

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: INGINERIE MECANICĂ

Ing. Dan Mihai DOGARIU

Optimizarea proceselor de formare a amestecului și
arderii din motoarele cu ardere internă

Optimization of Mixture Formation and Combustion
Processes of Internal Combustion Engines

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător științific

Prof.dr.ing. Anghel CHIRU

BRAȘOV, 2020

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov
Nr. 10692 din 17.07.2020

PREȘEDINTE:	Prof. Dr. Ing. Ioan Călin ROȘCA Decan, Facultatea de Inginerie Mecanică Universitatea Transilvania din Braşov
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:	Prof. Dr. Ing. Anghel CHIRU Universitatea Transilvania din Braşov
REFERENȚI:	Prof. Dr. Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. Cornel STAN Westfälische Hochschule Zwickau
	Prof. Dr. Ing. Gheorghe Alexandru RADU Universitatea Transilvania din Braşov
	Prof. Dr. Ing. Ilie DUMITRU Universitatea din Craiova

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat:

17 septembrie 2020, ora 10:00, online.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa m.dogariu@unitbv.ro.

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

CUVÂNT ÎNAINTE

În urma unor ani de studiu petrecuți experimentând metode moderne de calcul, simulare și testare a motoarelor cu ardere internă, doresc să-i mulțumesc domnului Prof.Dr.-Ing. Anghel CHIRU pentru susținerea și coordonarea activităților de studiu și cercetare și, în special, pentru încrederea pe care a avut-o în mine.

Sunt recunoscător domnilor profesori îndrumători Prof.Dr.-Ing. Gheorghe Alexandru RADU, Prof.Dr.-Ing. Corneliu COFARU și Prof.Dr.-Ing. Horia ABĂITĂNCEI, pentru observațiile critice și sprijinul absolut necesar realizării acestei teze.

Mulțumesc domnilor Dr.-Ing. Cristian Leahu și Dr.-Ing. Stelian Țărulescu, pentru accesul la standul de probe și timpul acordat petrecut alături de mine.

Mulțumesc și domnilor Prof.Dr.-Ing. Nicolae Ispas, Prof.Dr.-Ing. Mircea Năstăsoiu, Dr.-Ing. Sebastian Radu din Departamentul de Autovehicule și Transporturi din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică care mi-au oferit sprijinul organizatoric și tehnic prin consultare și recomandarea materialelor de studiu. Acord o atenție specială pentru Dr.-Ing. Vladimir Mărdărescu care mi-a oferit un sprijin deosebit, foarte pragmatic și idei bune într-o atmosferă lucrativă.

Mulțumesc colegilor de la Schaeffler România, Ing. Adrian Cernea, Dr.-Ing. Radu Plămădeală, Dr.-Ing. Radu Cosgarea, Dr.-Ing. Șerban Radu, Ing. Ervin Adorean și Ing. Ruxandra Dragomir, pentru profesionalismul consultărilor cu dânsii, pentru suportul tehnic extraordinar și nu în ultimul rând pentru părerile critice. Mai mult, le mulțumesc colegilor, care sub îndrumarea Dr.-Ing. Radu Plămădeală, mi-au asigurat seturi de măsurători geometrice realizate cu ajutorul unor echipamente exclusiviste de măsurare în coordonate.

De asemenea, le mulțumesc colegilor de birou pentru sfaturile utile și înțelegerea de care au dat dovadă.

Le mulțumesc colegilor de doctorat, Dr.-Ing. Lucian Rad, Ing. Marius Lazăr, Dr.-Ing. Doru Groza și Ing. Vlad Stancu pentru ajutorul oferit în multe situații dificile atât organizatorice cât și tehnice.

Doresc să le mulțumesc prietenilor din echipa de ciclism SRBT pentru înțelegerea și răbdarea de care au dat dovadă, dar și pentru consultarea pe anumite teme tehnice, câțiva dintre aceștia regăsindu-se menționați anterior.

Le mulțumesc Dr.-Ing. Bogdan Muntean și Dr. Mugur Ștefănescu pentru ajutorul competent și contribuția lor la această teză în mai multe feluri.

În final, dar mereu pe primul loc, mulțumesc familiei, căreia îi dedic această teză, și care mi-a fost alături tot timpul cu înțelegere și răbdare, îndeaproape sau de la distanță, pentru sprijin moral și consultarea de înaltă competență oferită în orice moment al zilei. Mulțumesc mamei mele Măriuca Dogariu și tatălui meu Dr.-Ing. Mihai Dogariu, modele de urmat în viață.



CUPRINS (Ib. română)

	Pg.	Pg.
	Teză	rezumat
INTRODUCERE	2	-
1. STUDIUL FACTORILOR CARE INFLUENŢEAZĂ PROCESELE DE ARDERE DIN MOTOARE	3	1
1.1 Aspecte generale privind ciclurile teoretice și reale ale motoarelor cu ardere internă cu piston.....	3	1
1.2 Analiza proceselor de formare a amestecului și arderii din motoarele cu ardere internă.....	8	1
1.2.1 Evaluarea procesului de admisie din motoarele cu aprindere prin scânteie în patru timpi.....	8	1
1.2.2 Evaluarea proceselor de formare a amestecului din motoarele cu aprindere prin scânteie.....	31	1
1.2.3 Analiza procesului de formare a amestecului în camerele de ardere ale motoarelor cu aprindere prin comprimare.....	36	1
1.2.4 Analiza procesului de ardere din motoarele cu aprindere prin comprimare.....	45	1
1.3 Modelarea arderii.....	49	2
1.4 Formarea emisiilor poluante (fum, NO _x – care se analizează împreună).....	51	2
1.5 Concluzii	52	2
1.6 Obiectivele tezei de doctorat.....	53	3
2. MODELAREA PRIN CALCUL A PROCESELOR DE ARDERE DIN MOTOARELE CU ARDERE INTERNĂ	54	4
2.1 Parametrii indicați și efectivi ai motoarelor cu ardere internă.....	54	4
2.2.1 Parametrii indicați ai motorului.....	54	4
2.1.2 Parametrii efectivi ai motorului.....	55	4
2.2 Analiza pe ciclu motor.....	57	4
2.3 Modelul Vibe pentru analiza procesului de ardere din motoarele cu ardere internă.....	59	5
2.4 Concluzii	69	6



3. ECHIPAMENTE, PROCEDURI ŞI METODOLOGII DE CERCETARE	70	7
3.1 Caracteristicile motoarelor experimentale.....	71	7
3.1.1 Motorul AVL 5403 MAS DI 4V DOHC.....	71	7
3.1.2 Motorul AVL 5402 MAC CR 4V DOHC.....	71	7
3.2 Descrierea aparaturii utilizate.....	72	7
3.2.1 Frâna.....	72	7
3.2.2 Instalațiile auxiliare frânei.....	73	7
3.3 Parametrii reglabili și măsurabili pe standul de încercări.....	76	8
3.3.1 Parametrii reglabili ai standului de încercare.....	76	8
3.3.2 Parametrii măsurabili ai motorului.....	76	8
3.4 Prezentarea senzorilor utilizați.....	77	8
3.4.1 Senzorul marcajelor de unghi, de rotație a arborelui cotit și a punctului mort superior.....	78	9
3.4.2 Senzorul de turație.....	80	9
3.4.3 Senzorul de moment.....	80	9
3.4.4 Senzorul de presiune piezoelectric.....	81	9
3.4.5 Senzorul de presiune piezorezistiv.....	82	9
3.4.6 Senzorul curentului absorbit de către injector.....	82	9
3.4.7 Senzorul excesului de aer (sonda lambda).....	83	9
3.4.8 Măsurarea emisiilor de fum.....	83	9
3.4.9 Măsurarea emisiilor de particule din gazele de evacuare.....	85	9
3.5 Sistemul de achiziție de date.....	86	11
3.5.1 Mărimi fizice și senzori.....	87	11
3.5.2 Condiționarea semnalelor.....	88	12
3.6 Metodologia cercetării.....	90	12
3.7 Primele rezultate obținute.....	92	13
3.7.1 Testarea motorului AVL 5403.....	93	13
3.7.2 Testarea motorului AVL 5402, fără combustie.....	93	13
3.7.3 Testarea motorului la sarcini parțiale.....	94	14
3.7.4 Testarea motorului la sarcină totală.....	97	14
3.8 Concluzii.....	99	15



4. OPTIMIZAREA ARDERII	100	15
4.1 Metodologia de optimizare a motorului diesel experimental.....	100	15
4.2 Rezultate obținute.....	103	17
4.2.1 Rezultate obținute folosind o singură injecție pe ciclu.....	103	17
4.2.2 Rezultate obținute folosind două injecții pe ciclu.....	107	17
4.2.3 Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu.....	111	17
4.2.4 Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu și o presiune de supraalimentare de 0.02 MPa.....	115	17
4.2.5 Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu și o presiune de supraalimentare de 0.03 MPa.....	117	17
4.2.6 Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu și o presiune de supraalimentare de 0.04 MPa.....	119	17
4.3 Concluzii privind acuratețea măsurărilor.....	122	19
4.4 Concluzii.....	123	19
5. VALIDAREA SIMULĂRILOR	125	21
5.1 Obiectivele urmărite cu ajutorul simulării.....	125	21
5.2 Metodologia de simulare.....	126	22
5.2.1 Propuneri pentru realizarea simulărilor cu aplicație pe motorul cu aprindere prin scânteie.....	126	22
5.2.2 Soluții alese pentru realizarea simulărilor cu aplicație pe motorul diesel.....	126	22
5.2.3 Cazuri simulate.....	127	22
5.3 Preluarea designului camerei de ardere pentru simularea proceselor motorului cu aprindere prin scânteie.....	127	22
5.3.1 Scanarea geometriei 3D a suprafețelor camerei de ardere.....	128	23
5.3.2 Reconstruirea modelului 3D după norul de puncte rezultat în urma scanării.....	130	23
5.3.3 Simplificarea geometriei și pregătirea acesteia pentru simulare.....	131	23
5.4 Simularea proceselor motorului cu aprindere prin scânteie.....	132	24
5.4.1 Pregătirea modelelor CFD pentru simulare.....	132	24
5.4.2 Rezultate obținute în urma simulării de curgere.....	133	24
5.5 Preluarea datelor necesare pentru simularea motorului diesel.....	134	25
5.6 Simularea și validarea proceselor motorului diesel.....	136	25



5.6.1 Rezultate obținute pentru simularea cazului fără ardere.....	136	25
5.6.2 Rezultate obținute pentru simularea cazului având o singură injecție pe ciclu.....	137	26
5.6.3 Rezultate obținute pentru simularea cazului având două injecții pe ciclu.....	146	27
5.6.4 Rezultate obținute pentru simularea cazului având trei injecții pe ciclu.....	150	30
5.6.5 Estimări prin calcul pentru cazurile experimentale realizate la presiuni de supraalimentare de 0.02, 0.03 și 0.04 MPa.....	155	30
5.7 Concluzii.....	156	31
6. CONCLUZII.....	158	31
6.1 Concluzii generale.....	158	31
6.2 Contribuții originale.....	159	33
6.3 Diseminarea rezultatelor.....	160	34
6.4 Direcții de dezvoltare în domeniul temei de cercetare.....	160	34
BIBLIOGRAFIE.....	162	36
ANEXE		
Anexa 1: Lista lucrărilor publicate.....	168	-
Anexa 2: Rezultate obținute folosind doar injecția principală.....	170	-
Anexa 3: Rezultate obținute folosind două injecții pe ciclu.....	174	-
Anexa 4: Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu.....	178	-
Anexa 5: Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu și o presiune de supraalimentare de 0.02 MPa.....	182	-
Anexa 6: Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu și o presiune de supraalimentare de 0.03 MPa.....	183	-
Anexa 7: Rezultate obținute folosind trei injecții pe ciclu și o presiune de supraalimentare de 0.04 MPa.....	184	-
Anexa 8: Rezumat.....	185	38



TABLE OF CONTENTS

	Pg. Thesis	Pg. summary
INTRODUCTION	2	-
1. STUDY REGARDING THE FACTORS INFLUENTING THE COMBUSTION PROCESSES IN ENGINES	3	1
1.1 General aspects regarding theoretical and real cycles of internal combustion piston engines.....	3	1
1.2 Analysis of mixture formation and combustion processes in internal combustion engines.....	8	1
1.2.1 Evaluation of intake process from four strokes spark ignition engines.....	8	1
1.2.2 Evaluation of mixture formation processes in spark ignition engines.....	31	1
1.2.3 Analysis of mixture formation process in the combustion chamber of compression ignition engines.....	36	1
1.2.4 Analysis of combustion process in compression ignition engines.....	45	1
1.3 Combustion modelling.....	49	2
1.4 Pollutant emission formation (smoke, NO _x – which is analysed together).....	51	2
1.5 Conclusions.....	52	2
1.6 Objectives of the paper.....	53	3
2. COMPUTATIONAL MODELLING OF COMBUSTION PROCESSES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES	54	4
2.1 Indicated and effective parameters of internal combustion engines.....	54	4
2.1.1 Indicated parameters of the engine.....	54	4
2.1.2 Effective parameters of the engine.....	55	4
2.2 Analysis on engine cycle.....	57	4
2.3 Vibe-model for the analysis of the combustion process from internal combustion engines.....	59	5
2.4 Conclusions.....	69	6



3. EQUIPMENTS, PROCEDURES, AND RESEARCH METHODOLOGY	70	7
3.1 Characteristics of the research engines.....	71	7
3.1.1 AVL 5403 MAS DI 4V DOHC Engine.....	71	7
3.1.2 AVL 5402 MAC CR 4V DOHC Engine.....	71	7
3.2 Description of equipment used.....	72	7
3.2.1 Brake.....	72	7
3.2.2 Brake auxiliary systems.....	73	7
3.3 Adjustable and measurable parameters on the test bench.....	76	8
3.3.1 Adjustable parameters of the test bench.....	76	8
3.3.2 Measurable parameters of the engine.....	76	8
3.4 Presentation of sensors used.....	77	8
3.4.1 Angle marking, crankshaft rotation and top dead center sensor.....	78	9
3.4.2 Engine speed sensor.....	80	9
3.4.3 Torque sensor.....	80	9
3.4.4 Piezoelectric pressure sensor.....	81	9
3.4.5 Piezoresistive pressure sensor.....	82	9
3.4.6 Sensor for current on injector.....	82	9
3.4.7 Oxygen sensor (lambda sensor).....	83	9
3.4.8 Smoke emissions measurement.....	83	9
3.4.9 Particle emissions in exhaust gas measurement.....	85	9
3.5 Data acquisition system.....	86	11
3.5.1 Physical quantity and sensors.....	87	11
3.5.2 Signal conditioning.....	88	12
3.6 Research methodology.....	90	12
3.7 The first results obtained.....	92	13
3.7.1 AVL 5403 engine testing.....	93	13
3.7.2 AVL 5402 engine testing, without combustion.....	93	13
3.7.3 Engine testing at partial loads.....	94	14
3.7.4 Engine testing at full load.....	97	14
3.8 Conclusions.....	99	15



4. COMBUSTION OPTIMIZATION	100	15
4.1 Optimization methodology of the research diesel engine	100	15
4.2 Results obtained	103	17
4.2.1 Results obtained using a single injection per cycle	103	17
4.2.2 Results obtained using two injections per cycle	107	17
4.2.3 Results obtained using three injections per cycle	111	17
4.2.4 Results obtained using three injections per cycle and a boost pressure of 0.02 MPa	115	17
4.2.5 Results obtained using three injections per cycle and a boost Pressure of 0.03 MPa	117	17
4.2.6 Results obtained using three injections per cycle and a boost pressure of 0.04 MPa	119	17
4.3 Conclusions regarding measurement accuracy	122	19
4.4 Conclusions	123	19
5. VALIDATION OF SIMULATION	125	21
5.1 Objectives followed with the help of simulation	125	21
5.2 Simulation methodology	126	22
5.2.1 Proposals for simulation realization applied on the spark ignition engine	126	22
5.2.2 Solutions chosen for simulation realization applied on the diesel engine	126	22
5.2.3 Simulated cases	127	22
5.3 Acquiring the design of the combustion chamber for the simulation of the processes of the spark ignition engine	127	22
5.3.1 Scanning the 3D geometry of the combustion chamber surfaces	128	23
5.3.2 Reconstructing the 3D model based on the cloud points resulted upon scanning	130	23
5.3.3 Simplifying the geometry and preparing it for simulation	131	23
5.4 Simulation of the spark ignition engine processes	132	24
5.4.1 Preparation of the CFD models for simulation	132	24
5.4.2 Results obtained on the flow simulation	133	24
5.5 Acquiring the necessary data for the simulation of the diesel engine	134	25
5.6 Simulation and validation of the diesel engine processes	136	25
5.6.1 Results obtained for the simulation of the case without combustion	136	25



5.6.2 Results obtained for the simulation of the case with one injection per cycle.....	137	26
5.6.3 Results obtained for the simulation of the case with two injections per cycle.....	146	27
5.6.4 Results obtained for the simulation of the case with three injections per cycle.....	150	30
5.6.5 Estimation through calculus for the experimental cases realized at boost pressures of 0.02, 0.03 and 0.04 MPa.....	155	30
5.7 Conclusions.....	156	31
6. CONCLUSIONS.....	158	31
6.1 Final conclusions.....	158	31
6.2 Original contributions.....	159	33
6.3 Dissemination of results.....	160	34
6.4 Future research directions.....	160	34
REFERENCES.....	162	36
ANNEX		
Annex 1: List of published papers.....	168	-
Annex 2: Results obtained using only the main injection.....	170	-
Annex 3: Results obtained using two injections per cycle.....	174	-
Annex 4: Results obtained using three injections per cycle.....	178	-
Annex 5: Results obtained using three injections per cycle and a boost pressure of 0.02 MPa.....	182	-
Annex 6: Results obtained using three injections per cycle and a boost pressure of 0.03 MPa.....	183	-
Annex 7: Results obtained using three injections per cycle and a boost pressure of 0.04 MPa.....	184	-
Annex 8: Abstract.....	185	38

1. STUDIUL FACTORILOR CARE INFLUENŢEAZĂ PROCESSELE DE ARDERE DIN

MOTOARE

După mai bine de 120 de ani de la primul automobil, mobilitatea motorizată a provocat, probabil, cele mai mari schimbări sociale și culturale, în prezent aflându-se printre interesele principale în viața oamenilor. Istoria se repetă cu tendințele de electrificare, însă aceste tendințe modernizate se întâlnesc din nou parțial cu aceleași provocări [DOG 2015a].

1.1. Aspecte generale privind ciclurile teoretice și reale ale motoarelor cu ardere internă cu piston

Pornind de la modelele ideale a proceselor din motoarele cu ardere internă, și anume de la diagramele proceselor termodinamice a ciclurilor ideale, s-au descris particularitățile ciclurilor reale, cu exemplificare pe ciclul diesel [SCH 2011].

1.2. Analiza proceselor de formarea a amestecului și arderii din motoarele cu ardere internă

Procesele gazodinamice de curgere datorate mișcării periodice ale pistonului și ritmicității închiderilor / deschiderilor supapelor, atât de admisie cât și de evacuare, pot fi utilizate în cazul optimizării umplerii cilindrului cu încărcătură combustibilă sau aer. Astfel, se poate obține un randament volumetric ridicat, iar în cazul optimizării evacuării gazelor arse, se poate obține un coeficient al gazelor reziduale cât mai redus.

Momentul motor, puterea și consumul de combustibil sunt influențate de raportul de comprimare al motorului, tipul camerei de ardere, forma capului pistonului, numărul și mărimea supapelor de admisie și evacuare, precum și de poziția bujiei, la un MAS, sau a injectorului la un MAC.

Pornind de la cele enunțate mai sus, în următoarele **subcapitole (1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4)** sunt prezentate mijloace și sisteme pentru îmbunătățirea proceselor de formare a amestecului și arderii din motoarele cu ardere internă.

