



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie  
POLITEHNICA BUCUREȘTI  
ȘCOALA DOCTORALĂ: Inginerie Mecanică și Mecatronică

# **Contribuții la studiul proceselor de ardere din turbomotoare ce folosesc amestecuri de gaz metan îmbogățite cu hidrogen**

**-TEZĂ DE DOCTORAT-  
-REZUMAT-**

**Conducător științific: Prof. Dr. Ing. Tudor Prisecaru**

**Doctorand: Ing. Marius Ștefan Enache**

Nr. Decizie Senat ..... din .....

**-BUCUREȘTI, 2024-**



# CUPRINS

1.	Obiectivele cercetării doctorale.....	4
1.1	Scopul cercetării doctorale si obiective.....	4
1.2	Analiza stadiului actual de dezvoltare al cercetărilor în domeniu.....	6
2.	Campania experimentală.....	8
2.1	Introducere și context.....	8
2.2	Instalația de testare folosită (campania 1).....	9
2.3	Soluții tehnice pentru diminuarea zgomotului.....	12
2.4	Analiza parametrilor termici și a emisiilor.....	15
2.4.1	<b>Instalația de testare folosită (campania 2).....</b>	<b>16</b>
2.4.2	<b>Descrierea instalației de testare (campania 2).....</b>	<b>16</b>
2.4.3	<b>Configurații de testare.....</b>	<b>16</b>
2.4.4	<b>Analiza de gaze de ardere și spectrele audio.....</b>	<b>18</b>
2.4.4.1	<b>Înregistrări campanie experimentală cu 60%CH<sub>4</sub>+40%H<sub>2</sub>:.....</b>	<b>18</b>
2.4.4.2	<b>Înregistrări campanie experimentală cu 40%CH<sub>4</sub>+60%H<sub>2</sub>:.....</b>	<b>20</b>
2.4.4.3	<b>Înregistrări campanie experimentală cu 20%CH<sub>4</sub>+80%H<sub>2</sub>:.....</b>	<b>23</b>
2.4.4.4	<b>Înregistrări campanie experimentală cu 100%H<sub>2</sub>:.....</b>	<b>25</b>
2.4.4.5	<b>Determinări acustice pe instalația experimentală.....</b>	<b>27</b>
2.4.4.6	<b>Determinări acustice în situația arderii gazului amestecurilor de gaz metan îmbogățite cu hidrogen pe instalația experimentală.....</b>	<b>30</b>
2.5	Concluzii campanie experimentală.....	33
3.	Modelarea numerică a curgerii turbulente reactive.....	34
3.1	Introducere.....	34
3.2	Elemente de cinetica reacțiilor chimice.....	35
3.2.1	Mecanismul de reacție CH <sub>4</sub> /aer.....	35
3.2.2	Mecanismul de reacție H <sub>2</sub> /aer.....	35
3.3	Modelare numerică pentru noul turbionator pentru funcționarea cu amestec CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> .....	36
3.4.1	<b>Geometria si grila de calcul.....</b>	<b>36</b>
3.4.2	<b>Condiții la limită.....</b>	<b>38</b>
3.4.3	<b>Rezultate modelare numerică.....</b>	<b>38</b>
4.	Concluzii generale.....	45
5.	Contribuții personale și diseminare.....	47
5.1	<b>Contribuții personale.....</b>	<b>47</b>
6.	Direcții viitoare de cercetare.....	48
7.	Referinte:.....	50

## 1. Obiectivele cercetării doctorale

## 1.1 Scopul cercetării doctorale si obiective

Această lucrare își propune să cerceteze atât pe cale teoretică, cât și experimentală, efectele îmbogățirii cu hidrogen a gazului natural, în camera de ardere a unei turbine cu gaze. În același timp, cercetarea doctorală a fundamentat elaborarea unui brevet OSIM cu numele: “Cameră de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară” [1], unde autorul este prim autor. Brevetul consideră o cameră de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară folosită în domeniul turbomotoarelor cu gaze, care utilizează combustibili gazoși, în special hidrogen, în care gazele combustibile sunt reprezentate de amestecuri din gaze cu viteze de ardere ridicate.

*Astfel, în Fig. 1.1 este prezentată “secțiune cameră de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară”, iar în Fig.1.2 este prezentat conceptul inovativ de ansamblul parte frontala camera de ardere împreună cu injector-turbionator asupra căreia autorul își concentrează prezentul studiu.*

Camera de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară este compusă dintr-o carcasă exterioară, un sistem de injecție, un sistem de aprindere cu bujie și un tub de foc, care se termină în aval cu o zonă secundară de diluție.

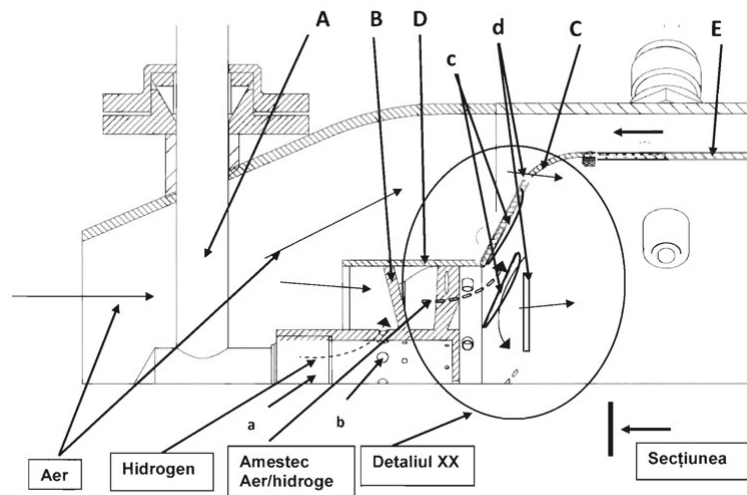


Figura 1.1- Secțiune longitudinală a camerei de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară [6]

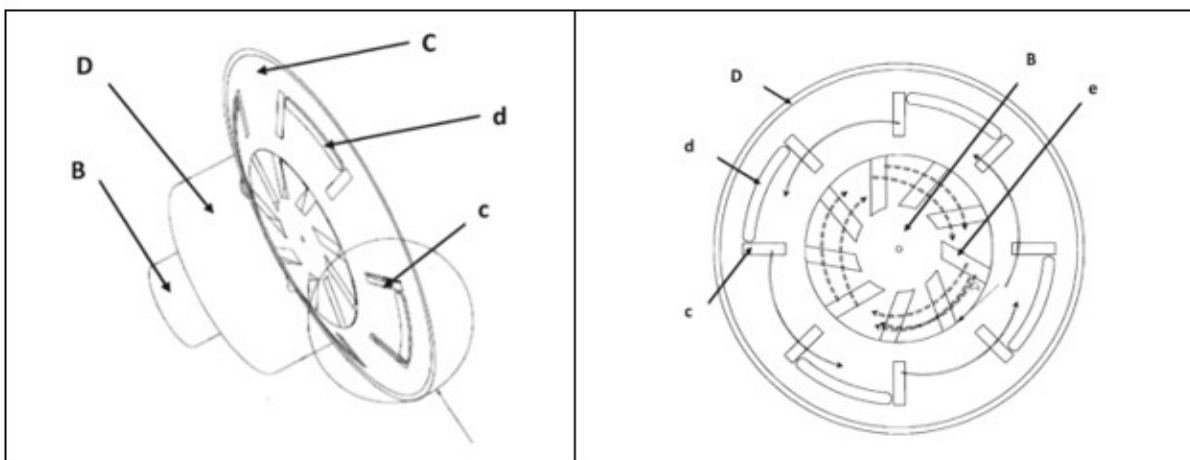


Figura 1.2- Parte frontala camera de ardere împreuna cu injector-turbionator [6]

Sistemul de injecție A furnizează combustibilul gazos către un turbionator B, care este prevăzut la exterior cu palete elicoidale dispuse pe direcția axială a curgerii. Aceste palete formează canale elicoidale evazate, creând ajutaje convergente cu secțiune plan-paralelă pe lățime, generând la ieșire jeturi la unghiuri față de direcția axială, care la rândul lor formează jeturi de turbionare. Alimentarea cu gaze combustibile se realizează prin introducerea acestora printr-un canal interior al turbionatorului B și apoi în fluxul de aer, prin orificii b amplasate central și la baza fiecărui canal de curgere, în mai multe rânduri. Pe peretele frontal C, care leagă piesa de centrare a turbionatorului D de partea cilindrică a tubului de foc E, sunt realizate fante de turbionare c dispuse radial, care generează jeturi de turbionare în direcție opusă celor din fantele e ale turbionatorului B.

Se propun următoarele obiective de atins pentru această lucrare de doctorat:

- **Analizarea ecuațiilor care guvernează curgerea turbulentă reactivă, precum și a modelelor numerice care facilitează analiza numerică a acestor curgeri;**
- **Realizarea de simulări numerice tridimensionale ale curgerii turbulente cu aport de căldură (cu aprinderea conceptului de injector-turbionator) în modelul experimental privind amestecurile de metan-hidrogen în flăcări cu preamestec, turbionare și diluție primară folosind software-ul ANSYS, existent în COMOTI;**
- **Plecând de la datele cunoscute și pe baza concluziilor simulărilor CFD realizate, se va dezvolta un noul concept de injector-turbionator, care va fi integrat într-o cameră de ardere inovativă, cu preamestec și turbionare pentru testarea experimentală.**
- **Pe lângă hidrogenul pur (100% H<sub>2</sub>), amestecurile de hidrogen-metan (20%H<sub>2</sub>+80%CH<sub>4</sub>, 40%H<sub>2</sub>+60%CH<sub>4</sub>, 80%H<sub>2</sub>+20%CH<sub>4</sub>) vor fi studiate deoarece hidrogenul înlocuiește metanul drept component principal al combustibilului.**

- *Atenuarea undelor acustice generate în curgerile reactive în situația folosirii amestecurilor de gaz metan îmbogățit cu hidrogen drept combustibil*
- *Validarea rezultatelor simulărilor numerice cu datele experimentale obținute în cadrul studiilor prezentate în această lucrare, precum și cu date experimentale existente în literatura de specialitate.*
- *Brevetarea soluție constructive studiate și experimentate. Brevetarea va permite protecția legală a invenției și deschiderea oportunităților de valorificare comercială prin licențiere, atragerea de investiții sau integrarea în produse și tehnologii existente, consolidând astfel valoarea economică și contribuția științifică a cercetării în domeniul ingineriei sistemelor de ardere.*

## 1.2 Analiza stadiului actual de dezvoltare al cercetărilor în domeniu

Reducerea emisiilor de CO<sub>2</sub> a devenit o prioritate majoră pe agenda instituțiilor europene, având ca scop limitarea efectelor dramatice ale schimbărilor climatice asupra vieții de zi cu zi a oamenilor. Creșterea eficienței arderii combustibilului și reducerea emisiilor de poluanți, inclusiv a emisiilor de dioxid de carbon, reprezintă tendințele dominante în sectorul energetic modern. Totodată, a devenit evident că nu există o soluție universală pentru reducerea amprentei de carbon a sectorului energetic, prin simpla tranziție a energiei industriale către surse regenerabile. Analiza datelor din literatură evidențiază o activitate extinsă de cercetare și dezvoltare în direcția utilizării amestecurilor de metan și hidrogen ca un combustibil promițător și ecologic, caracterizat prin emisii reduse de carbon. Principala diferență dintre hidrogen și combustibilii tradiționali pe bază de hidrocarburi constă în rata de ardere semnificativ mai mare a hidrogenului, care, în condiții standard, este de cel puțin de șase ori mai mare decât cea a metanului. De asemenea, hidrogenul are limite de concentrație mult mai extinse pentru propagarea flăcării în comparație cu hidrocarburi. Din acest motiv, pe lângă utilizarea hidrogenului ca și combustibil direct, se explorează intens și utilizarea acestuia ca aditiv pentru combustibilii tradiționali, în special pentru gazul natural comprimat (GNC). Un număr mare de studii au fost dedicate studiului arderii amestecurilor hidrogen-metan. Nam et al [2] au fost efectuate simulări numerice pe o camera de ardere folosind drept combustibil gaz metan îmbogățit cu hidrogen pentru a obține o înțelegere cuprinzătoare a efectului îmbogățirii cu hidrogen asupra arderii turbulente. S-a descoperit că, pe măsură ce conținutul de hidrogen a crescut la peste 11% (volumic), unghiul de extindere a flăcării a crescut rapid. Concentrațiile de NO<sub>x</sub> au crescut atunci când conținutul de hidrogen a fost mai mare de 11% vol. Cu toate acestea, emisia de CO nu a fost sensibilă la variația concentrației de hidrogen. Rezultatele au arătat că

structura flăcării a fost ușor influențată de modificarea compoziției combustibilului. Aceasta a afectat puternic câmpul de curgere și, prin urmare, oscilațiile de presiune din interiorul camerei de ardere. Când concentrația de hidrogen a crescut, flacăra a devenit mai scurtă și mai groasă, iar efectul ei asupra zonei exterioare de recirculare a fost minimizat. Glee et al [3] investighează eficacitatea creșterii diametrului injectorului de combustibil pentru a extinde limitele de amestecare ale hidrogenului înainte de flashback. Rezultatele arată că arzătorul nemodificat poate susține până la 50% vol. adăugarea de hidrogen înainte de flashback. Prin Creșterea diametrului injectorului de combustibil se realizează reducerea aerului primar facilitând astfel o funcționare stabilă pentru concentrații de până la 100% hidrogen. Lungimea flăcării, vizibilitate și proprietățile de transfer de căldură radiantă sunt toate crescute ca urmare a debitului de aer redus ajungându-se la un compromis în ceea ce privește emisiile de NOx crescute. Influența adăugării de hidrogen asupra performanței unei camere de ardere în contracurent ce folosește un injector turbionator cu metan și aer a fost studiată de Fu et al [4], atât numeric cât și experimental. Simulările numerice au fost realizate sub anumite condiții de intensitate a turbulenței pentru un turbomotor cu o putere de 100 kW, alimentat cu un amestec de metan și hidrogen. Rezultatele arată că o distribuție a debitului de aer 50% în zona primară a tubului de foc, 20% în zona secundară și 30% în zona de diluție conduce la o distribuție ideală a temperaturii la ieșire. Pe măsură ce raportul de hidrogenului crește în combustibil, temperatura de ieșire scade și emisiile de poluant NOx sunt menținute într-un interval ultra-scăzut. Când conținutul de hidrogen în volum depășește 20%, adăugarea de hidrogen are un impact semnificativ asupra sinergiei în camera de ardere, ceea ce favorizează o distribuție uniformă a temperaturii la ieșire și o rezistență relativ scăzută la curgere. Abdelhalim et al [5] analizează stabilitatea și caracteristicile de ardere ale unei flăcări stratificate de CH<sub>4</sub>/aer, îmbogățită cu hidrogen, într-un model de arzător pentru turbină cu gaz, care imită arzătoarele Dual Annular Counter-Rotating Swirl (DACRS) utilizate în turbinele aeroderivative reale. Studiul a evaluat efectele varierii de la 0 la 20% a procentului volumic de hidrogen în combustibilul total introdus în camera de ardere, și varierii de la 0,5 la 0,73 a raportul de echivalență asupra stabilității flăcării, structurii acesteia și emisiilor. Rezultatele obținute pentru camera de ardere studiată au arătat că adăugarea de hidrogen produce două efecte opuse asupra flăcării. Îmbogățirea cu hidrogen îmbunătățește cinetica reacțiilor și viteza flăcării, ceea ce ar trebui să conducă la o flacără mai stabilă, mai strălucitoare și mai compactă. Rezultatul este că limita stingere a flăcării a rămas constantă la un raport de echivalență de aproximativ 0,5, în ciuda creșterii fracției de hidrogen până la 20% vol. Emisiile de NOx nu au fost afectate de îmbogățirea cu hidrogen până

la 20%, dar creșterea raportului de echivalență favorizează formarea de NO<sub>x</sub>, așa cum era de așteptat. Marragou et al [6] au investigat folosind o camera de ardere echipată cu un injector coaxial, în condiții pe laborator, regimuri de funcționare și emisiile de poluanți ale flăcărilor parțial preamestecate folosind drept combustibil CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/aer. Studiul arată că introducerea de hidrogen prin orificiul central favorizează arderea, rezultând un stres termic scăzut asupra injectorului și emisii scăzute de NO<sub>x</sub>. De asemenea, studiul subliniază că micșorarea diametrului duzei centrale a injectorului pentru hidrogen extinde considerabil regimurile de funcționare. Flăcările se detașează de marginea injectorului atunci când viteza medie de curgere a hidrogenului este suficient de mare. În această configurație, s-a constatat că emisiile de NO<sub>x</sub> rămân scăzute chiar și când se folosește hidrogen pur. Mai mult, emisiile de NO<sub>x</sub> scad atunci când puterea termică crește pentru un raport de echivalență fix. Impactul adăugării de hidrogen nepremestecat asupra formei și mecanismelor de stabilizare ale unei flăcări de metan/aer turbionate a fost analizat prin simulări numerice utilizând metoda Large Eddy Simulations (LES) de către Laera et al [7]. Atunci când hidrogenul este adăugat în amestec, se observă variații mari ale numerelor Prandtl și Schmidt pentru N<sub>2</sub>, în funcție de concentrațiile locale ale speciilor, caracteristici care sunt neglijate de modelele simplificate. Conform experimentelor, flacăra de tip clasic în formă de V este stabilizată în regiunea de viteză mică din apropierea suportului flăcării creată de zona centrală de recirculare (CRZ). Apoi, îmbogățirea cu hidrogen a combustibilului se realizează injectând 2% din puterea termică a CH<sub>4</sub> printr-un canal central. În acest caz, sunt prezente atât flacăra preamestecată, cât cea difuzivă, influențând stabilizarea flăcării și unghiul acesteia. Având în vedere concentrația mare de H<sub>2</sub> în aceste regiuni, stabilizarea flăcării este puternic influențată de modelele de transport adoptate subliniind importanța utilizării proprietăților complexe de transport în simulările numerice ale arderii hidrogenului folosind metoda LES care implică arderea hidrogenului.

**Cuvinte cheie: hidrogen, turbomotoare, reducere zgomot, ardere amestecuri, CFD.**

## **2. Campania experimentală**

Acest capitol conține două campanii experimentale principale care investighează arderea metanului (CH<sub>4</sub>) îmbogățit cu diferite concentrații de hidrogen (H<sub>2</sub>) în camera de ardere a unui turbomotor, arderea fiind investigată printr-un tub de cuarț. Scopul principal este analiza fenomenelor acustice și a zgomotului produs în urma combustiei, evaluarea emisiilor de monoxid de carbon (CO) și oxid de azot (NO), dar și stabilirea condițiilor optime de ardere pentru diverse amestecuri.



## 2.1 Introducere și context

Obiectivele principale ale studiului includ analiza comportamentului acustic al amestecurilor combustibile, evaluarea emisiilor de gaze și determinarea condițiilor optime de funcționare pentru arderea stabilă și sigură a amestecurilor cu conținut ridicat de hidrogen. Injecția combustibilului s-a realizat prin intermediul injectorului-turbionator, folosit într-un studiu recent [8] cu privire la utilizarea efectelor adăugării de hidrogen în gazul natural, în camera de ardere a unei turbine cu gaze. Detaliile constructive ale acestui sistem de injecție și amestecare sunt prezentate în Fig. 2.1.

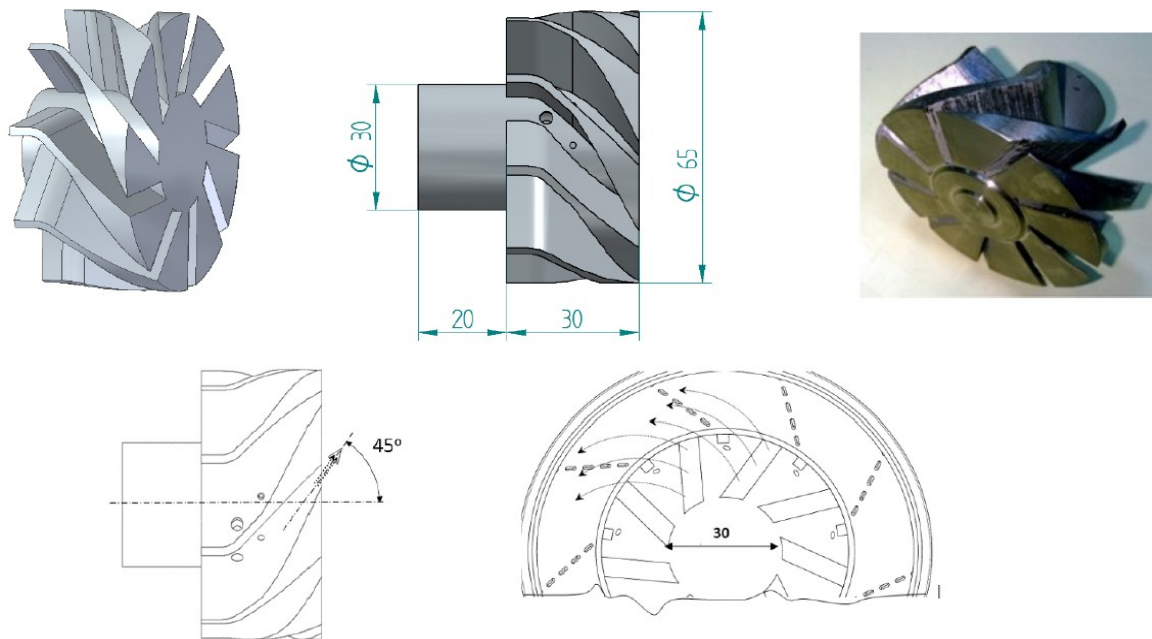


Figura 2.1- Injectorul-turbionator folosit [57]

## 2.2 Instalația de testare folosită (campania 1)

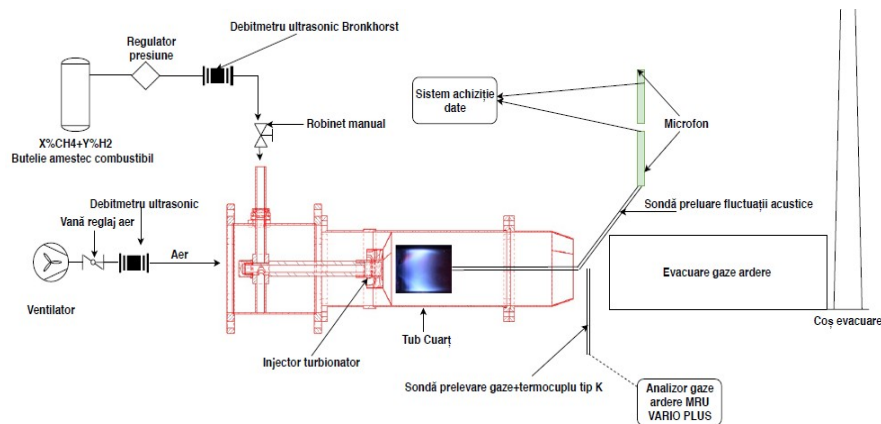


Figura 2.2- Amenajare experimentală

În cele ce urmează sunt prezentate datele experimentale măsurate și prelucrate (Tabelul 2.1). Debitul de combustibil a fost supus unei transformări prin care s-a ținut cont de natura amestecului, acesta fiind format din două tipuri de gaze combustibile.

