

UNIVERSITATEA “BABEȘ-BOLYAI” CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE FIZICĂ
SPECIALIZAREA: FIZICĂ TEHNOLOGICĂ

LUCRARE DE LICENȚĂ

Coordonator științific

Conf. dr. ing. Flaviu Turcu
dr. Vasile Rednic

Absolvent

Kovács Gergő

2022

UNIVERSITATEA “BABEȘ-BOLYAI” CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE FIZICĂ
SPECIALIZAREA: FIZICĂ TEHNOLOGICĂ

LUCRARE DE LICENȚĂ
STUDIUL CFD AL PROCESULUI DE PULVERIZARE A
BIOCOMBUSTIBILILOR

Coordonator științific

Conf. dr. ing. Flaviu Turcu
dr. Vasile Rednic

Absolvent

Kovács Gergő

2022

Cuprins

1. Introducere în domeniu.....	4
2. Procese de curgere și de pulverizare	6
2.1 Densitatea	
2.2 Vâscozitatea	
2.3 Regimurile curgerii fluidelor	
2.3.1 Numărul Reynolds	
2.4 Caracteristicile de injecție și pulverizare	
3. Teoria elementului finit	16
4. Metode experimentale pentru studiul procesului	23
4.1 Determinarea proprietăților fizice a combustibililor studiați	
4.2 Studiul experimental a procesului de pulverizare	
5. Software-ul Ansys	31
5.1 Prezentare generală	
5.2 Prezentarea modelului realizat pentru fenomenul studiat	
6. Rezultate și interpretări.....	43

Introducere

Biocombustibilii pot să ofere o soluție tranzitorie pentru problema epuizării resurselor exploatabile de petrol. Până societatea devine total independentă de combustibili fosili, consumul global de petrol trebuie redus. O alternativă promițătoare este utilizarea acestor combustibili pe bază de uleiuri vegetale, dar domeniul necesită o evoluție semnificativă tehnologică. Pentru motoarele cu combustie internă în general și motoarele Diesel în particular, proprietățile fiziochimice ale combustibilului sunt critice din punctul de vedere al procesului de combustie. Cercetarea realizată în cadrul acestei lucrări are trei părți distincte.

Primul obiectiv al prezentei cercetări a fost determinarea proprietăți fizice, de interes pentru procesul de combustie, ale unor uleiuri-bio. Ulterior acestea urmând a fi amestecate cu motorină comercială dar în același timp, amestecul rezultat să fie utilizabil pentru motoarele cu ardere internă actuale. Cele mai relevante proprietăți fizice, din acest punct de vedere sunt vâscozitatea și dependența acesteia de temperatură.

În etapa a doua a cercetării, a fost realizat un studiu a procesului de pulverizare al combustibililor pe baza de ulei de rapiță. Când acesta este injectat în camera de ardere are loc un proces, numit fărâmițare, ce constă în ruperea uleiului în picături micrometrice. Astfel, se formează un amestec de aer și combustibil pulverizat, care asigură o suprafață de contact mare între aer și picături. Suprafața mare de contact induce o ardere eficientă. Din acest motiv, scopul acestei etape a fost de a studia procesul de fărâmițare și implicit diametrul mediu al picăturilor de ulei și distribuția diametrelor picăturilor în funcție de domeniul de temperatură.

Studiul experimental este însoțit de o analiză computațională a dinamicii procesului de pulverizare, care presupune construirea unui model virtual pentru procesul fizic experimental și validarea acestui model prin concordanța măsurărilor experimentale cu cele computaționale. Simulările computaționale au fost realizate cu ajutorul modulului FLUENT din software-ul ANSYS 17 Workbench. Cea mai utilizată tehnică de analiză a proceselor de curgere este Computational Fluid Dynamics (CFD). Metoda se bazează pe discretizarea domeniului geometric studiat (meshing) și iterarea ecuațiilor diferențiale care guvernează procesele relevante pentru utilizator. Iterarea se referă la propagarea ecuațiilor specifice fenomenelor de interes prin toată geometria discretizată, de la element la element.

Correspondența între rezultatele experimentale și computaționale validează încă odată de ce CFD este o capabilitate critică în analiza proceselor de curgere, făcând posibil ca cercetătorii să economisească resurse importante precum timp sau bani.

1. Introducere în domeniu

Industria energetică și optimizarea proceselor energetice reprezintă o temă deschisă atât din perspectivă cercetării științifice cât și a dezvoltărilor tehnologice recente. Perioada de după revoluția industrială reprezintă etapa celor mai intense dezvoltări tehnologice din istoria omenirii. Această evoluție a avut ca și consecință, exploatarea majorității surselor primare de energie sau resurse de energie ne-regenerabilă. Industrializarea din Europa de Vest și Statele Unite ale Americii a avut o evoluție explozivă pe parcursul secolului al XIX-lea în general și în a doua parte a doua în mod, și s-a datorat utilizării mașinilor termice. Acestea foloseau combustibil solid, în principal lemn și cărbune iar energia lor termică era folosită pentru angrenarea diverselor instalații industriale. La sfârșitul secolului a fost descoperită o altă sursă de energie, de această dată compușii fiind în starea naturală sub formă lichidă. Dezvoltarea industriei petro-chimice a permis optimizarea conversiei energiei chimice stocate în combustibili fosili într-o altă formă de energie. Compușii rezultați din prelucrarea chimică a petrolului au însemnat, și reprezintă în continuare o cheie a modernizării industriei mobilității la nivel planetar.

Conform organizațiilor internaționale există două aspecte fundamentale legate de combustibili fosili, și anume limita fizică a acestora și efectele negative asupra mediului datorate arderii lor. Resursele de țiței exploatabile nu sunt nelimitate și se vor epuiza într-un viitor apropiat, chiar dacă capacitățile de extracție se extind. Acest aspect creează nevoia de a găsi noi resurse de energie regenerabilă și sustenabilă pe termen lung. O industrie care se dezvoltă continuu și aduce inovații, este cea a bateriilor și subsecvent a mașinilor cu propulsie electrică. Până când mașinările de transport cu propulsie electrică le vor înlocui pe cele cu motoarele cu ardere internă în general și cele de mare putere în special (ex. vapoare, avioane, etc) va necesita o perioadă lungă de timp. Până la finalizarea procesului de transformare bazată pe energie regenerabilă, vom parcurge o perioadă de utilizare a sistemului hibrid de obținere a energiei. Din acest motiv se folosește o sursă de energie regenerabilă, care reduce consumul de combustibil fosil și oferă o soluție intermediară pentru problema de epuizare a resurselor de petrol. Acesta este utilizarea biocombustibililor.

Biocombustibil este un nume generic pentru combustibilii proveniți din biomasă care pot fi plante, alge sau rămășițe de origine animală. Acest tip de sursă de energie este considerat regenerabil, deoarece cultivarea porumbului și a rapiței, spre exemplu, presupune un proces de fotosinteză prin care se absoarbe cantitatea de dioxid de carbon produsă la arderea uleiului provenit din aceste plante. Carburanții bazați pe biomasă au multiple avantaje față de cei clasici. Uleiurile obținute din plante conțin mai puțin sulf și azot. Datorită acestui fapt, arderea lor produce mai

puține gaze poluante. Ideea folosirii acestui tip de combustibil este de aceeași vârstă cu a motoarelor cu combustie internă, însă era considerată o metodă inefficientă, până la epuizarea resurselor fosile nu era identificată ca o problemă. Utilizarea acestor categorii de (bio)combustibili sau a celor mixti, a indus unele probleme de funcționare care au necesitat găsirea unor soluții. În speța, vâscozitatea acestor amestecuri este mult mai ridicată comparativ cu a combustibililor obținuți din rafinarea hidrocarburilor și astfel uleiurile vâscoase sunt mai greu de pulverizat. Se depun eforturi continue pentru optimizarea proprietăților fizico-chimice ale acestor amestecuri mixte de combustibil „bio/clasic” și astfel pentru a prelungi perioada de utilizare a rezervelor de combustibili fosili, pe de o parte, cât și pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră.