Printre acestea, pentru evaluarea procesului de admisie din motoarele cu aprindere prin scânteie în patru timpi (**subcapitolul 1.2.1**), sunt amintite cele mai recente sisteme de distribuție variabilă a supapelor, cu referire la posibilitatea realizării ciclurilor *Atkinson*, *Miller* și *Budack* [ATK 1887], [MIL 1957], [BUD 2015]. În acest domeniu, s-au propus prin contribuție proprie mai multe variante constructive ale unui culbutor comutabil hidraulic în două trepte cu rolă. Aceste concepte au fost ulterior brevetate [P 2018a], [P 2018b], [P 2018c], [P 2018d]. Aceste variante vin ca răspuns înaintea cerințelor actuale pentru conceptul culbutorului comutabil, și anume:

- Moment de inerție redus, deci mase cât mai reduse;
- Flexibilitate mare la integrarea funcțiilor într-un spațiu cât mai compact;
- Frecări cât mai reduse.

Sunt prezentate câteva dintre cele mai recente soluții pentru realizarea raportului de comprimare variabil împreună cu beneficiile utilizării acestora, dar și provocările tehnologice.

Cele mai recente sisteme și strategii în domeniul injecției de combustibil în motoarele cu aprindere prin scânteie sunt prezentate în **subcapitolul 1.2.2**. Motorul experimental **AVL 5403**, din dotarea Institutului Universității *Transilvania* din Braşov, pe care s-au realizat o serie de teste și simulări, este prevăzut cu sistem dual de injecție (injecție directă și injecție în colectorul de admisie).

Analiza procesului de formare a amestecului în camerele de ardere ale motoarelor cu aprindere prin comprimare este prezentată în **subcapitolul 1.2.3**, punându-se accentul pe importanța injecției multiple.

Analiza procesului de ardere din motoarele cu aprindere prin comprimare este prezentată în **subcapitolul 1.2.4**, fiind expuse în detaliu fazele formării amestecului și cele ale arderii unui MAC, precum și influențele diferiților factori.

1.3. Modelarea arderii

Temperatura de la sfârșitul compresiei în camera de ardere poate fi crescută pentru a scurta procedura de aprindere în scopul obținerii unei arderi mai line [ZHA 2009]. Întârzierea la aprindere scade cu creșterea temperaturii, pe durata unei injecții uniforme. Pe de altă parte, durata sfârșirii arderii crește cu creșterea temperaturii.

Privind procesul de injecție, cu cât este mai fină atomizarea și cu cât este mai uniform distribuit combustibilul în camera de ardere, condițiile pentru o aprindere mai puternică și viteze de ardere mai mari sunt mai favorabile. Acestea sunt și acompaniate de presiuni de ardere foarte mari și creșteri bruște de presiuni, care au efecte negative asupra componentelor. Creșterea rapidă a presiunii se poate reduce asigurând că doar o cantitate mică de combustibil este preparată în timpul întârzierii la aprindere. Aceasta înseamnă că începutul injecției și rata injecției sunt foarte importante.

1.4. Formarea emisiilor poluante (fum, NO_x – care se analizează împreună)

Din compoziția gazelor de evacuare ale unui motor diesel modern cu injecție directă, încărcat la plină sarcină, cea mai mare parte a emisiilor este formată din oxizi de azot și particule. Agenții poluanți se datorează următoarelor cauze:

- Ardere incompletă, care generează funingine, monoxid de carbon, hidrocarburi;
- Reacții de ardere necontrolate, care produc NO_x;
- Impurități nedorite în combustibil, care produc SO₂.

1.5. Concluzii

După trecerea în revistă a noțiunilor de bază privind ciclurile termodinamice, în prima parte a capitolului sunt prezentate câteva dintre soluțiile remarcabile aplicate în producția de masă pentru optimizarea proceselor din motoarele cu ardere internă.

Electronica avansată și sistemele moderne de comandă, împreună cu materiale și tehnologii noi de fabricație, au făcut posibile reinventarea și dezvoltarea mai multor sisteme mecanice cu

scopul de a îmbunătăți procesele din motoarele cu ardere internă sau de a optimiza întregul sistem de propulsie.

Printre soluțiile prezentate sunt amintite și patru contribuții originale referitoare la culbutori comutabili pentru sisteme de distribuție variabilă, cu referințe către brevetele acestora.

Se observă că motoarele cu aprindere prin scânteie beneficiază în continuare de cele mai multe posibilități de optimizare prin dezvoltarea sistemelor de distribuție variabilă, dezactivarea cilindrilor, adaptarea raportului de comprimare variabil, supraalimentare și tot mai multe concepte de realizare a amestecului și arderii, dar și de tratare a gazelor arse.

În final, chiar dacă în contextul actual propulsiile hibride sau electrice au devenit soluțiile cele mai populare pentru a combate poluarea în orașe, motorul diesel are un potențial foarte mare să devină cel mai ecologic sistem de propulsie, luând în considerare randamentul superior al arderii și posibilitățile moderne mult îmbunătățite de tratare a gazelor arse.

1.6. Obiectivele tezei de doctorat

În conformitate cu tendințele manifestate pe plan mondial în construcția de automobile, apare ca justificată abordarea temei legate de optimizarea funcționării unui motor cu ardere internă. În acest context, teza de doctorat are ca obiectiv principal **identificarea unor căi de optimizare a proceselor de ardere din motoarele cu ardere internă.**

Ținând seama de problematica menționată, am propus următoarele obiective:

1. Întreprinderea unui studiu detaliat asupra proceselor de ardere din motoarele cu ardere internă;
2. Evaluarea direcțiilor de studiu și cercetare, pornind de la experiența și competențele acumulate;
3. Elaborarea metodologiei pentru cercetarea teoretică și experimentală a proceselor de ardere dintr-un motor cu ardere internă;
4. Simularea formării amestecului și arderii cu programe analitice și modele moderne;
5. Instrumentarea motorului experimental în vederea efectuării cercetărilor și asigurarea unei bune funcționări a echipamentelor;
6. Utilizarea unui sistem de achiziție de date, modular și dedicat testării motoarelor, în vederea determinării parametrilor principali ai motorului: presiunea din camera de ardere, moment, putere, consum, presiunea din colectorul de admisie, temperatura gazelor de ardere, concentrațiile de fum și funingine;
7. Determinarea caracteristicilor funcționale ale motorului cercetat: de turație (la sarcini parțiale și totale) și de reglaj (în funcție de cantitatea de combustibil injectată în camera de ardere și de unghiul de avans al injectiei);
8. Elaborarea metodicii de prelucrare a datelor experimentale culese;
9. Organizarea cercetărilor experimentale în vederea optimizării regimurilor de funcționare a motorului prin intervenția în cartograma sistemului de injecție și utilizarea diferitelor presiuni de supraalimentare;
10. Prelucrarea datelor experimentale, interpretarea informațiilor și formularea concluziilor;

11. Elaborarea de lucrări științifice și susținerea lor în congrese și reuniuni științifice;

12. Publicarea rezultatelor studiilor și cercetărilor în reviste profesionale.

Pentru realizarea obiectivelor propuse este utilizată aparatura de cercetare a Centrului de cercetare „Produse High-Tech pentru Autovehicule” al ICDT al Universității *Transilvania* din Braşov.

2. MODELAREA PRIN CALCUL A PROCESELOR DE ARDERE DIN MOTOARELE CU ARDERE INTERNĂ

2.1. Parametrii indicați și efectivi ai motoarelor cu ardere internă

Subcapitolele 2.1.1 și 2.1.2 prezintă parametrii indicați și cei efectivi ai motoarelor cu ardere internă. Parametrii indicați sunt prezentați discutând pe baza diagramei indicate, iar formulele acestora stau la baza calculelor teoretice efectuate pe ciclurile obținute experimental: lucrul mecanic indicat L_i , presiunea medie indicată p_{mi} , puterea indicată P_i , randamentul indicat η_i , randamentul termic η_t și consumul specific indicat de combustibil c_i .

Parametrii efectivi ai motorului sunt cei finali față de cei indicați [MAR 1968], [BOB 2000]. În calcule s-au determinat următorii parametri: lucrul mecanic efectiv L_e , presiunea medie efectivă p_e , puterea efectivă P_e , randamentul mecanic η_m , randamentul efectiv η_e , consumul orar de combustibil C și consumul specific efectiv de combustibil c_e .

2.2. Analiza pe ciclu motor

Odată cu dezvoltarea noilor sisteme de injecție, perfecționarea combustiei s-a schimbat considerabil. Față de sistemele clasice, degajarea de căldură, care este un instrument important în cercetarea experimentală a proceselor de ardere, devine controlabilă în mare parte. Totuși, degajarea de căldură nu se măsoară în mod direct, dar se poate estima pe baza măsurărilor asupra presiunii din cilindru, a consumului etc. prin respectarea principiilor fizice. Calculul căldurii cumulative degajate trebuie să țină cont de următoarele:

- Prima lege a termodinamicii pentru sisteme deschise;
- Legea gazelor perfecte;
- Legea conservării maselor.

Urmărind primul principiu al termodinamicii, evoluția temperaturii și a vitezei de degajare a căldurii se poate determina în funcție de raportul de comprimare ϵ al motorului [HEY 1988].

Estimarea perfecțiunii arderii se poate face prin formule semiempirice, care să aproximeze datele experimentale pentru o clasă anume de motoare. Astfel, pentru o ardere unizonală, Vibe a propus o relație asemănătoare funcției de repartitie a distribuției probabilistice Weibull [MOR 2010], care ar exprima epuizarea în timp a resurselor necesare arderii și care are forma (2.1):

$$y = f(x) = 1 - \exp(-a \cdot x^{m+1}) \quad (2.1)$$

Unde, $y = \frac{m_a}{m_t}$ – reprezintă masa de combustibil ars (m_a) raportată la masa totală de combustibil injectat (m_t în [kg / ciclu]), cu $y \in \{0...1\}$;

2.3. Modelul Vibe pentru analiza procesului de ardere din motoarele cu ardere internă

Modelul Vibe propus este unul unizonal sau unidimensional, dependent de timp sau rotație arbore cotit, fără a se ține cont de pierderile de căldură către pereții camerei de ardere, iar curba echivalentă arderii este expresia eliberării energiei chimice a combustibilului. Se consideră un amestec omogen, cu starea inițială la sfârșitul compresiei, din punct de vedere termodinamic [PRZ 2013, KER 2014].

Modelul Vibe presupune cunoașterea a trei parametri:

α_i – începutul arderii;

$\Delta\alpha$ – durata arderii;

m – parametrul de formă.

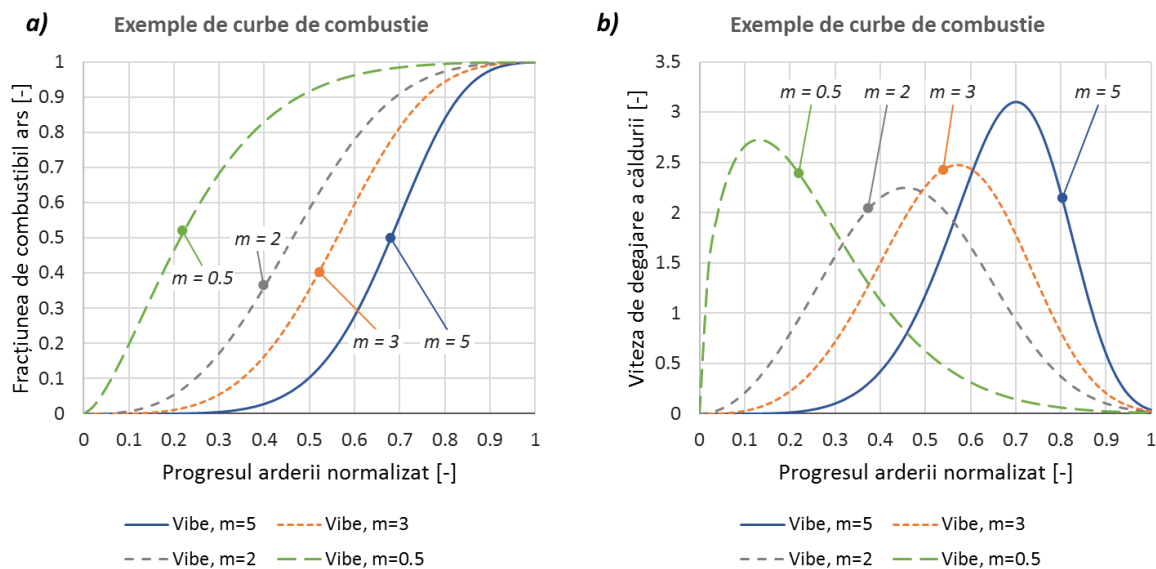


Fig. 2.1 Variația parametrului m , pentru $a = 7$: **a** – fracțiunea de combustibil ars; **b** – viteza de degajare a căldurii [după MER 2006]

În Fig. 2.1 se pot observa influențele parametrului m asupra funcției Vibe raportate la progresul arderii, care se desfășoară de la 0 la 1. Fig. 2.1 **a**) prezintă fracțiunea de masă arsă, iar Fig. 2.1 **b**) viteza de degajare a căldurii. Frațiunea de masă arsă reprezintă cantitatea raportată de la începutul arderii (0) până la finalul arderii (1) [COS 2011].

Cu parametrii potriviți, se poate aplica relația Vibe și pentru un MAS la plină sarcină, spre exemplu cu $a = 2$ și $m = 3$.

Pentru o estimare mai precisă, atunci când se consideră un proces de ardere cu două faze, adică preardere plus o ardere difuză, este potrivit un model Vibe dublu, care are expresia (2.2) [DIN 2011]:

$$y = f(x) = b_1 \cdot \left[1 - \exp(-a \cdot x^{m_1+1}) \right] + b_2 \cdot \left[1 - \exp(-a \cdot x^{m_2+1}) \right] \quad (2.2)$$

Unde, b_1 și b_2 – sunt factori de ponderare;

m_1 și m_2 – sunt parametri de formă.

Între b_1 și b_2 există relația: $b_1 + b_2 = 1$.

Estimarea căldurii chimice degajate de masa de combustibil ars, conform unui model Vibe dublu, se face prin derivarea relației (2.2):

$$\frac{dy}{d\alpha} = b_1 \cdot a \cdot (m_1 + 1) \cdot x^{m_1} \cdot \exp(-a \cdot x^{m_1+1}) + b_2 \cdot a \cdot (m_2 + 1) \cdot x^{m_2} \cdot \exp(-a \cdot x^{m_2+1}) \quad (2.3)$$

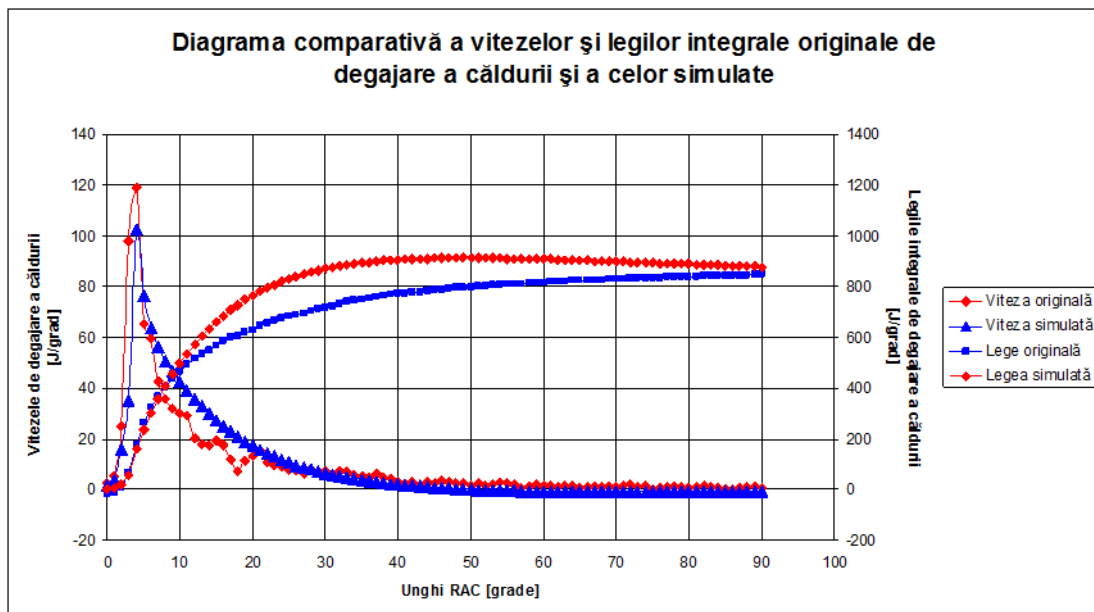


Fig. 2.2 Exemplu de aplicare a funcției Vibe duble

2.4. Concluzii

Urmărind natura statistică a arderii, s-au simulat cu instrumente matematice potrivite procesele de ardere. S-au dezvoltat modele uni și multi-zonale, prin coeficienți care pot fi validați prin experiment, însă este necesară o experiență mare pentru acest lucru. Unul din modelele matematice fiind după Vibe, iar rezultatul acestei abordări aproximează satisfăcător (sub 5% abatere) fenomenul fizic (Fig. 2.2).

Acuratețea măsurării experimentale contribuie în mod hotărâtor la precizia calculului prin stabilirea condițiilor inițiale, de stare și de frontieră.

Pentru că fenomenul arderii este unul rapid, măsurarea trebuie realizată cu viteze mari de eșantionare, sistemul Indicom și Puma permit rate de eșantionare cu frecvența de 19.8 kHz.

O problemă deocamdată greu de rezolvat este măsurarea temperaturilor camerei de ardere, inclusiv în capul pistonului.

3. ECHIPAMENTE, PROCEDURI ŞI METODOLOGII DE CERCETARE

Cercetările au fost organizate pe două motoare de tip monocilindru, unul cu aprindere prin scânteie, celălalt cu aprindere prin comprimare. Cercetările experimentale s-au efectuat pe un stand de încercat motoare, compus dintr-o frână electrică şi motorul de studiat.

3.1. Caracteristicile motoarelor experimentale

În **subcapitolele 3.1.1. şi 3.1.2** sunt prezentate caracteristicile tehnice ale motorului **AVL 5403 MAS DI 4V DOHC**, respectiv **AVL 5402 MAC CR 4V DOHC**. Ca particularităţi, motorul AVL 5403 este dotat cu 2 injectoare şi se poate instala un cilindru transparent.

3.2. Descrierea aparaturii utilizate

Studiul experimental al arderii amestecului carburant în motor, se va efectua cu ajutorul unei baze de date implementată de către producătorul instalaţiilor standului de probă, urmărindu-se menţinerea unei acurateţe ridicată în ce priveşte rezultatele diferitelor măsurări.

3.2.1. Frâna

Cercetările experimentale sunt efectuate pe un stand AVL echipat cu o frână de curent alternativ, care este o maşină electrică trifazică de tip asincron reversibilă, răcită cu lichid (fără efect termic asupra componentelor din vecinătate), controlul turaţiei şi a momentului fiind asigurat de programul PUMA. Acest control permite simularea unor multitudini de regimuri de funcţionare, cum ar fi antrenarea motorului pentru determinarea pierderilor mecanice, simularea accelerărilor, simularea ciclurilor de consum, etc.

Se pot testa motoare cu puteri până la 60 [kW], la turaţia maximă de 7950 [rpm].

3.2.2. Instalaţiile auxiliare frânei

Instalaţiile auxiliare frânei sunt: circuitul de răcire, instalaţia de alimentare cu combustibil, Instalaţia pentru măsurarea consumului de combustibil, instalaţia de supraalimentare, valva de contrapresiune a gazelor de evacuare şi controlerul clapetei de acceleraţie pentru MAS.