**Tabel 2.1 . Date experimentale**

Nr.Crt	debit aer kg/s	debit CH <sub>4</sub> kg/s	debit CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /h	Temperatura °C	CO ppm	T stingere °C
1	0.02	0.0007125	0.95	998.4	52	620
2	0.02	0.0006375	0.85	903.6	879	
3	0.02	0.00054	0.72	687.4	2251	
4	0.02	0.0005325	0.71	682.3	2200	
Nr.Crt	debit aer kg/s	debit 90%CH <sub>4</sub> +10%H <sub>2</sub> kg/s (cu factor de corectie)	debit 90%CH <sub>4</sub> +10%H <sub>2</sub> masurat Nm <sup>3</sup> /h	Temperatura °C	CO ppm	T stingere °C
1	0.02	0.000738	5	1023.4	278	540
2	0.02	0.0006585	4.8	939	316	
3	0.02	0.0005604	4	796	1532	
4	0.02	0.0004914	3.6	684.9	1767	
5	0.02	0.0004428	3	602	1800	
		0.0004127	2.8	530.8	1855	
Nr.Crt	debit aer kg/s	debit 80%CH <sub>4</sub> +20%H <sub>2</sub> kg/s (cu factor de corectie)	debit 80%CH <sub>4</sub> +20%H <sub>2</sub> masurat Nm <sup>3</sup> /h	Temperatura °C	CO ppm	T stingere °C
1	0.02	0.0007596	5.8	1020.2	79	526
2	0.02	0.0006512	4.8	932.2	606	
3	0.02	0.0005155	3.8	773.5	1118	
4	0.02	0.0004613	3.4	690.2	1356	
5	0.02	0.0003682	2.8	536	1381	
Nr.Crt	debit aer kg/s	debit 60%CH <sub>4</sub> +40%H <sub>2</sub> kg/s (cu factor de corectie)	debit 60%CH <sub>4</sub> +40%H <sub>2</sub> masurat Nm <sup>3</sup> /h	Temperatura °C	CO ppm	T stingere °C
1	0.02	0.0007234	6.5	1036.9	52	250
2	0.02	0.0005899	5.3	932.2	109	
3	0.02	0.0004897	4.4	805.2	228	
4	0.02	0.0004118	3.7	695.9	550	
5	0.02	0.000345	3.1	589.6	618	
6	0.02	0.0003005	2.7	498.9	628	
7	0.02	0.000256	2.3	353.4	957	
8	0.02	0.0002226	2	289.3	1051	
Nr.Crt	debit aer kg/s	debit 40%CH <sub>4</sub> +60%H <sub>2</sub> kg/s (cu factor de corectie)	debit 40%CH <sub>4</sub> +60%H <sub>2</sub> masurat Nm <sup>3</sup> /h	Temperatura °C	CO ppm	T stingere °C
1	0.02	0.0006821	8	1062.9	14	330
2	0.02	0.0004945	5.8	869	54	
3	0.02	0.0004178	4.9	766.7	92	

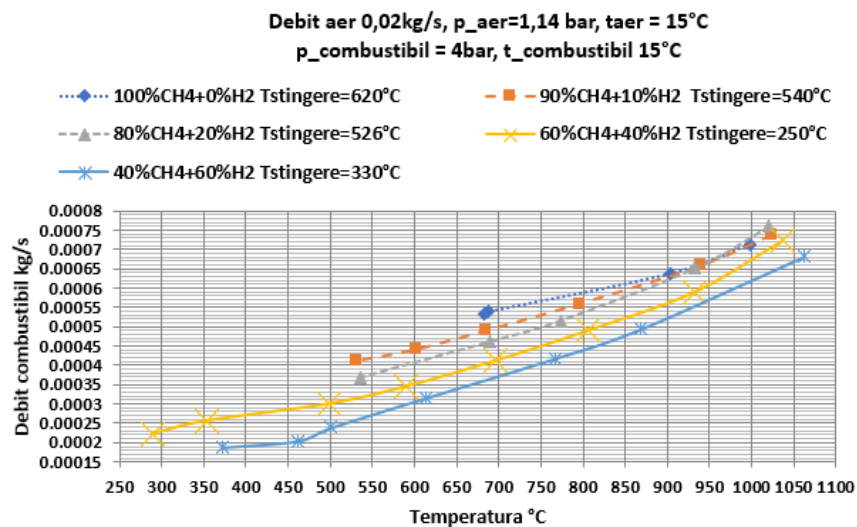


Figura 2.3- Valorile debitelor de combustibil în raport cu temperatura flăcării

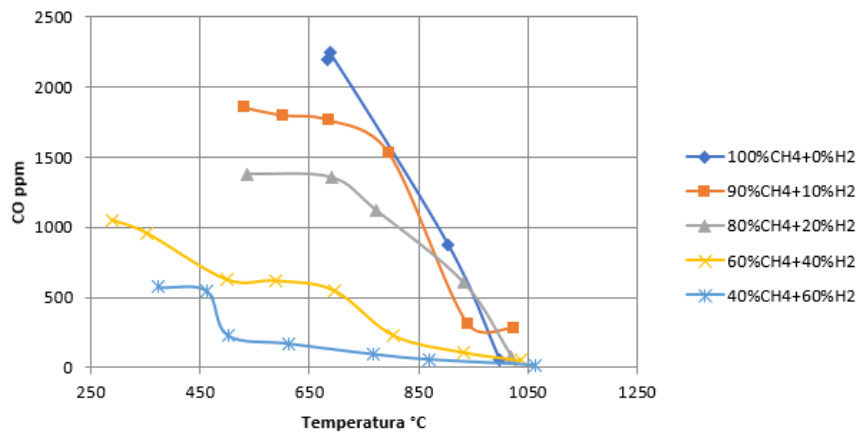


Figura 2.4- Variația concentrației de monoxid de carbon cu temperatura.

Debit aer=0,02kg/s la T=15°C - 113,1 dB

Debit aer=0,02 kg/s+Debit CH4=0,0007125kg/s - 113,4 dB (fără ardere)

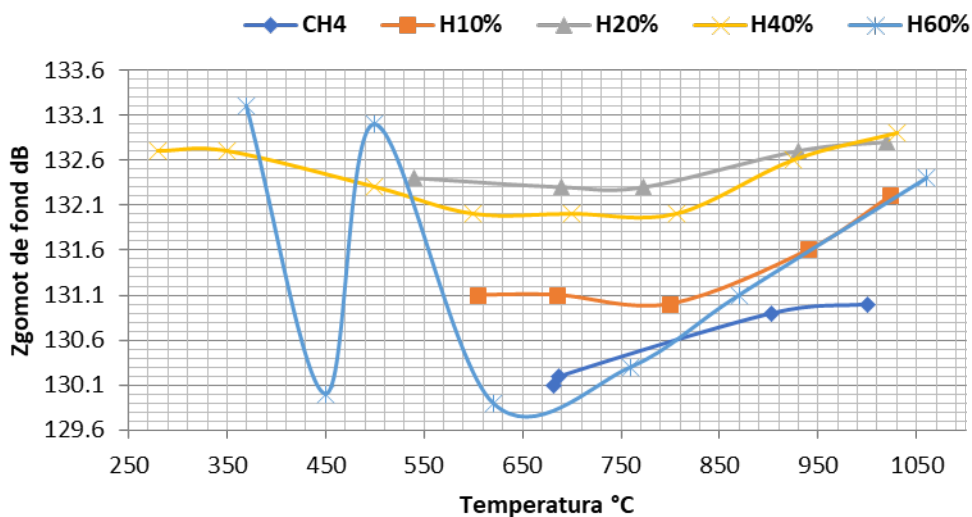


Figura 2.5- Zgomot de fond

Semnalele acustice au fost captate utilizând un sistem de achiziție multicanal Sirius, furnizat de Dewesoft. În următoarea imagine sunt prezentate analizele spectrale în domeniul frecvență corespunzătoare zgomotului produs doar de circulația fluxului de aer rece în comparație cu zgomotul produs de fluxul de aer rece și gaz metan. Se observă ca introducerea de CH<sub>4</sub> conduce la creșterea zgomotului la frecvențe medii și înalte lucru produs de jetul turbulent de CH<sub>4</sub>. Din punct de vedere al nivelului de zgomot global, aportul metanului conduce la creșterea acestuia doar cu 0,3dB nivel măsurat în interiorul camerei de ardere. Din analiza spectrală a semnalului măsurat în afara camerei de ardere se poate observa la frecvența de 24Hz o componentă spectrală ce provine de la funcționarea ventilatorului și corespunde turăției acestuia de funcționare.

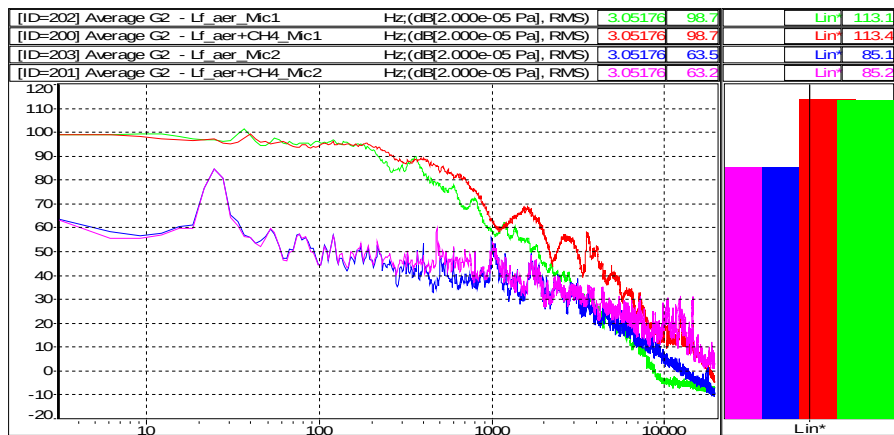


Figura 2.6- Zgomot produs în curgerea aerului în comparație cu cea a aerului+CH<sub>4</sub> fără ardere

În analiza spectrală ce este prezentată în continuare este evidențiat zgomotul ce apare în momentul combustiei metanului, unde se observă o creștere a nivelului global de zgomot de 16,7dB.

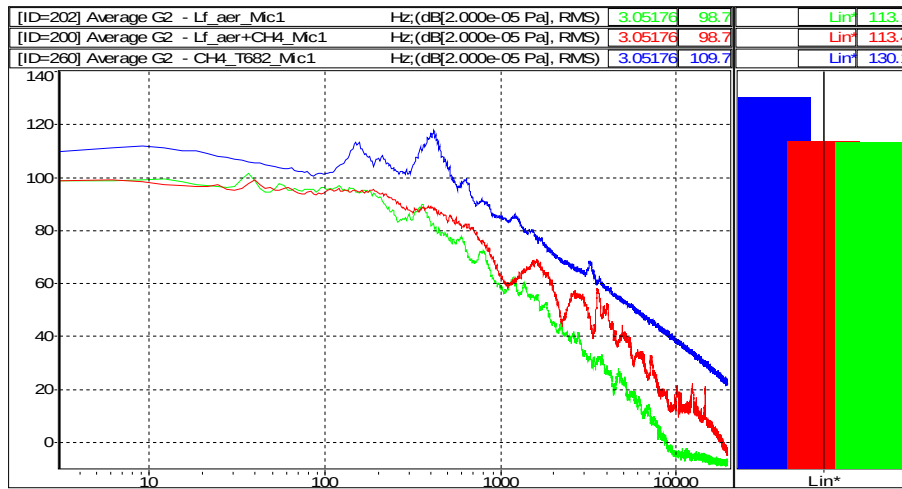


Figura 2.7- Zgomot produs în interiorul tubului de cuarț în cazul curgerii aerului, aer+metan (rece), aer+metan (ardere cu temperatura la evacuare de 882°C)

### 2.3 Soluții tehnice pentru diminuarea zgomotului

Pentru a atenua zgomotul produs în timpul arderii amestecurilor de hidrogen și metan, au fost propuse și testate mai multe soluții tehnice. Una dintre cele mai eficiente metode a fost utilizarea unui disc de cupru poros (Fig 2.8), amplasat în fața turbionatorului. Acest disc acționează ca un filtru acustic care disipă o parte din energia acustică produsă de ardere. Testele au demonstrat că acest disc reduce în mod semnificativ zgomotul, în special în zonele în care frecvențele acustice sunt cele mai ridicate.

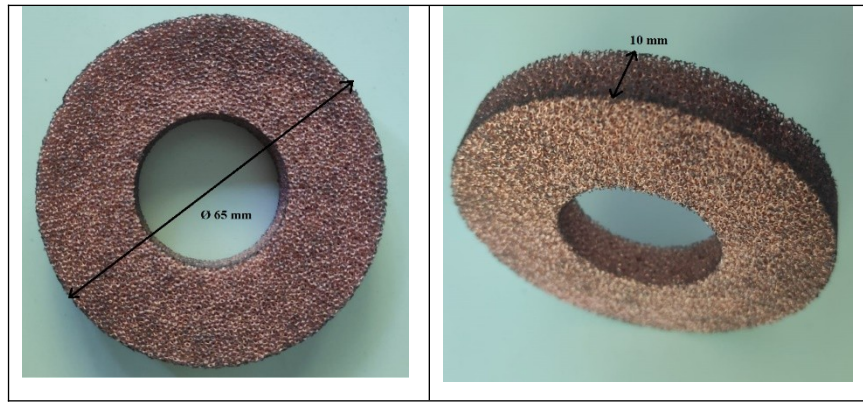


Figura 2.8- Disc de cupru cu diametrul porilor variind în jurul valorii de 0.5mm cu o densitate a porilor de 60 pori/inch (echivalență = 81% porozitate).

Pe lângă discurile de cupru, au fost experimentate și alte soluții, cum ar fi adăugarea unui jet axial pentru alimentarea flăcării (difuzive) și modificarea geometriei camerei de ardere pentru a optimiza distribuția aerului și a combustibilului. În special, configurațiile care includ o repartitie modificată a aerului au permis reducerea fenomenelor acustice periculoase și au contribuit la creșterea stabilității flăcării în condiții de funcționare cu amestecuri de combustibil bogate în hidrogen.



Figura 2.9- Turbionatorul cu orificiul central de 2 mm în diametru pentru injecția de combustibil în incinta de ardere.

În graficul prezentat în continuare sunt expuse spectrele semnalelor acustice măsurate în ambele puncte pentru 20%. Pentru verificarea stabilității standului și a zgomotului generat au fost efectuate două sesiuni de testare cu H<sub>2</sub>0% menținându-se aceleași praguri termice. În cadrul testelor la 1020 °C variația nivelului de presiune acustică în punctul de măsurare în zona rece este de 0.5dB iar pentru zona caldă este de 0.1dB.

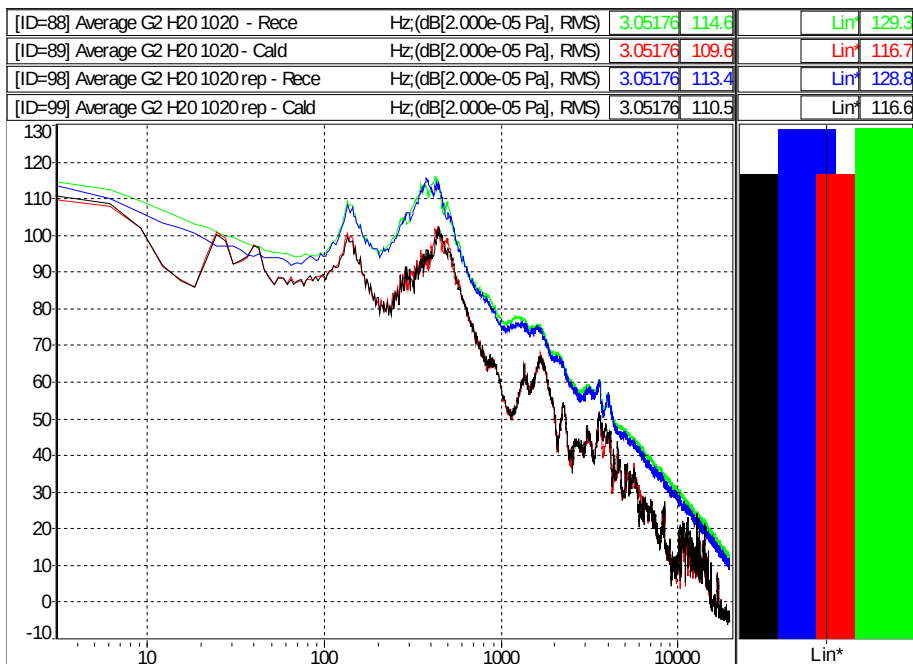


Figura 2.10- Variația zgomotului în cazul arderii 80%CH<sub>4</sub>+20%H<sub>2</sub> pentru 1020°C la evacuare



Figura 2.11- Variația zgomotului în cazul arderii 80%CH<sub>4</sub>+20%H<sub>2</sub> pentru 930°C la evacuare

Tabel 2.2 Rezultate măsurători acustice

Procent volumic hidrogen+metan	Temperatura °C	Turbionator fără injecție axială	Turbionator cu injecție axială	Turbionator cu injecție axială și disc de cupru
		Nivel presiune acustică dB		
20%H <sub>2</sub> + 80% CH <sub>4</sub>	1020	132,8	131,2	117,9
	770	132,3	128,3	114,1
	536	132,4	127,5	113,4
40%H <sub>2</sub> +60% CH <sub>4</sub>	1031	132,9	127,5	115,5
	801	132	126,9	114,4
	584	132	127,1	114,1
60%H <sub>2</sub> +40% CH <sub>4</sub>	1061	132,4	129,5	116,1
	776	136,1	129,9	129,5
	500	135,3	133	127,5

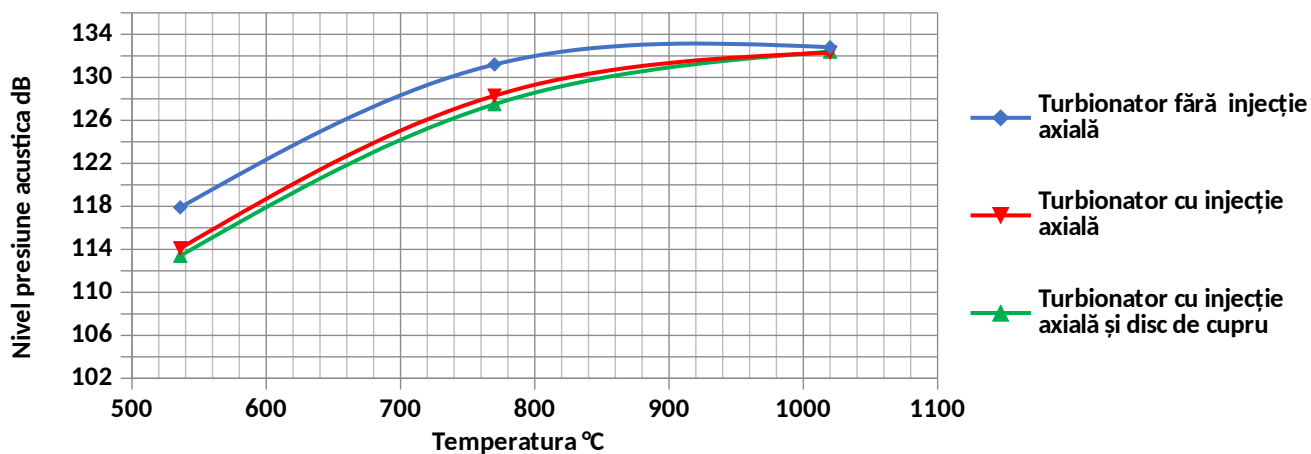


Figura 2.12- Valorile comparative ale sesiunii 1(albastru) cu cele din sesiunea 2 (roșu și verde).

