

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA BUCUREȘTI
Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA GNC LA MOTORUL DIESEL DE
AUTOMOBILE
RESEARCHES REGARDING THE USE OF CNG TO THE CARS DIESEL ENGINE

Autor: M.ing. Silviu ROTARU

Conducător științific: prof. dr. ing. Constantin PANĂ

BUCUREȘTI
2024

CUPRINS

Introducere.....	1
1. Relevanța temei de cercetare.....	3
1.2 Descrierea cadrului internațional și identificarea oportunității utilizării GNC la motorul diesel de automobil.....	3
2.2 Obiectivele lucrării.....	6
2. Analiza stadiului de cercetare.....	6
2.1 Analiza rezultatelor unor cercetări experimentale efectuate în domeniu.....	6
2.2 Concluzii capitolul 2	9
3. Investigații experimentale ale motorului diesel alimentat cu GNC.....	11
3.1 Analiza rezultatelor determinate experimental.....	12
3.2 Concluzii asupra rezultatelor experimentale.....	13
4. Modelarea proceselor termo-gazodinamice din cilindrul motorului cu aprindere prin comprimare.....	15
5. Comparație între rezultatele investigațiilor experimentale și teoretice.....	20
6. Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare.....	22
Diseminarea rezultatelor cercetărilor efectuate.....	25
Bibliografie selectivă.....	26

Cuvinte cheie: mod de alimentare diesel–gaz, mod de alimentare DF, DG, GNC, gaze naturale comprimate, bi–combustibil, injecție indirectă, puterea calorifică inferioară, cifră octanică, motor diesel, presiune medie indicată, dioxid de carbon, oxizi de azot, hidrocarburi nense, particule PM.

Introducere

Teza de doctorat intitulată *CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA GNC LA MOTORUL DIESEL DE AUTOMOBILE (RESEARCHES REGARDING THE USE OF CNG TO THE CARS DIESEL ENGINE)* face parte din preocupările colectivului de cercetare al Departamentului de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice (TMETF), Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică (FIMM) din Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA BUCUREȘTI. Teza conține contribuții originale în domeniul studiului influenței pe care o are utilizarea de gaze naturale comprimate la motorul diesel alimentat în modul diesel–gaz. De asemenea lucrarea aduce noutate și în domeniul modelării matematice unde, pornind de la elementele de bază ale instrumentului software AMESIM, este dezvoltat un model termo–gazodinamic pentru analiza influenței utilizării GNC la motorul diesel.

Lucrarea al cărei conținut are 185 de pagini este împărțită în șase capitole, conține 25 de tabele și 196 de figuri iar la finalul acesteia sunt prezentate 109 referințe bibliografice numerotate în ordinea citării lor în teză.

Capitolul 1 face o sinteză generală a contextului internațional care a favorizat creșterea ponderii motoarelor cu aprindere prin comprimare utilizate la automobile; apoi sunt prezentați factorii principali care au condus la declinul motorului diesel și la orientarea cercetătorilor spre

studiul combustibililor alternativi. Capitolul mai conține de asemenea o descrie succintă a proprietăților fizice și chimice ale gazelor naturale comprimate care le fac eligibile pentru utilizarea lor la motorul diesel de automobil. Totodată capitolul cuprinde descrieri scurte despre procesele tehnologice de obținere, transport și stocare a gazelor naturale comprimate precum și metodele de alimentare a motorului cu acest combustibil.

Capitolul 2 realizează o investigație detaliată a stadiului actual al cercetării în domeniul utilizării gazelor naturale la motorul cu aprindere prin comprimare. Analiza cercetărilor teoretice și experimentale a avut în vedere evaluarea influenței gazelor naturale comprimate asupra arderii (durată întârziere la autoaprindere, presiune maximă, viteză de degajare a căldurii, consum specific energetic/combustibil, randament termic, durată ardere), a performanțelor energetice și de poluare ale motorului cu aprindere prin comprimare pentru diferite regimuri de funcționare și diferite grade de substituție a motorinei cu GNC.

Obiectivul principal al **capitolului 3** a fost studiul și analiza influenței utilizării gazelor naturale comprimate asupra performanțelor motorului diesel de automobil alimentat prin metoda diesel-gaz. Rezultatele obținute la funcționarea convențională au reprezentat referințe; datele înregistrate la funcționarea motorului alimentat în modul DG au fost comparate cu referințele în vederea formulării concluziilor cu privire la performanțele energetice și de poluare pentru regimuri de funcționare diferite și pentru mai multe grade de substituție a motorinei cu gaze naturale comprimate.

În **capitolul 4** este prezentat procesul de dezvoltare a modelului termo-gazodinamic utilizând instrumentul software AMESIM. Activitatea de modelare se împarte în două părți principale: partea de construcție a modelului matematic pornind de la elementele de bază, disponibile în instrumentul software AMESIM și partea de parametrizare a modelului obținut.

În **capitolul 5**, rezultatele obținute prin calcul cu ajutorul instrumentul software AMESIM sunt comparate cu cele determinate experimental la sarcinile studiate (40%, 55% și 75%) pentru diferiți coeficienți de substituție energetică a motorinei cu gaze naturale comprimate. Finalizarea cu succes a etapelor de parametrizare respectiv de validare a modelului matematic, face posibilă aprofundarea analizei influenței alimentării motorului diesel în modul DG; prin calcul se pot obține valorile unor mărimi sau parametri care nu au putut fi determinați experimental: evoluția temperaturilor (din cilindru, a gazelor arse, a încărcăturii proaspete), cantitatea de combustibil ners rămas în cilindru, cantitatea de gaze arse rămase în cilindru, forța de apăsare a gazelor asupra pistonului, etc.

Capitolul 6 prezintă concluziile finale ale tezei de doctorat; sunt prezentate contribuțiile personale și sunt descrise direcțiile următoare.

Lucrarea se încheie cu lista lucrărilor publicate in extenso și referințele bibliografice în ordinea citării lor în text.

Mulțumiri

Lucrarea reprezintă încununarea unor eforturi considerabile din partea unor oameni pe al căror suport m-am putut baza mereu.

*Mulțumiri sunt adresate conducătorului științific, d-lui **prof. dr. ing. Constantin PANĂ** pentru îndrumarea continuă și riguroasă pe tot parcursul acestei lucrări.*

*De asemenea mulțumiri sunt adresate d-lui **prof. dr. ing. Nicolae NEGURESCU**, d-lui **conf. dr. ing. Alexandru CERNAT**, d-lui **ș.l. dr. ing. Dinu FUIORESCU** și d-lui **conf. dr. ing. Cristian NUȚU** pentru sfaturile și sprijinul acordat.*

Această lucrare ar fi fost mult mai greu de realizat fără susținerea și înțelegerea permanentă a soției.

*Totodată mulțumiri sunt prezentate și d-lui **ing. Ovidiu Pavelescu** de la care a pornit ideea lucrării, care mi-a împărtășit cunoștințele acumulate despre GNC și care m-a susținut.*

Autorul

Capitolul 1 - Relevanța temei de cercetare

1.1. Descrierea cadrului internațional și identificarea oportunității utilizării GNC la motorul diesel de automobil

Punerea în aplicare a unor reglementări, [22], care au favorizat creșterea excesivă a numărului de automobile propulsate cu motoare diesel a condus la creșterea alarmantă a unor specii de poluanți (NO_x, particule PM) rezultați în gazele de ardere care au impact negativ asupra sănătății și chiar asupra vieții oamenilor.

Conform unui studiu realizat de Organizația Mondială pentru Sănătate (World Health Organization) denumit HRAPIE Project (Health risks of air pollution in Europe), în urma interviurii a 100 de experți, persoane fizice sau companii cu interese și activități strict legate de problema calității aerului s-a ajuns la concluzia că cea mai importantă sursă de emisii poluante (dintr-un total de 16 prezentate persoanelor intervievate) este ramura transporturilor rutiere reprezentând 40,7%. Sectorul de activitate al persoanelor intervievate este de protecția mediului sau de sănătate publică, medicină, transporturi. Așa cum poate fi observat în diagrama de mai jos, (figura 1.1), elementele cele mai nocive din emisiile motoarelor sunt, oxizii de azot, particulele de materie fine și ultra fine precum și metalele, [23].

Agenția pentru Protecția Mediului din Statele Unite publică, în mai 2002, un referat de o importanță deosebită, în care aduce la cunoștința populației diferitele boli de care pot fi afectate persoanele ce intră în contact cu gazele de evacuare ale motoarelor diesel. Componentele gazelor de evacuare care aduc cele mai grave afecțiuni sunt particulele de materie fine și ultra fine, particule de acid sulfuric și sulfati; oxizii de azot sunt componenți ai gazelor de evacuare la fel de periculoși pentru sănătate. Studiile au fost realizate în laboratoare pe diferite categorii de animale, dar au luat în evidență și categorii sociale ale căror locuri de muncă sau locuințe le poziționau în zone cu risc

ridicat în ceea ce privește afecțiunile direct legate de expunerea la gazele de evacuare ale motoarelor diesel (echipe de mentenanță camioane, lucrători în domeniu minier). De asemenea au fost conduse și studii IN VITRO care să evidențieze gravitatea afecțiunilor provocate de expunere la gazele de evacuare ale motoarelor diesel. Printre afecțiunile care sunt cauzate de expunere la GED se numără: tumori maligne și benigne, mutații genetice, afecțiuni ale sistemului respirator, afecțiuni ale pielii etc, [24].