Instalaţia de alimentare cu combustibil are dublu rol, de condiţionare a combustibilului în ceea ce priveşte temperatura şi presiunea acestuia. Măsurarea debitului masic se face cu ajutorul instalaţiei AVL 735s. Debitul masic de combustibil se măsoară cu ajutorul unui senzor cu efect Coriolis, care permite măsurări cvasinstantanee, în regim continuu.

Instalaţia de supraalimentare permite simularea supraalimentării motorului prin reglarea presiunii şi temperaturii aerului de admisie în mod continuu. Astfel, presiunea aerului de admisie se poate regla până la 0.3 MPa, iar temperatura de la 25 la 80°C, cu respectarea limitărilor funcţionale şi constructive ale motorului, în cazul de faţă $p_{cil,max} < 12$ MPa.

3.3. Parametrii reglabili și măsurabili pe standul de încercări

Parametrii reglabili ai standului de încercare sunt amintiți în **subcapitolul 3.3.1**, iar aceștia sunt:

- Temperatura mediului ambiant, în limitele 25 – 27 [°C];
- Turația motorului;
- Momentul motor 180 [Nm];
- Temperatura lichidului de răcire, menținută constantă la 80 [°C];
- Temperatura uleiului de ungere, menținută constantă la 85 [°C];
- Temperatura și presiunea combustibilului, controlate în limite strânse, astfel încât nivelul de încredere al indicației consumului de combustibil să fie de 97%;
- Presiunea și temperatura aerului de admisie, controlabilă în cazul supraalimentării;
- Contrapresiunea în colectorul de evacuare.

Parametrii măsurabili ai motorului sunt amintiți în **subcapitolul 3.3.2**, iar aceștia sunt:

- Turația, în limitele – la MAS 1000...9600 [rpm], la MAC 1000...4200 [rpm];
- Momentul motor dezvoltat;
- Presiunea de injecție – la MAS <12 [MPa], la MAC <220 [MPa];
- Avansul la injecție, în pași de min 0.1 [°RAC];
- Durata injecției, în pași de min 0.1 [mg/ciclu];
- Curentul absorbit de injector [A];
- Presiunea și temperatura aerului de admisie, reglabile;
- Presiunea din camera de ardere, p_{cil} [MPa];
- Excesul de aer, λ ;
- Emisia de fum (*Filter Smoke Number*) [FSN];
- Particulele de carbon PM [mg/m³].

3.4. Prezentarea senzorilor utilizați

Amplasarea senzorilor pe motor este reprezentată în Fig. 3.1.

În Fig. 3.1 **a)**, vederea dinspre evacuare, se observă următorii senzori pentru: 1 - temperatura gazelor, 2 - sonda lambda, 3 - presiunea gazelor de evacuare, 4 - electro-valvă de siguranță a presiunii de ulei, 5 - temperatura uleiului, 6 - encoderul 364C.

În Fig. 3.1 **b)**, vederea dinspre colectorul de admisie, se observă următorii senzori pentru: 7 - sonda lambda, 8 - instalația de condiționare a presiunilor, 9 - temperatura aerului admis, 10 - presiunea la admisie.

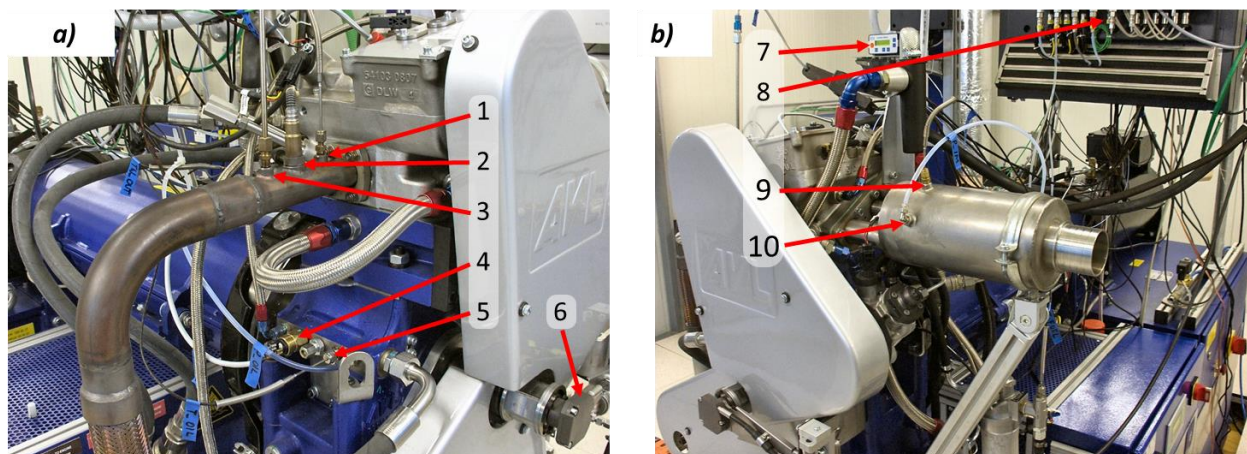


Fig. 3.1 Amplasarea senzorilor pe motor: **a** – vedere dinspre evacuare;
b – vedere dinspre colectorul de admisie

În următoarele subcapitole (**3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5, 3.4.6, 3.4.7, 3.4.8, 3.4.9**) sunt prezentate caracteristicile tehnice și câteva informații referitoare la senzorii utilizați, precum:

- Senzorul marcajelor de unghi, de rotație a arborelui cotit și a punctului mort superior;
- Senzorul de turație;
- Senzorul de moment;
- Senzorul de presiune piezoelectric;
- Senzorul de presiune piezorezistiv;
- Senzorul curentului absorbit de către injector;
- Senzorul excesului de aer (sonda lambda);
- Măsurarea emisiilor de fum;
- Măsurarea emisiilor de particule din gazele de evacuare.

Măsurarea emisiilor de fum și de particule a constat obiectul principal al cercetării întreprinse.

Instalația de măsurare a fumului din gazele de evacuare de tip AVL 415 S funcționează după principiul Bosch (ISO DP 10054 / ISO 10054) și anume, cel al reflexiei unui fascicul de lumină pe suprafața unui filtru, care se va înnegri prin extragerea unei probe din gazele de evacuare

Caracteristica de absorbție a filtrului este cvasi independentă de lungimea de undă a luminii radiante, iar gradul de înnegrire a filtrului este comparat cu lumina reflectată de filtrul alb, rezultatul fiind dat de FSN (*Filter Smoke Number*). Definirea numărului de înnegrire este dată de relația 3.1:

$$FSN = \frac{100 - R}{10} \quad (3.1)$$

Unde, $R = \frac{R_p}{R_f} \cdot 100\%$

R – este strălucirea relativă a probei;

R_p – este valoarea luminii reflectate de către proba de măsură;

R_f – este valoarea de alb;

Este de aşteptat ca relația dintre numărul de înnegrire FSN și cantitatea de carbon să nu fie liniară. Cercetări multiple [KIR 2016] pe clase de motoare, în afara celor navale, au evidențiat curbe de dependență între FSN și particule de forma celor din Fig. 3.2 a). Fig. 3.2 b) prezintă spre comparație rezultatele experimentelor din teză față de cele din literatură, din Fig. 3.2 a).

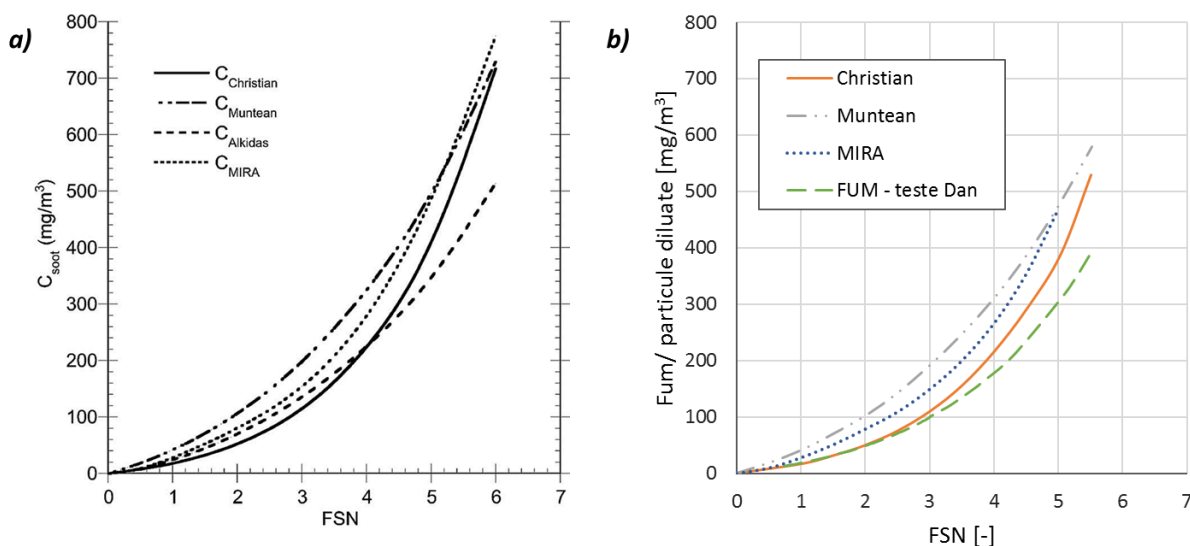


Fig. 3.2 Emisii de fum și particule: **a** – rezultate din [KIR 2016]; **b** – experimentele din teză față de cele din [KIR 2016] (MIRA, Motor Industry Research Association)

Determinarea cantității de particule este un indicator performant al calității arderii. Totuși, măsurarea particulelor emise de un MAC este o problemă delicată datorită tendinței diverselor elemente constituente ale gazelor de evacuare de a se recombina pe traiectul care ține de la locul de prelevare a probei până la locul de măsurare, după cum se indică în Fig. 3.3 b).

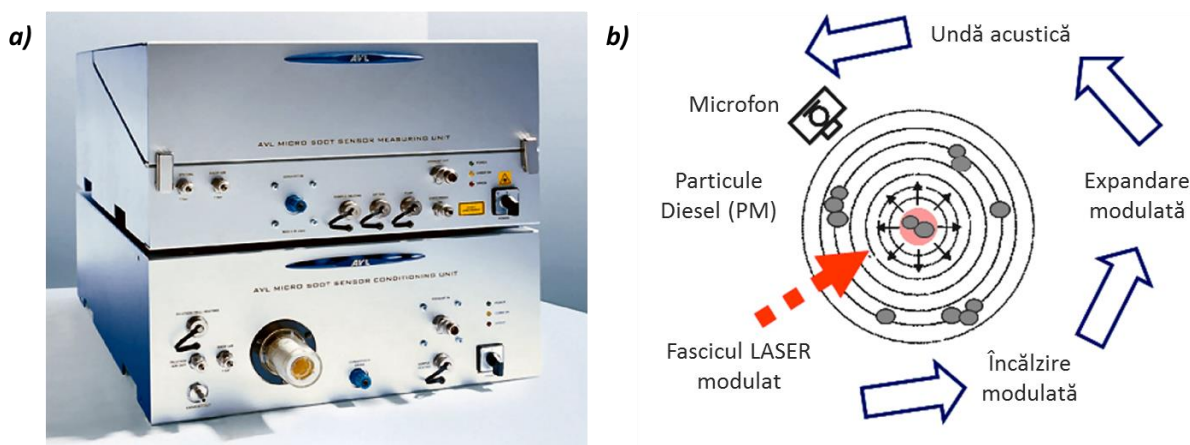


Fig. 3.3 **a** – Detectorul de particule AVL 483; **b** – principiul de măsurare [AVL 2018, HAI 2004, CHI 2018]

Tehnologia de măsurare (ISO 8178-1) prin metoda fotoacustică se bazează pe absorbția luminii de către particulele de carbon din proba extrasă. Instalația AVL MSS (Micro Soot Sensor) permite măsurarea cu înaltă acuratețe a concentrației de particule în mod continuu.

Prin diluarea gazelor de evacuare se obține proba de microparticule fără interferențe cu alte componente; această probă este iradiată cu ajutorul unui fascicul modulat LASER – încălzirea și răcirea periodică a probei conduce la apariția unei unde periodice de presiune, care poate fi detectată de un microfon, a cărei amplitudine crește proporțional cu creșterea densității de particule.

Un aparat de condiționare realizează diluția probei în raport de 2...20, în același timp produce răcirea probei la maximum 60°C, la o presiune de 0.005 MPa [AVL 2018].

3.5. Sistemul de achiziție de date

Încercările se realizează prin măsurarea mai multor parametri, ceea ce presupune crearea unui lanț de măsurare, care include o varietate de senzori, aparatura de condiționare a semnalelor generate de aceștia, mijloace de achiziție a datelor furnizate, stocarea și prelucrarea ulterioară a datelor. Pentru fiecare mărime măsurată există un lanț propriu de măsurare.

3.5.1. Mărimi fizice și senzori

S-au măsurat următoarele mărimi, direct sau prin conversie digitală, prin utilizarea senzorilor adecvați:

- Turațiile arborelui motorului și ale arborelui frânei:
 - encoder – la motor;
 - senzor de tip Hall – la frână;
- Momentul dezvoltat de motor:
 - cu ajutorul unui senzor de moment cu transmisie prin unde radio, de tip HBM;
- Puterea determinată prin calcul cu relația 3.2:

$$P = \frac{M \cdot n \cdot \pi}{30} \text{ [kW]} \quad (3.2)$$

unde, în cazul metodei tensometrice:

M – momentul indicat de senzorul de cuplu HBM [Nm]

n – turația indicată de senzorul inductiv al frânei [rpm];

- Consumul specific este determinat prin măsurarea continuă a debitului masic de combustibil:
 - senzor de tip Coriolis;
- Temperatura aerului de admisie, măsurată la intrarea în colectorul de admisie:
 - cu termocuplu, de tip NiCrNi (cromel-alumel);
 - cu termorezistență, de tip Pt100;
 - cu termistori (PTC și NTC);
 - cu dispozitive semiconductoare;
- Temperatura gazelor de evacuare, măsurată în colectorul de evacuare, cu un termocuplu NiCrNi;

- Temperatura uleiului și a apei de răcire, măsurate în baia de ulei, respectiv în circuitul de răcire al motorului la ieșirea din termostat, cu senzori termorezistivi Pt100 și cu termistori;
- Presiunea din colectorul de admisie, printr-un senzor piezorezistiv de presiune absolută de tip APT 100;
- Presiunea din camera de ardere, cu ajutorul unui senzor piezoelectric de presiune AVL, tip GU-22C;
- Emisia de particule, cu instalația AVL 415 S și AVL 483;
- Marcarea punctului mort superior și a unghiului de rotație al arborelui cotit, cu un dispozitiv AVL, tip Z042;
- Curentul absorbit de injectorul electromagnetic, cu dispozitivul E3N.

3.5.2. Condiționarea semnalelor

Instalația de măsurare este situată pe o platformă AVL – INDICOM care reunește un set de amplificatoare configurabile după natura parametrului măsurabil al motorului sau a frânei. Modulul Indimodul are 8 canale configurabile după natura traductoarelor, fiecare având posibilitatea de calibrare și recunoașterea într-o bază de date.

3.6. Metodologia cercetării

Metodologia cercetării prezintă condițiile de încercare, posibilitățile de control și de măsurare pe standul de probe și programul încercărilor. S-a urmărit realizarea testelor la sarcină totală, pe o plajă de turații de la 1400 rpm până la 4000 rpm cu pași din 200 în 200 rpm.

Pentru fiecare regim de turație și la o sarcină stabilită, s-au analizat următorii parametri: puterea și momentul motorului, presiunea maximă din cilindru, presiunea medie indicată, coeficientul de exces de aer, temperatura gazelor de evacuare și emisiile de fum și funingine.

Pentru motorul AVL 5402 s-a urmărit determinarea caracteristicilor de turație exterioară și de sarcină cu înregistrarea consumului orar și a celui specific pentru mai multe strategii de injecție multiplă pe ciclu. În punctele de interes, 2400, 3000... s-au repetat măsurătorile în condițiile supraalimentării cu aer, livrat la temperatura de 50 °C și la presiunile de 0.02, 0.03, 0.04 MPa.

În punctele de interes s-a intervenit asupra sistemului de management electronic pentru reglarea avansului injecțiilor și debitului de combustibil livrat [mg / ciclu].

În toate cazurile s-au măsurat și înregistrat următoarele mărimi:

- presiunea din cilindru P_{cil} [MPa];
- factorul de exces de oxigen λ ;
- temperatura gazelor de evacuare T_g [°C];
- presiunile în colectorul de admisie și în cel de evacuare [MPa];
- probe de fum [SN] și particule (funingine) [mg / m³].

3.7. Primele rezultate obținute

3.7.1. Testarea motorului AVL 5403

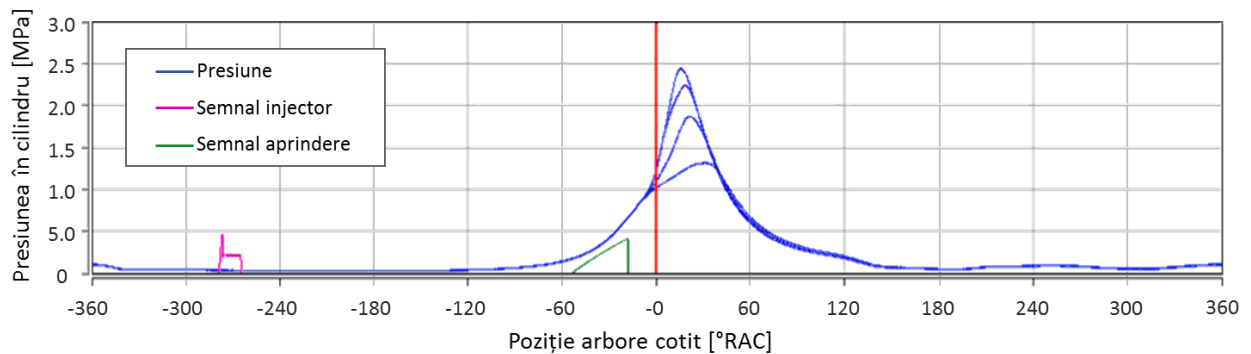


Fig. 3.4 Presiuni în cilindru obținute la turația de 1520 rpm – AVL 5403 MAS

3.7.2. Testarea motorului AVL 5402, fără combustie

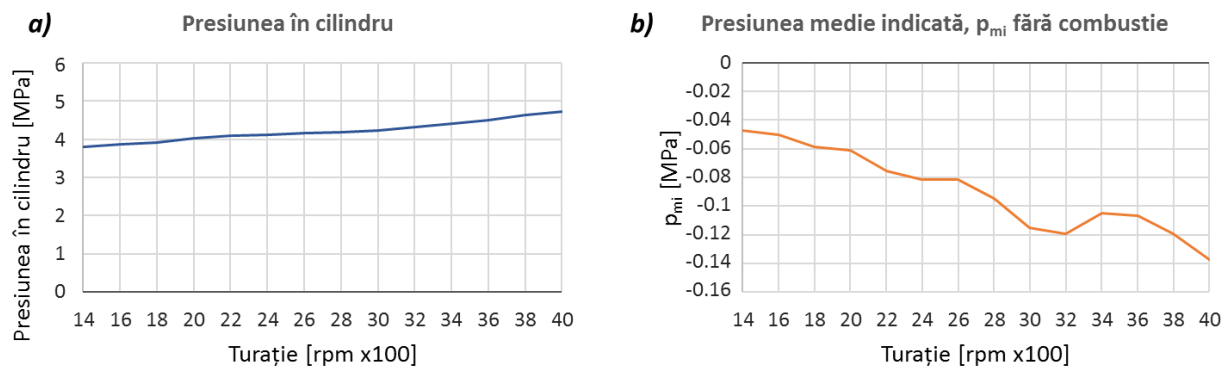


Fig. 3.5 Presiunile maxime în cilindru obținute la sfârșitul comprimării și presiunile medii indicate

Pentru estimarea presiunii la sfârșitul comprimării (PMS), se poate aplica relația 3.3.

$$p_{cil} = p_{ad} \cdot \varepsilon^n \quad (3.3)$$

Unde, p_{cil} – este presiunea în cilindru la PMS;

p_{ad} – este presiunea aerului admis în cilindru;

ε – este raportul de comprimare;

n – este exponentul politropic la comprimare.

