



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Școala doctorală „Inginerie Mecanică și Mecatronică”

TEZĂ DE DOCTORAT

Studiul performanțelor economice și emisiilor poluante ale unui motor cu aprindere prin scânteie alimentat cu gaz natural comprimat și hidrogen

Autor: Ing. Barbu Marius Cătălin

Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Chiriac Radu

Președinte comisie	Prof. Dr. Ing. Tudor PRISECARU	de la	Universitatea Politehnica București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Radu CHIRIAC	de la	Universitatea Politehnica București
Referent	Acad. Prof. Dr. Ing. Mihail-Viorel BĂDESCU	de la	Universitatea Politehnica București
Referent	Prof. Dr. Ing. Nicolae BURNETE	de la	Universitatea Tehnică din Cluj Napoca
Referent	Prof. Dr. Ing. Ilie DUMITRU	de la	Universitatea din Craiova

București
Septembrie 2023

Cuprins

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE ȘI MOTIVAREA ALEGERII TEMEI.....	2
CAPITOLUL 2. COMBUSTIBILII STUDIAȚI.....	4
2.1 GAZUL NATURAL COMPRIMAT.....	4
2.2 HIDROGENUL.....	5
CAPITOLUL 3. EMISIILE POLUANTE ȘI LEGISLAȚIA.....	5
CAPITOLUL 4. CICLURI DE CONDUCERE.....	5
4.1 WLTP.....	6
4.2 RDE.....	6
4.3 PEMS.....	7
CAPITOLUL 5. PROCEDURA ȘI REZULTATE RDE ÎN CADRUL GRUPULUI RENAULT.....	7
CAPITOLUL 6. STUDIU PRIVIND INFLUENȚA HIDROGENULUI ÎN AMESTEC CU GAZUL NATURAL.....	9
6.1. Metodologie și achiziție de date.....	9
6.2. Calibrarea modelului teoretic.....	9
6.3. Rezultate.....	12
CAPITOLUL 7. STUDIUL INFLUENȚEI RAPORTULUI DE COMPRIMARE ASUPRA FUNCȚIONARII MOTORULUI GNC-H₂.....	15
7.1. Configurarea simulării.....	15
7.2. Rezultate.....	17
CONCLUZII FINALE.....	23
CONTRIBUȚII PERSONALE.....	25
LISTĂ DE PUBLICAȚII.....	25
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	26

Cuvinte cheie: Gaz natural comprimat; Hidrogen; Emisii poluante; Motor cu aprindere prin scânteie; Fractal; Vibe 2 Zone; Raport de comprimare.

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE ȘI MOTIVAREA ALEGERII TEMEI

Odată cu cerințele din ce în ce mai stricte privind reglementările de poluare, producătorii de automobile încearcă să adapteze soluții alternative de propulsie folosind noi

surse de energie, altele decât combustibilii fosili. Astfel, o posibilă soluție alternativă o reprezintă gazul natural stocat în rezervoare sub presiune (200-250 bar), ce poartă numele de gaz natural comprimat (GNC), utilizat drept combustibil pentru vehiculele cu motoare termice.

O altă soluție alternativă este hidrogenul (H_2) care este un gaz incolor, inodor și inodoriu. Acest gaz nu include atomi de carbon în molecula sa; astfel după ardere (oxidare), nu rezultă gaze poluante precum bioxidul de carbon (CO_2), hidrocarburile (HC) și monoxidul de carbon (CO) [1, 2].

Amestecul de hidrogen și gaz natural în diferite fracții numite HGNC (Hydrogen-Natural Gas Mixture) poate fi considerat un combustibil pentru vehicul, fără a necesita modificări majore ale motorului cu ardere internă. Beneficiile acestor combustibili ar fi că sunt mai puțin poluanți, regenerabili și mai viabili din punct de vedere economic decât benzina [3].

Această lucrare își propune, plecând de la situația actuală a infrastructurii de alimentare cu gaz natural comprimat (GNC) și hidrogen până la adaptarea motoarelor cu ardere internă pentru acești combustibili alternativi în diferite proporții, să evidențieze modificările performanțelor, economicității și emisiilor poluante produse de acestea în condițiile în care s-ar trece la acești combustibili alternativi.

Sunt evidențiate rezultatele unor studii experimentale privind utilizarea gazului natural în amestec cu hidrogenul drept combustibil pentru motoarele cu aprindere prin scânteie ținând cont de legislația actuală privind emisiile poluante. Rezultatele arată avantajele unei arderi și viteze de ardere îmbunătățite în motorul cu gaz natural prin amestecarea cu hidrogenul.

Îmbogățirea cu hidrogen extinde limita de ardere a amestecurilor gaz natural comprimat-hidrogen (HGNC). Adăugarea de hidrogen (H_2) în fracțiuni volumetrice de 20-30% în gazul natural poate constitui o soluție eficientă pe termen scurt la problema gazelor cu efect de seră, fără a solicita modificări importante ale actualelor tehnologii folosite în motoare. Pentru a putea obține caracteristici de performanță semnificativ îmbunătățite se poate crește raportul de comprimare al motorului în cazul utilizării GNC și H_2 datorită cifrei octanice mai mari decât la benzină.

Lucrarea prezintă rezultatele unei investigații experimentale și teoretice privind performanțele, economicitatea și emisiile poluante realizate pe motorul de proveniență Renault HR09DET cu aprindere prin scânteie, în patru timpi, în 3 cilindri și injecție de combustibil multipunct alimentat cu gaz natural comprimat și amestecul gaz natural comprimat-hidrogen. Obiectiv: evidențierea influenței adaosurilor de hidrogen de diverse fracțiuni în amestec cu gazul natural comprimat asupra performanței, eficienței și emisiilor poluante în condițiile în care se menține puterea maximă a motorului la trecerea de la alimentarea cu benzină la cea cu GNC.

Pentru efectuarea investigației teoretice s-a realizat un model de simulare cu programul AVL Boost, care a fost calibrat folosind date experimentale obținute pentru motorul alimentat cu benzină. Modelul de simulare a permis adăugarea de hidrogen în paralel cu alimentarea cu gaz natural. Rezultatele evidențiază schimbările de performanță și emisiile de poluanți reglementate ca hidrocarburi nearse (HC), monoxid de carbon (CO) și emisii de oxizi de azot (NO_x).

A fost studiat impactul creșterii raportului de comprimare, folosind 2 legi de degajare a căldurii (Vibe 2 Zone și Fractal), pe acest motor cu aprindere prin scânteie la diferite proporții ale combustibililor alternativi și anume gazul natural comprimat și hidrogenul. Având în vedere cifra octanică mai mare pentru GNC și hidrogen comparativ cu benzina,

eficiența termică a motorului a fost îmbunătățită prin creșterea raportului de comprimare, fără a apărea fenomenul de detonație.

CAPITOLUL 2. COMBUSTIBILII STUDIAȚI

Odată cu normele tot mai stricte, producătorii de automobile sunt obligații să găsească noi soluții alternative de propulsie utilizând alte surse de energie decât cele provenite din combustibilii fosili. Motivele principale sunt de natură ecologică, economică și politică.

Benzina și motorina sunt combustibili fosili clasici (convenționali) de origine petrolieră, dar există și combustibili alternativi (neconvenționali) care nu sunt de origine petrolieră. Dintre aceștia, se apreciază că hidrogenul are un viitor deschis pentru alimentarea motoarelor cu ardere internă. Un alt combustibil neconvențional de interes este gazul natural comprimat (GNC) ce prinde contur odată cu normele tot mai stricte privind emisiile de CO₂.

2.1. Gazul natural comprimat

Una din soluțiile alternative este GNC (Gazul Natural Comprimat) sau GNCV (Gaz Natural Comprimat pentru Vehicule). GNC este „gazul natural stocat în recipiente sub presiune, prin comprimare, în scopul utilizării drept combustibil pentru vehicule cu motoare termice”, conform Legii Energiei nr. 123/2012. După comprimare la cca 1% din volumul ocupat în condiții normale, gazul natural rămâne în stare gazoasă și presiunea la care se comercializează este de 200-250 bar, în recipiente speciale. Gazul natural poate fi lichefiat la -163°C și stocat sub numele de Gaz Natural Lichefiat (GNL).

Gazul natural (GNC) este considerat un combustibil alternativ pentru vehicule din cauza avantajelor sale economice și de mediu ^[4]. Gazul natural comprimat este alcătuit în principal din metan (CH₄), dar conține frecvent urme de etan, propan, hidrogen sulfurat, azot, heliu, bioxid de carbon și vapori de apă ^[5].

Cu toate acestea, datorită vitezei de ardere lentă a GNC-ului și a arderii cu amestec sărac, motorul cu aprindere prin scânteie cu GNC are încă unele dezavantaje, cum ar fi eficiența termică scăzută, viteza de ardere mai mică, reducerea puterii motorului și creșterea consumului de combustibil ^[6].

Ca avantaj a gazului natural se numără cifra octanica mare de 130, ceea ce permite unui motor să funcționeze cu un raport de comprimare mai ridicat fără a apărea fenomenul de detonație. În plus, motoarele pe benzină și motorină pot fi ușor convertite în motoare cu gaz natural comprimat fără modificări structurale majore.

La finalul anului 2021, s-a estimat că la nivel mondial, circulau peste 30 de milioane de vehicule alimentate cu gaz natural comprimat, ceea ce îi conferă acestui combustibil un loc tot mai conturat în industria auto ^[7]. Dintre acestea peste 13 milioane de vehicule alimentate cu gaz natural comprimat sunt în Europa ^[7]. 4159 stații GNC și 648 stații GNL sunt raportate pentru Europa privind infrastructura actualizată la nivelul anului 2023.

Există trei tipuri de vehicule alimentate cu gaz natural:

- 1) Dedicat: Vehicule concepute pentru a funcționa numai pe gaz natural.
- 2) Bi-combustibil: Aceste tipuri de vehicule au două sisteme separate de combustibil. Acestea permit funcționarea fie pe gaz natural, fie pe benzină.
- 3) Combustibil dublu: În cazul vehiculelor grele, se utilizează o injecție pilot de motorină pentru a aprinde gazul natural.

2.2. Hidrogenul

Hidrogenul (H_2) este un gaz inodor, incolor și insipid. Este mai ușor decât aerul și arde cu o flăcără invizibilă. Este singurul gaz combustibil care nu conține atomi de carbon în molecula și astfel, în urma arderii (oxidării), nu rezultă gaze poluante cum ar fi monoxidul de carbon (CO) și bioxidul de carbon (CO_2). H_2 are cea mai înaltă conductivitate termică dintre toate gazele. Combinat cu oxigenul, flacăra hidrogenului atinge o temperatură de $2834^\circ C$. Are o putere calorică masică de 2,8 ori mai mare decât a benzinei și anume 121 MJ/kg. Viteza maximă de propagare a flăcării este de 8 ori mai mare iar vaporii de hidrogen nu sunt toxici [4].

Costul ridicat al unității masice de H_2 lichid constituie un dezavantaj al utilizării hidrogenului la motoare termice.

Datorită vitezei de ardere a hidrogenului, considerabil mai mare comparativ cu benzina, durata fazei de ardere în motor este redusă. Din acest motiv randamentul termic al unui motor cu ardere internă ce utilizează hidrogen este superior motoarelor cu ardere internă ce utilizează benzina. [8]. Din punct de vedere al autoaprinderii hidrogenul are o rezistență mai mare la auto-aprindere ($RON > 130$) deci poate fi utilizat pe motoare cu raport de comprimare ridicat. Cu toate acestea limita de inflamabilitate în aer apare la amestecuri foarte sărace ($\lambda > 10$) și din acest motiv amestecul aer-hidrogen se poate autoaprinde relativ ușor (comparativ cu benzina) de la piesele motorului care au temperatură ridicată. [8]

Utilizarea hidrogenului cu rol de combustibil pentru motoarele cu ardere internă sau pentru pilele de combustibil poate fi o alternativă la combustibili fosili.

În iulie 2020, Comisia Europeană a propus o strategie a hidrogenului pentru o Europă neutră climatic, ce urmărește accelerarea producerii de hidrogen curat și asigurarea rolului său la baza unui sistem energetic neutru climatic până în 2050 [9].

Extragerea hidrogenului se poate realiza din multiple surse, cum ar fi prin reformarea hidrocarburilor sau prin electroliza apei. Cea mai promițătoare tehnologie, pe termen lung, pare să fie electroliza apei (descompunerea apei în hidrogen și oxigen utilizând curent electric) deoarece utilizează ca materie primă apa iar curentul electric poate fi obținut din surse regenerabile (solară, eoliană) [8].

La sfârșitul anului 2022, 814 stații de alimentare cu hidrogen erau în funcțiune în întreaga lume, iar alte 315 stații sunt planificate pentru a fi construite. Dintre acestea în Europa sunt 254 de stații de hidrogen.

CAPITOLUL 3. EMISIILE POLUANTE ȘI LEGISLAȚIA

Emisiile poluante sunt dăunătoare sănătății și afectează calitatea aerului. Standardele de calitate a aerului sunt definite de Organizația Mondială a Sănătății (OMS) și aplicate în diferite regiuni ale lumii. Aceste emisii sunt reglementate în regiunile lumii prin diferite pachete legislative cunoscute sub numele de EU5, EU6, (Europa), ULEV, LEVII, LEVII, (SUA) etc.

CAPITOLUL 4. CICLURI DE CONDUCERE

Odată cu dezvoltarea tehnologiei și a schimbării condițiilor de trafic, testul de laborator privind consumul de combustibil și emisiile poluante a trebuit și el actualizat pentru a reflecta realitatea. Datorită evoluției în tehnologie și condițiile de mers, vechiul test de laborator numit New European Driving Cycle (NEDC – noul ciclu de conducere european) a devenit depășit. În acest sens, Uniunea Europeană a dezvoltat un nou test numit Procedura

Armonizată la Nivel Mondial de Testare a Vehiculelor Ușoare (WLTP - Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure).