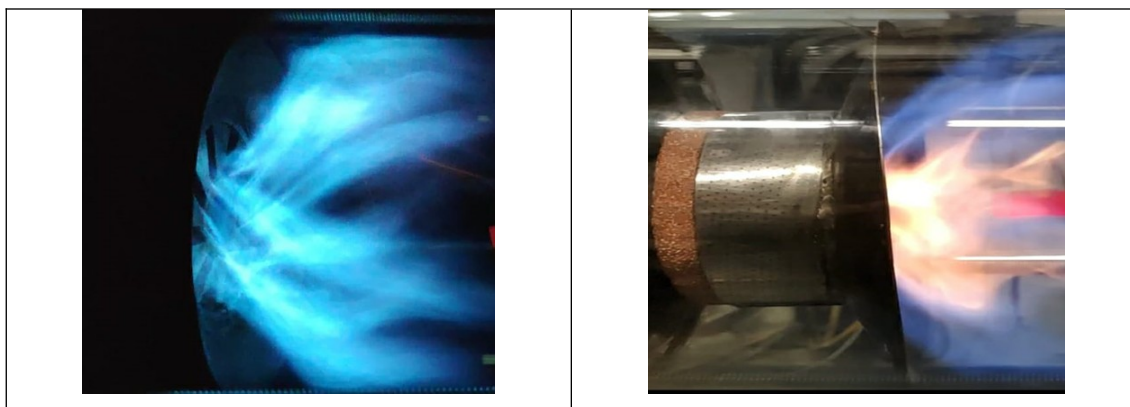


Figura 2.13- Flacăra turbulentă prima sesiune de teste (stânga), a doua sesiune de testare (dreapta)

## 2.4 Analiza parametrilor termici și a emisiilor

Temperatura flăcării și emisiile de CO au fost monitorizate pe parcursul campaniei 1 pentru a evalua eficiența combustiei și impactul ecologic al amestecurilor. Un rezultat important al studiului este că amestecurile cu o proporție mai mare de hidrogen generează emisii de CO cu valori mai scăzute pe măsură ce crește concentrația de hidrogen.

De asemenea, s-a observat că, în general, emisiile de CO cresc semnificativ atunci când arderea are loc în condiții de deficiență de oxigen în zona de reacție sau când amestecurile sunt mai bogate în metan. În aceste condiții, procesul de oxidare incompletă a metanului favorizează formarea monoxidului de carbon.

## 2.4.1 Instalația de testare folosită (campania 2)

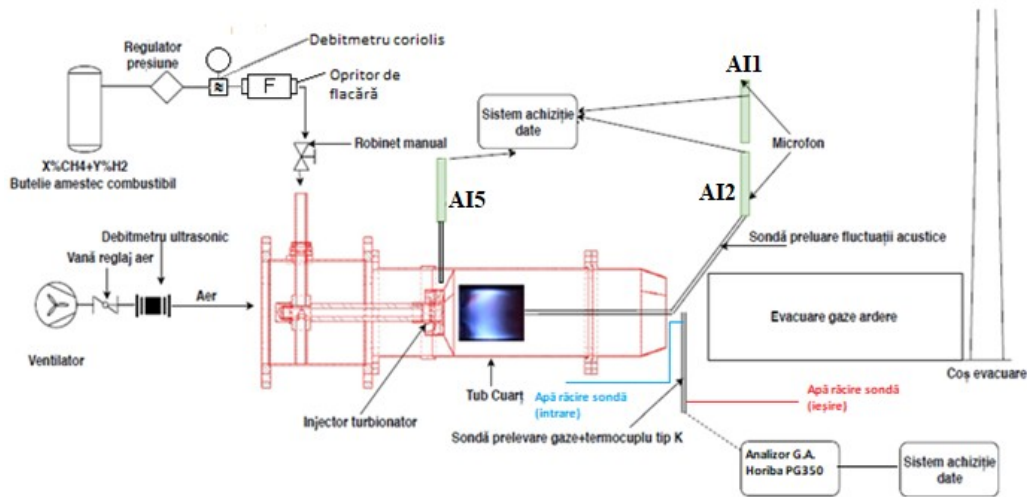


Figura 2.3 - Standul experimental campania 2 de testare

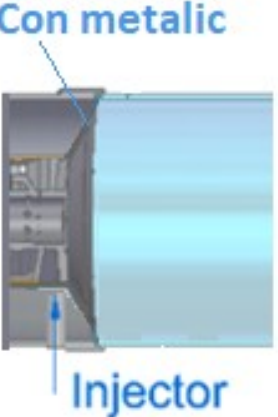
## 2.4.2 Descrierea instalației de testare (campania 2)

Analiza gazelor de ardere s-a realizat cu un sistem produs de HORIBA, model PG350, prin care au fost înregistrate emisiile de NO, CO și CO<sub>2</sub>, cât și concentrația de O<sub>2</sub>, la interval de o secundă pe parcursul fiecărei etape de testare. Sistemul de măsurare portabil constă dintr-o sondă portabilă (PSP-4000H), o linie încălzită, un sistem de prelevare a probelor de gaz (PSS-5H) și PG-350 ca analizor de gaz.

## 2.4.3 Configurații de testare

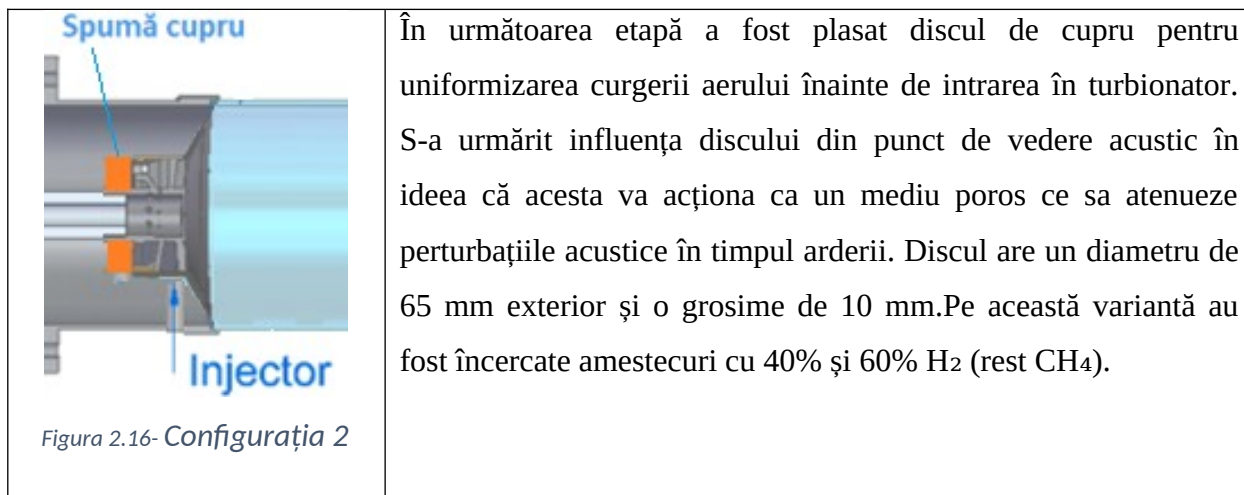
Testele au fost realizate folosind patru configurații ale sistemului de injecție și amestec al combustibilului cu aerul în volumul de testare, fiecare având scopul de a îmbunătăți distribuția aerului și a combustibilului, stabilitatea arderii și performanțele acustice. Cele patru configurații testate au fost:

### 2.4.3.1 Configurația 1 [C1] (Fără sită de cupru):

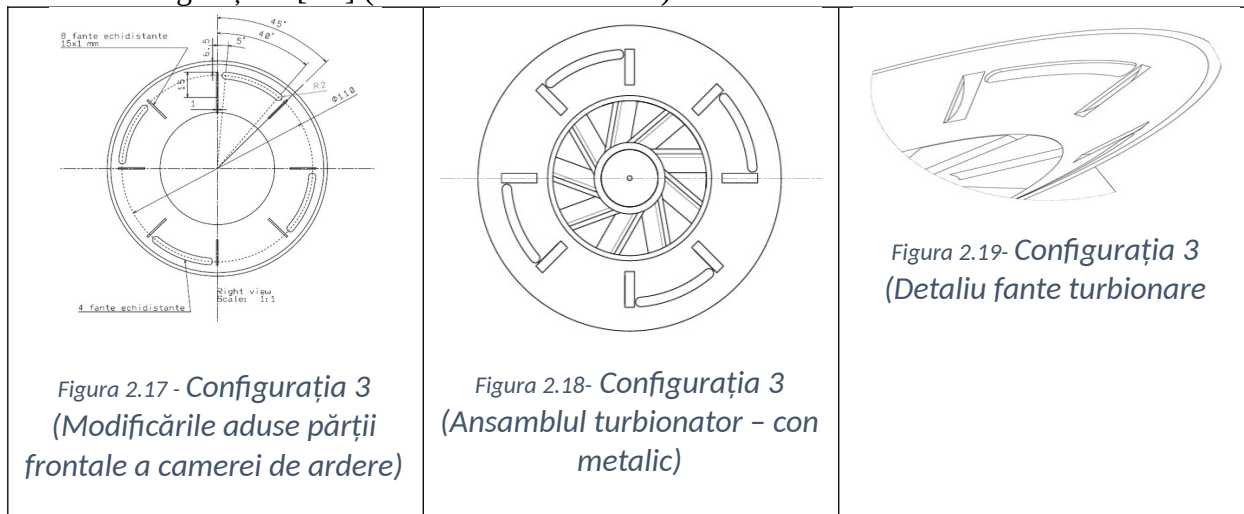
 <p>Figura 2.15- Configurația 1</p>	<p>În această configurație experimentală, conul metalic a fost executat din tablă neperforată de 0,6 mm grosime din oțel inoxidabil refractar SAE 310S care este sudat de tronsonul de susținere al tubului de cuarț. Tot aerul va trece strict printre paletele turbionatorului, astfel evitându-se problemele de etanșitate la interfața metal-cuarț. De asemenea gradul de turbionare va fi sporit în volumul de ardere, din cauza vitezelor mai mari de curgere</p>
--	---

### 2.4.3.2 Configurația 2 [C2] (Cu sită de cupru):





### 2.4.3.3 Configurația 3 [C3] (Cu fante de turbionare)



În urma observațiilor cu privire la influența jeturilor de aer și combustibil, abordate din punct de vedere al unor simulări numerice, etapă premergătoare acestui studiu, s-a constatat necesitatea unei repartiții modificate a aerului datorită constatării că simpla camera cu preamestec și turbionare [Brevet RO 131144] nu a putut depăși concentrația de 60% H<sub>2</sub> în amestecul combustibil din cauza zgomotului produs care poate deveni distructiv pentru întregul ansamblu. Astfel, a apărut ideea, pusă în practică, executată și experimentată, de a transforma camera inițială în „camera de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară” [Brevet RO 137923]. Pe această variantă au fost încercate amestecuri cu 60%, 80% și 100% H<sub>2</sub> (rest CH<sub>4</sub>).

### 2.4.3.4 Configurația 4 [C4] (Cu fante de turbionare și sită de cupru)

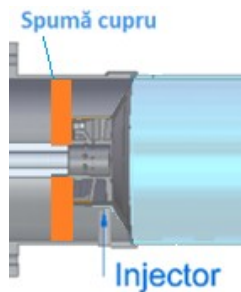


Figura 2.20- Configurația 4



Figura 2.4- Configurația 4

Plecând de la soluția constructivă prezentată anterior (configurația 3), s-a executat și pentru această configurație un disc de cupru cu diametrul exterior de 124 mm, grosime 10 mm, astfel încât să poată fi folosit pe întreaga suprafață de trecere a aerului înspre zona primară atât printre paletele turbionatorului cât și prin fantele executate pe conul de tablă.

## 2.4.4 Analiza de gaze de ardere și spectrele audio

### 2.4.4.1 Înregistrări campanie experimentală cu 60%CH<sub>4</sub>+40%H<sub>2</sub>:

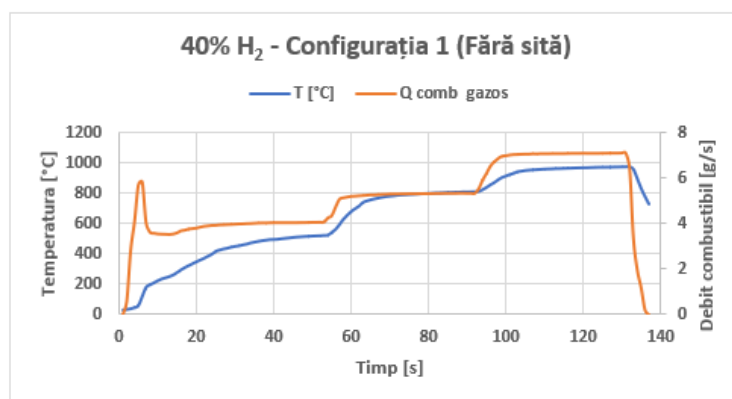


Figura 2.22- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 1 la 40%H<sub>2</sub> în amestec

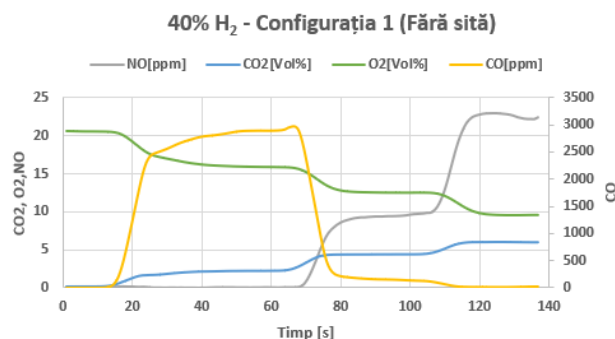


Figura 2.5- Variația în timpul experimentărilor a NO, CO, CO și O<sub>2</sub>, pentru configurația de testare numărul 1 la 40%H<sub>2</sub> în amestec

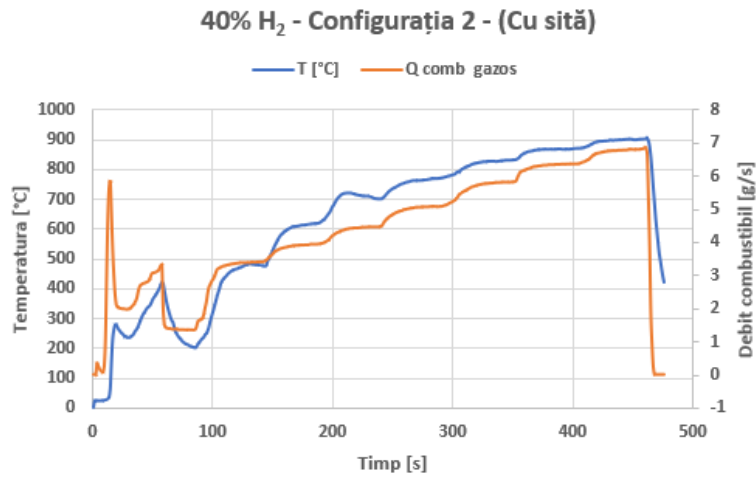


Figura 2.24- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 2 la 40% $H_2$  în amestec

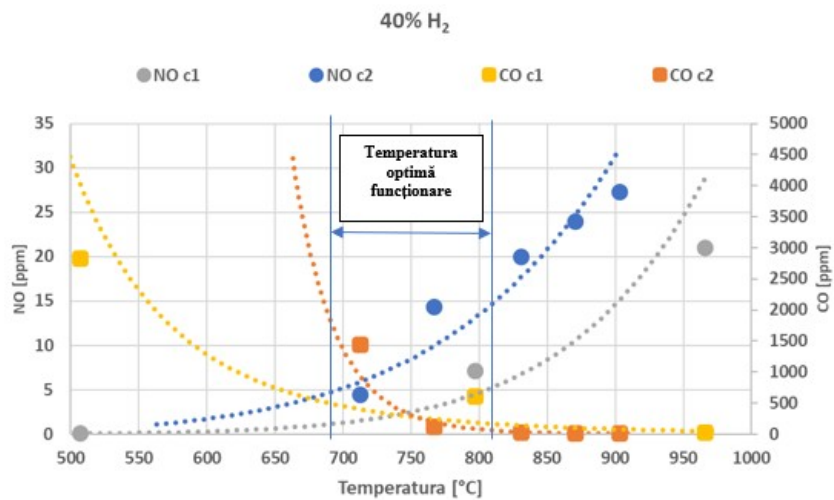


Figura 2.25- Comparație între configurația 1 (fără sită de cupru) și configurația 2 (cu sită de cupru) pentru 40% $H_2$  în amestec

Pentru configurația 1 (fără sită de cupru) punctul de intersecție dintre curba emisiilor de CO și cea de NO este situat pe abscisă la 750°C. Pentru configurația 2 (cu sită de cupru) punctul de intersecție dintre curba emisiilor de CO și cea de NO este situat pe abscisă la 715°C. Există o ușoară tendință de creștere a valorilor emisiilor de NO pentru configurația 2. În ceea ce privește emisiile de CO nu sunt diferențe notabile între cele două configurații, ambele înregistrând valori de ordinul sutelor până la ordinul miilor de unități [ppm], un bun indicator al unui randament de ardere departe de ideal. Proporția volumetrică mică de hidrogen (40%), tradusă în participare masică de 7,7 % favorizează pentru atingerea acestor praguri de temperatură la un debit de 0,02 kg/s aer, emisii mari de CO, datorat conținutului mare de carbon din amestecul combustibil în raport cu aerul disponibil pentru ardere.

## 2.4.4.2 Înregistrări campanie experimentală cu 40%CH<sub>4</sub>+60%H<sub>2</sub>

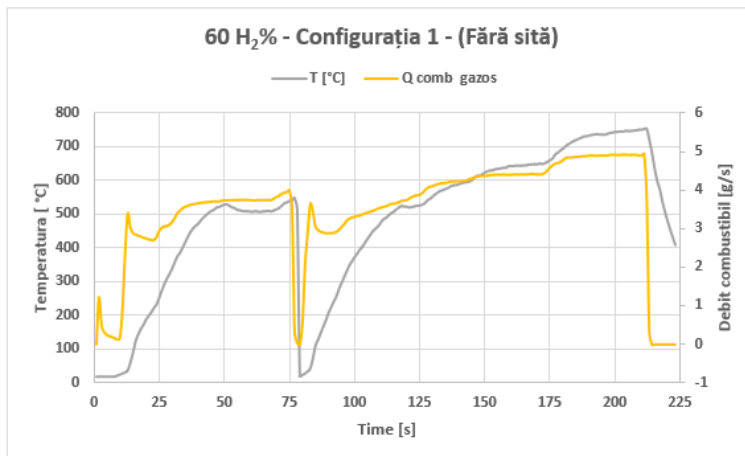


Figura 2.26- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația 1 de testare la 60%H<sub>2</sub> în amestec

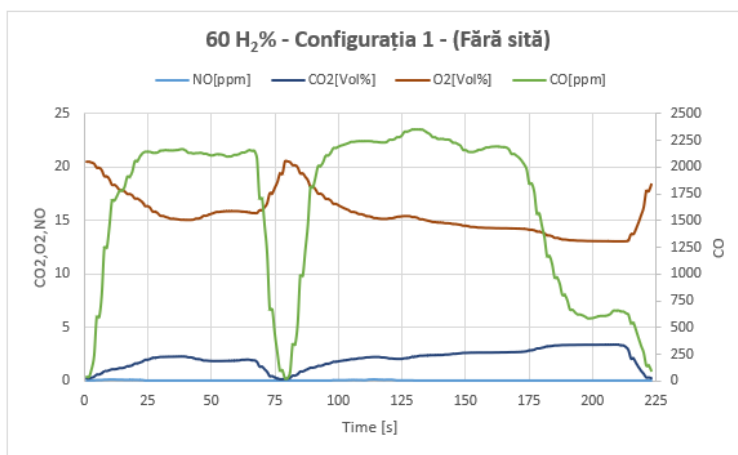


Figura 2.27- Variația în timpul experimentărilor a NO,CO,CO și O<sub>2</sub>, pentru configurația 1 de testare la 60%H<sub>2</sub> în amestec

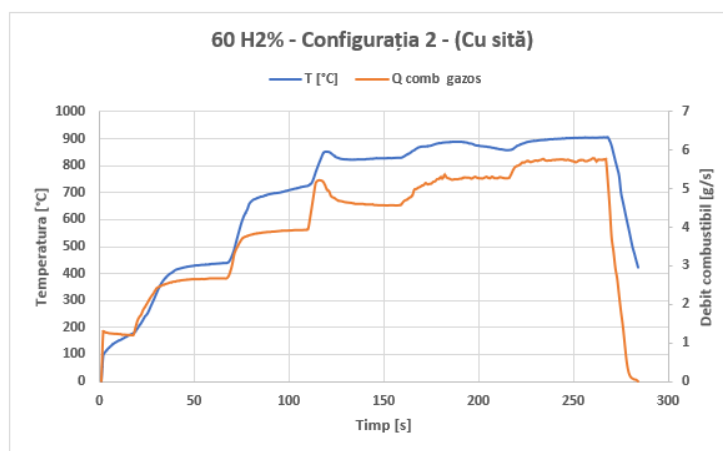


Figura 2.28- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația 1 de testare numărul 1 la 60%H<sub>2</sub> în amestec

