cu creștere de presiune, se implementează modificările necesare pentru a obține creșterea de presiune în condiții de vid redus. Aceste modificări includ utilizarea unei țevi de evacuare cu diametru redus și cu cea mai scurtă lungime testată în campania experimentală factorială completă, precum și utilizarea unei bujii alternative care furnizează o putere energetică mai mare în condiții de vid. Modelul CDP modificat este prezentat în **Figura 20**.

Campania experimentală este efectuată într-o cameră de vid, unde presiunea ambientală este redusă la 15 mbar pentru a simula condiții similare celor din spațiu. CDP-ul este alimentat cu un amestec hidrogen–oxigen, combustibilul și oxidantul fiind furnizate la presiuni de 7.5 bar și, respectiv, 5.5 bar, corespunzând unui raport de echivalență de 0.048. Doi senzori de presiune cu rată mare de achiziție (Kulite ETM-HT-375), poziționați atât în camera de aprindere a CDP, cât și în camera de vid, permit monitorizarea în timp real a fluctuațiilor de presiune.

CDP-ul finalizează cu succes șase cicluri de creștere de presiune prin combustie (**Figura 21**), așa cum este înregistrat atât de senzori de presiune, cât și prin vizualizarea Schlieren. Aceste creșteri rapide ale presiunii indică prezența a șase unde distincte de detonație. Combustia este inițiată la un nivel de vid de aproximativ 103 mbar (**Figura 22**), iar procesul repetitiv de creștere de presiune (**Figura 23**) a persistat aproximativ 0.5 secunde înainte de apariția unei explozii (**Figura 24**). Această explozie a fost cauzată de acumularea de combustibil nearsat în interiorul camerei de vid, rezultat al unei frecvențe de aprindere a bujiei sub specificațiile de proiectare. Ca urmare, un debit mai mare de produși de gaz au fost expulzați fără a fi aprins, ceea ce a condus la acumularea de combustibil nears. Imaginile obținute cu tehnica

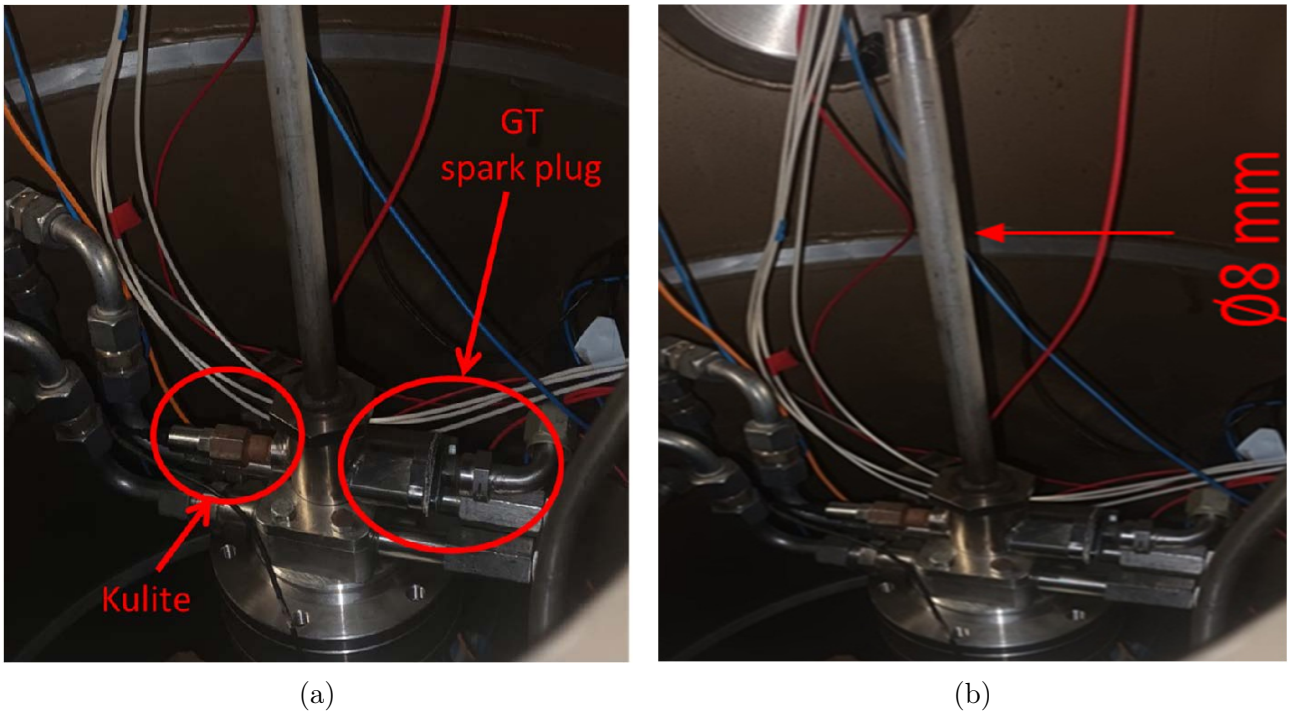


Figure 20: Modelul CDP instalat în camera de vid [27].

de vizualizare Schlieren confirmă apariția ciclurilor creștere a presiunii prin combustie la o frecvență de 11.97 Hz. Deși unda inițială de presiune nu este vizibilă direct din cauza nivelului scăzut de presiune, efectele sale asupra structurii curgerii pot fi clar identificate.

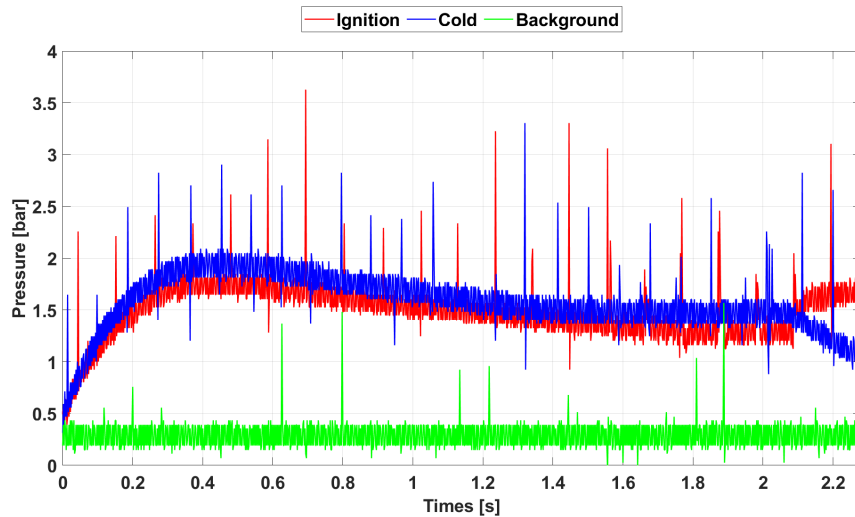


Figure 21: Semnalele de presiune complete, în timpul testării CDP în vid: linia roșie – combustie, linia albastră – curgere la rece, linia verde – presiunea din interiorul camerei de vid. [27].

Mai multe provocări tehnice au fost întâmpinate în timpul experimentelor. Menținerea integrității semnalului este dificil din cauza nivelurilor ridicate de zgomot, parțial atribuite conexiunilor cablurilor care trec prin pereții camerei de vid. În plus, capacitatea limitată a camerei de vid restricționează durata de operare la presiune scăzută, ceea ce afectează colectarea globală a datelor și posibilitatea de a obține rezultate mai robuste.

În paralel cu semnalele de presiune, se utilizează și tehnica Schlieren, pentru a captura

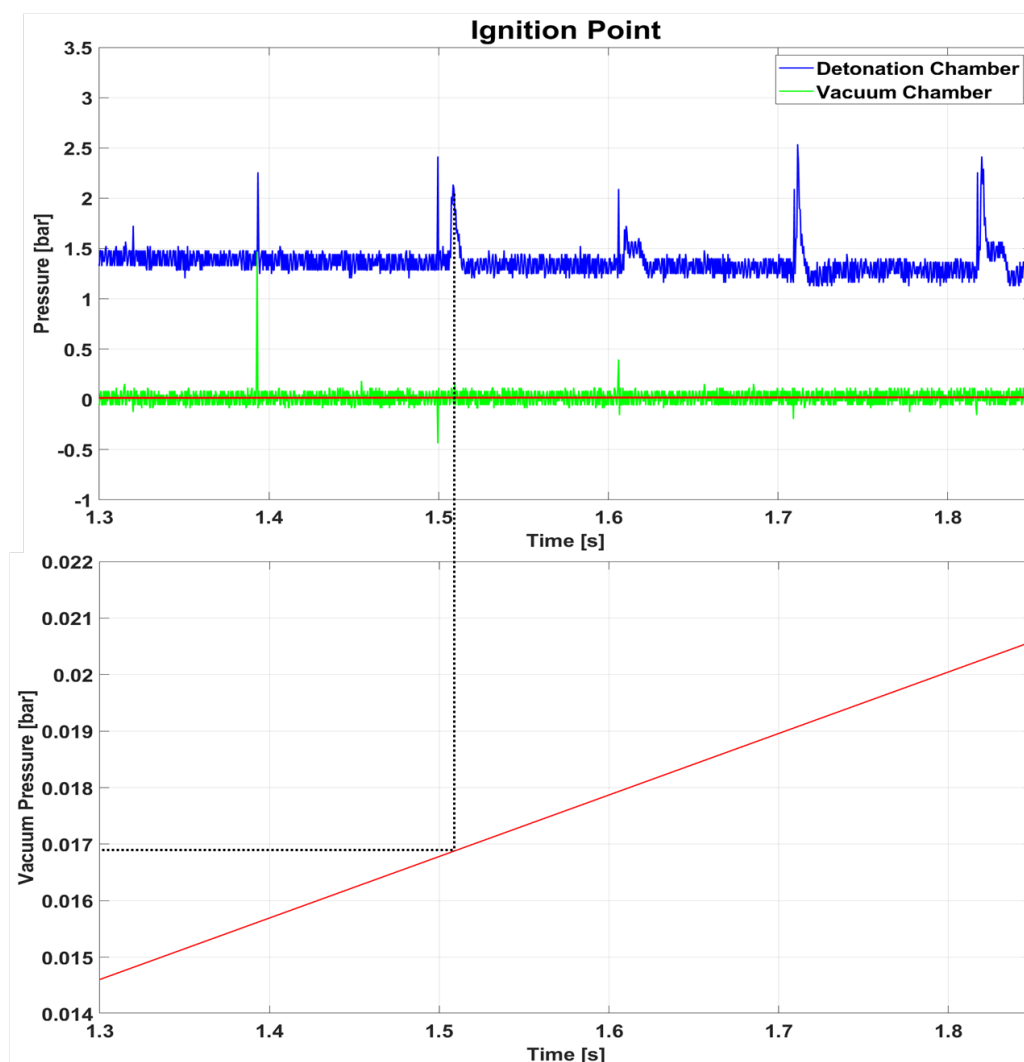


Figure 22: Semnalul de presiune din CDP în timpul aprinderii [27].