2. Procese de curgere și de pulverizare

Calitatea unui combustibil este dată de mărimile fizice care caracterizează curgerea și pulverizabilitatea lor. Printre acestea se enumără, în mod special, densitatea, vâscozitatea și tensiunea superficială. Aceste caracteristici sunt arbitrare în stabilirea regimului curgerii sub anumite condiții precum și în formarea picăturilor la pulverizare pentru a asigura o suprafață de contact cu aerul din incinta de injecție potrivită pentru o ardere cât mai completă.

2.1 Densitatea

Densitatea este o mărime fizică fundamentală, caracteristică compușilor aflați atât în stare de agregare solidă lichidă sau gazoasă. Lichidele sunt caracterizate în primul rând prin densitate, (ρ), definită ca masa unității de volum. Unitatea de măsură a densității în Sistemul Internațional de Unități (SI) este 1 kg/m^3

Densitatea relativă (ρ_r) a mediului lichid este definită în raport cu densitatea apei (ρ_0) la temperatura de $4 \text{ }^\circ\text{C}$, și care are valoarea de 1000 kg/m^3 .

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.1.1)$$

În realitate, mediul lichid este ușor compresibil în timp ce mediile gazoase sunt atât compresibile cât și extensibile. Din urmă, mediile lichide nu sunt extensibile și datorită acestui fapt, deși iau forma suportului care le conține admit suprafețe de separare cu atmosferă (suprafață liberă) și chiar suprafețe de separație față de un alt lichid (lichide nemiscibile). Pe aceste suprafețe de separație apare o forță suplimentară și anume, tensiunea superficială. În astfel de condiții, procesele de pulverizare, cum sunt și cele care fac obiectul prezentului studiu, sunt de importanță critică și din punctul de vedere al eficientizării energetice al întregului proces. Un astfel de parametru fizic care impactează randamentul ciclului motor este tensiunea superficială între combustibilul bio pulverizat și aerul din camera de ardere.

S-a observat și demonstrat că densitatea mediilor lichide este mult mai puternic dependentă de variația temperaturii comparativ cu dependența de variația presiunii. Astfel la temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ densitatea apei crește de la 998 kg/m^3 la o presiune de 1 atm , la 1003 kg/m^3 la o presiune de 100 atm . Variația densității este astfel de $0,5 \%$ la o creștere a presiunii de 100 de ori. În cazul creșterii temperaturii apei, aflată la o presiune de 1 atm , de la $20 \text{ }^\circ\text{C}$ la $75 \text{ }^\circ\text{C}$ se determină o variație

a densității de la 998 kg/m la 975 kg/m². Astfel la o creștere de 3,75 ori a temperaturii densitatea se modifică cu 2,3 %. [1]

Variația densității combustibilului cu temperatura va induce astfel, schimbări semnificative la pulverizarea acestui lichid. Acest comportament va fi detaliat, caracterizat și prezentat în capitolul 6.

2.2 Vâscozitatea

Pe lângă densitate, vâscozitatea și variația acesteia, în funcție de temperatură, joacă un rol important în procesele de curgere în general și în cazul celor de alimentare a motoarelor cu aprindere prin comprimare (MAC) în particular. Este important de luat în considerare variația acestor mărimi în funcție de regimul termic de funcționare, deoarece în industriile care utilizează MAC, agregatele trebuie fabricate astfel încât să funcționeze în parametri optimi pentru intervale largi de temperatură (aproximativ de la -50 °C la 50 °C).

Evaluarea detaliată și cât mai precisă a efectelor de frecare dintre medii diferite sau compuși chimici diferiți ai aceluiaș mediu, trebuie să fie făcută prin combinarea aspectelor teoretice cu unele elemente empirice. La contactul dintre două medii diferite (ex. solid și lichid sau solid și gaz) sau dintre diferiți compuși ai aceluiaș mediu (ex. ulei și apă sau ulei și acid) în cazul mișcării relative a unuia față de celălalt apar forțe de frecare. [2]

Aceste forțe, care apar la suprafața de contact, sunt în sensul opus a mișcării. Mărimea acestor forțe depinde de coeficientul de frecare care apare la suprafața de contact dintre medii, respectiv compuși diferiți ai aceluiaș mediu. Acest coeficient poate fi observat experimental prin mișcarea aceluiaș corp solid (ex. un corp sferic solid) în trei medii diferite (aer, apă, ulei). Astfel se identifică coeficientul de frecare μ , ca fiind o proprietate a fluidului de rezistență la mișcare, numită vâscozitate. În sens invers, capacitatea de opunere a unei rezistențe cât mai mici la deplasarea relativă a unui mediu față de celălalt se numește fluiditate. Pentru determinarea unei relații de legătură a vâscozității cu mediile ce se afla în contact considerăm un strat de fluid între două plăci solide paralele (sau un sistem echivalent. două plăci paralele imersate într-un volum mare de fluid) separate de distanța Y (figura 2.1) .

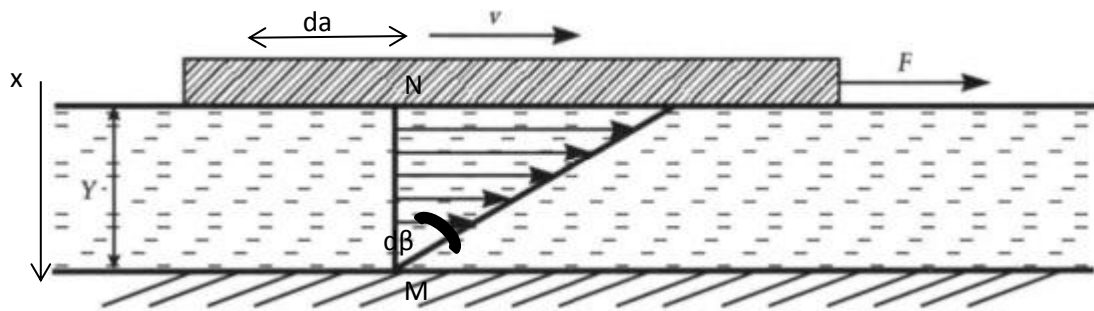


Figura 2.1 : Modelul plăcilor paralele separate de un fluid [3]

Asupra plăcii superioare se aplică o forță constantă \mathbf{F} , paralelă cu plăcile, în timp ce placa inferioară este ținută fixă. Placa superioară, sub acțiunea forței \mathbf{F} este mișcată continuu cu viteza constantă \mathbf{V} . Fluidul care se află în contact cu placa superioară aderă la placă și se deplasează cu aceeași viteză \mathbf{V} . Tensiunea de forfecare τ , care acționează asupra stratului superior de fluid este astfel:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.2.2)$$

unde A reprezintă suprafața de contact dintre placa și fluid. Stratul de fluid care se află în contact cu placa se deformează continuu sub influența tensiunilor de forfecare. În același timp fluidul care se află în contact cu placa inferioară are viteza de deplasare a plăcii, adică zero. În cazul curgeii staționare laminare, viteza fluidului dintre plăci variază pe direcția distanței y , între 0 și F . În aceste condiții viteza de deplasare și gradientul vitezei sunt:

$$u(x) = \frac{x}{Y} \cdot V \quad (2.2.3)$$

Adică:

$$\frac{du}{dx} = \frac{V}{Y} \quad (2.2.4)$$

unde: x reprezintă distanța pe vertical de la placa inferioară, fixă. De-a lungul unui interval de timp, dt , particulele de fluid aflate de o parte și de alta a unei linii verticale MN se rotesc cu un unghi variabil $d\beta$, în timp ce placa superioară se deplasează de-a lungul unei distanțe $da = Vdt$. Deplasarea unghiulară sau deformația poate fi exprimată ca:

$$d\beta \approx \tan \beta = \frac{da}{x} = \frac{V \cdot dt}{x} = \frac{du}{dx} dt \quad (2.2.5)$$

