

UNIVERSITATEA din PITEȘTI

Școala doctorală „INGINERIA AUTOVEHICULELOR”

Doctorand ing. Mihai-Stelian NICULAE

*„Cercetări privind influența implementării ciclului Miller-Atkinson
asupra aerodinamicii interne a unui m.a.s. de automobil”*

Conducător științific: prof. univ. habil. dr. ing. Adrian CLENCI

Mentori: prof. univ. dr. ing. Florian IVAN
 conf. univ. dr. ing. Rodica NICULESCU
 CS III. dr. ing. Victor IORGA-SIMAN

Pitești

2022

Cuprinsul tezei

1.	Introducere și motivarea alegerii temei	6
1.1	Interesul pentru tema abordată.....	6
1.2	Obiectivele tezei	12
1.3	Organizarea tezei	13
1.4	Concluzii	14
2.	Cicluri termodinamice cu destindere prelungită	16
2.1	Ciclul Atkinson.....	16
2.2	Ciclul Miller	22
2.3	Stadiul actual al preocupărilor privitoare la aplicarea ciclului Miller-Atkinson	29
2.3.1	Aerodinamica internă.....	29
2.3.2	Supraalimentarea motorului Miller-Atkinson	52
2.3.3	Sinergii ale ciclului Miller-Atkinson	56
2.4	Concluzii	64
3.	Studiul aerodinamicii interne a motoarelor cu aprindere prin scântee	67
3.1	Modelarea și simularea numerică a curgerii fluidelor.....	67
3.1.1	Aerodinamica internă a motorului cu ardere internă.....	67
3.1.2	Caracteristicile principale ale curgerii fluidelor.....	68
3.1.3	Fenomenul de turbulență și scările turbulente	71
3.1.3.1	Scara integrală.....	71
3.1.3.2	Scara Kolmogorov	72
3.1.3.3	Micro-scara Taylor.....	73
3.1.4	Ecuatiile de curgere	74
3.1.5	Modele de turbulență	76
3.1.6	Bazele simulării CFD	84
3.1.6.1	Discretizarea domeniului de calcul	86
3.1.6.2	Stabilirea condițiilor inițiale și la limită.....	89
3.1.6.3	Prezentare generală a metodelor numerice.....	90
3.1.6.4	Alegerea modelului de turbulență	92
3.1.6.5	Simularea și analiza rezultatelor	92
3.1.6.6	Interpretarea rezultatelor	92
3.2	Metode și mijloace experimentale	93
3.2.1	Abordările Euler și Lagrange.....	93
3.2.2	Anemometria pe baza particulelor	94
3.3	Concluzii	106
4.	Influența implementării ciclului Miller-Atkinson asupra aerodinamicii interne.....	108
4.1	Metodologia de cercetare.....	108
4.2	Particularitățile investigațiilor experimentale	109
4.3	Particularitățile investigațiilor numerice.....	115
4.4	Rezultate.....	124
4.4.1	Miller-Atkinson: PIV vs. CFD.....	124
4.4.2	Otto vs. Miller-Atkinson via CFD	129
4.4.3	Ameliorarea aerodinamicii interne pentru cazul Miller-Atkinson	135
4.4.3.1	Efectul cursei pistonului asupra aerodinamicii interne.....	135
4.4.3.2	Efectul mascării supapei de admisie asupra aerodinamicii interne	141
4.4.3.3	Efectul mascării scaunului supapei de admisie asupra aerodinamicii interne	146
4.5	Concluzii	154
5.	Concluzii finale și perspective	156
	Contribuții personale.....	160
	Listă de publicații	161
	Listă de figuri.....	162
	Listă de tabele	165
	Bibliografie.....	166
	Curriculum vitae	176

Rezumat

Cuprins

Cuvânt înainte

- 1. Interesul pentru tema abordată*
 - 2. Obiectivele tezei*
 - 3. Organizarea tezei*
 - 4. Rezultate*
 - 5. Concluzii*
 - 6. Contribuții personale*
- Bibliografia tezei*

Cuvânt înainte

Prin aceste rânduri doresc să mulțumesc, în primul rând, conducătorului meu științific, domnul profesor Adrian Clenci, pentru îndrumarea științifică, susținerea și încrederea acordate încă de la debutul acestui subiect, în anul 2016, în cadrul tezei de master. Totodată, aș vrea să îmi exprim aprecierea pentru modul inedit de susținere a cursurilor în cadrul studiilor de licență și master, ce a constituit pentru mine un model de urmat. De asemenea, îi sunt recunoscător domnului profesor Adrian Clenci și pentru numeroasele colaborări științifice realizate în numele Universității din Pitești, atât în plan național, cât și internațional, fără de care, de exemplu, această teză de doctorat nu ar fi fost posibilă.

Sincere mulțumiri și domnului profesor Florian Ivan, pentru susținerea, motivarea și îndrumarea sub formă continuă ce mi-au fost oferite încă din anii studenției, fără de care, probabil, nu aș fi atât de pasionat de acest domeniu pe cât sunt acum.

În egală măsură, doresc să mulțumesc și domnului cercetător științific Victor Iorga-Simăn și doamnei conferențiar Rodica Niculescu pentru sprijinul și sfaturile acordate de-a lungul stagiului doctoral.

Universității din Pitești, școlii mele, îi sunt recunoscător pentru experiențele academice de înalt nivel pe care le-am trăit de-a lungul celor unsprezece de ani de studiu petrecuți aici.

Mulțumirile mele se îndreaptă și către dr. Stéphane Guilain – Renault France, dr. Wolfgang Schwarz – AVL France, profesor Philippe Guibert, respectiv, dr. Marcellin Perceau din cadrul Universității din Sorbona (Institut Jean le Rond d'Alembert), Franța pentru strânsa colaborare pe subiectul corelării dintre rezultatele simulărilor numerice realizate la Universitatea din Pitești și rezultatele experimentale PIV, obținute la standul motor al Renault France și al Institutului Jean le Rond d'Alembert. De asemenea, mulțumesc și profesorului Plamen Punov din cadrul Universității Tehnice din Sofia, Bulgaria pentru frumoasa cooperare referitoare la modelarea 1D a fenomenelor specifice de curgere.

În încheiere, dar nu în ultimul rând, doresc să le mulțumesc părinților Nicoleta și Stelian și partenerei mele Oana, pentru susținerea morală permanentă, înțelegerea și încrederea acordate în tot acest timp.

Mihai Niculae

Pitești, noiembrie 2022

1. Interesul pentru tema abordată

Chiar dacă reprezintă, încă, cea mai răspândită sursă energetică de propulsie, motorul termic se confruntă cu probleme de mediu. Iată de ce acum, mai mult ca niciodată, este evidentă nevoia de a găsi un echilibru între intensificarea naturală a mobilității rutiere și protecția mediului.

Progresele semnificative ale motorului cu ardere internă din ultima perioadă nu au reușit să elimine preocupările, desigur, justificate, cu privire la efectele pe termen lung asupra mediului. Din acest punct de vedere, este important să punctăm cele două aspecte luate în calcul la analiza impactului asupra mediului: emisiile poluante și emisiile de gaze cu efect de seră.

Odată cu Euro7, va avea loc o severizare semnificativă (e.g., reduceri față de norma în vigoare, Euro6, de 75%, 50%, 50%, respectiv de 83.3% a valorilor limită de CO, THC, PM, respectiv, NO_x), ce va impune constructorilor o atenție deosebită asupra depoluării la sursă și prin post-tratament catalitic, altfel spus, un interes deosebit pentru tehnologiile ce vor face posibilă atingerea acestor ținte.

Obiectivele stabilite cu privire la gazele cu efect de seră au în vedere reducerea față de nivelul din 1990 cu 55% până în 2030, iar din 2050, Uniunea Europeană dorește să devină primul continent neutru din punctul de vedere al gazelor cu efect de seră. Valoarea de referință pentru totalul emisiilor de gaze cu efect de seră, cunoscută și sub denumirea de „an de bază” este anul 1990, agreat prin protocolul de la Kyoto adoptat pe 11 decembrie 1997.

Pentru a face față acestor noi provocări, constructorii de automobile trebuie să identifice și să adopte noi tehnologii la nivelul grupului motopropulsor capabile să răspundă cerințelor de diminuare a emisiilor poluante și a gazelor cu efect de seră, miza fundamentală fiind crearea contextului pentru asigurarea unei adevărate mobilități rutiere sustenabile. Desigur, electrificarea totală (BEV¹) sau parțială (HEV²) este o soluție, însă, în această perioadă de tranziție energetică, ameliorarea performanțelor energetice și ecologice ale motorului cu ardere internă trebuie să rămână un deziderat important.

Conform celor precizate în multe lucrări, motorul cu ardere internă are încă potențial de ameliorare, existând, încă, o serie de posibilități fezabile de ameliorare energetică și ecologică, rămase neexploatate. Mai mult, pe baza proiecțiilor realizate de IEA³ până în anul 2050, transportul va fi realizat în continuare preponderent prin intermediul motoarelor cu ardere internă. IEA preconizează că 58% din autoturisme vor fi propulsate de motoare termice, din care 85% vor utiliza un sistem de propulsie hibrid. Totodată, accentul este pus pe dezvoltarea de motoare ce corespund strategiei „Near Zero Impact”⁴.

În acest context, o soluție fezabilă ce poate fi aplicată pentru a răspunde nevoii de a reduce impactul mobilității rutiere asupra mediului este diferențierea raportului de comprimare, ε_c , de cel de destindere, ε_d prin intermediul implementării ciclului Miller-Atkinson⁵. Această soluție tehnică poate fi implementată în producția de serie relativ simplu, fără modificări semnificative la nivelul pieselor motorului.