dinamica undelor de șoc și structurile frontului de combustie. O cameră de mare viteză Phantom VEO 710L, care operează la 77.000 fps, este poziționată în avalul țevii de evacuare pentru a înregistra evoluția curgerii la ieșirea din țeava. Rezultatele sunt prezentate în **Figura 25**, unde A reprezintă diamantele Mach, B este frontul de combustie, iar C este unda de șoc. Spre deosebire de ciclurile de detonație observate în condiții atmosferice, regimul de flux invers nu este prezent în vid.

Acest studiu contribuie semnificativ la eliminarea decalajului dintre experimentele desfășurate la sol și dezvoltarea ulterioară a unui CDP pentru aplicații spațiale. Studiile viitoare ar trebui să continue îmbunătățirea designului CDP pentru a funcționa în medii extreme, concentrându-se pe optimizarea eficienței combustibilului, a fiabilității și a scalabilității. În final, scopul este de a avansa tehnologia către un sistem de propulsie destinat aplicațiilor spațiale, complet operațional, capabil să ofere beneficii semnificative de performanță în spațiu. Abordând aceste provocări, cercetarea va avansa tehnologia CDP către atingerea unui sistem funcțional de propulsie spațială, capabil să utilizeze combustia cu creștere de presiune pentru o propulsie mai eficientă a navelor spațiale.

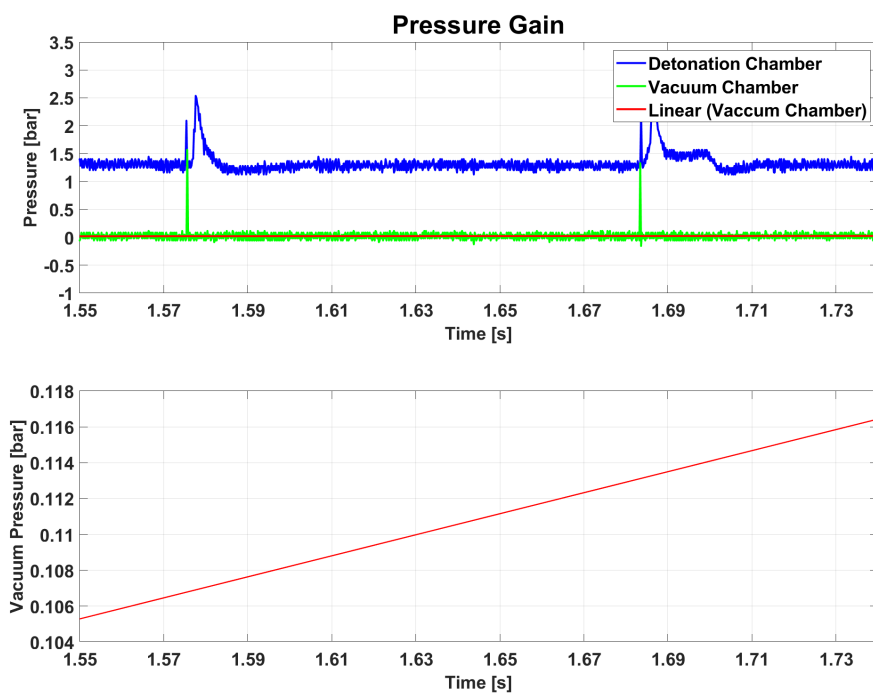


Figure 23: Semnalul de presiune din CDP în timpul funcționării [27].

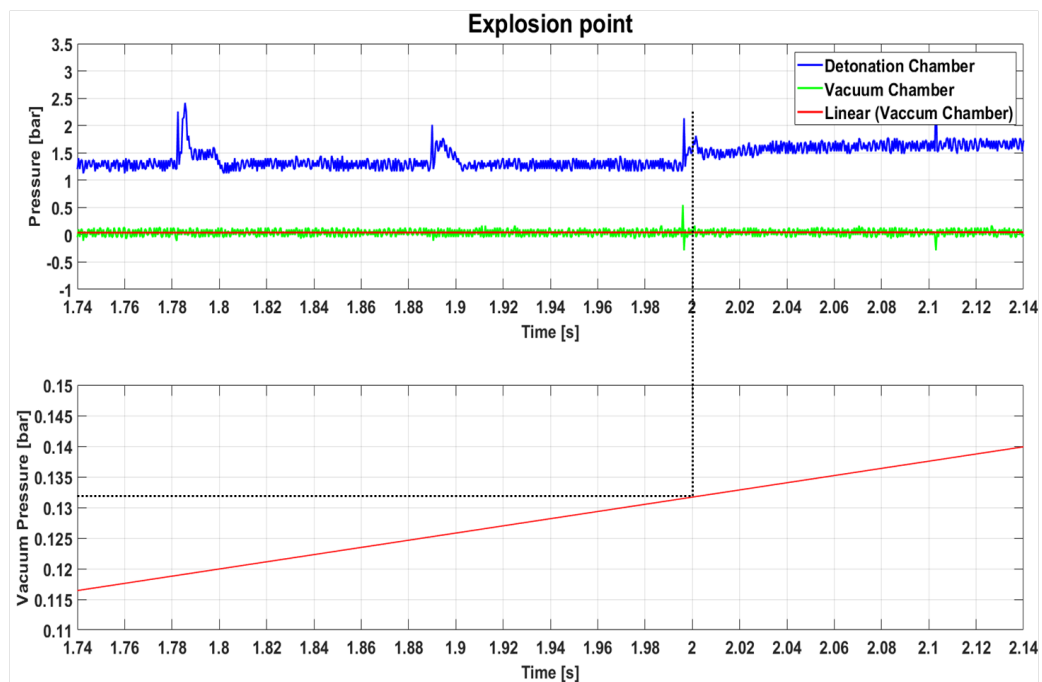


Figure 24: Semnalul de presiune din CDP în timpul exploziei [27].