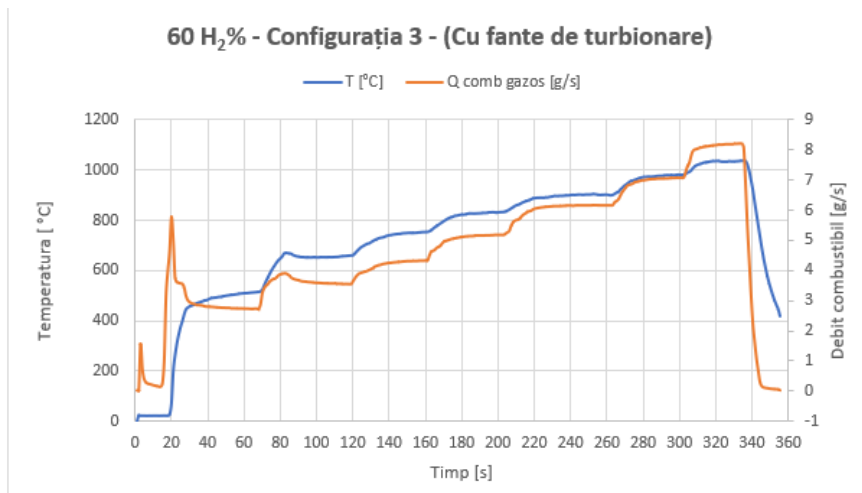


Figura 2.29-Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 3 la 60%H<sub>2</sub> în amestec

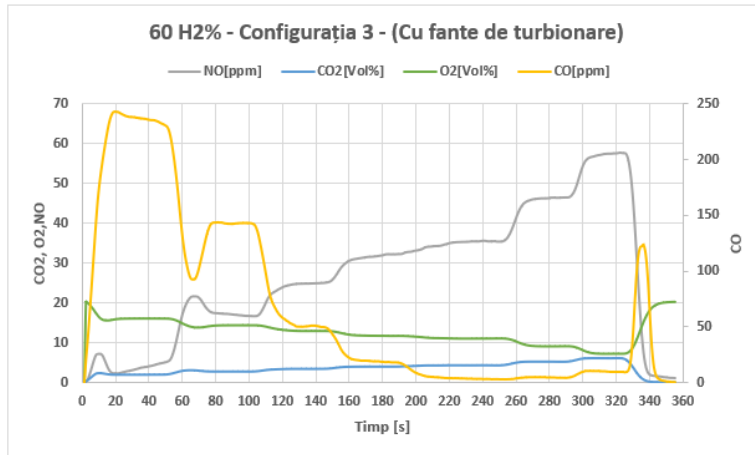


Figura 2.30-Variația în timpul experimentărilor a NO,CO,CO și O<sub>2</sub>, pentru configurația de testare numărul 3 la 60%H<sub>2</sub> în amestec

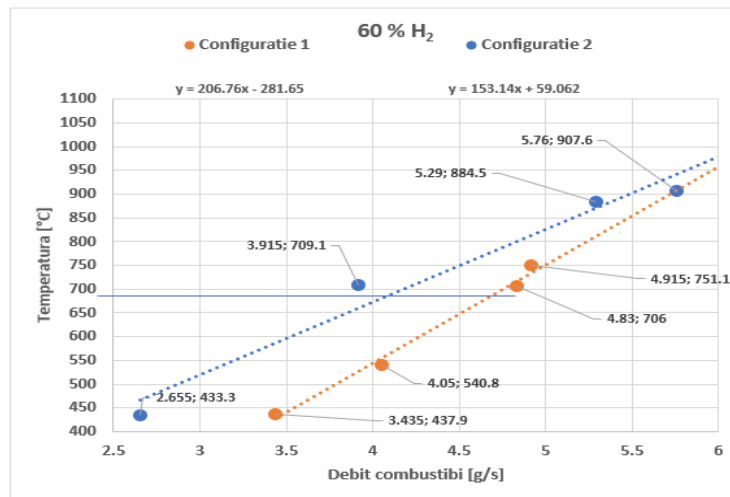


Figura 2.31- Comparație între evoluția temperaturilor pentru configurația 1 (fără sită de cupru) și configurația 2 (cu sită de cupru) la 60% H<sub>2</sub> în amestecul de combustibil

Variațiile debitului cu temperatura, în ambele configurații testate, sunt liniare și direct proporționale pentru un debit de aer de 0,02 kg/s. Utilizarea sitei de cupru în configurația 2 implică o diferență absolută procentuală de 26% față de configurația 1 în ceea ce privește panta graficului.

Cele două grafice aferente configurației 1 și 2 de testare au o tendință convergentă unul în raport cu celălalt, punctul de intersecție atingându-se conform tendinței evoluției liniare surprinse, peste temperatura maximă de testare înregistrată.

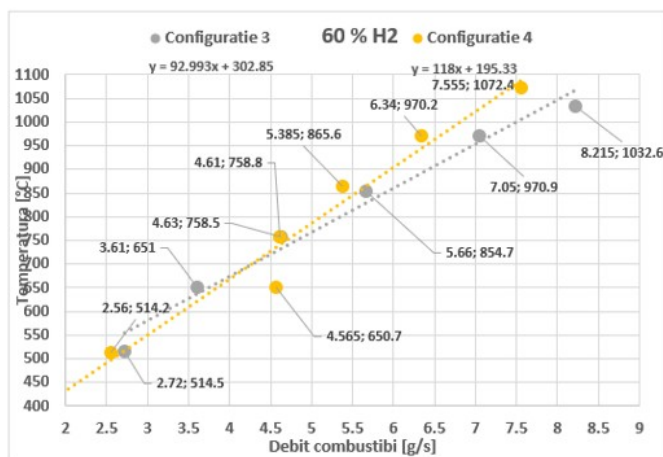


Figura 2.32- Comparare între evoluția temperaturilor pentru configurația 3 (cu fante de turbionare) și configurația 4 (cu fante de turbionare și sită de cupru) la 60% H<sub>2</sub> în amestecul de combustibil

Variațiile debitului cu temperatura, în ambele configurații testate, sunt liniare și direct proporționale pentru un debit de aer de 0,02 kg/s. Utilizarea sitei de cupru în configurația 4 implică o diferență absolută procentuală de 26% față de configurația 3 în ceea ce privește panta graficului.

Cele două grafice aferente configurației 2 și 4 de testare au o tendință similară unul în raport cu celălalt, convergența atingându-se conform tendinței evoluției liniare surprinse, în jurul temperaturii de 750°C. Spre deosebire de configurația 1, unde temperatura maximă până la care s-a încercat testarea pe stand a fost de aproximativ 750 °C (fapt datorat zgomotului prea puternic), în configurațiile 3 și 4, temperatura de evacuare a atins praguri de 1032°C, respectiv 1072 °C, în condiții de siguranță, din punct de vedere al zgomotului inițial identificat. Debiturile înregistrate nu sunt cu mult diferite pentru cele 2 configurații, astfel diferențele sunt date doar de parametrii de stare ai aerului ambiental.

### 2.4.4.3 Înregistrări campanie experimentală cu 20%CH<sub>4</sub>+80%H<sub>2</sub>

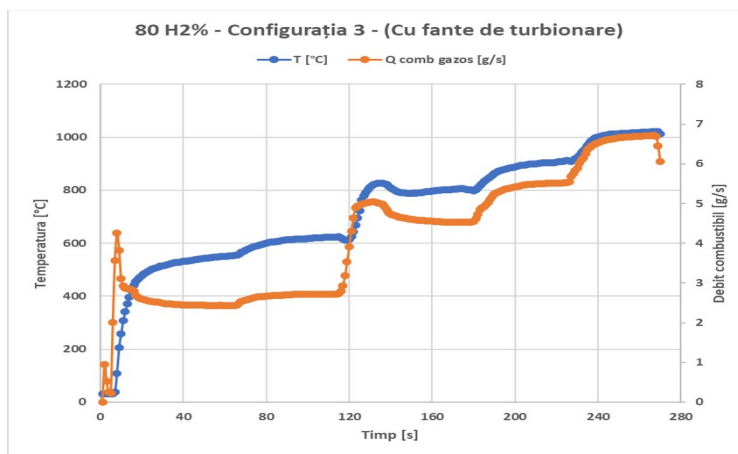


Figura 2.33- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 3 la 80%H<sub>2</sub> în amestec

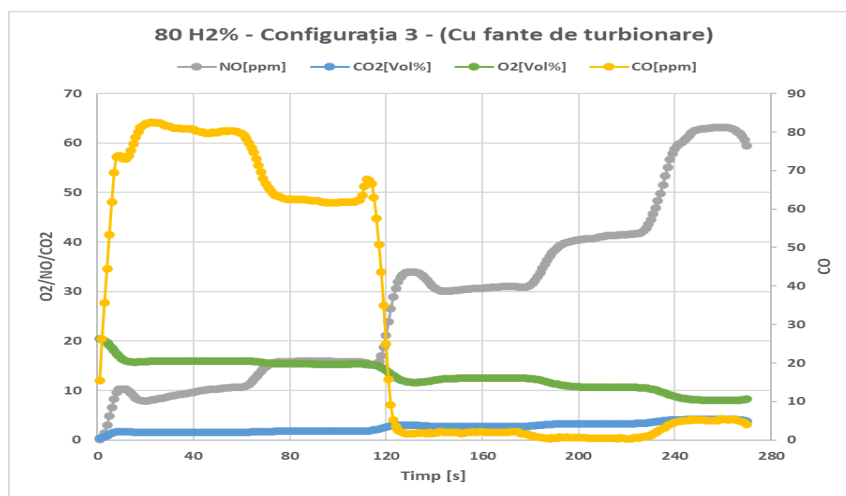


Figura 2.34- Variația în timpul experimentărilor a NO,CO,CO și O<sub>2</sub>, pentru configurația de testare numărul 3 la 80%H<sub>2</sub> în amestec

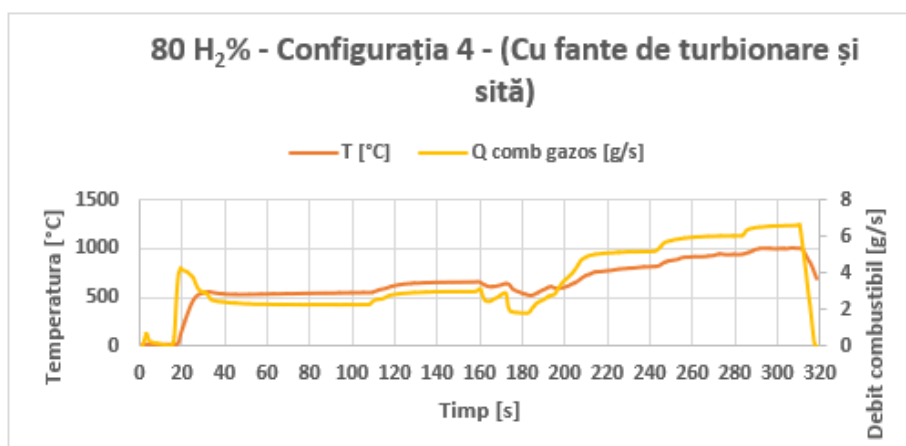


Figura 2.35- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 4 la 80%H<sub>2</sub> în amestec

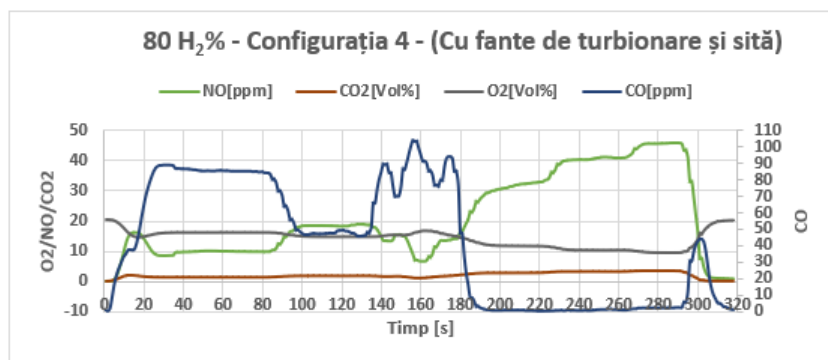


Figura 2.36- Variația în timpul experimentărilor a NO,CO,CO și O2, pentru configurația de testare numărul 4 la 80%H<sub>2</sub> în amestec

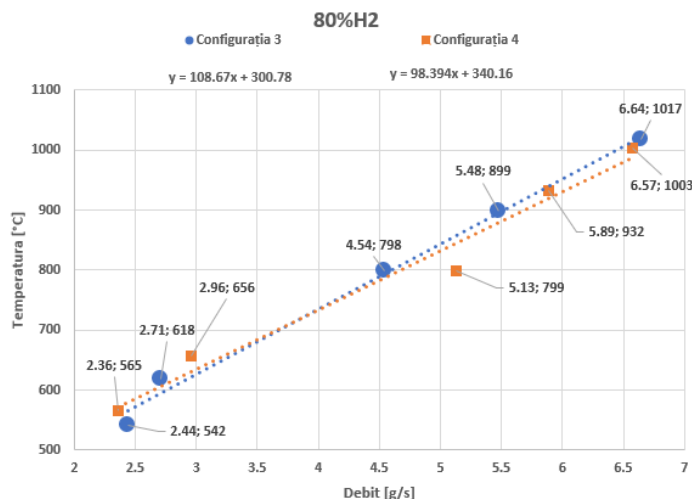


Figura 2.37- Comparație între evoluția temperaturilor pentru configurația 1 (fără sită de cupru) și configurația 2 (cu sită de cupru) la 60% H<sub>2</sub> în amestecul de combustibil

În Fig. 2.37 se pot observa următoarele aspecte: Variațiile debitului cu temperatura, în ambele configurații testate, sunt liniare și direct proporționale pentru un debit de aer de 0,02 kg/s. Utilizarea sitei de cupru în configurația 2 implică o diferență absolută procentuală de 9,25% față de configurația 1 în ceea ce privește panta graficului. Nu sunt observate diferențe notabile între cele două configurații testate din punct de vedere al debitelor de combustibil utilizate pentru atingerea temperaturilor în punctul de măsură. În Fig. 2.38 se pot observa următoarele aspecte: Evoluțiile emisiilor de NO și CO sunt similare pentru ambele configurații testate cu diferențe insignifiante pentru aceleași praguri de temperatură. Datorită conținutului de carbon din amestecul combustibil (66% CH<sub>4</sub> masic) emisiile de monoxid de carbon au valori de ordinul zecilor, exprimate în unități [ppm], spre deosebire de amestecurile cu 40% respectiv 60% H<sub>2</sub> (rest CH<sub>4</sub>).



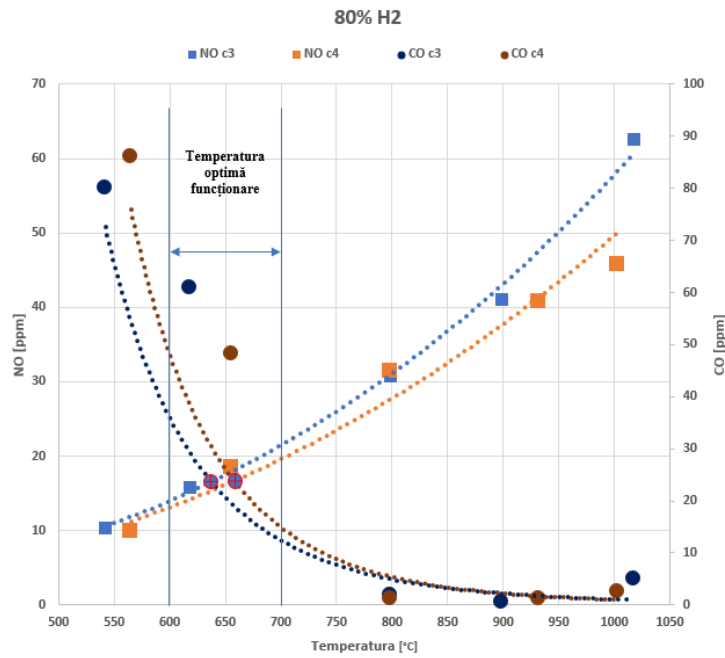


Figura 2.38- Evoluția emisiilor de NO și CO în configurațiile de testare 3 (cu fante de turbionare) și 4 (cu fante de turbionare și sită de cupru)

#### 2.4.4.4 Înregistrări campanie experimentală cu 100% H<sub>2</sub>:

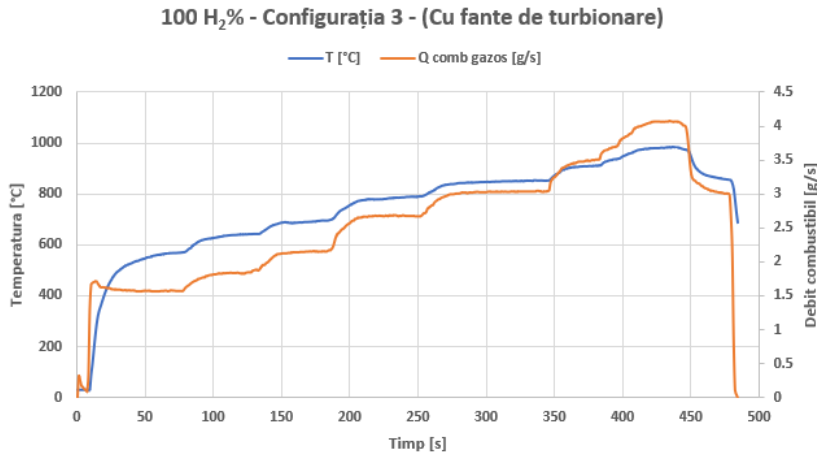


Figura 2.39- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 3 la 100% H<sub>2</sub>

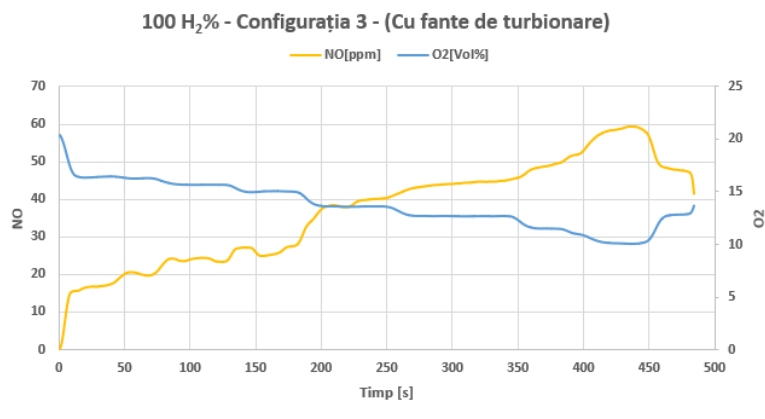


Figura 2.40- Variația în timpul experimentărilor a NO,CO,CO și O2, pentru configurația de testare numărul 3 la 100%H2

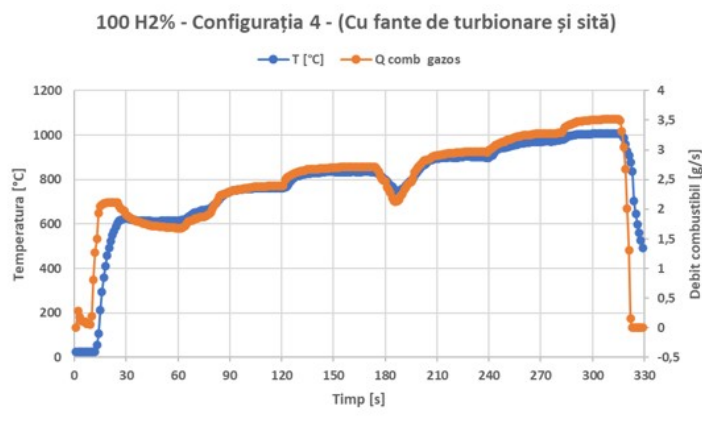


Figura 2.41- Variația în timpul experimentărilor a temperaturii și a debitului de combustibil pentru configurația de testare numărul 4 la 100%H2 în amestec

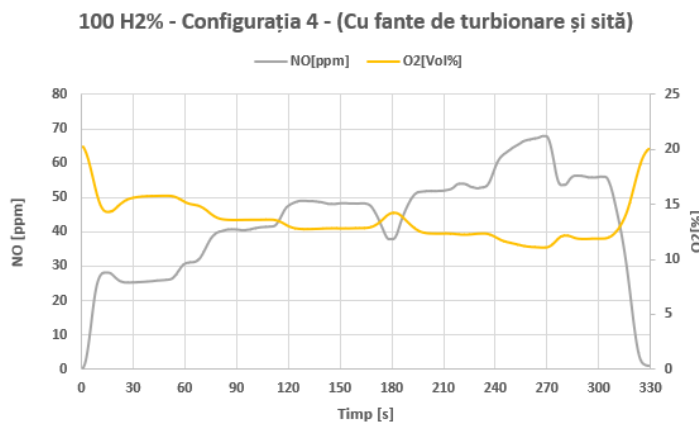


Figura 2.42- Variația în timpul experimentărilor a NO și O2, pentru configurația de testare numărul 4 la 100%H2 în amestec

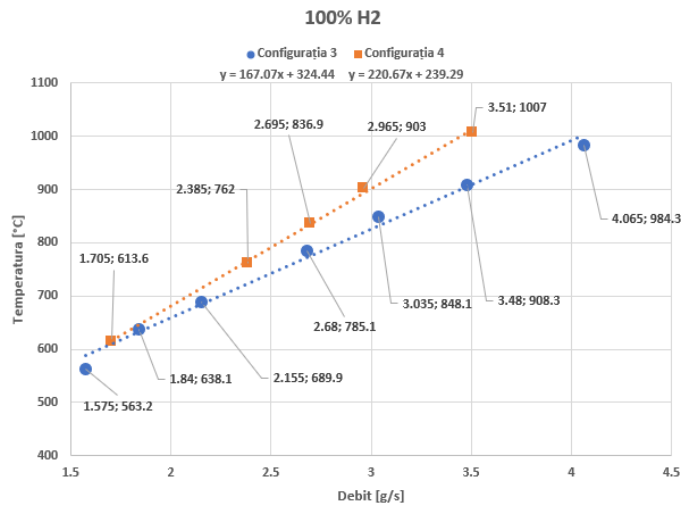


Figura 2.43- Comparație între evoluția temperaturilor pentru configurația 3 (cu fante de turbionare) și configurația 4 (cu fante de turbionare și sită de cupru) la 100% H<sub>2</sub> în amestecul de combustibil

În Fig. 2.43 se pot observa următoarele aspecte: Variațiile debitului cu temperatura, în ambele configurații testate, sunt liniare și direct proporționale pentru un debit de aer de 0,02 kg/s. Utilizarea sitei de cupru, implică o diferență absolută procentuală de 24% față de configurația 1 în ceea ce privește panta graficului. Diferențele între temperaturile măsurate pentru aceleași debite de combustibil vehiculate sunt cu variații de la 50 până la 100°C, o ușoară tendință crescută fiind în cazul configurației 4.