Concluzia susținută de acest raționament simplu este că în condițiile utilizării aceluiași tip de combustibil cu carbon în moleculă (e.g., benzina), pentru reducerea emisiilor de dioxid de carbon este necesară scăderea consumului de carburant, ceea ce presupune creșterea randamentului efectiv al motorului termic, i.e., ameliorarea performanțelor energetice.

¹ BEV (en) – Battery Electric Vehicle

² HEV (en) – Hybrid Electric Vehicle

³ IEA (engl.) – International Energy Agency

⁴ “Un nivel atât de scăzut de emisii poluante încât nu mai are un efect negativ asupra calității aerului”, [13]

⁵ James Atkinson (1886) și Ralph Miller (1954) – inventatorii ce au pus bazele preocupărilor pentru destindere prelungită în interiorul cilindrului

Din acest punct de vedere, după cum s-a precizat anterior, utilizarea ciclului Miller-Atkinson este o variantă potrivită, adoptată în ultima perioadă de un număr semnificativ de constructori. Mulțumită destinderii prelunge, ciclul Miller-Atkinson asigură funcționarea cu un randament superior ciclului Otto, ceea ce, în această perioadă de tranziție energetică, permite constructorilor să facă față reglementării europene referitoare la emisia de CO₂ (dioxid de carbon). În plus, prin intermediul ciclului Miller-Atkinson este posibilă realizarea de sinergii complexe la nivelul grupului motopropulsor, astfel încât obiectivele legislative actuale și viitoare referitoare la emisiile poluante și de CO₂ să fie atinse. Dintre aceste sinergii putem evidenția: funcționarea în regim „dual fuel”⁶ (benzină – GNC⁷ sau benzină – GPL⁸), hibridizare, injecție de apă, injecție divizată, dezactivarea cilindrilor, VNT⁹ etc.

Totuși, ciclul Miller-Atkinson, ca urmare a particularităților prin care un motor standard ce funcționează conform ciclului Otto este convertit la funcționarea Miller-Atkinson, generează o diminuare semnificativă a intensității aerodinamicii interne a motorului rezultat (mișcări organizate și turbulență), cu efecte negative asupra gradului de omogenizare a amestecului și, implicit, asupra procesului de ardere, prin urmare, asupra performanțelor energetice și ecologice.

În concluzie, luând în considerare aspectele expuse mai sus, teza de doctorat se concentrează pe realizarea unor cercetări privind influența implementării ciclului Miller-Atkinson asupra aerodinamicii interne a unui m.a.s.¹⁰ de automobil.

2. Obiectivele tezei

Orientarea tehnologică a constructorilor de automobile este influențată decisiv de către elementele normative. Așadar, ținând cont de ceea ce se preconizează că va fi implementat odată cu standardul EURO7, se pare că din ce în ce mai mulți constructori vor recurge la implementarea *ciclului cu destindere prelungită, cunoscut sub denumirea Miller-Atkinson*.

Acesta fiind contextul, prin această teză de doctorat se asumă următoarele obiective:

- prezentarea ciclurilor cu destindere prelungită în interiorul cilindrului: Atkinson, respectiv, Miller;
- fundamentarea termodinamică a ciclului cu destindere prelungită în interiorul cilindrului;
- studiul stadiului actual referitor la aplicarea ciclului Miller-Atkinson;
- studiul metodelor de investigare a aerodinamicii interne a motorului cu ardere internă;
- cercetarea influenței implementării ciclului Miller-Atkinson asupra aerodinamicii interne prin investigații experimentale și numerice;
- identificarea unor metode de ameliorare a aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson și studiiul efectelor generate prin aplicarea lor.

3. Organizarea tezei

Pentru atingerea obiectivelor precizate anterior, teza de doctorat este organizată după cum se prezintă în schema din figura 1.

Așadar, după această primă parte de introducere și justificare a temei de cercetare, cea de-a doua parte este consacrată problematicii specifice ciclului Miller-Atkinson: se fundamentează termodinamic ciclul cu destindere prelungită în interiorul cilindrului pentru a pune în evidență avantajele și dezavantajele asociate; în plus, ținând cont de efectul negativ al implementării ciclului Miller-Atkinson referitor la diminuarea intensității aerodinamicii interne a motorului, s-a realizat un studiu al metodelor de investigare a aerodinamicii interne a motorului cu ardere internă. Cea de-a treia parte este dedicată cercetării influenței implementării ciclului Miller-Atkinson asupra aerodinamicii interne a unui m.a.s. prin investigații experimentale și numerice; tot în această parte sunt identificate și

⁶ cu doi combustibili

⁷ GNC (ro.) – Gaz Natural Comprimat

⁸ GPL (ro.) – Gazul Petrolier Lichefiat

⁹ VNT (engl.) – Variable Nozzle Turbine

¹⁰ m.a.s (ro.) – motor cu aprindere prin scânteie

unele metode de ameliorare a aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson. Teza se finalizează cu concluzii din care derivă și perspectivele asociate acestei cercetări.

Schema din figura 1 reprezintă o interpretare grafică a celor menționate mai sus și nu numai că prezintă capitolele asociate celor patru mari părți ale tezei dar stabilește și conexiunile între aceste capitole.

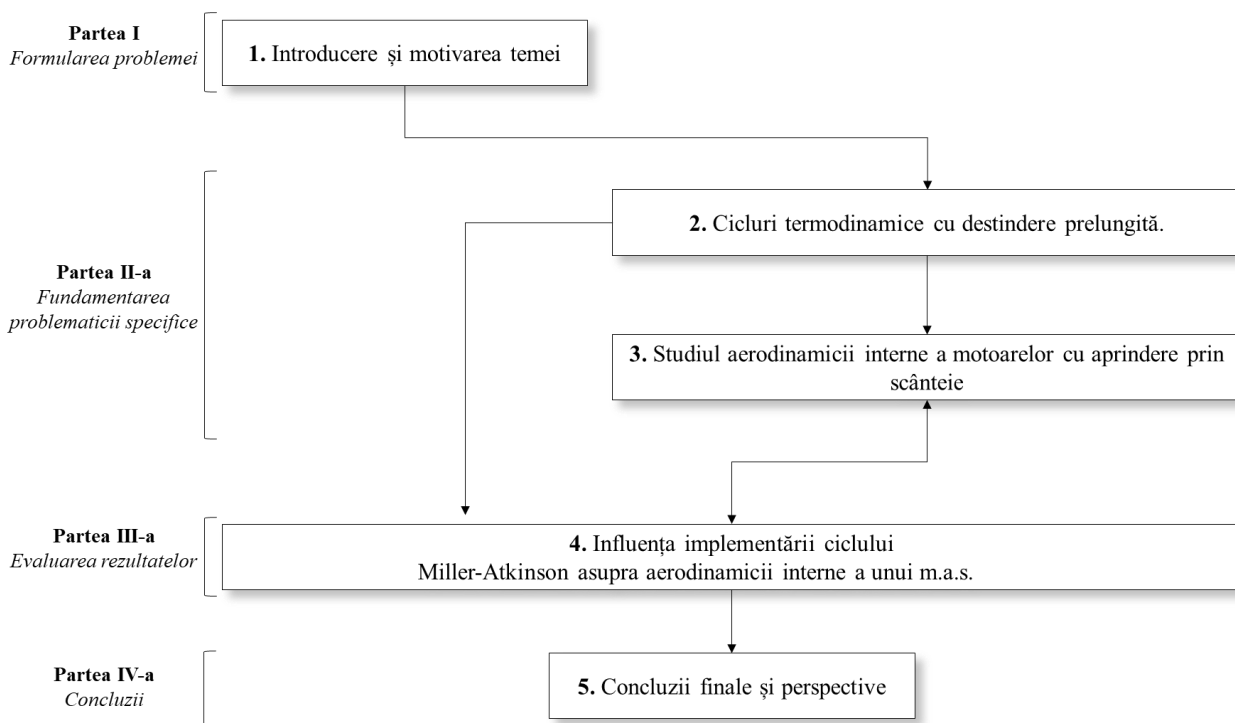


Figura 1. Structura tezei

4. Rezultate

În acest studiu, într-o primă abordare metodologică, este evaluat efectul implementării ciclului Miller-Atkinson asupra aerodinamicii interne a unui motor cu aprindere prin scânteie prin intermediul tehnicii PIV¹¹ și al simulărilor numerice CFD¹². Datele experimentale PIV folosite în această teză pentru corelarea cu datele rezultate în urma simulării CFD sunt o consecință a acordului de cooperare științifică dintre Universitatea din Pitești, AVL Franța, Renault Franța și Université de Sorbonne (Institut Jean le Rond d'Alembert).

Așadar, rezultatele PIV au fost realizate în Franța și, ca urmare a acestui acord de cooperare, au fost puse la dispoziția echipei Universității din Pitești care a asumat realizarea simulărilor numerice.

În ceea ce privește rezultatele obținute prin intermediul tehnicii PIV, motorul transparent Miller EIVC¹³ supus testelor nu permite măsurători în zona superioară a camerei de ardere. Cu alte cuvinte, observarea și extragerea informațiilor cu privire la aerodinamica internă localizată în partea superioară a cilindrului, în apropierea punctului mort superior, nu este posibilă cu configurația existentă a standului motor transparent. Din acest motiv, investigarea acestei zone de interes a fost realizată prin intermediul simulării CFD de tip RANS¹⁴, i.e., rezultatele simulării numerice 3D au fost folosite pentru a extrapola datele prelevate prin tehnica PIV și a realiza, astfel, o imagine completă a fenomenelor aerodinamice ce au loc în cilindru, în cazul ciclului Miller-Atkinson.