3.7.3. Testarea motorului la sarcini parţiale

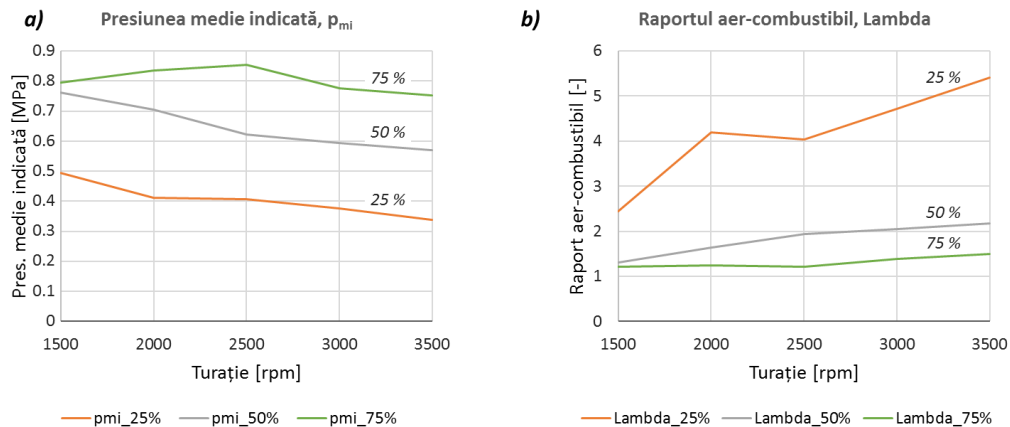


Fig. 3.6 Evoluția presiunii medii indicate și a raportului aer-combustibil în cazul utilizării a două injecții pe ciclu pentru diferite sarcini parțiale

Cu cât motorul este mai încărcat, în cilindru apare o presiune medie indicată mai mare. Acesta dezvoltă la rândul ei, un moment motor mai mare. Raportul aer-combustibil este mai apropiat valorii unitare atunci când presiunea medie indicată crește. Atunci, amestecul devine mai bogat [DOG 2016c].

3.7.4. Testarea motorului la sarcină totală

Folosind valorile de pe harta motorului încă neoptimizată, s-au obținut primele rezultate a trei testări pe plaja de turații dorite: considerând doar una, două și trei injecții pe ciclu. Cu aceste rezultate, s-au trasat caracteristicile externe din Fig. 3.7.

Din această imagine de ansamblu, se poate trage o concluzie asupra oportunității de optimizare a parametrilor de injecție în jurul turației de 3000 rpm. În acest punct, trebuie realizate optimizări ale momentului și ale puterii produse, însă luând în considerare și emisiile rezultate.

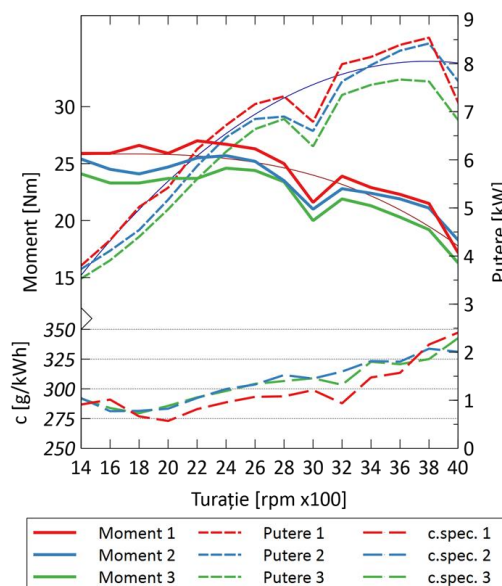


Fig. 3.7 Presiunea în cilindru obținută folosind o injecție pilot și o injecție principală pentru turația de 2000 rpm la diferite sarcini

3.8. Concluzii

Testările inițiale, prezentate anterior, au fost realizate considerând parametrii implicați ai motorului. La urmă, obținându-se o serie de caracteristici pe o plajă de turații acoperitoare pentru utilizarea motorului în aplicații auto.

Înainte de rularea testelor, din interfața Indicom se pot alege interogări privind valorile de ieșire înregistrate, valori care provin atât din măsurare, cât și valori calculate pe baza parametrilor de intrare și cei mășurați.

Testele au avut în vedere încercarea motorului la mai multe regimuri de sarcină și la utilizarea de multiple injecții pe ciclu. Acestea au evidențiat moduri diferite de funcționare, de unde se pot trage concluzii privind posibilitățile de optimizare a motorului supus încercărilor datorită oportunităților oferite de standul de testare și a metodei de lucru.

Rezultatele privind emisiile de fum sunt comparabile cu cele obținute de alți cercetători independenți din industria auto, inclusiv organizația MIRA (*Motor Industry Research Association*) (Fig. 3.2). Aceștia au cercetat o gamă largă de motoare de diverse capacități cilindrice, dar au și utilizat diverși combustibili, inclusiv alternativi. Este de remarcat că fiecare au folosit aparaturi diferite și la perioade diferite.

4. OPTIMIZAREA ARDERII

4.1. Metodologia de optimizare a motorului diesel experimental

Sistemul *Indicom* permite măsurarea presiunilor din camera de ardere, din admisie, determinarea duratelor și a momentului de start al injecției. Interfața de comunicare permite reglaje ale numărului de injecții și ale momentelor și duratelor acestora. Criteriul principal de optimizare este obținerea momentului maxim. Încercările au fost reluate de mai multe ori pentru anumite puncte.

Un exemplu prezentat în Fig. 4.1, Fig. 4.2, Fig. 4.3 este la turația de 3000 de rotații, cu o singură injecție pe ciclu. Aceste rezultate sunt doar pentru exemplificarea metodologiei de lucru în vederea optimizării punctelor de pe harta motorului.

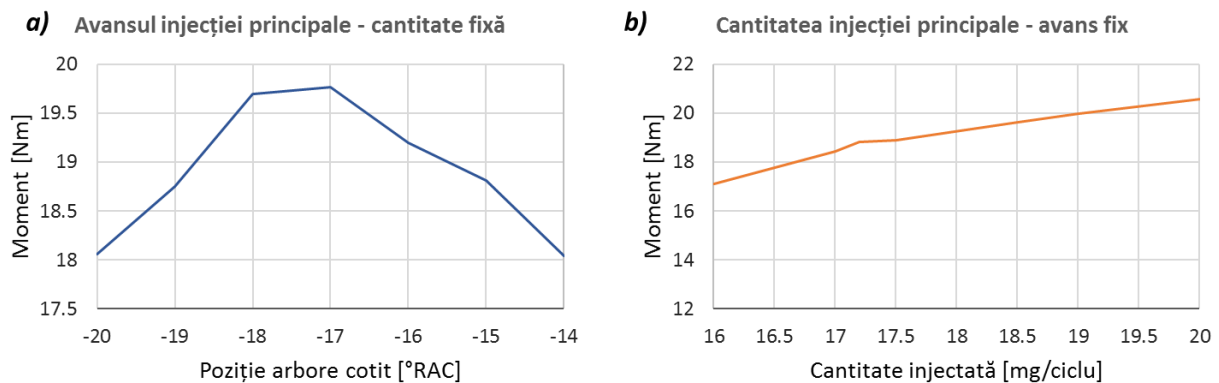


Fig. 4.1 Influența avansului și cantității injecției principale asupra momentului motor

În Fig. 4.1 **a)** se prezintă căutarea avansului optim în jurul unei valori unde momentul motor este maxim, păstrând cantitatea injectată fixă la o valoare de 18 mg/ciclu.

În Fig. 4.1 **b)** se prezintă evoluția momentului la creșterea cantității injectate, păstrând valoarea optimă a avansului determinată la punctul **a)**. Creșterea cantității injectate a fost limitată de emisiile de fum.

În Fig. 4.2 sunt prezentate cinci încercări la 2000 rpm cu 3 injecții pe ciclu. La încercarea nr. 1 s-a obținut momentul maxim, însă și emisiile de fum și particule au fost cele mai ridicate. La încercarea nr. 3 au rezultat cele mai bune valori pentru emisii, însă momentul motor a fost compromis. Din graficul prezentat în Fig. 4.2 **b)** se observă că încercarea nr. 2 se situează pe o pantă ascendentă, iar nr. 1 se prezintă ca o singularitate ce poate fi tratată ca o valoare aberantă. Momentul motor pentru încercarea nr. 2 devine cel mai mare, dacă excludem încercarea nr. 1.

Diferența este mică între încercările nr. 2 și 5 privind momentul motor, însă în ceea ce privesc emisiile, la încercarea nr. 5 au rezultat emisii mai mici. În aceste condiții, încercarea nr. 5 poate fi considerată optimă.

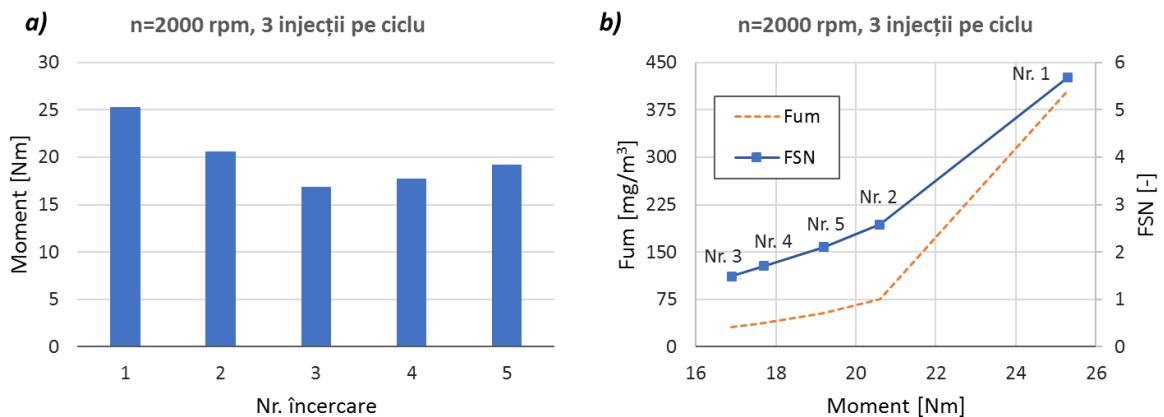


Fig. 4.2 Influența avansului asupra momentului, emisiilor de fum și particule

Scara graficelor de tip „spider” din Fig.4.3 este relativă față de o valoare maximă de referință pentru fiecare set de puncte și este exprimată procentual.

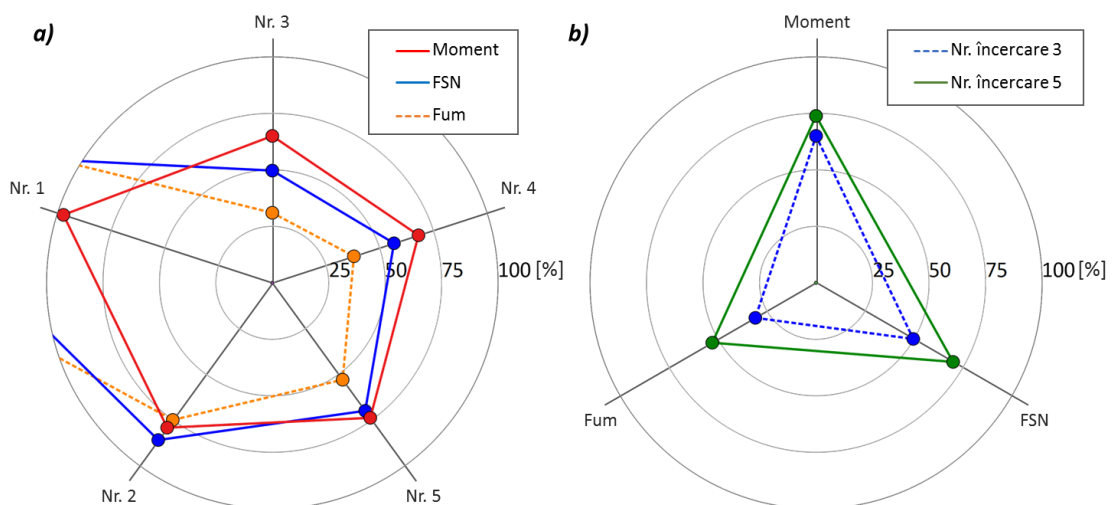


Fig. 4.3 Prezentarea comparativă și selectivă a încercărilor reprezentative:
a - strategia de optimizare; **b** - selecția variantelor optime

4.2. Rezultate obținute

În **subcapitolele** următoare (**4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6**) sunt prezentate, în mod similar, rezultatele obținute utilizând una, două sau trei injecții pe ciclu, pe întreaga gamă de turații prospectată (1400 rpm – 4000 rpm), la sarcină totală.

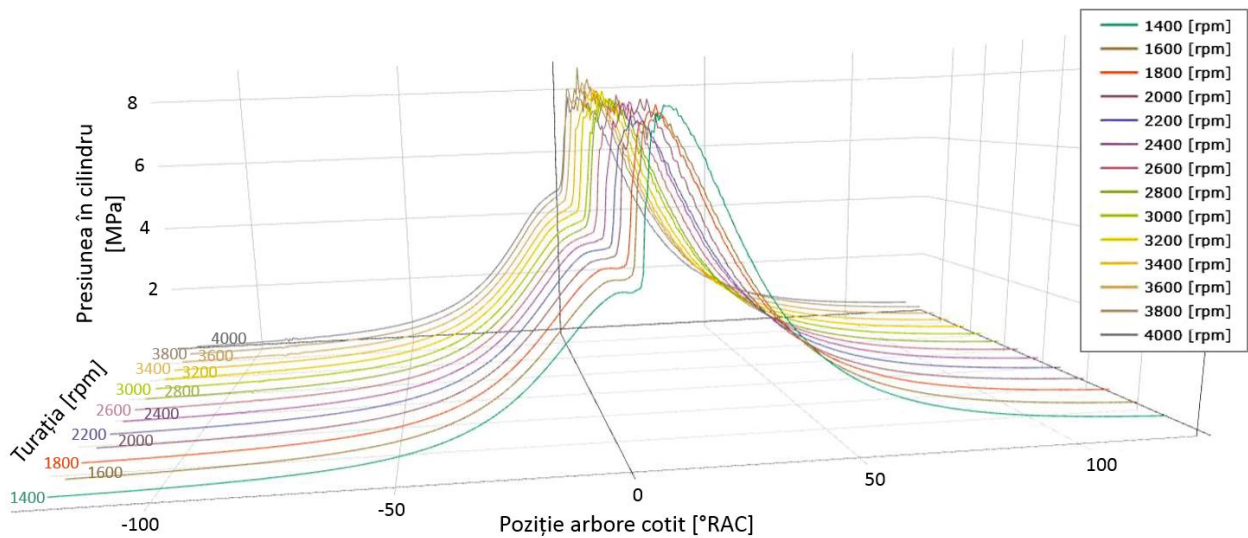


Fig. 4.4 Presiunile în cilindru obținute folosind o singură injecție pe ciclu pentru gama de turații prospectată

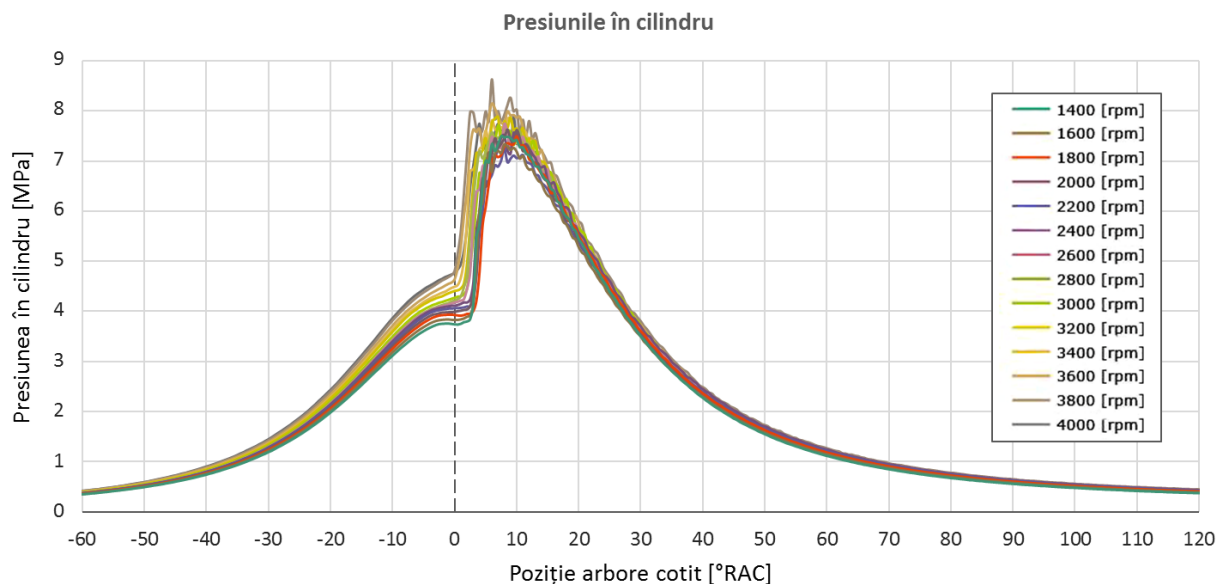


Fig. 4.5 Presiunile în cilindru obținute folosind o singură injecție pe ciclu pentru gama de turații prospectată

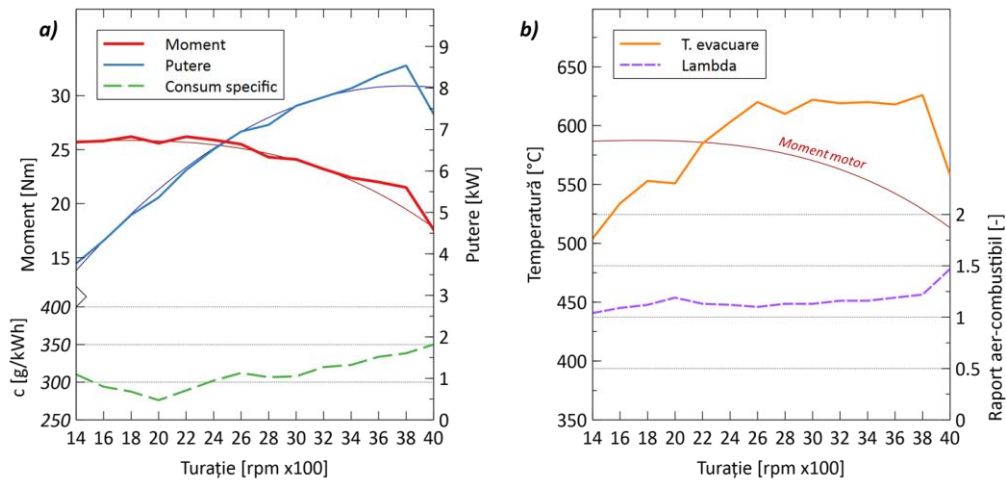


Fig. 4.6 Caracteristica externă obținută folosind o singură injecție pe ciclu pentru gama de turații prospectată la sarcina maximă