#### 2.4.4.5 Determinări acustice pe instalația experimentală.

În primă etapă s-a identificat influența geometriei asupra curgerii nereactive pentru care s-a determinat nivelul de zgomot emis de sursă la un debit de 0.02 kg/s aer vehiculat prin instalația experimentală. Este important faptul ca în condiții de curgere fără ardere în spectrul microfonului 2 se observă un vârf la frecvența de 317 Hz și 451 Hz ceea ce semnifică faptul că la aceste frecvențe sunt excitate la rândul lor de câteva frecvențe de rezonanță ale tubului de cuarț (vezi detaliul **a Fig. 2.44**) și ale tronsonului de conductă de furnizare a aerului către tronsonul experimental (vezi detaliul **b Fig. 2.44**).

Din cauză că în acest caz este implicată doar curgerea aerului cu un grad de turbulență redus care produce un zgomot diminuat (în comparație cu o curgere reactivă), aceste frecvențe de rezonanță ale tubului au amplitudini mici.

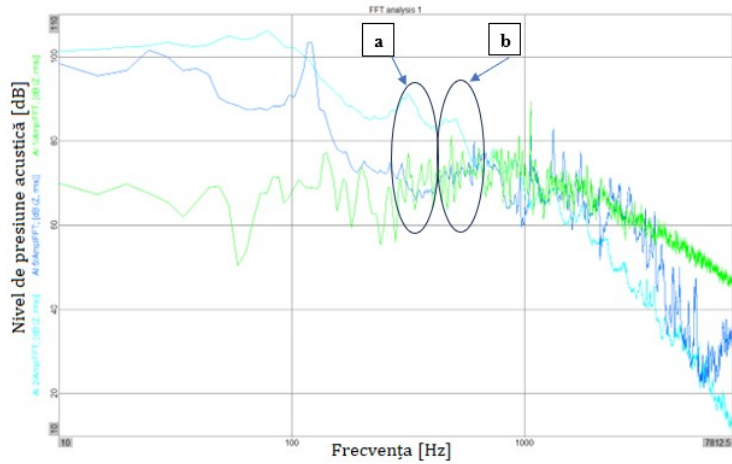


Figura 2.44- Curgere nereactivă (doar aer) cu reprezentarea frecvenței - Hz pe abscisă și a nivelului de presiune acustică - dB în ordonată

În cazul de față, se consideră viteza sunetului 340 m/s pentru o temperatură de 15°C iar pentru valorile frecvențelor prezentate, respectiv:  $f_1=317 \text{ Hz}$ ;  $f_2=451 \text{ Hz}$ , rezultă  $L_1=0,562 \text{ m}$ ;  $L_2=0,376 \text{ m}$ . Acest fapt confirmă influența tubului de cuarț și a întregii instalații de testare așa cum a fost prezentată în Figura 2.14 în generarea de unde acustice de presiune ce vor fi amplificate în momentul apariției unor gradienti de temperatură la pereți în cazul arderii combustibilului în volumul mărginit de aceștia.

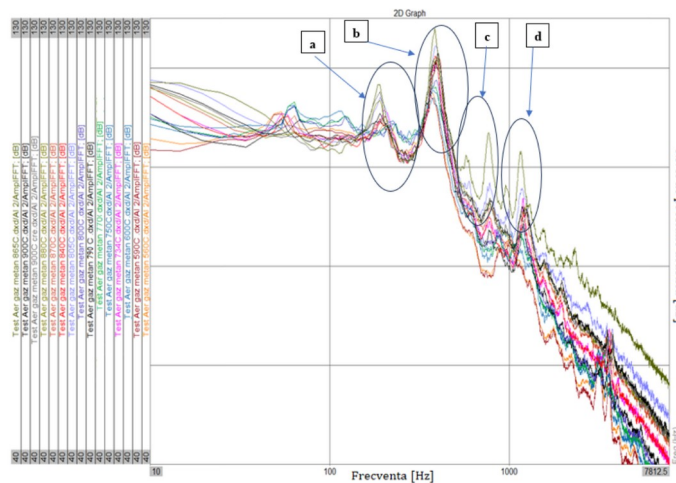


Figura 2.45- Analiza spectrală pentru curgerea reactivă (CH<sub>4</sub>) ale datelor înregistrate cu microfonul AI2 pentru configurația 1 de testare

Se observă următoarele în Fig. 2.45: Apariția unei componente spectrale la 190 Hz doar la temperaturi mari (>800°C) care este de fapt frecvența fundamentală - (vezi **a**). Aceeași componentă spectrală apare la 385 Hz care reprezintă prima armonică și are amplitudini mai mari în situația curgerii reactive (arderii CH<sub>4</sub>) - (vezi **b**). Această componentă are a 2-a și a 3-a armonică la 524 Hz respectiv 771 Hz, temperatura conduce la creșterea amplitudinii - (vezi **c**). A patra armonică corespunde unei frecvențe de 1166 Hz, peste această valoare armonicile nu mai

prezintă interes - (vezi **d**). În Fig. 2.46, ce este prezentată în cele ce urmează se sunt comparate spectrele acustice pentru arderea unui amestec de 80% CH<sub>4</sub> îmbogățit cu 20% H<sub>2</sub> la diferite regimuri de temperaturi de funcționare. Separat, sunt prezentate în figura SADASD, spectrele acustice pentru arderea amestecurilor: 60% CH<sub>4</sub> îmbogățit cu 40% H<sub>2</sub>, respectiv 40% CH<sub>4</sub> îmbogățit cu 60% H<sub>2</sub>. Pe baza analizei cazului Fig. 2.46 s-au remarcat următoarele aspecte: Arderea unui amestec cu 20% H<sub>2</sub> (volumic) conduce la generarea unui ton puternic cu frecvența fundamentală între 209-239 Hz - (vezi **a**), Prima armonică a acestui spectru apare la 412 Hz – (vezi **b**), A doua armonică și a treia armonică apar la 512 Hz, respectiv 625 Hz - (vezi **c**),

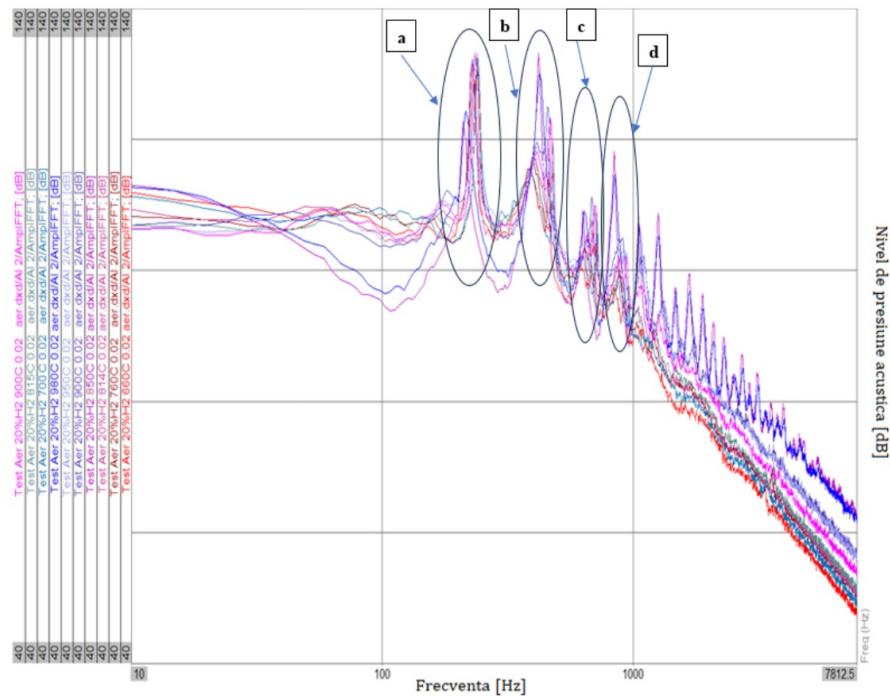


Figura 2.46-. Analiza spectrală pentru curgerea reactivă (80%CH<sub>4</sub>+20%H<sub>2</sub>) ale datelor înregistrate cu microfonul AI2 pentru configurația 1 de testare

Pe baza analizei Fig. 2.47 s-au remarcat următoarele aspecte: Pe măsură ce concentrația volumică de H<sub>2</sub> a crescut, spectrul a fost puternic alterat. Arderea unor amestecuri cu 40% respectiv 60% H<sub>2</sub> (volumic) conduce la generarea de tonuri puternice cu *frecvențele fundamentale* ce variază între 288-361 Hz restul fiind armonici – (vezi **a**), Vârfulurile graficelor spectrelor pentru frecvențele aferente armonicilor de ordin 1 (**b**), 2 și 3(**c**), 4(**d**) au amplitudini diferite față de cele observate în analiza spectrală prezentată în Fig. 2.63. Apariția acestor armonici identificate la frecvențe mai mari nu a dus la o legătură directă și clară a motivului pentru care variația conținutului de hidrogen din amestec (dar și a temperaturii) alterează variația frecvențelor, însă tendința observată este ca fundamentală tonului să crească în frecvență odată cu varierea concentrației și temperaturii.

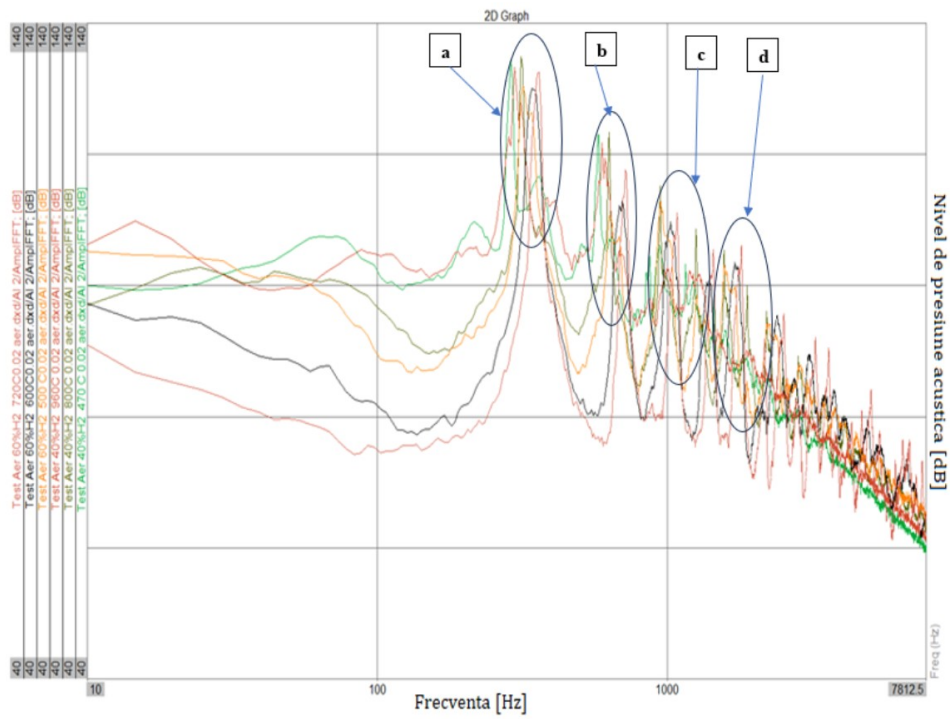


Figura 2.47- Analiza spectrală pentru curgerea reactivă ( $60\%CH_4+40\%H_2$  respectiv  $40\%CH_4+60\%H_2$ ) ale datelor înregistrate cu microfonul AI2 pentru configurația 1 de testare

#### 2.4.4.6 Determinări acustice în situația arderii gazului amestecurilor de gaz metan îmbogățite cu hidrogen pe instalația experimentală.

Din cauza zgomotului foarte puternic măsurat de către microfoanele 2 și 5, domeniul dinamic de măsurare al microfoanelor a fost depășit, sistemul intrând în „overload”. Astfel vârfurile semnalelor preluate de microfoanele 2 și 5 sunt trunchiate iar analiza în frecvență va indica amplitudini mai mici pe componentele spectrale decât cele percepute în realitate. Pentru observarea acestui fenomen, în imaginea următoare este prezentată forma de undă a unui semnal acustic care nu a depășit domeniul dinamic și forma de undă a unui semnal care a intrat în „overload”.

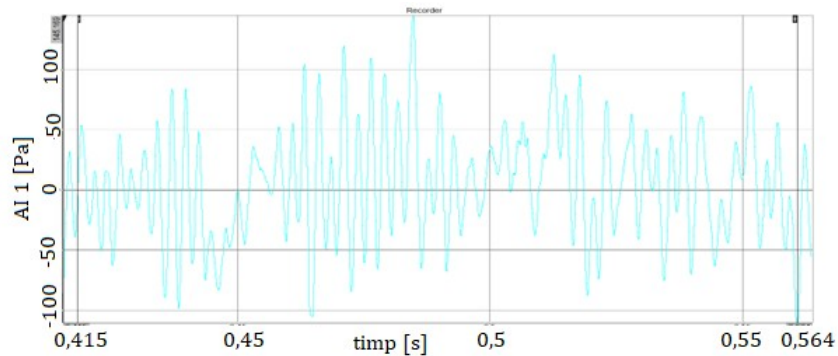


Figura 2.48- Exemplu de semnal corect

**Tabel 2.3 Datele experimentale pentru analiza acustică c1 și c2**

Configurația 1	Roșu	Temperatura	Temperatura medie	Microfon AI1		
				Fundamentala		Valoarea integrată
Configurația 2	Albăstru	[°C]	[°C]	Frecvențe [Hz]	Amplitudini [dB]	RMS [dB]
20	Plot 1	660	I 680	229	109,372	121
		700		229	94	115
	Plot 2	814	II 822	229	110	124
		830		224	93	117,4
	Plot 3	950	III 960	229	114	128,4
		970		209	95	118,7
40	Plot 4	470	I 470	288	123	137,2
		470		273	122	134,5
	Plot 5	800	II 800	312	124	135
		800		273	119	131,9
	Plot 6	960	III 955	297	123	136
		950		263	110	124
60	Plot 7	500	I 465	317	125	142
		430		292	128	139
	Plot 8	600	II 650	341	129	146
		700		322	131	141
	Plot 9	720	III 767,5	361	132	144
		815		332	129	140

De remarcat valorile integrate ale presiunii acustice înregistrate în situația arderii unui amestec 40%CH<sub>4</sub>-60%H<sub>2</sub> în configurația 1 de testare. Zgomotul produs, comparabil cu decolarea unui avion, a depășit la aproximativ 1 metru de sursă valoarea de 140 dB, ceea ce are potențial distructiv atât pentru instalație cât și pentru operator.

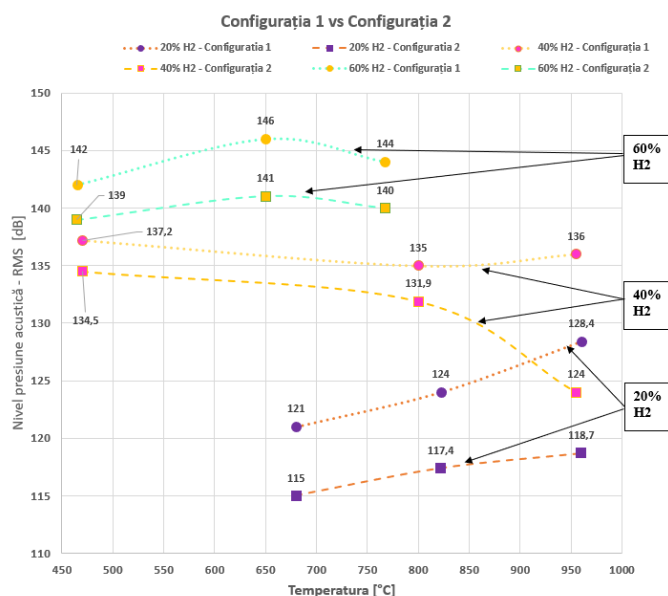


Figura 2.49- Comparație a nivelelor de presiune acustică înregistrate pentru configurațiile 1 (linie punctată) și 2 (linie întreruptă) de testare la arderea amestecurilor cu 20%, 40% și 60% H<sub>2</sub> în compoziție

În Figura 2.49 se poate observa faptul că pentru fiecare compoziție încercată, utilizarea sitei de cupru în amonte de turbionator, anume soluția testată în configurația 2, a realizat atenuarea nivelului de presiune acustică în sens favorabil folosirii ei iar rezultatele sunt după cum sunt prezentate în tabelul:

**Tabel 2.4 Comparație a nivelului de zgomot între c1 și c2**

X%H <sub>2</sub>	Diferența medie a nivelului de zgomot C2 față de C1 [dB]	Diferență procentuală a reducerii zgomotului pe fiecare regim de temperaturi testat [%]	
		I	II
20	-7,4	I	5,22
		II	5,62
		III	8,17
40	-5,9	I	2,01
		II	2,35
		III	9,68
60	-4	I	2,16
		II	3,55
		III	2,86

În această comparație prezentată anterior s-a constatat faptul că sita de cupru a redus zgomotul pe toate regimurile de funcționare (I, II, III), atenuând efectele fenomenului termoacustic întâlnit în situația arderii amestecurilor de CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> pe standul de testare. Faptul că valorile descreșterii intensității sonore sunt cuprinse între 4-8 dB denotă că schimbările sunt notabile și suficient de importante în exploatare, ținând cont că variația de la valoarea inițială a nivelului de presiune acustică la valoarea acesteia după folosirea sitei de cupru. În această comparație, dintre configurația de testare 3 respectiv 4, sunt remarcate valori mai mici ale nivelului de presiune acustică față de valorile măsurate în comparația dintre configurația de testare 1 respectiv 2. Aici este identificată o valoare maximă de 128,7 dB, cu mult mai mică față de valorile maxime identificate în sesiunile de testare anterioare. În Fig. 2.50 se observă faptul că în cazul amestecurilor de 60% H<sub>2</sub> în amestec sita de cupru contribuie foarte puțin în sensul atenuării zgomotului, însă la toate regimurile de funcționare aceasta aduce o scădere a nivelului de presiune acustică înregistrat.



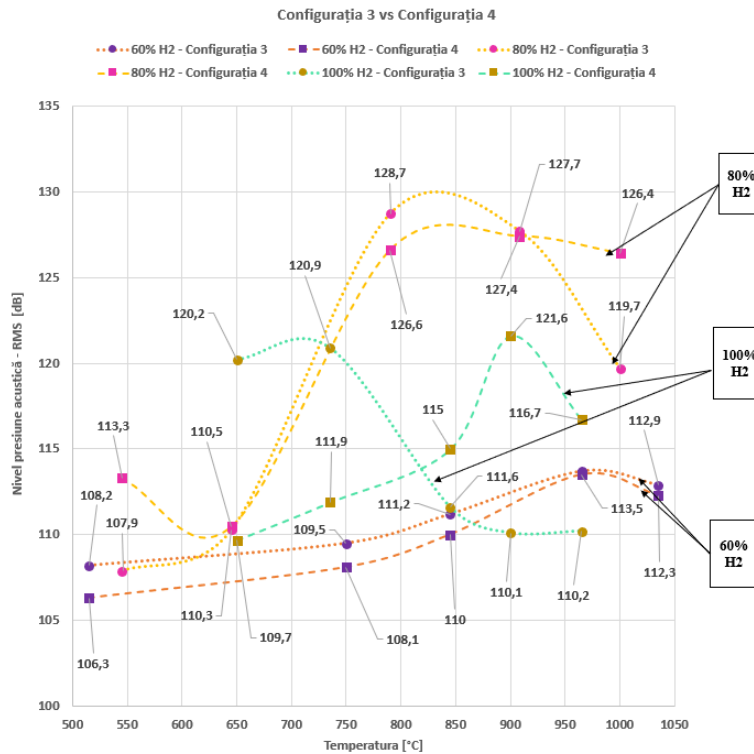


Figura 2.50- Comparație a nivelelor de presiune acustică înregistrate pentru configurațiile 3 (linie punctată) și 4 (linie întreruptă) de testare la arderea amestecurilor cu 60%, 80% și 100% H<sub>2</sub> în compoziție

## 2.5 Concluzii campanie experimentală

Rezultatele obținute în urma experimentelor arată că arderea amestecurilor de metan și hidrogen implică provocări complexe legate de zgomot, stabilitatea flăcării și emisiile de gaze. Hidrogenul, datorită proprietăților sale de combustie rapidă, introduce un comportament acustic mai intens și fluctuații mari de temperatură, în special la concentrații ridicate. Soluțiile tehnice propuse, cum ar fi discurile de cupru poros și modificările geometriei camerei de ardere, au avut un impact pozitiv asupra reducerii zgomotului și îmbunătățirii stabilității arderii. Introducerea sitelor de cupru a redus nivelurile de zgomot cu până la 8 dB în anumite configurații, ceea ce face aceste soluții viabile pentru aplicațiile industriale unde siguranța și eficiența energetică sunt critice.