¹¹ PIV (engl.) – anemometria pe baza particulelor

¹² CFD (engl.) – Computational Fluid Dynamics

¹³ EIVC (engl.) – Early Intake Valve Closing

¹⁴ RANS (engl.) – Reynolds-Averaged Navier–Stokes

Figura 2 ilustrează într-o manieră grafică această primă abordare: câmpurile de viteză, înregistrate prin intermediul tehnicii PIV în trei poziții unghiulare, 560, 630, 680°RAC (i.e., în punctul mort inferior – PMI, la finalul admisiei, respectiv, la 70 și 120°RAC după PMI, de-a lungul cursei de comprimare) sunt folosite pentru corelarea cu cele obținute în aceleași poziții unghiulare prin intermediul simulării numerice CFD. Simularea numerică are la bază o abordare iterativă de tip PDCA¹⁵, miza fiind corelarea cu datele experimentale PIV. Apoi, după ce această corelare este considerată satisfăcătoare, se va realiza extrapolarea rezultatelor PIV pentru a obține informațiile căutate în zona ce nu a putut fi investigată experimental cu tehnica PIV, i.e., pentru poziții unghiulare ale arborelui cotit superioare valorii de 680°RAC.

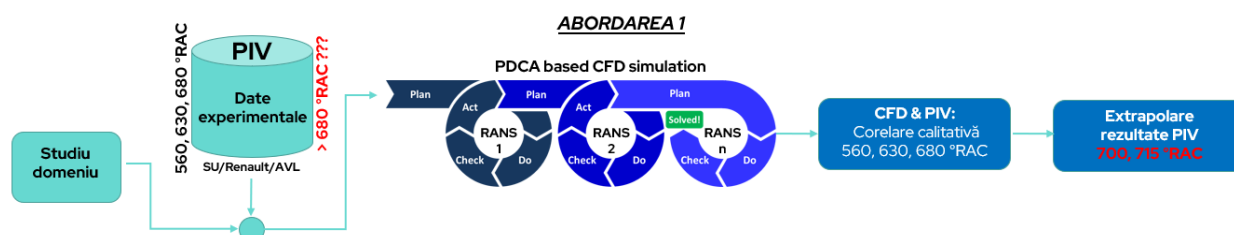


Figura 2. Metodologia de cercetare – abordarea 1

În cea de-a doua abordare (figura 3), mai întâi, sunt puse în evidență diferențele din punctul de vedere al aerodinamicii interne dintre ciclul Miller-Atkinson și ciclul Otto, cel din urmă reprezentând referința.

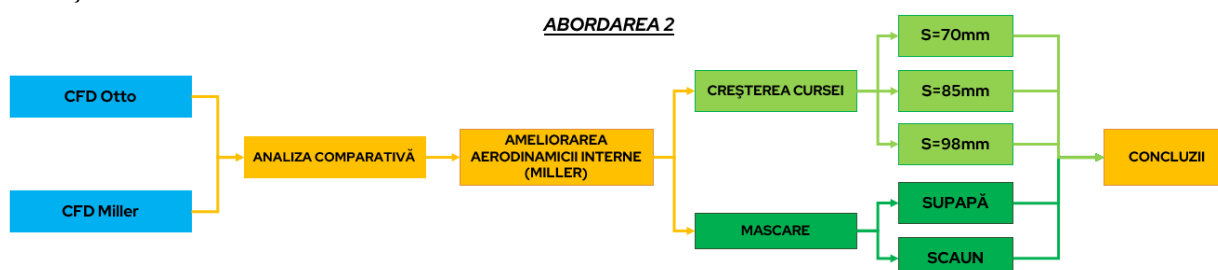


Figura 3. Metodologia de cercetare – abordarea 2

Apoi sunt analizate diferite metode de ameliorare a aerodinamicii interne în cazul ciclului Miller: modificarea cursei pistonului (trei valori ale cursei sunt analizate), mascarea la nivelul scaunului supapei de admisie și mascarea la nivelul supapei de admisie.

Studiul derulat conform metodologiei prezentate grafic în figura 2 a evidențiat tendințe comparabile, în ciuda diferențelor inerente dintre câmpurile de viteze PIV și CFD. Aerodinamica internă a motorului s-a cuantificat prin intermediul următorilor parametri: energie cinetică medie (MKE, K), energie cinetică turbulentă (TKE, k) și raport de *tumble*, acesta din urmă fiind o măsură de cuantificare a intensității mișcării organizate ce se stabilește în cilindrul motorului. Constatările acestei prime abordări susțin concluzia că atunci când se utilizează ciclul Miller bazat pe EIVC, trebuie acordată o atenție deosebită intensificării aerodinamicii interne a motorului pentru a beneficia de o combustie eficientă.

În cea de-a doua abordare după ce sunt puse în evidență diferențele din punctul de vedere al aerodinamicii interne dintre ciclul Miller-Atkinson și ciclul Otto, sunt analizate diferite metode de ameliorare a aerodinamicii interne în cazul ciclului Miller: modificarea cursei pistonului (trei valori ale cursei sunt analizate), mascarea la nivelul scaunului supapei de admisie și mascarea la nivelul supapei de admisie.

Astfel, mai întâi, s-a concluzionat faptul că ciclul Otto reușește să conserve mult mai eficient aerodinamica generată în faza de admisie. În cazul ciclului Miller, chiar dacă în primă fază, în punctul

¹⁵ PDCA (en) = Plan-Do-Check-Act

de viteză maximă al pistonului, viteza de curgere este mai mare, aerodinamica internă nu este conservată, ci este diminuată după închiderea supapelor de admisie, astfel încât, la sfârșitul cursei de comprimare, avem o mișcare mai liniștită a masei de aer în comparație cu Otto. Deci, se subliniază, încă o dată, faptul că durata redusă de deschidere a supapelor de admisie, necesară pentru a asigura implementarea principiului Miller-Atkinson este cauza diminuării intensității aerodinamicii interne a acestui tip de motor.

Apoi, pentru a maximiza efectul pozitiv al utilizării ciclului Miller-Atkinson, este necesară căutarea de soluții pentru intensificarea aerodinamicii interne a acestui tip de motor:

- 1.1. investigarea efectului creșterii cursei pistonului în cazul Miller, pentru a recupera căderea TKE din timpul cursei de comprimare are un efect pozitiv doar asupra primei faze a admisiei, acest efect nementinându-se în continuare;
- 1.2. mascarea supapei de admisie evidențiază o creștere a TKE atât în timpul fazei de admisie dar, mai ales, la finalul comprimării, determinând valori superioare față de referința Otto;
- 1.3. mascarea supapei de admisie poate fi considerată o provocare din punctul de vedere al construcției și funcționării motorului, supapele, fiind piese mobile, sunt supuse unor solicitări deosebite, ceea ce a generat ideea mascării mai degrabă a scaunului de supapă;
- 1.4. totuși, după cum s-a văzut, mascarea scaunului supapei nu a arătat același potențial de ameliorare a aerodinamicii interne a motorului ca varianta mascării supapei.

Desigur, subiectul ameliorării performanțelor energetice și ecologice ale motorului cu aprindere prin scânteie este complex, iar cele prezentate în acest capitol pot fi completate și cu alte investigații CFD, subliniate, mai jos, la secțiunea *deschiderile oferite de cercetările prezentate în cadrul acestei lucrări*.

5. Concluzii

În urma cercetărilor realizate, au fost reținute următoarele idei:

1. Piața europeană de autovehicule trebuie să se conformeze cu legislațiile ce devin, cu fiecare actualizare, mai severe, din punctul de vedere al emisiilor poluante și al gazelor cu efect de seră. În cazul în care aceste cerințe cu privire la gazele cu efect de seră nu sunt îndeplinite, constructorii din industria auto sunt obligați să plătească „sume compensatorii” pentru fiecare automobil comercializat. Este, așadar, imperativă ameliorarea performanțelor energetice și ecologice ale motorului cu ardere internă. Așa cum a fost deja sugerat prin studiul bibliografic efectuat, motorul cu ardere internă, în special, motorul cu aprindere prin scânteie, are încă un potențial semnificativ de ameliorare energetică și ecologică, o serie de îmbunătățiri fezabile ce pot asigura respectarea normelor europene viitoare, sunt încă neexploatare în producția de serie. Transformarea cea mai des întâlnită în ultima perioadă, în pregătirea pentru a face față noilor provocări legislative, este utilizarea ciclurilor termodinamice cu destindere prelungită, cunoscute sub denumirea Miller-Atkinson, în detrimentul ciclului clasic (Otto). Provocarea principală este de a diminua emisiile de CO₂, iar prin particularitățile sale de funcționare și prin capacitatea sa de a crea sinergii ce permit o ameliorare suplimentară a randamentului termic al motorului cu aprindere prin scânteie, ciclul Miller-Atkinson este capabil să răspundă acestei provocări.
2. În urma cercetărilor bibliografice efectuate, referitoare la ciclul Miller-Atkinson, au fost reținute o serie de idei, precum: aerodinamica internă a acestui motor nu este suficientă pentru a maximiza impactul favorabil al implementării destinderii prelungeite și, prin urmare, are nevoie de ameliorare; ciclul poate fi implementat fie prin adoptarea strategiei de închidere timpurie/precoce a supapelor de admisie (EIVC), fie prin adoptarea strategiei de închidere tardivă a supapelor de admisie (LIVC) ori prin adoptarea unor combinații între EIVC și LIVC; datorită particularităților de funcționare, fenomenul de ardere anormală cu detonație este diminuat; dezavantajul principal al acestui ciclu este dat de capacitatea sa mai redusă de a produce performanțe de vârf sau performanțe dinamice, dezavantaj ce poate fi combătut prin aplicarea supraalimentării; din această perspectivă, un avantaj esențial este

posibilitatea utilizării unei turbine cu geometrie variabilă convențională, ca urmare a temperaturii gazelor arse evacuate mai reduse, generate de destinderea prelungită în interiorul cilindrului; totodată, prin diminuarea voluntară a raportului de comprimare, emisia de NO_x generată la sursă este semnificativ diminuată cu efecte suplimentare benefice referitoare la impregnarea convertorului catalitic cu Rh.