Astfel, rata deformării influențate de tensiunile de forfecare τ devine:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dx} \quad (2.2.6)$$

Astfel rata deformării unui element de fluid este echivalent cu gradientul perpendicular pe direcția de curgere a vitezei. Experimental s-a demonstrat că la majoritatea fluidelor rata deformării, și astfel gradientul vitezei, sunt direct proporționale cu tensiunea de forfecare τ :

$$\tau \sim \frac{d\beta}{dt} \sim \frac{du}{dx} \quad (2.2.7)$$

Fluidele a căror rată de deformare este proporțională cu tensiunile de forfecare sunt numite fluide Newtoniene, după numele savantului Isaac Newton, care le-a prezentat pentru prima dată în anul 1687. Majoritatea mediilor fluide cum sunt apa, uleiul sau benzina sunt lichide Newtoniene, în timp ce sângele sau plasticul lichid sunt exemple de fluide non-Newtoniene. În cazul curgerii fluidelor Newtoniene, în condiții uni-dimensionale, tensiunea de forfecare poate fi exprimată liniar, sub următoarea formă:

$$\tau = \mu \frac{du}{dx} \quad (2.2.8)$$

Unitatea de măsură în acest caz fiind $\frac{N}{m^2}$ iar μ reprezintă coeficientul de vâscozitate sau dinamică. Unitatea de măsură a vâscozității dinamice, în sistem S.I. este 1 Pa·s. Sunt folosite și alte unități de măsură, strâns utilizate în legătura cu metoda experimentală de determinare a vâscozității. Dintre aceste unități de măsură se enumără: $N \cdot \frac{s}{m^2}$ și $\frac{kg}{m} \cdot s$.

Unitatea de măsură în sistem CGS este poise (P), numit după savantul francez Jean Louis Marie Poiseuille. Relația de corespondență între poise și pascal-secundă este:

$$10 \text{ P} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (2.2.9)$$

Ca și referință este utilizată foarte des cea a apei, la temperatura de 20 °C, având valoarea de 0.01 P.

Vâscozitatea mediilor fluide, lichide sau gazoase, variază în mod diferit cu temperatura. Dacă vâscozitatea lichidelor scade cu temperatura cea a gazelor se comportă diametral opus și crește. Scăderea vâscozității lichidelor, odată cu creșterea temperaturii, se datorează energiei mult

mai ridicate pe care o posedă moleculele, astfel încât ele pot opune o forță mult mai mare forțelor de coeziune moleculară. Ca rezultat, moleculele lichidului energizate mai puternic pot să se miște mult mai liber. Spre deosebire de acesta, în gaze, vâscozitatea este determinată de forțele provenite din coliziunile moleculelor, care va crește cu creșterea agitației termice.

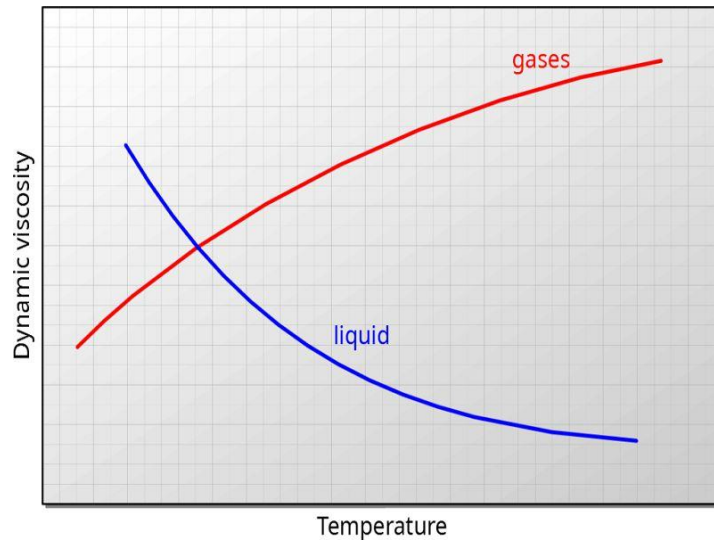


Figura 2.2: Evoluția vâscozității fluidelor cu temperatura [4]

Vâscozitatea lichidelor este direct legată de puterea necesară pentru transportul unui fluid printr-o țevă sau pentru a muta un corp solid printr-un fluid. Vâscozitatea mediilor lichide este aproximată astfel:

$$\mu = a \cdot 10^{b \cdot (T - c)} \quad (2.2.10)$$

unde T reprezintă temperature absolută, iar a, b și c sunt constante determinate experimental.

2.3 Regimurile curgerii fluidelor

În analiza dinamicii fluidelor este avantajos să se illustreze geometric capurile de curgere. Pentru o astfel de prezentare sunt necesare o serie de noțiuni cum ar fi: linie de curgere sau linie de curent. Prin linie de curgere se înțelege traiectoria unei particule de fluid. Linia de curent este curba imaginară în interiorul unui fluid aflat în mișcare astfel încât în fiecare punct ea are tangentă câte un vector de viteză al particulelor de fluid. Forma liniilor de curent poate varia de la un moment de timp la altul în cazul în care curgerea este nestaționară. În cazul în care câmpul vitezilor nu depinde de timp (adică viteza într-un punct nu se modifică în timp, chiar dacă în puncte diferite

viteza poate varia) sau, altfel spus curgerea este staționară, forma liniilor de curent nu se modifică în timp (liniile de câmp rămân "înghețate"). Acest comportament implică faptul că, în cazul curgerii staționare, dacă la un moment o particulă de fluid se află pe o linie de curent dată, aceasta va rămâne pe acea linie de curent. Suprafața formată de liniile de curent care trec prin punctele unei curbe închise poartă numele de tub de curent, iar volumul de fluid care trece printr-un tub de curent se numește filament de curent. Fizicianul american Osborn Reynolds a prezentat în 1883 diferența dintre cele două tipuri de curgere a fluidelor: laminară și turbulentă. Diferența dintre cele două tipuri de curgere a fost evidențiată printr-un experiment în care fizicianul a injectat o cantitate de substanță de contrast (vopsea) în apă care curgea printr-un tub cum este prezentat în figura 2.3.

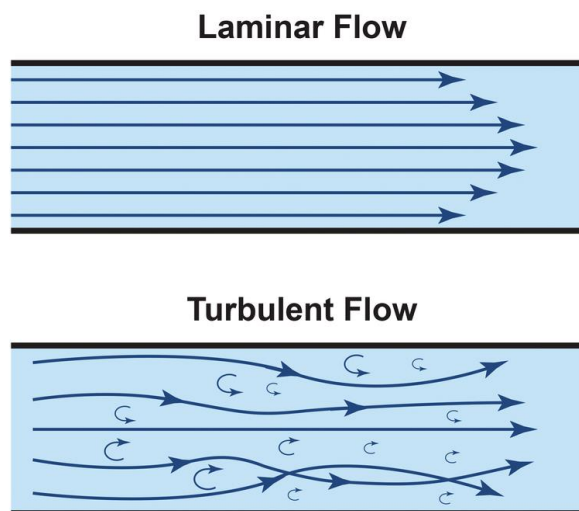


Figura 2.3: Regimul laminar și regimul turbulent al curgerii [5]

La viteze scăzute de curgere cantitatea de vopsea prezintă o formă dreaptă bine definită, indicând astfel că fluidul se deplasează în straturi paralele fără o mișcare de mixare între straturi, chiar și la nivel macroscopic. Acest gen de curgere fiind denumită laminară. Pe măsură ce rata de curgere a fost crescută, până peste o valoare critică, vopseaua se dezintegrează, deplasându-se într-un mod neregulat, împrăștiat într-o secțiune axială a tubului din ce în ce mai mare. Acest comportament indică o amestecare a straturilor la nivel macroscopic, perpendicular pe direcția de curgere. Curgerea a fost numită turbulentă. [6], [7]

2.3.1 Numărul Reynolds

În cazul curgerii printr-un tub cu secțiunea circulară de diametrul d parametrul introdus de Reynolds are următoarea expresie:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2.3.1.1)$$

unde V – viteza medie prin secțiunea transversal a tubului

μ - vâscozitatea dinamică a lichidului definită

ρ – densitatea fluidului

Acest număr caracterizează regimul unei curgeri, este o mărime adimensională și se numește numărul Reynolds.