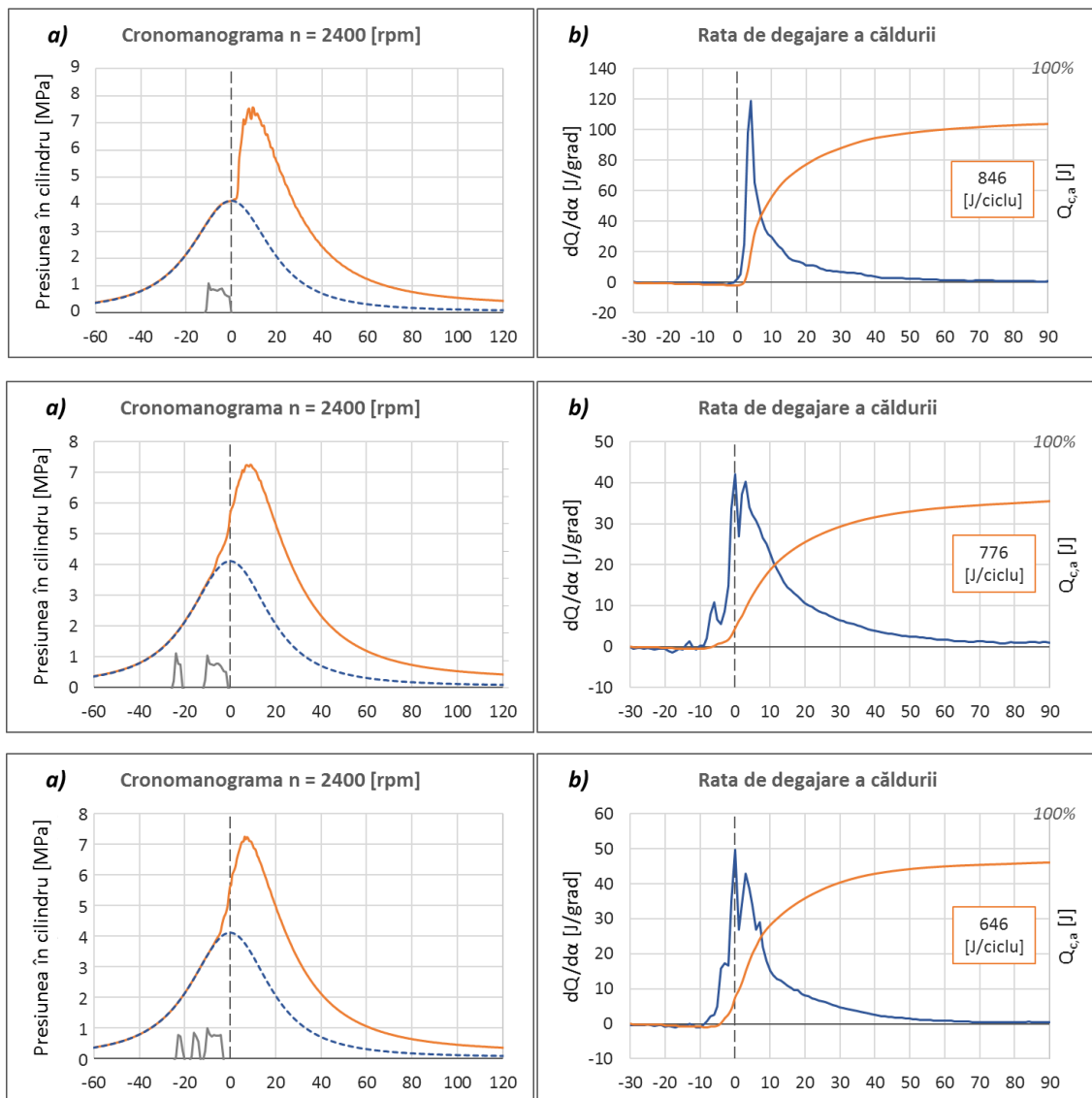


Fig. 4.7 **a** - Presiunea în cilindru; **b** - rata de degajare a căldurii, folosind una, două și trei injecții pe ciclu la turația de 2400 rpm

Valorile negative pentru legea integrală de degajare a căldurii înainte de începerea arderii se datorează următoarelor două motive:

1. Vaporizării combustibilului în timpul injecției în cilindru;
2. Vitezei reduse a pistonului în apropiere de PMS. Din această cauză, cedările de căldură către pereții camerei de ardere se măresc.

4.3. Concluzii privind acuratețea măsurărilor

Prelucrarea statistică a datelor experimentale oferă o indicație calitativă a unor șiruri de măsurări repetate, care pot produce erori de măsurare. Eroarea de măsurare se numește abaterea rezultatului unei măsurări față de adevărata valoare măsurată.

În cazul de față, instalația Indicom permite până la 200 de măsurări consecutive, totuși se consideră satisfăcător un număr de 100 de măsurări consecutive ale presiunii din cilindru, ceea ce permite o evaluare corectă a uniformității arderii, implicit a calității acesteia.

Atunci când se urmărește obținerea unor rezultate cu o precizie prestabilită ale măsurărilor efectuate se poate apela la măsurări singulare sau puțin repetate, dacă experiențele anterioare justifică nivelul de încredere ales, nivel determinat mai ales de experiența operatorului în ceea ce privește estimarea erorilor sistematice [MIL 1985].

Rezultatele unei prelucrări globale ale diferitelor surse de erori, ținând cont de precizia de măsurare a aparatelor de măsură și de condițiile de încercare sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Evaluarea erorilor de măsurare

Mărimea	Precizie aparat [%]	Estimația raportată s/\bar{x} [%]	Limitele de încredere $\pm ts$ [%]	Eroare estimată [%]
Turații	0.05	0.15	0.08	1.22
Moment motor	0.1	0.32	0.18	2.02
Temperaturi	0.2	0.66	0.31	3.33
Presiunea de admisie	0.05	0.23	0.16	1.66
Presiunea din cilindru	0.02	0.18	0.1	1.08
Nivel vibrații	0.1	0.41	0.21	2.12
Emisii poluante	0.1	0.88	0.55	4.35
Deplasare ambreiaj	0.02	0.25	0.16	1.05
Timp de consum de combustibil	0.01	0.2	0.67	4.86
Marcaj unghi și PMS	0.01	0.027	0.14	1.21

4.4. Concluzii

S-au realizat cercetări pe motorul AVL 5402 în variantele cu o injecție principală, cu o injecție principală și una pilot și o injecție principală și două pilot. În total s-au prelevat probe în 116 puncte de turație optimizate. În fiecare punct s-a măsurat: momentul, puterea, consum specific, emisii de fum și particule.

Diferenţele de presiune maximă din cilindru în gama de turaţii prospectată pentru cazurile optimizate este de sub 7%, pentru utilizarea unei singure injecţii (Fig. 4.5) şi două injecţii pe ciclu, iar pentru cazul utilizării a trei injecţii pe ciclu rezultă sub 5%.

Rezultatul optimizării se poate observa în Fig. 4.8, unde curba de putere şi moment prezintă o îmbunătăţire cu 15% în zona turaţiei de 3000. În mod similar, s-a realizat o îmbunătăţire a caracteristicii externe şi în cazul folosirii a două sau trei injecţii.

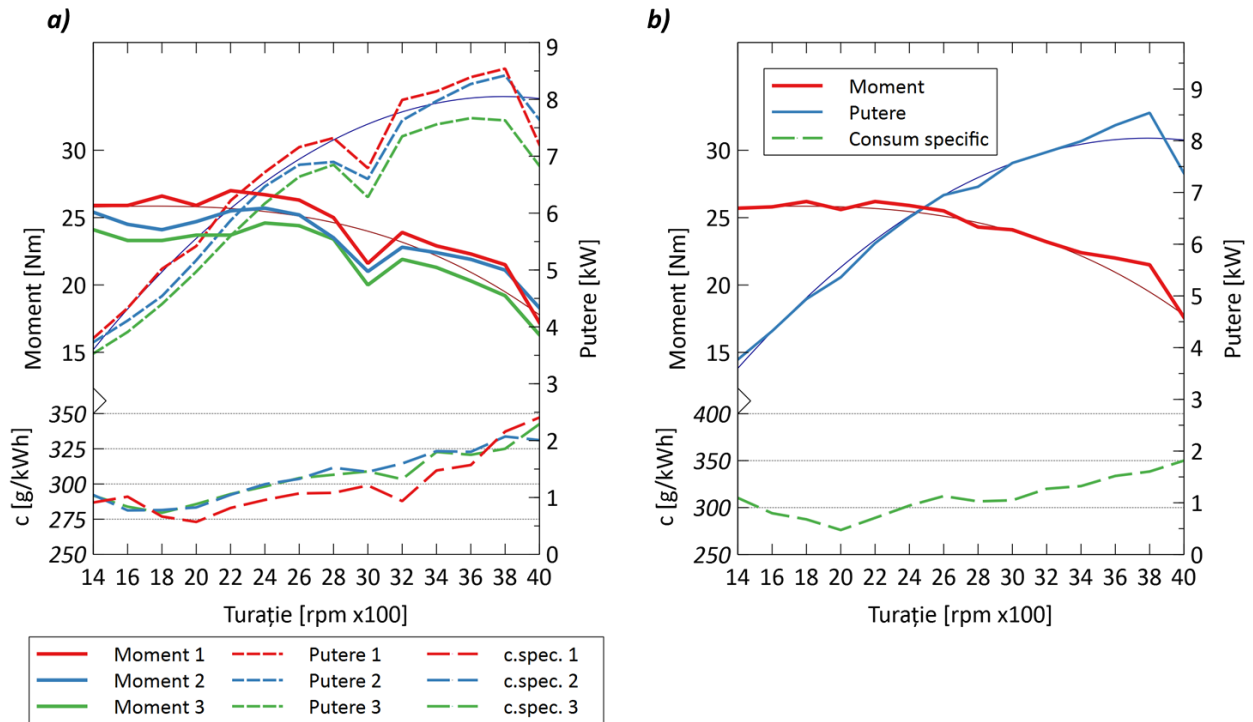


Fig. 4.8 Caracteristici externe: **a** - folosind una, două şi trei injecţii pe ciclu, cu parametrii iniţiali, neoptimizaţi; **b** - prin optimizarea unei singure injecţie pe ciclu

În Fig. 4.9 **a**) s-au colecţionat toate rezultatele înregistrate privind emisiile de fum şi particule pentru a observa o corespondenţă între acestea. Iar, în Fig. 4.9 **b**) se propune o funcţie liniară între emisiile de fum şi particule.

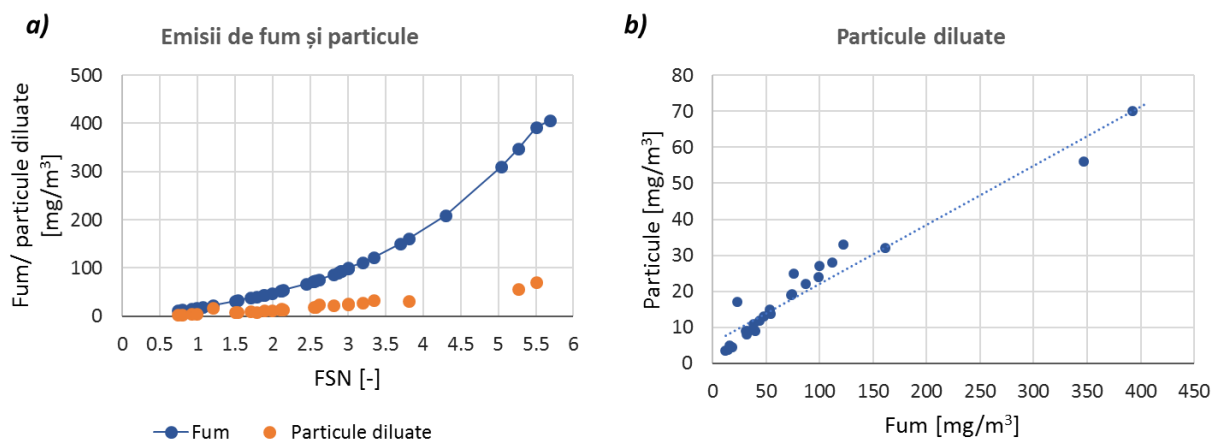


Fig. 4.9 Emisiile de fum şi particule

5. VALIDAREA SIMULĂRILOR

Studiul formării amestecului prin mijloace experimentale este dificil, costisitor și chiar imposibil pentru anumite cerințe. În ciuda unui grad mai ridicat de incertitudine pe care îl presupune simulările numerice privind studiul formării amestecului în comparație cu experimentul, acestea pot oferi informații într-un spectru mai larg despre procesele complexe din cilindru și în zone de interes în orice loc din interiorul domeniului computațional [DOG 2016e], [BAU 2006].

În general, analizele de curgere a fluidelor, sau CFD, presupun definirea unui domeniu de analiză, sau domeniu computațional, care să fie în totalitate utilizat de măcar un fluid, deci un volum determinat. Pe domeniul de analiză se definesc proprietățile fluidului sau ale fluidelor, dacă sunt mai multe, de exemplu în cazul simulării amestecului aer-combustibil, după care trebuie să se aplice condițiile de frontieră, prin care se modelează simularea de curgere. În cazul simulărilor CFD, condițiile de frontieră pot fi cel puțin de tip intrare, ieșire sau perete.

Simularea formării amestecului aer-carburant și a arderii acestuia în motorul cu ardere internă presupune un studiu complex de multifizică. Pentru formarea amestecului, se definesc proprietățile combustibilului, atât cele fizice de temperatură și densitate, dar și compoziția chimică, care cu cât este mai detaliată, cu atât rezultatele vor fi mai bine corelate cu realitatea, în special privind estimările asupra compoziției emisiilor poluate. Următoarea condiție este stabilirea momentului de început și sfârșit al injecției și a cantității injectate.

5.1. Obiectivele urmărite cu ajutorul simulării

Prin simulările propuse în teză se urmărește, în primul rând, obținerea unei metode pragmatice de analiză virtuală, din care să rezulte rezultate verosimile pentru studiile de caz considerate.

În vederea studiului virtual cu aplicație pe motorul cu aprindere prin scânteie, obiectivul principal constă în simularea procesului de admisie, din care să se prezinte fenomenul de curgere al aerului admis în cilindru pe lângă supapele de admisie. În această situație se dorește:

- Să se prezinte câmpurile vitezelor de curgere în volumul simulat, cu ajutorul unor secțiuni 2D la anumite distanțe în cilindru pentru a surprinde procesul de admisie.

Pentru simularea în mediu virtual a proceselor din motorul cu aprindere prin comprimare sunt stabilite următoarele obiectivele:

- Să se prezinte vitezele de curgere pentru studiile de caz, ca rezultate clasice și de bază pentru simulările CFD.
- Să se prezinte raportul de echivalență cu ajutorul căruia se pot identifica zonele amestecului.
- Să se prezinte distribuția în secțiune a formării emisiilor de funingine.
- Să se prezinte distribuția temperaturilor în interiorul cilindrului.

5.2. Metodologia de simulare

5.2.1. Propuneri pentru realizarea simulărilor cu aplicație pe motorul cu aprindere prin scânteie

Obiectul simulărilor îl face motorul monocilindric de tip MAS, care a fost testat și pe stand, AVL 5403, instalat la Institutul universității Transilvania din Braşov (ICDT) și destinat testărilor termodinamice.

Pentru a putea face o previziune cât mai reală prin simulare asupra proceselor din motor, camera de ardere a fost modelată 3D cu acuratețe ridicată utilizând echipamente de ultimă generație de scanare 3D cu palpate. Rezultatele unor simulări preliminare oferă detalii privind fenomenele de curgere prin galeriile de admisie [DOG 2016e].

5.2.2. Soluții alese pentru realizarea simulărilor cu aplicație pe motorul diesel

Pentru simularea proceselor din motorul diesel, s-a utilizat AVL-ESE Diesel, un soft CFD bi-dimensional dedicat analizelor de curgere și de combustie în motoarele cu ardere internă.

Pentru a putea compara rezultatele simulărilor cu valorile obținute în cercetarea experimentală pe stand, s-au ales două turații care coincid cu cele propuse și pentru experiment, și anume 2000 și 2400 rotații. Parametrii de injecție, avans și cantitate, utilizați în simulare sunt corecți, având ca referință valorile reale stabilite din timpul testării experimentale.

5.2.3. Cazuri simulate

Următoarele cazuri au fost simulate, cu aplicație pe motoarele studiate experimental pe stand:

- Pentru motorul cu aprindere prin scânteie:
 - Simulare 3D de curgere pentru procesul de admisie și compresie.

- Pentru motorul cu aprindere prin comprimare:
 - Simulare fără combustie, model de calibrare la turația **2000 rpm – Caz 1a**;
 - Simulare fără combustie, model de calibrare la turația **2400 rpm – Caz 2a**;
 - Simulare cu o singură injecție pe ciclu la turația **2000 rpm – Caz 1b**;
 - Simulare cu o singură injecție pe ciclu la turația **2400 rpm – Caz 2b**;
 - Simulare cu două injecții pe ciclu la turația **2000 rpm – Caz 1c**;
 - Simulare cu trei injecții pe ciclu la turația **2400 rpm – Caz 2c**.

5.3. Preluarea designului camerei de ardere pentru simularea proceselor motorului cu aprindere prin scânteie

Pentru a realiza analize virtuale corecte, geometria virtuală ar trebui să fie cât mai fidelă cu cea a motorului real. Din acest motiv, s-a dorit obținerea unui model 3D de acuratețe ridicată, construit după scanarea geometriei reale a camerei de ardere [DOG 2015b].

5.3.1. Scanarea geometriei 3D a suprafeţelor camerei de ardere

Pentru a obţine modelul 3D al geometriei camerei de ardere s-au utilizat tehnologii moderne de scanare 3D în coordonate cu probă palpată (*touch probe 3D scanning technology*).

Metoda recomandată pentru a scana anumite profile geometrice sau suprafeţe 3D, în vederea reconstruirii acestora, este prelevarea automată şi în mod continuu a punctelor în urma trecerii probei pe suprafaţa de măsurat [LEA 2014].

5.3.2. Reconstruirea modelului 3D după norul de puncte rezultat în urma scanării

În urma scanării 3D a suprafeţelor camerei de ardere au rezultat mai multe date de tip nori de puncte, volumul de date fiind destul de mare. Cu instrumente speciale de modelare CAD s-a încercat reconstruirea geometriei cât mai exacte a camerei de ardere supuse scanării.

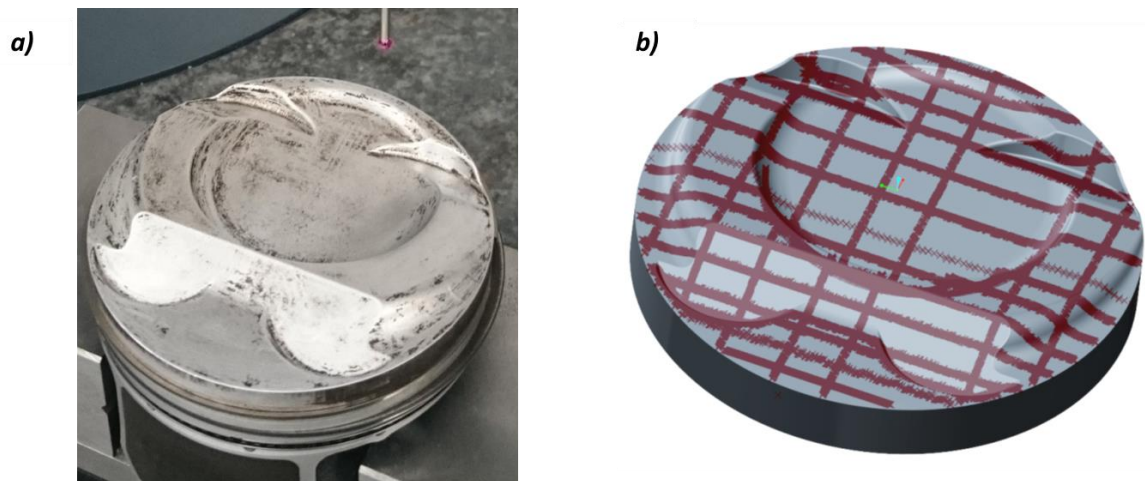


Fig. 5.1 Suprafaţa capului pistonului: **a** - în timpul scanării; **b** - model CAD [DOG 2015b]

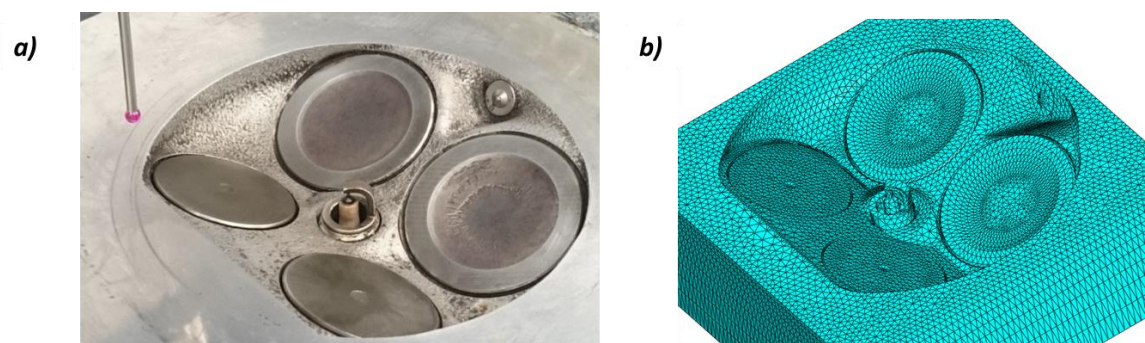


Fig. 5.2 Suprafaţa camerei de ardere din chiulasă: **a** - în timpul scanării; **b** - model CAD discretizat [DOG 2015b]

Subcapitolul 5.3.3 propune câţiva paşi suplimentari pentru a simplifica geometria reconstruită în vederea utilizării acesteia cu succes în simulările viitoare. S-au construit mai multe modele de analiză, folosind softuri generaliste de CFD.