3. În ceea ce privește aerodinamica internă a motorului cu ardere internă, acesta este un domeniu a cărui investigare este destul de delicată/complexă. Înțelegerea și rezolvarea fenomenului de curgere turbulentă este o provocare continuă în toate domeniile de știință, deși tehnica de calcul și simulare evoluează în mod continuu. Pentru o abordare cât mai adaptată, studiul bibliografic efectuat în această zonă a dinamicii fluidelor a contribuit la înțelegerea particularităților aferente: caracteristici curgere, descrierea fenomenelor de curgere turbulentă, modele de turbulență, ecuațiile ce stau la baza modelării curgerii fluidelor, investigarea curgerii prin mijloace experimentale de tipul tehnicii PIV și prin intermediul simulării CFD. Așadar, s-a remarcat că problemele de turbulență, în funcție de tipul lor, se rezumă la rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes, fie prin intermediul metodelor numerice, prin rezolvare analitică, fie prin folosirea ecuațiilor cu derivate parțiale. Simularea CFD rezolvă problemele de curgere prin intermediul metodelor numerice, ceea ce permite obținerea unor rezultate apropiate de încercările experimentale, dar în același timp, trebuie avut în vedere faptul că unele discrepanțe se pot datora tipului de discretizare sau modelului de turbulență ales. Din acest motiv, este foarte importantă simularea curgerii, folosind mai multe modele de turbulență și tipuri de discretizare pentru a putea, finalmente, alege varianta cea mai potrivită pentru problema studiată.

4. Rezultatele experimentale obținute prin tehnica PIV au fost posibile mulțumită colaborării științifice dintre Universitatea din Pitești, AVL France, Renault France și Université de Sorbonne (Institut Jean le Rond d'Alembert).

5. Motorul transparent Miller-Atkinson folosit pentru investigarea aerodinamicii interne prin intermediul tehnicii PIV nu a permis măsurători în zona superioară a camerei de ardere. Cu alte cuvinte, observarea și extragerea informațiilor cu privire la aerodinamica internă localizată în partea superioară a cilindrului, în apropierea punctului mort superior, nu a fost posibilă. Din acest motiv, s-a mizat pe rezultatele simulării numerice 3D pentru a realiza extrapolarea datelor prelevate prin tehnica PIV în momente anterioare. Așadar, simularea CFD și investigarea experimentală cu tehnică PIV s-au dovedit a fi complementare, permițând, finalmente, obținerea unei imagini complete a fenomenelor aerodinamice ce au loc în cilindrul motorului transparent Miller-Atkinson.

6. Analiza comparativă a intensității aerodinamicii interne, Otto vs. Miller-Atkinson, s-a realizat prin intermediul simulărilor CFD, rezultatele obținute fiind în concordanță cu rezultatele obținute de alți cercetători, i.e., prin aplicarea ciclului Miller-Atkinson, intensitatea aerodinamicii interne se diminuează substanțial în comparație cu ciclul Otto, cauza identificată fiind reducerea duratei de deschidere a supapelor de admisie. Din rezultatele obținute reiese faptul că deși energia cinetică turbulentă în cilindru este mai mare în faza de admisie, ulterior, aceasta se distruge rapid și, prin urmare, nu este conservată sau amplificată în apropierea sfârșitului procesului de comprimare; astfel, are loc o influență negativă asupra procesului de ardere specific motorului Miller-Atkinson bazat pe strategia EIVC, ceea ce, în mod evident, va avea un impact negativ asupra performanței energetice și ecologice a acestui tip de motor. Așadar, pentru a nu estompa avantajele intrinseci ale ciclului Miller-Atkinson, este imperativă căutarea de soluții pentru intensificarea aerodinamicii interne a acestui tip de motor. Ca urmare, în această lucrare de doctorat a fost analizat, într-o manieră separată sau succesivă, efectul a trei potențiale soluții de ameliorare a aerodinamicii interne: creșterea cursei pistonului, mascarea supapei de admisie și mascarea scaunului supapei de admisie.

7. Prima soluție explorată – creșterea cursei – se bazează pe ideea că mărirea cursei pistonului conduce la creșterea vitezei pistonului, aceasta influențând, în același sens, viteza de curgere a aerului în cilindru – aceasta fiind principala sursă de turbulență specifică procesului de admisie. Într-adevăr, rezultatele obținute arată o creștere a energiei cinetice turbulente în cilindru de-a lungul procesului de

admisie, odată cu creșterea cursei, dar aceasta pare să se degradeze rapid după închiderea supapelor de admisie. Totuși, creșterea cursei pistonului este specifică ciclului Miller-Atkinson, după cum a reieșit din studiul bibliografic realizat, probabil, mizându-se pe ideea formării unui amestec cât mai omogen de-a lungul admisiei, tocmai ca urmare a creșterii energiei cinetice turbulente.

8. A doua încercare de ameliorare exploatează o tehnică de restricționare parțială a curgerii aerului la nivelul orificiului de admisie ce se intitulează „mascare” a supapelor de admisie. Rezultatele obținute evidențiază o creștere a vârfului de energie cinetică turbulentă cu peste 200%, față de ciclul Otto și cu 32% față de ciclul Miller în varianta standard. Totodată, a fost observat următorul aspect: prin aplicarea procesului de mascare, în această situație, o cantitate mai mare de energie cinetică turbulentă este conservată la finalul cursei de comprimare și, prin urmare, sunt atinse valori mai ridicate chiar și față de ciclul Otto. Așadar, procesul de mascare al supapei pare să aibă un potențial ridicat în îmbunătățirea aerodinamicii interne, dar implementarea unui astfel de procedeu implică provocări tehnologice, ce țin de fabricarea acestui perete pe circumferința talerului supapei de admisie și de ordin cinematic și dinamic, având în vedere faptul că supapa de admisie este o piesă aflată în mișcare. În consecință, cea de-a treia soluție de ameliorare a aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson a fost aplicarea procedurii de mascare la nivelul scaunului de supapă.

9. Deși, cele două tipuri de mascări sunt caracterizate de o înălțime identică a peretelui prin intermediul căruia s-a realizat această mascare (2.87 mm), ca urmare a poziționării diferite, dictată de geometria ansamblului „scaun-supapă”, rezultatele obținute nu sunt identice. De fapt, după cum s-a văzut, cele două soluții, având un amplasament diferit acționează pe durate diferite de timp. A fost observat faptul că, de exemplu, la 440°RAC peretele amplasat la nivelul supapei restricționează aproape complet curgerea prin acea secțiune, în timp ce în cazul peretelui la nivelul scaunului de supapă curgerea este în continuare posibilă pentru încă o perioadă de timp. Rezultatele obținute evidențiază, de-a lungul procesului de admisie, un vârf de TKE similar cu Miller în varianta standard, însă în ceea ce privește sfârșitul procesului de comprimare, energia cinetică turbulentă este inferioară ciclului Otto dar, totuși, superioară ciclului Miller în varianta standard. Analiza detaliată a procesului de curgere la nivelul supapei de admisie subliniază faptul că aerodinamica internă este mai intensă în cazul procesului de mascare la nivelul supapei deoarece peretele de mascare restricționează curgerea mult mai devreme și pentru o perioadă mai lungă de timp față de mascarea scaunului de supapă. Prin urmare, viteza de curgere la nivelul supapei este mult mai intensă în acest caz, ceea ce conduce la accelerarea mișcării aerului în cilindru. De asemenea, pe faza de închidere, restricționarea curgerii, produce o intensificare a curgerii în zona supapei, ceea ce conduce la impulsionearea suplimentară a mișcării de rotație formată deja în cilindru (i.e., *tumble*). Așadar, concluzia obținută este că prin procesul de mascare al scaunelor de supape, deși se obține o ameliorare a aerodinamicii interne față de versiunea Miller standard, totuși, rezultatele sunt inferioare soluției de mascare a supapelor de admisie. Referitor la înălțimea peretelui de mascare a scaunelor supapelor de admisie (2.87 mm), o valoare mai mare nu este posibilă ca urmare a nevoii de evitare a impactului cu pistonul la finalul cursei de comprimare.

10. Concluzia finală se rezumă, simplu, astfel: ameliorarea aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson este necesară pentru a maximiza impactul pozitiv al implementării destinderii prelungite asupra performanțelor energetice și ecologice ale motorului. Astfel, lucrarea de doctorat se încheie simetric, ultima sa concluzie fiind, de fapt, un răspuns la întrebarea lansată prin titlul său.