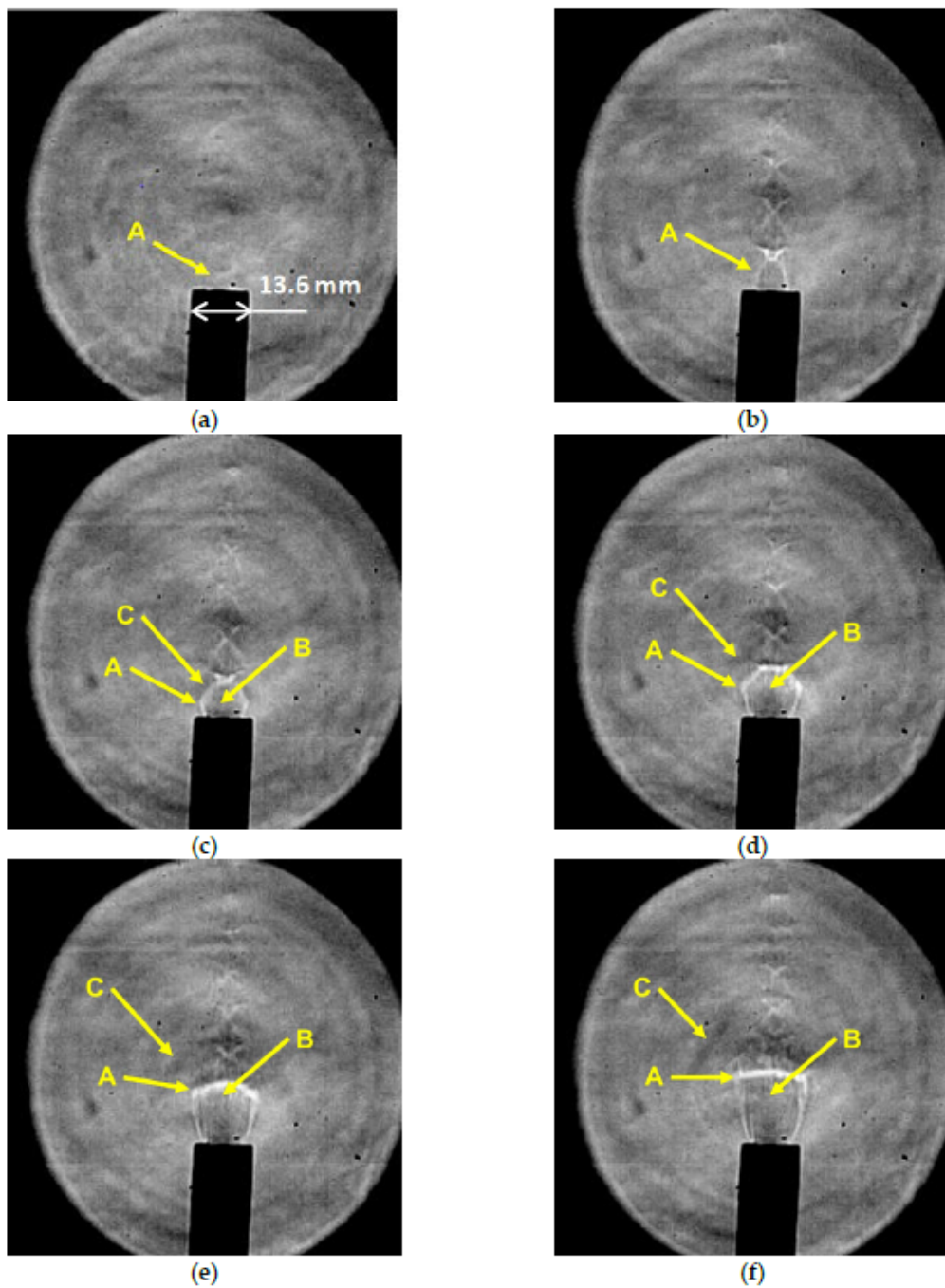


Figure 25: Imagini Schlieren ale curgerii la ieșirea din CDP în timpul funcționării în condiții de vid. (a) $-1.953\mu s$; (b) $-12.99\mu s$; (c) $0.00\mu s$; (d) $12.99\mu s$; (e) $25.58\mu s$; (f) $38.97\mu s$ [27].

Concluzii și Contribuții Personale

3.1 Concluzii Generale

Camera de Detonație Pulsatorie este cercetată riguros prin intermediul mai multor campanii experimentale, care au drept scop atingerea capacității operaționale cu doi oxidanți distincti, extinzând astfel potențialul aplicațiilor sale și **avansând Nivelul de Maturitate Tehnologică la 5**. Pentru a defini harta operațională pentru fiecare oxidant, sunt desfășurate două campanii experimentale factorial complete, în condiții atmosferice. Aceste campanii examinează sistematic influența a patru parametri critici: presiunile de alimentare ale oxidantului și combustibilului, frecvența de aprindere a bujiei și lungimea țevii de evacuare, fiecare parametru fiind variat pe patru niveluri. Rezultatele acestor experimente sunt documentate și analizate în detaliu.

Pentru campaniile experimentale desfășurate în condiții atmosferice, performanța CDP este evaluată utilizând zece indicatori cheie: debitul masic de oxidant, debitul masic de combustibil, tracțiunea, presiunile maxime și medii ale ciclului, temperaturile maxime și medii, viteza undei de șoc și a undei de combustie, precum și frecvența de operare. Acest set extins de date, derivat dintr-o matrice de teste experimentale concepută cu meticulozitate, alcătuiește o bază solidă pentru eforturile ulterioare de optimizare

Pe baza acestor rezultate, geometria camerei este optimizată suplimentar pentru a îmbunătăți creșterea de presiune și frecvența de operare. Procesul de optimizare a generat îmbunătățiri demonstrabile ale performanței, evidențiate prin date detaliate privind presiunea și tracțiunea.

Faza finală a experimentării implică testarea în condiții de vid pentru a simula medii asemănătoare spațiului. Această campanie se concentrează pe un singur caz de testare, cu parametri fixați, inclusiv presiunile oxidantului și combustibilului, lungimea țevii de evacuare și frecvența bujiei. Constatările din această campanie reprezintă un pas semnificativ către evaluarea fezabilității CDP pentru aplicații dincolo de condițiile atmosferice.

Această cercetare sistematică subliniază interdependența complexă dintre parametrii operaționali și performanța camerei, evidențiind importanța testărilor atât în condiții atmosferice, cât și de vid, pentru avansarea tehnologiei CDP. Detalii suplimentare privind configurația experimentală, metodele de achiziție a datelor și rezultatele sunt prezentate în **Anexele C – E ale Tezei de Doctorat**, unde sunt prezentate toate tabelele și figurile, care oferă o perspectivă detaliată asupra cercetărilor.

3.2 Valorile Maxime

În ansamblu, pentru cele 256 de cazuri testate, valorile maxime înregistrate pentru tracțiune, presiune, temperatură, viteza undei de șoc și viteza undei de combustie, pentru fiecare dintre primele două campanii experimentale în condiții atmosferice, sunt prezentate în **Tabelul 5**.

3.3 Harta Operațională a Camerei

Harta operațională pentru H_2/aer în condiții atmosferice este determinată în principal de presiunile combustibilului și oxidantului, deși lungimea țevii de evacuare și frecvența bujiei influențează, de asemenea, performanța camerei. Presiunea pe linia de aer joacă un rol esențial

Table 5: Centralizarea Valorilor Maxime Înregistrate.

Parametru	Hidrogen / Aer		Hidrogen / Oxigen	
	Valoare Maximă	Caz	Valoare Maximă	Caz
Tracțiune [N]	28.9	2032	27.1	2332
Presiune [bar]	5.18	2032	3.22	1332
Temperatură [K]	1247	3213	1266	2302
Viteza undei de șoc [m/s]	1429	0122	1429	0331
Viteza undei de combustie [m/s]	633	1323	923	0230

în determinarea vitezei jeturilor de aer care intră în camera de preamestec, afectând astfel intensitatea vârtejului central, care acționează ca o valvă aerodinamică pentru admisia hidrogenului, și pentru calitatea amestecului combustibil/aer. La presiuni ridicate ale oxidantului, peste 6.5 bar, nu se observă regimuri operaționale susținute, deoarece dinamica procesului de amestec este perturbată, împiedicând detonația. În intervalul intermediar de presiune a oxidantului (5–6.5 bar), funcționarea depinde de presiunea de alimentare cu combustibil, fiind obținute cicluri de detonație pentru presiuni ale combustibilului mai mari de 7.5 bar. La presiuni mai scăzute ale oxidantului, sub 5 bar, raportul de echivalență devine factorul decisiv. De exemplu, cazul 2103, cu un raport de echivalență de 0.318, nu atinge un regim de detonație, în timp ce cazurile cu rapoarte de echivalență mai mari reușesc, indiferent de presiunea combustibilului. Limita inferioară a raportului de echivalență pentru operarea CDP crește odată cu creșterea presiunii de alimentare cu aer și scade odată cu creșterea presiunii de alimentare cu combustibil.

Pentru oxigen, aceeași parametri influențează ciclul de detonație, însă lungimea țevii de evacuare are un efect mai pronunțat. La presiuni ridicate ale oxidantului, peste 7.3 bar, pentru a obține o detonație susținută este necesar un raport de echivalență mai mare de 0.069. Sub acest prag, detonația nu poate fi realizată. Pentru raporturi de echivalență ce depășesc 0.069, presiunea de alimentare cu combustibil de peste 10 bar susține constant funcționarea corectă, iar o țevă de evacuare scurtă (200 mm) facilitează obținerea detonației chiar și la presiuni mai mici ale combustibilului. În intervalul superior-intermediar (6.4–7.3 bar), presiunea pe linia de combustibil devine factor critic, cu o anumită incertitudine pentru raporturile de echivalență între 0.069 și 0.072, unde pentru câteva cazuri nu se obține detonația. În intervalul mediu (5.4–6.4 bar), factorul limitativ este raportul de echivalență. La regimurile cu un raport de echivalență sub 0.06 nu este inițiată aprinderea, iar cele cu raport de echivalență peste 0.2 trec în regim de detonație continuă. Persistă incertitudinea la limitele raportului de echivalență, în special între 0.06 și 0.07 pentru amestecurile prea sărace și între 0.17 și 0.2 pentru amestecurile prea bogate.

În intervalul inferior-intermediar (4.7–5.4 bar), toate cazurile prezintă o detonație pulsatorie susținută. Cu toate acestea, în intervalul de presiune scăzută a oxidantului, sub 4.8 bar, majoritatea cazurilor trec în deflagrație, din cauza intensității insuficiente a vârtejului de a controla valva aerodinamică. Totuși, trei cazuri marginale reușesc să mențină detonația, evidențiind interacțiunea complexă dintre presiunile oxidantului și ale combustibilului, raportul de echivalență și parametrii de proiectare. Aceste constatări subliniază complexitatea determinării hărții operaționale a CDP și importanța unei ajustări fine a condițiilor de proiectare și operare.

3.4 Analiza Statistică

O analiză statistică "ANOVA" a fost realizată pentru ambele campanii experimentale, H_2/aer și H_2/O_2 , în condiții atmosferice (rezultatele fiind prezentate în **Capitolele 5, 6** și în textbfAnexa C). Rezultate sunt centralizate în **Tabelul 7** pentru aer și în **Tabelul 8** pentru oxigen. Debitul masic pentru oxidant și combustibil nu au fost incluse în analiza statistică, din motive evidente. Definițiile factorilor menționați în aceste tabele sunt prezentate în **Tabelul 6**.