Valorile tipice pentru numărul Reynolds pentru diferite regimuri ale curgeri unui lichid într-un tub circular sunt [8]:

- Regim laminar: $\text{Re} < 2000$
- Regim tranzitoriu: $2000 < \text{Re} < 4000$
- Regim turbulent: $\text{Re} > 4000$

2.4 Caracteristicile de injecție și pulverizare

Procesul de formare a amestecului *combustibilului - aer* este determinat de succesiunea proceselor de injecție, pulverizare și vaporizare a combustibilului, de distribuția acestuia în aer sau a aerului în zonele cu mare concentrație de combustibil. Dintre factorii care sunt necesari pentru obținerea unui amestec combustibil - aer de o calitate cât mai ridicată cei mai importanți factori sunt:

- Pulverizare fină și omogenă a combustibilului în toată camera de ardere
- Concordanța între forma jetului de combustibil injectat și forma geometrică a camerei de ardere
- Crearea unor curenți de aer intenși în interiorul camerei de ardere pentru o fărâmițare a jetului de combustibil și astfel omogenizarea amestecului

Calitatea pulverizării combustibilului, depinde de factorii ai procesului de injecție, de caracteristicile combustibilului și de factorii de mediu în care are loc injecția. Dependența dintre aceștia fiind extrem de complexă, fiecare din factorii influențează într-o foarte mare măsură eficiența transformării energiei chimice a combustibilului în energie mecanică.

Combustibilul trebuie să pătrundă în cilindru într-o stare de pulverizare foarte fină pentru ca suprafața de contact cu aerul să fie cât mai mare. Cu ajutorul injectorului combustibilul este introdus în cilindru, proces care poartă denumirea de injecție. Din punct de vedere al modului în care se face injectarea se identifică mai multe sisteme de injecție:

- pneumatică
- mecanică
- hidraulică
- electro-mecanică (cu ajutorul unui solenoid)
- piezo-electrică

Injecția pneumatică a fost utilizată în primele decenii ale secolului trecut cu precădere în cazul motoarelor mari. Acest tip de injecție necesită existența unor compresoare de aer, de presiune ridicată (40-60 atmosfere), cu ajutorul cărora combustibilul este introdus prin injector în camera de ardere. Sistemul cu ajutorul căruia s-au făcut experimentele pentru prezentă cercetare se bazează pe injecție mecanică. Standul de injecție va fi prezentat detaliat în capitolul 4.

Injectoarele cele mai moderne sunt cele piezo-electrice. Acestea posedă un grad de control a orificiului injectorului și a cantității de combustibil injectate foarte ridicat. Un astfel de sistem are ca element de bază, pentru acționarea acului injector, un cristal piezoelectric, care se contractă sau se dilată la aplicarea unei sarcini electrice pe el.

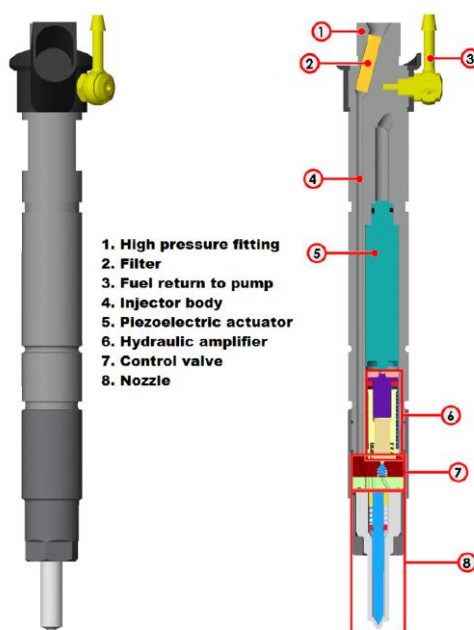


Figura 2.4 : Construcția unui injector piezoelectric [9]

Combustibilul este pulverizat, în cilindru, prin intermediul unui organ al injectorului numit pulverizator. Acest pulverizator este montat la extremitatea injectorului și intră în camera de ardere. Pulverizatorul poate fi prevăzut cu unul sau mai multe orificii în funcție de necesități. S-a demonstrat teoretic și dovedit practic că utilizarea pulverizatoarelor cu mai multe orificii are ca efect o mai eficientă pulverizare a combustibilului în cilindru, ducând astfel la o omogenizare, a ansamblului aer-combustibil într-un grad mult mai ridicat. Utilizarea injectoarelor dotate cu pulverizatoare cu unu sau mai multe orificii se face în funcție de caracteristicile constructive ale motoarelor în componența cărora intră ele. [10]

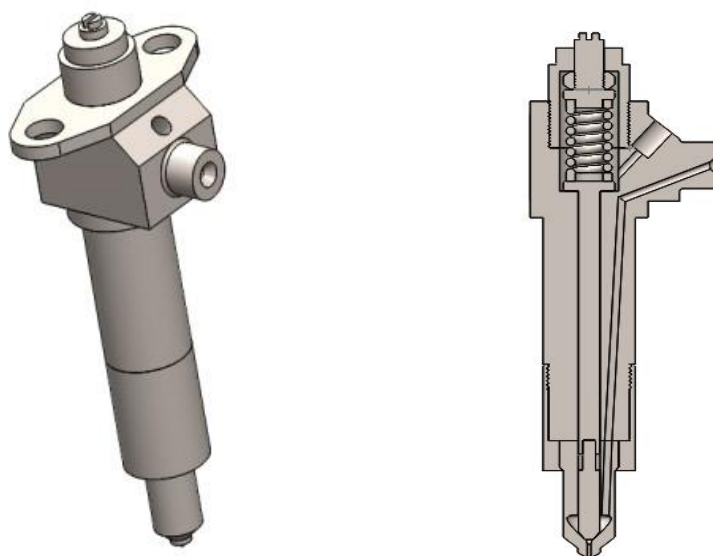


Figura 2.5 : Injector mecanic cu arc, cu o singură duză

3. Teoria elementului finit

Există multe metode analitice care sunt folosite pentru rezolvarea problemelor de statică sau mecanică structurală unde utilizatorul are nevoie de calculul cât mai precis a unei tensiuni interioare sau a unei deflecții sub o anumită sarcină a unei piese. De asemenea există metode analitice și pentru rezolvarea problemelor de fizica fluidelor și calculul mărimilor fizice legate de curgerea unui lichid sau gaz, însă mai multe aplicații implică geometrii complicate care nu se pot rezolva sau se rezolvă foarte greu analitic.

Metoda elementelor finite este o unealtă puternică care folosește calculul iterativ, computațional pentru a aproxima soluția problemelor de acest tip. Această tehnică este utilizată pe scală largă în tehnologie și în industrie. Lângă problemele de mecanică se mai folosește și pentru calculul mărimilor legate de curgerea fluidelor, transfer de căldură, electricitate și magnetism. Voi prezenta pașii de urmărit pentru rezolvarea unei probleme cu această metodă printr-un exemplu de statică elastică liniară și analiză de tensiuni interioare.