Desigur, subiectul abordat în cadrul acestei teze este nu numai complex, dar și foarte ofertant. Ca urmare, în ceea ce privește ***deschiderile oferite de cercetările prezentate în cadrul acestei lucrări***, ele, sunt sintetizate în cele ce urmează:

- proiectarea unui circuit de admisie dedicat intensificării mișcării de *tumble* și analiza efectelor sale asupra aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson; în lucrarea de față, studiile realizate s-au făcut pe baza geometriei furnizate de Renault France, influența unui astfel de circuit de admisie nefăcând obiectul acordului de cooperare științifică ce a făcut posibilă derularea acestei teze; totuși,

pare firească nevoia de reproiectare a circuitului de admisie pentru a determina compensarea dezavantajului inerent al strategiei EIVC, prin intermediul căreia se implementează cel mai frecvent principiul Miller-Atkinson ;

- o abordare identică cu cea derulată în cadrul acestei lucrări pentru a studia efectul strategiei LIVC asupra aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson pare un pas firesc pentru o cercetare viitoare; un asemenea studiu, coroborat cu cel prezentat în cadrul acestei teze ar putea genera alegeri diferite, EIVC/LIVC, pe puncte diferite de funcționare ale motorului; totodată, în cazul strategiei LIVC, o atenție deosebită ar trebui acordată cuantificării masei de aer refulată în canalizația de admisie la începutul procesului de comprimare;
- realizarea unui studiu CFD folosind tehnica LES este de mare interes pentru că astfel, simularea se apropie de experimentul PIV; totuși, o astfel de simulare CFD necesită resurse hardware copleșitoare, ce nu se regăsesc cu ușurință nici chiar la nivel european;
- realizarea unor studii CFD pe cicluri Miller-Atkinson cu ardere pentru a pune în evidență, de pildă, efectul implementării destinderii prelungite asupra speciilor chimice generate la sursă și, prin urmare, pentru a stabili decizii cu privire la impregnarea adecvată cu substanțe catalitice a monolitului ceramic;
- în ce măsură implementarea strategiilor EIVC/LIVC permite funcționarea complet neobturată a motorului în zona sarcinilor parțiale este, de asemenea, un subiect ce merită abordat; necesită, oare, cuplarea cu variația înălțimii de ridicare a supapelor?
- s-a menționat în cadrul lucrării de față nevoia supraalimentării motorului Miller-Atkinson; ca urmare, o direcție viitoare de cercetare de mare potențial ar fi studiul cuplării motorului Miller-Atkinson cu un sistem de supraalimentare dotat cu o turbină cu geometrie variabilă (aceasta ținând cont de potențialul energetic mai scăzut al gazelor arse evacuate ale motorului Miller-Atkinson); dincolo de performanțele energetice și ecologice în puncte stabilizate de funcționare, un alt aspect foarte important este legat de agrementul de conducere; așadar, în ce măsură, acesta este afectat prin adoptarea ciclului Miller-Atkinson și, mai ales, în ce măsură este restabilit prin intermediul utilizării unei turbine cu geometrie variabilă;
- totodată, studiul utilizării unui astfel de motor în cadrul unui sistem hibrid de propulsie pare foarte ofertant; în această configurație, motorul Miller-Atkinson ar putea fi utilizat în varianta cu aspirație naturală.

6. Contribuții personale

Lucrarea realizată a încercat să surprindă aspecte relevante referitoare la ameliorarea performanțelor energetice și ecologice ale motorului cu aprindere prin scânteie prin intermediul implementării destinderii prelungite. Astfel, s-a pus în evidență un dezavantaj inerent ciclului Miller-Atkinson: deteriorarea aerodinamicii interne a motorului ca urmare a strategiilor utilizate pentru implementarea sa, i.e., EIVC și/sau LIVC. În consecință, scopul cercetărilor prezentate în această lucrare a fost evidențierea influenței implementării ciclului Miller-Atkinson asupra aerodinamicii interne a motorului.

Studiile efectuate s-au făcut în cadrul acordului de cooperare științifică semnat între Universitatea din Pitești, AVL Franța, Renault Franța și Université de Sorbonne (Institut Jean le Rond d'Alembert). De fapt, beneficiarul final al acestor studii este Renault Franța care a pus la dispoziție standul motor transparent, tehnica de investigare experimentală PIV și detaliile specifice geometriei motorului supus cercetărilor.

În acest context, în continuare sunt sintetizate contribuțiile personale cu privire la problematica specifică a subiectului ales:

1. realizarea unui studiu termodinamic comparativ, Otto vs. Atkinson, respectiv, Otto vs. Miller, din care au rezultat mizele, avantajele și dezavantajele implementării acestui tip de ciclu cu destindere prelungită

2. realizarea unui studiu bibliografic amănunțit referitor la mizele și provocările implementării ciclului Miller-Atkinson; o atenție deosebită a fost acordată efectului implementării acestui tip de ciclu asupra aerodinamicii interne a motorului; astfel, întreaga preocupare a acestei teze se susține pe aspecte, încă neelucidate complet, reieșite din acest studiu al stadiului actual;
3. teza fiind despre aerodinamica internă a motorului termic, realizarea unui studiu bibliografic dedicat acestui subiect a constituit una dintre preocupările majore, motiv pentru care este subliniat și la acest capitol al contribuțiilor personale; au rezultat, astfel, concluzii utile referitoare la maniera în care este cuantificată aerodinamica internă a motorului, atât prin experimente de tip PIV, cât și prin simulări CFD, ce au fost ulterior exploatate pentru atingerea scopului declarat al tezei;
4. stabilirea unei metodologii adecvate de cercetare pentru a atinge scopul tezei ;
5. analiza detaliată a aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson prin intermediul tehnicii PIV și al simulărilor CFD de tip RANS: corelarea calitativă a datelor experimentale PIV cu cele reieșite din simulările CFD, realizate într-o manieră iterativă și extrapolarea rezultatelor PIV pentru zona inaccesibilă optic;
6. analiza comparativă detaliată, Otto vs. Miller-Atkinson, referitoare la aerodinamica internă a motorului;
7. identificarea unor posibilități de ameliorare a aerodinamicii interne și studiul amănunțit al implementării acestora asupra capacității de restabilire a aerodinamicii interne a motorului Miller-Atkinson.

Bibliografia tezei

- [1] A. Clenci, “Revista Ingineria Automobilului,” *Vol. 7 Nr. 2 - Editorial – Președinte SIAR*, 2013.
- [2] United Nations, “Sustainable transport, sustainable development.,” in *Interagency report for second Global Sustainable Transport Conference*, 2021.
- [3] A. Clenci, “Real Driving Emissions (RDE) – Émissions en conditions réelles de conduite-Enjeux et défis,” *Tech. l’Ingénieur*, 2020.
- [4] Transport & Environment, “Mission (almost) accomplished,” 2020.
- [5] European Environmental Agency, *Air quality in Europe*, no. 9. 2020.
- [6] J. G. J. Olivier and J. A. H. W. Peters, “Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions,” 2020.
- [7] M. Niculae, A. Clenci, V. Iorga-Simăn, and R. Niculescu, “An overview on the Miller-Atkinson over-expansion thermodynamic cycle,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 564, no. 1, Oct. 2019.
- [8] Transport & Environment, “Euro 7: Europe’s chance to have clean air,” 2021.
- [9] “Emission Standards.” [Online]. Available: <https://www.dieselnit.com/standards/eu/ld.php>. [Accessed: 04-Apr-2022].
- [10] European Environment Agency, “Greenhouse gas emissions from transport in Europe,” 2021. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport>. [Accessed: 04-Apr-2022].
- [11] European Commission, “Greenhouse gas emission statistics - emission inventories,” *Eurostat*, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories. [Accessed: 18-Nov-2020].
- [12] European Commission, “Stepping up Europe’s 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people,” Brussels.
- [13] United Nations, “What is the Kyoto Protocol?,” *United Nations Framework Convention on*

- Climate Change*. [Online]. Available: https://unfccc.int/kyoto_protocol. [Accessed: 18-Nov-2020].
- [14] Eurostat, “Greenhouse gas emissions, base year 1990,” *European Commission*, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/t2020_30. [Accessed: 18-Nov-2020].
 - [15] United Nations, “The adoption of the kyoto protocol of the united nations framework convention on climate change,” *Kyoto Protoc.*, vol. 58, no. 2, 1998.
 - [16] European Environment Agency, “Average carbon dioxide emissions from new passenger cars,” *European Environment Information and Observation Network (Eionet)*, 2020. [Online]. Available: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/average-emissions-for-new-cars-6#tab-chart_1. [Accessed: 19-Nov-2020].
 - [17] JATO, “SUVs make up 40% of total car registrations, as the European market records its best October result since 2009,” London, Oct. 2019.
 - [18] Q. XIN and C. . Pinzon, *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Elsevier, 2014.
 - [19] The International Council on Clean Transportation, “Diesel Technology Developments,” 2017.
 - [20] N. Urbancic *et al.*, “Diesel: The true (dirty) story,” 2017.
 - [21] European Commission, “Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles,” *European Commission*, 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles_en.
 - [22] European Commission, “CO₂ emission performance standards for cars and vans,” *European Commission*, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_en#tab-0-0. [Accessed: 06-Nov-2020].
 - [23] W. Hofegger, “Emissions legislation update from WLTP/RDE to EU7,” *AVL Powertrain Engineering Techday*, 2017. [Online]. Available: https://www.avl.com/documents/5490654/6605769/AVL%2BPTE%2BTechday%2B%25234_03_Emissions%2Blegislation%2Bupdate%2BWLTPRDE-EU7_Hofegger. [Accessed: 22-Feb-2021].
 - [24] European Automobile Manufacturers Association, “What is the real driving emissions (RDE) test?,” *Car Emissions Testing Facts*, 2018. [Online]. Available: <http://www.caremissionstestingfacts.eu/rde-real-driving-emissions-test/>. [Accessed: 17-Mar-2022].
 - [25] A. Clenci, V. Sălan, R. Niculescu, V. Iorga-Simăn, and C. Zaharia, “Assessment of real driving emissions via portable emission measurement system,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 252, no. 1.
 - [26] R. Backhaus, “Future Emission Regulations - Low Levels across All Engine Operating Points,” *MTZ Worldw.*, vol. 81, no. 9, 2020.
 - [27] B. Lieberman, “A brief introduction to climate change and transportation,” *Yale Climate Connections*, 2019. [Online]. Available: <https://yaleclimateconnections.org/2019/09/a-brief-introduction-to-climate-change-and-transportation/>. [Accessed: 24-Dec-2020].
 - [28] Z. Wang, H. Liu, and R. D. Reitz, “Knocking combustion in spark-ignition engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 61, no. July, 2017.
 - [29] J. N. D. S. Vianna, A. D. V. Reis, A. B. D. S. Oliveira, A. G. Fraga, and M. T. De Sousa, “Reduction of pollutants emissions on SI engines - Accomplishments with efficiency increase,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 27, no. 3, 2005.
 - [30] A. Schloßhauer, J. Fryjan, K. Habermann, and T. Uhlmann, “Multi-variable Gasoline Engine