Table 6: Definițiile factorilor și răspunsurilor utilizați în analiza "ANOVA"

F1	Lungimea țevii de evacuare
F2	Frecvența bujiei
F3	Presiunea liniei de alimentare cu combustibil
F4	Presiunea liniei de alimentare cu oxidant
F1xF2	Corelație între Lungimea țevii de evacuare și Frecvența bujiei
F1xF3	Corelație între Lungimea țevii de evacuare și Presiunea liniei de alimentare cu combustibil
F1xF4	Corelație între Lungimea țevii de evacuare and Presiunea liniei de alimentare cu oxidant
F2xF3	Corelație între Frecvența bujiei și Presiunea liniei de alimentare cu combustibil
F2xF4	Corelație între Frecvența bujiei și Presiunea liniei de alimentare cu oxidant
F3xF4	Corelație între Presiunea liniei de alimentare cu combustibil și Presiunea liniei de alimentare cu combustibil
F1xF2xF3	Corelație între Lungimea țevii de evacuare, Frecvența bujiei, și Presiunea liniei de alimentare cu combustibil
F1xF2xF4	Corelație între Lungimea țevii de evacuare, Presiunea liniei de alimentare cu oxidant
F1xF3xF4	Corelație între Lungimea țevii de evacuare, Presiunea liniei de alimentare cu combustibil și Presiunea liniei de alimentare cu combustibil
F2xF3xF4	Corelație între Frecvența bujiei, Presiunea liniei de alimentare cu combustibil, și Presiunea liniei de alimentare cu oxidant
Y1	Tracțiune (valoare medie pe ciclu)
Y2	Presiunea maximă
Y3	Presiunea medie
Y4	Temperatură maximă
Y5	Temperatură medie
Y6	Viteza undei de șoc
Y7	Viteza undei de combustie
Y8	Frecvența de operare

Analiza campaniilor experimentale desfășurate în condiții atmosferice evidențiază influența diversilor parametri operaționali asupra celor zece indicatori măsurați. Pentru ambii oxidanți, aer și oxigen, debitul masic al oxidantului crește odată cu creșterea presiunii oxidantului și a lungimii țevii de evacuare, efectul țevii fiind mai pronunțat la presiuni scăzute ale oxidantului. În schimb, debitul masic al oxidantului scade pe măsură ce raportul de echivalență crește, în timp ce debitul masic al combustibilului crește corespunzător. Măsurătorile tracțiunii, deși

influențate de variațiile rigidității liniei de combustibil în timpul testărilor, prezintă, în general, o corelație pozitivă cu raportul de echivalență în campania cu aer/hidrogen. Totuși, această tendință este mai puțin evidentă în testele cu oxigen/hidrogen, probabil datorită intervalului mai restrâns de rapoarte de echivalență explorat. Pentru ambele campanii, presiunile mai ridicate ale oxidantului duc la creșterea tracțiunii datorită debitului crescut.

Lungimea țevii de evacuare și frecvența bujiei au, de asemenea, un impact semnificativ asupra performanței tracțiunii. În campania pe aer, valorile maxime ale tracțiunii se înregistrează șa țevi mai lungi (400 mm și 500 mm) la presiuni ridicate ale oxidantului, în timp ce țevile mai scurte (200 mm și 300 mm), combinate cu frecvențe de aprindere mai mari (233 Hz și 350 Hz), performează mai bine la presiuni scăzute ale oxidantului. Pentru oxigen, influența este inversă. La presiuni scăzute ale oxidantului, țevile scurte, asociate cu o frecvență a bujiei de 100 Hz, produc o tracțiune mai ridicată, în timp ce țevile mai lungi oferă rezultate mai bune la 350 Hz. Efectele acestor factori se diminuează la presiuni ridicate ale oxidantului, pentru ambii oxidanți.

La presiuni mai mari de alimentare cu oxidant (peste 6 bar), presiunea maximă a ciclului crește odată cu raportul de echivalență și cu presiunea oxidantului pentru ambele campanii, confirmând relația directă cu tracțiunea. La presiuni scăzute ale oxidantului, însă, creșterea presiunii maxime a ciclului pentru rapoarte de echivalență ridicate (peste 0.6 pentru aer și 0.15 pentru oxigen) este mai puțin semnificativă, unele cazuri prezentând chiar scăderi ușoare. Această scădere este deosebit de evidentă în testele pe aer la o frecvență a bujiei de 233 Hz și în testele pe oxigen la toate frecvențele în punctele adiacente regimului de proiectare (150 Hz, 233 Hz și 350 Hz), în special pentru țevi mai scurte. Presiunea medie a ciclului prezintă tendințe similare, cu o scădere notabilă la presiunea oxidantului de 6 bar în campania pe aer. Se observă devieri de la tendința așteptată de creștere a presiunii medii odată cu raportul de echivalență pentru țevi lungi (400 mm și 500 mm) în campania pe aer și pentru țeava de 300 mm în campania pe oxigen. Valorile maxime ale presiunii medii apar la rapoarte de echivalență intermediare, între 0.5 și 0.7 pentru aer și în jur de 0.5 pentru oxigen, cel mai proeminent în testele pe aer fiind la o frecvență a bujiei de 150 Hz.

Table 7: Rezultatele "ANOVA" centralizate pentru campania H_2/aer .

Răspuns	F1	F2	F3	F4	F1xF2	F1xF3	F1xF4
Y1	N	D	N	D	N	N	N
Y2	N	D	N	D	N	N	N
Y3	N	D	N	D	D	N	N
Y4	D	D	D	D	D	N	N
Y5	D	D	D	D	D	N	N
Y6	N	D	D	D	N	N	N
Y7	N	D	D	D	N	N	N
Y8	N	D	N	N	N	N	N
Răspuns	F2xF3	F2xF4	F3xF4	F1xF2xF3	F1xF2xF4	F1xF3xF4	F2xF3xF4
Y1	N	D	N	N	N	N	N
Y2	N	N	N	N	N	N	D
Y3	D	N	N	N	D	D	N
Y4	D	D	D	D	D	D	D
Y5	D	D	D	D	D	D	D
Y6	N	N	N	D	N	N	N
Y7	N	N	N	D	N	N	N
Y8	N	N	N	N	N	N	N

Temperatura maximă a ciclului crește odată cu raportul de echivalență și cu presiunea

oxidantului pentru cea mai scurtă țevă de evacuare (200 mm) în campania cu aer/hidrogen. Aceste efecte se diminuează pe măsură ce lungimea țevii crește. Pentru cele lungi (400 mm și 500 mm), temperatura maximă scade odată cu presiunea oxidantului, fiind identificat un raportul de echivalență optim corespunzător temperaturii maxime. Pentru oxigen, temperatura maximă crește, în general, odată cu raportul de echivalență, însă tendința este minimă pentru țeava cea mai scurtă (200 mm) și cea mai lungă (500 mm), cu o variabilitate mai mare pentru lungimi intermediare. Lungimea țevii are o influență semnificativă asupra comportamentului temperaturii. Pentru aer, creșterea lungimii acesteia reduce raportul de echivalență corespunzător temperaturii maxime, în timp ce pentru oxigen, temperatura maximă crește direct proporțional cu lungimea. Frecvențele mai ridicate ale bujiei deplasează ușor raportul de echivalență corespunzător temperaturii maxime spre valori mai mari în testele pe aer, însă nu se observă un efect consistent pentru oxigen.

Profilurile de temperatură medie sunt, de asemenea, afectate de lungimea țevii, din cauza absorbției de căldură de către pereții exteriori. Pentru țeava scurtă (200 mm), tendințele temperaturii medii se aliniază cu tendințele temperaturii maxime în funcție de raportul de echivalență și de presiunea oxidantului în testele cu aer, dar acestea sunt nesemnificative pentru oxigen. Pentru țevile mai lungi, comportamentul devine mai complex, după cum este detaliat în **Anexa C**.

Viteza undei de detonație, calculată pe baza diferenței de timp dintre semnalele maxime ale celor doi senzorii de presiune și cele două fotodiodele, plasate de-a lungul țevii de evacuare, indică decuplarea dintre unda de șoc și unda de combustie. Pentru aer, această decuplare este mai puțin severă la lungimi intermediare (400 mm) și rapoarte de echivalență între 0.6 - 0.7. Pentru oxigen, se observă o cuplare mai puternică la 200 mm și 300 mm, cele mai bune rezultate fiind la 300 mm și rapoarte de echivalență între 0.1 - 0.15. Creșterea presiunii oxidantului îmbunătățește cuplarea prin scăderea vitezei undei de șoc și creșterea vitezei undei de combustie. Frecvența bujiei are un efect minim asupra decuplării. Vitezele de detonație în regiunile cu cuplare puternică sunt de aproximativ 600 m/s pentru ambele campanii.

Frecvența de operare a CDP este determinată în principal de frecvența bujiei, dar adesea este mai mică din cauza aprinderilor ratate. Frecvența de proiectare de 100 Hz produce cele mai puține aprinderi ratate pentru ambii oxidanți. Testele cu oxigen demonstrează performanțe bune la frecvențe mai ridicate (150 Hz și 233 Hz), în timp ce testele cu aer arată o creștere a aprinderilor ratate la 233 Hz. Pentru celelalte frecvențe diferite de frecvența de proiectare, raporturile de echivalență optime sunt în jur de 0.5 pentru aer și 0.15 pentru oxigen. Țevile de evacuare mai lungi contribuie la reducerea aprinderilor ratate și la creșterea frecvenței de operare pentru ambii oxidanți.

3.5 Analiza datelor Schlieren

Ambele campanii experimentale desfășurate în condiții atmosferice permit identificarea a patru etape în timpul unui ciclu CDP (**Capitolele 2, 3 și 5 ale tezei**):

1. Detonație: presiunea crește rapid, atinge un vârf înalt, apoi scade la fel de rapid.
2. Ingerarea aerului ambiental și a gazelor anterior evacuate, datorită inversării curgerii.
3. Evacuarea gazelor ingerate în CDP în etapa anterioară.
4. Evacuarea completă a gazelor rămase în interiorul dispozitivului.