5.4. Simularea proceselor motorului cu aprindere prin scânteie

5.4.1. Pregătirea modelelor CFD pentru simulare

Importul geometriei STL și prelucrarea ulterioară acesteia este necesară pentru a rezolva problemele interpretării apărute la import. Fișierul prelucrat va fi un alt STL, însă mai detaliat și cu suprafețe triunghiulare controlate, după cerințele specifice. Acest fișier rezultat se poate utiliza în programul AVL Fire, dar și în alte programe de simulare, precum Comsol.

Discretizarea modelului de curgere pentru acest tip de analiză trebuie să conțină anumite elemente specifice pentru analizele termo-dinamice [JUR 2008, WIN 2000].

5.4.2. Rezultate obținute în urma simulării de curgere

Rezultatele prezentate sunt obținute pentru cazul admisiei și comprimării.

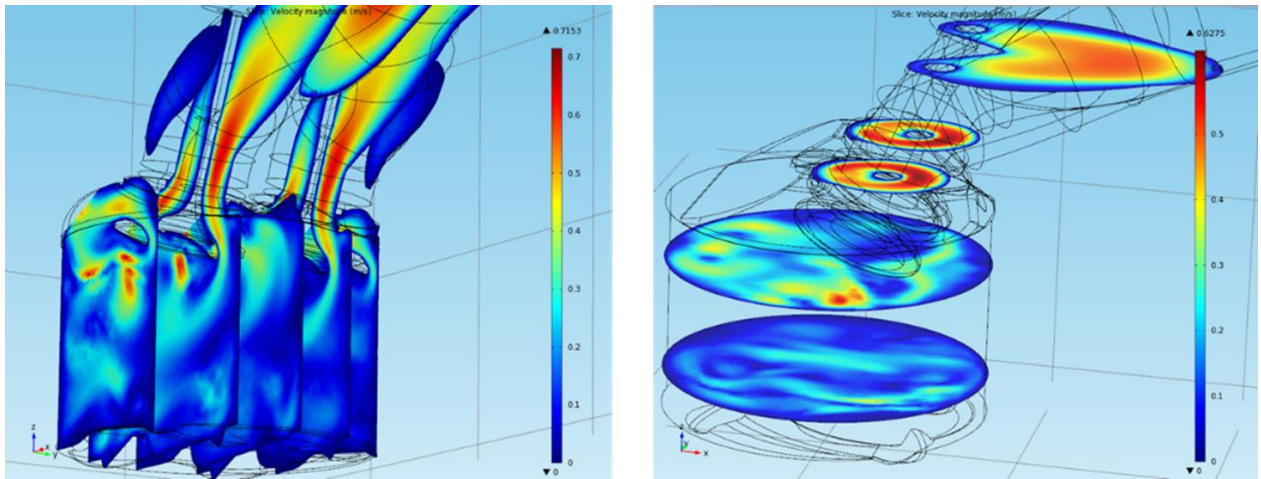


Fig. 5.3 Secțiuni prin domeniul de simulare prezentând câmpul de viteze [DOG 2016e]

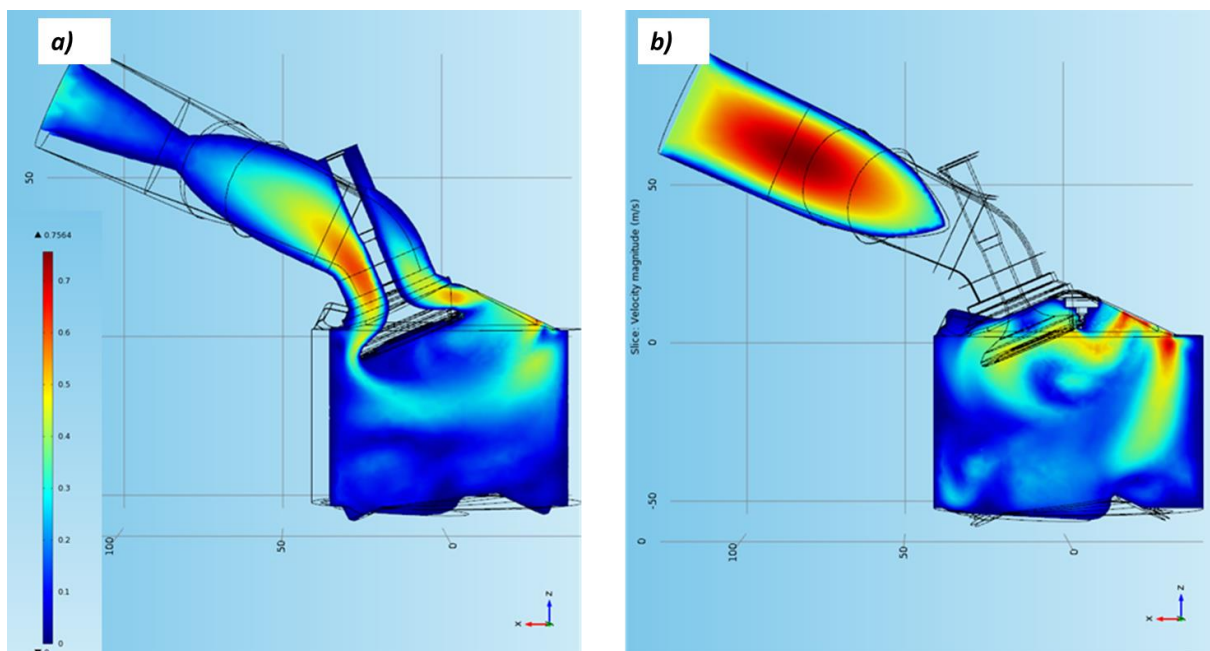


Fig. 5.4 Detaliu ce prezintă admisia: **a** - secțiune prin centrul unei supape de admisie; **b** - secțiune prin centrul cilindrului [DOG 2016e, DOG 2016a]

5.5. Preluarea datelor necesare pentru simularea motorului diesel

Inspectarea și verificarea injectorului utilizat în motorul AVL 5402 este necesară pentru a defini modelul de simulare.

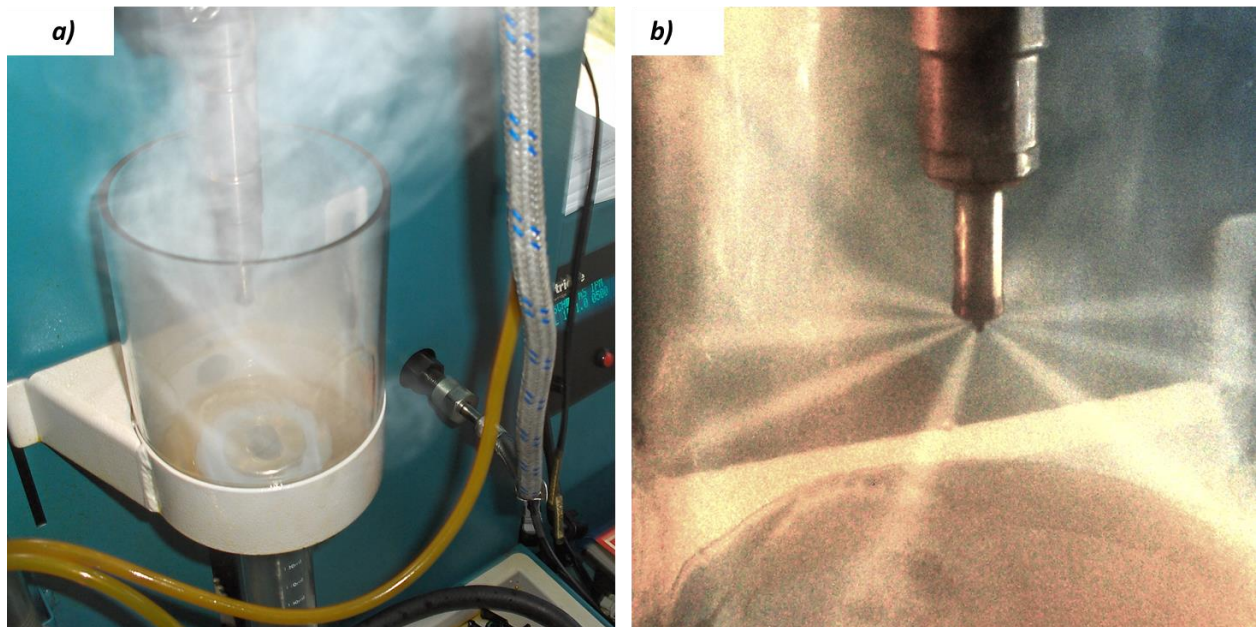


Fig. 5.5 Verificare injectorului

5.6. Simularea și validarea proceselor motorului diesel

Modelul de simulare este simplificat la un sector axisimetric 1/8, corespunzător celor 8 jeturi ale pulverizatorului.

5.6.1. Rezultate obținute pentru simularea cazului fără ardere

În scopul calibrării modelului, s-a simulat un ciclu la turația 2000 rpm fără ardere (caz 1a). La final, s-a urmărit presiunea din cilindru la finalul comprimării. Presiunea la PMS, la sfârșitul comprimării rezultată din experiment este de 4.03 [MPa], iar din simulare de 4.069 [MPa].

Un ciclu la turația 2400 rpm fără ardere (caz 2a) a fost simulat pentru a verifica condițiile inițiale la o turație diferită. Presiunea la PMS, la sfârșitul comprimării rezultată din experiment este de 4.05 [MPa], iar din simulare de 4.12 [MPa].

5.6.2. Rezultate obținute pentru simularea cazului având o singură injecție pe ciclu

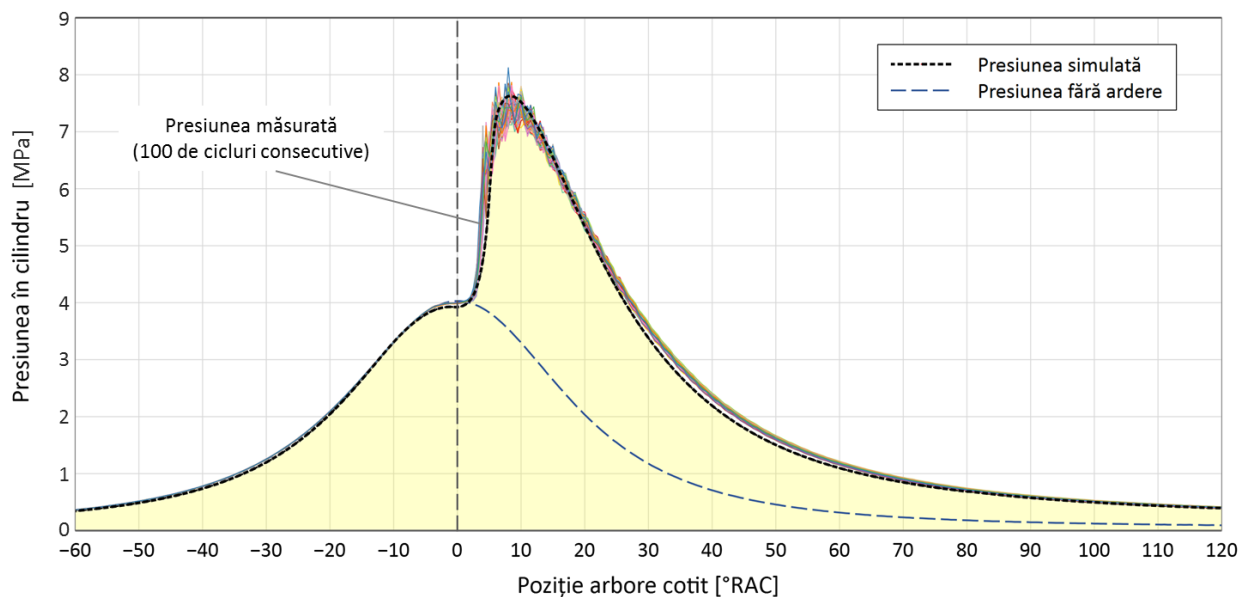


Fig. 5.6 Simularea presiunii din cilindru în cazul utilizării unei singure injecții pe ciclu la turația de 2000 rpm – Caz 1b [DOG 2019]

Tabelul 5.1 Parametrii rezultați din simulare și cei din experiment – caz 1b

Parametrii urmăriți	din simulare	din experiment
Masa aerului la începutul compresiei [kg]	5.75E-004	5.57E-004
Presiunea medie efectivă [MPa]	0.513	0.640
Consumul specific [kg/kWh]	0.3521	0.276
Raportul aer-combustibil [-]	1.53	1.62
Randamentul indicat [-]	0.30	0.54
Presiunea medie indicată [MPa]	0.630	0.834
Puterea indicată [kW]	5.36	7.10
Momentul indicat [Nm]	25.60	33.88
Cantitatea de combustibil injectată [kg]	2.56E-005	2.47E-005

Rezultatele privind vitezele de curgere, raportul de echivalență, distribuția în secțiune a formării emisiilor de funingine și distribuția temperaturilor în interiorul cilindrului se regăesc în teză.

5.6.3. Rezultate obținute pentru simularea cazului având două injecții pe ciclu

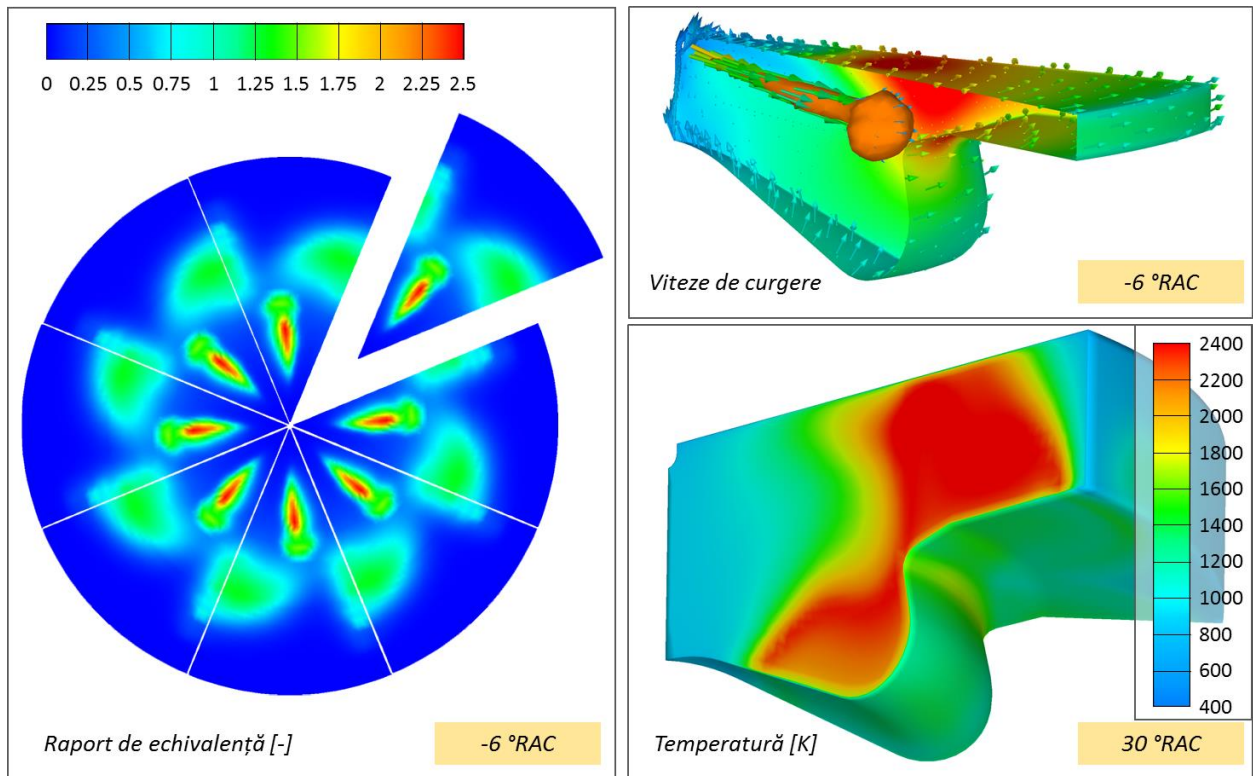


Fig. 5.7 Rezultate obținute la simularea a două injecții pe ciclu pentru turația de 2000 rpm