- for Lowest CO₂ Emissions,” *MTZ Worldw.*, vol. 79, no. 11, 2018.
- [31] M. Thewes, F. Hoppe, H. Baumgarten, and J. Seibel, “Water Injection for Gasoline Combustion Systems,” *MTZ Worldw.*, vol. 76, no. 2, 2014.
 - [32] N. V. Gromov, O. P. Taran, K. N. Sorokina, T. I. Mishchenko, S. Uthandi, and V. N. Parmon, “Toyota Hybrid System,” *Catal. Ind.*, vol. 8, no. 2, 2016.
 - [33] A. Clenci, F. Ivan, and R. Racota, “Higher Expansion or Higher Compression at S.I.E.,” *7th Int. Conf. ESFA, Organ. under FISITA patronage*, 2003.
 - [34] R. Sessions, “Nissan’s new VCR engine: worth the effort?,” *SAE International*, 2018. [Online]. Available: <https://www.sae.org/news/2018/05/2019-infiniti-qx-50-w-vc-turbo-review>.
 - [35] A. Clenci and P. Podevin, “Moteurs a taux de compression variable,” *Ed. Tech. l’Ingénieur*, 2008.
 - [36] A. Mayer, D. Wolf, M. Günther, and M. Medicke, “Fully Variable Valve Train to Apply Miller/Atkinson Strategies for Future Downsizing Concepts,” *MTZ Worldw.*, vol. 79, no. 7–8, 2018.
 - [37] G. Mastrangelo, D. Micelli, and D. Sacco, “Extreme Downsizing by the two-cylinder gasoline engine from Fiat,” *MTZ Worldw.*, vol. 11, no. 1, 2011.
 - [38] R. Budack, R. Wurms, G. Mendl, and T. Heiduk, “The New Audi 2.0-l I4 TFSI Engine,” *MTZ Worldw.*, vol. 77, no. 5, May 2016.
 - [39] W. Demmelbauer-Ebner, K. Persigehl, M. Görke, and E. Werstat, “The New 1.5-l Four-cylinder TSI Engine from Volkswagen,” *MTZ Worldw.*, vol. 78, no. 2, Feb. 2017.
 - [40] W. Demmelbauer-Ebner, J. Theobald, J. Worm, and P. Scheller, “The new 1.5-l EA211 TGI evo,” *MTZ Worldw.*, vol. 79, no. 9, Sep. 2018.
 - [41] M. Shirasaka, “The New Four-Cylinder Horizontally-Opposed Gasoline Engine from Subaru,” *MTZ Worldw.*, vol. 72, no. 11, Nov. 2011.
 - [42] M. Braun, M. Klaas, and W. Schröder, “Influence of Miller Cycles on Engine Air Flow,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 11, no. 2, Apr. 2018.
 - [43] K. Grab-Rogaliński, S. Szaja, and W. Tutak, “The Miller Cycle Based Ic Engine Fuelled With a Cng/Hydrogen,” *J. KONES. Powertrain Transp.*, vol. 21, no. 4, 2014.
 - [44] N. Bontemps, J. Roux, D. Jeckel, A. Schloßhauer, D. Lückmann, and R. Aymanns, “VNT Turbocharger for Gasoline Miller Engines,” *SIA*, no. June, 2017.
 - [45] N. Neumann, N. Freisinger, G. Vent, and T. Seeger, “Experimental investigation of Miller cycle combustion technology with water injection,” in *Internationales Stuttgarter Symposium*, Stuttgart: Springer, 2019.
 - [46] E. Ortiz-Soto and M. Younkins, “Advanced Cylinder Deactivation with Miller Cycle,” *MTZ Worldw.*, vol. 80, no. 5, 2019.
 - [47] J. Scharf, T. Uhlmann, A. Balazs, and R. Tharmakulasingam, “Targeted Efficiency Optimisation for Gasoline Engines,” *MTZ Worldw.*, vol. 77, no. 6, 2016.
 - [48] S. Eicheldinger, G. Wachtmeister, H. D. Nguyen, and F. Dinkelacker, “Combustion Development for Gas Engines with Extreme BMEPs above 30 bar,” *MTZ Worldw.*, vol. 80, no. 6, 2019.
 - [49] L. Carley, “CNG and Propane Engine Builds,” *Engine Builder*, 2015. [Online]. Available: <https://www.enginebuildermag.com/2015/05/cng-and-propane-engine-builds/>.
 - [50] R. Backhaus, “The Gasoline Engine Spark Ignition Remains,” *MTZ Worldw.*, vol. 80, no. 2, 2019.

- [51] M. Neubauer, P. Kapus, and G. Fraidl, "Efficiency and Emission Measures for Future High-performance Engines," *MTZ Worldw.*, vol. 80, no. 1, 2019.
- [52] J. Oder, C. Wouters, H. Rottengruber, and S. Pischinger, "CNG DI Combustion Processes in Combination with High-load EGR and the Miller Process," *MTZ Worldw.*, vol. 82, no. 5–6, 2021.
- [53] C. Weber, R. Friedfeldt, H. Ruhland, and M. Wirth, "Downsizing and High Power with Future Fuels and Emission Levels," *MTZ Worldw.*, vol. 82, no. 5–6, 2021.
- [54] J. Martins, F. Brito, T. Costa, and J. Costa, "The Quest for Improving Efficiency in Internal Combustion Engines," *3ª Conferência Int. em Produção do Conhecimento Científico em Timor-Leste*, no. November, 2018.
- [55] H. Wei, A. Shao, J. Hua, L. Zhou, and D. Feng, "Effects of applying a Miller cycle with split injection on engine performance and knock resistance in a downsized gasoline engine," *Fuel*, vol. 214, no. February, 2018.
- [56] B. Geringer and H. P. Lenz, "Internationales Wiener Motorensymposium (39)," *Sonderprojekte ATZ/MTZ*, vol. 23, no. S1, Aug. 2018.
- [57] S. S. Hou, "Comparison of performances of air standard Atkinson and Otto cycles with heat transfer considerations," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 5, 2007.
- [58] D. Martins *et al.*, "Structural analysis , survey and classification of kinematic chains for Atkinson cycle engines," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 2, 2018.
- [59] A. James, "Internal Atkinson-Gas-Engine," US367496A, 1887.
- [60] A. Clenci, P. Podevin, and G. Descombes, "Etude thermodynamique de la détente prolongée," *Colloq. Francoph. sur l'Energie, Environnement, Econ. Thermodyn. COFRET'08*, 2008.
- [61] R. Miller, "Miller cycle engine patent," 2817322.
- [62] H. Mo, Y. Huang, X. Mao, and B. Zhuo, "Investigations on the Potential of Miller Cycle for Performance Improvement of Gas Engine," *Glob. J. Res. Eng. B Automot. Eng.*, vol. 16, no. 1, 2016.
- [63] K. Hatamura, M. Hayakawa, T. Goto, and M. Hitomi, "A study of the improvement effect of Miller-cycle on mean effective pressure limit for high-pressure supercharged gasoline engines," *JSAE Rev.*, vol. 18, no. 2, 1997.
- [64] Y. Zhao and J. Chen, "Performance analysis of an irreversible Miller heat engine and its optimum criteria," vol. 27, pp. 2051–2058, 2007.
- [65] M. D. Bassett, S. C. Blakey, and P. W. Foss, "A simple two-state late intake valve closing mechanism," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 211, no. 3, 1997.
- [66] B. Chen, L. Zhang, Q. Luo, and Q. Zhang, "The thermodynamic analysis of an electrically supercharged Miller Cycle gasoline engine with early intake valve closing," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 44, no. 3, 2019.
- [67] H. Jääskeläinen, "Miller Cycle Engines," *ECOpaint Inc.*, 2019. [Online]. Available: https://dieselnets.com/tech/engine_miller-cycle.php. [Accessed: 20-Mar-2020].
- [68] M. Scheidt, C. Brands, M. Kratzsch, and M. Günther, "Combined Miller/Atkinson Strategy for Future Downsizing Concepts," *MTZ Worldw.*, vol. 75, no. 5, May 2014.
- [69] N. Morand, G. Agnew, N. Bontemps, and D. Jeckel, "Variable Nozzle Turbine Turbocharger for Gasoline 'Miller' Engine," *MTZ Worldw.*, vol. 78, no. 1, Jan. 2017.
- [70] N. Al-Hasan, S. Reuter, M. Klaus, and A. Koch, "RAAX Turbocharger Applied to the Miller Cycle," *MTZ Worldw.*, vol. 77, no. 7–8, Jul. 2016.
- [71] C. Glahn, M. Kluin, I. Hermann, and A. Königstein, "Requirements for the Boosting System