Rezumatul datelor Schlieren este prezentat în **Tabelul 9**, care oferă media pe 30 de cicluri a principalilor parametri ce caracterizează ciclul de detonație, pentru ambii oxidanți, aer și oxigen, pentru testul 0032.

Table 8: Rezultatele ANOVA centralizate pentru campania H_2/O_2 .

Răspuns	F1	F2	F3	F4	F1xF2	F1xF3	F1xF4
Y1	D	D	D	N	N	D	D
Y2	D	N	D	D	D	N	D
Y3	D	N	D	N	N	D	N
Y4	D	D	N	D	D	N	N
Y5	D	D	N	D	D	N	N
Y6	N	N	N	N	D	D	N
Y7	N	N	N	N	D	D	N
Y8	N	N	N	N	N	N	N
Răspuns	F2xF3	F2xF4	F3xF4	F1xF2xF3	F1xF2xF4	F1xF3xF4	F2xF3xF4
Y1	N	N	N	N	N	N	N
Y2	N	N	N	N	N	N	N
Y3	N	N	N	N	D	D	D
Y4	N	D	N	N	N	N	N
Y5	N	D	N	N	N	N	N
Y6	D	D	N	N	N	N	N
Y7	D	D	N	N	N	N	N
Y8	N	N	N	N	N	N	N

Numărul Mach maxim al curgerii este mai mare pentru oxigen, iar timpul necesar pentru atingerea vitezei maxime a curgerii este, de asemenea, mai mare. Curgerea inversată apare mai târziu pentru combustia hidrogen–oxigen decât pentru hidrogen–aer, iar durata acestuia pare a fi mai scurtă. Fluxul inversat tinde să dispară pentru unele cicluri în cazul oxigenului. Frecvența de operare este asemănătoare frecvența bujiei, însă scade pentru oxigen, ca efect al numărului semnificativ mai mare de aprinderi ratate.

Table 9: Valori medii ale caracteristicilor fluxului estimate din datele Schlieren.

Parametru	Hidrogen / Aer	Hidrogen / Oxigen
Unghi Mach	66	53
Număr Mach	1.1	1.3
Viteză undă de șoc [m/s]	699	668
Viteză medie a fluxului [m/s]	149	217
Timp pentru atingerea vitezei maxime [μ s]	149	217
Timp până la inversarea fluxului [μ s]	1598	2311
Durată inversare flux [μ s]	1705	1331
Frecvența ciclului [Hz]	70.3	100.4

3.6 Îmbunătățirea Performanțelor

Cele două campanii experimentale ulterioare, detaliate în **Capitolul 7** și în **Anexa E**, sunt desfășurate pentru a îmbunătăți performanțele CDP. Prima campanie experimentală se concentrează pe îmbunătățirea indicatorilor de performanță, inclusiv tracțiunea, presiunea, impulsul specific total și impulsul specific dat de combustibil, în condiții atmosferice, iar rezultatele sunt sintetizate în **Tabelul 10**. A doua campanie are ca scop optimizarea frecvenței de operare, iar constatările sunt prezentate în **Tabelul 11**.

Prima campanie experimentală (**Capitolul 7**) completează studiul ANOVA, evidențiind rolul esențial al dimensiunii orificiului injectorului de combustibil în optimizarea performanței CDP. Conform constatărilor ANOVA, mărimea orificiului de injecție, care reglează debitul masic al combustibilului, se dovedește a fi un factor critic ce influențează comportamentul detonației, presiunea maximă și eficiența tracțiunii. Impactul său variază în funcție de diferitele presiuni ale oxidantului, demonstrând o dependență clară de debitul masic al oxidantului. Rezultatele se aliniază cu compromisurile observate în performanța injectorului: la presiuni scăzute ale oxidantului, injectoarele mai mici excelează în generarea unor indicatori de performanță favorabili. Aceste injectoare optimizează absorbția combustibilului și amestecul, necesitând, în același timp, debite masice mai mici, ceea ce le face potrivite pentru aplicații precum propulsia spațială, unde minimizarea stocării combustibilului și a oxidantului este esențială.

Table 10: Performanța de ieșire pentru geometria de bază și geometria optimizată.

Parametru	Geometrie de bază	Optimizată	Creștere totală [%]
Presiunea combustibilului [bar]	10	10	-
Presiunea oxidantului [bar]	9	9	-
ER [-]	0.09508	0.10126	106.499
Tracțiune [N]	4.4447	16.067	361.486
Impuls specific total [s]	21.615	71.629	331.385
Impuls specific dat de combustibil [s]	1840.324	5730.731	311.397
Presiunea maximă a ciclului [bar]	2.239	3.633	162.259
Presiunea medie a ciclului [bar]	1.239	1.714	94.7538
Câștig de presiune [%]	180.660	309.412	171.267

În schimb, la presiuni mai ridicate ale oxidantului, studiul confirmă performanța superioară a injectoarelor cu diametru mai mare. Aceste injectoare mențin un amestec eficient și o detonație robustă în condițiile în care Jet-in-Cross-Flow (JICF) este mai intens, rezultând o presiune maximă și o tracțiune mai ridicată. Totuși, aceste performanțe îmbunătățite vin cu dezavantajul creșterii semnificative a debitului masic, evidențiind compromisul inerent între atingerea unor indicatori de performanță ridicați și constrângerile practice legate de stocare și eficiența operațională.

Aceste rezultate validează concluziile derivate din analiza ANOVA, subliniind interacțiunea complexă dintre geometria injectorului și condițiile de operare. Ele evidențiază necesitatea studiului aprofundat al injectoarelor, cu scopul de a echilibra performanța și aspectele practice pentru a răspunde cerințelor specifice, ale diferitelor aplicații.

A doua campanie experimentală (**Anexa E**) se bazează pe analiza ANOVA, explorând în continuare influența lungimii țevii de evacuare și a geometriei rezonatoarelor asupra performanței CDP, în special în ceea ce privește frecvența de operare. În timp ce studiul ANOVA indică faptul că lungimea țevii de evacuare are o oarecare influență asupra performanței, efectul său este limitat în comparație cu alți factori. În contrast, frecvența bujiei demonstrează un impact foarte redus în rezultatele ANOVA, evidențiind rolul său minor în influențarea indicatorilor de performanță.

Variabilitatea lungimii rezonatoarelor adaugă o valoare semnificativă constatărilor, demonstrând influența substanțială asupra frecvenței de operare și creșterii de presiune. Rezultatele arată că lungimile normalizate ale rezonatoarelor asigură un echilibru optim între creșterea de presiune și frecvența de operare pentru ambii oxidanți. Acest aspect evidențiază relația complementară dintre geometria țevii de evacuare și cea a rezonatoarelor în îmbunătățirea dinamicii detonației și a extracției de energie, aliniindu-se cu observațiile studiului ANOVA și extinzându-le.

Table 11: Frecvența de operare pentru geometria de bază și geometria optimizată.

	Frecvența de operare [Hz]
Geometrie de bază	
Hidrogen / Aer	100
Hidrogen / Oxigen	100
Optimizată	
Hidrogen / Aer	300
Hidrogen / Oxigen	400

3.7 Testarea în Vid

Pentru testarea în vid, mai multe modificări ale geometriei sunt necesare pentru a obține cicluri repetate de combustie cu creștere de presiune. Acestea includ înlocuirea bujiei cu una mai puternică și reducerea diametrului țevii de evacuare de la 15 mm la 8 mm (detalii furnizate în **Capitolul 8**). Cu aceste ajustări, mai multe cicluri de combustie cu creștere de presiune, în condiții de evacuare atmosferică rarefiată, sunt înregistrate cu succes folosind atât senzorii de presiune, cât și vizualizările Schlieren. Amestecul combustibil se aprinde la un nivel de vid de aproximativ 103 mbar, menținând procesul de combustie cu creștere de presiune în regim pulsatoriu pentru aproximativ 0.5 secunde, înainte de a fi perturbat de o explozie cauzată de acumularea amestecului nersat în țeava de evacuare.

Vizualizările Schlieren ale curgerii la ieșirea din țeava de evacuare confirmă prezența ciclurilor de creștere de presiune la o frecvență de 11.97 Hz. Deși unda de presiune normală nu mai este direct vizibilă, aceasta poate fi identificată indirect prin efectele sale asupra structurilor curgerii. Comparativ cu ciclurile de detonație observate în timpul operării la presiune atmosferică, faza ciclului de curgere inversată este absentă, conform așteptărilor pentru condițiile de vid.

3.8 Contribuții Personale

Pentru atingerea obiectivului general al tezei, acela de a avansa CDP de la **NMT 2 la NMT 5**, am abordat sistematic fiecare dintre obiectivele specifice ale tezei, aducând contribuții semnificative la proiectarea camerei, dezvoltarea campaniilor experimentale, analiza datelor și modernizarea facilității de testare. Aceste eforturi nu numai că au rezolvat principalele provocări tehnice, dar au furnizat și informații critice despre operarea și optimizarea sistemelor CDP.

La început, m-am concentrat pe validarea geometriei de bază a CDP pentru obținerea detonației cu un amestec de H_2/aer , la frecvența de proiectare de 100 Hz (**OS1 și OS2, NMT 3**). Vizualizările Schlieren ale curgerii au evidențiat absența unui regim de detonație susținut, determinând necesitatea unei analize suplimentare a performanței camerei. Prin identificarea necesității de **reducere a dimensiunilor porturilor de intrare a oxidantului** pentru a crește viteza fluxului și intensitatea vârtejului, esențiale pentru antrenarea hidrogenului și controlul admisiei acestuia, **am implementat** o modificare cheie care a permis obținerea detonației cu succes. Această realizare a fost facilitată prin dezvoltarea unui software de procesare a imaginilor de bază [28], la care am contribuit semnificativ. Software-ul identifică caracteristicile critice ale curgerii supersonice, ajutând la procesul de diagnosticare. Această etapă a validat viabilitatea geometriei de bază și este prezentată în **Capitolul 2 al tezei de doctorat**.