**Configurația 1:** Fără sită de cupru. Aceasta a fost prima configurație de bază, în care aerul și combustibilul au fost injectate în camera de ardere printr-un turbionator clasic. Zgomotul generat în această configurație a fost semnificativ, în special la temperaturi mari și în amestecuri cu un conținut ridicat de hidrogen. **Configurația 2:** Cu sită de cupru. În această configurație, s-a introdus un disc de cupru poros în fața turbionatorului pentru a reduce zgomotul și a uniformiza fluxul de aer. Această soluție a dus la o reducere semnificativă a zgomotului și la o ardere mai stabilă în amestecurile bogate în hidrogen. **Configurația 3:** Cu fante de turbionare. A treia

configurație a implicat modificarea geometriei camerei de ardere prin adăugarea unor fante pentru a optimiza curgerea aerului și a îmbunătăți amestecul de aer și combustibil. Această modificare a permis creșterea concentrației de hidrogen în amestec până la 100% H<sub>2</sub> fără a produce zgomot excesiv. **Configurația 4:** Cu fante de turbionare și sită de cupru. Aceasta a combinat soluțiile din configurațiile 2 și 3, incluzând atât discurile de cupru, cât și fantele de turbionare. Configurația 4 a demonstrat, de asemenea, bune rezultate în ceea ce privește stabilitatea arderii și controlul fenomenelor acustice. Totuși, direcțiile viitoare de cercetare includ optimizarea suplimentară a acestor soluții și extinderea studiului la alte tipuri de combustibili îmbogățiți cu hidrogen. De asemenea, se dorește dezvoltarea unor metode de atenuare suplimentară a zgomotului și a emisiilor prin utilizarea unor materiale noi, cum ar fi spumele metalice sau rășinile ceramice, care pot disipa mai eficient energia acustică și pot rezista la temperaturi înalte.

### 3. Modelarea numerică a curgerii turbulente reactive

#### 3.1 Introducere

Curgerea fluidelor este guvernata de un set de ecuații cunoscut sub numele de ecuații Navier-Stokes. Acest sistem de ecuații cu derivate parțiale se bazează pe legi fundamentale de conservare a masei, momentului, energiei și a speciilor chimice. Astfel o soluție analitică a acestui sistem de ecuații ar oferi o descriere exactă a curgerii unui fluid reactiv.

În cazul curgerilor turbulente, forțele inerțiale depășesc în magnitudine forțele vâscoase, astfel încât instabilitățile care se dezvoltă în curgere au tendința de a crește și de a forma rapid structuri rotative mari caracterizate de scara de lungime integrală,  $l_0$ . Aceste structuri rotative mari sunt supuse întinderii și se sparg în structuri din ce în ce mai mici, până se ajunge la așa numita limita Kolmogorov. Dacă  $l_0$  este comparabil cu cele mai mari scări de lungime implicate în curgere și este într-un domeniu unde grilele de calcul de rezoluții rezonabile o pot capta, atunci scara de lungime Kolmogorov este mult mai mică și o integrare numerică care să prindă această scară devine nepractică din punctul de vedere al resurselor de calcul. O astfel de abordare, de a rezolva toate scările de lungime până la cea mai mică (scara Kolmogorov), este cunoscută în literatură sub numele de **DNS**. Numărul Reynolds până la care poate fi folosită metoda **DNS** este în jur de 6000 [9]. O primă soluție a problemei resurselor de calcul ridicată de curgerile turbulente o constituie așa numită tehnică de „**Mediere Reynolds a ecuațiilor Navier – Stokes**” (**RANS**). În metoda RANS, ecuațiile Navier-Stokes sunt mediate în timp. Trebuie rezolvat astfel doar câmpul de curgere mediat în timp, eliminând în felul acesta fluctuațiile temporale datorate

scărilor mici implicate în mișcarea turbulentă, și permițând utilizarea de rețele de discretizare mult mai grosiere și necesitând resurse de calcul semnificativ reduse.

### 3.2 Elemente de cinetica reacțiilor chimice

Procesul de ardere este rezultatul unei reacții chimice puternic exoterma, rezultat al schimburilor energetice care se produc o dată cu ciocnirile intermoleculare. În general, la temperaturi obișnuite o reacție chimică se produce foarte încet, deoarece moleculele, deși se ciocnesc, nu pot pune în joc o cantitate de energie suficientă pentru a realiza transformarea

chimică. Dacă se definește viteza de reacție  $\bar{w} \left[ \frac{\text{molecule}}{m^3 s} \right]$ , ca fiind numărul de molecule transformate în unitatea de timp și în unitatea de volum, aceasta va fi proporțională, conform ipotezei reacțiilor prin ciocnire, cu numărul moleculelor de substanțe active, și anume cu concentrațiile lor:

$$\bar{w} = k \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \dots \quad (3.5)$$

unde coeficientul  $k$  exprimă faptul că numai o parte din ciocniri sunt eficiente. Conform teoriei cineticii chimice, la reacția chimică nu conduc decât ciocnirile "active", adică ciocnirile la care participă molecule având o energie inițială mai mare sau egală cu o energie determinată, care se

notează  $E_a \left( \frac{J}{kmol} \right)$  și care se numește energie de activare. Aceasta energie este necesară pentru a distruge sau a slăbi legăturile intramoleculare existente [60].

#### 3.2.1 Mecanismul de reacție CH<sub>4</sub>/aer

În studiul de față a fost folosit un mecanism de reacție în doi pași pentru modelarea numerică a procesului de ardere CH<sub>4</sub>/aer. Mecanismul de reacție este descris de următoarele ecuații chimice:



#### 3.2.2 Mecanismul de reacție H<sub>2</sub>/aer

Lanțul principal al reacțiilor de ardere a hidrogenului este reprezentat în Figura 3.1, unde sunt evidențiate căile majore de reacție. Aceste căi au fost selectate pe baza vitezei specifice a fiecărei reacții elementare. Astfel, se pune accentul pe reacțiile cu viteza cea mai mare, urmând ca reacțiile mai lente, care sunt determinate de constanta vitezei de reacție, să devină dominante în controlul întregului proces de ardere. Această abordare asigură o evaluare detaliată a mecanismelor de ardere a hidrogenului, oferind informații esențiale pentru simularea numerică și pentru optimizarea procesului în diferite scenarii experimentale și industriale.

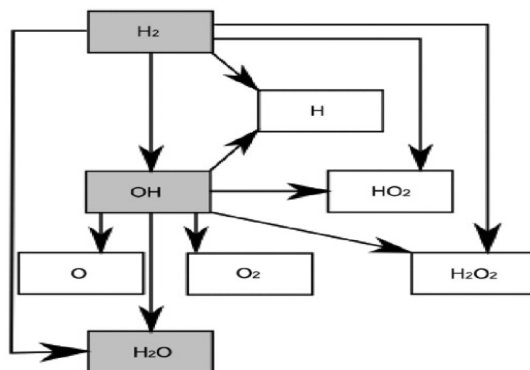


Figura 3.1 Schema lanțului principal pentru mecanismul de reacție de oxidare redus al hidrogenului

Strategia de reducere a mecanismului de reacție se bazează pe ipoteze privind procesele staționare și echilibrul parțial. În cazul unui sistem omogen, ipoteza stării de echilibru este aplicabilă pentru acele specii intermediare care sunt produse prin reacții lente și consumate prin reacții rapide, astfel încât concentrația lor se menține redusă. Asumarea echilibrului parțial poate fi justificată atunci când coeficienții vitezei de reacție pentru reacțiile reversibile sunt semnificativ mai mari decât cei ai tuturor celorlalte reacții [10]. În Tabelul 3.1 este prezentat mecanismul de reacție H<sub>2</sub>/aer utilizat în simulările numerice.

**Tabel 3.1** Mecanismul de oxidare al hidrogenului [11]

Nr	Reactanți		Prođuși	A	n	Ea kJ/g* mol	Ea j/kg- mol
1	H+O <sub>2</sub>	→	OH+O	1,20E+17	-0,91	69,1	6,91E+07
2	OH+O	→	O <sub>2</sub> +H	1,80E+13	0	0	0
3	O+H <sub>2</sub>	→	OH+H	1,50E+07	2	31,6	3,16E+07
4	OH+H <sub>2</sub>	→	H <sub>2</sub> O+H	1,50E+08	1,6	13,8	1,38E+07
5	H+H <sub>2</sub> O	→	OH+H <sub>2</sub>	4,60E+08	1,6	77,7	7,77E+07
6	O+H <sub>2</sub> O	→	OH+OH	1,50E+10	1,14	72,2	7,22E+07
7	H+H+M(H <sub>2</sub> )	→	H <sub>2</sub> +M(H <sub>2</sub> )	7,00E+15	-0,6	0	0,00E+00
8	H <sub>2</sub> +M(H <sub>2</sub> )	→	H+H+M(H <sub>2</sub> )	8,80E+14	0	402	4,02E+08
9	H+OH+M(H <sub>2</sub> O)	→	H <sub>2</sub> O+M(H <sub>2</sub> O)	1,40E+23	-2	0	0,00E+00
10	H <sub>2</sub> O+M(H <sub>2</sub> O)	→	H+OH+M(H <sub>2</sub> O)	1,60E+17	0	478	4,78E+08

### 3.3 Modelare numerică pentru noul turbionator pentru funcționarea cu amestec CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>

În cadrul acestui studiu au fost realizate simulări numerice de tip RANS folosind software-ul comercial ANSYS FLUENT.

#### 3.4.1 Geometria și grila de calcul

Geometria domeniului de calcul a fost realizată folosind software-ul de proiectare 3D Solid Edge, bazat pe configurația standului de testare, aceasta fiind prezentată în Figura 3.3. Domeniul de calcul include conul metalic care reprezintă partea frontală a arzătorului, injectorul-

turbionator, traseul de aer și orificiile de alimentare cu combustibil ale arzătorului și carcasa exterioară.

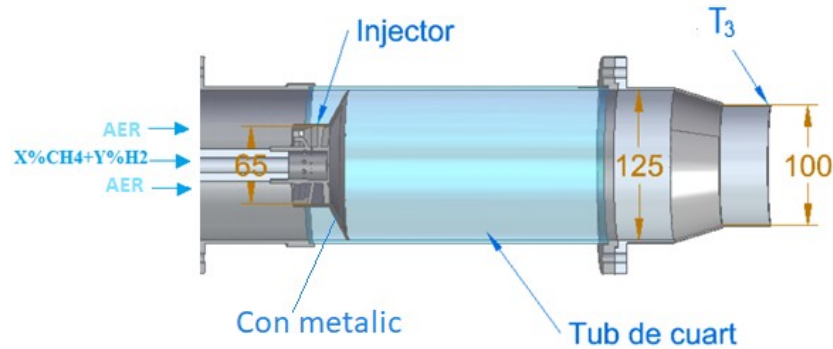


Figura 3.3 Modelul 3D al tronsonului experimental

Grila de calcul constă într-o rețea de elemente nestructurate generată folosind ICEM-CFD din pachetul ANSYS. Rețeaua are 6.233.848 de elemente și 1.056.870 de noduri. Aceasta a fost rafinată în interiorul tubului de foc, în zona primară, așa cum se poate observa în Figura 3.2. Aceasta îndesire a elementelor de volum are rolul de a surprinde fenomene precum: amestecarea, dezvoltarea zonelor de recirculare cât și câmpul de temperaturi rezultat în urma reacției de oxidare a amestecurilor de combustibili.

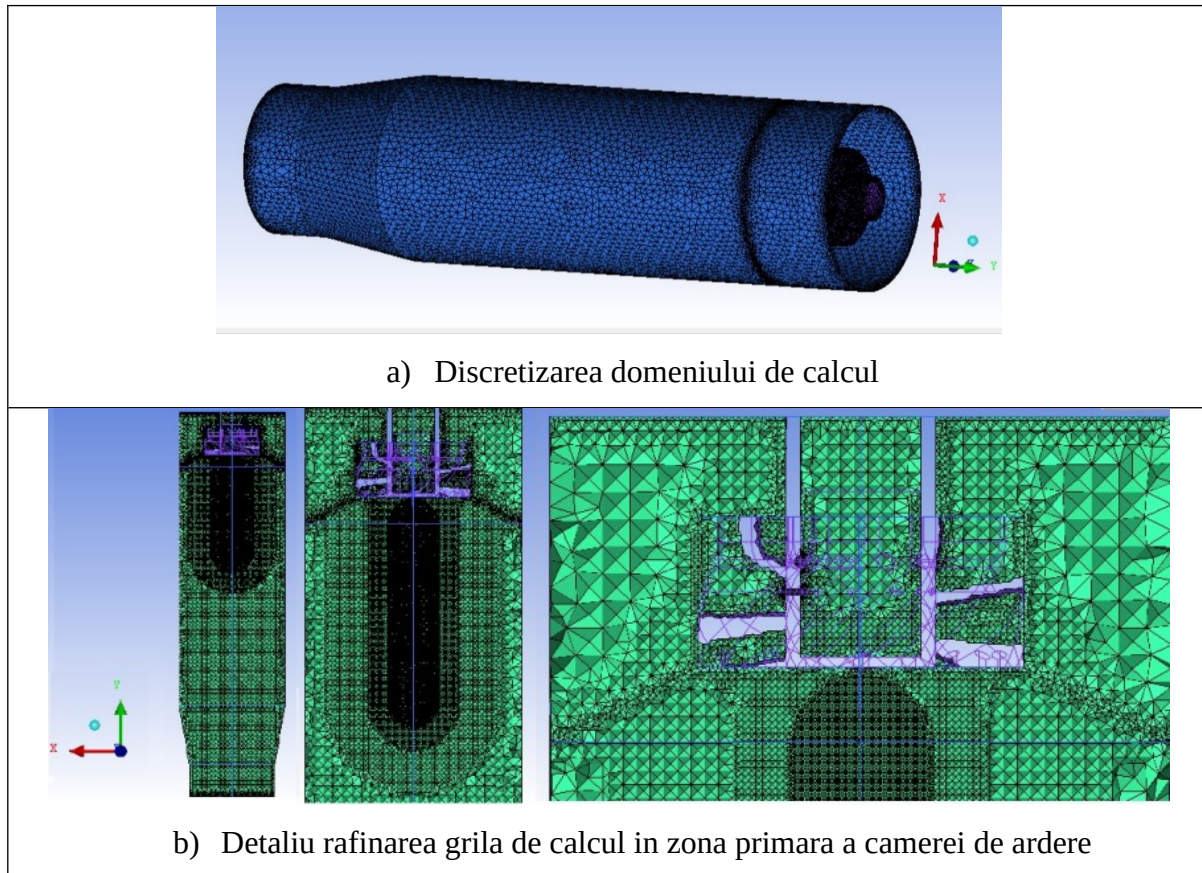


Figura 3.2 Grila de calcul

### 3.4.2 Condiții la limită

Modelul de turbulență utilizat a fost de tip RANS, respectiv modelul k-ε care furnizează cele mai bune rezultate de până acum în cazuri similare [12-13]. Aceste structuri fine ocupă o fracțiune foarte mică din volumul real al fluidului, compus dintr-un mecanism de reacție metan-aer în două etape, importat din biblioteca ANSYS și mecanismul de reacție în 10 pași pentru reacția hidrogen-aer.

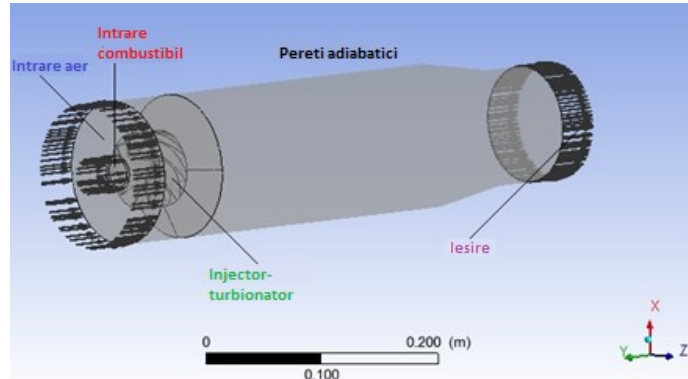


Figura 3.3 Domeniul de calcul

Debitele amestecurilor metan-hidrogen au fost variate pentru a se atinge la evacuarea arzătorului temperatura în raport cu puterea termică de 25,5 kW; 19,5 kW și 14,5 kW.

### 3.4.3 Rezultate modelare numerică

În prima etapă a studiului a fost făcută o comparație între două variante de injector-turbionator. Ambele prezintă orificii radiale între paletele turbionatorului prin care amestecul de combustibil este injectat și parțial preamestecat cu aerul. În cazul celei de-a doua variante de injector-turbionator a fost adăugat un orificiu pe fața frontală a turbionatorului care să imprime un jet pe direcție axială în tubul de foc. Acest orificiu (2 mm diametru) permite injectarea amestecului de combustibil în zona primară rezultând o flacără de difuzie. Cele două geometrii aferente cazului 1 și cazului 2 sunt prezentate în Fig. 3.4.

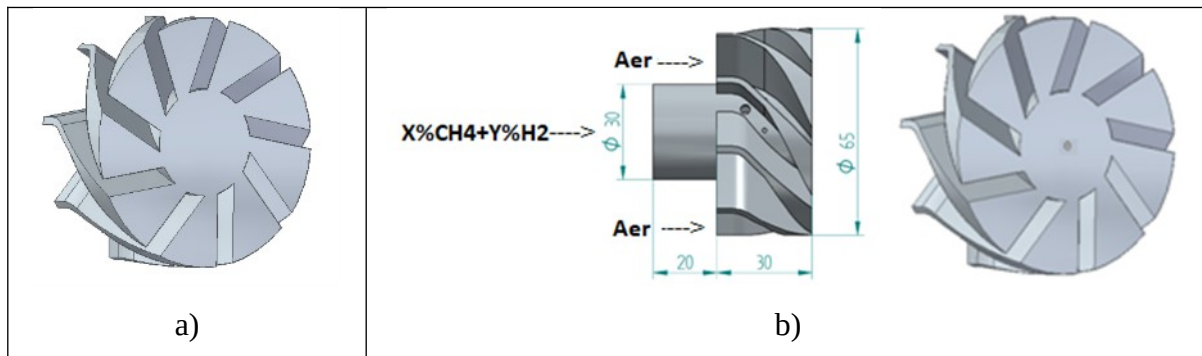


Figura 3.4 Injectorul turbionator a) cazul 1 și b) cazul 2

Temperatura medie totală de-a lungul arzătorului a fost monitorizată pentru a înțelege mai bine fenomenul care are loc în interiorul tubului de foc în timpul arderii metanului îmbogățit cu hidrogen pentru fiecare caz (Figura 3.5).

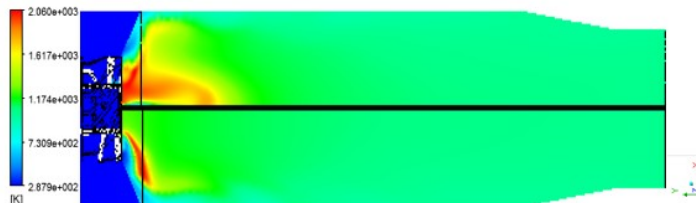


Figura 3.5 Distribuția temperaturii de-a lungul camerei de ardere (cazul 1, prezentat sub linia neagră și cazul 2 prezentat deasupra liniei negre)

În Figurile 3.6-3.8 sunt prezentate evoluțiile temperaturilor în lungul camerei de ardere. Cu linia continuă sunt graficele aferente pentru cazul 1 iar cu linia punctată pentru cazul 2.