- of Future Engine Concepts,” *MTZ Worldw.*, vol. 78, no. 4, Apr. 2017.
- [72] P. Kapus, M. Neubaue, and G. Fraidl, “The Future of the Stoichiometric Gasoline Engine — Less Consumption and more Output,” *MTZ Worldw.*, vol. 75, no. 11, Oct. 2014.
 - [73] M. Matsuda, T. Yokomori, M. Shimura, Y. Minamoto, M. Tanahashi, and N. Iida, “Development of cycle-to-cycle variation of the tumble flow motion in a cylinder of a spark ignition internal combustion engine with Miller cycle,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 22, no. 5, May 2021.
 - [74] A. Clenci, F. Ivan, and R. Racota, “The Need for supercharging the Miller cycle Engine,” in *Prima conferință internațională SMAT Craiova*, 2001.
 - [75] M. Penzel, V. Bevilacqua, and M. Böger, “Meeting Future Emission Standards with Turbocharged High-Performance Gasoline Engines,” *MTZ Worldw.*, vol. 81, no. 6, Jun. 2020.
 - [76] M. Sens, S. Zwahr, and M. Günther, “Potential of the Variable Compression Ratio on a Fully ‘Millered’ Gasoline Engine,” *MTZ Worldw.*, vol. 77, no. 4, Apr. 2016.
 - [77] H. Friedl, “Trends in gasoline powertrain technology for high performance and low emission,” in *CAR2017*, 2017, no. 11.
 - [78] M. Niculae, A. Clenci, V. Iorga-Simăn, and R. Niculescu, “A Study on the Influence of the Miller Cycle upon the Engine’s Internal Aerodynamics,” in *The 30th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering*, Cham: Springer International Publishing, 2020.
 - [79] J. Bohbot, Y. Blacodon, and B. Scheurer, “Aerodynamic Flow Simulation in an Internal Combustion Engine Using the Smoothed Particle Hydrodynamics Method,” 2011, no. September.
 - [80] I. Florian, “Influența arhitecturii camerei de ardere Heron asupra arderii, economicității și poluării chimice,” Universitatea Politehnica București, 2002.
 - [81] J. Vernet, “Detailed study of steady in- cylinder flow and turbulence using stereo-PIV,” SCANIA, Sweden, 2012.
 - [82] Y. L. Qi, L. C. Dong, H. Liu, P. V. Puzinauskas, and K. C. Midkiff, “Optimization of intake port design for SI engine,” *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 13, no. 6, Oct. 2012.
 - [83] P. G. Aleiferis, M. K. Behringer, and J. S. Malcolm, “Integral Length Scales and Time Scales of Turbulence in an Optical Spark-Ignition Engine,” *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 98, no. 2, Mar. 2017.
 - [84] R. Ryrholm and M. Eriksson, “Optical Study of Tumble Spray and Combustion,” Chalmers University of Technology, 2015.
 - [85] S. Bednář, “Konstrukční cvičení a metodiky konstruování spalovacích motorů.” [Online]. Available: <https://slideplayer.cz/slide/2718972/>. [Accessed: 10-Nov-2019].
 - [86] Y. Kim, M. Kim, S. Oh, W. Shin, S. Cho, and H. H. Song, “A New Physics-Based Modeling Approach for a 0D Turbulence Model to Reflect the Intake Port and Chamber Geometries and the Corresponding Flow Structures in High-Tumble Spark-Ignition Engines,” *Energies*, vol. 12, no. 10, May 2019.
 - [87] M. Mahmoud, *Engineering Thermofluids*, vol. 53, no. 9. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
 - [88] H. Tennekes and J. L. Lumley, *A First Course in Turbulence*. London, 1972.
 - [89] A. Bakker, “Lectures on Applied Computational Fluid Dynamics,” *Dartmouth College*, 2008. [Online]. Available: <https://www.bakker.org/Lectures-Applied-CFD.pdf>. [Accessed: 28-Sep-2020].
 - [90] D. Stefanescu, M. Marinescu, and I. Ganea, *Termogazodinamica tehnică*. Bucuresti: Editura

- Tehnica, 1986.
- [91] "Laminar flow," *Wikipedia*, 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Laminar_flow.
 - [92] I. Cooper, "Fluid Flow," *University of Sydney*, 2002. [Online]. Available: http://www.physics.usyd.edu.au/teach_res/jp/fluids/flow1.pdf. [Accessed: 25-Mar-2020].
 - [93] *Wikipedia*, "Turbulence," 2019. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence>.
 - [94] W. Frei, "Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?," 2017. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>. [Accessed: 09-Nov-2019].
 - [95] MIT - Department of Mechanical Engineering, "Reynolds Number & Pipe Flow," *Massachusetts Institute of Technology*, 2002. [Online]. Available: <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-000-how-and-why-machines-work-spring-2002/study-materials/TurbulentFlow.pdf>. [Accessed: 25-Mar-2020].
 - [96] L. Davidson, "Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling," Sweden, 2012.
 - [97] L. Phillips, "Turbulence, the oldest unsolved problem in physics," *Ars Technica*, 2018. [Online]. Available: <https://arstechnica.com/science/2018/10/turbulence-the-oldest-unsolved-problem-in-physics/>.
 - [98] S. B. Pope, "Turbulent Flows," *Cambridge University Press*, 2000. [Online]. Available: <https://my.eng.utah.edu/~mcmurtry/Turbulence/turbulence.html>. [Accessed: 18-Mar-2020].
 - [99] J. Larsson, "Turbulence length scale," *CFD Online*, 2012. [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_length_scale. [Accessed: 28-Sep-2019].
 - [100] American Meteorological Society, "Turbulence length scales," *Glossary of Meteorology*, 2012. [Online]. Available: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Turbulence_length_scales. [Accessed: 28-Sep-2019].
 - [101] S. Banerjee, "Compressible turbulence in space and astrophysical plasmas : Analytical approach and in-situ data analysis for the solar wind. Solar and Stellar Astrophysics," *Universite Paris Sud*, 2014.
 - [102] "Taylor microscale," *Wikipedia*, 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Taylor_microscale. [Accessed: 28-Sep-2019].
 - [103] J. Anderson, *Computational Fluid Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
 - [104] S. Dobek, "Fluid Dynamics and the Navier-Stokes Equation," Washington, 2012.
 - [105] "Gradient," *Wikipedia*. [Online]. Available: <https://ro.wikipedia.org/wiki/Gradient>. [Accessed: 09-Nov-2019].
 - [106] G. Sanderson, "Divergence and curl: The language of Maxwell's equations, fluid flow, and more," *YouTube*, 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=rB83DpBJQsE>. [Accessed: 09-Nov-2019].
 - [107] S. Buhl, F. Dietzsch, C. Buhl, and C. Hasse, "Comparative study of turbulence models for scale-resolving simulations of internal combustion engine flows," *Comput. Fluids*, vol. 156, Oct. 2017.
 - [108] G. N. Coleman and R. D. Sandberg, "A primer on direct numerical simulation of turbulence - methods, procedures and guidelines," 2010.
 - [109] S. Kurien and M. A. Taylor, "Direct Numerical Simulations of Turbulence - Data Generation and Statistical Analysis," *Los Alamos Sci.*, no. 29, 2005.
 - [110] J. Xu and H. Ma, "Applications of URANS on predicting unsteady turbulent separated flows,"

- Acta Mech. Sin. Xuebao*, vol. 25, no. 3, 2009.
- [111] T. Saad, “Turbulence Modeling For Beginners,” 2011.
 - [112] G. Alfonsi, “Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling,” *Appl. Mech. Rev.*, vol. 62, no. 4, Jul. 2009.
 - [113] A. Ueyama, “Basic Course of Thermo-Fluid Analysis,” *Cradle*, 2019. [Online]. Available: <https://www.cradle-cfd.com/media/column/a91>. [Accessed: 20-Feb-2020].
 - [114] “Reynolds decomposition,” *Wikipedia*, 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_decomposition. [Accessed: 20-Oct-2019].
 - [115] V. Iorga-Simăn, “Etude par simulation numérique des écoulements dans le conduit d’admission d’un moteur à levée de soupape d’admission variable,” Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2012.
 - [116] K. Hanjalić, M. Popovac, and M. Hadžiabdić, “A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 25, no. 6, Dec. 2004.
 - [117] Advanced Simulation Technologies, “AVL FIRE - Turbulence modeling (brochure),” Graz, Austria, 2009.
 - [118] S. M. Salim and S. C. Cheah, “Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows,” *Int. MultiConference Eng. Comput. Sci.*, vol. II, no. January 2009, 2009.
 - [119] K. Fouladi, “Elements of Turbulence Modeling,” *NAFEMES World Congress*, 2015. [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/12099834/>. [Accessed: 14-Jun-2022].
 - [120] C. Hasse, V. Sohm, and B. Durst, “Numerical investigation of cyclic variations in gasoline engines using a hybrid URANS/LES modeling approach,” *Comput. Fluids*, vol. 39, no. 1, Jan. 2009.
 - [121] C. Hasse, V. Sohm, and B. Durst, “Detached eddy simulation of cyclic large scale fluctuations in a simplified engine setup,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 30, no. 1, Feb. 2009.
 - [122] M. Karbon and A. K. Sleiti, “Turbulence Modeling Using Z-F Model and RSM for Flow Analysis in Z-SHAPE Ducts,” *J. Eng.*, vol. 2020, Mar. 2020.
 - [123] L. C. Berselli *et al.*, *Mathematics of Large Eddy Simulation of Turbulent Flows*, First edit. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
 - [124] R. Yu, “Large eddy simulations,” 2017. [Online]. Available: https://www.fm.energy.lth.se/fileadmin/fm/Education/Courses/Turbulence/LES__TurbulenceCourse2017.pdf. [Accessed: 15-Mar-2020].
 - [125] J. Gibbs, “LES of Turbulent Flows Lecture 5,” *Department of Mechanical Engineering University of Utah*, 2016. [Online]. Available: https://gibbs.science/les/lectures/lecture_05.pdf. [Accessed: 15-Mar-2020].
 - [126] M. Uhlmann, “Modelling of turbulent flows: RANS and LES,” 2012. [Online]. Available: http://www-turbul.ifh.uni-karlsruhe.de/uhlmann/VORLESUNG/turbmod/ss12/slides/talk8_ho.pdf. [Accessed: 17-Mar-2020].
 - [127] C. S. Hemmingsen, K. M. Ingvorsen, S. Mayer, and J. H. Walther, “LES And URANS simulations of the swirling flow in a dynamic model of a uniflow-scavenged cylinder,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 62, Dec. 2016.
 - [128] V. K. Krastev, G. Di Ilio, G. Falcucci, and G. Bella, “Notes on the hybrid URANS/LES turbulence modeling for Internal Combustion Engines simulation,” *Energy Procedia*, vol. 148, Aug. 2018.
 - [129] B. Enaux *et al.*, “Large Eddy Simulation of a Motored Single-Cylinder Piston Engine: Numerical Strategies and Validation,” *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 86, no. 2, Mar. 2011.