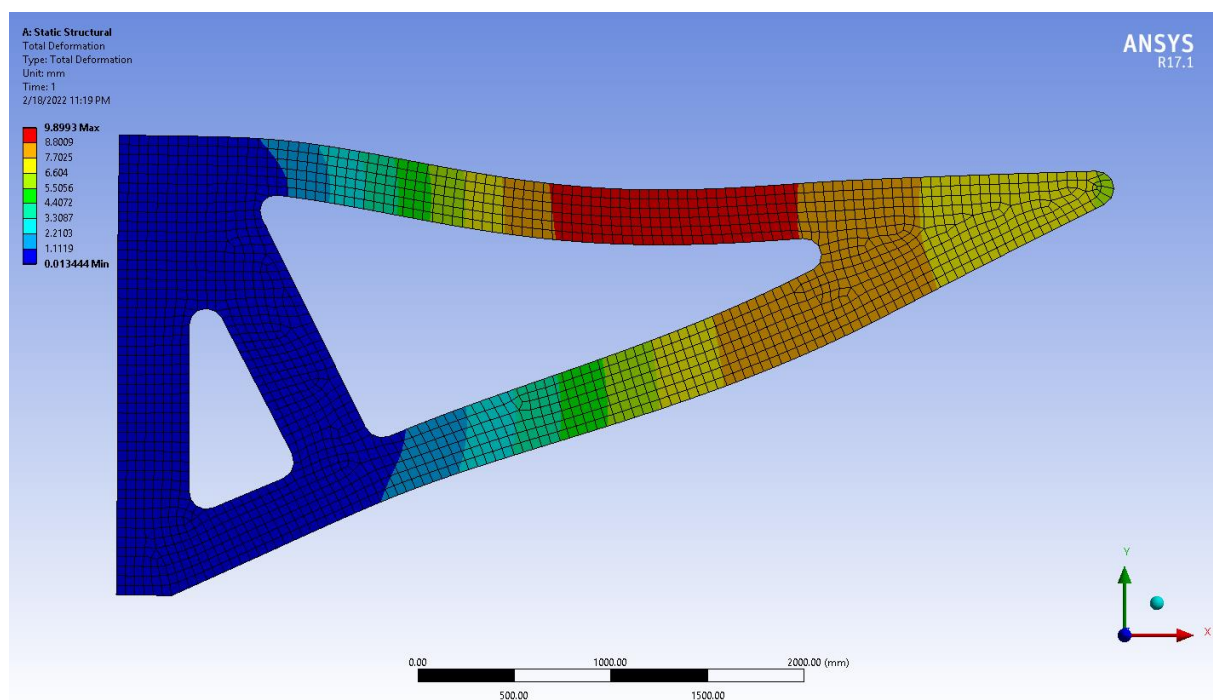


Figura 3.1: Analiză de deflecție a unui suport

Să presupunem că vrem să analizăm suportul din figura 3.1 cu o sarcină aplicată în apropierea extremității. Scopul este de a obține tensiunea interioară, deflecția anumitor puncte relevante și întinderea componentei pentru a stabili dacă materialul confecționat rezistă la

tensiunea care apare în interior sau nu. Tensiunile interioare apar astfel încât să stabilească echilibrul în toate zonele geometriei. În cazul unei bari este ușor de stabilită condiția echilibrului pe baza forțelor de forfecare și de îndoire dar în cazul de față există mai multe contribuții provenite din natura geometriei și din cauză că problema este bidimensională. Pentru probleme tridimensionale, calculele se complică și mai mult. Metoda elementului finit abordează problema prin împărțirea geometriei în elemente mici care sunt interconectate prin noduri. Acest proces este numit discretizare, iar mulțimea elementelor și nodurilor poartă numele de “mesh”. Discretizarea își manifestă avantajele la nivelul condiției de echilibru, fiindcă aceasta acum trebuie satisfăcută numai pentru un număr finit de elemente discrete și mici, nu pentru un corp continuu. Pentru realizarea meshului se folosesc mai multe forme ale elementelor. Acestea pot fi triunghiuri, pătrate, cuburi, tetraedre sau linii în funcție de dimensionalitatea problemei. Elemente triunghiulare sunt potrivite pentru modelarea geometriilor cu multe detalii și contururi ascuțite, însă la geometrii mai simetrice, simple elementele pătratiche/cubice s-au dovedit a fi mai eficiente. Pentru aceeași problemă există multiple moduri de discretizare care se folosesc în funcție de nevoile utilizatorului, însă trebuie ținut cont de faptul că, creșterea complexității meshului conduce la o soluție mai precisă dar necesită mai multă putere de calcul și resurse computaționale. De exemplu o problemă care implică o bară cu sarcini aplicate axial poate fi modelat prin linii (discretizare unidimensională). Acest exemplu este foarte simplu și necesită resurse computaționale puține. Elementele de mesh menționate sunt elemente de ordinul întâi, însă există și elemente de ordinul doi care au mai multe noduri. Acestea cresc precizia calculelor. Diferența este prezentată pe figura 3.2.

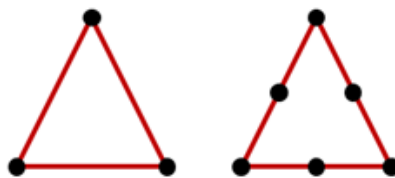


Figura 3.2: Discretizare de ordinul întâi și de ordinul doi

Meshingul unei geometrii poate să fie de calitate mai înaltă sau mai scăzută. Această proprietate este caracterizată de două mărimi subunitare:

- ortogonalitatea
- asimetria (skewness)

Ortogonalitatea se referă la cât de bine sunt plasate în spațiu, unghiul dintre muchiile și fețele adiacente cât de apropiat este de un unghi optim pentru efectuarea calculelor.

Asimetria este măsura calității elementelor de mesh. Cu cât mai multe elemente sunt de formă optimă (pătrat perfect, triunghi perfect, cub perfect etc.) cu atât asimetria este mai scăzută. Așadar, în cazul ideal ortogonalitatea este egală cu 1 iar asimetria cu 0.

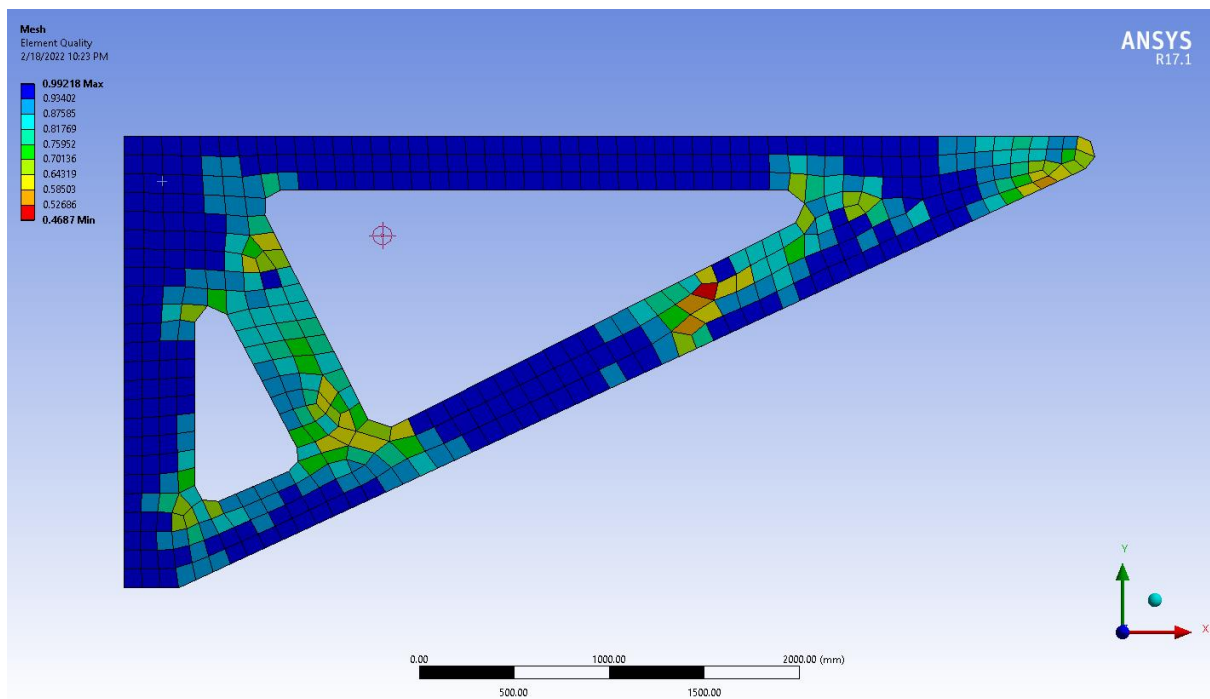


Figura 3.3: Geometrie discretizată cu calitatea elementelor de mesh (forme simetrice au calitate mai mare)

Pe figura 3.3 se vede geometria discretizată pentru exemplul de mai devreme. Calculul proprietăților are loc în felul următor: Pentru fiecare element se poate defini un vector coloană cu gradele de libertate a nodurilor din extremități, adică în cazul bidimensional dacă presupunem un element de linie, avem două grade de translație și unul de rotație pentru fiecare nod. [11]



Figura 3.4 : Gradele de libertate al unui element bidimensional cu două noduri

În cazul elementului de linie cu două noduri avem șase grade de libertate. Deci vectorul de deplasare $\{u\}$ va conține 6 elemente:

$$\{u\} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta \theta_2 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Matricea unui element identic, dar care permite translații și rotații după toate cele trei axe spațiale, va avea 12 elemente. Pentru simplitate vom considera cazul corespunzător ecuației 3.1 .