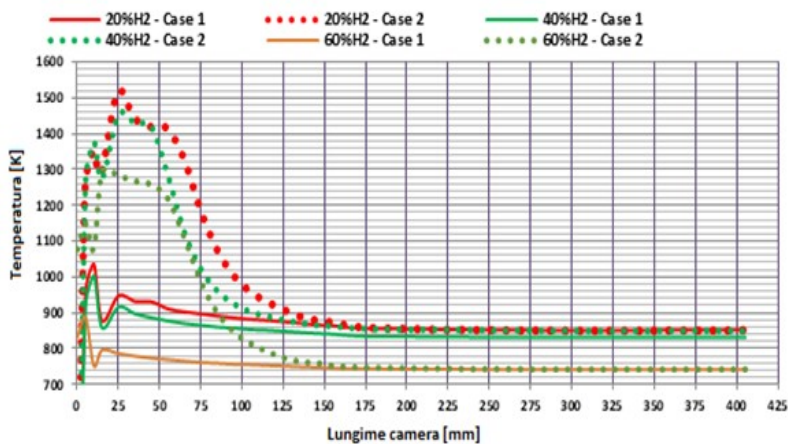


Figura 3.6  $P(t) \approx 14 \text{ kW}$  Debit aer = 0.02 kg/s

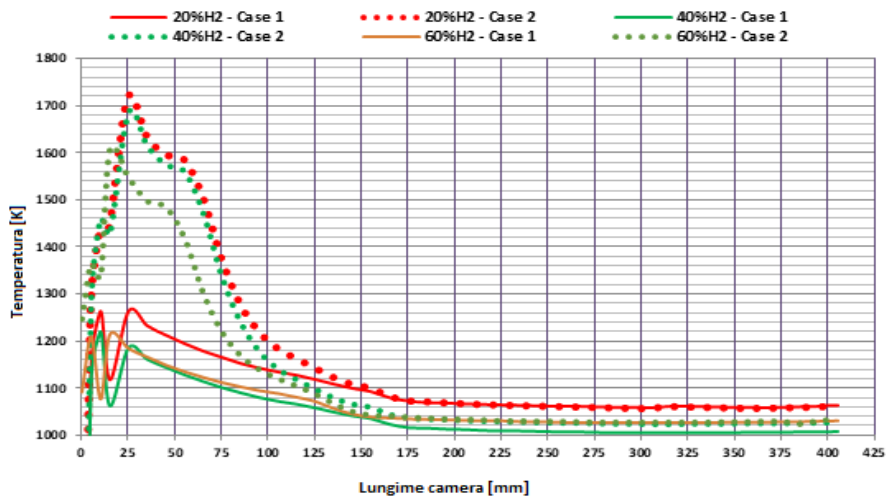


Figura 3.7  $P(t) \approx 19 \text{ kW}$  Debit aer = 0.02 kg/s

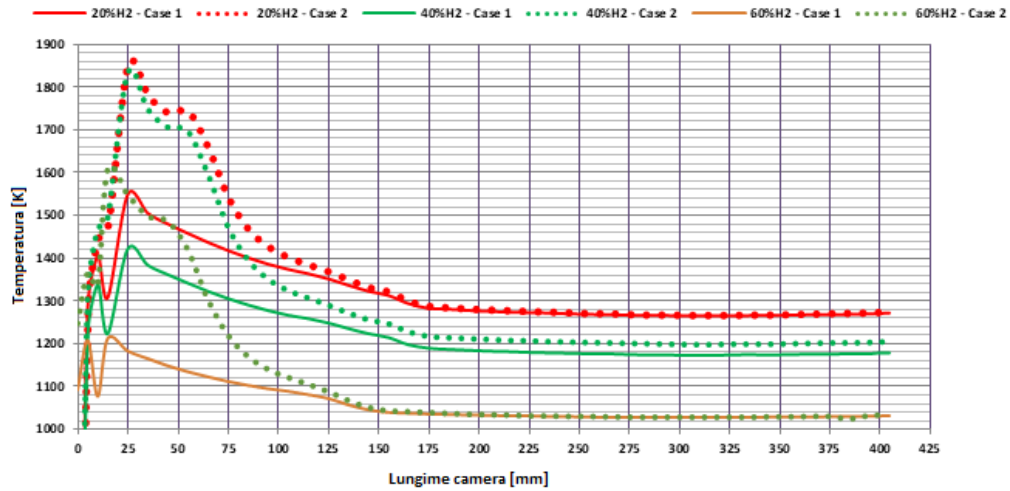


Figura 3.8  $P(t) \approx 24kW$  Debit aer=0.02 kg/s

Vectorii de viteză sunt prezentați în Figura 3.9 pentru ambele cazuri, cea mai mare magnitudine fiind indicată la ieșirea din canalele pentru trecerea aerului dintre paletele turbionatorului. Pentru cazul 1, flacăra cu distribuție radială (preamestecată parțial) este mai extinsă către perete față de cea prezentată în cazul 2 datorită debitului suplimentar de combustibil prin orificiul frontal de 2 mm diametru și reducerii vitezei prin orificiile radiale de combustibil. Acest lucru a dus la temperaturi scăzute în apropierea peretelui camerei de ardere fără aer suplimentar pentru a asigura răcirea.

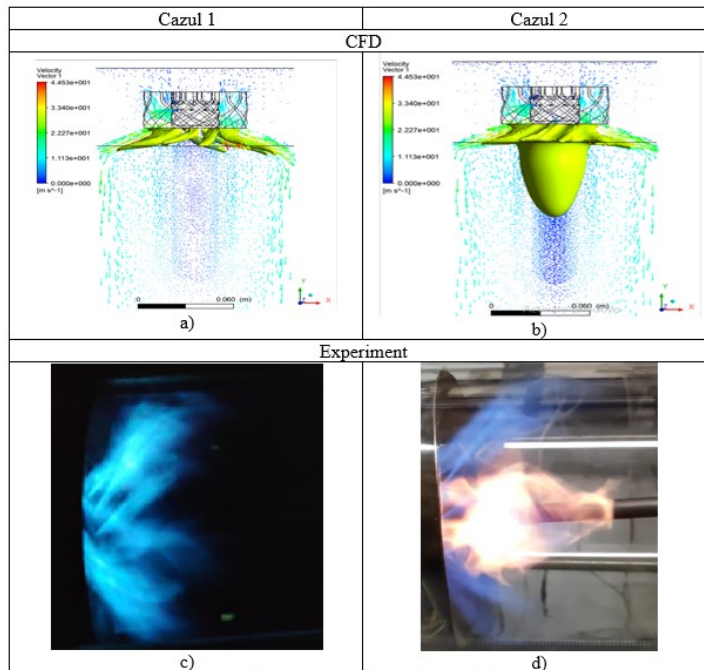


Figura 3.9 Comparare forma flacără CFD versus Experiment



Rezultatele au indicat că pentru același debit masic de combustibil, temperatura în zona primară a arzătorului în cele două cazuri a avut o variație între 200 și 400 K. În cazul 2, flacăra difuzivă a indus o creștere a temperaturii în primii 100 mm ai camerei de ardere care poate duce la formarea de NO<sub>x</sub>. Mai mult, flacăra difuzivă a mutat frontul flăcării mai departe de injectorul de turbionator și de conul metalic, iar ca rezultat, aceasta va prelungi durata de viață a pieselor metalice ale arzătorului. Atât în cazul curgerii reactive cât și în cea nereactivă (doar aer) prin tubul de foc s-a constatat atât numeric cât și experimental faptul că în centrul acestuia direcția curenților este în sens invers curgerii turbionare, anume dinspre planul de ieșire din tubul de foc către injectorul-turbionator. Linia centrală este prezentată în figura 3.10.

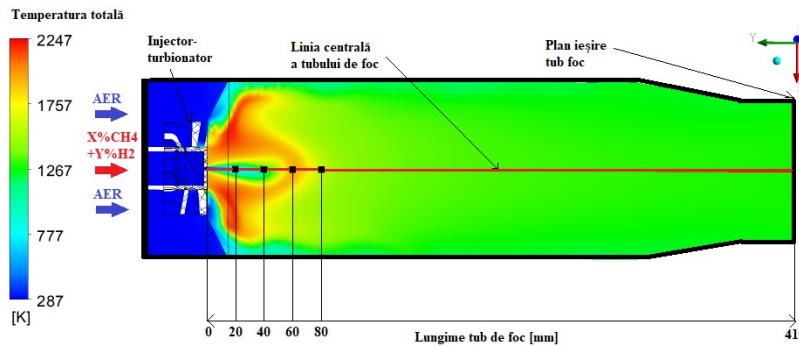


Figura 3.10 Secțiune longitudinală a domeniului de calcul prin care sunt puse în evidență linia centrală a tubului de foc și punctele de interes pentru măsurarea vitezei în zona primară

S-a considerat ce-a de-a doua variantă de injector-turbionator care dezvoltă atât flacăra cu preamestec parțial cât și flacăra difuzivă. În vederea investigării mecanismului de reacție ales, au fost realizate investigații în domeniul de calcul cu privire la temperatura totală, viteza și direcția curgerii, repartiția speciilor chimice participante la reacțiile de ardere. Speciile chimice au fost exprimate sub formă de fracție masică. Aceasta reprezintă un mod de exprimare a compoziției unui component dintr-un amestec sau soluție, fiind raportul dintre masa componentului și masa totală din soluție. Combustibilul avut în vedere a fost 40%CH<sub>4</sub>+60%H<sub>2</sub>.

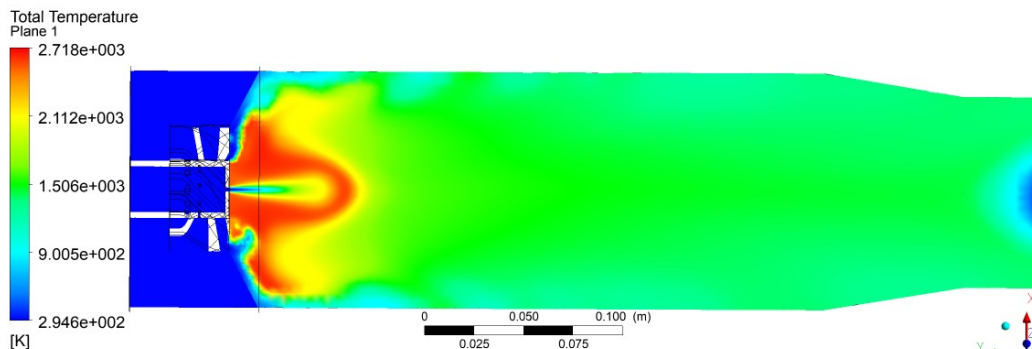


Fig. 3.18 Fig.

3.11 Temperatura totală în secțiunea domeniului de calcul

Din Figura 3.11 se poate observa ca zona de temperatura mare se regasteste in zona primara a tubului de foc. Acest lucru este de dorit in cazul functionarii corecte a unei camere de ardere.

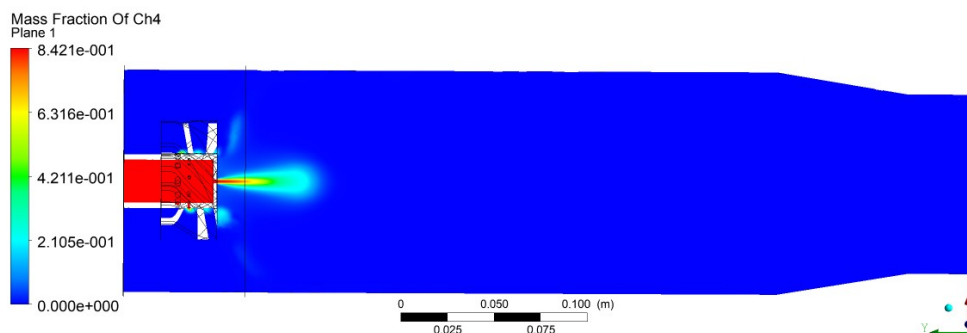


Fig. 3.12 Frația masică de  $CH_4$  în secțiunea domeniului de calcul

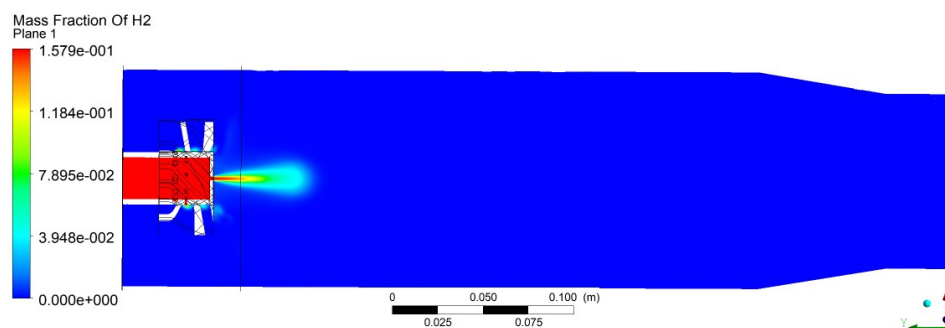


Fig. 3.13 Frația masică de  $H_2$  în secțiunea domeniului de calcul

Din Figurile 3.12 – 3.13 se poate observa ca a amestecul combustibil este consumat in întregime in zona primara a tubului de foc, fracțiile masice de  $H_2$  si  $CH_4$  la ieșirea din camera de ardere fiind 0. Producții de reacție, rezultați in urma modelarii numerice a procesului de ardere, având o fracție masica semnificativa ( $> 10^{-3}$ ), sunt prezentați in Figurile 3.14-3.16. Acești produși de reacție sunt  $H_2O$ ,  $CO$ , respectiv  $OH$ .

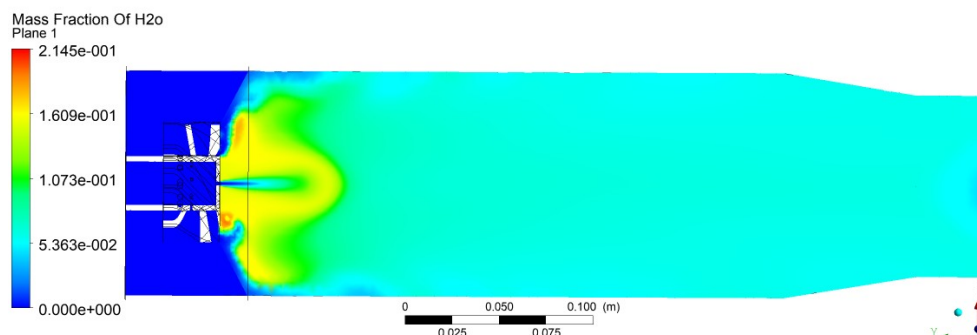


Fig. 3.14 Frația masică de  $H_2O$  în secțiunea domeniului de calcul

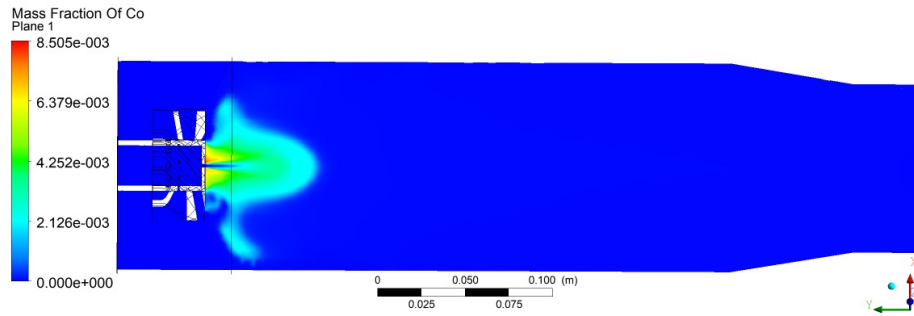


Fig. 3.15 Frația masică de CO în secțiunea domeniului de calcul

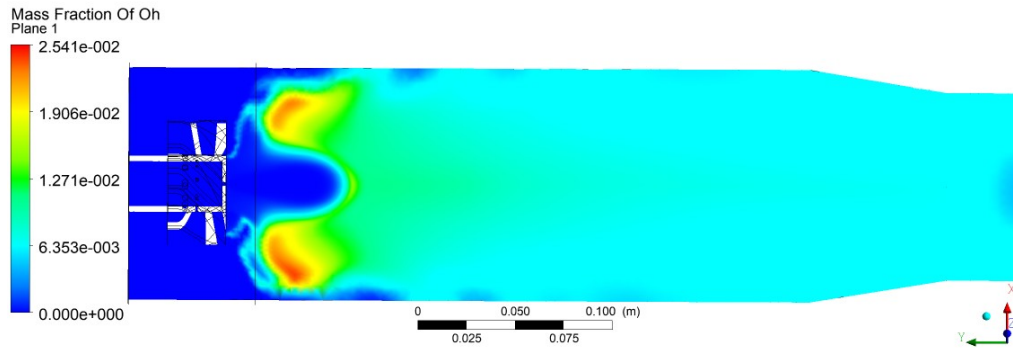


Fig. 3.16 Frația masică de OH în secțiunea domeniului de calcul

Pentru a investiga zona de interes, unde se desfășoară reacțiile de ardere, au fost monitorizate evoluțiile a diferiți parametri relevanți în 1000 de puncte de-a lungul liniilor galbene din Fig 3.17. Diametrul tubului de foc este de 125 mm.

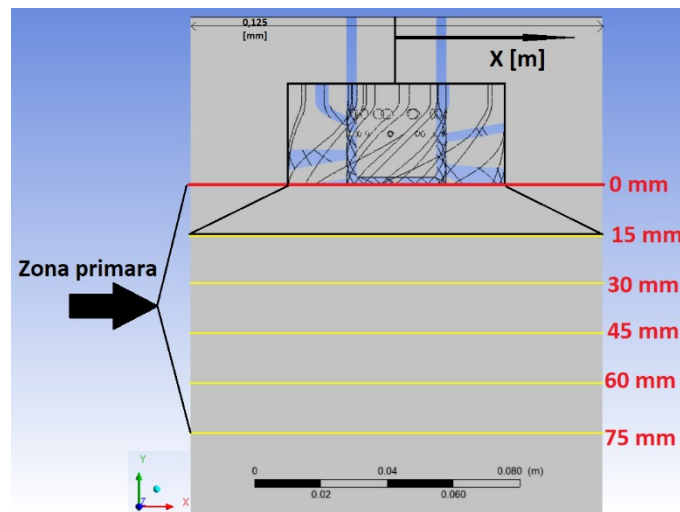


Figura 3.17 Pozitionare linii de monitorizare parametrii

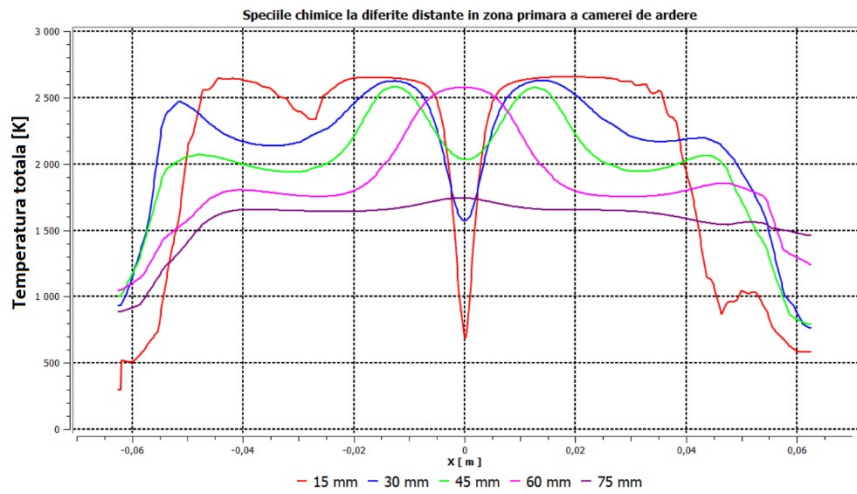


Figura 3.18 Evoluția temperaturii totale în zona primară a domeniului de calcul

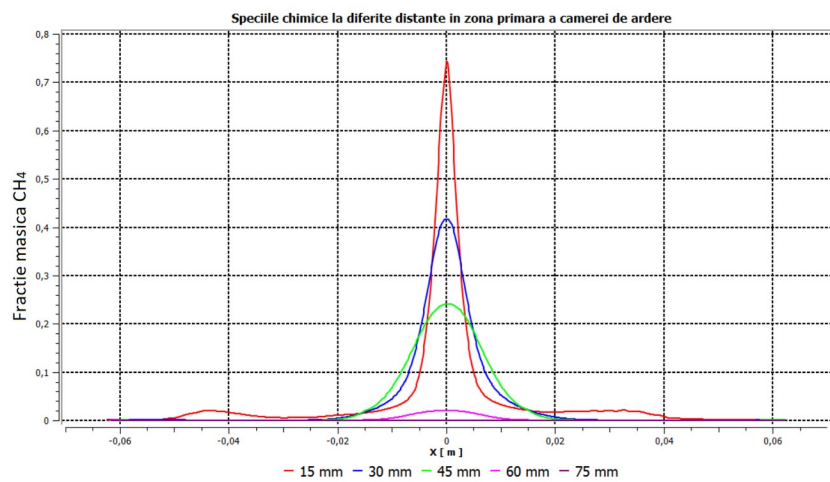


Figura 3.19 Evoluția fracției masice de CH<sub>4</sub> în zona primară a domeniului de calcul

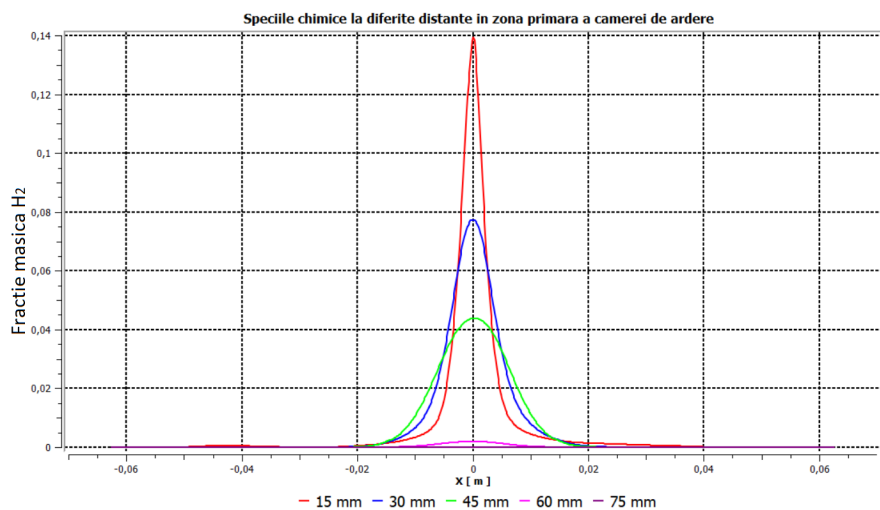


Figura 3.20 Evoluția fracției masice de H<sub>2</sub> în zona primară a domeniului de calcul

Din Figurile 3.19-3.20 se poate observa o fracție masică mai mare de amestec  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  pe axa de simetrie a tubului de foc. Astfel, cea mai mare parte de amestecul combustibil este injectat în tubul de foc prin orificiul central de pe fața turbionatorului. De asemenea, pe măsura ce ne depărtăm de injector, fracțiile masice de  $\text{CH}_4$  și  $\text{H}_2$  scad. Acestea ajung la valoarea 0 la o distanță de 75 mm față de injector, sugerând o ardere completă a amestecului combustibil.