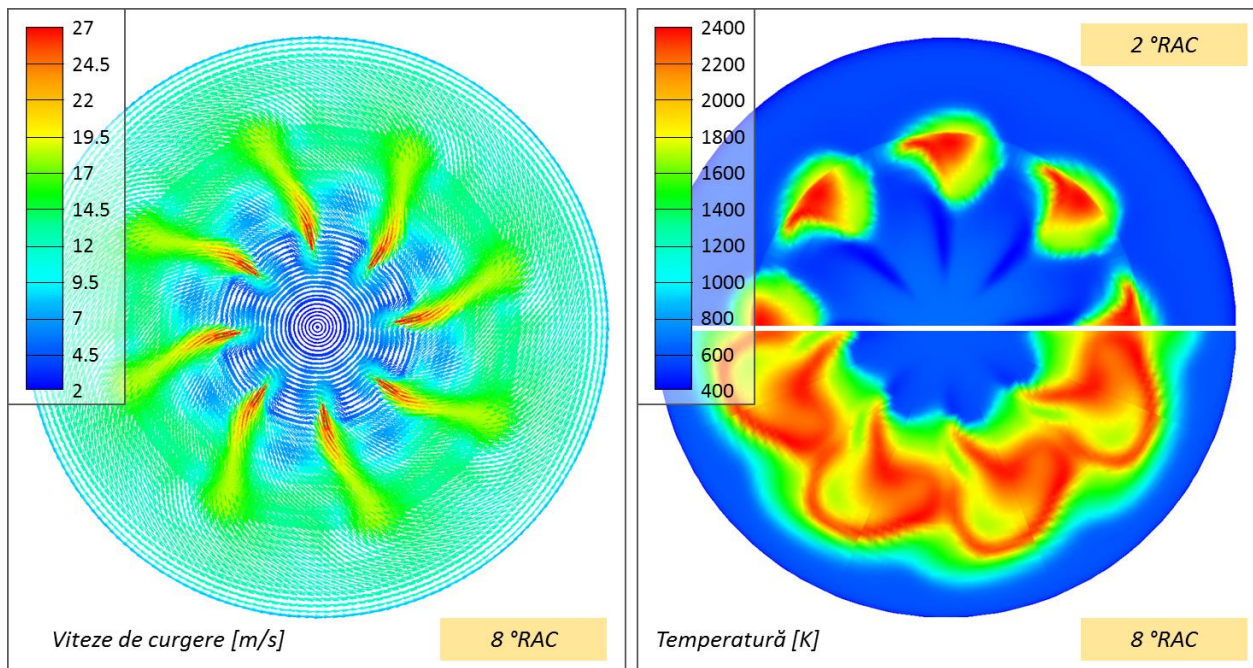


Fig. 5.8 Vitezele de curgere și temperatura în cilindru la turația de 2000 rpm

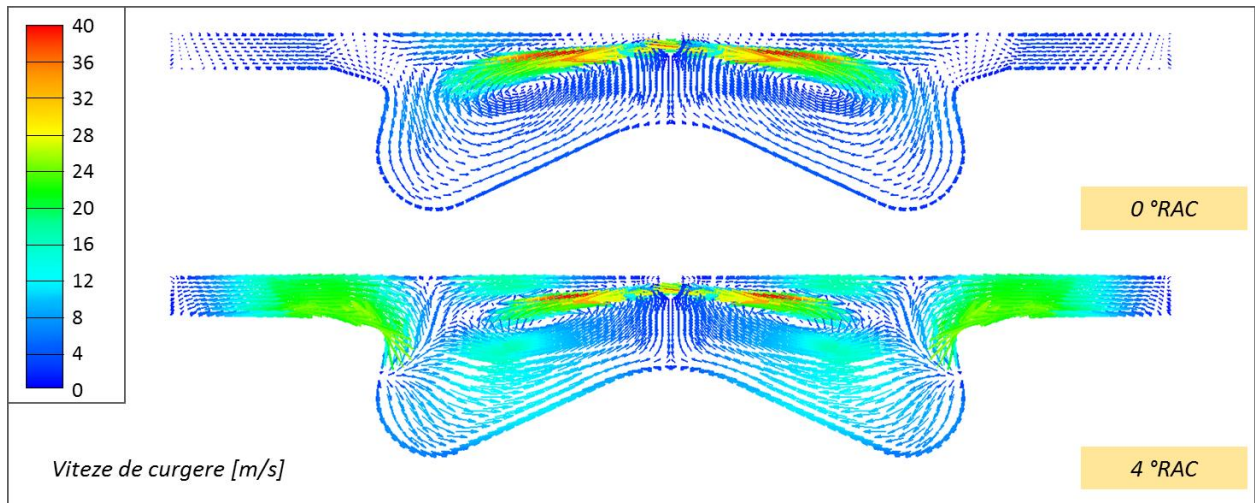


Fig. 5.9 Vitezele de curgere în cilindru la turația de 2000 rpm

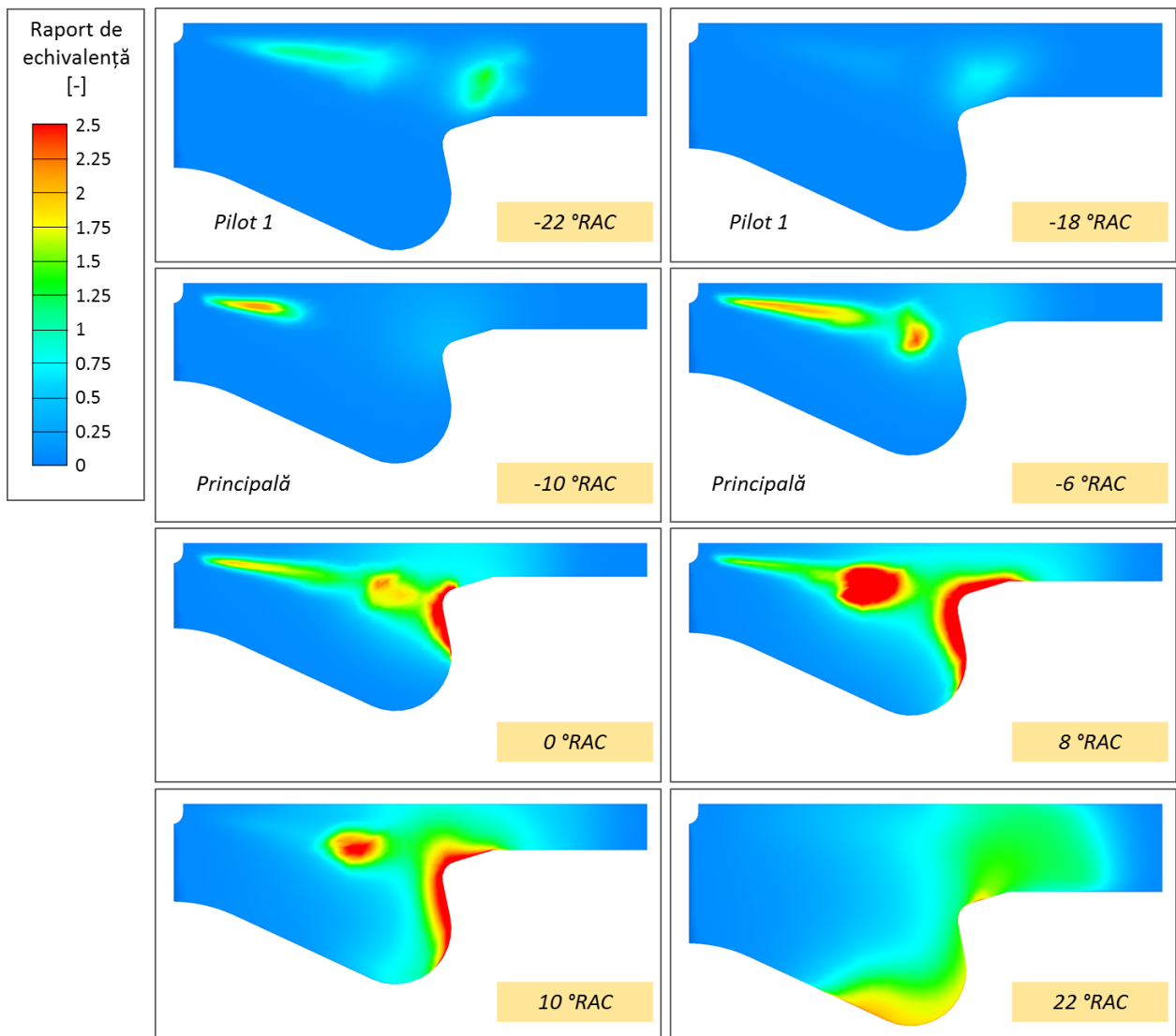


Fig. 5.10 Raportul de echivalență obținut la simularea a două injecții pe ciclu pentru turația de 2000 rpm

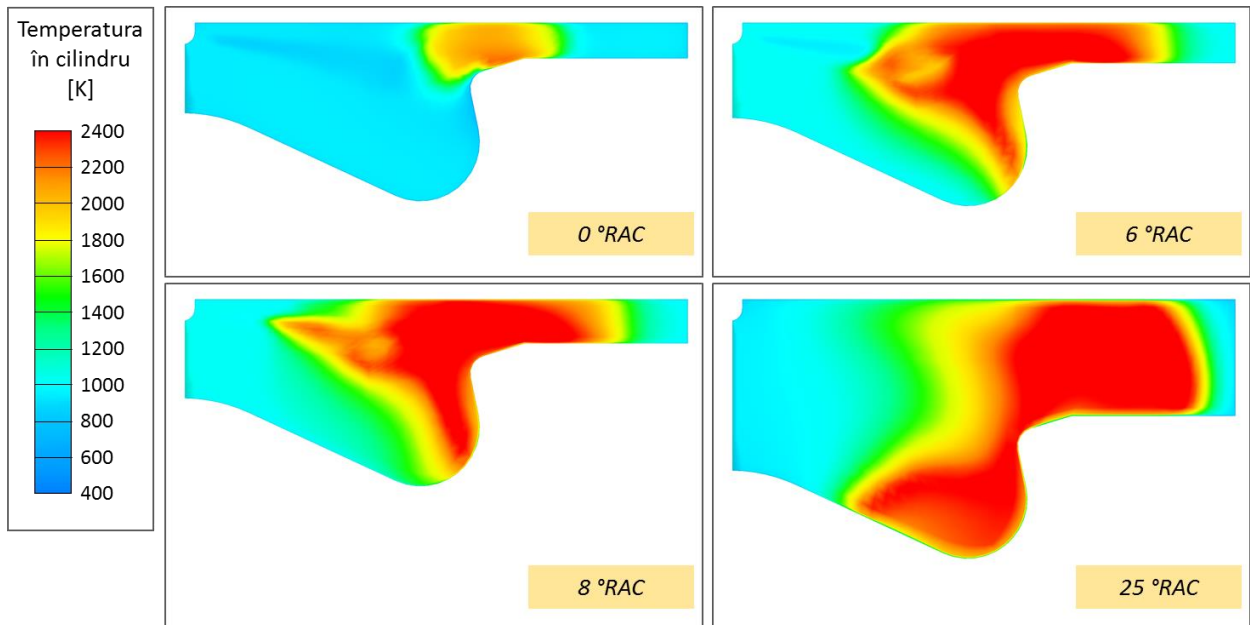


Fig. 5.11 Temperatura în cilindru obținută la simularea a două injecții pe ciclu pentru turația de 2000 rpm

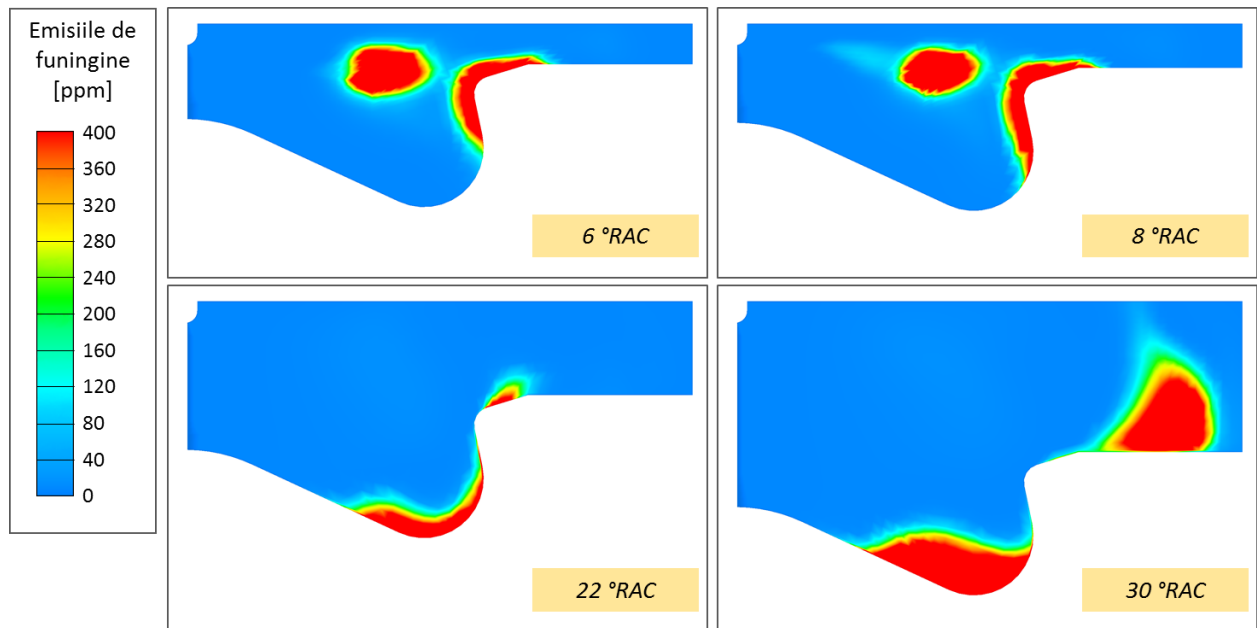


Fig. 5.12 Emisiile de funingine obținute la simularea a două injecții pe ciclu pentru turația de 2000 rpm

5.6.4. Rezultate obținute pentru simularea cazului având trei injecții pe ciclu

Setul de rezultate prezentat în teză este similar ca și în cazurile prezentate la 5.6.3 și 5.6.2.

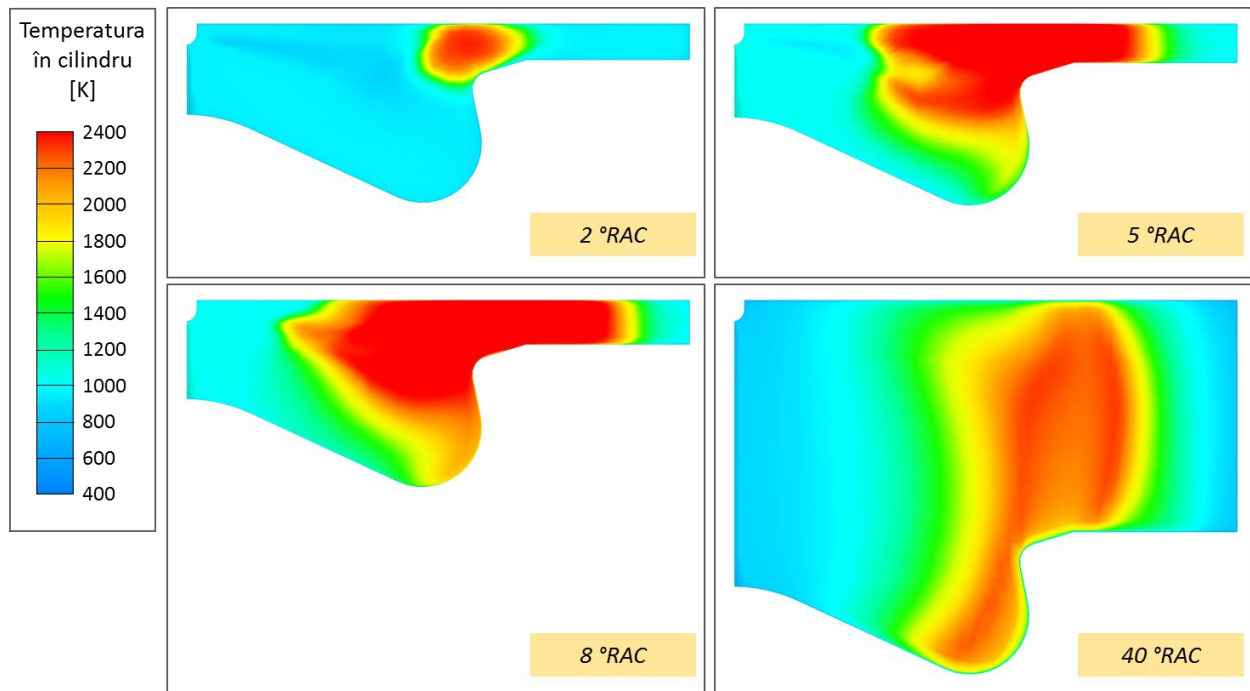


Fig. 5.13 Temperatura în cilindru obținută la simularea a trei injecții pe ciclu pentru turația de 2400 rpm

În **subcapitolul 5.6.5** s-au prezentat temperaturile obținute în cilindru utilizând presiuni de supraalimentare de 0.02, 0.03 și 0.04 MPa. Acestea au fost calculate pentru situația utilizării a două injecții pilot și o injecție principală pe ciclu.

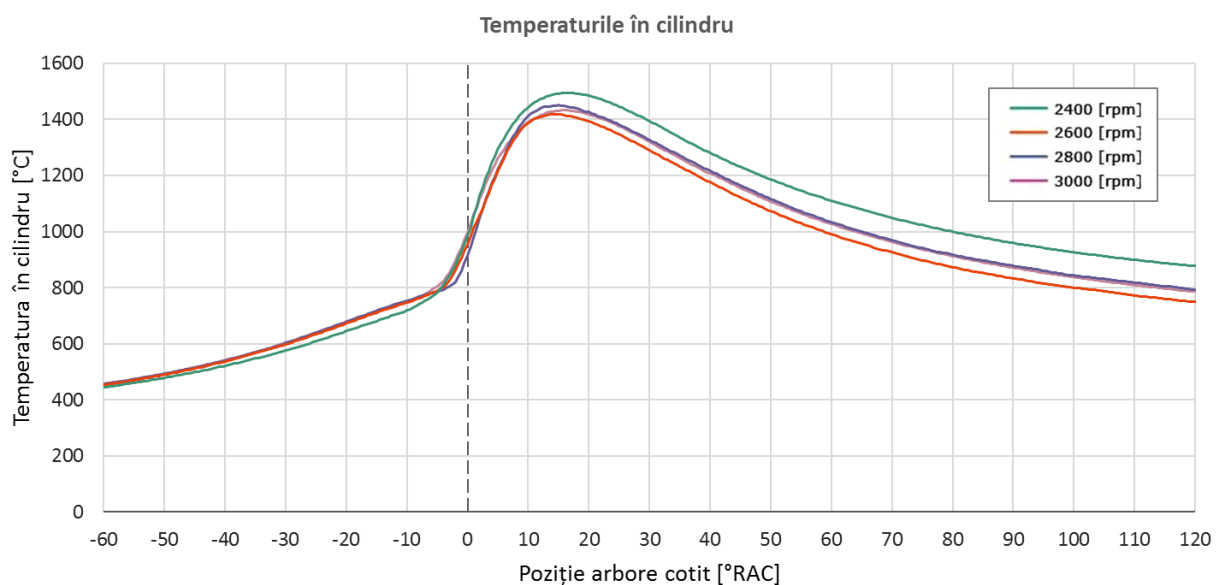


Fig. 5.14 Temperaturile în cilindru obținute folosind două injecții pilot și o injecție principală și o presiune de supraalimentare de 0.03 MPa pentru gama de turații cercetate

5.7. Concluzii

Modelul de calibrare, în care nu este simulată și combustia, dezvăluie importante influențe pe care le pot avea parametrii de intrare asupra rezultatelor și chiar asupra convergenței analizei.

În cazul simulărilor de ardere, presiunea și temperatura aerului la sfârșitul admisiei au o influență asupra creării condițiilor de ardere a cantității de combustibil introduse în cilindru. Creșterea doar a temperaturii în cilindru, din parametrii inițiali de stare ai analizei, favorizează avansurile mai timpurii, necesare în special la simularea a două sau trei injecții pe ciclu.

Experimentul a validat simularea CFD pentru o injecție pe ciclu cu o eroare minimă de 1%.

Câteva principii de bune practici au fost evidențiate pentru a realiza simulări de succes:

- Culegerea corectă a datelor inițiale: geometrie, condiții inițiale și valori de corecție;
- Verificarea geometriei scanate cu ajutorul unor programe de prelucrare a geometriilor în formate neutre, precum STL sau STP;
- Construirea unor modele simple de simulare, care pot fi verificate analitic cu formule simple;
- Construirea modelului de simulare final în pași simpli, din mai multe simulări simple.

6. CONCLUZII

6.1 Concluzii generale

Dezvoltarea și optimizarea motoarelor cu ardere internă prezintă în continuare un interes major pentru marea industrie constructoare de autovehicule, dar și pentru utilizatorii din alte domenii speciale, precum cel nautic, aeronautic și pentru aplicații staționare. În ciuda amenințării din partea propulsiei electrice și sub presiunile legislative de reducere a emisiilor nocive, viitorul motorului cu ardere internă este asigurat de dezvoltarea continuă a strategiilor de management electronic al injecției și de sistemele moderne complexe de tratare a gazelor de evacuare.

La începutul lucrării s-a realizat un studiu asupra principiilor teroretice de formare a amestecului și arderii și o evaluare a potențialului adus de anumite strategii și sisteme moderne de injecție sau de distribuție variabilă, raport de comprimare variabil, supraalimentare.