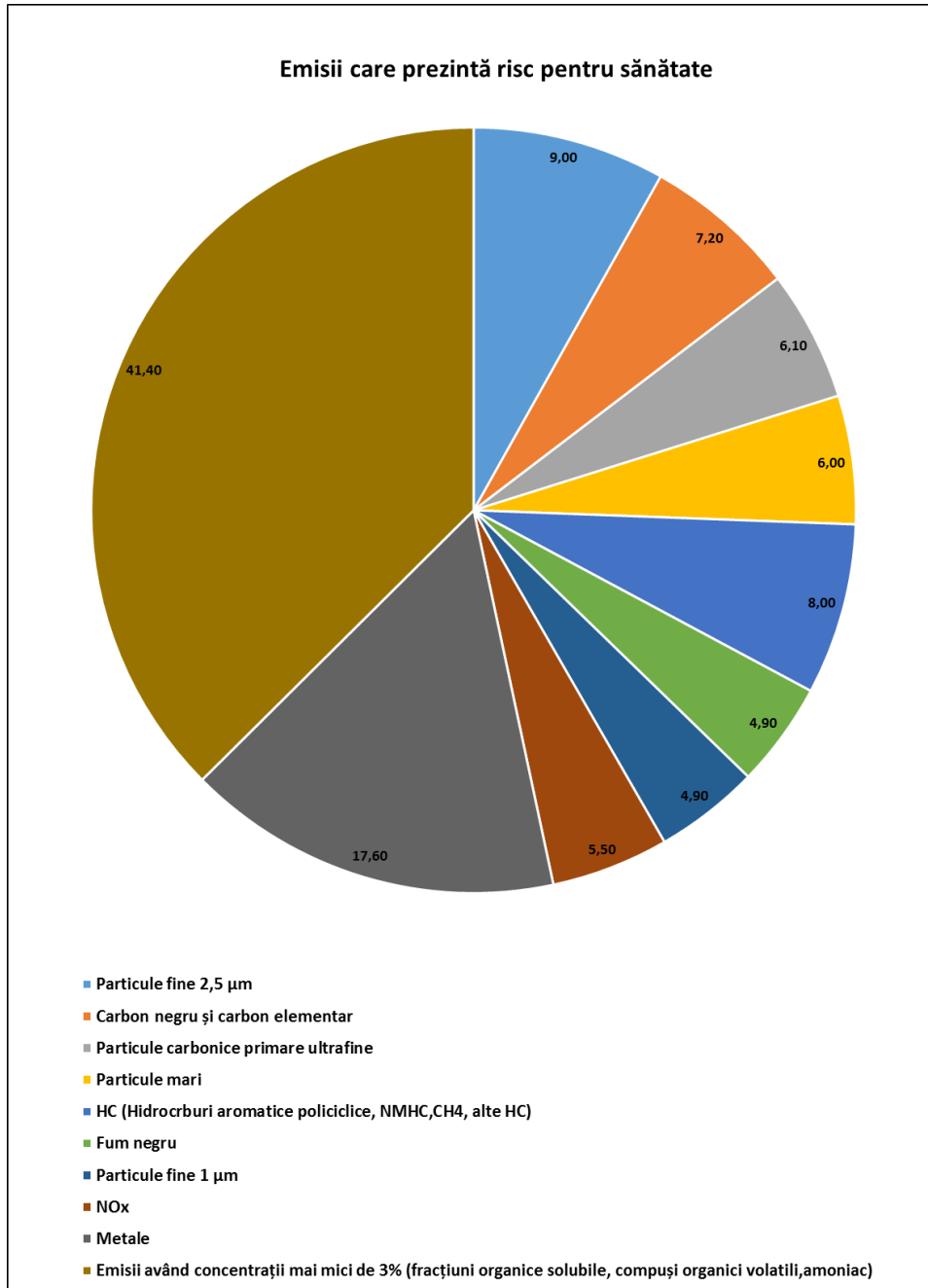


Figura 1.1 Emisii cu risc pentru sănătate, [23]

Atenția deosebită la nivel global asupra creșterii alarmante a poluării mediului înconjurător precum și asupra principalelor surse de emisii poluante, devin subiecte foarte importante. Studii amănunțite prezintă impactul asupra sănătății oamenilor care trăiesc sau își desfășoară activitatea în zone urbanizate sau industrializate[2],[3],[4]. Pentru a răspunde, guvernele pun în aplicare măsuri din ce în ce mai severe atât pentru motoarele utilizate în transporturi cât și pentru cele staționare; noi proceduri și echipamente de măsurare a emisiilor autovehiculelor sunt dezvoltate (ex: Real Driving Emission realizat cu PEMS – sistem portabil pentru măsurarea emisiilor). În această realitate globală, cercetătorii se orientează pe de o parte spre îmbunătățirea arderii și tratarea gazelor arse și pe de altă parte spre identificarea de combustibili alternativi mai puțin poluanți și cu proprietăți de ardere superioare celor convenționali.

Preocuparea din ce în ce mai mare pentru reducerea emisiilor de oxizi de azot și de particule PM din elementele de evacuare ale motoarelor cu aprindere prin comprimare (mac) precum și cererea continuu crescândă de energie alternativă pentru propulsia automobilelor fac din gazele naturale comprimate o alternativă atractivă pentru convertirea motoarelor cu aprindere prin comprimare, ușurându-se astfel drumul industriei autovehiculelor către propulsia cu hidrogen, hibridă și electrică.

Gazele naturale comprimate reprezintă o alternativă viabilă nu doar pentru că au o răspândire largă, ci și pentru prețul scăzut, posibilitatea de alimentare a automobilului chiar în regie proprie și arderea foarte „curată” în comparație cu combustibilii clasici. În comparație cu motorul diesel alimentat cu motorină, în gazele de evacuare, la arderea de bi-combustibil (motorină–GNC) se observă o scădere semnificativă a emisiilor de CO₂, particule PM și oxizi de azot, însă procentele de HC și de CO pot crește în anumite plaje de turații și sarcini de până la 100 de ori. Gazele naturale comprimate degajă în urma arderii mai puțin CO₂ pentru că în structura lor au cei mai puțini atomi de carbon pe unitate de energie dintre toți combustibilii fosili.

Articole de specialitate prezintă performanțele energetice, emisiile și scot în evidență beneficiile obținute prin alimentarea unui motor diesel în modul dual, cu mai mulți combustibili: Aklouche, [14], realizează o sinteză a beneficiilor obținute în urma alimentării motorului cu GNC și biogaz. Egúsqviza, [15], prezintă performanțele energetice și emisiile unui motor supraalimentat alimentat cu GNC, luând ca etalon funcționarea motorului atunci când acesta este alimentat convențional. Mahla, [16], demonstrează că impactul negativ asupra emisiilor de hidrocarburi nearse poate fi redus prin utilizarea sistemului de recirculare a gazelor arse (Exhaust Gases Recirculation System). Comportamentul unui motor staționar alimentat cu GNC este analizat de Jamrozik, [17], în timp ce M. Mbarawa, [18], prezintă influențele alimentării în modul bi-combustibil cu gaze naturale comprimate asupra întârzierii la autoaprindere și asupra temperaturii gazelor de evacuare.

Interesul crescut pentru gazele naturale comprimate este justificat de următorii factori: conținutul de carbon mai scăzut (76% carbon în comparație cu motorina care are 86% carbon), putere calorifică inferioară mai mare decât cea a combustibililor convenționali (48.6MJ/kg), rezistența la detonație foarte mare (cifra octanică 130) și ușurința de procurare.

Puterea calorifică inferioară ridicată a gazelor naturale comprimate precum și starea lor gazoasă determină reduceri notabile ale consumului specific energetic.

Cifra octanică ridicată conferă gazelor naturale comprimate o rezistență foarte bună la detonație și astfel este favorizată utilizarea acestora în motoarele cu rapoarte de comprimare ridicate.

Temperatura de autoaprindere ridicată a GNC conduce la necesitatea inițierii arderii fie prin autoaprinderea unui pilot de motorină, fie prin scânteia dată de o bujie, fie prin intrarea amestecului

în contact cu o suprafață fierbinte, (bujie incandescentă); în modul DG gazele naturale comprimate sunt injectate în galeria de admisie pentru a se amesteca cu aerul introdus în cilindru; amestecul aer-GNC este aprins în cilindru cu ajutorul unui pilot de motorină.

În gazele de evacuare, la arderea bi-combustibil (motorină-GNC) se observă o scădere semnificativă a emisiei de CO₂, particule PM și oxizi de azot; conținutul scăzut de carbon în GNC (75% conform [26]) explică prezența în gazele de ardere a unui procent mai mic de CO₂ și particule PM pe unitate energetică; conform [27], temperaturile de 1930-2080°C în cilindru sunt cele mai favorabile pentru apariția oxizilor de azot; utilizarea gazelor naturale comprimate a căror flacără are temperatură maximă de 1790°C, [28], poate determina scăderea temperaturii gazelor din cilindru și implicit scăderea nivelului de NO_x din gazele de evacuare.

Căldura specifică a gazelor naturale comprimate mai mare decât căldura specifică a aerului [29], poate determina o temperatură redusă la finalul comprimării datorită caldurii specifice mai mari a amestecului omogen aer-GNC favorizând prelungirea duratei întârzierii la autoaprindere.

La polul opus, procentele de HC și de CO pot crește în anumite plaje de turații și sarcini mici și medii de până la 100 de ori comparativ cu teste similare făcute la funcționarea cu motorină a motorului diesel; stingerea flăcării la perete este unul dintre motivele care stau la baza nivelului crescut de HC în gazele de evacuare; emisia de CO este determinată de concentrația de oxigen din cilindru, temperatura gazelor din cilindru, intensitatea curenților turbionari; influența GNC asupra acestor factori (scade concentrația de oxigen, scade temperatura din cilindru), poate determina creșterea nivelului de CO.

1.2. Obiectivele lucrării

Principalele obiective ale tezei de doctorat sunt:

- Analiza contextului internațional al cauzelor care impun utilizarea combustibililor alternativi la motoarele diesel.
- Analiza proprietăților fizice și chimice ale GNC comparativ cu motorina și stabilirea impactului utilizării GNC asupra funcționării motorului diesel.
- Analiza stadiului actual al cercetărilor în domeniu.
- Optimizarea standului de încercări experimentale ale motorului diesel de automobil alimentat cu GNC.
- Efectuarea investigațiilor experimentale pe standul de încercări.
- Modelarea proceselor termo-gazodinamice din cilindru motorului diesel alimentat cu GNC.
- Validarea rezultatelor investigațiilor teoretice.
- Diseminarea rezultatelor investigațiilor teoretice și experimentale efectuate.
- Stabilirea unor noi direcții de cercetare în domeniu.

Capitolul 2 - Analiza stadiului de cercetare

2.1. Analiza rezultatelor unor cercetări experimentale efectuate în domeniu

Influența utilizării de gaze naturale asupra *presiunii maxime* face obiectul studiului multor articole științifice. S. Imran arată că în modul de alimentare DG presiunea maximă din cilindru este mai mică decât în cazul alimentării cu motorină și este atinsă mai târziu pe ciclu, în special în zona

sarcinilor și turațiilor mici și mijlocii, datorită reducerii avansului la injecția motorinei și a înrăutățirii umplerii cilindrului, [8]. Liu Shenghua și colaboratorii concluzionează că presiunea maximă este cu până la 24% mai mică decât în cazul alimentării standard datorită unui coeficient de substituție energetică prea mare, neadaptat la regimul de turație și sarcină al motorului, a unui avans și a unui pilot de motorină necorespunzător, [11]. K. Suresh Kumar și colaboratorii vor demonstra că pentru toate regimurile de funcționare analizate presiunea maximă atinsă în modul de alimentare DG este inferioară celei înregistrate la alimentarea motorului cu motorină. Autorii pun acest rezultat pe seama vitezei de ardere mai reduse a amestecului aer-gaz; reacțiile de oxidare sunt mai încete și au tendința de a fi incomplete la sarcini joase și medii, [37].

Degajarea de căldură și viteza de degajare a căldurii reprezintă unele dintre mărimile avute în atenție atunci când motorul este alimentat în modul DG. Viteza de degajare a căldurii în modul de alimentare DG este inferioară din punct de vedere al valorii maxime dar și întârziată cu cel puțin 7°RAC , [11]. La alimentarea standard, arderea injecției principale are loc cu o anumită întârziere față de începutul arderii pilotului (datorită întârzierii la injecție și a timpului necesar vaporizării) lucru ce poate fi observat printr-o scădere a vitezei de degajare a căldurii; în modul de alimentare DG amestecul omogen aer-GNC există deja în cilindru la apariția nucleelor de flacără datorate pilotului de motorină; flacăra se propagă rapid în volumul de amestec omogen aer-GNC, [11]. F.Z. Aklouche, prezintă impactul negativ pe care îl are utilizarea de GNC; căldura degajată în modul de alimentare diesel-gaz are o valoare mai mică decât în cazul funcționării standard, însă atinge pragul de 90% din cantitatea totală mai repede pe ciclu; la alimentarea în modul DG viteza de creșterea a presiunii pierde din intensitate deoarece prin reducerea pilotului de motorină vor rezulta mai puține nuclee de flacără de la care să se propage flacăra, [14].