Bazându-mă pe acest succes, trecerea la amestecuri de H_2/O_2 a expus noi provocări, datorate reacțiilor mai rapide ale oxigenului (**OS3, NMT 3**). Pentru a face față acestor

provocări, **am proiectat și testat mai multe plăci de injecție a combustibilului**, iterând asupra parametrilor precum dimensiunea portului injectorului și alinierea acestuia cu formarea vârtejului, pentru a îmbunătăți penetrarea lui și astfel amestecul format. După mai multe configurații, **am identificat un design care susține cicluri de detonație repetabile cu oxigen**. Aceasta demonstrează adaptabilitatea CDP-ului la diferiți oxidanți, confirmând potențialul său pentru aplicații diverse, de la zborul atmosferic la misiunile spațiale, unde stocarea oxigenului este fezabilă. Aceste constatări sunt detaliate în **Capitolul 3**.

Pentru a defini harta operațională și a înțelege mai bine performanța CDP, **am organizat și executat o campanie experimentală factorială completă în condiții atmosferice (OS4, NMT 4)**. **Am dezvoltat o matrice de teste cu 4 parametri, fiecare având 4 niveluri** (cuprinzând 256 de configurații per oxidant, totalizând 512 de teste pentru H_2 /air and H_2/O_2), **participând activ la colectarea datelor pe parcursul campaniei**. Pentru a gestiona setul extins de date, **am creat subrutine automate pentru procesarea și vizualizarea datelor**. Aceste instrumente permit extragerea eficientă a indicatorilor cheie, cum ar fi raportul de echivalență, tracțiunea, presiunile ciclului, vitezele undelor și frecvența de operare. **Am efectuat un studiu ANOVA detaliat** pentru a evalua impactul parametrilor critici (presiunile pe linia de combustibil și oxidant, frecvența bujiei și lungimea țevii de evacuare) asupra performanței CDP. Această analiză nu numai că cuantifică influențele parametrilor, dar pregătește și terenul pentru eforturi viitoare de modelare, oferind informații esențiale despre dinamica fluxului și a combustiei. Rezultatele acestui studiu sunt detaliate în **Capitolele 4 – 6 și în Anexa C**.

Folosind informațiile obținute, **am propus modificări ale plăcii de injecție a combustibilului pentru a optimiza performanța pentru ambii oxidanți (OS5, NMT 4)**. În plus, am efectuat cercetări detaliate asupra influenței factorilor geometrici, cum ar fi lungimile rezonatoarelor și ale țevii de evacuare, asupra frecvenței de operare și asupra repetabilității combustiei. **Acest studiu a condus la observarea unui fenomen ne mai întâlnit: un efect de rezonanță ce poate fi interpretat ca o spirală aerodinamică Schelkin**. Această descoperire nouă nu doar că scoate în evidență dinamica complexă a fluxului, anterior necaracterizată în CDP, ci subliniază și rolul critic al rezonanței în sporirea repetabilității și eficienței detonației. Aceste rafinări au condus la îmbunătățiri semnificative ale performanței, așa cum este documentat în **Capitolul 7 și în Anexa E**. Interacțiunea dintre aceste optimizări geometrice, constatările experimentale și identificarea acestui fenomen unic evidențiază importanța adaptării designurilor CDP la cerințele operaționale specifice, simultan cu avansarea înțelegerii științifice a mecanismelor ce stau la baza propulsiei cu flux internă supersonic.

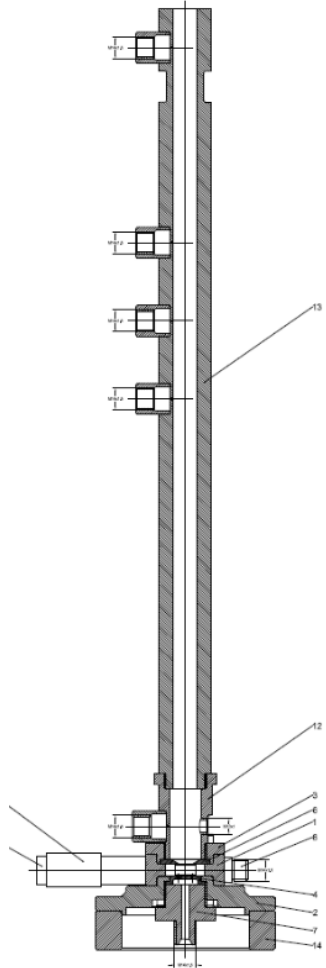
În final, **am abordat tranziția critică către condiții de vid pentru a evalua fezabilitatea CDP-ului în aplicații spațiale (OS6, NMT 5)**. Încercările inițiale de a obține aprinderea în medii rarefiate au fost împiedicate de o energie de aprindere insuficientă și de o dinamică a curgerii suboptimală. Prin înlocuirea bujiei cu una mai puternică și reducerea diametrului țevii de evacuare de la 15 mm la 8 mm, **am reușit să înregistrez cu succes mai multe cicluri de combustie cu creștere de presiune la un nivel de vid de aproximativ 103 mbar**. Deși acumularea amestecului nersat a dus ulterior la o explozie, acest experiment a marcat un progres semnificativ în demonstrarea combustiei cu creștere de presiune în condiții de vid redus. Aceste constatări, detaliate în **Capitolul 8**, reprezintă un pas critic, întrucât literatura de specialitate nu oferă dovezi ale unor astfel de realizări în domeniul camerelor de detonație. **Acest reper evidențiază potențialul CDP pentru misiuni aerospațiale imediate și pregătirea sa pentru NMT 5**.

În plus, **am contribuit la modernizarea facilității experimentale, standul de detonație, pentru a extinde capacitățile de cercetare**. Mai exact, **am participat la proiectarea, identificarea componentelor necesare și construirea unei linii de combustibil pentru metan**, permițând efectuarea de experimente cu amestecuri hidrogen-

metan, care sunt mai sigure și mai practice pentru stocarea criogenică în aplicații spațiale, în comparație cu hidrogenul pur. Această îmbunătățire a facilității, discutată în **Anexa B**, se aliniază obiectivului tezei de a avansa NMT al tehnologiei PDC pentru propulsia spațială.

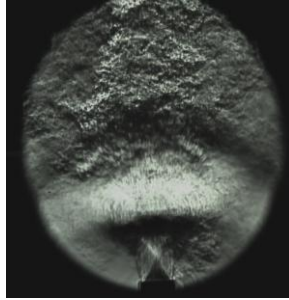
În ansamblu, aceste contribuții întruchipează misiunea de bază a acestei teze: dezvoltarea și optimizarea unui sistem de propulsie inovator, cu flux intern supersonic, care să avanseze conceptul CDP de la NMT 2 la NMT 5. Prin îmbunătățiri iterative ale designului, campanii experimentale extinse și modernizarea facilității, **am demonstrat viabilitatea, versatilitatea și scalabilitatea sistemelor CDP.** Setul extins de date și optimizările validate oferă o bază solidă pentru cercetări viitoare, asigurând că tehnologia CDP va continua să evolueze către niveluri de maturitate tehnologice superioare și implementarea efectivă în aplicații reale. Munca mea contribuie semnificativ la avansarea stadiului actual al combustiei cu creștere de presiune, un domeniu promițător cu implicații transformative pentru sistemele aerospațiale și energetice.

Geometria de bază CDP

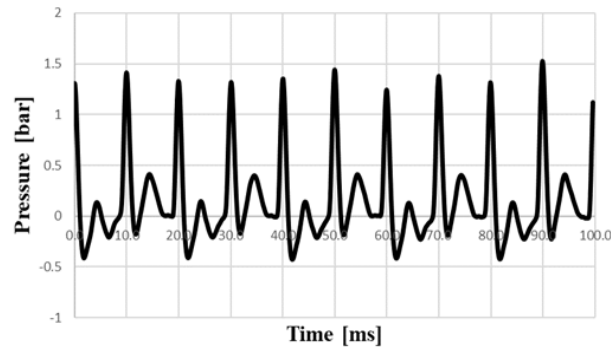
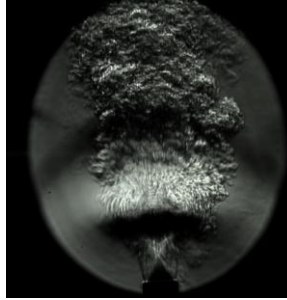


OS1 & OS2

H_2 /aer



H_2 / O_2



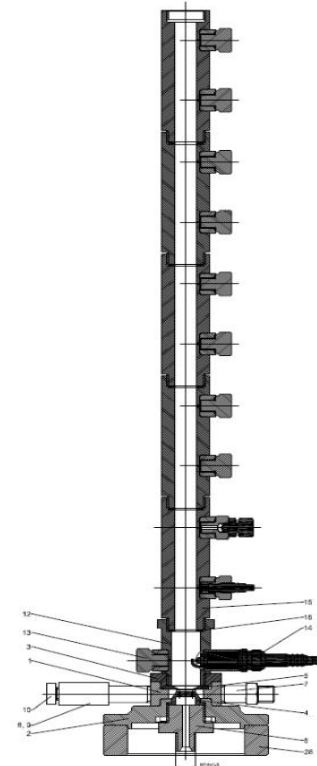
Modificările CDP pentru OS1 & OS2:

- Diminuarea diametrului de intrare oxidant
- Adaptarea orificiului de injecție H_2

(Capitolele 2 & 3 din Teza de Doctorat)

OS3

Geometrie adaptată



CDP adaptat pentru modularitate:

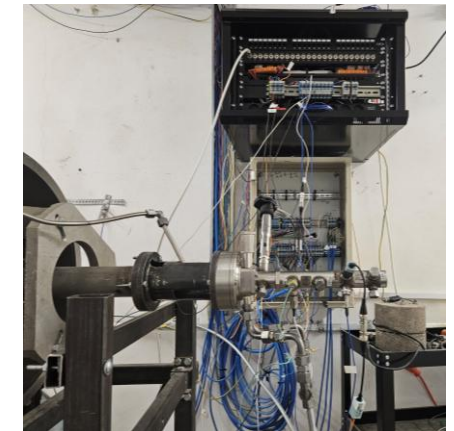
- Matrice de test factorial completă (512 tests)

- Hartă operațională completă

- Studiu ANOVA

(Capitolele 4,5,6 și Anexa C din Teza de Doctorat)

Geometrie adaptată



Start – NMT 2

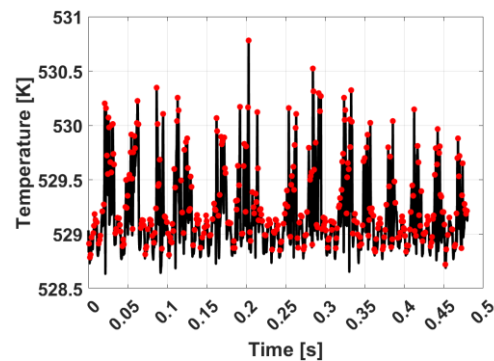
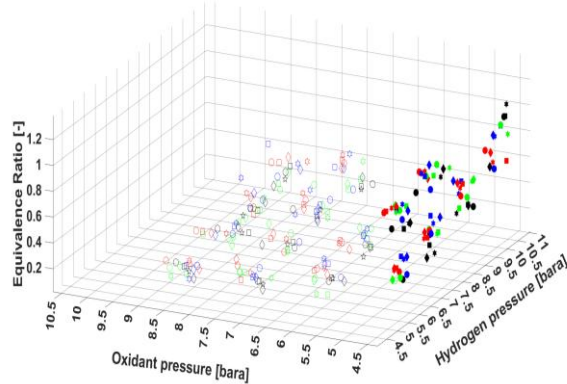
NMT 3

NMT 3

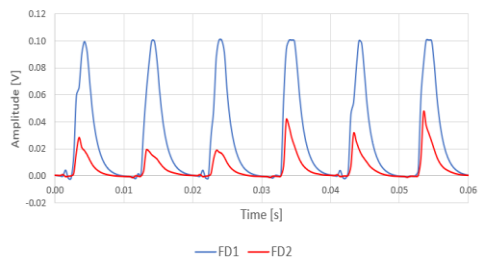
Continuare următoarea pagină

OS3

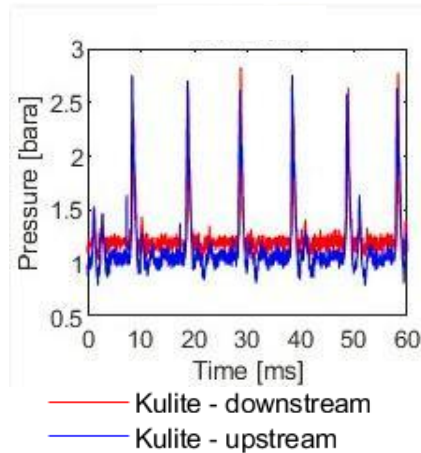
Rezultate



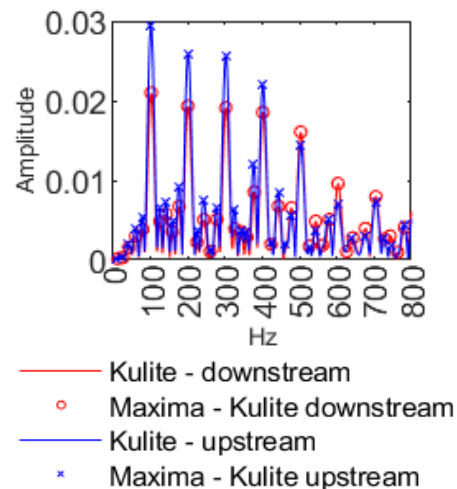
Photodiodes



Presiuni

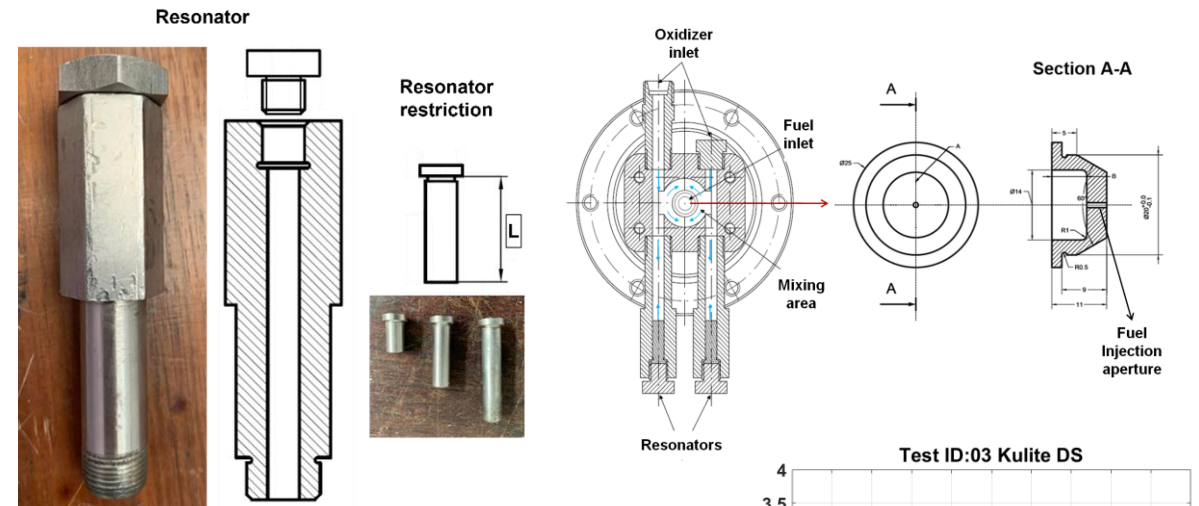


Analiză FFT



OS4

Optimizare Geometrică



Optimizarea geometriei CDP:

1. Modificarea plăcii de injecție cu combustibil

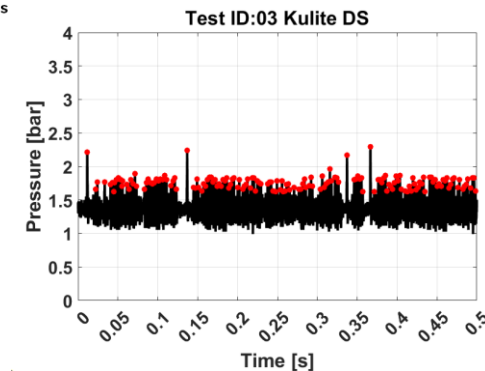
- Tracțiune augumentată (361 %)
- Creștere de presiune augumentată (171%)
- Presiune maximă a ciclului îmbunătățită (162 %)

2. Optimizarea rezonatoarelor și a țevii de evacuare

- Augumentarea frecvenței de operare
 - H_2/aer - 300 %
 - H_2/O_2 - 400 %

• **Un NOU fenomen observat – Spirală aerodinamică Schelkin**

(Capitolul 7 & Anexa E din Teza de Doctorat)