Noul regulament EU6d privind emisiile a pus în aplicare testarea reală a emisiilor de conducere ca o cerință suplimentară începând cu 2017. Legislația privind emisiile în condiții reale de conducere prin regulamentul (UE) 2017/1151 (RDE - Real Driving Emission) adaugă drumul ca mediu pentru testarea și certificarea emisiilor [9].

Pentru a face față acestor noi provocări RDE, este nevoie de un sistem portabil de măsurare a emisiilor portabile (PEMS), bine conceput, compact, modular și ușor de instalat în vehiculul al căror emisii poluante urmează să fie testate.

4.1. WLTP

În condițiile definite de legea UE, testul de laborator Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP – procedura armonizată la nivel mondial de testare a vehiculelor ușoare) este folosit pentru a măsura consumul de combustibil și emisiile de CO₂ de la autoturisme precum și emisiile lor de poluanți.

Noua procedură WLTP se bazează pe noile cicluri de conducere (WLTC - Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles) pentru a măsura consumul mediu de combustibil, emisiile de CO₂, precum și emisiile de poluanți de către autoturisme și vehicule comerciale ușoare.

Ciclul de conducere WLTP este împărțit în patru părți cu viteze medii diferite: mică, medie, mare și foarte mare. Fiecare parte conține o serie de faze de conducere, opriri, accelerare și faze de frânare. Pentru un anumit tip de autoturism, fiecare configurație a motorului este testată cu WLTP pentru cea mai ușoară (cea mai economică) și cea mai grea (cea mai puțin economică) versiune.

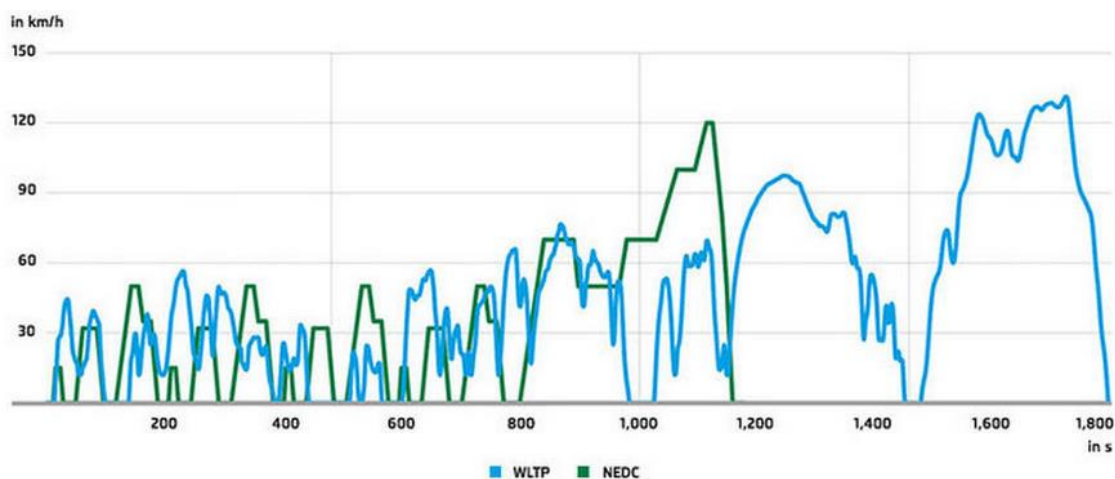


Figura 4.1: Diferențe între fazele celor două cicluri NEDC și WLTP [10]

4.2. Nivelul real al emisiilor în trafic - RDE

Chiar dacă ciclul WLTP are condiții de testare mult mai complexe comparativ cu vechiul ciclu NEDC, acestea nu țin totuși cont de toți parametrii exploatării reale a unui autovehicul. De aceea a fost adăugat testul pentru nivelul real al emisiilor în trafic RDE. Acesta se efectuează pe drumurile publice, în condiții reale de exploatare și vine în completarea certificării WLTP prin verificarea nivelului real al consumului și al emisiilor poluante.

În conformitate cu RDE, un autovehicul este condus pe drumurile publice într-o gamă largă de diferite condiții. Echipamentele specifice instalate pe vehicul colectează date pentru a verifica dacă emisiile poluante declarate conform legislație în vigoare, cum ar fi NO_x, nu sunt depășite.

4.3. PEMS

PEMS – Sistem portabil de măsurare a emisiilor (Portable Emissions Measurement System) este un dispozitiv suficient de mic și de ușor, astfel încât să poată fi atașat în vehiculul al căror emisii poluante urmează să fie testate.

Utilizarea PEMS este vastă, însă în ultimii ani s-a focalizat pe verificarea și optimizarea emisiilor poluante ale motorului, în condiții reale. Acest sistem este capabil să determine nivelul de poluanți al unui automobil, cât și densitatea și numărul de particule emise (PM și PN). Emisiile reglementare măsurate, la acest moment, folosind PEMS sunt: CO, HC, NO_x, NMHC, PN + CO₂.

Scopul utilizării PEMS, odată cu normele tot mai stricte a ajuns să fie un sistem obligatoriu pentru autoritățile competente, pentru a verifica respectarea limitelor de emisii impuse de norma de depoluare, în condiții reale, nu numai în laborator.

CAPITOLUL 5. PROCEDURA ȘI REZULTATE RDE ÎN CADRUL GRUPULUI RENAULT

În cadrul Centrului Tehnic Titu al grupului Renault se realizează și testarea RDE pentru diferite tipuri de autovehicule și motorizări specifice cu noul ciclu de conducere WLTP. Pentru realizarea acestor teste este o procedură complexă și bine definită.

După calculul masei pentru autovehiculul ce urmează a fi testat este nevoie de testele de corelare realizate în bancul cu rulouri conform ciclului WLTC destinate pentru validarea dispozitivului de măsură PEMS. Testele se realizează în paralel cu bancul cu rulouri analizând rezultatele obținute prin comparația cu PEMS urmărind să nu se depășească limitele impuse de regulament.

În cadrul grupului Renault există o motorizare cu benzină având denumirea HR09DET destinat utilizării drept combustibil a gazului natural comprimat. Acesta a fost adaptat pe un motorul cu aprindere prin scânteie supraalimentat de 898 cm³. Versiunea pe gaz natural comprimat având puterea totală de 66 kw, cuplul maxim de 140 Nm, norma de poluare Euro6b pe o caroserie de Logan, cu o transmisie manuală în 5 trepte.

Rezultatele comparative privind cele mai importante emisii poluante obținute pe bancul cu rulouri și rezultatele obținute pe vehicul în testele pe stradă cu ajutorul PEMS pentru cele două cazuri benzină și gaz natural comprimat sunt prezentate în figurile 5.1, 5.2 și 5.3. Emisiile comparate sunt CO₂, NO_x și CO cu mențiunea că vehiculul în momentul testelor având o calibrare de test care diferă de cea oficială folosită la testele de omologare și cu care este echipat vehiculul de serie.

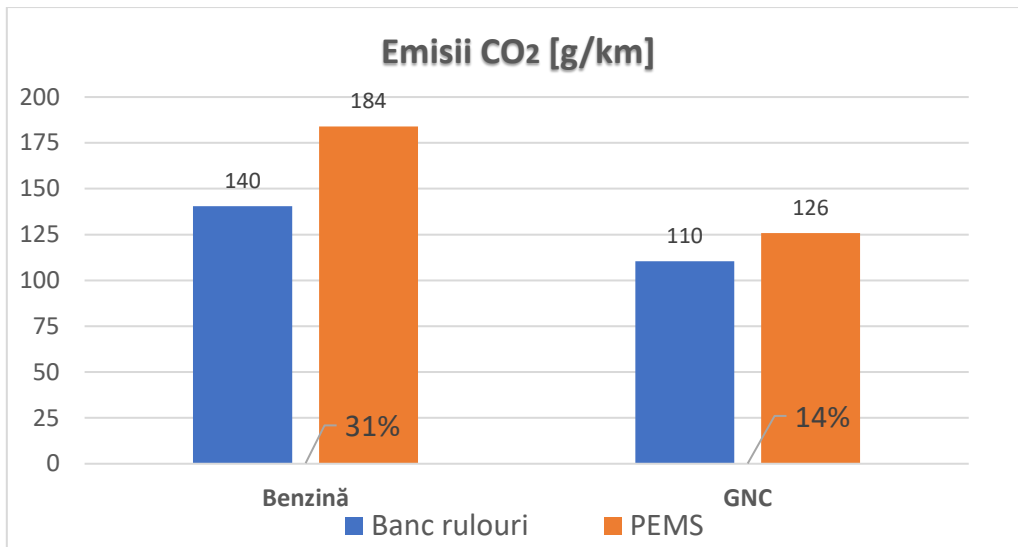


Figura 5.1: Comparația emisiilor de CO₂ [11]

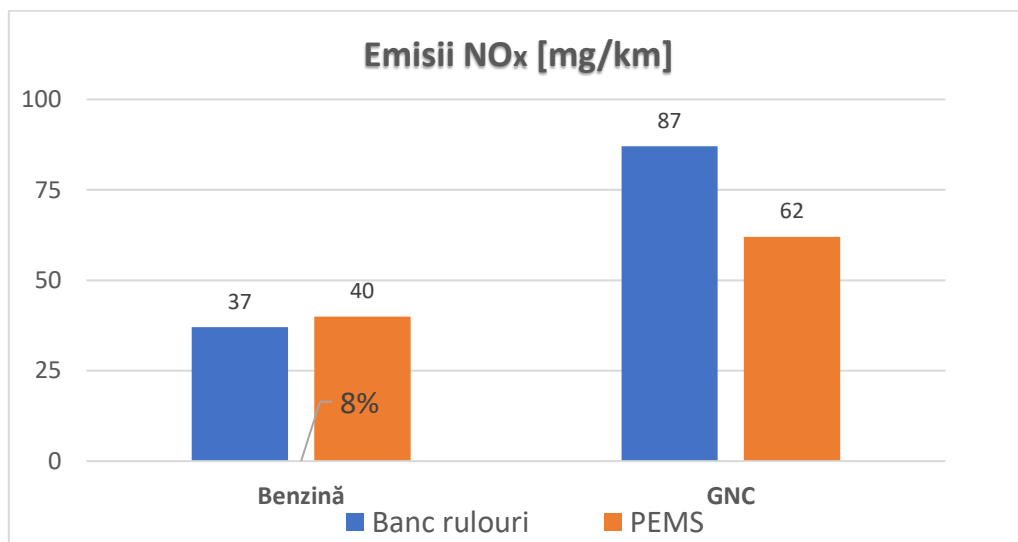


Figura 5.2: Comparația emisiilor de NO_x [11]

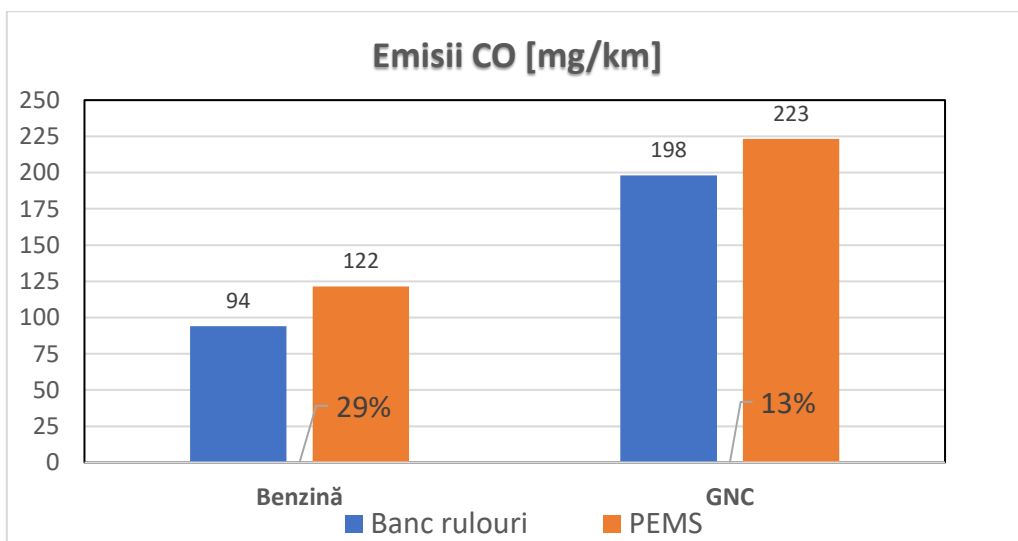


Figura 5.3: Comparația emisiilor de CO [11]

CAPITOLUL 6. STUDIU PRIVIND INFLUENȚA HIDROGENULUI ÎN AMESTEC CU GAZUL NATURAL

Procedura de testare cea mai utilizată pentru omologarea vehiculelor se numește WLTP și se bazează pe ciclul WLTC.