Modul de calcul al deplasărilor și rotațiilor este unul algebric. Se presupune o relație direct proporțională între deplasări și forțe respectiv rotații și momente și se definește o matrice a constantelor de elasticitate $[k]$. Acesta este o matrice pătratică și numărul coloanelor și rândurilor este egală cu numărul total al gradelor de libertate. În cazul de față matricea o să aibă dimensiuni de 6x6. [12]

$$[k] = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Relația dintre aceste mărimi alături de matricea forțelor și momentelor $\{f\}$ este:

$$\{f\} = [k]\{u\} \quad (3.3)$$

$$\text{Adică: } \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_1 \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta \theta_2 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Cunoscând elementele matricii $\{f\}$ și cele ale $[k]$ se pot calcula deplasările și rotațiile din matricea $\{u\}$. Acest calcul corespunde unui singur element cu două noduri din toată geometria. Calculatorul poate rezolva probleme de acest tip, fiindcă multe elemente din matricile de elasticitate au valoare zero. Valorile elementelor $[k]$ și $\{f\}$ sunt stabilite secvențial de calculator pentru fiecare element. Iar valorile incipiente sunt date de așa numite condiții la limită care definesc datele de “input” ale problemei alături de geometria discretizată. Calculatorul nu rezolvă toate ecuațiile algebrice și diferențiale, ci folosește diferite metode de aproximare, care lucrează cu mărimi reziduale. Rezidualele sunt erorile de aproximație, adică diferența între două calcule consecutive. Procesul iterativ constă în executarea aceluiași calcul până rezidualele devin mai mici decât o valoare de prag stabilită de utilizator. Cu cât această valoare de prag este mai mică, cu atât soluția este mai precisă, dar calculul va necesita mai mult timp și putere computațională. O metodă de calcul aproximativ este cea a energiei potențiale minime. Aceasta se numește metoda variațională și constă în căutarea acelei distribuții în spațiu a elementelor de mesh care corespunde celei mai mici energii potențiale, ținând cont de interacția de tip liniar (elastic) între elemente. Fenomenele fizice au tendința de a induce acea stare a sistemelor care are cea mai mică energie potențială, așadar această metodă computațională este una funcțională și utilizată foarte des.

De asemenea, metoda de calcul iterativ se aplică foarte des, în cazul fenomenelor din domeniul mecanicii fluidelor. Având în vedere faptul că sistemul analizat pentru acest studiu se bazează pe curgerea unui lichid, voi prezenta funcționarea metodei printr-un exemplu simplu într-un fluid, care curge într-un tub. Repetând pașii de construirea geometriei și discretizarea acestuia, se obține o secțiune transversală a tubului.

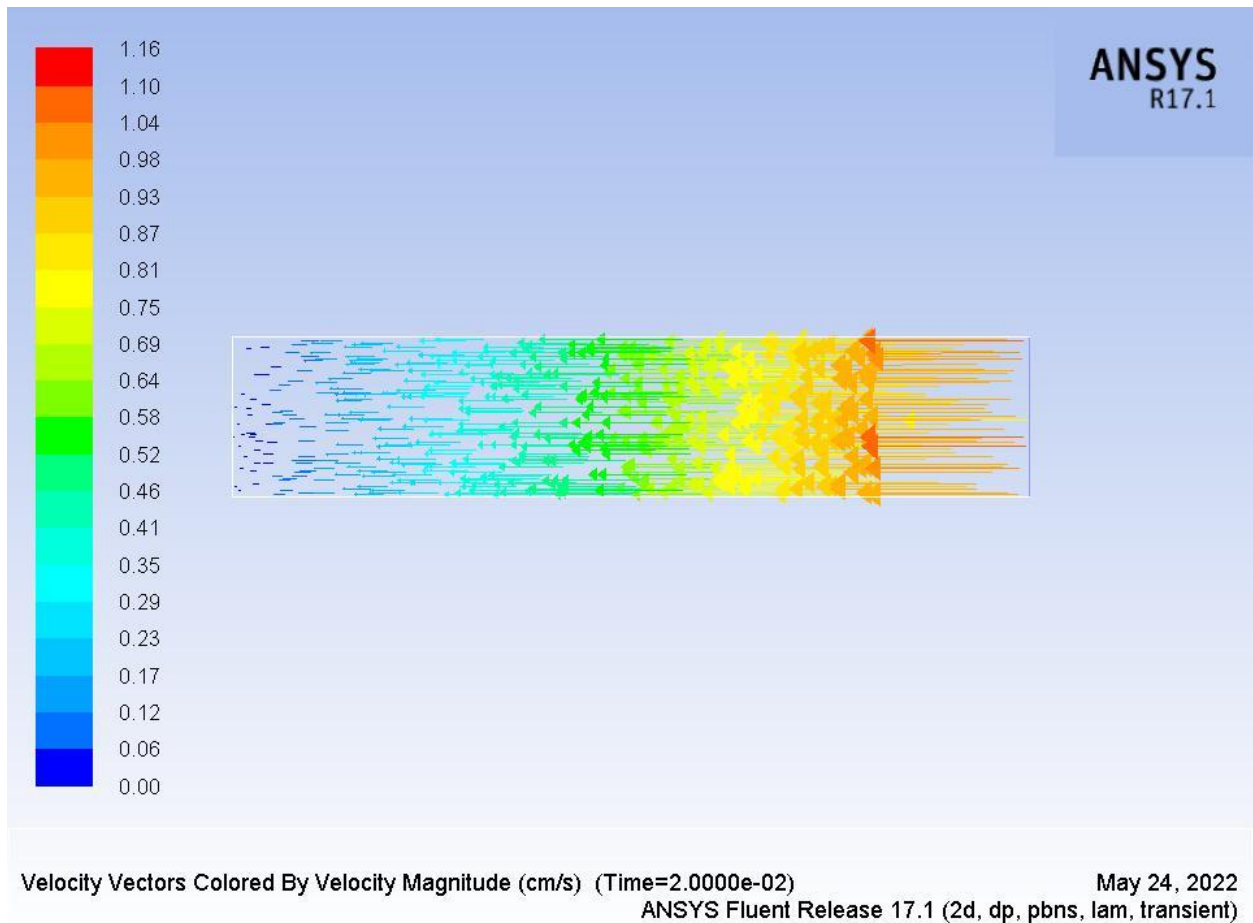


Figura 3.5 :Reprezentarea liniilor de curgere cu vectori de viteză pentru o secțiune transversală a unui tub cilindric

Exemplul de pe figura 3.5 arată vectorii de viteză a unei curgeri. Apa intră pe extremitatea din dreapta a tubului , cu o viteză inițială de 1.2 cm/s și după trecerea timpului de 8 s sistemul are starea reprezentată. De asemenea, se poate simula aproape orice fenomen și se poate reprezenta o multitudine de rezultate (flux de căldură, temperatură, viteze de curgere, numărul Reynolds etc.) din domeniul fizicii fluidelor, cu ajutorul teoriei elementului finit.