Durata întârzierii la autoaprindere este mai mare cu $3-4^{\circ}\text{RAC}$ față de alimentarea standard datorită reducerii cantității de aer admis în cilindru. Autorul lucrării [37] lansează teoria apariției unui efect de inhibare chimică pe care metanul l-ar avea asupra motorinei prin reducerea cifrei cetanice care poate determina o creștere a întârzierii la autoaprindere.

Consumul specific energetic este identificat ca având valori mai mari în zona sarcinilor scăzute dat fiind controlul defectuos al arderii în modul de alimentare diesel-gaz. Începând cu sarcini mai mari de 40%, funcționarea în modul de alimentare DG este de preferat. Eficiența crescută a motorului în modul de alimentare DG determină scăderi cu până la 50% din costul total la utilizarea motorinei drept combustibil, [19]. Consumul specific energetic este mai mare în modul de alimentare DG la turații scăzute ale motorului, scade cu până la 8% pe domeniul de turații de 1200-2000 rpm, și la turații mari crește datorită înrăutățirii arderii conform [13]. Autorul indică puterea calorifică inferioară ca fiind principalul factor care determină o scădere a consumului specific energetic. La sarcini mici, temperaturile reduse din cilindru, precum și stingerea flăcării la perete pot fi unele dintre cauzele creșterii consumului specific energetic.

Puterea motorului va crește cu până la 5,2% iar **momentul motor** cu până la 5,8% la creșterea debitului de GNC utilizat; creșterea puterii și momentului motor sunt puse pe seama puterii calorifice inferioare ridicate a gazelor naturale și a creșterii omogenității amestecului aer-combustibil, [13].

Conform lucrării [8] *emisia de NO_x* în modul de alimentare DG este inferioară celei la funcționarea standard din două motive: cantitatea de aer în interiorul cilindrului este mai mică și căldura specifică mai mare a GNC-ului decât a aerului care determină o temperatură mai mică în cilindru la sfârșitul comprimării; autorul arată cu ajutorul programului REFPROP că temperatura amestecului omogen aer-GNC de la sfârșitul comprimării se reduce cu până la 100K. În modul de alimentare DG odată cu atingerea regimurilor de sarcini și turații medii se pot înregistra scăderi ale concentrației de NO_x cu până la 50% față de motorul alimentat cu motorină, [8]. În cele două moduri de alimentare cu combustibil a motorului emisia de oxizi de azot crește la mărirea sarcinii, însă lipsa unei corelări precise între debitele celor doi combustibili poate conduce la creșterea emisiei de NO_x cu până la 1500 ppm în modul de alimentare DG la sarcini ridicate; autorul susține că emisia de oxizi de azot poate fi legată și de apariția arderii cu detonație. Un avans prea mare la injecția pilotului de motorină favorizează creșterea cantității de amestec preformat care va da naștere unui număr mai mare de nuclee de flăcără. Creșterea presiunii și temperaturii în cilindru peste un anumit prag favorizează apariția arderii cu detonație. În zona amestecurilor mai sărace, temperatura foarte mare favorizează declanșarea mecanismului Zeldovich, [11].

F. Königsson apreciază că 50% din *emisiile de HC* se datorează blocării combustibilului în interstițiile dintre piston, cilindru și segmenti, [43]. Efectul de vârtej poate reduce cu până la 20% din emisii. Când indicele de exces de aer crește peste 1,8, stingerea flăcării din cauza amestecului prea sărac devine principala cauză pentru creșterea concentrației de HC, [42]. Emisiile de HC sunt preponderent mai mari la funcționarea în modul de alimentare DG în primul rând din cauza lipsei de aer dar și din cauza stingerii flăcării la perete. La sarcini parțiale, atunci când 45% din energia utilă este dată de GNC, emisiile de HC cresc cu până la 800% față de funcționarea standard; la sarcină plină (când mai mult de 65% din energie este furnizată de GNC) emisiile de HC sunt cu 250% mai mari decât la alimentarea standard. Creșterea sarcinii motorului conduce la creșterea temperaturii din cilindru și a intensității curenților turbionari din cilindru iar acești factori influențează pozitiv calitatea arderii, [8].

Funcționarea motorului diesel alimentat în modul DG prezintă un avantaj mare în ceea ce privește *emisii de dioxid de carbon* care se reduce cu până la 12% în condițiile unui coeficient de substituție a motorinei cu GNC mediu de 35%, [12]. Conținutul scăzut de carbon al gazelor naturale comprimate constituie principala cauză pentru reducerea emisiei de dioxid de carbon, [41].

Emisia de *monoxid de carbon* este influențată negativ de injecția de GNC până la o presiune medie indicată de 0,6MPa deoarece la sarcinile mici temperatura din cilindru fiind mică favorizează stingerea flăcării și apariția arderii incomplete, [11]. La sarcini medii crește temperatura din cilindru, arderea se îmbunătățește și concentrația de CO scade. Pe tot domeniul de variație a sarcinii, concentrația emisiei de CO este superioară în modul de alimentare DG datorită cantității de aer mai mică din cilindru [19], [43], [14]. Emisia de monoxid de carbon este controlată prin calitatea amestecului, lipsa de aer conducând la ardere incompletă. Pe tot domeniul de variație a turației, figura 2.43, concentrația emisiei de monoxid de carbon este inferioară în modul de alimentare DF datorită conținutul redus de carbon din GNC, [13].

Emisia de particule PM este mai redusă pe tot domeniul de variație a sarcinii la alimentarea motorului în modul DG, [14]. Autoarea amintește despre legăturile liniare ale carbonului, C-C, prezente în motorină care în faza arderii difuzive disociază la temperaturi înalte și dau naștere particulelor PM. Gazele naturale comprimate nu au aceste legături carbon-carbon și astfel emisia de particule PM tinde către valori foarte mici în modul DG. Principalele motive pentru reducerea emisiei de fum este conținutul scăzut de carbon al CNG precum și reducerea procentului fracțiunilor grele existente pe ciclu. Conținutul de carbon din compoziția gazelor naturale dar și puterea calorică superioară a GNC determină reducerea carbonului pe unitate energetică, lucru care favorizează reducerea concentrației emisiei de fum la funcționarea motorului în modul de alimentare DG, [11].

Mohamed Y.E. Selim, [49], desprinde concluzii în urma analizei rezultatelor de laborator, privind **nivelul de zgomot** al motorului alimentat în modul diesel-gaz cu CNG în comparație cu funcționarea motorului utilizând motorină. Autorul demonstrează o legătură directă între viteza de creștere a presiunii ($dp/d\alpha$) și nivelul de zgomot produs de motor în funcționare. Poluarea fonică a motorului alimentat în modul DG este studiată și în [50], [51], [52].

2.2. Concluzii capitolul 2

Din analiza influenței gazelor naturale comprimate asupra funcționării motorului diesel alimentat prin metoda diesel-gaz se pot formula următoarele concluzii:

- **Presiunea maximă din cilindru** → Presiunea maximă a gazelor din cilindru crește la mărirea gradului de substituție a motorinei cu GNC datorită creșterii ponderii arderii rapide. Prin modificarea avansului la injecția pilotului de motorină se poate micșora presiunea maximă a gazelor sub valoarea aferentă alimentării numai cu motorină.
- **Întârzierea la autoaprindere** → Durata întârzierii la autoaprindere a pilotului de motorină crește la mărirea gradului de substituție a motorinei cu GNC datorită reducerii cantității de aer din camera de ardere, a temperaturii amestecului la finalul procesului de comprimare și a efectului de inhibare chimică a motorinei în prezența metanului ce ar putea sugera scăderea cifrei cetanice.
- **Viteza de degajare a căldurii** → Viteza de degajare a căldurii în modul de alimentare DG este mai mare deoarece întârzierea mare la autoaprindere favorizează vaporizarea unei cantități mai mari de motorină, creșterea omogenității amestecului și creșterea ponderii fazei arderii rapide. Prin modificarea avansului injecției pilotului de motorină viteza de degajare a căldurii poate fi redusă.
- **Consumul specific** → Consumul specific de combustibil/energetic este mai mare în zona sarcinilor mici datorită stingerii flăcării la perete, a scăpărilor de amestec aer-GNC în colectorul de evacuare în timpul suprapunerii supapelor.

Începând cu sarcini mai mari de 40%, funcționarea cu GNC este mai eficientă datorită îmbunătățirii arderii.

- **Puterea și momentul motor** → Puterea calorifică inferioară a gazelor naturale comprimate determină creșterea puterii și momentului motor în modul de alimentare DG pentru toate regimurile de funcționare.
- **Emisia de oxizi de azot** → Concentrația de NO_x din gazele de evacuare scade din două motive: datorită reducerii cantității de aer din cilindru și a temperaturii gazelor.
- **Emisia de hidrocarburi nearse** → Hidrocarburile nearse înregistrează o concentrație mai mare cu până la 800% în modul de alimentare DG față de funcționarea standard, la sarcini mici și medii. La sarcini mari, deși mai redusă, emisia de hidrocarburi continuă să aibă o concentrație mai mare decât în cazul utilizării motorinei ca unic combustibil datorită reducerii cantității de aer din cilindru.
- **Emisia de dioxid de carbon** → Conținutul scăzut de carbon al GNC determină scăderea emisiei de CO₂; puterea calorifică mai mare a metanului în comparație cu cea a motorinei face ca emisia de dioxid de carbon să scadă și mai mult atunci când refacerea puterii este obiectivul principal.
- **Emisia de monoxid de carbon** → Monoxidul de carbon își poate mări concentrația cu până la 20% față de cea în cazul arderii doar a motorinei datorită reducerii cantității de aer din cilindru.
- **Emisia de fum** → Cantitatea de particule PM scade datorită conținutului de carbon mai mic din molecula GNC.
- **Optimizarea funcționării mac în modul de alimentare DG**

Controlul funcționării motorului cu aprindere prin comprimare alimentat cu GNC în modul de alimentare DG are în vedere reducerea consumului specific de combustibil/energetic, reducerea concentrației emisiilor, creșterea puterii și a momentului motor. Acesta poate fi realizat prin modificarea avansului la injecție a pilotului, a mărimii pilotului de motorină, a temperaturii lichidului de răcire.

Creșterea cantității pilotului de motorină are ca efecte creșterea presiunii înregistrate în cilindru, scăderea întârzierii la autoaprindere și a duratei arderii, reducerea concentrației de CO în gazele de ardere, însă determină o creștere cu până la 52% a concentrației oxizilor de azot și cu 150% a concentrației de hidrocarburi.

Reducerea avansului la injecția pilotului de motorină determină o reducere a întârzierii la autoaprindere și a concentrației de NO_x din gazele de evacuare dar va accentua înrăutățirea arderii, creșterea concentrației CO și HC în gazele de evacuare, creșterea consumului specific.

Dezavantajele utilizării GNC

- Obturarea orificiilor injectorului de motorină este o problemă care apare atunci când acesta injectează doar 10% din cantitatea de motorină necesară pe ciclu. Acest lucru determină creșterea temperaturii vârfului injectorului care la rândul ei determină vaporizarea fracțiunilor volatile și cocsificarea fracțiunilor grele. Prin adăugarea unei cămăși de cupru în jurul vârfului injectorului se asigură protecția sa termică.