În acest sens au fost determinate cele mai utilizate puncte de funcționare ale motorului după un ciclul WLTC, rezultând 4 regimuri de funcționare de interes, care au cele mai mari ponderi și sunt indicate în figura 6.1 (turația motorului / Presiunea Medie Efectivă): ^[12]

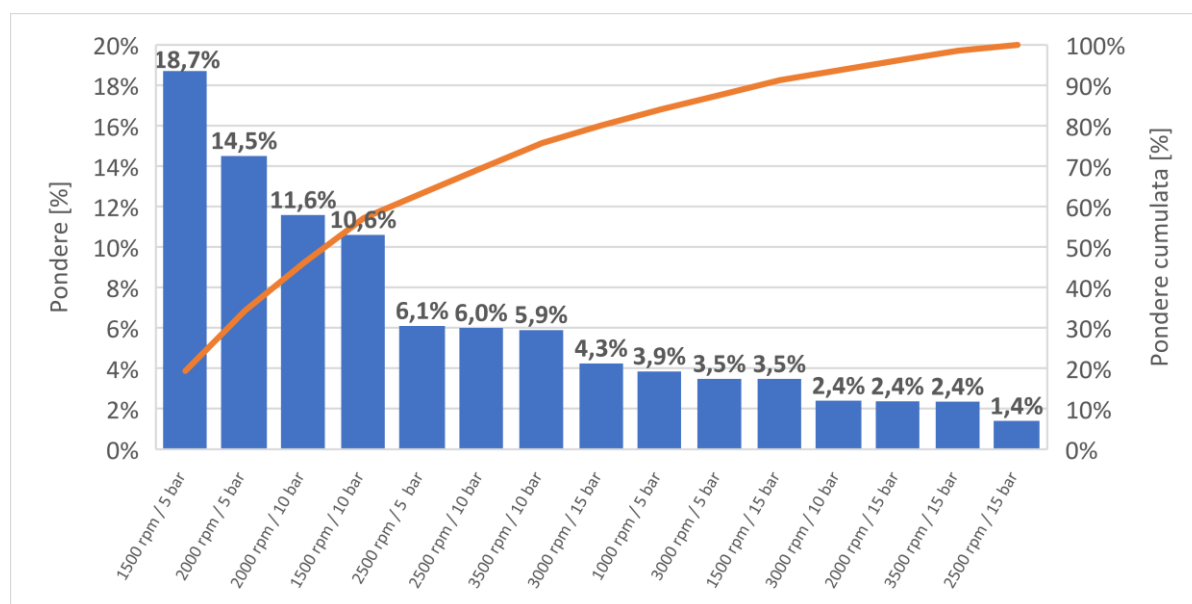


Figura 6.1 Histograma cu condițiile de funcționare a motorului (turația motorului / PME) în care a fost petrecut cel mai mult timp în ciclul WLTP ^[12]

6.1. Metodologie și achiziție de date

Pentru acest studiu a fost luat în considerare motorul supraalimentat cu benzină fabricat de grupul Renault având denumirea HR09DET.

Au fost efectuate teste experimentale pe un banc de motor la Centrul Tehnic Titu cu achiziția automată a tuturor parametrilor necesari efectuării calibrării modelului teoretic.

6.2. Calibrarea modelului teoretic

Funcționarea motorului a fost simulată cu ajutorul unui model termodinamic dezvoltat cu instrumentul AVL Boost (Figura 6.2) utilizând legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone. Calibrarea modelului a fost efectuată conform specificațiilor producătorului pentru funcționarea motorului cu benzină. Componentele principale ale modelului sunt enumerate ca: TC1 – Turbocompresor, CL1 - Filtru de aer, CO1 – Răcitor de aer de supraalimentare, TH1 - Clapeta de accelerație, PL1 – Galerie de admisie, C1, C2, C3 - Cilindri motor, PL2 - Galerie de evacuare, CAT1 - Catalizator, WG1 - Waste Gate, SB1 și SB2 - limitele sistemului.

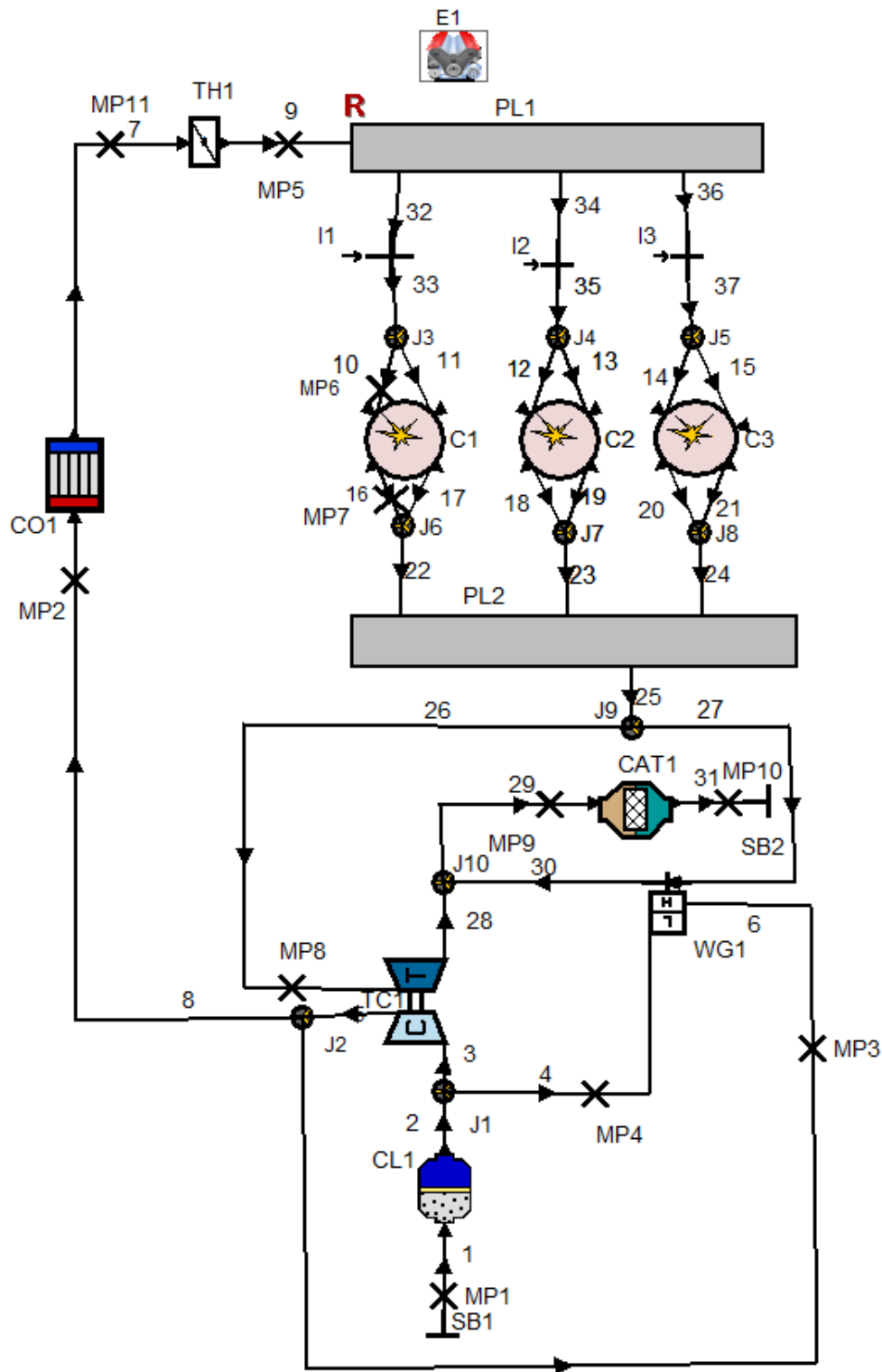
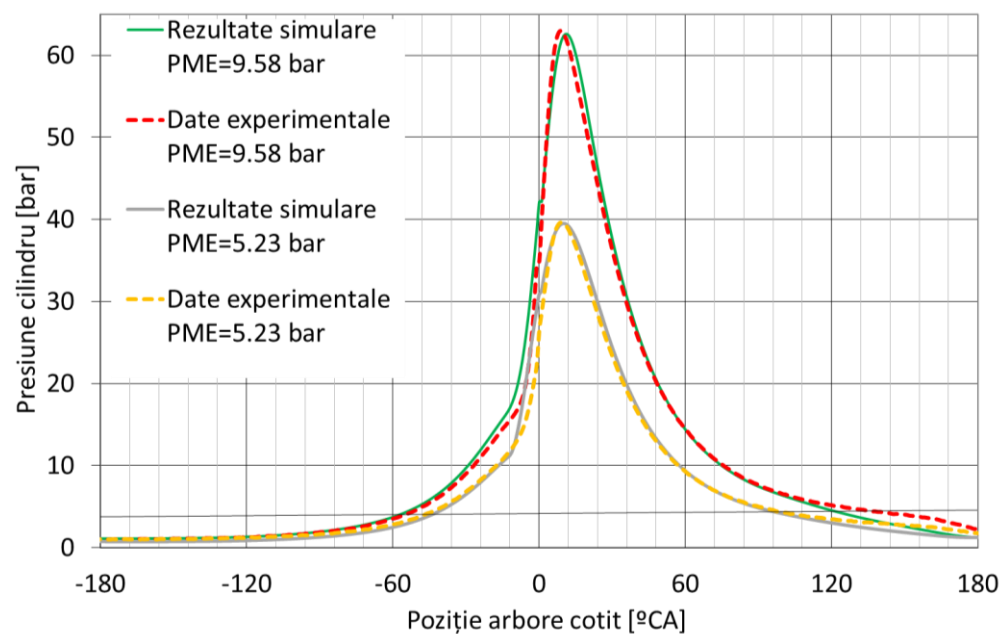


Figura 6.2 Modelul simbolic al motorului în AVL Boost [13]

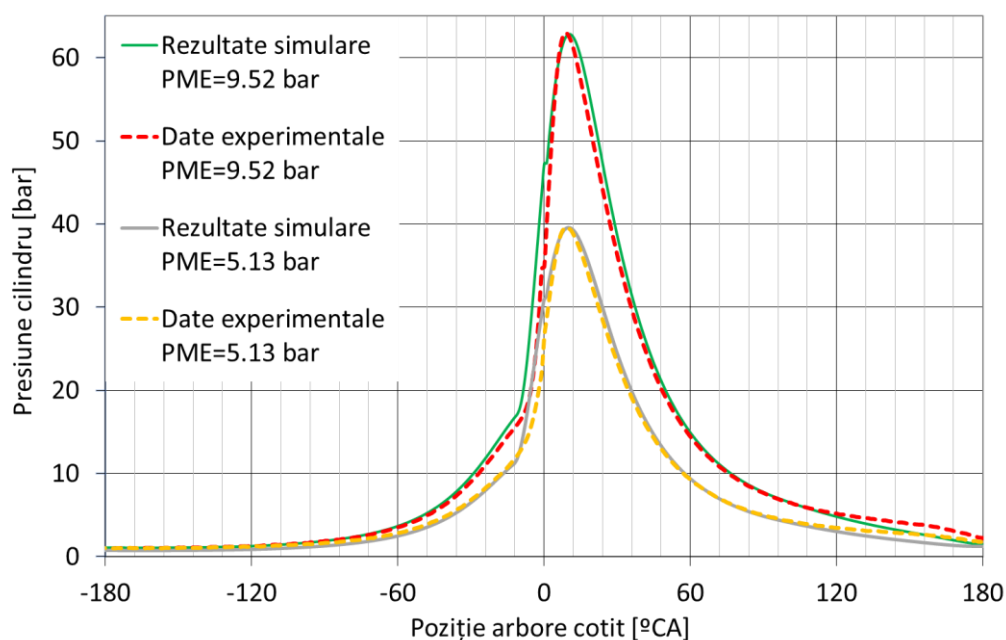
Calibrarea modelului a fost realizată prin compararea rezultatelor experimentale obținute pe bancul motorului cu cele obținute prin simulare cu motorul alimentat cu benzină comercială (cu etanol 7%) pentru cele 4 condiții de funcționare selectate. Următorii parametri de măsurare din testele pe bancul motorului au fost menținuți constanți pentru dezvoltarea modelului și pentru calibrarea acestuia: consumul de combustibil, debitul masic de aer,

unghiul clapetei, începutul arderii (SOC), presiunea medie efectivă de frecare (FMEP) și presiunea în galeria de admisie. Cu toate acestea, în etapa de calibrare, au fost variați mai mulți parametri, cum ar fi: durata arderii (CD), parametrul de formă (SHP), multiplicatorul cinetic CO, multiplicatorul de post-procesare NO_x și multiplicatorul de post-oxidare HC.

Realizarea calibrării modelului pe baza datelor obținute experimental este precisă, iar acuratețea este în limita de 5% pentru PME, presiunea maximă și unghiul presiunii maxime pentru condițiile de funcționare selectate. Calibrarea puterii a fost efectuată cu diferențe relative de până la 2% atât la turația de 1500 rpm, cât și la 2000 rpm.



a) 1500 rpm



b) 2000 rpm

Figura 6.3. Presiunea experimentală și simulată din cilindru a) la 1500 rpm cu PME de 5,23 și 9,58 bari, b) la 2000 rpm cu PME de 5,13 și 9,52 bar

Calibrarea pentru emisiile reglementate de HC, CO și NOx a fost realizată cu o precizie bună pentru toate cele 4 condiții de funcționare cu abateri relative de până la 1%. Rezultând o simulare cu diferențe relative mai mici de 2% între datele experimentale și rezultatele simulărilor s-a putut aprecia ca modelul este viabil și predictiv și în acest fel el poate fi utilizat pentru alte simulări diferite de cele de calibrare.

6.3. Rezultate

După calibrarea modelului pentru funcționarea cu benzină, a fost efectuat un studiu de simulare pentru a înțelege influența alimentării motorului cu gaz natural și hidrogen asupra performanței motorului și a emisiilor poluante comparativ cu rezultatele obținute pentru alimentarea cu benzină. Simulările au fost făcute păstrând constant raportul aer-combustibil ($\lambda=1$) pentru 4 combustibili utilizați: benzină E7, metan 100%, metan îmbogățit cu hidrogen 20% v/v și metan îmbogățit cu hidrogen 30% v/v. Același raport aer-combustibil ($\lambda=1$) a fost menținut constant prin modificarea masei de combustibil injectat fără modificarea celorlalți parametri.