După finalizarea calculului, urmează etapa de post-procesare și de validare. Post-procesarea înseamnă extragerea rezultatelor și executarea măsurătorilor pe modelul computațional pentru a obține rezultatele necesare. Validarea modelului constă în compararea acestuia cu un model real, fizic și în cazul concordanței rezultatelor experimentale cu cele obținute la post-procesare modelul poate fi considerat validat și poate să fie folosit pentru simularea fenomenului real, economisind

timp și resurse. Ca și rezumat, pașii de urmat pentru rezolvarea unei probleme cu metoda elementului finit sunt următorii:

- **SARCINILE UTILIZATORULUI**
- **SARCINILE CALCULATORULUI**

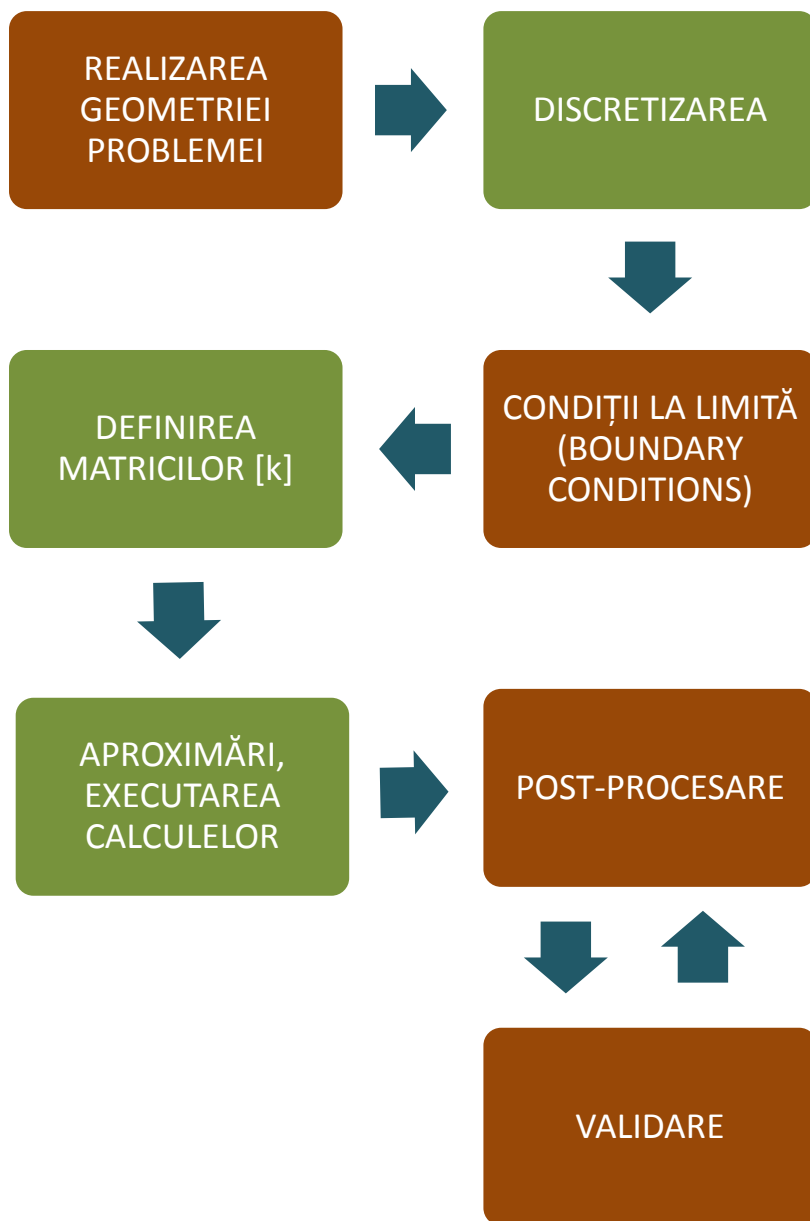


Figura 3.6 : Rezumatul pașilor pentru metoda elementului finit

4. Metode experimentale pentru studiul procesului

Scopul cercetării este de a determina proprietățile fizice a patru tipuri combustibili diferiți pentru diferite temperaturi și pe urmă de a determina distribuția particulelor după diametre în amestecul aer-combustibil în camera de ardere. După executarea experimentelor se realizează o simulare CFD (computational fluid dynamics) pe baza metodei elementului finit. Parametrii de input ai experimentului se introduc în software și se ajustează modelul până rezultatele din simulări sunt în concordanță cu cele experimentale. Acești parametri sunt: numărul de duze la injector, diametrul orificiului duzei, presiunea de injectare, presiunea ambientală (în camera de ardere) și debitul masic a combustibilului pe injector. Lângă parametrii injecției este important de a ține cont variația proprietăților fizice cele mai relevante din punctul de vedere a pulverizării a combustibililor studiate. Cei patru tipuri de combustibil studiați sunt:

- **SE4RP** : Super Euro 4 RomPetrol (motorină standard de la benzinărie)
- **NAB**: Biodiesel Neaditivat
- **NAB + FPBC1**: NAB aditivat cu un tip de aditiv în proporție de 1:1000 raport volumic
- **NAB + FPBC2**: NAB aditivat alt tip de aditiv în proporție de 1:1000 raport volumic

Biodiesel-ul a fost obținut prin presare la rece din rapiță, deci este un combustibil de origine vegetală.

4.1 Determinarea proprietăților fizice a combustibililor studiați

Proprietățile fizice cele mai importante din punctul de vedere a pulverizării sunt: densitatea, tensiunea superficială și vâscozitatea. Aceste proprietăți prezintă variații în funcție de temperatură de care trebuie ținut cont la studiul combustibililor. Dependența acestor proprietăți în funcție de temperatură sunt datele de input pentru simulările realizate.

Dependența densității s-a stabilit cu unelte simple de măsurarea volumului, masei și temperaturii. Densitatea relativă a compușilor investigați este exprimată în raport cu densitatea apei distilate, la temperatura de 4 °C și presiunea de 1 atmosferă. În tabelul 4.1 sunt prezentate valorile densității la cinci valori diferite de temperatură. Uleiurile nedegumate, neaditivate și aditivate, prezintă o masă volumică (densitate) mai mare decât cea a motorinei de referință (SE4RP). Mai semnificativă este însă valoarea în sine, în cazul tuturor uleiurilor, fiind cu aproximativ 10% mai mare decât a referinței. Comparând valorile densității (uleiurilor între ele se

poate observa că densitatea cea mai ridicată se întâlnește la uleiul de rapiță nedegumat (NAB), denumit și biodiesel nedegumat. În urma procesului de aditivare, indiferent de tipul de aditiv folosit (FPBC1 sau FPBC2), densitatea tuturor compușilor se reduce (figura 4.1). din punct de vedere al consumului de carburant creșterea masei volumice duce la o reducere a consumului specific de carburant [13]. Totuși În cazul raportării combustibililor pe bază de uleiuri vegetale la combustibili diesel de origine fosilă, trebuie să se țină cont și de alte caracteristici.