- Încadrarea în normele de poluare impune dezvoltarea unui sistem electronic performant de comandă a injecției de motorină și GNC care să poată stabili proporții optime pentru cei doi

combustibili în funcție de turație și sarcină astfel încât să fie satisfăcute atât normele de poluare dar și cerințele de putere și moment motor.

- Injecția directă de GNC, deși rezolvă problema emisiilor poluante încă necesită ample cercetări pentru perfecționarea injectorului de motorină/gaz.

- Viteza de creștere a presiunii în cilindru la funcționarea în modul diesel-gaz este superioară celei în modul mono combustibil lucru ce dă naștere unui zgomot de ardere mai pronunțat iar un control imprecis al avansului sau cantității pilotului de motorină injectată poate favoriza apariția detonațiilor.

Stocarea la 240bar a GNC presupune o masă ridicată a buteliei și un volum mare ocupat; spațiul redus și masa utilă scăzute ale automobilelor le fac mai puțin eligibile pentru echiparea ulterioară cu acest tip de sistem în comparație cu sistemul de alimentare cu gaz petrol lichefiat, GPL.

Capitolul 3 – Investigații experimentale ale motorului diesel alimentat cu GNC

Partea de început a acestui capitol trece în revistă aparatura de laborator cu ajutorul căreia au fost realizate investigațiile experimentale: sistemul de alimentare cu gaze naturale comprimate în colectorul de admisie, frâna electrică cu curenți turbionari Schenck E90, motorul cu aprindere prin comprimare având modificările specifice alimentării în mod dual, panoul de monitorizare și control, echipamentul pentru măsurarea emisiilor poluante, echipamentele pentru măsurarea debitelor de aer și combustibil, sistemul de alimentare cu motorină, sistemul de alimentare cu gaze naturale comprimate.

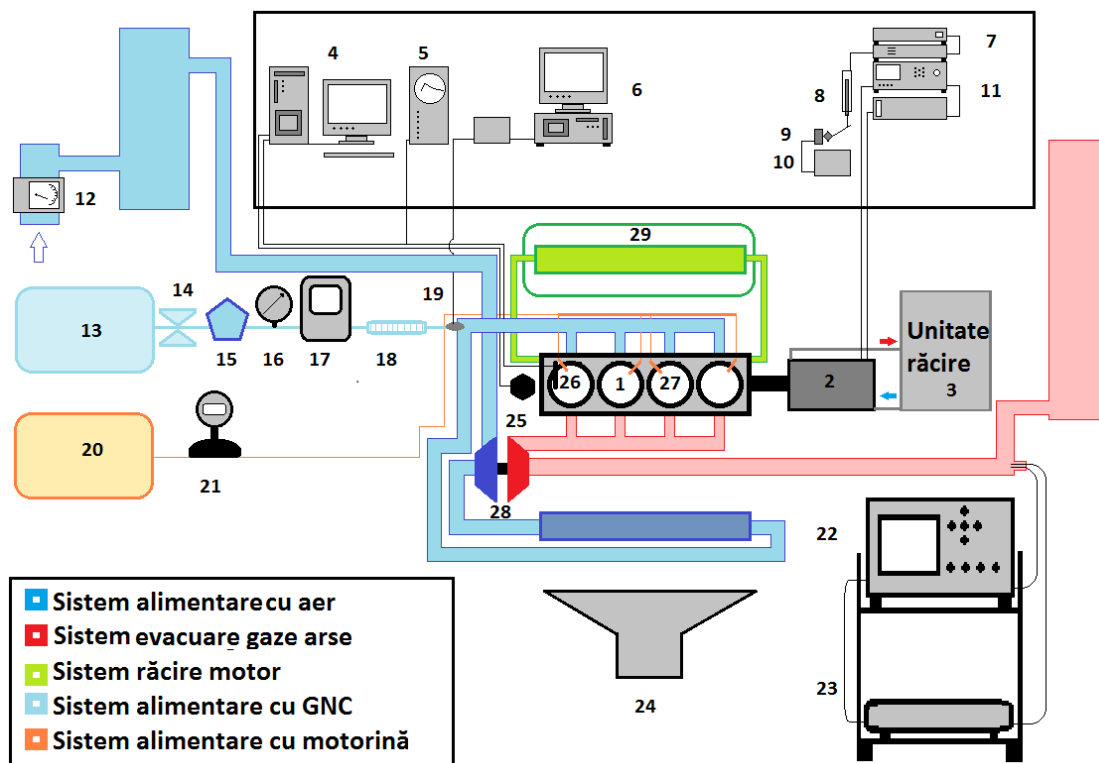


Figura 3.4 Schema generală a standului pentru încercări

Tabel 3.2 Componența generală a standului pentru încercări experimentale

Nr. crt.	Element
1	Motor
2	Frână electrică cu curenți turbionari
3	Unitate de răcire cu apă a frânei
4	Unitate de achiziție a datelor
5	Osciloscop
6	Unitate de control al sistemului de injecție de gaze naturale comprimate
7	Unitate de control și unitate de putere pentru servomotorul de acționare a pedalei de accelerație
8	Servomotor pentru acționarea pedalei de accelerație
9	Pedală de accelerație
10	Unitate electronică de control al motorului
11	Unitate de control și unitate de putere pentru frâna dinamometrică
12	Debitmetru volumic de aer
13	Recipient sub presiune pentru stocarea gazelor naturale comprimate
14	Vană pentru închiderea manuală a GNC
15	Regulator/reductor de presiune pentru GNC
16	Manometru pentru măsurarea presiunii de alimentare cu GNC
17	Debitmetru masic pentru măsurarea consumului de GNC
18	Stingător de flacără

19	Bloc de injectoare de gaze naturale comprimate
20	Rezervor de motorină
21	Debitmetru masic pentru măsurarea consumului de motorină
22	Analizor de gaze
23	Incintă pentru măsurarea emisiei de fum
24	Ventilator
25	Traductor de poziție a arborelui cotit
26	Traductor de presiune în cilindru
27	Injector de motorină
28	Turbocompresor
29	Răcitor cu apă

Alimentarea motorului diesel se realizează prin modul diesel-gaz: acest procedeu presupune injectarea de gaze naturale comprimate în colectorul de admisie; se realizează astfel amestecul aer-GNC care odată ajuns în camera de ardere, la sfârșitul comprimării este aprins cu ajutorul unui pilot de motorină, figura 1.6.

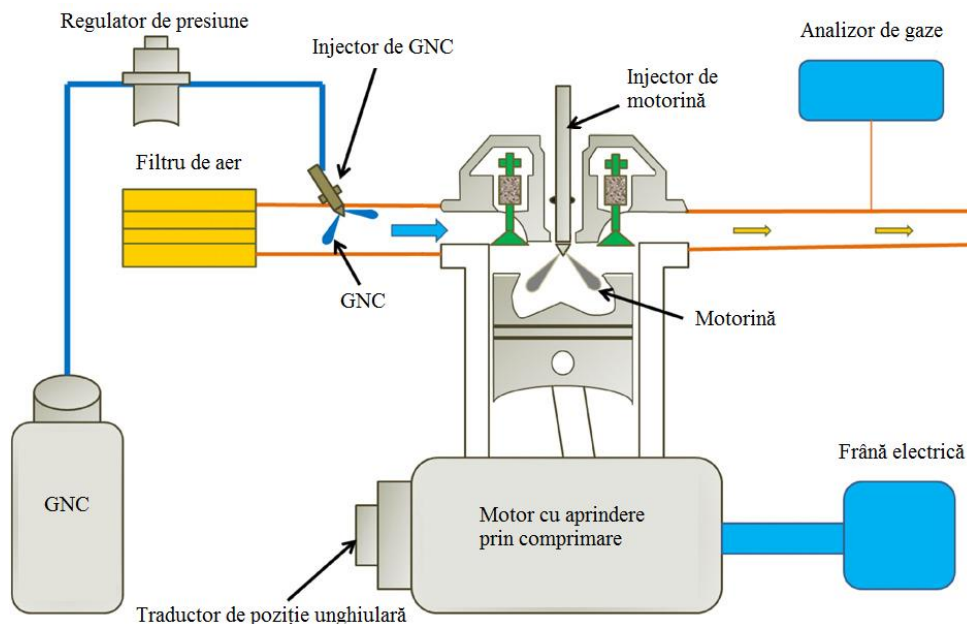


Figura 1.6 Schemă de principiu cu elementele principale ale instalației diesel-gaz pentru teste de performanță și stabilitate, [26]

Au fost prezentate rezultatele determinate experimental pe un motor Renault diesel K9K K792 pentru regimurile studiate (sarcinile de 40%, 55% și 70%) la 2000rpm și pentru diferiți coeficienți de substituție energetică a motorinei cu GNC.

Durata **întârzierii la autoaprindere** scade în toate cazurile studiate. Cea mai mare reducere a întârzierii la autoaprindere se constată la sarcini mari (11° RAC pentru coeficientul maxim de substituție energetică a motorinei cu GNC).

Odată cu creșterea coeficientului de substituție energetică a motorinei cu GNC, diagrama de **presiune a gazelor** va pune în evidență creșterea ponderii arderii amestecurilor preformate datorită creșterii omogenității amestecului aer–combustibil din cilindru.

Presiunea în cilindru crește cu până la 10% pentru toate sarcinile studiate atunci când coeficientul de substituție a motorinei cu GNC atinge valoarea maximă; această creștere se datorează puterii calorifice inferioare mai mari și creșterii omogenității amestecului aer–combustibil din cilindru. **Viteza maximă de creștere a presiunii** este influențată pozitiv de utilizarea de GNC în modul de alimentare DG; pentru toți coeficienții de substituție energetică a motorinei cu GNC crește proporția de amestec preformat care va arde în faza arderii rapide.

Consumul specific energetic înregistrează scăderi cu până la 50% la sarcini mici și mijlocii și cu până la 38% pentru sarcini de 70%; pentru toate regimurile de funcționare studiate, consumul specific energetic înregistrează o scădere semnificativă, lucru care este în concordanță cu dezideratul tuturor constructorilor de autovehicule: randament efectiv maxim cu scopul protejării resurselor și mediului înconjurător, [93], [94]. Scăderea consumului specific energetic are loc datorită puterii calorifice inferioară mai mare a gazelor naturale comprimate și creșterii ponderii arderii amestecurilor preformate.

Durata fazei arderii rapide scade odată cu creșterea sarcinii motorului datorită creșterii numărului de nuclee de flacără de la care arderea se va propaga în amestecul preformat. Injecția de GNC va mări durata acestei faze și o va face mai puțin sensibilă la creșterea sarcinii.

Durata arderii difuzive va crește odată cu creșterea sarcinii motorului datorită unei cantități mai mari de motorină arsă în această fază. Injecția de GNC va determina scurtarea acestei faze prin reducerea dozei principale de motorină pe ciclu și o va face mai sensibilă la creșterea sarcinii.

Pentru toate regimurile studiate injecția de gaze naturale comprimate va determina creșterea **cantității de căldură** degajată pe ciclu.

Admisia de GNC va avea un impact pozitiv asupra **vitezei de degajare a căldurii** amestecului preformat apărut în urma vaporizării preinjecției de motorină; alimentarea în modul DG influențează negativ **viteza maximă de degajare** a căldurii.