Figura 6.4 prezintă rezultatele obținute pentru puterea efectivă; se poate observa o scădere de până la 15%, fiind mai evidentă cu cât cantitatea de hidrogen este mai mare. Această diferență se datorează scăderii cantității de aer care intră în motor, aerul fiind înlocuit cu combustibilul gazos aspirat în interiorul cilindrului prin canalul supapei de admisie (figura 6.4); tendința obținută pentru puterea efectivă este similară cu cea a debitului masic de aer.

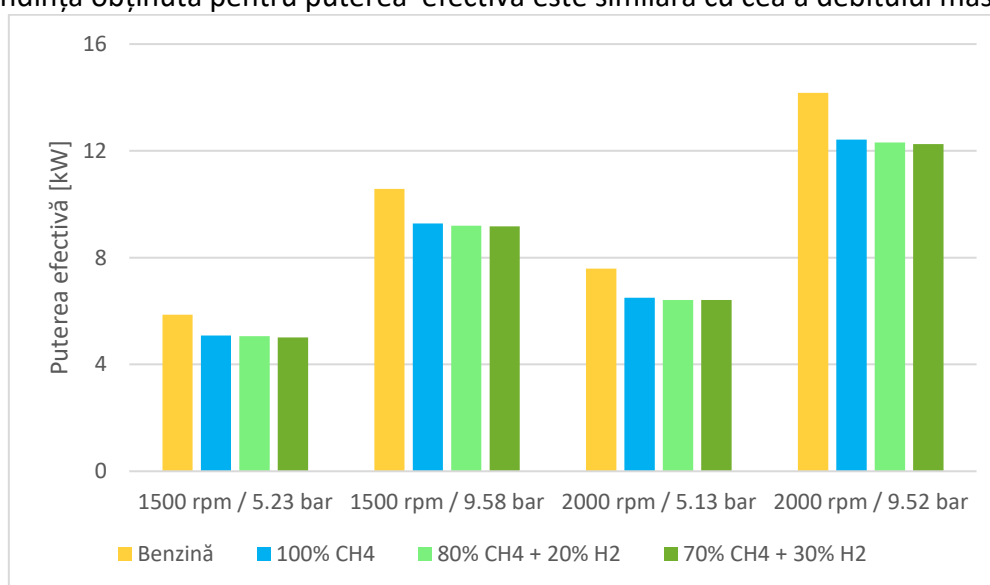


Figura 6.4. Evoluția puterii efective în funcție de combustibilul utilizat pentru cele 4 condiții de funcționare

Din figura 6.5 se poate remarca că cu cât fracția de hidrogen este mai mare, cu atât fenomenul de înlocuire a aerului de admisie cu combustibil gazos este mai accentuat, efectul fiind evident deoarece hidrogenul are densitatea cea mai mică.

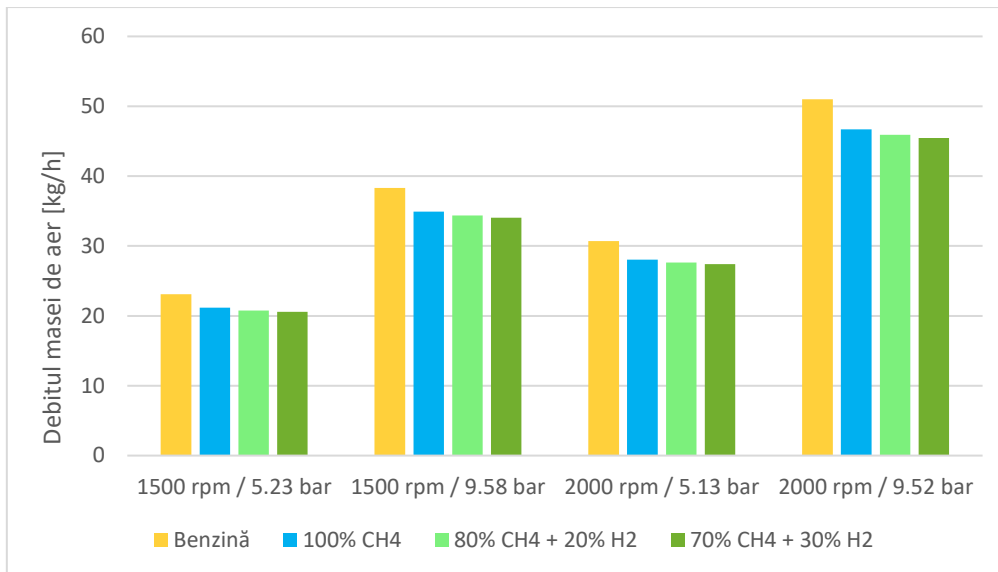


Figura 6.5. Evoluția debitului masic de aer în funcție de combustibilul utilizat pentru cele 4 condiții de funcționare

Importanța injecției directe a combustibilului gazos poate fi astfel evidențiată atunci când performanța motorului obținută la alimentarea cu benzină trebuie menținută folosind același debit de aer indus în cilindrii motorului.

Figurile 6.6 și 6.7 arată rezultatele pentru emisiile reglementate de HC și CO. Se pot observa scăderi semnificative de până la 65% pentru HC și 55% pentru CO. Aceste scăderi pot fi atribuite unei mai bune omogenități în cazul amestecului „combustibil gazos-aer” (pentru combustibilii GNC și H₂) comparativ cu amestecul „combustibil lichid-aer” (pentru benzină).

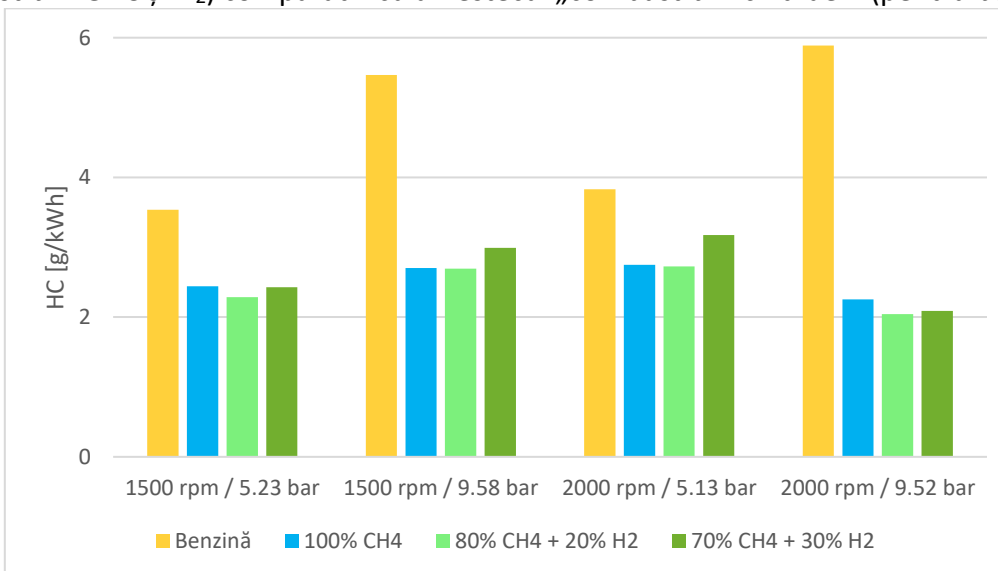


Figura 6.6. Evoluția HC în funcție de combustibilul utilizat pentru cele 4 condiții de funcționare

O mică creștere a emisiilor de HC ar putea fi observată și atunci când cantitatea de hidrogen crește de la 20% la 30% v/v. Acest lucru se poate datora vitezei mai mari de ardere a hidrogenului în comparație cu gazul natural care diminuează timpul disponibil necesar reacțiilor de oxidare a hidrocarburilor.

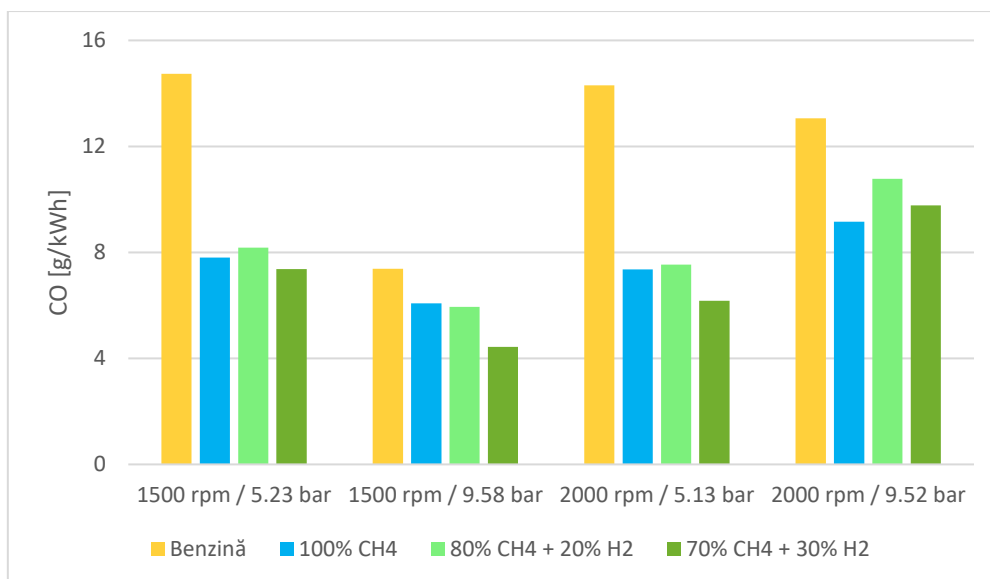


Figura 6.7. Evoluția CO în funcție de combustibilul utilizat pentru cele 4 condiții de funcționare

Scăderea emisiilor de CO prezentată în figura 6.6 prin creșterea sarcinii și printr-o cantitate mai mare de îmbogățire cu hidrogen este atribuită efectului termic mai mare care accelerează oxidarea cinetică chimică a CO umed la temperaturi ridicate pentru toți combustibilii gazoși. Acest efect pare să nu fie atât de evident la o fracție scăzută de 20% hidrogen. Rezultate similare au fost raportate de Keshavarz ^[14].

Emisiile de NO_x depind de vârful de temperatură maximă din interiorul cilindrului, cantitatea de oxigen disponibilă și timpul de rezidență (durata arderii la un nivel ridicat de temperatură). O creștere a emisiilor de NO_x se observă în figura 6.8. la valori mai mari ale PME pentru ambele turații ale motorului de 1500 rpm și 2000 rpm; rezultate similare au fost obținute de Agarwal ^[3].

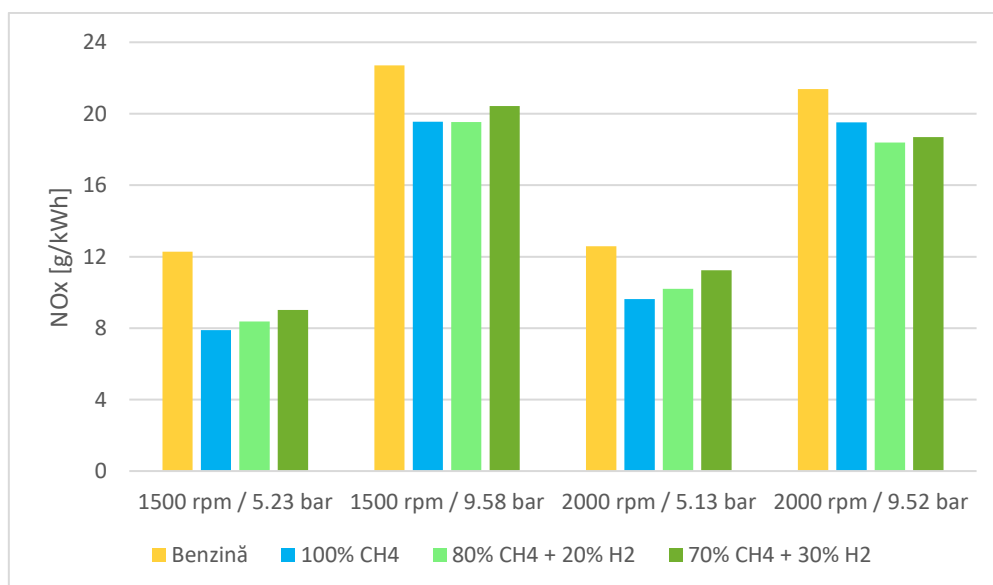


Figura 6.8. Evoluția NO_x în funcție de combustibilul utilizat pentru cele 4 condiții de funcționare

Există o scădere a emisiilor de NO_x cu o medie de 15% atunci când combustibilul a fost schimbat din benzină în gaz natural comprimat și apoi o ușoară creștere a NO_x prin îmbogățirea cu hidrogen (figura 6.8).

Aceste variații sunt bine corelate cu variația temperaturilor maxime (figura 6.9) deoarece nu există o modificare a cantității de oxigen pentru amestecurile stoechiometrice la lambda =1. Creșterea temperaturii precum și a emisiilor de NO_x, când motorul funcționează cu o fracțiune de hidrogen mai mare, este atribuită unei viteze mai mari de degajare a căldurii; aceeași concluzie fiind raportată și de Mehra [15].