#### **4. Concluzii generale**

Cercetările prezentate în cadrul acestei teze au avut ca scop principal investigarea și optimizarea proceselor de ardere din turbomotoarele care folosesc amestecuri de metan și hidrogen. Rezultatele obținute în urma campaniilor experimentale și a simulărilor numerice au adus contribuții importante în domeniul controlului emisiilor și stabilității arderii pentru turbinele cu gaz, contribuind la soluții eficiente pentru atingerea unor obiective de sustenabilitate energetică și reducerea emisiilor poluante.

##### **1. Eficiența arderii în amestecurile de metan și hidrogen**

Unul dintre cele mai relevante rezultate ale studiului este legat de eficiența combustiei în amestecurile de metan și hidrogen. S-a constatat că, odată cu creșterea procentului volumic de hidrogen din amestecul de combustibil, eficiența arderii a crescut considerabil. În special, pentru amestecurile cu un conținut de 60% și 80%  $\text{H}_2$  au demonstrat o reducere semnificativă a emisiilor de monoxid de carbon ( $\text{CO}$ ), datorită faptului că hidrogenul arde mai rapid și complet în comparație cu metanul și ca din punct de vedere energetic aceste amestecuri conțin mai puțin carbon. În configurațiile testate cu 60%  $\text{H}_2$  în amestecul combustibil, emisiile de  $\text{CO}$  au fost reduse cu până la 50% comparativ cu arderea metanului pur. Acest rezultat este în conformitate cu observațiile din literatură, conform cărora hidrogenul permite o oxidare completă datorită vitezei mai mari de propagare a flăcării și temperaturii mai ridicate în zona de reacție. Mai mult, flăcările generate în aceste amestecuri au fost mai compacte și mai stabile, favorizând o ardere eficientă.

##### **2. Emisii de $\text{NO}_x$ și influența temperaturii flăcării**

Un alt aspect important al cercetării a fost evaluarea emisiilor de  $\text{NO}_x$ , un poluant principal în turbinele cu gaze. Pe măsură ce proporția volumică de hidrogen din amestec a crescut, emisiile de  $\text{NO}_x$  au avut o tendință de creștere, în special datorită temperaturii ridicate a flăcării. De exemplu, pentru amestecuri de 60%  $\text{H}_2$ , emisiile de  $\text{NO}_x$  au crescut cu aproximativ 15-20% față de amestecurile de metan pur. Această creștere este rezultatul mecanismului Zeldovich, responsabil pentru formarea  $\text{NO}_x$  termic la temperaturi ridicate. Totuși, utilizarea unor soluții tehnice inovatoare, cum ar fi sita de cupru poros și fantele de turbionare, a permis o

reducere semnificativă a emisiilor de NO<sub>x</sub>. În configurația cu sită de cupru, emisiile de NO<sub>x</sub> au fost reduse cu până la 10% datorită unei distribuții mai uniforme a oxidantului și a combustibilului, ceea ce a redus temperaturile locale ridicate din zona de ardere. Fantele de turbionare au contribuit la o diluție mai bună a amestecului, diminuând formarea de NO<sub>x</sub> în situația folosirii amestecurilor cu conținut ridicat de hidrogen.

### **3. Stabilitatea flăcării și comportamentul acustic**

Unul dintre obiectivele principale ale studiului a fost investigarea stabilității flăcării în timpul arderii amestecurilor de hidrogen și metan. Amestecurile de hidrogen au prezentat o flacără mai compactă și mai intensă datorită vitezei mai mari de propagare a flăcării și a ratei ridicate de eliberare a energiei. Această caracteristică a fost evidentă în special la amestecurile de 80% H<sub>2</sub>, unde flacăra a fost mai stabilă în condiții de temperatură înaltă, având o dimensiune redusă față de flăcările generate de metan pur. În ceea ce privește perturbațiile acustice, amestecurile bogate în hidrogen au generat pulsații acustice mai puternice, datorită temperaturii mai mari a flăcării și implicit a vitezei de propagare a sunetului în mediul gazelor de ardere. În special, la amestecuri cu 60% H<sub>2</sub>, s-au înregistrat pulsații acustice de peste 140 dB, ceea ce poate avea un impact semnificativ asupra duratei de viață a componentelor turbinei și asupra siguranței generale a sistemului. Totuși, utilizarea sitei de cupru poros a redus semnificativ nivelul zgomotului, cu până la 8 dB în anumite configurații și anumite amestecuri combustibile. Aceasta soluție s-a dovedit extrem de eficientă în atenuarea zgomotului și poate fi implementată în turbinele cu gaze la scară industrială.

### **4. Optimizarea geometriei camerei de ardere**

Geometria camerei de ardere a fost un factor cheie în obținerea unor rezultate optime în ceea ce privește stabilitatea arderii și reducerea emisiilor. Modificările aduse prin utilizarea fanțelor de turbionare au contribuit la o distribuție mai uniformă a amestecului de combustibil și aer în camera de ardere, ceea ce a dus la o reducere a temperaturilor locale și implicit la o scădere a formării de NO<sub>x</sub>. În plus, aceste modificări au permis o funcționare mai stabilă a flăcării, chiar și în condiții de 100% H<sub>2</sub>, unde instabilitățile termice și pulsațiile acustice sunt în mod normal mai greu de controlat. Testele experimentale efectuate pe configurațiile cu injecție axială de combustibil care alimentează flacăra difuzivă au arătat o îmbunătățire semnificativă a stabilității arderii, cu o reducere a nivelului presiunii acustice. În mod particular, fanțele de turbionare au permis o curgere mai uniformă și o diluție mai bună a gazelor, asigurând un proces de ardere mai eficient și mai controlat din perspectiva emisiilor poluante din gazele de ardere. În comparație cu configurațiile inițiale, optimizarea geometriei camerei de ardere [C3] a permis o

funcționare stabilă chiar și la concentrații ridicate de hidrogen, ceea ce indică viabilitatea acestei soluții pentru aplicații industriale.

## **5. Viabilitatea soluțiilor tehnice pentru aplicații industriale**

Soluțiile tehnice testate în această cercetare, cum ar fi sita de cupru poros, fantele de turbionare și injecția axială, au demonstrat un potențial semnificativ pentru implementarea lor în turbinele cu gaze de mare capacitate. Aceste soluții nu doar că au contribuit la reducerea emisiilor de NO<sub>x</sub> și CO, dar au permis și controlul eficient al instabilităților acustice și al pulsațiilor termice, asigurând astfel o funcționare sigură și eficientă a sistemului de ardere. Aplicabilitatea acestor soluții în medii industriale este susținută de stabilitatea arderii și de reducerea semnificativă a zgomotului, care reprezintă factori critici în operarea pe termen lung a turbinelor cu gaze.

Cercetările desfășurate în cadrul acestei teze de doctorat au demonstrat viabilitatea utilizării hidrogenului drept combustibil alternativ (vector energetic) pentru turbinele cu gaze, în special în amestec cu metanul. Soluțiile tehnice propuse, cum ar fi fantele de turbionare, sita de cupru și injecția axială de combustibil, au permis optimizarea procesului de ardere, reducerea emisiilor de NO<sub>x</sub> și CO, și îmbunătățirea stabilității flăcării. Aceste rezultate pot deschide noi perspective pentru dezvoltarea turbinelor cu gaze mai eficiente și mai prietenoase cu mediul înconjurător, contribuind la reducerea emisiilor globale și la creșterea eficienței energetice în sectoarele industriale și energetice.

## **5. Contribuții personale și diseminare**

### **5.1 Contribuții personale**

Cercetarea doctorală s-a materializat într-o serie de contribuții originale care au folosit cercetările teoretice, numerice și experimentale prezentate în capitolele anterioare. Aceste contribuții personale sunt sintetizate în cele de mai jos:

- **Proiectarea și dezvoltarea unui nou concept de cameră de ardere cu turbionare pentru reducerea zgomotului** - Una dintre contribuțiile mele majore a fost dezvoltarea unui prototip de cameră de ardere inovativă, care utilizează tehnici avansate de preamestec și turbionare. Această cameră de ardere a fost concepută special pentru a reduce zgomotul generat în timpul arderii prin optimizarea geometriei turbionatorului și a fluxului de aer-combustibil. Prin utilizarea paletelor elicoidale în turbionator, s-a obținut o ardere mult mai stabilă și compactă, ceea ce a redus semnificativ oscilațiile acustice. Zgomotul a fost diminuat nu doar printr-o mai bună omogenizare a amestecului de combustibil și aer, dar și prin ajustarea caracteristicilor

geometrice ale camerei de ardere, care au redus pulsațiile acustice și au eliminat o parte din instabilitățile aerodinamice cauzate de fluxul turbulent. Această realizare a condus la depunerea unui brevet de invenție la OSIM pentru a brevetă soluția propusă, proiectată.

- **Campanie experimentală axată pe reducerea zgomotului în procesele de ardere** - Un alt aspect important al contribuției mele constă în desfășurarea unei campanii experimentale detaliate în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare Turbomotoare COMOTI, unde am investigat procesele de ardere ale amestecurilor de metan și hidrogen. În cadrul testelor experimentale, am analizat frecvențele acustice generate în timpul arderii folosind analize Fourier și alte metode avansate de măsurare a zgomotului. Rezultatele experimentale au arătat o reducere semnificativă a nivelului de zgomot la arderea amestecurilor de metan îmbogățite cu hidrogen, în special la concentrațiile de 40% H<sub>2</sub> și 60% CH<sub>4</sub>. Această configurație a condus la o ardere mai stabilă, cu pulsații acustice reduse și o flacără mai compactă, ceea ce a dus la minimizarea oscilațiilor sonore și a fluctuațiilor presiunii.

- **Modelare numerică pentru optimizarea reducerii zgomotului**  
Un alt pilon important al contribuției mele constă în realizarea de simulări numerice tridimensionale pentru optimizarea curgerii reactive și validarea unui mecanism de reacție extins pentru arderea amestecurilor de gaz metan îmbogățite cu hidrogen, în camera de ardere. Prin simulările numerice am identificat soluții tehnice care au permis nu doar stabilizarea flăcării, ci și reducerea fenomenelor termoacustice ce generează zgomot. În urma simulărilor, am propus ajustarea unor parametri precum dimensiunile fantelor de turbionare și viteza de injectare a combustibilului, care au avut un impact pozitiv asupra reducerii zgomotului. Aceste optimizări au fost ulterior validate în cadrul campaniei experimentale, confirmând corelarea bună între modelările numerice și rezultatele obținute în realitate.

- **Asigurarea conformității emisiilor poluante cu legislația în vigoare**  
Un alt aspect important al cercetării mele a fost analiza emisiilor poluante generate de arderea amestecurilor de metan și hidrogen, în concordanță cu cerințele legale actuale privind emisiile de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> și alte gaze poluante. Prin utilizarea amestecurilor de combustibili ce conțin până la 100% hidrogen, am reușit să aduc emisiile de NO<sub>x</sub> și CO (pentru cazul amestecurilor metan-hidrogen) la niveluri care respectă limitele impuse de legislația europeană și internațională.



## 6. Direcții viitoare de cercetare

Pe măsură ce tehnologia avansează și cerințele de reducere a emisiilor cresc, cercetările privind optimizarea proceselor de ardere în turbomotoarele care folosesc combustibili alternativi, precum amestecurile de metan și hidrogen, continuă să fie esențiale. Studiul prezent propune mai multe direcții viitoare de cercetare pentru a extinde cunoștințele și aplicațiile actuale, asigurând astfel o tranziție eficientă către surse de energie mai curate și mai sustenabile.

### 1. Optimizarea geometriei și configurației injectorului turbionator

O direcție de cercetare promițătoare este optimizarea geometriei și a configurării injectorului turbionator (swirler) utilizat în camerele de ardere. Geometria paletelor turbionatorului influențează direct stabilitatea flăcării, eficiența amestecului aer-combustibil și emisiile de poluanți. Prin urmare, o investigație detaliată asupra diferitelor configurații de palete, inclusiv unghiul, dimensiunea și distribuția acestora, ar putea oferi soluții inovatoare pentru îmbunătățirea performanțelor arderii. Utilizarea modelarilor numerice CFD avansate și a metodelor experimentale de măsurare laser, cum ar fi „Doppler global velocimetry (DGV)”, ar putea fi benefică pentru înțelegerea complexităților curgerii turbulente și a comportamentului flăcării.

### 2. Studiul arderii cu Amestecuri Alternative de Combustibil

Pe lângă utilizarea amestecurilor de metan și hidrogen, cercetările viitoare ar trebui să exploreze utilizarea altor combustibili alternativi, cum ar fi biogazul sau gazele de sinteză, în combinație cu hidrogenul. Este necesară o analiză aprofundată pentru a evalua modul în care caracteristicile fizico-chimice ale acestor amestecuri influențează parametrii arderii, cum ar fi viteza flăcării, temperatura de ardere, emisiile de poluanți și stabilitatea flăcării.

### 3. Dezvoltarea Metodelor Avansate de Modelare Numerică

Pentru a îmbunătăți înțelegerea proceselor complexe de ardere, cercetările viitoare ar trebui să includă dezvoltarea și implementarea unor metode CFD (Computational Fluid Dynamics) mai avansate, cum ar fi LES (Large Eddy Simulation) și DNS (Direct Numerical Simulation). Aceste metode permit o cunoaștere mai detaliată a curgerilor turbulente reactive și a fenomenelor asociate, precum autoaprinderea sau „flashback-ul”. De asemenea, ar putea fi benefică integrarea unor modele chimice complexe care să simuleze cu acuratețe reacțiile multiple și interacțiunile termochimice din timpul arderii amestecurilor de metan și hidrogen.

### 4. Implementarea Tehnologiilor pentru Reducerea Emisiilor

Reducerea emisiilor de NO<sub>x</sub> reprezintă o provocare majoră în arderea hidrogenului din cauza temperaturilor ridicate ale flăcării. Direcțiile viitoare de cercetare ar trebui să includă studii

aprofundate asupra tehnicilor de amestecare rapidă și uniformă a combustibilului cu aerul, pentru a evita zonele cu temperaturi locale ridicate care favorizează formarea de NO<sub>x</sub>. În plus, utilizarea tehnologiilor de post-tratare, cum ar fi catalizatorii de reducere selectivă a NO<sub>x</sub> (SCR), ar putea fi explorată pentru a elimina NO<sub>x</sub> din gazele de evacuare. O altă direcție importantă este optimizarea procesului de ardere prin ajustarea raportului de echivalență combustibil-aer și utilizarea unor configurații geometrice inovatoare de camere de ardere care permit o distribuție mai uniformă a temperaturii flăcării. Utilizarea tehnologiilor de injecție dublă sau în etape pentru alimentarea cu combustibil poate ajuta la controlul emisiilor de NO<sub>x</sub> prin asigurarea unei arderi mai complete și mai eficiente.

### **5. Investigarea Stabilizării Dinamice a Flăcării**

Un alt domeniu de cercetare important este investigarea stabilizării dinamice a flăcării în condiții de ardere variabilă. Flăcările bazate pe hidrogen au un comportament dinamic diferit față de cele bazate pe gaz natural, datorită vitezei de propagare mai mari și ratelor locale de eliberare a căldurii. Cercetările viitoare ar trebui să se concentreze pe analiza comportamentului termodinamic al acestor flăcări, utilizând tehnici de modelare analitică și metode experimentale avansate pentru a dezvolta strategii de atenuare a pulsațiilor termoacustice, asigurând astfel o funcționare stabilă a sistemului de ardere.

### **6. Integrarea Sistemelor de Ardere în Rețelele de Energie Regenerabilă**

În contextul creșterii proporției de surse regenerabile în sistemul energetic, este important să se investigheze modul în care sistemele de ardere adaptabile la schimbarea tipului de combustibil pot fi integrate eficient în rețelele energetice moderne. Cercetările viitoare ar putea explora impactul acestor sisteme asupra stabilității rețelei și eficienței energetice, contribuind astfel la tranziția către o industrie cu emisii reduse de carbon.

### **7. Dezvoltarea de Noi Materiale și Soluții Tehnice pentru Combustia cu Hidrogen**

Hidrogenul, prin caracteristicile sale unice de ardere, impune cerințe specifice asupra materialelor utilizate în componentele turbomotoarelor. Este esențial să se dezvolte noi materiale rezistente la temperaturi ridicate și coroziune, care să poată suporta mediile reactive și ciclurile de funcționare intense. Cercetările ar trebui să se concentreze pe evaluarea diferitelor aliaje și materiale compozite, precum și pe dezvoltarea de soluții tehnice pentru prelungirea duratei de viață a componentelor critice.

## 7. Referinte:

- [1] RO137923A0, Cameră de ardere cu preamestec, turbionare și diluție primară, Enache, Marius Ștefan Prisecaru, Tudor Silivestru, Valentin CÂrlĂnescu, RĂzvan Mangra, Andreea Cristina Florean, Florin Gabriel Kuncser, Radu Eugen ,RO-BOPI 1/2024, [https://www.osim.ro/images/Publicatii/Inventii/2024/bopi\\_inv\\_01\\_2024.pdf](https://www.osim.ro/images/Publicatii/Inventii/2024/bopi_inv_01_2024.pdf)
- [2] Nam J., Lee Y., Joo S., Yoon Y., Yoh J.J., Numerical analysis of the effect of the hydrogen composition on a partially premixed gas turbine combustor, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, pp. 6278–6286, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.066>.
- [3] Adam J. Gee , Douglas B. Proud , Neil Smith , Alfonso Chinnici , Paul R. Medwell, Hydrogen addition to a commercial self-aspirating burner and assessment of a practical burner modification strategy to improve performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.230>
- [4] Zaiguo Fu, Lichao Sui, Jin Lu, Jiang Liu, Peifen Weng, Zhuoxiong Zeng, Weiguo Pan, Investigation on effects of hydrogen addition to the thermal performance of a traditional counter-flow combustor, *Energy*, vol. 262, Part A, 2023, 125465, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125465>
- [5] Abdelhalim A., Abdelhafez A., Nemitallah M.A., Effects of non-premixed H<sub>2</sub> injection on the stability, shape, and combustion/emissions characteristics of premixed CH<sub>4</sub>/air flames: An experimental study, *Fuel*, vol. 365, 2024, 131213, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131213>
- [6] Marragou S., Magnes H., Poinot T., Selle L., Schuller T., Stabilization regimes and pollutant emissions from a dual fuel CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> and dual swirl low NO<sub>x</sub> burner, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, Issue 44, pp 19275-19288, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.033>
- [7] Laera D., Agostinelli P.W., Selle L., Cazères Q., Oztarlik G., Schuller T., Gicquel L., Poinot T., Stabilization mechanisms of CH<sub>4</sub> premixed swirled flame enriched with a non-premixed hydrogen injection, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, Iss. 4, pp 6355-6363, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.378>
- [8] R. Carlanescu, Cercetari numerice si experimentale asupra efectelor adaugarii de hidrogen in gazul metan, in camera de ardere a unei turbine cu gaze, Teza Doctorat, Scoala Doctorala: inginerie Mecanica si Mecatronica, Universitatea Politehnica Bucuresti, 2018
- [9] S.B. Pope, "Turbulent Flows", Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2000
- [10] C.M. Müller, N. Peters, Reduced kinetic mechanisms for premixed methanol flames, in: N. Peters, B. Roog (Eds.), *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, in: *Lecture Notes in Physics*, Springer-Verlag, Berlin, 1993, pp. 142–155.
- [11] Warnatz, J. "Rate coefficients in the C/H/O System, Chapter 5 in *Combustion Chemistry* (W.c. Gardiner Jr., ed.) Springer-Verlag, New York, pp 197-360, 1984
- [12] Yilmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, I., (2017). *Int J of Hydrogen Energy*, 42(40), 25744-25755.
- [12] Agarwal, A., Pitso, I (2020). *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1341-1349
- [13] Andreea Cristina Mangra, Razvan Carlanescu, Marius Enache, Florin Florean, Radu Kuncser, Numerical and experimental investigation of a micro gas turbine combustion chamber, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2022, № 3, p. 139-145 <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.139>