În vederea aplicării unei soluții tehnice pragmatice și corespunzătoare îmbunătățirii performanțelor energetice și de consum a motorului cu ardere internă studiat, s-a decis asupra modificării parametrilor de injecție. Această optimizare s-a putut realiza cu ajutorul echipamentelor din celula de testare din cadrul Institutului de Cercetare Dezvoltare al Universității Transilvania din Braşov.

Urmărind natura statistică a arderii, s-au simulat cu instrumente matematice potrivite procesele de ardere. S-au dezvoltat modele uni și multi-zonale, prin coeficienți care pot fi validați prin experiment, însă este necesară o experiență mare pentru acest lucru. Unul din

modelele matematice fiind după Vibe, iar rezultatul acestei abordări aproximează satisfăcător (sub 5% abatere) fenomenul fizic (Fig. 2.2).

Experimentul a validat simularea CFD pentru o injecție pe ciclu cu o eroare minimă de 1% (Fig. 5.6). Pentru această reușită a fost necesară validarea prin modelare și măsurare a presiunii din cilindru a motorului antrenat.

La simularea injecției pilot și injecției pilot secundare au apărut limitări privind avansurile ce puteau fi utilizate în softul dedicat. La avansuri mari ale injecției pilot au apărut dificultăți la simularea aprinderii amestecului preformat. Compararea ciclurilor măsurate cu cele simulate prezintă o abatere de sub 7%.

Pentru simularea formării amestecului la motorul cu aprindere prin scânteie, s-a realizat un model 3D al geometriei camerei de ardere, inclusiv al galeriilor de admisie și evacuare prin scanarea cu sondă tactilă.

Acuratețea măsurării experimentale contribuie în mod hotărâtor la precizia calculului prin stabilirea condițiilor inițiale, de stare și de frontieră. O problemă deocamdată greu de rezolvat este măsurarea temperaturilor camerei de ardere, inclusiv în capul pistonului.

Pentru a obține o corelație cât mai bună între simulare și testare, s-a dorit utilizarea în simulare a formei camerei de ardere cât mai fidele cu cea reală. Astfel, s-a reconstruit geometria 3D cu ajutorul scanării 3D a formelor interioare ale motorului. Această geometrie a fost supusă unor modificări de simplificare în conformitate cu cerințele modelelor de analiză.

În această lucrare s-a realizat optimizarea unui motor cu ardere internă cu aprindere prin comprimare experimental în vederea creșterii performanțelor energetice prin modificarea parametrilor de injecție și ai presiunii de supraalimentare. Cu ajutorul echipamentelor de management electronic al injecției s-au studiat diferite strategii de injecție pentru o gamă de turații de la 1400 la 4000 rpm.

După testarea motorului AVL 5402 la sarcină maximă și analizând caracteristicile externe, acestea trebuie optimizate din punct de vedere al momentului și puterii produse, mai ales în jurul turației de 3000 rpm, însă luând în considerare și emisiile rezultate. Rezultatul optimizării se poate observa în Fig. 4.8, unde curba de putere și moment prezintă o îmbunătățire cu 15% în zona turației de 3000. În mod similar, s-a realizat o îmbunătățire a caracteristicii externe și în cazul folosirii a două sau trei injecții.

S-au realizat cercetări pe motorul AVL 5402 în variantele cu o injecție principală, cu o injecție principală și una pilot și o injecție principală și două pilot. În total s-au prelevat probe în 116 puncte de turație optimizate. În fiecare punct s-a măsurat: momentul, puterea, consum specific, emisii de fum și particule.

Testele au avut în vedere încercarea motorului la mai multe regimuri de sarcină și la utilizarea de multiple injecții pe ciclu. Acestea au evidențiat moduri diferite de funcționare, de unde se pot trage concluzii privind posibilitățile de optimizare a motorului supus încercărilor datorită oportunităților oferite de standul de testare și a metodei de lucru.

Prin testarea motorului antrenat pe toată plaja de turații selectate, se poate calcula randamentul mecanic. De asemenea, se pot preciza momentele începerii combustiei, prin suprapunere peste curbele de presiune obținute cu motorul în funcționare la diferite regimuri de funcționare.

Cercetările experimentale s-au efectuat pe baza unei planificări a încercărilor descrise în **Capitolul 3.6.**

Rezultatele privind emisiile de fum sunt comparabile cu cele obținute de alți cercetători independenți din industria auto, inclusiv organizația MIRA (*Motor Industry Research Association*) (Fig. 3.2). Aceștia au cercetat o gamă largă de motoare de diverse capacități cilindrice, dar au și utilizat diverși combustibili, inclusiv alternativi. Este de remarcat că fiecare au folosit aparaturi diferite și la perioade diferite. Cercetările efectuate în lucrarea de față au oferit rezultate comparabile cu cele ale cercetătorilor amintiți, mai ales în zona de concentrație de fum mică (până la 3 FSN) (Fig. 3.2 b).

În urma analizei rezultatelor înregistrate privind emisiile de fum și particule s-a evidențiat o dependență aproximativ liniară (Fig. 4.9).

Diferențele de presiune maximă din cilindru în gama de turații prospectată pentru cazurile optimizate este de sub 7%, pentru utilizarea unei singure injecții (Fig. 4.5) și două injecții pe ciclu, iar pentru cazul utilizării a trei injecții pe ciclu rezultă sub 5%.

Abaterea ciclică este minimă (sub 2%) în zona turației momentului maxim, și anume 2000 rpm, pentru utilizarea a două injecții pe ciclu.

6.2 Contribuții originale

Cele mai importante contribuții personale sunt prezentate mai jos:

- Studiul formării amestecului de aer-combustibil și a arderii la motoarele cu aprindere prin scânteie și a metodelor de creștere a performanțelor energetice;
- Studiul factorilor care influențează formarea amestecului carburant și analiza procesului de ardere din motoarele cu aprindere prin comprimare;
- Pe parcursul tezei s-au brevetat cinci concepte pentru sisteme de distribuție variabilă;
- Instrumentarea controlului alimentării standului cu curent continuu;
- Verificarea parametrilor funcționali ai injectorului motorului MAC AVL 5402 la un stand specializat (inductivitate, rezistență internă, tensiunea de alimentare, număr de orificii, presiunea minimă de deschidere);
- Realizarea unei planificări a încercărilor, în vederea eficientizării testelor din punct de vedere economic;
- Propunerea unei diagrame „spider” pentru determinarea criteriilor de optimizare a motorului MAC AVL 5402 (Fig. 4.3);
- Intervenție asupra cartogramei injecției (avans, durată, cantitate de combustibil, număr injecții pe ciclu) pentru definirea unei metodologii de optimizare.
- Optimizarea parametrilor de injecție amintiți mai sus pentru 116 puncte de funcționare a motorului MAC AVL 5402;
- Propunerea unei corelații între emisiile de fum și particule la sarcină maximă;
- Prelucrarea și filtrarea metodică a înregistrărilor experimentale;
- Realizarea unor simulări pentru a evidenția formarea amestecului la MAC AVL 5402 pentru mai multe regimuri de funcționare;

- Scanarea 3D a geometriei camerei de ardere a motorului MAS AVL 5403, în vederea realizării de simulări CFD;
- Reconstruirea modelului 3D al camerei de ardere după norul de puncte rezultat în urma scanării;
- Realizarea unei simulări pentru a evidenția curgerea prin poarta supapelor de admisie, la motorul MAS AVL 5403;
- Compararea rezultatelor obținute în urma simulărilor cu cele obținute experimental;
- Realizarea unei cartograme optimizate pentru mai multe regimuri de funcționare.

6.3 Diseminarea rezultatelor

Lucrarea este structurată pe șase capitole. Pe durata studiilor doctorale, o mare parte din cunoștințele dobândite în activitatea depusă au fost făcute cunoscute mediului științific prin participări la conferințe și redactarea de lucrări și texte științifice.

Dintre participările la conferințe, se pot aminti următoarele evenimente: SMAT Craiova 2014; EAEC-ESFA București 2015; ICOME Craiova 2015; FISITA Busan 2015; COFRET București 2016; CONAT Braşov 2016; SMAT 2019.

Încă din anul întâi de studiu au fost pregătite lucrări științifice pe teme legate de mobilitatea viitorului și prezența motorului cu ardere internă într-un peisaj futurist. Aceste lucrări au fost publicate și indexate ISI (9 lucrări), BDI și B+.

Aspecte legate de cercetările teoretice și experimentale asupra motoarelor cu ardere internă au fost făcute cunoscute prin 22 de lucrări (9 ca prim autor).

Studiul atât practic cât și teoretic asupra temei abordate pe durata doctoratului mi-a oferit posibilitatea de a propune mai multe concepte de îmbunătățire. Acestea au fost ulterior brevetate. Dintre cele devenite publice se pot aminti următoarele, în legătură cu tema abordată:

- diferite concepte de culbutori comutabili cu rolă;
- mecanism pentru realizarea defazării;
- pompă axială cu rotor flotant pentru fluide speciale.

Aceste brevete, amintite mai sus, au aplicație pe admisia variabilă de aer, prezentând diferite mecanisme de distribuție variabilă.

6.4 Direcții de dezvoltare în domeniul temei de cercetare

În urma cercetărilor experimentale s-au putut obține degajările de căldură aparentă pe ciclu, acestea fiind estimate prin calcul și vizualizate în mod direct în fereastra softului de achiziție de date. Însă, după înregistrarea lor, aceste seturi de date au necesitat filtrare pentru o prelucrare ulterioară.

Din cauza caracterului individual al curbelor degajării de căldură aparente, fiecare grafic în parte a necesitat filtrare. Considerând acest aspect, o direcție de dezvoltare ar putea fi realizarea unui algoritm de filtrare automată a setului de valori al degajărilor de căldură.

Preferabil, această automatizare să poată fi validată pentru intervalul prospectat. De dorit ar fi un algoritm mai general de filtrare, dar care să respecte constrângerile privind relația dintre căldura degajată aparentă pe ciclu și viteza de degajare.

La turații mai mari de 3000 rpm este necesară o eșantionare a unghiului de rotație mai fină, cel puțin de 0.1 °RAC. Acest lucru este util pentru o estimare corectă a fenomenelor rapide de ardere.

Pentru validarea modelului matematic al degajării de căldură, este necesară o instrumentare a camerei de ardere pentru măsurarea temperaturilor pereților camerei, inclusiv a capului pistonului, de altfel o problemă încă greu de rezolvat.

O altă direcție viitoare de cercetare poate consta în construirea unor modele de simulare complexe privind procesele de formare a amestecului și arderii în motoarele cu aprindere prin scânteie. Aceste simulări sunt de obicei foarte complexe, analizele durează mult și necesită resurse de calcul. Simulările de acest gen sunt foarte dorite și exclusiviste. Rezultatele pot dezvălui informații inedite asupra anumitor parametri ce pot fi ulterior optimizați.

O direcție de dezvoltare poate fi optimizarea unui motor cu aprindere prin scânteie cu injecție duală (injecție în poarta supapei și injecție directă), deoarece standul de cercetări oferă și această posibilitate, iar metoda de testare este similară cu cea descrisă în **Capitolul 1**.

O direcție de dezvoltare ar fi exploatarea posibilității de supraalimentare la diferite presiuni și temperaturi.

Diferite studii asupra fenomenelor de curgere pe traseul de admisie se pot realiza prin simularea unor modele 3D optimizate.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. [ATK 1887] Atkinson, J. (1887). Gas-Engine. US Patent 367496 (1887-08-02)
2. [BAU 2006] Baumgarten, C. (2006). Mixture Formation in Internal Combustion Engines. Springer-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-540-30835-5
3. [BOB 2000] Bobescu, Ghe. et al. (2000). Motoare pentru Automobile și Tractoare. Editura Tehnica-Info, Chişinău
4. [BUD 2015] Budack, R., Kuhn, M. et al. (2015). Optimization of the Combustion Process as Demonstrated on the New Audi 2.0l TFSI. 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology
5. [CHI 2018] Chiru, A., Țârulescu, S. (2018). Testarea și Omologarea Motoarelor cu Ardere Internă. Editura Matrix Rom, București, ISBN 978-606-25-0425-0
6. [COS 2011] Cosgarea, R. (2011). Cercetări Privind Utilizarea de Sisteme Avansate de Ardere prin Folosirea Amestecurilor Omogene / Parțial Omogene la Motoarele cu Aprindere prin Comprimare. Teză de doctorat, Școala Doctorală Interdisciplinară, Universitatea Transilvania din Braşov
7. [DIN 2011] Ding, Y. (2011). Characterising Combustion in Diesel Engine. Teză de doctorat, VSSD, Delft
8. [DOG 2015b] **Dogariu, D.M.**, Andrei, C., Vieru, B. T., Plămădeală, R. A., Chiru, A. (2015). A Method for 3D Geometry Scanning of a Combustion Chamber. Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA 2015, București
9. [DOG 2016a] **Dogariu, D. M.**, Chiru, A., Lazăr, M., Stancu, V. Ș. (2016). Aspects on Mixture Formation at an Experimental Spark Ignition Single Cylinder. 36th FISITA World Automotive Congress, Busan
10. [DOG 2016c] **Dogariu, D. M.**, Chiru, A., Țârulescu, S. (2016). Study on the Combustion Control for a Compression Ignition Engine Using Different Injection Strategies. COFRET 2016, București
11. [DOG 2016e] **Dogariu, D. M.**, Chiru, A., Țârulescu, S., Lazăr, M., Stancu, V. Ș. (2016). Study on Mixture Formation at an Experimental Spark Ignition Engine. CONAT 2016, Braşov
12. [DOG 2019] **Dogariu, D. M.**, Chiru, A., Leahu, C. I., Lazăr, M., Buta, A. C. (2019). Diesel Smoke and PM Measurements and Simulation. Proceedings of the SMAT 2019, Craiova, ISBN 978-606-14-1547-2, pp. 63–70
13. [HAI 2004] Haisch, C., Beck, H.A., Niessner, R., Jacob, E., Rothe, D.A. (2004). Photoacoustic Sensor System for Time Resolved Quantification of Diesel Soot Emissions. SAE paper No. 2004-01-0968
14. [HEY 1988] Heywood, J.B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill
15. [JUR 2008] Juretić F., Moser W., Rainer G. (2008). Recent Advances in AVL's CFD Mesh Generation Software – ESE-Tools. International Design Conference - DESIGN 2008, pp. 643-648

16. [KER 2014] Keromnes, A. (2014). Internal Combustion Engine Modeling. Institut Superior Pour l'Automobile et Transport
17. [KIR 2016] Kirkpatrick, A. (2016). Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. John Wiley and Sons, ISBN-978-1-118-53331-4
18. [MAR 1968] Mărdărescu, R. (1968). Motoare pentru Automobile și Tractoare. Editura Didactică și Pedagogică, București
19. [MER 2006] Merker, P. G., Schwarz, C., Stiesch, G., Otto, F. (2006). Simulating Combustion. Springer, ISBN 3-540-25161-8
20. [MIL 1957] Miller, R. (1957). Supercharged Engine. US Patent 2817322
21. [MIL 1985] Milea, A. (1985). Cartea Metrologului. Metrologie Generală. Editura Tehnică, București
22. [MOR 2010] Morariu, C. O. (2010). Probabilități și Statistică Aplicată. Ed. Universității Transilvania, Braşov
23. [P 2018a] **Dogariu, D. M.,** Tănasie, C., Cernea, A., Gherghișan, H. D. (2018). Switchable Traction Lever for a Valve Mechanism of an Internal Combustion Engine. Patent RO132822 (A2), 2018; DE102017119121 (A1)
24. [P 2018b] **Dogariu, D. M.,** Tănasie, C., Cernea, A., Gherghișan, H. D. (2018). Switchable Traction Lever for a Valve Mechanism of an Internal Combustion Engine. Patent RO132823 (A2), 2018; DE102017119122 (A1)
25. [P 2018c] **Dogariu, D. M.,** Tănasie, C., Cernea, A., Gherghișan, H. D. (2018). Switchable Traction Lever for a Valve Mechanism of an Internal Combustion Engine. Patent RO132824 (A2), 2018; DE102017119123 (A1)
26. [P 2018d] **Dogariu, D. M.,** Tănasie, C., Cernea, A., Gherghișan, H. D. (2018). Switchable Traction Lever for a Valve Mechanism of an Internal Combustion Engine. Patent RO132825 (A2), 2018; DE102017119124 (A1)
27. [PRZ 2013] Przybyla, G., Postrzednik, S., Zmudka, Z. (2013). The Heat Transfer Coefficient Calculation in the ICE Cylinder Based on In-Cylinder Pressure Data. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 4
28. [SCH 2011] Schwarz, C., Teichmann, R. (2011). Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. Vieweg+Teubner Verlag, ISBN-13: 978-3-834-81987-1
29. [WIN 2000] Winterbone, D. E., Pearson, R. J. (2000). Theory of Engine Manifold Design / Wave Action Methods for IC Engines. SAE - ISBN-7680-0656-2
30. [ZHA 2009a] Zhao, H. (2009). Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Gasoline and Gas Engines. Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-1-84569-389-3
31. [ZHA 2009b] Zhao, H. (2009). Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Diesel Engines. Woodhead Publishing Limited, ISBN 1845697456, 978-1-845-69745-7
32. [AVL 2018] ***AVL 483 Micro Soot Sensor manual (2018). www.avl.com

REZUMAT

Optimizarea Proceselor de Formare a Amestecului și Arderii din Motoarele cu Ardere Internă

Cuvinte cheie: testarea motorului, injecție multiplă, supraalimentare, caracteristică externă a motorului, emisii de fum și particule, simulare CFD, analiză pe ciclu, model analitic Vibe

În această lucrare sunt propuse anumite căi de optimizare a proceselor de ardere ale unui motor cu ardere internă.

Lucrarea este structurată pe șase capitole. În prima parte sunt prezentate influențele parametrilor principali ai motorului asupra performanțelor sale și se regăsesc soluții tehnice moderne și de interes major pentru îmbunătățirea parametrilor energetici și reducerea emisiilor. S-a realizat un model matematic al procesului de ardere, după metoda Vibe. Probele experimentale s-au desfășurat succesiv, începând pe un MAS AVL 5403 și apoi pe un MAC AVL 5402. Pentru optimizarea arderii la MAC, s-au reglat momentele de injecție (început, durată și cantitate) și presiunile acesteia, urmărindu-se obținerea unui moment maxim și emisii minime de fum și particule. Datele experimentale au fost prelucrate și filtrate metodic și sunt reprezentate în anexe. Prin simulare numerică s-a putut vizualiza formarea amestecului la diferite strategii ale injecției. Apoi, rezultatele experimentale s-au comparat cu cele obținute din simulare.

În final, s-au realizat optimizări ale arderii prin intervenție asupra parametrilor injecției din cartogramă pentru 116 puncte de măsură.

ABSTRACT

Optimization of Mixture Formation and Combustion Processes of Internal Combustion Engines

Keywords: engine testing, multiple injection, supercharging, engine external characteristic, soot and particles emissions, CFD, cycle analysis, Vibe analytical model

In this paper there are proposed ways to optimize combustion processes of an internal combustion engine.

This paper is organized on six chapters. In the first part, the influences of engine's main parameters on its performances are presented and there are summarized modern technical solutions of great interest for enhancing the output performance and for emission reduction. A mathematical model was realized describing the combustion process after a method by Vibe. Experimental research has been carried out consecutively, starting out with testing a spark ignition engine AVL 5403 and then a compression ignition engine AVL 5402. For the combustion optimization of the compression ignition engine, the injection timing was tuned (start and duration of injection and quantity) and the injection pressures, for obtaining a maximum torque and lowest smoke and particle emissions. Experimental data was carefully processed and filtered and are presented in appendices. Through virtual simulation the mixture formation could be visualized at different injection strategies. Then, experimental results have been compared to the results obtained through simulation.

Finally, combustion optimization has been realized by tuning the injection parameters from the engine map for 116 measurement points.