Pentru toate regimurile studiate, injecția de gaze naturale comprimate are un efect negativ asupra **stabilității întârzierii la autoaprindere, sfârșitului fazei arderii rapide și sfârșitului fazei arderii difuzive**. Dacă pentru stabilitatea $\alpha_{5\%FMA}$ influența GNC este mare, CoV pentru sfârșitul fazei arderii difuzive are valori mici.

Creșterea sarcinii motorului conduce la o îmbunătățire a stabilității arderii.

Injecția de gaze naturale comprimate aduce influențe preponderent negative asupra **coeficientului de variație a presiunii maxime în cilindru**; acest fenomen se face observat pe fondul unui control imprecis al cantității de GNC admise în cilindru. Alimentarea motorului în modul DG are impact foarte redus asupra CoV_{pmax} .

Presiunea medie indicată este influențată pozitiv de injecția de GNC pentru toate regimurile studiate; reducând varietatea speciilor din doza de combustibil pe ciclu se pot obține valori similare ale lucrului mecanic specific realizat pe cicluri diferite.

Injecția de GNC determină scăderea emisiei de **dioxid de carbon** pentru toate regimurile de funcționare a motorului studiate; creșterea sarcinii motorului determină o reducere a concentrației emisiei de CO₂ la utilizarea de GNC; dacă la sarcini mici concentrația de CO₂ scade cu 20% la

sarcina de 70% aceasta nu înregistrează scăderi mai mari de 7%. Scăderea emisiei de CO₂ se datorează concentrației scăzute de carbon din compoziția combustibilului alternativ. Considerat element cu influență majoră în producerea efectului de seră, dioxidul de carbon stabilește și la momentul actual bareme pentru taxarea companiilor atât pentru producerea de autovehicule cât și pentru nivelul emisiilor motoarelor construite; studii de actualitate prezintă metode de reducere a dioxidului de carbon din atmosferă prin captarea lui, [95].

La sarcini mici și mijlocii emisia de *oxizi de azot* atinge un nivel cu până la 10% mai mare atunci când motorul este alimentat în modul DG; la sarcina de 70% injecția de GNC are influențe pozitive, motorul emițând cu până la 33% mai puțin NO_x. Următorii factori pot influența pozitiv concentrația de oxizi de azot: cantitate mai mică de aer disponibil pe ciclu (substituit de GNC), temperatura mai mică a flăcării produse de GNC și timp mai scurt de formare (datorită creșterii ponderii fazei arderii rapide).

La alimentarea motorului în modul DG, emisia de *hidrocarburi nearse* este mai mare pentru toate regimurile studiate (concluzie confirmată și de [96] pentru regimurile de funcționare a motorului studiate). Principalii factori sunt: blocarea de GNC în interstițiile piston cilindru și trecerea de GNC direct în evacuare pe timpul suprapunerii deschiderii supapelor. Pentru sarcini mici stingerea flăcării în amestec sărac poate reprezenta un alt motiv pentru creșterea emisiei de hidrocarburi nearse.

Emisia de *fum* este influențată în moduri diferite:

- La sarcini joase alimentarea cu gaze naturale comprimate face ca emisia de fum să crească, în primul rând din cauza arderii incomplete promovate în primul rând de regimul termic scăzut al motorului.
- La sarcini medii, pe fondul creșterii temperaturii în cilindru, tendința generală este de scădere a emisiei de fum odată cu creșterea raportului de substituție x_c .
- La sarcini mari se înregistrează o scădere de 30% a emisiilor de fum odată cu creșterea raportului de substituție x_c , dar până la o anumită valoare a acestuia, datorită temperaturii ridicate. După acest prag al x_c , cantitatea de aer din cilindru devine insuficientă, iar emisia de fum crește datorită înrăutățirii arderii.

Capitolul 4 – Modelarea proceselor termo–gazodinamice din cilindrul motorului cu aprindere prin comprimare

Pentru a construi un model care să genereze date cu valori similare celor determinate experimental, s-a pornit de la un sistem AMESIM predefinit: Engine_SingleCylinder_Diesel. Acest model a suferit o serie de modificări: modelul arderii în cilindru a fost substituit cu unul care utilizează un fluid compus din 12 gaze; modelele colectoarelor de admisie respectiv evacuare au fost substituite cu modele pentru incinte cu volum și presiune constante care utilizează de asemenea fluid cu 12 gaze; au fost adăugate injectoare pentru simularea mai exactă a injecției de motorină (pre-injecție, doza principală și post-injecție), a fost adăugat un sistem nou de injecție pentru alimentarea cu gaze naturale comprimate; deși modificarea inițială a reprezentat fidel sistemul fizic (injecție indirectă în colectorul de admisie – figura 4.1), limitările instrumentului software

AMESIM (gazele naturale admise în cilindru împreună cu aerul necesar arderii nu sunt considerate combustibil ci gaz ars) au condus la adăugarea unui sistem de injecție directă de combustibil pentru care injecția s-a făcut cu 120°RAC înainte de PMI, figura 4.2; beneficiind de parametrizarea modelului conform căreia tot combustibilul injectat înainte de declanșarea arderii va genera prin vaporizare amestec preformat și va arde în faza arderii rapide, putem spune că odată cu injecția de GNC ponderea amestecului preformat va crește și arderea în cilindru va căpăta trăsături similare arderii amestecurilor omogene; modelul construit este reprezentativ pentru investigațiile ulterioare.

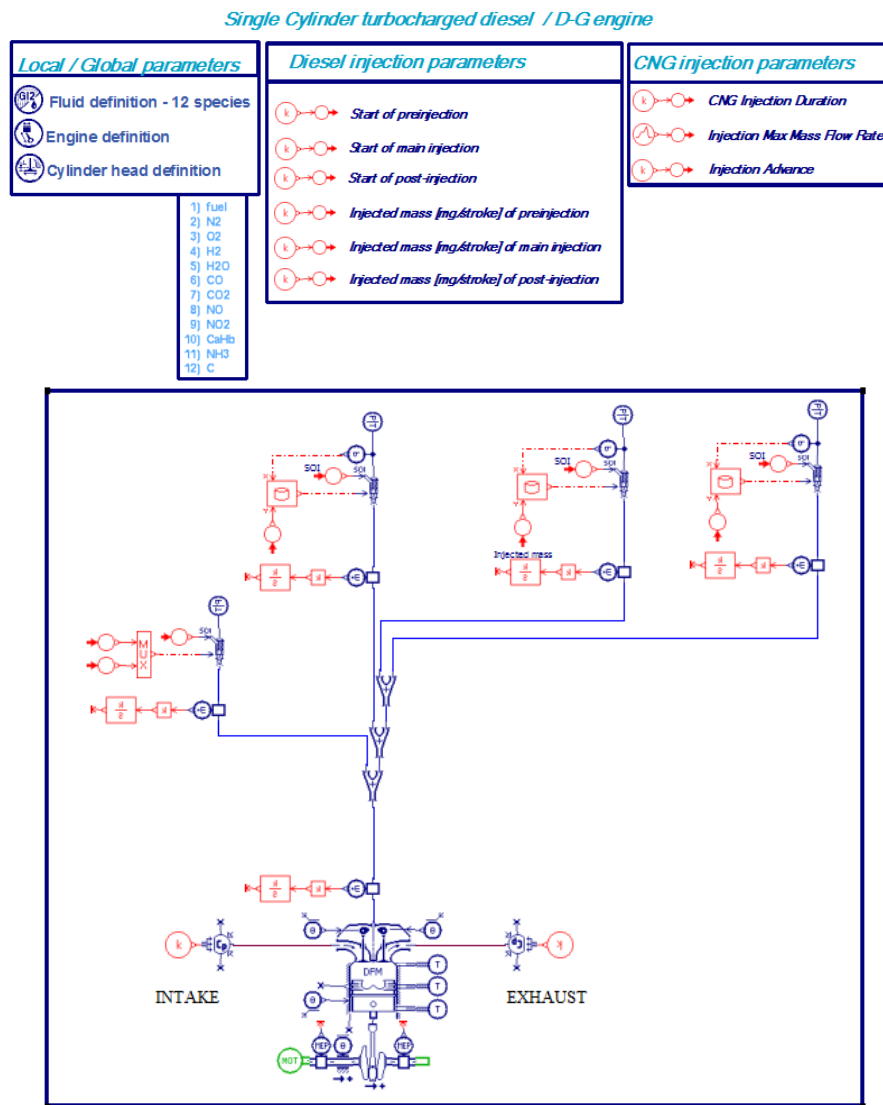


Figura 4.2 Modelul termo-gazodinamic pentru simularea arderii în motorul monocilindru diesel alimentat standard și în modul DG

După optimizare, sistemul conține următoarele submodele:

- generatorul pentru mișcarea de rotație (PM000);
- modelul pentru măsurarea presiunii medii indicate (ENGMPESE11);

- modelul pentru calculul momentului motor (ENGCRK31);
- sursa pentru moment motor nul (T000);
- modelul pentru simularea arderii în cilindru unui motor diesel (ENG12DFM00);
- modelul pentru partea inferioară a chiulasei unde sunt calculate transferul de căldură, cantitatea de aer admisă în cilindru și cantitatea de gaze arse evacuate (ENG12CYLH030);
- modelul pentru partea superioară a chiulasei unde sunt implementate legea de ridicare a supapelor și sincronizarea cu poziția unghiulară a arborelui cotit (ENG12CYLH010);
- sursele de temperatură și presiune constante (ENGCS001);
- joncțiunile pentru injecție multiplă (ENGMINJ01);
- senzorul pentru poziție unghiulară (ENGGLBAS21);
- generatorul de poziție arbore cotit (ENGGLBA11);
- senzor de presiune (ENGTFPSE02);
- volum cu aport de căldură conform utilizării fluidului motor cu 12 gaze (ENG12CH03);

Calibrarea globală a modelului se realizează prin următoarele categorii de parametri:

- **definiția fluidului** care participă în procesul de ardere (aer, motorină, GNC, și gaze de ardere). Acești parametri reprezintă proprietățile fizice și chimice ale fluidului motor (aer, combustibil, gaze de evacuare) pe baza cărora modelul matematic va opera. Acest submodel utilizează 12 gaze (Combustibil, N₂, O₂, H₂, H₂O, CO, CO₂, NO, NO₂, HC, NH₃, particule PM) și un lichid (pentru lichid se vor parametriza valorile x, y respectiv z din C_xH_yO_z pentru a calcula durata de vaporizare a combustibilului). Principalii parametri ai combustibilului utilizați de modelul matematic sunt: puterea calorică inferioară, conținutul de carbon, hidrogen, respectiv oxigen, densitatea combustibilului în stare lichidă, căldura specifică a combustibilului în stare lichidă, căldura latentă pentru vaporizare, căldura specifică la presiune constantă, viscozitatea, conductivitatea termică, constanta gazului perfect.
- **definiția motorului** conține caracteristicile fizice ale motorului care au influență asupra performanțelor acestuia
- **definiția chiulasei**, oferă posibilitatea modificării dimensiunilor, momentelor de deschidere/închidere precum și a legilor de ridicare a supapelor
- **parametrizare globală** pentru creșterea eficienței în lucrul cu instrumentul software AMESIM: spre exemplu dacă este necesară o temperatură generală folosită de mai multe submodele aceasta poate fi introdusă într-un set de parametri globali; această temperatură se va actualiza simultan în toate submodelele care o utilizează.
- **parametrizare locală pentru fiecare subsistem** (ex: cu generatorul pentru mișcarea de rotație a fost setată turația motorului, modelul pentru simularea arderii în cilindru: condiții inițiale de temperatură și presiune, caracteristici fizice ale injectorului, parametri specifici calculului întârzierii la autoaprindere, parametri specifici calculului arderii, parametri specifici calculului emisiilor poluante, parametri specifici calculului pierderilor de căldură).