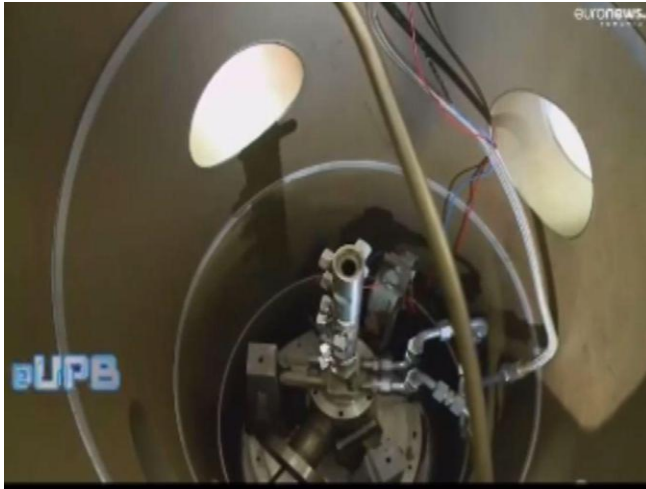
TRL 4

TRL 4

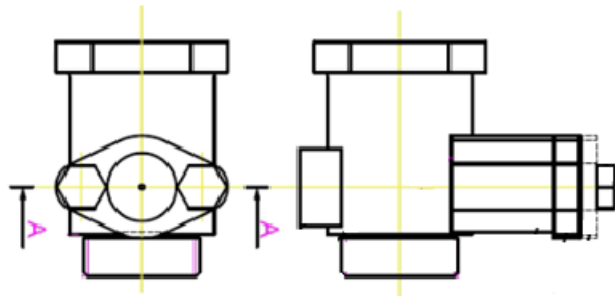
Continuare următoarea pagină

O nouă geometrie pentru testele în camera de vid

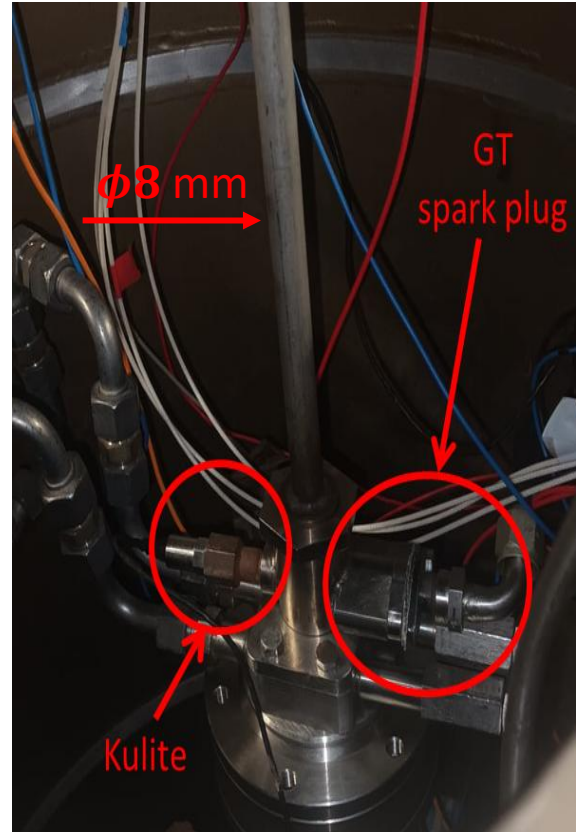
Design inițial



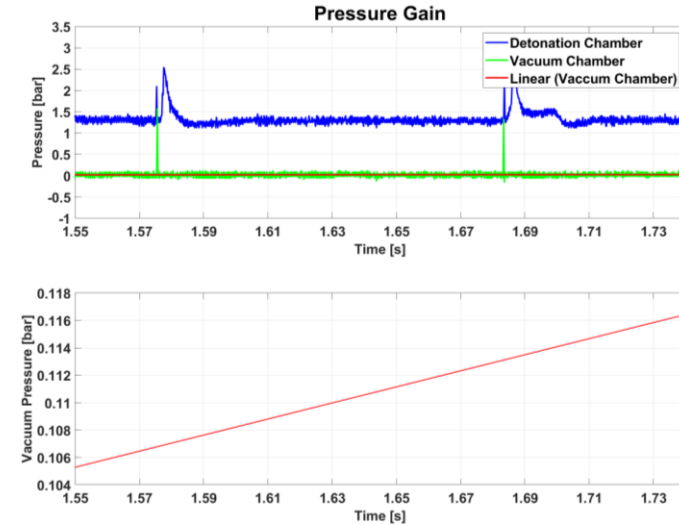
Adaptarea portului bujiei



Design final



Rezultate



Creșterea presiunii în condiții de vid reduse
(~103 mbar):

- Adaptarea geometriei (țeava de evacuare, detonator)
- Observarea mai multor unde de creștere a presiunii
- **Rezultate documentate in documentarul Euronews, eUPB:**

https://m.youtube.com/watch?v=iJ4D7wQ1m-Unb&fbclid=IwAR01KMWx_mRM8MGZ9Ay4eR2G7_Oq0WwSqEWTU5NQPeIQ9dNOhFDdcoPwPE

Bibliography

- [1] F. Brahim and M. Guemmadi, 2023. “Thermodynamic and Environmental Comparison of Various Recuperated Cycles for Gas Turbine Applications”, 47–58, ISBN: 978-981-97-6148-7, https://doi.org/10.1007/978-981-97-6148-7_6.
- [2] K Kailasanath, 2000. “Review of propulsion applications of detonation waves”, *AIAA journal*, 38, 1698–1708, <https://doi.org/10.2514/2.1156>.
- [3] University of Texas at Arlington Aerodynamics Research Center, 2024. Pulsed Detonation Engines. <https://arc.uta.edu/research/pde.htm> Accessed: 7th October 2024.
- [4] European Commission, 2019. European Green Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en Accessed: 7th October 2024.
- [5] SpaceX, 2024. Starship. <https://www.spacex.com/vehicles/starship/> Accessed: 7th October 2024.
- [6] NASA, 2021. Next Generation of Orion Spacecraft in Production for Future Artemis Missions. <https://www.nasa.gov/missions/next-generation-of-orion-spacecraft-in-production-for-future-artemis-missions/> Accessed: 7th October 2024.
- [7] E. J. Gutmark, 2021. “Pressure Gain Combustion”, *Shock Waves*, 31, 619–621, <https://doi.org/10.1007/s00193-021-01053-3>.
- [8] D. L. Chapman, 1899. “VI. On the rate of explosion in gases”, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 47, 90–104, <https://doi.org/10.1080/14786449908621243>.
- [9] E. Jouguet, 1905. “On the propagation of chemical reactions in gases”, *J. Math. Pures Appl*, 1, 347–425.
- [10] Y. B. Zeldovich, 1950. On the theory of the propagation of detonation in gaseous systems. Technical Report, FM 00-7.
- [11] R. Vutthivithayarak “Analysis of pulse detonation turbojet engines”. PhD Thesis. Texas, USA: University of Texas at Arlington, 2011.
- [12] E. Wintenberger and J. E. Shepherd, 2006. “Thermodynamic cycle analysis for propagating detonations”, *Journal of propulsion and power*, 22, 694–698, <https://doi.org/10.2514/1.12775>.
- [13] Kenneth K Kuo, 1986. Principles of combustion, ISBN: 9780471046899.
- [14] S. R. Turns, 1996. Introduction to combustion, ISBN: 9871259025945.
- [15] J. H. Lee, R. Knystautas, and A. Freiman, 1984. “High speed turbulent deflagrations and transition to detonation in H₂-air mixtures”, *Combustion and flame*, 56, 227–239, [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(84\)90039-7](https://doi.org/10.1016/0010-2180(84)90039-7).
- [16] J. Shepherd, 2002. Detonation Database. https://shepherd.caltech.edu/detn_db/html/db.html Accessed: 9th October 2022.
- [17] S.M. Frolov, V.A. Smetanyuk, V.S. Aksenov, and A.S. Koval’, 2017. “Deflagration-to-detonation transition in crossed-flow fast jets of propellant components”, vol. 476, 153–156, <https://doi.org/10.1134/S0012501617090019>.

- [18] J. Chambers and K. Ahmed, 2017. “Turbulent flame augmentation using a fluidic jet for Deflagration-to-Detonation”, *Fuel*, 199, 616–626, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.023>.
- [19] M. Cooper, S. Jackson, and J.E. Shepherd, 2000. Effect of deflagration-to-detonation transition on pulse detonation engine impulse. Technical Report, FM 00-3.
- [20] A. V. Cojoccea, T. Cuciuc, I. Porumbel, M. Gall, B. Gherman, and D. E Crunțeanu, 2022. “Experimental Investigations of Hydrogen Fuelled Pulsed Detonation Combustor”, vol. 86007, V03BT04A020, ISBN: ISBN: 978-0-7918-8600-7, <https://doi.org/10.1115/GT2022-82393>.
- [21] G.I. Vrabie, D.C Asoltanei, **Cojoccea, A.V.**, M. Gall, T. Cuciuc, and I. Porumbel, 2023. “Experimental Comparison for Different Oxidizers in Hydrogen Fuelled Pulsed Detonation Combustor”, *Turbo Scientific Journal*, X(2), 37–53, <https://comoti.ro/wp-content/uploads/2024/01/Vol-X-No-2-2023.pdf>.
- [22] **Cojoccea, A. V.**, T. Cuciuc, I. Porumbel, M. Gall, G. Vrabie, and D. Asoltanei, 2024. “Stability Exploration of Pulsed Detonation in Hydrogen-Air and Hydrogen-Oxygen Mixtures”, https://www.3af-spacepropulsion.com/images/DOCUMENTS/SP2024_PRELIMINARY_PROGRAMME.pdf.
- [23] A. Bogoi, T. Cuciuc, A. V. Cojoccea, M. Gall, I. Porumbel, and C. E. Hrițcu, 2024. “Experimental Pressure Gain Analysis of Pulsed Detonation Engine”, *Aerospace*, 11, 465, <https://doi.org/10.3390/aerospace11060465>.
- [24] A.V. Cojoccea, I. Porumbel, M. Gall, and T. Cuciuc, 2024. “Experimental Thrust and Specific Impulse Analysis of Pulsed Detonation Combustor”, *Applied Sciences*, 14, 5999, <https://doi.org/10.3390/app14145999>.
- [25] R. W Shonkwiler and F. Mendivil, 2009. Explorations in monte carlo methods, ISBN: 978-3-031-55964-8.
- [26] A.V. Cojoccea, I. Porumbel, M. Gall, and T. Cuciuc, 2024. “Experimental Investigations on the Impact of Hydrogen Injection Apertures in Pulsed Detonation Combustor”, *Energies*, 17, 4918, <https://doi.org/10.3390/en17194918>.
- [27] A.V. Cojoccea, M. Gall, G.I. Vrabie, T. Cuciuc, I. Porumbel, G. Ursescu, and D.E. Crunțeanu, 2024. “Experimental Study on Ignition and Pressure-Gain Achievement in Low-Vacuum Conditions for a Pulsed Detonation Combustor”, *Technologies*, 12, 252, <https://doi.org/10.3390/technologies12120252>.
- [28] G. I. Vrabie, A. V. Cojoccea, M. Gall, C. Anton, D.C. Asoltanei, and I. Porumbel, 2024. “Towards the development of an algorithm for automatic analysis and detection of shock waves in the schlieren visualization technique.”, *INCAS Bulletin*, 16, ISSN: 2066-8201, <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2024.16.4.12>.