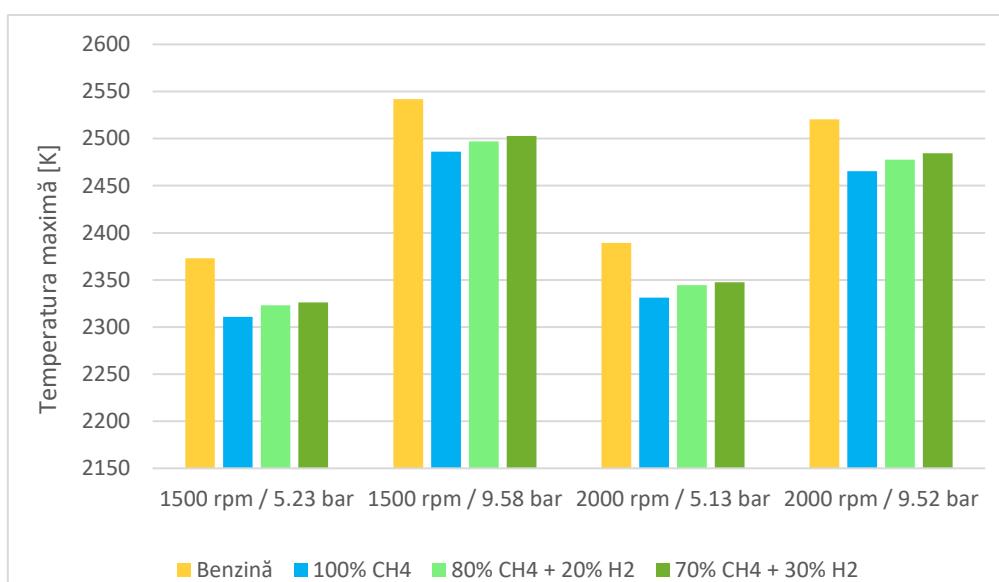


Figura 6.9. Evoluția temperaturii maxime în funcție de combustibilul utilizat pentru cele 4 condiții de funcționare

CAPITOLUL 7. STUDIUL INFLUENȚEI RAPORTULUI DE COMPRIMARE ASUPRA FUNCȚIONĂRII MOTORULUI GNC-H₂

O soluție pentru creșterea eficienței motoarelor termice o reprezintă creșterea raportului de comprimare a acestora, care poate de asemenea și compensa scăderea puterii. În funcție de cât de mult se dorește creșterea acestui raport de comprimare este nevoie de schimbarea arhitecturii pistonului. Acest lucru poate fi realizat numai prin utilizarea combustibililor cu o cifră octanică mai mare pentru a evita fenomenul nedorit de detonație. Doi dintre cei mai studiați combustibili cu o cifră octanică mai mare decât benzina sunt gazul natural și hidrogenul. Pentru ca un motor termic să poată funcționa cu combustibili gazoși necesită adaptarea sistemului de alimentare. Mai multe studii au fost efectuate prin simulare și investigații experimentale pentru a evidenția avantajele și dezavantajele acestor modificări. [15]

7.1. Configurarea simulării

A fost studiat impactul asupra performanțelor și emisiilor poluante în cazul alimentării motorului cu GNC și hidrogen în diferite fracțiuni volumetrice: 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70, 80%, 90% și 100% H₂. Pentru fiecare amestec de combustibil, a fost efectuat un studiu parametric privind influența raportului de comprimare asupra performanței și emisiilor motorului, luând în considerare următoarele valori: 9,5, 9,7, 10, 10,5, 11 și 11,5. Studiul a fost realizat folosind instrumentul de simulare AVL Boost v2019.1.

Funcționarea motorului a fost simulată folosind programul AVL Boost utilizând același model prezentat anterior dar cu o lege de degajare a căldurii (Fractal) care permite cuplarea cu arhitectura (geometria pistonului, chiulasei) forma camerei de ardere, amplasarea bujiei diferită față de cea anterioară (Vibe 2 Zone).

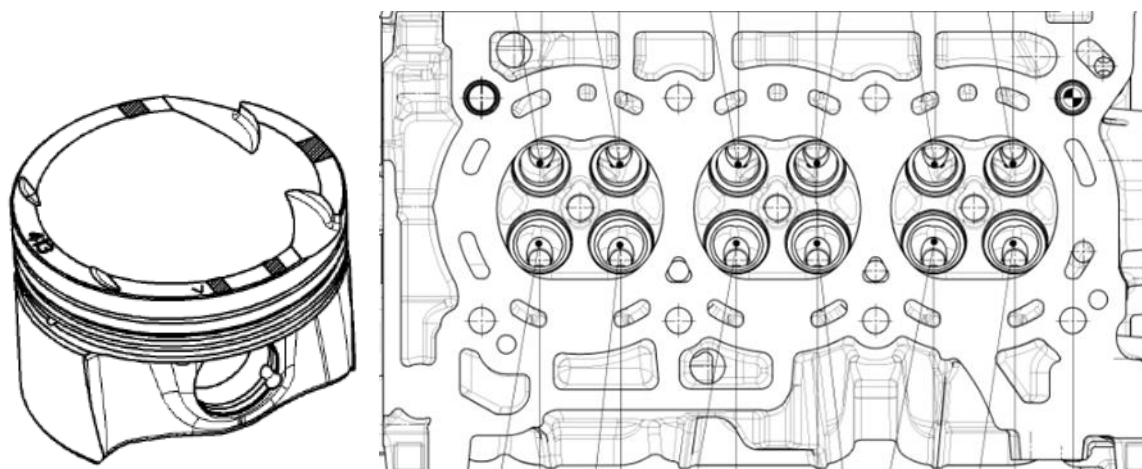


Figura 7.1. Geometria pistonului și a chiulasei motorului real ^[11]

Componentele principale ale acestui model au rămas aceleași ca la studiul anterior. Modelului de simulare a fost realizat având la bază același motor real HR09DET de producție Renault.

Modelul de ardere termodinamică cu două zone este definit în secțiunea Modele de ardere - Vibe 2 Zone. Caracteristicile gazului sunt calculate folosind modelul cu două zone pentru încărcătura proaspătă rămasă (zona nearsă) și pentru produșii de ardere (zona cu gaze arse).

Tabelul 1 prezintă valorile efective de calibrare cu abaterile relative pentru emisiile reglementate de CO, NO_x, HC, puterea efectivă, presiune medie efectivă, presiune maximă, unghiul de presiune maximă și consumului specific de combustibil. După calibrare s-au obținut diferențe de până la 4% pentru puterea efectivă, până la 1,7% pentru HC, până la 9,5% pentru CO și 2,3% pentru NO_x.

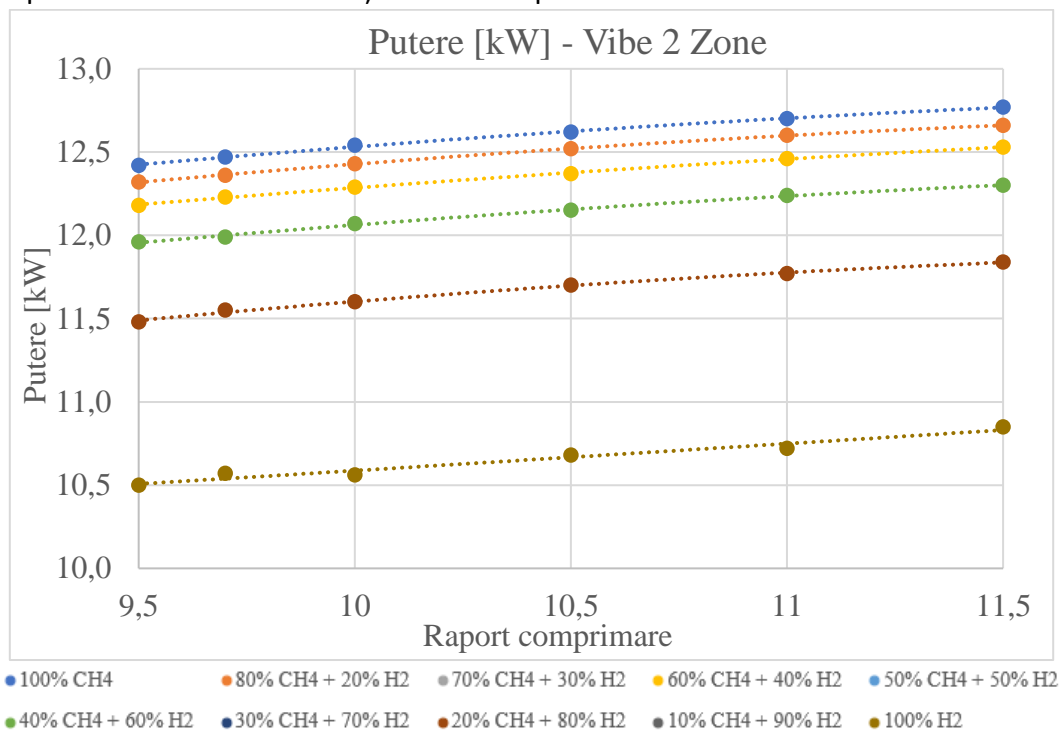
Tabelul 1. Rezultatele calibrării

2000 rpm / 9.52 bar	Rezultate exp.	Rezultate sim. Vibe 2 Zone	Rezultate sim. Fractal	Deviații relative Vibe 2 Zone	Deviații relative Fractal
Putere [KW]	14,27	14,17	14,84	-0,7%	4,0%
CO [g/kWh]	13,06	13,06	14,30	0,0%	9,5%
HC [g/kWh]	5,93	5,89	6,03	-0,7%	1,7%
NO _x [g/kWh]	21,54	21,37	21,05	-0,8%	-2,3%
Presiune medie efectivă [bar]	9,52	9,47	9,91	-0,5%	4,1%
Presiune maximă [bar]	63,01	62,87	63,31	-0,2%	0,5%
Unghiul de pres. maximă [deg]	9	9,14	13,5	1,6%	50,0%
CSC [g/kWh]	258	253	242	-1,9%	-6,2%

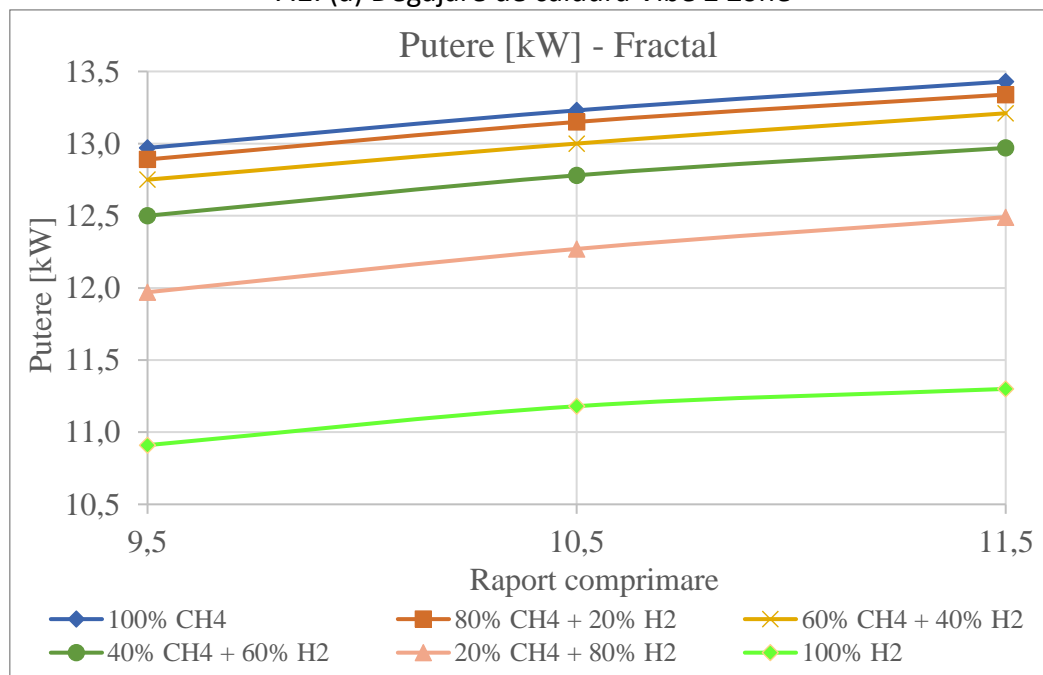
7.2. Rezultate

Această secțiune prezintă rezultatele obținute pentru fiecare model de degajare a căldurii aplicat, și anume Vibe 2 Zone și Fractal.

O creștere a puterii efective de până la 3,3% a fost obținută pentru Vibe 2 Zone și până la 4,3% pentru Fractal, între rapoartele de comprimare de 9,5 și 11,5, pentru toate tipurile de combustibili, prezentate în figura 7.2 a și b. Creșterea puterii se datorează creșterii raportului de comprimare ce induce o desfășurare mai rapidă a arderii.