În figurile 4.17–4.19 sunt prezentate diagramele indicate ale ciclului motor la alimentarea cu motorină a motorului la sarcinile de 40%, 55%, 70% și turația de 2000rot/min determinate experimental și prin modelarea proceselor termo-gazodinamice din cilindru.

Calibrarea modelului a făcut ca diferențele între rezultatele modelării și ale investigațiilor experimentale să fie foarte mici. S-au utilizat consumurile orare de combustibil și aer la modelarea proceselor termo-gazodinamice din cilindru înregistrate la investigațiile experimentale ale motorului. Cantitatea de combustibil injectată a fost împărțită în trei injecții pe ciclu.

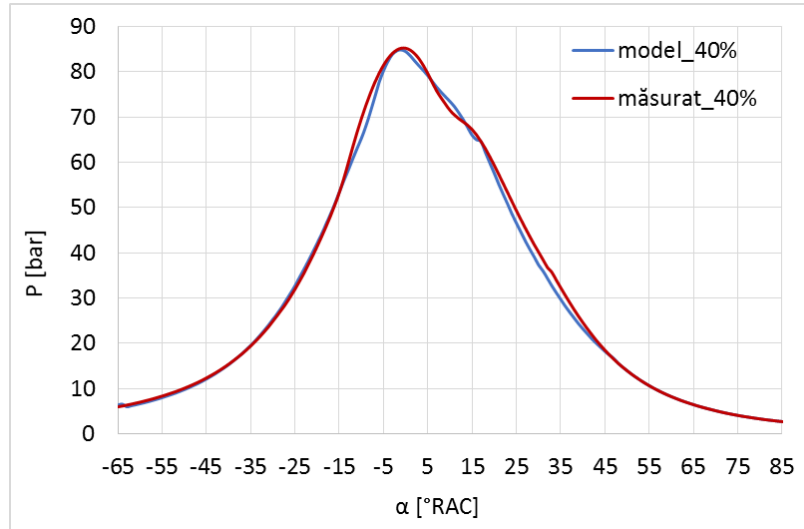


Figura 4.17 Evoluția presiunii în cilindru calculată și determinată experimental la sarcina de 40% la alimentarea standard a motorului

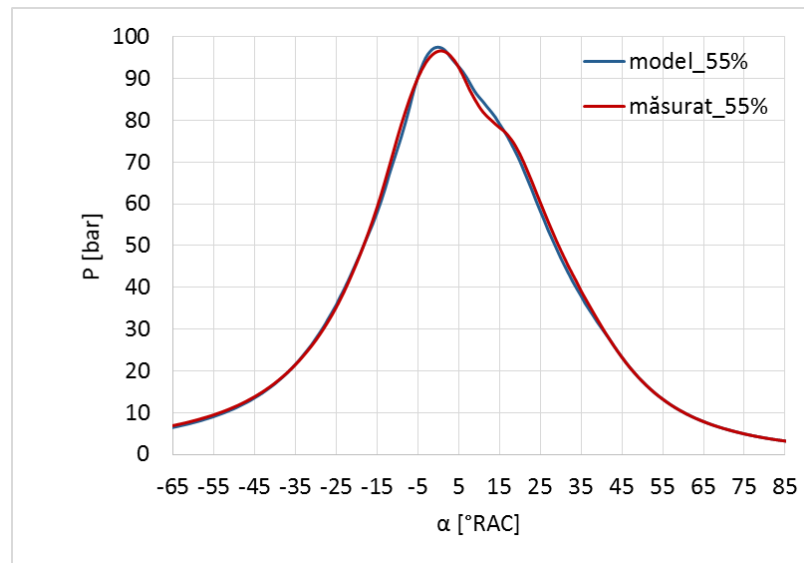


Figura 4.18 Evoluția presiunii în cilindru calculată și determinată experimental la sarcina de 55% la alimentarea standard a motorului

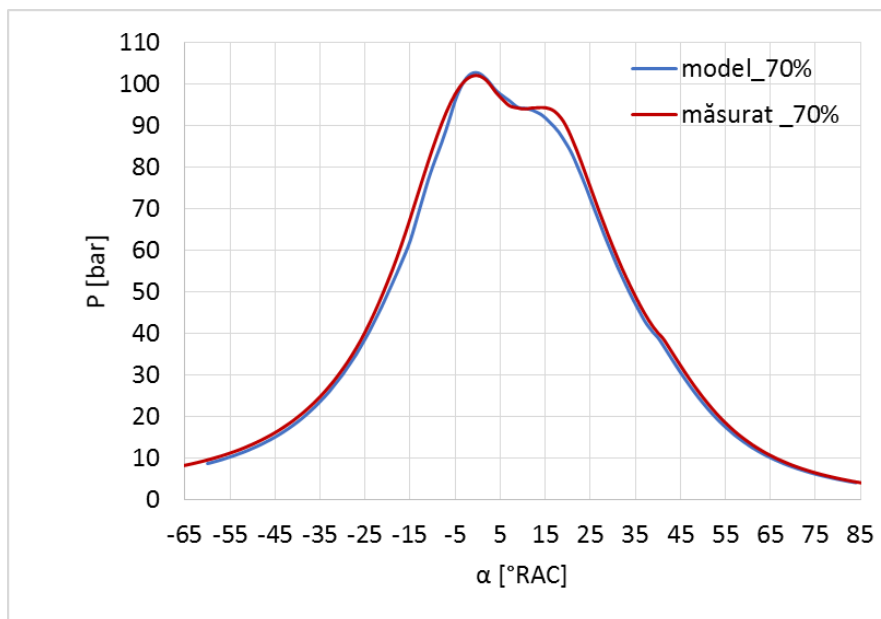


Figura 4.19 Evoluția presiunii în cilindru calculată și determinată experimental la sarcina de 70% la alimentarea standard a motorului

Capitolul următor prezintă o comparație între rezultatele investigației experimentale și cele obținute cu ajutorul modelului termo-gazodinamic; evoluția presiunii în cilindru, concentrația de fum, concentrația de dioxid de carbon, concentrația de oxid de azot din gazele arse, degajarea de căldură și viteza de degajare a căldurii reprezintă mărimile pe baza cărora este apreciată calitatea dezvoltării și calibrării modelului matematic.

Capitolul 5 - Analiza comparativă a rezultatelor investigațiilor experimentale și teoretice

Pornindu-se de la participațiile masice ale fiecărui combustibil injectat pe ciclu au fost identificate valori pentru parametri echivalenți utilizați de către model:

- puterea calorifică inferioară;
- fracția de atomi de carbon respectiv hidrogen din molecula de combustibil;
- densitatea combustibilului în stare lichidă;
- căldura specifică a combustibilului în stare lichidă;
- temperatura de referință pentru căldura latentă de vaporizare a combustibilului;
- căldura specifică la presiune constantă;
- viscozitatea absolută;
- conductivitatea termică;
- constanta specifică a gazului.

Pentru fiecare dintre cele 15 cazuri investigate experimental a fost realizată câte o versiune a modelului matematic pentru a cărei calibrare, alături de parametri menționați în paragraful

anterior, au mai fost utilizate: cantitatea și temperatura aerului admis în cilindru, presiunea de supraalimentare, temperatura gazelor de evacuare, masa fiecărui combustibil pe ciclu.

Printre avantajele utilizării unui model matematic construit și parametrizat precis se numără reducerea costurilor cu încercările experimentale și cu eventuale defecțiuni apărute ca urmare a erorilor de operare a sistemului fizic (depășirea unor praguri de temperaturi, presiuni, sau turații, etc); totodată cu ajutorul modelului matematic inginerul cercetător poate face un număr foarte mare de iterații pentru diferite regimuri de funcționare; dintre acestea le va supune investigației experimentale doar pe cele de interes; astfel se reduce timpul petrecut în celula pentru încercări experimentale; de asemenea printre avantajele se mai poate număra și protecția fizică a celei pentru investigații experimentale prin identificare unor regimuri critice de funcționare și evitarea acestora pe parcursul încercărilor.

Modelul utilizat pentru simularea arderii în motorul cu aprindere prin comprimare, alimentat atât standard cât și în modul DG a pornit de la unul deja existent în librăria AMESIM însă a suferit o serie de modificări pentru a apropia datele calculate de cele determinate experimental.

Următoarele concluzii au fost formulate în legătură cu performanța modelului termogazodinamic:

Variația presiunii în cilindru a fost calculată utilizând următorii parametri: cantitatea de aer pe ciclu, cantitățile fiecărui combustibil pe ciclu, presiunea de supraalimentare, temperatura aerului admis, temperatura gazelor de evacuare. Pentru toate cele trei sarcini analizate s-a observat că modelul reușește să calculeze valori ale presiunii în cilindru foarte apropiate de cele determinate experimental. De asemenea pentru toate regimurile studiate sunt observate lipsa de precizie în calculul căderii de presiune datorate încălzirii picăturilor dozei principale (este neglijată căldura pierdută pentru preîncălzirea picăturilor de motorină) și creșterea presiunii calculate din cilindru spre finalul arderii peste nivelul celei determinate experimental (datorită puterii calorifice inferioare mediate pe baza participațiilor masice ale fiecărui combustibil); aceste derivate au impact foarte mic asupra altor mărimi.

Cantitatea de căldură degajată și viteza maximă de degajare a căldurii obținute prin calcul au derivate mici față de valorile determinate experimental. Cantitatea de căldură nu va înregistra dispersii mai mari de 10%; odată cu creșterea sarcinii motorului calculul vitezei maxime de degajare a căldurii se face mai precis reducându-se de la erori de 20% la sarcini mici la erori de 5% la sarcini mari; creșterea stabilității în funcționare a motorului face mai ușoară determinarea prin calcul a vitezei maxime de degajare a căldurii.

Concentrația de particule PM și opacitatea

Aprecierea emisiei de fum se realizează pe baza calculului ponderii de particule PM din gazele de evacuare. Prin suprapunerea acestor diagrame peste diagramele valorilor opacității determinate experimental se observă că modelul confirmă tendințele observate cu prilejul investigației experimentale;

Concentrația de dioxid de carbon are în toate cazurile studiate tendințe similare cu cele determinate experimental. Derivate mai mici de 5% pot fi identificate pentru toate regimurile studiate.

Concentrația de oxizi de azot este determinată precis prin modelul matematic pentru toate regimurile studiate derivatele situându-se sub pragul de 10%.

Analiza **concentrației de monoxid de carbon** determinată cu ajutorul modelului arată creșteri de până la 6 ori a emisiei de monoxid de carbon odată cu atingerea coeficientului maxim de substituție energetică a motorinei cu GNC independent de regimul motor studiat.

Influența sarcinii motorului asupra concentrației de oxigen din gazele de ardere

Valorile teoretice ale concentrației de O₂ arată o reducere a cantității de oxigen din gazele de ardere odată cu creșterea sarcinii atât la alimentarea standard a motorului cât și la alimentarea în modul DG.