- [130] S. Girimaji and K. Abdol-Hamid, "Partially-Averaged Navier Stokes Model for Turbulence: Implementation and Validation," in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2005, no. June.
- [131] "Computational fluid dynamics," *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics. [Accessed: 09-Nov-2019].
- [132] D. Kuzmin, "Introduction to Computational Fluid Dynamics," *Institute of Applied Mathematics*. [Online]. Available: <http://www.mathematik.tu-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>.
- [133] CFD Online, "Meshing." [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Meshing>. [Accessed: 09-Nov-2019].
- [134] D. Kuzmin, *A Guide to Numerical Methods for Transport Equations*. Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [135] FLUENT Inc., "Modeling Turbulence," 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=57c8520396b7e48f7a5a4e18&assetKey=AS%3A401539928739840%401472745987642>. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [136] H. Chen, M. Xu, and D. L. S. Hung, "Analyzing In-cylinder Flow Evolution and Variations in a Spark-Ignition Direct-Injection Engine Using Phase-Invariant Proper Orthogonal Decomposition Technique," in *SAE Technical Papers*, 2014, vol. 1, no. April.
- [137] "Fluid Kinematics." [Online]. Available: https://www.slideshare.net/abrishshewa/chapter-four-fluid-mechanics?from_action=save. [Accessed: 12-Feb-2020].
- [138] M. Niculae, "Suport prezentare raport de cercetare nr. 3 : Metodica cercetării experimentale a aerodinamicii interne a m.a.s," Pitesti, 2020.
- [139] "Marine Hydrodynamics," *MIT - Department of Mechanical Engineering*, 2006. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/13.021/demos/lectures/lecture2.pdf>.
- [140] M. Jahanmiri, "Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications," Goteborg, 2011.
- [141] M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*, Second Edi. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [142] G. Caridi, "Helium-filled soap bubbles for vortex core velocimetry," *Lnkedin*, 2017. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/helium-filled-soap-bubbles-vortex-core-velocimetry-giuseppe-ca-caridi/>. [Accessed: 23-Mar-2020].
- [143] "Particle Palette," *microParticles GmbH*, 2018. [Online]. Available: <https://microparticles.de/en/product-palette.html>. [Accessed: 23-Mar-2020].
- [144] "Prospect Of Hollow Glass Microspheres In The Insulation Coating," *Sinosteel Maanshan New Material Technology*, 2014. [Online]. Available: <http://www.glass-bubble.fr/news/insulation-coating-of-hollow-glass-microspheres-16.html>. [Accessed: 23-Mar-2020].
- [145] C. L. Bianchi, S. Ardizzone, and G. Capperelletti, "Nanocrystalline Oxides : Surfactants-Assisted Growth," *Encycl. Nanosci. Nanotechnol.*, no. January, 2006.
- [146] "Polystyrene particles nano particles,Silicon particles,PS particles," *Shanghai Biochemical Co., Ltd.* [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Polystyrene-particles-nano-particles-Silicon-particles_60023150658.html. [Accessed: 23-Mar-2020].
- [147] R. Zakaria and P. Bryanston-Cross, "Light scattering efficiency of oil smoke seeding droplets in PIV systems," in *2012 Photonics Global Conference (PGC)*, 2012, no. December.
- [148] N. Alfaraj, "A review of charge-coupled device image sensors," 2017.
- [149] M. Perceau, P. Guibert, A. Clenci, V. Iorga-Simăn, M. Niculae, and S. Guilain, "Investigation

- of the Aerodynamic Performance of the Miller Cycle from Transparent Engine Experiments and CFD Simulations,” *Machines*, vol. 10, no. 6, p. 467, Jun. 2022.
- [150] M. Niculae, A. Clenci, V. Iorga-Simăn, and R. Niculescu, “Évaluation de l’impact du masquage des soupapes d’admission et de l’augmentation de la course du piston sur l’aérodynamique interne du moteur Miller,” *Entropie Thermodyn. – énergie – Environ. – économie*, vol. 1, no. 3, 2021.
- [151] “Calculation of unsteady in-cylinder flow of gasoline engine. RANS and LES approach, Scientific cooperation agreement between University of Pitesti, Renault France, AVL France and Sorbonne Université, 2016 – 2018 & 2019 - 2021.”
- [152] Y. CAO, “Sensibilité d’un écoulement de rouleau compressé et des variations cycle à cycle associées à des paramètres de remplissage moteur,” *Thèse Dr. Ec. Natl. Supérieure mécanique d’aérotechnique*, vol. Ph.D. Thes, 2014.
- [153] Y. Cao, E. Kaiser, J. Borée, B. R. Noack, L. Thomas, and S. Guilain, “Cluster-based analysis of cycle-to-cycle variations: application to internal combustion engines,” *Exp. Fluids*, vol. 55, no. 11, 2014.
- [154] T.-T. Vu and P. Guibert, “Proper orthogonal decomposition analysis for cycle-to-cycle variations of engine flow. Effect of a control device in an inlet pipe,” *Exp. Fluids*, vol. 52, no. 6, Jun. 2012.
- [155] P. Guibert and L. Lemoyne, “Dual particle image velocimetry for transient flow field measurements,” *Exp. Fluids*, vol. 33, no. 2, Aug. 2002.
- [156] M. Niculae, “Master’s Thesis - A Case Study Regarding The In-Cylinder Air Motion Characteristics In A Motored Gasoline Engine CFD vs. PIV,” University of Pitesti, 2017.
- [157] G. Trică, V. Iorga-Siman, A. Clenci, R. Niculescu, and A. Trică, “A CFD approach for the study of the in-cylinder air motion characteristics in a motored gasoline engine,” *Rev. Ing. Automob.*, vol. 38, no. 1842 – 4074, 2016.
- [158] L. Julien, C. Armelle, D. Eric, L. Bertrand, and L. Corine, “Application De La Piv Diphasique Pour Etudier Les Interactions Spray/Gaz En Injection Directe Essence,” in *Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL)*, 2014.
- [159] G. Trică, V. Iorga-Siman, A. Clenci, R. Niculescu, and A. Trică, “A case study regarding the in-cylinder air motion characteristics in a motored gasoline engine: CFD vs. PIV,” *COFRET’16-S1-009*, vol. 38, no. 1842 – 4074, 2016.
- [160] X. Yang, S. Gupta, T. W. Kuo, and V. Gopalakrishnan, “RANS and large Eddy simulation of internal combustion engine flows-A comparative study,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 136, no. 5, 2014.
- [161] P. Punov, M. Niculae, A. Clenci, S. Mihalkov, V. Iorga-Siman, and A. Danlos, “Assessment of the Miller cycle operation in a spark ignition engine via 1D numerical simulation,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 960, no. 1, Jan. 2022.
- [162] M. Perceau, P. Guibert, and S. Guilain, “Zero-dimensional turbulence modeling of a spark ignition engine in a Miller cycle « Dethrottling » approach using a variable valve timing system,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 199, Nov. 2021.
- [163] A. T. Kirkpatrick and C. R. Ferguson, *Internal Combustion Engines - Third Edition*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [164] E. Petschenig, “AVL PIV Flow Testing,” 2013.
- [165] M. Dejanu, “tudii și cercetări privind îmbunătățirea ofertei energetice a motoarelor cu ardere internă, prin aprinderea amestecului cu puls laser,” Universitatea din Pitești, 2012.
- [166] A. Mubarak Alqahtani and P. Mazurko, “Investigation Into The Effect Of Bore/Stroke Ratio On A Single Cylinder Two Stroke Opposed Piston Engine,” *J. KONES. Powertrain Transp.*,

vol. 23, no. 2, Jan. 2016.

- [167] M. Austin, "Nissan Announces New 1.2-Liter Three-Cylinder," *Car and Driver*, 2010. [Online]. Available: <https://www.caranddriver.com/news/a18741135/nissan-announces-new-1-2-liter-three-cylinder/>. [Accessed: 23-Sep-2020].
- [168] J. Kargul *et al.*, "Benchmarking a 2018 Toyota Camry 2.5-Liter Atkinson Cycle Engine with Cooled-EGR," in *SAE Technical Papers*, 2019, vol. 2019-April, no. April.
- [169] H. Kishi, "New Powertrains," 2016. [Online]. Available: <https://global.toyota/en/download/14447949/>. [Accessed: 17-Feb-2020].
- [170] D. Guillaume, "Présentation moteur: Audi 2.0l TFSI," 2016. [Online]. Available: <https://www.guillaumedarding.fr/presentation-moteur-audi-2-0l-tfsi-1969596.html>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [171] Y. Gazeau, "Moteur Nissan 1.2 DIG-S à cycle Miller," *Auto-Innovations*, 2012. [Online]. Available: http://www.auto-innovations.com/site/brevetech/nissan_digs.html. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [172] C. Yin, Z. Zhang, Y. Sun, T. Sun, and R. Zhang, "Effect of the piston top contour on the tumble flow and combustion features of a GDI engine with a CMCV: A CFD study," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 10, no. 1, 2016.
- [173] L. Xu, P. Hu, and F. Luo, "Study on the influence of masking on the high tumble intake ports of GDI engine by three-dimensional simulation," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 252, no. 3, Jul. 2019.
- [174] B. Murali Krishna and J. M. Mallikarjuna, "Experimental investigations of in-cylinder flows of Engine with Intake Shrouded Valve," *Int. J. Eng. Technol. Manag. Appl. Sci.*, vol. 3, no. November, 2015.