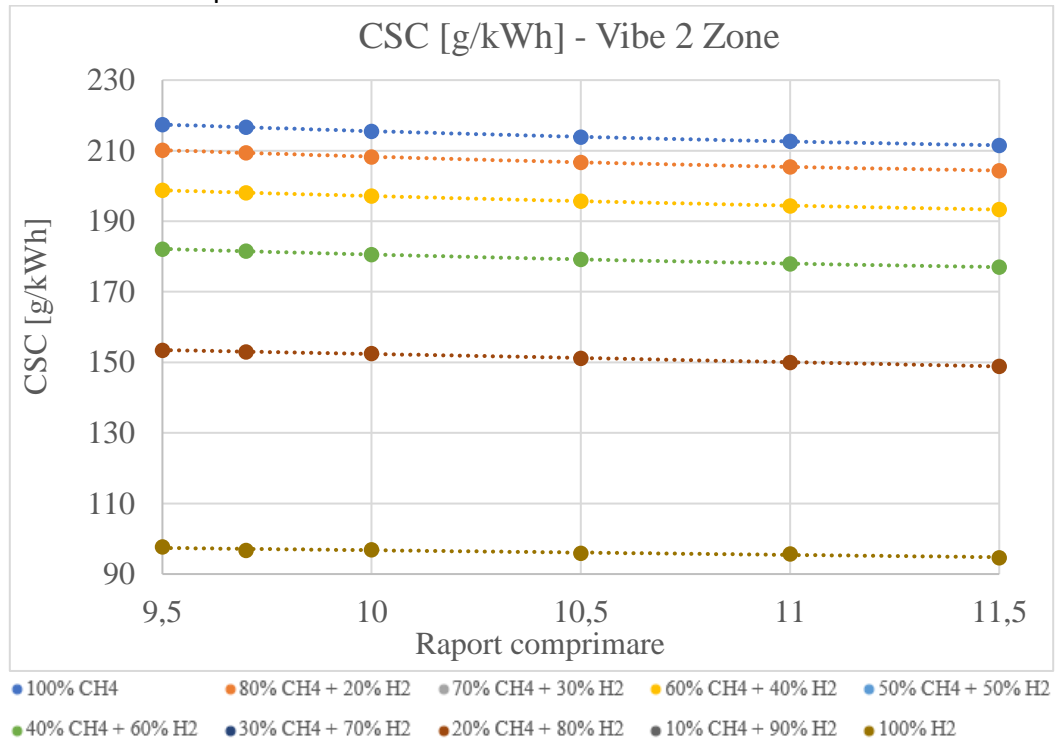
7.2. (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone



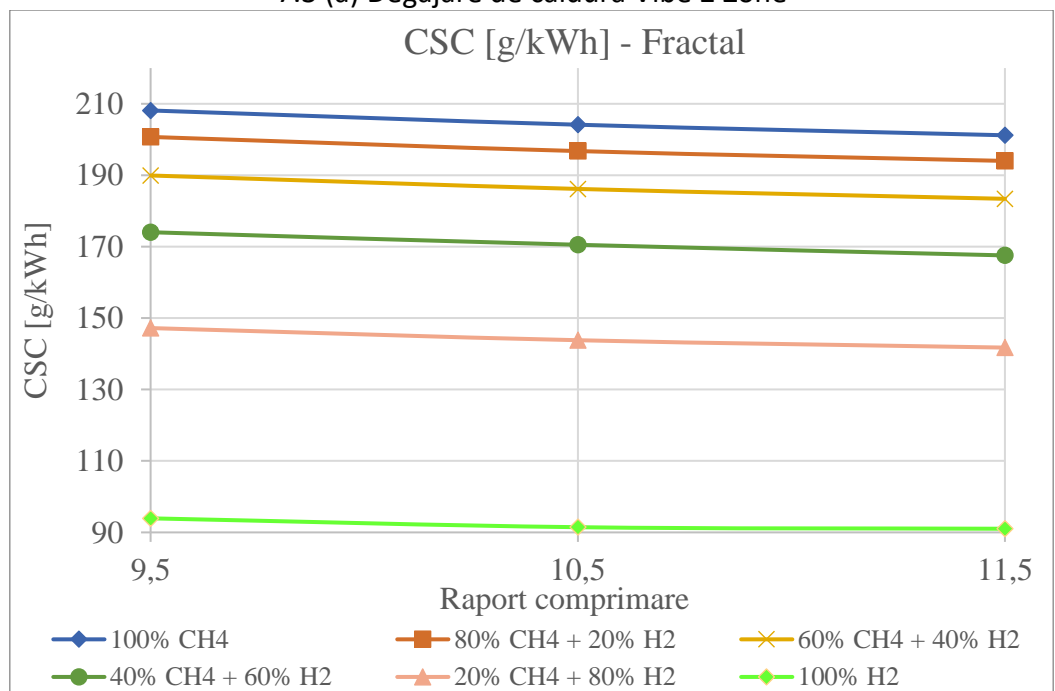
7.2. (b) Degajare de căldură Fractal

Figura 7.2. Evoluția puterii efective pentru cele 10 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare

Figura 7.3 a și b prezintă evoluția consumului specific de combustibil (CSC) cu creșterea rapoartelor de comprimare. O scădere de până la 3,1% a fost obținută pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 3,7% pentru legea de degajare a căldurii Fractal, comparând raportul de comprimare de 9,5 și 11,5, pentru toate tipurile de combustibili. Scăderea consumului specific de combustibil se datorează creșterii raportului de comprimare care duce la creșterea randamentului motorului prin scurtarea duratei arderii și creșterea temperaturii maxime pe ciclu mai evidentă în cazul modelului Fractal de ardere.



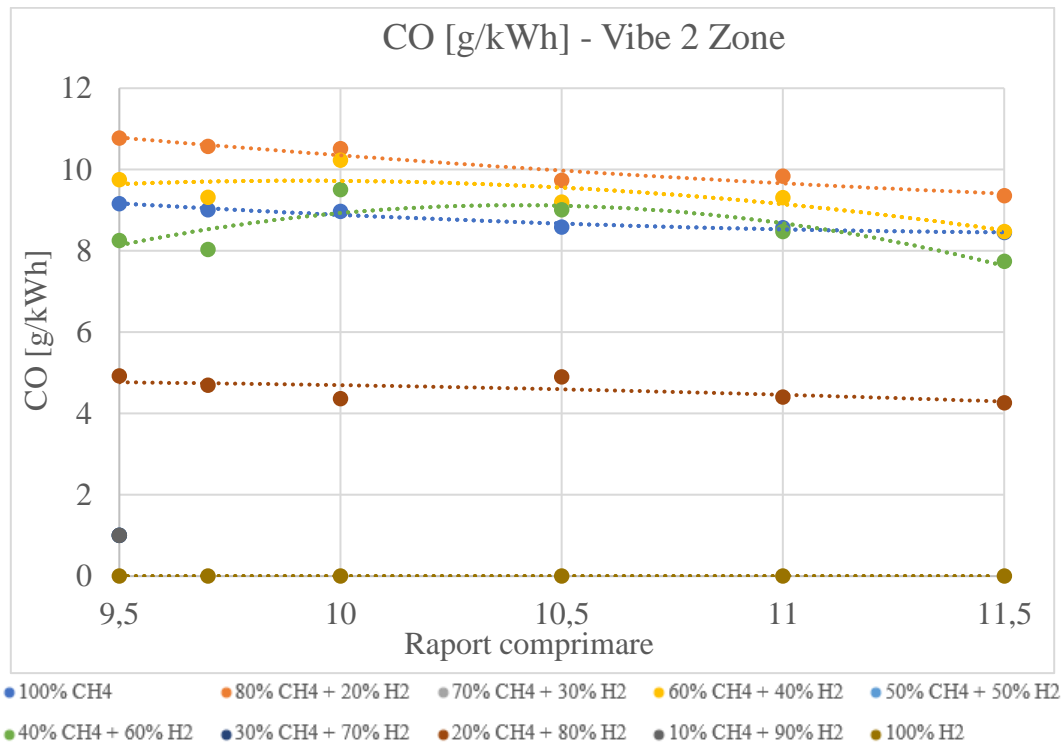
7.3 (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone



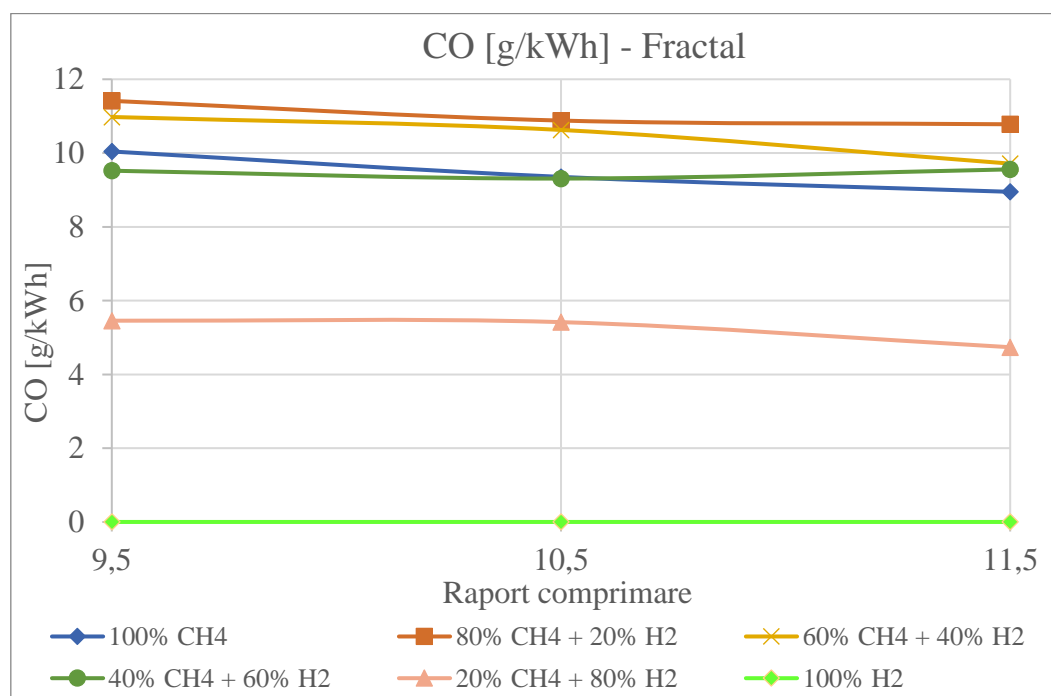
7.3 (b) Degajare de căldură Fractal

Figura 7.3. Evoluția CSC pentru cele 10 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare

Figura 7.4 a și b prezintă evoluția CO cu creșterea rapoartelor de comprimare. S-a obținut o scădere de până la 19,7% pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 13,2% pentru legea de degajare a căldurii Fractal, comparând raportul de comprimare de 9,5 și 11,5, pentru toate tipurile de combustibili. Scăderea duratei arderii poate determina reducerea nivelului emisiilor de CO deoarece timpul de oxidare a carbonului până la CO₂ se scurtează.



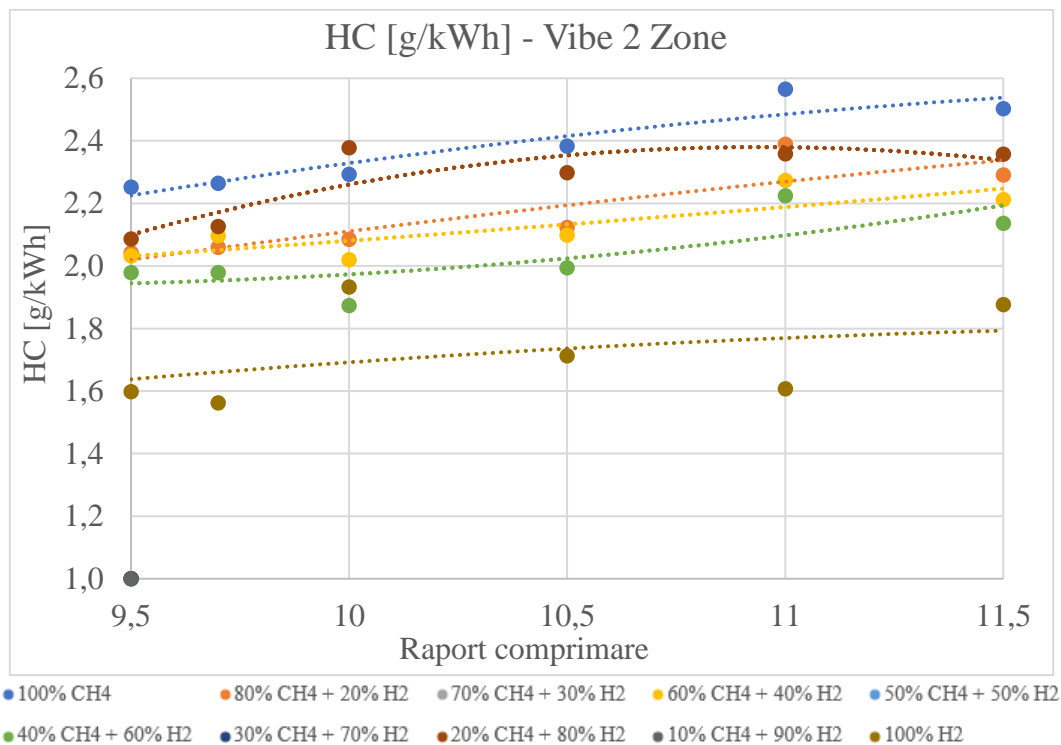
7.4. (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone



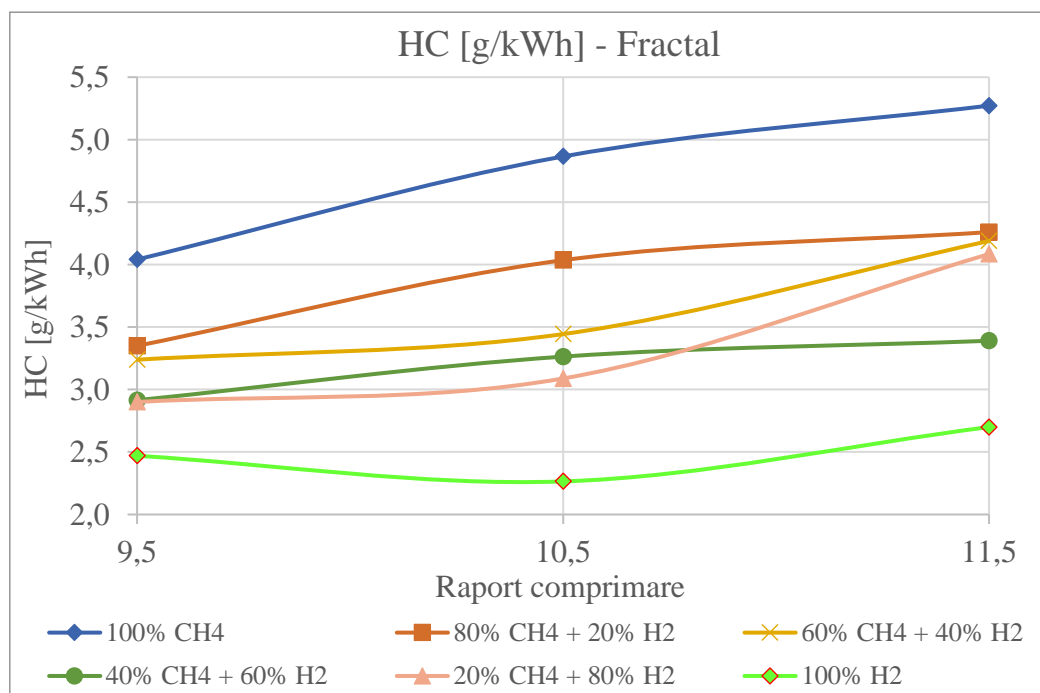
7.4. (b) Degajare de căldură Fractal

Figura 7.4. Evoluția CO pentru cele 10 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare

Figura 7.5 a și b prezintă evoluția HC cu creșterea rapoartelor de comprimare. O creștere de până la 17,4% a fost obținută pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 40,8% pentru legea de degajare a căldurii Fractal, comparând raportul de comprimare de 9,5 și 11,5, pentru toate tipurile de combustibili. Scăderea duratei arderii poate determina creșterea nivelului emisiilor de HC prin reducerea timpului de oxidare a acestora.