Utilizarea ulterioară a modelului matematic

Finalizarea cu succes a etapelor de parametrizare respectiv de validare a modelului matematic, face posibilă aprofundarea analizei influenței alimentării motorului diesel în modul DG; prin calcul se pot obține valorile unor mărimi sau parametri care nu au putut fi determinați experimental: evoluția temperaturilor (din cilindru, a gazelor arse, a încărcăturii proaspete), cantitatea de combustibil nears rămas în cilindru, cantitatea de gaze arse rămase în cilindru, forța de apăsare a gazelor asupra pistonului, etc.

Optimizările ce pot fi aduse modelului termo-gazodinamic sunt:

- identificarea fiecărui combustibil utilizat;
- utilizarea de combustibil injectat în poarta supapei;
- transformarea mărimilor de intrare (ex: temperaturi, presiuni, timpi de injecție, sau debite) din valori constante în diagrame care iau în considerare parametri variabili ai motorului;
- utilizarea unui motor complet cu toți cei patru cilindri pentru a fi considerate și influențele (ex: influențe gazodinamice din colectoarele de admisie/evacuare);
- activarea funcției de blow-by (pierderea de gaze pe lângă piston în carterul inferior);
- dezvoltarea și activarea calcului concentrației de hidrocarburi nearse.

Capitolul 6 - Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare

6.1 CONCLUZII FINALE

Lucrarea elaborată a avut ca obiectiv principal analiza influenței utilizării gazelor naturale comprimate la un motor diesel alimentat în modul diesel-gaz.

Cercetările teoretice și experimentale efectuate privind alimentarea motorului diesel de automobil cu gaze naturale comprimate în modul D-G permit formularea următoarelor concluzii:

- Reducerea duratei întârzierii la autoaprindere la creșterea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC la toate sarcinile motorului investigate datorită creșterii omogenității amestecului aer-combustibil.

- Reducerea duratei arderii la mărirea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC datorită creșterii ponderii arderii amestecurilor preformate.

- Reducerea vitezei maxime de degajare a căldurii cu 12% la sarcina de 70% a motorului la creșterea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC.

- Creșterea cu 25% a vitezei maxime de degajare a căldurii la sarcina de 55% a motorului pentru un grad de substituție energetică a motorinei cu GNC de 7% și reducerea ușoară a acesteia pentru grade de substituție energetică a motorinei cu GNC mai mari de 20%.

- La sarcini mici ale motorului influența GNC asupra vitezei maxime de degajare a căldurii este neînsemnată.

- Creșterea presiunii maxime în cilindru datorită creșterii cantității de amestec preformat.

- Mărirea vitezei maxime de creștere a presiunii pentru toți coeficienții de substituție energetică a motorinei cu GNC datorită creșterii ponderii arderii amestecurilor preformate.

- Scăderea consumului specific efectiv cu până la 50% la sarcini mici și mijlocii și cu până la 38% pentru sarcini de 70% datorită creșterii ponderii fazei arderii amestecurilor preformate și a puterii calorifice inferioare a gazelor naturale comprimate mai mare decât cea a motorinei.

- Creșterea presiunii medii indicate la creșterea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC pentru toate regimurile studiate datorită puterii calorifice inferioare a gazelor naturale comprimate mai mare decât a motorinei și a creșterii ponderii fazei arderii rapide.

- Reducerea concentrației de dioxid de carbon din gazele de evacuare cu 7% la sarcini mari și cu 20% la sarcini mici la creșterea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC datorită conținutului mai redus de carbon al gazelor naturale.

- Reducerea emisiei de oxizi de azot cu până la 33% la sarcini mari ale motorului la creșterea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC datorită reducerii cantității de aer din cilindru și a reducerii temperaturii gazelor. La sarcini mici și mijlocii concentrația emisiilor de oxizi de azot atinge un nivel cu până la 10% mai mare la creșterea gradului de substituție energetică a motorinei cu GNC.

- Creșterea concentrației de hidrocarburi nearse ca efect al blocării de amestec preformat în interstițiile cilindrului, a evacuării directe a GNC în perioada deschiderii suprapuse a supapelor și posibil a stingerii flăcărilor la sarcini mici.

- La sarcini joase alimentarea cu gaze naturale comprimate face ca emisia de fum să crească, în primul rând din cauza arderii incomplete promovate de regimul termic scăzut al motorului.

- La sarcini medii, pe fondul creșterii temperaturii în cilindru, tendința generală este de scădere a emisiei de fum odată cu creșterea raportului de substituție energetică a motorinei cu GNC.

- La sarcini mari se înregistrează o scădere de 30% a emisiilor de fum odată cu creșterea raportului de substituție energetică a motorinei cu GNC.

Alimentarea motorului diesel de automobil cu gaze naturale comprimate în modul D-G, prin influențele pozitive pe care le are asupra emisiilor poluante și al celor cu efect de seră și asupra presiunii medii indicate reprezintă o alternativă cu impact pozitiv asupra calității aerului din aglomerațiile urbane sau puternic industrializate, contribuind la creșterea calității vieții.

6.2 CONTRIBUȚII PERSONALE

Principalele contribuții personale la elaborarea tezei de doctorat sunt:

- Analiza contextului internațional privind reducerea accentuată a emisiilor poluante și a gazelor cu efect de seră prin utilizarea GNC drept combustibil alternativ pentru motorul diesel de automobil.

- Analiza proprietăților fizice și chimice ale celor doi combustibili utilizați la alimentarea motorului diesel investigat și stabilirea implicațiilor asupra funcționării lui.

- Analiza unor procese tehnologice de obținere, stocare și transport ale gazelor naturale comprimate în vederea stabilirii unor soluții mai eficiente de producere.
- Analiza metodelor de alimentare a motorului diesel de automobil cu gaze naturale comprimate.
- Analiza stadiului actual al cercetărilor în domeniu și dezvoltarea lui cu noi informații obținute prin efectuarea cercetărilor teoretice și experimentale.
- Upgradarea standului de încercări în vederea efectuării investigațiilor experimentale specifice obiectivului general al tezei de doctorat – alimentarea unui motor diesel de automobil în modul D-G cu motorină și gaze naturale comprimate.
- Stabilirea unei proceduri adecvate pentru efectuarea investigațiilor experimentale ale motorului diesel de automobil alimentat cu gaze naturale comprimate în modul D-G.
- Prelucrarea și interpretarea rezultatelor investigațiilor experimentale.
- Dezvoltarea și parametrizarea unui model termo–gazodinamic AMESIM pentru simularea proceselor termo-gazodinamice din cilindrul motorului diesel de automobil alimentat cu gaze naturale comprimate. O activitate susținută a reprezentat identificarea unei metode prin care să fie depășită limitarea modelului termo–gazodinamic standard AMESIM (lipsa posibilității de a modela alimentarea în modul diesel-gaz).
- Validarea modelului termo–gazodinamic dezvoltat.
- Diseminarea rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale în reviste cu circulație națională și internațională și în volumele unor conferințe internaționale de prestigiu.
- Participarea la programele de dezvoltare în domenii conexe ingineriei organizate de Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA BUCUREȘTI, în calitate de student doctorand mi-a oferit perspective noi și ocazia de a aplica cunoștințele dobândite în alte domenii: dezvoltarea unui plan de afacere bazat pe cunoștințele tehnice dobândite cu prilejul elaborării tezei.

6.3 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Cercetările teoretice și experimentale efectuate de autor deschid noi direcții de cercetare privind utilizarea eficientă a gazelor naturale comprimate la motorul diesel de automobil:

- Injecția de GNC în poarta supapei de admisie/directe în cilindrul motorului și controlul individual și sincronizat al injectoarelor de gaze naturale comprimate.
- Interfațarea eficientă a celor două unități de control (unitatea electronică de control a motorului diesel standard și unitatea electronică de control a injecției de GNC) la toate regimurile de funcționare.
- Optimizarea reglajului motorului (avans injecție motorină, mărime pilot motorină, consum GNC, dozaj, etc.) la toate regimurile de funcționare a motorului.
- Efectuarea investigațiilor experimentale în condiții reale, la regimuri de funcționare frecvent utilizate în exploatare.
- Optimizarea parametrizării modelului termo-gazodinamic AMESIM la utilizarea GNC în modul D-G.

- Activarea funcției de blow-by.

DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR EFECTUATE

Rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale efectuate de autor pe durata elaborării tezei de doctorat au fost publicate în reviste prestigioase editate/volume ale unor conferințe internaționale.

Lucrări publicate în reviste:

1. Silviu ROTARU, Constantin PANA, Nicolae NEGURESCU, Alexandru CERNAT, Dinu FUIOIESCU, Cristian Nikolaos NUȚU, „*CNG INFLUENCE ON COMBUSTION IN AN AUTOMOTIVE DIESEL ENGINE FUELED IN DIESEL-GAS MODE*”, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 82, Iss. 4, 2020, pp. 67-78, ISSN (print): 1454-2358 / (online): 2286-3699, Revistă categoria B+, Cod CNCIS 102, indexat în BDI: ULRICHS INTERNATIONAL, PERIODICALS DIRECTORY, SCOPUS (<https://www.scopus.com/sourceid/21639>), INSPEC (www.theiet.org/publishing/inspec/support/docs/loj.cfm), METADEX (http://www.csa.com/ids70/serials_source_list.php?db=metadex-set-c), ELSEVIER SCIENCESS BIBLIOGRAPHIC DATABASES, ENGINEERING VILLAGE, CAMBRID-GE SCIENTIFIC ABSTRACTS (http://www.csa.com/ids70/serials_source_list.php?db=mchtrans-set-c), COMPENDEX lucrarea indexată în BDI SCOPUS la <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85097111593&origin=resultlist>

2. Silviu Rotaru, Constantin Pana, Nicolae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nutu, Dinu Fuiiorescu and Gheorghe Lazaroiu, CNG impact on combustion quality of a diesel engine fuelled in diesel-gas mode – Helyon – în curs de recenzie.