7.5. (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone

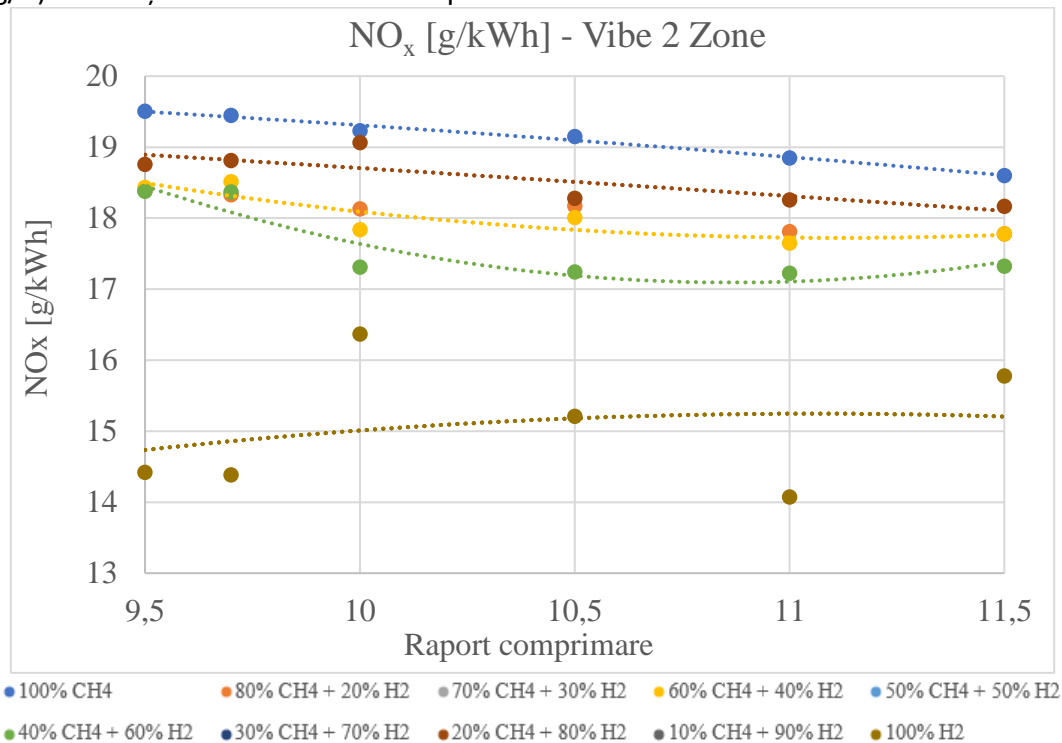


7.5. (b) Degajare de căldură Fractal

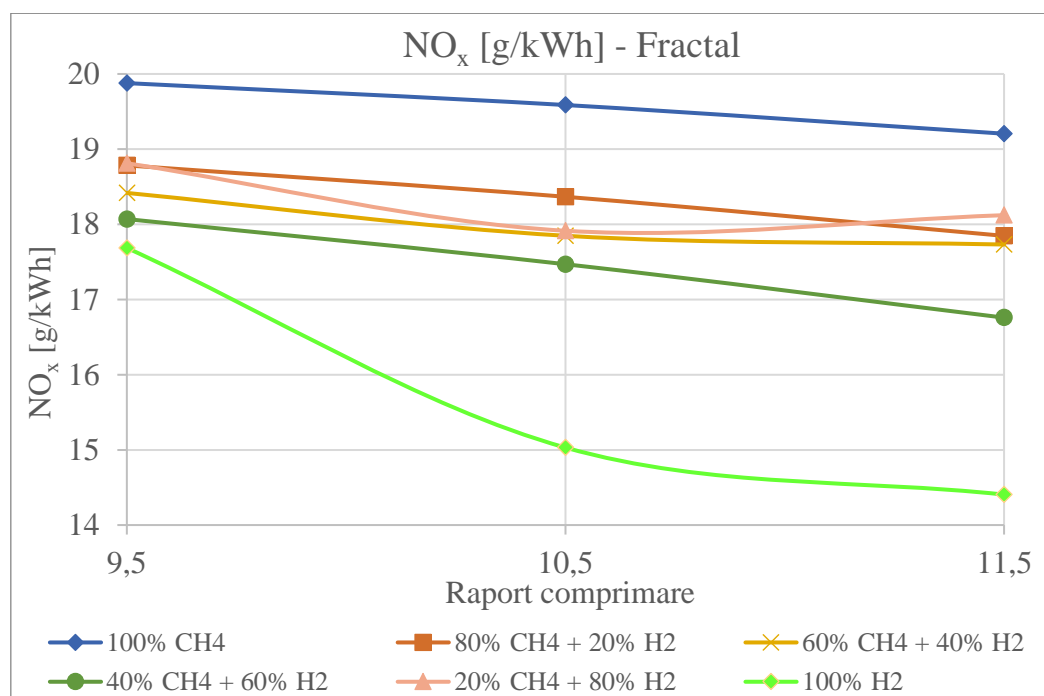
Figura 7.5. Evoluția HC pentru cele 10 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare

Figura 7.6 a și b prezintă evoluția NO_x cu creșterea rapoartelor de comprimare. S-a obținut o scădere de până la 5,7% pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 18,6% pentru legea de degajare a căldurii Fractal, comparând raportul de comprimare de 9,5 și 11,5 pentru toate tipurile de combustibili.

Există o ușoară scădere a NO_x raportat în g/kWh posibil din cauza creșterii NO_x în ppm (sau g/h) dar creșterii mai accentuate a puterii efective a motorului în KW.



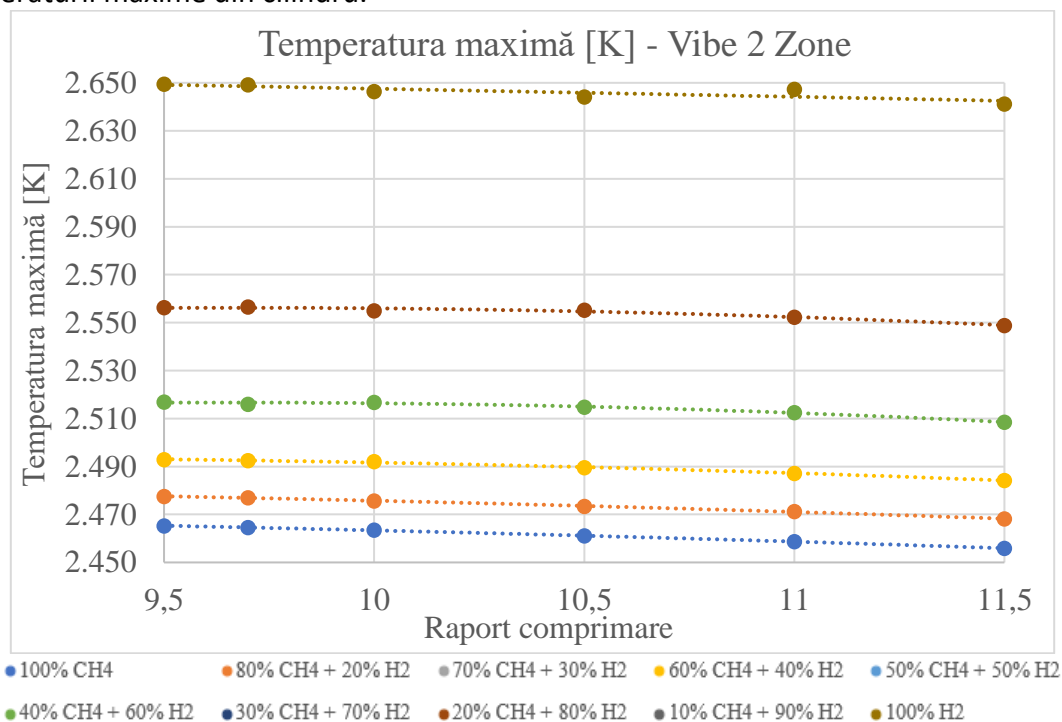
7.6. (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone



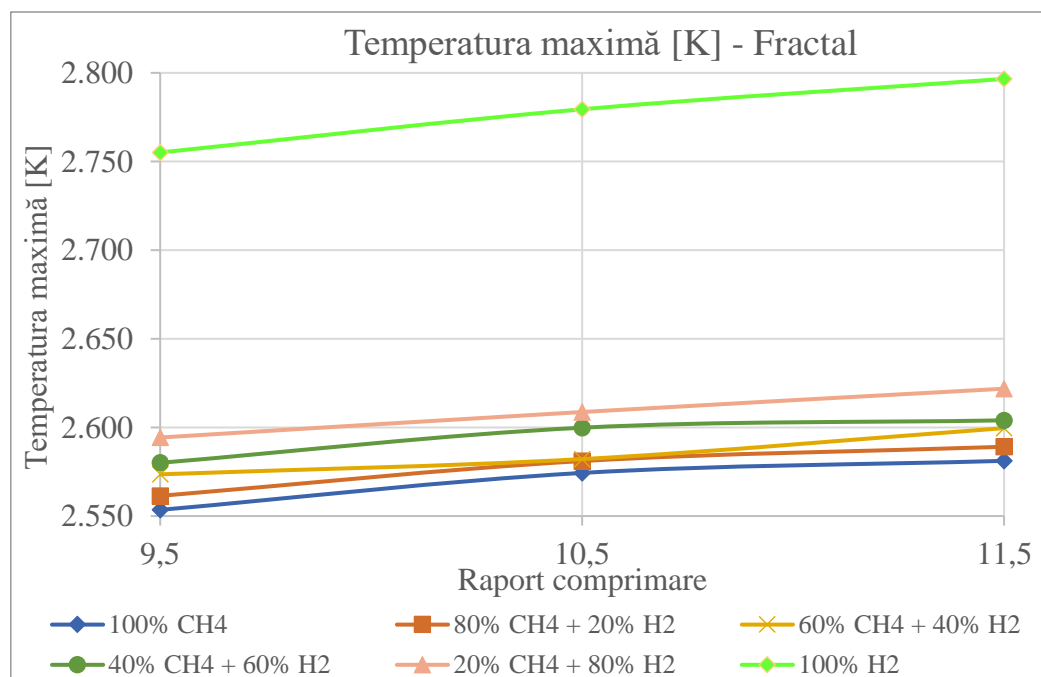
7.6. (b) Degajare de căldură Fractal

Figura 7.6. Evoluția NO_x pentru cele 10 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare

Scăderea emisiilor de NO_x este atribuită unor valori mai scăzute ale temperaturii maxime din cilindru în cazul Vibe 2 Zone. Figura 7.7 a și b prezintă evoluția temperaturii maxime din cilindru cu creșterea rapoartelor de comprimare. S-a obținut o scădere de până la 0,4% pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone, comparând raportul de comprimare de 9,5 și 11,5, pentru toate tipurile de combustibili. În cazul Fractal, emisiile de NO_x scad deoarece scăderea cantității de aer are o pondere mai mare comparativ cu creșterea temperaturii maxime din cilindru.