Lucrări prezentate la conferințe internaționale:

1. **S. Rotaru**, C. Pana, N. Negurescu, Al. Cernat, D. Fuiiorescu, Cr. N. Nutu, *Experimental investigations of an automotive diesel engine fuelled with natural gas in dual fuel mode*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 997(1), 012130, ACME code 6-22, Session ACME-06-01: Automotives. Engine and Transmission. Road Safety, indexat în BDI SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218549774>, respectiv <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85099246948&origin=resultlist>

2. **Silviu Rotaru**, Constantin Pană, Nicolae Negurescu, Alexandru Cernat, Dinu Fuiiorescu, Cristian Nikolaos Nutu, *Experimental study on combustion of an automotive diesel engine fuelled with CNG* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1262, The 10th

International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022) 09/06/2022 - 10/06/2022 Online. Citation S Rotaru 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1262 012072. DOI 10.1088/1757-899X/1262/1/012072,

3. **Silviu Rotaru**, Constantin Pană, Nicolae Negurescu, Alexandru Cernat, Dinu Fuioreescu, Cristian Nikolaos Nutu, *Effects of CNG quantity on combustion characteristics and emissions of a dual fuelled automotive diesel engine*, E3S Web of Conferences **180**, 01008 (2020), published by E3S Web-of-Conferences Open Access proceedings in Environment, Energy and Earth Sciences (eISSN: 2267-1242), and indexed in *Conference Proceedings Citation Index (Web of Science)*, *Scopus*, *DOAJ*, *EBSCO* and other prestigious scientific databases. (ISSN 2359-7941), pp. 10, , published online 24 July 2020, Journal E3S Web of Conference, eISSN:2267-1242, Publisher EDP Sciences, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018001008>, indexat si în SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=25229963900> indexat in BDI SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218549774> , respectiv <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85089497390&origin=resultslist>

4. **Silviu Rotaru**, Constantin Pană, Nicolae Negurescu, Gheorghe Lăzăroi, Alexandru Cernat, Dinu Fuioreescu, Cristian Nuțu, „*Researches regarding the CNG use at an automotive diesel engine*”, Part I – Advanced Powertrain and Propulsion, Book of Abstracts, The 30th SIAR International Congress of Automotive and Transportation Engineering SMAT 2019, sub egida FISITA, Editors Răcilă D L, Ilie D, Editura Universitaria, ISBN 978-606-14-1548-9, Craiova, October 23-25, 2019

Contracte și rapoarte științifice:

1. Burse pentru educația antreprenorială în rândul doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat (Be Antreprenor), ! COD MYSM 124539, IMPLEMENTARE: 10.07.2019 - 09.01.2021. , POCU: AXA PRIORITARĂ 6. Grant of European Social Fund from the Sectoral Operational Programme Human Capital 2014-2020, through the Financial Agreement with the title "Scholarships for entrepreneurial education among doctoral students and postdoctoral researchers (Be Antreprenor!)", Contract no. 51680/09.07.2019 - SMIS code: 124539.

Bibliografie selectivă

- [1] Atkinson S., Skinner G., Gebrekal T., What worries the world, <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2019-11/what-worries-the-world-september-2019.pdf>, World Worries, Ipsos 2019.
- [2] Seagrave J., McDonald J.D., Bedrick E., Edgerton E.S., Gigliotti A.P., Jansen J.J., Ke L., Naeher L.P., Seilkop S.K., Zheng M., Mauderly J.L., Lung toxicity of ambient particulate matter from southeastern U.S. sites with different contributing sources: relationships

between composition and effects. *Environ Health Perspect.* 2006 Sep;114(9):1387-93. doi: 10.1289/ehp.9234. PMID: 16966093; PMCID: PMC1570075.

- [3] Schultz E.S., Litonjua A.A. & Melén E., Effects of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution on Lung Function in Children. *Curr Allergy Asthma Rep* 17, 41 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11882-017-0709-y>.
- [4] Cazacu M.M., Timofte A., Balin I., Dimitriu D.G., Gurlui S., Complementary Atmospheric Urban Pollution Studies In The North-East Region Of Romania, Iasi CountyCazacu, Marius & Timofte, Adrian & Balin, Ioan & Dimitriu, Dan-Gheorghe & Gurlui, Silviu. (2011). Complementary atmospheric urban pollution studies in the north-east region of Romania, Iasi county. *Environmental engineering and management journal.* 10. 139-145. 10.30638/eemj.2011.020.
- [8] Imran S., Emberson D.R., Diez A., Wen D.S., Crookes R.J., Korakianitis T., Natural gas fueled compression ignition engine performance and emissions maps with diesel and RME pilot fuels, *Applied Energy*, Volume 124, 2014, Pages 354-365, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.067>.
- [11] Shenghua L., Longbao Z., Ziyang W., Jiang R., Combustion characteristics of compressed natural gas/diesel dual-fuel turbocharged compression ignition engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.* 2003;217(9):833-838. doi:10.1177/095440700321700909.
- [12] Napolitano P., Guido C., Beatrice C., and Del Giacomo N., Application of a Dual Fuel Diesel-CNG Configuration in a Euro 5 Automotive Diesel Engine, *SAE Technical Paper* 2017-01-0769, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-0769>.
- [13] Muralidharan, M., Srivastava, A., and Subramanian, M., Full Load Investigation of CNG–Diesel Dual-Fuel Heavy-Duty Engine with Selective Catalytic Reduction on Engine Performance and Emissions for Its Potential Use, *SAE Int. J. Engines* 15(3):393-411, 2022, <https://doi.org/10.4271/03-15-03-0020>.
- [14] Aklouche F.Z.. Etude caractéristique et développement de la combustion des moteurs Diesel en mode Dual-Fuel : optimisation de l'injection du combustible pilote. *Thermique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique*, 2018. Français. (NNT : 2018IMTA0072).
- [15] Egúsqüiza J. & Braga S., Braga Carlos., Performance and Gaseous Emissions Characteristics of a Natural Gas/Diesel Dual Fuel Turbocharged and Aftercooled Engine. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering - J BRAZ SOC MECH SCI ENG.* 31. 10.1590/S1678-58782009000200007, 2009.
- [16] Mahla, S. K. et al. Effect of EGR on Performance and Emission Characteristics of Natural Gas Fueled Diesel Engine, 2010 *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 4 pp 524 – 528.
- [17] Jamrozik A., Tutak W., Grab-Rogaliński K., An Experimental Study on the Performance and Emission of the diesel/CNG Dual-Fuel Combustion Mode in a Stationary CI Engine. *Energies* 2019, 12, 3857. <https://doi.org/10.3390/en12203857>.

- [18] Mbarawa M., Milton B.E., An Examination of the Maximum Possible Natural Gas Substitution for Diesel Fuel in a Direct Injected Diesel Engine, R & D Journal, 2005, 21 (1) incorporated into The SA Mechanical Engineer.
- [19] Wan Mansor W. N., Dual fuel engine combustion and emissions – an experimental investigation coupled with computer simulation Doctor of Philosophy Colorado State University Fort Collins, Colorado, Fall 2014.
- [22] ***CO2 Based Motor Vehicle Taxes In The EU in 2016, <http://www.acea.be>.
- [23] Health risks of air pollution in Europe, United States Environmental Protection Agency, www.eea.europa.eu, 2022.
- [24] Health assessment document for diesel engine exhaust, U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2002). Prepared by the National Center for Environmental Assessment, Washington, DC, for the Office of Transportation and Air Quality; EPA/600/8-90/057F. Available from: National Technical Information Service, Springfield, VA; PB2002-107661, and <<http://www.epa.gov/ncea>>.
- [26] Lijiang Wei, Peng Geng, A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance, Fuel Processing Technology, Volume 142, 2016, Pages 264-278, ISSN 0378-3820, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.018>.
- [27] Flynn P. F., Hunter G. L., Durrett R. P., Farrell L. A., & Akinyemi W. C. Minimum Engine Flame Temperature Impacts on Diesel and Spark-Ignition Engine NO_x Production. SAE Transactions, 109, 1286–1297. <http://www.jstor.org/stable/44634306>.
- [28] Reed R. J., North American Combustion Handbook, Volume 1, 3rd edition, North American Mfg Co., 1986. Archived from the original on 2011-07-16. Retrieved 2009-12-09.
- [37] Suresh Kumar K., Sudheer Premkumar B., Rajagopal K., Murthy V.S.S., Rao S., NagaRaja C., Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission Characteristics of a Pre-Mixed CNG - Diesel Dual Fuel Mode Engine, IOSR-JMCE, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 9, Issue 2, (Sep.-Oct. 2013).
- [41] Grigoratos T., Fontara G., Martini G., Peletto C., A Study of Regulated and Green House Gas Emissions from a Prototype Heavy-Duty Compressed Natural Gas Engine under Transient and Real Life Conditions, Energy 103 (2016): 340-355, <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.157>.
- [42] Belgiorno G., Di Blasio G., Beatrice C., Parametric Study and Optimization of the Main Engine Calibration Parameters and Compression Ratio of a Methane-Diesel Dual Fuel Engine, Fuel 222, no. 15 (2018): 821-840, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.038>.
- [43] Königsson F., On Combustion in the CNG-Diesel Dual Fuel Engine, PhD paper, 2019.
- [49] Selim M. Y.E, Pressure–time characteristics in diesel engine fueled with natural gas, Renewable Energy, Volume 22, Issue 4, 2001, Pages 473-489, ISSN 0960-1481, [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00115-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00115-4), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001154>).

- [50] Schaberg P.W., Priede T., Dutkiewicz R.K., Effects of a rapid pressure rise on engine vibration and noise, SAE paper 900013, 1990.
- [51] Galinsky G., Reader G.T., Potter I.J., Gustafson R.W., Effect of various working fluid compositions on combustion noise in diesel engines, AIAA-94-3996-CP, 1994:1157–1162.
- [52] Imoto K., Sugiyama S., Fukuzawa Y., Reduction of combustion-induced noise in IDI diesel engine (1st report, target of cycle and low-noise combustion). Trans of JSME, B 1997;63(605):329–35.
- [87] **Rotaru, S.**, Pana, C., Negurescu, N., Cernat, A., Fuiiorescu, D. and Nuțu, C.N., 2020. Effects of CNG quantity on combustion characteristics and emissions of a dual fuelled automotive diesel engine. In E3S Web of Conferences (Vol. 180, p. 01008). EDP Sciences.
- [88] **Rotaru, S.**, Pana, C., Negurescu, N., Cernat, A., Fuiiorescu, D. and Nuțu, Experimental investigations of an automotive diesel engine fuelled with natural gas in dual fuel mode ACME 2020 / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 997 (2020) 012130 / IOP Publishing / doi:10.1088/1757-899X/997/1/012130.
- [89] **Rotaru, S.**, Pana, C., Negurescu, N., Cernat, A., Fuiiorescu, D. and Nuțu, Researches regarding the CNG use at an automotive diesel engine, SMAT 2019.
- [90] **Rotaru, S.**, Pana, C., Negurescu, N., Cernat, A., Fuiiorescu, D. and Nuțu, CNG INFLUENCE ON COMBUSTION IN AN AUTOMOTIVE DIESEL ENGINE FUELED IN DIESEL-GAS MODE U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 82, Iss. 4, 2020 ISSN 1454-2358.
- [92] **Rotaru, S.**, Pana, C., Negurescu, N., Cernat, A., Fuiiorescu, D. and Nuțu, Experimental study on combustion of an automotive diesel engine fuelled with CNG, Automotives. Engine and Transmission. Road Safety. The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering, ACME 2022, June 9-10, 2022, Iasi, Romania (The ACME2022 Conference Proceedings will be published by IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, an open-access proceedings journal, with abstracting and indexing in ISI Web of Science (Conference Proceedings Citation Index), Scopus, EI Compendex, among others (as a proceedings journal, an Impact Factor is not assigned) – în curs de indexare.
- [93] Andreescu C., Notițe de curs – Protecția mediului și a resurselor, Facultatea de Transporturi, UBP, 2014.
- [94] Aramă C., Apostolescu N., Grunwald B., Poluare aerului de către motoarele cu ardere internă, Editura Tehincă, ISBN:168IPOLTPO, 1975.
- [95] James C.S., Howard J.J., Experimental hydrate formation and gas production Scenarios based on CO2 sequestration, Fuel 2019, 235, 763–774.
- [96] Nirendra N. M., Robert R.R. Verhelst S., Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels, Fuel, Volume 109, 2013, Pages 669-678, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.007>.

[108] Rotaru S., Plan de afacere: Dezvoltarea unei companii care să ofere soluții de alimentare DG a motoarelor cu aprindere prin comprimare staționare de generator pentru BeAntreprenor 2019 – 2020.