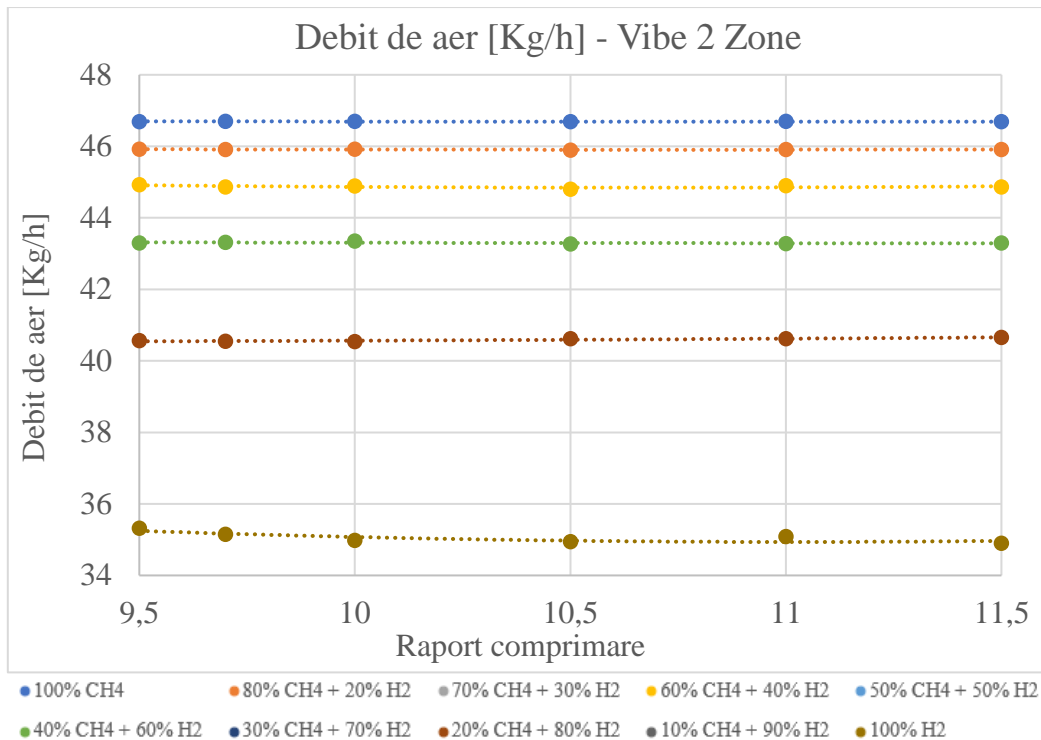


7.7 (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone

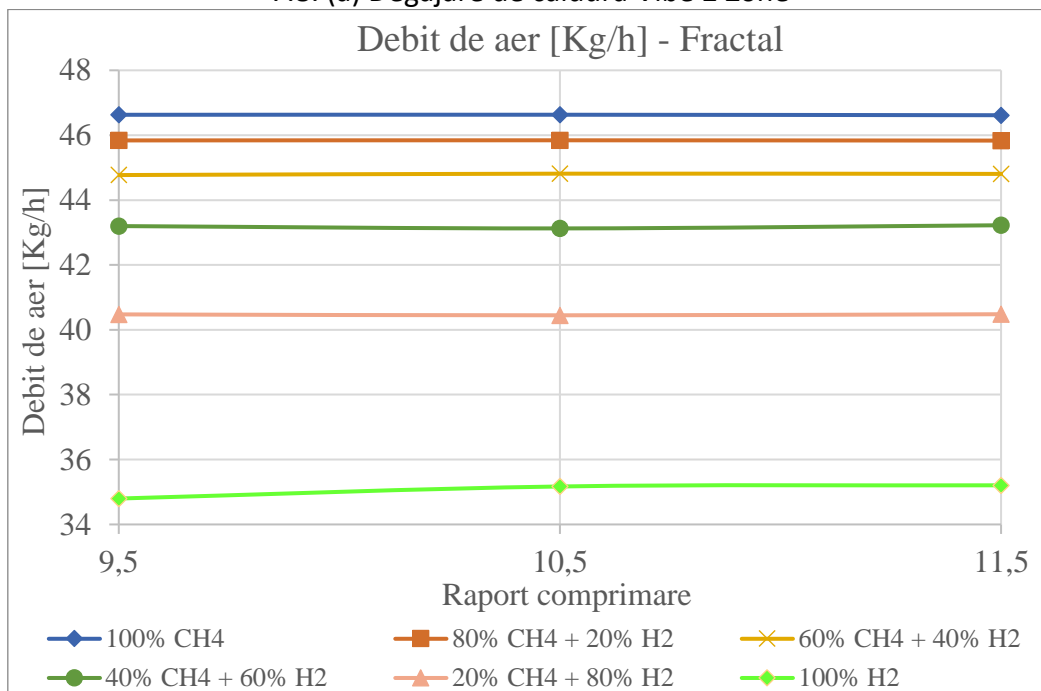


7.7. (b) Degajare de căldură Fractal

Figura 7.7. Evoluția temperaturii maxime pentru cele 10 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare



7.8. (a) Degajare de căldură Vibe 2 Zone



7.8 (b) Degajare de căldură Fractal

Figura 7.8. Evoluția debitului de aer pentru cele 101 și respectiv 6 tipuri de combustibili la diferite rapoarte de comprimare

CONCLUZII FINALE

Studiul actual evidențiază influența gazului natural comprimat îmbogățit cu hidrogen în comparație cu combustibilul lichid convențional benzina asupra performanței și emisiilor unui motor cu aprindere prin scânteie. Concluziile pot fi rezumate astfel:

- Prin schimbarea combustibilului lichid cu cel gazos se obține o mai bună omogenitate a amestecului cu aerul, asigurând astfel o ardere mai completă cu reduceri semnificative ale emisiilor de HC și CO.
 - S-a obținut o scădere a puterii efective a motorului datorită înlocuirii aerului de admisie cu combustibili gazeși pentru același raport stoichiometric ($\lambda=1$).
 - S-a obținut o scădere a emisiilor de NO_x în medie cu 15% în cazul utilizării gazului natural comprimat comparativ cu benzina.
 - Creșterea ușoară a emisiilor NO_x și scăderea emisiilor de CO au avut loc în mod normal odată cu mărirea fracțiunii de hidrogen din GNC din cauza temperaturilor mai ridicate din cilindru.
 - Îmbogățirea cu hidrogen extinde limita de ardere a amestecurilor de HGNC; astfel eficiența motorului poate fi îmbunătățită prin funcționarea cu amestecuri sărace.
 - Caracteristici de performanță îmbunătățite pot fi obținute cu un raport de comprimare mai mare al motorului când se utilizează GNC și H₂ datorită cifrei octanice mai mari în comparație cu benzina.
 - Adăugarea de H₂ (până la 20-30% volum) în cazul alimentării cu gaz natural comprimat poate fi o soluție eficientă pe termen scurt la problema emisiilor de gaze cu efect de seră.
- Studiul a mai arătat ca rezultatele obținute prin simulare în software-ul AVL Boost, folosind 2 legi de degajare a căldurii, „Vibe 2 Zone” și „Fractal”, pot simula foarte bine comportamentul unui motor cu aprindere prin scânteie în diferite condiții de funcționare. Condițiile de funcționare a motorului sunt: turație constantă de 2000 rpm, sarcină constantă de 9,52 bar presiune medie efectivă și amestec stoechiometric $\lambda=1$. A fost de asemenea studiată influența alimentării cu gaz natural comprimat și hidrogen în diferite proporții volumetrice: 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70, 80%, 90% și 100% H₂. Pentru fiecare amestec de combustibil a fost efectuat un studiu al raportului de comprimare pentru următoarele valori: 9,5, 9,7, 10, 10,5, 11 și 11,5 în cazul Vibe 2 Zone și 9,5, 10,5 și 11,5 în cazul Fractal.

Odată cu creșterea raportului de comprimare, se observă că puterea efectivă crește proporțional pentru ambele modele de degajare de căldură, Vibe 2 Zone și Fractal până la 4,3%. Acest fapt se datorează scăderii CSC până la 4,4%. Scăderea emisiilor de NO_x cu până la 18,6% poate fi atribuită unor valori mai scăzute ale temperaturii maxime din cilindru. O scădere de până la 19,7% a fost obținută pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone pentru emisiile de CO.

Dintre rezultatele obținute între cele 2 rapoarte de comprimare minim și maxim (9,5 și 11,5), pentru toate tipurile de combustibili, se pot enumera câteva concluzii:

- O creștere a puterii efective de până la 3,3% a fost obținută pentru Vibe 2 Zone și până la 4,3% pentru Fractal.
- O scădere a consumului specific de combustibil (CSC) de până la 3,1% a fost obținută pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 3,7% pentru legea de degajare a căldurii Fractal.
- S-a obținut o scădere a emisiilor de CO de până la 19,7% pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și o scădere de până la 13,2% pentru legea de degajare a căldurii Fractal.
- O creștere a emisiilor de HC de până la 17,4% a fost obținută pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 40,8% pentru legea de degajare a căldurii Fractal.

- S-a obținut o scădere a emisiilor de NO_x de până la 5,7% pentru legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și până la 18,6% pentru legea de degajare a căldurii Fractal, atribuită unor valori mai scăzute ale temperaturii maxime din cilindru.

În urma studiului raportului de comprimare observăm că tendințele sunt de creștere a puterii efective, de scădere a CSC și de scădere a emisiilor de CO și NO_x. Astfel se confirmă așteptările cu privire la îmbunătățirea performanțelor și emisiilor poluante ale motorului studiat la alimentarea cu combustibili cu cifră octanică ridicată.

CONTRIBUȚII PERSONALE

1. Obținerea și prelucrarea rezultatelor experimentale la standul de probe motor din cadrul Renault Technologie Roumanie pentru motorul alimentat cu benzină.
2. Obținerea și prelucrarea rezultatelor experimentale la standul de rulouri din cadrul Renault Technologie Roumanie urmărind procedura WLTP pentru motorul studiat pentru cele două cazuri benzină și gaz natural comprimat.
3. Obținerea și prelucrarea rezultatelor experimentale pe vehicul din cadrul Renault Technologie Roumanie urmărind ciclul de conducere RDE pentru cele două cazuri benzină și gaz natural comprimat.
4. Obținerea și prelucrarea rezultatelor simulărilor celor mai utilizate regimuri de funcționare în ciclul WLTC din cadrul Renault Technologie Roumanie pentru motorul studiat.
5. Crearea modelului simulat cu ajutorul programului AVL Boost pentru motorul alimentat cu benzină, astfel încât am atins caracteristicile de performanță și emisii ale motorului real de 0,9 litri Renault în limita maximă a abaterilor relative de 1,9%.
6. Adaptarea modelului AVL Boost pentru alimentarea cu doi combustibili, Gaz Natural Comprimat și Hidrogen în diverse proporții volumetrice, în varianta motor cu aprindere prin scânteie.
7. Realizarea studiului prin simulare numerică cu AVL Boost folosind legea de degajare a căldurii Vibe 2 Zone pentru funcționarea motorului la diferite turații și sarcini.
8. Realizarea studiului prin simulare numerică cu programului AVL Boost folosind legea de degajare a căldurii Fractal care ține cont de arhitectura motorului.
9. Realizarea studiului prin simulare numerică cu programului AVL Boost a efectului măririi raportului de comprimare pentru cele două legi de degajare a căldurii Vibe 2 Zone și Fractal.

LISTĂ DE PUBLICAȚII

1. **M.C. Barbu**; A. Birtaş; R. Chiriac; "The impact of different heat release models on performance and emissions of a spark ignition engine operating with hydrogen and natural gas mixtures at different compression ratios"; in U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. xx, Iss. xx, 2023 (în curs de publicare)
2. **M.C. Barbu**; A. Birtaş; R. Chiriac; "On the improvement of performance and pollutant emissions of a spark ignition engine fuelled by compressed natural gas and hydrogen"; Energy Reports Volume 8, Supplement 9, November 2022, Pages 978-991; <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.136>
3. **M.C. Barbu**; R. Chiriac; "The use of natural gas mixed with hydrogen as fuel for spark-ignition engines"; SIAR - Ingineria automobilului, nr. 60; ISSN 1842 – 4074 (pp.8-15); September 2021; <http://siar.ro/wp-content/uploads/2021/08/rIA-60.pdf>

4. R. Chiriac; B. Radu; **M.C. Barbu**; “Computational elements for designing a piston steel type”; SIAR - Ingineria automobilului, nr. 38; (pp.17-19); March 2016; http://siar.ro/wp-content/uploads/2016/03/rIA-nr.38-2016_1-martie.pdf

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] *Concawe*, Literature review on CNG / H2 Mixtures for heavy-duty CNG vehicles, Brussels, report December 2021 [[CrossRef](#)]
- [2] *Molina, S.; Novella, R.; Gomez-Soriano, J.; Olcina-Girona, M.* New Combustion Modelling Approach for Methane-Hydrogen Fueled Engines Using Machine Learning and Engine Virtualization. *Energies* 2021, 14, 6732. [[CrossRef](#)]
- [3] *Rajesh Kumar Prasad, Avinash Kumar Agarwal.* Development and comparative experimental investigations of laser plasma and spark plasma ignited hydrogen enriched compressed natural gas fueled engine. *Energy*, 2021, 216, 119282 [[CrossRef](#)]
- [4] *Kim K., Kim H., Kim B., Lee K. and Lee K.*, Effect of Natural Gas Composition on the Performance of a CNG Engine, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2009;64(2); 199-206.
- [5] *Semin, R.A.B.*, A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines, *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2008;1(4): 302-311.
- [6] *Hu E., Huang Z., He J., Zheng J., Miao H.*, Measurements of laminar burning velocities and onset of cellular instabilities of methane–hydrogen–air flames at elevated pressures and temperatures, *Int J Hydrogen Energy* 2009;34: 5574 –84.
- [7] *The Natural & bio Gas Vehicle Association*; NGVA Europe, ngva.eu
- [8] www.e-automobile.ro
- [9] *Comisia Europeană*; romania.representation.ec.europa.eu
- [10] *Group VAG* vw.com
- [11] Information from within *Groupe Renault*
- [12] *M.C. Barbu; A. Birtaş; R. Chiriac*; “ On the improvement of performance and pollutant emissions of a spark ignition engine fuelled by compressed natural gas and hydrogen”; *Energy Reports* Volume 8, Supplement 9, November 2022, Pages 978-991; <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.136>
- [13] *AVL-BOOST* Theory (2019)
- [14] *Ali Keshavarz* „Experimental Study of Hydrogen Addition Impact on Emissions and Performance of a Natural Gas Fueled Engine”. *The Journal of Engine Research / Vol. 14 / 2009*
- [15] *Roopesh Kumar Mehra, Hao Duan, Romualdas Juknelevičius, Fanhua Ma, Junyin Li.* Progress in hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) internal combustion engines - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 80, December 2017, Pages 1458-1498 [[CrossRef](#)]
- [16] *J. B. Heywood*, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, 2018 by McGraw-Hill Education