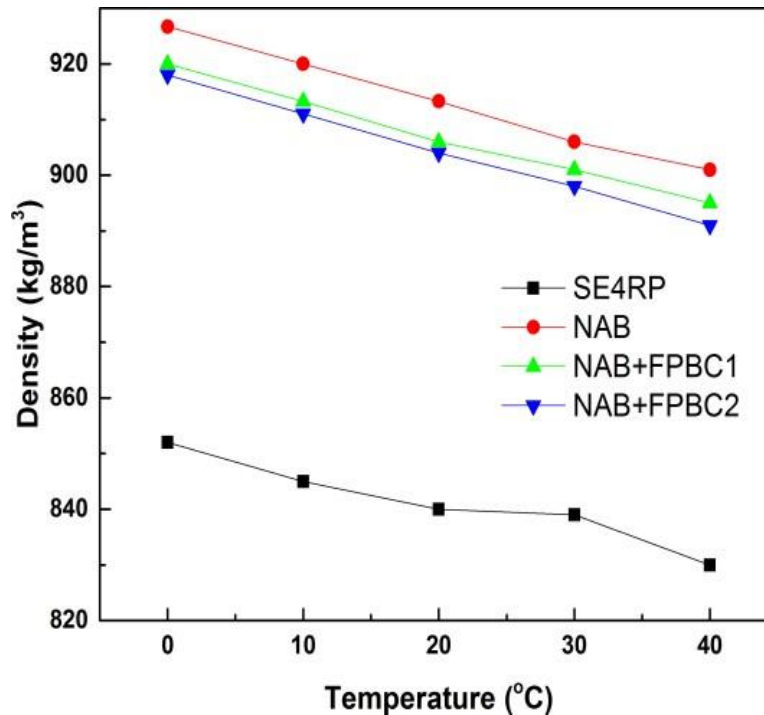


Figura 4.1: Reprezentarea grafică a dependenței de temperatură a densității combustibililor studiați

Tensiunea superficială este măsura pulverizabilității. Valorile pentru această mărime au fost stabilite în [14]. Pentru SE4RP am considerat dependența motorinei simple iar pentru celelalte trei combustibili de origine vegetală, dependența tensiunii superficiale a fost luată la fel ca și a uleiului de rapiță în cartea scrisă de Jordi-Roger et al [14]. Aceste valori sunt reprezentate grafic în figura 4.2 și tabelat în tabelul 4.1.

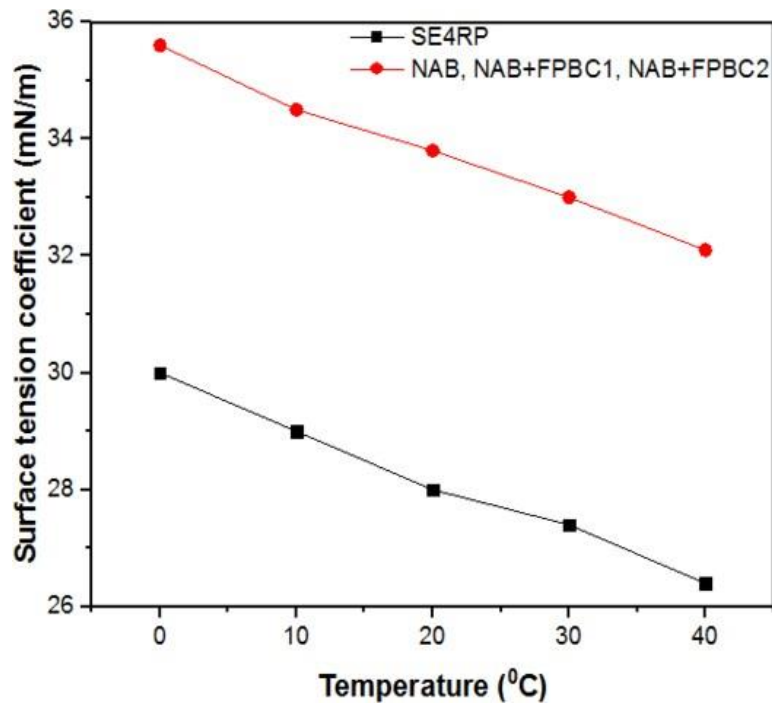


Figura 4.2: Reprezentarea grafică a dependenței de temperatură a tensiunii superficiale combustibililor studiați

Măsurătorile de vâscozitate au fost executate cu ajutorul unui vâscometru rotațional, care rotește o sondă circulară în lichidul studiat și din momentul forței pe care o exercită lichidul asupra sondei care se rotește în lichid, se stabilește valoarea vâscozității dinamice, cele două mărimi fiind în relație de proporționalitate directă. Temperatura se măsoară cu ajutorul unor termocuple iar lichidul este stocat într-un calorimetru pentru a înlătura pierderile de căldură și fluctuații de temperatură. Montajul experimental este reprezentat prin modelul CAD în figura 4.3. Sunt folosite trei termocuple pentru a măsura în timp real temperatura lichidului din centrul, lângă peretele și în exteriorul cilindrului. Diferența între aceste temperaturi este important de monitorizat pentru a ține sistemul în echilibru și omogenitate termică. [15]

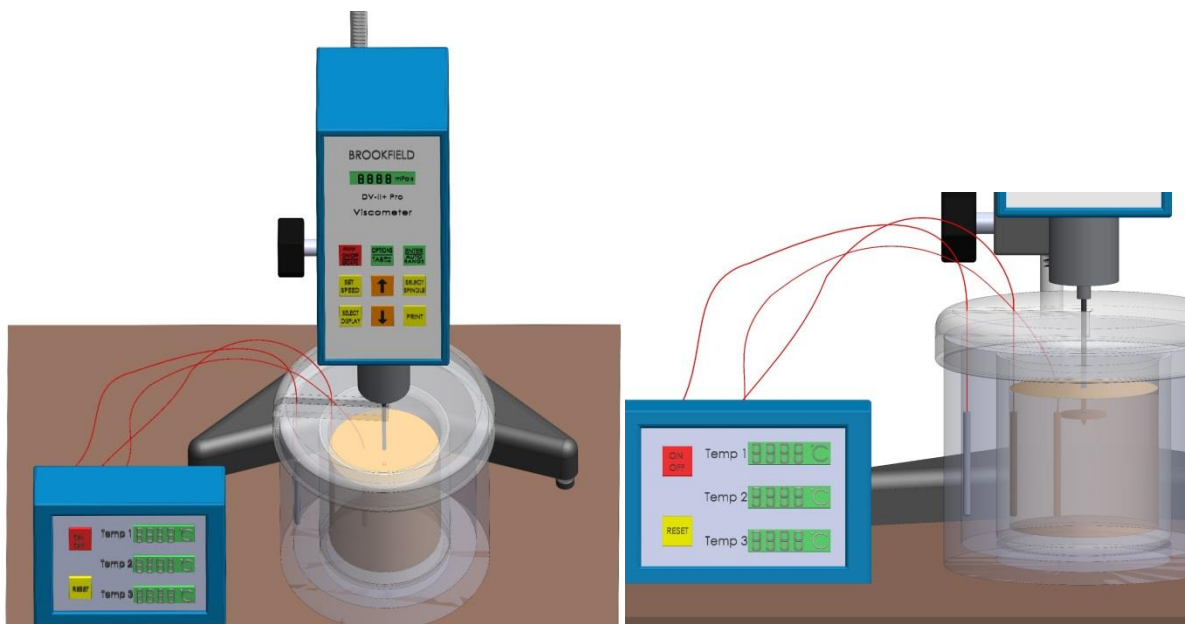


Figura 4.3 : Model CAD pentru vâscometrul rotațional

Vâscozitatea dinamică a motorinei referință (SE4RP) și a celor trei uleiuri (nedegumate, neaditivate / aditivate) a fost determinată la temperatura variabilă, pe un interval care acoperă temperaturile existente în zonele de clima continentală: de la $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ la $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Evoluția viscozității dinamice a referinței SE4RP, în funcție de temperatură, este prezentată în figura 4.4. În cazul analizelor la temperaturi pozitive evoluția vâscozității dinamice, prezintă o evoluție ce poate fi caracterizată ca fiind de tip logaritmă. În cazul analizelor la temperatură scăzută evoluția vâscozității dinamice este de tipul exponențial. Acest comportament diferit se datorează forțelor intermoleculare care determină caracteristica structurii compusului la nivel macroscopic. În cazul temperaturilor scăzute acestea fiind mai ridicate și deci forța necesară ruperii acestor legături fiind mai ridicate. Se observă că odată cu scăderea temperaturii, de la $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ la $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, vâscozitatea prezintă o creștere neliniară. Dacă până la temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ valorile vâscozității dinamice se păstrează în limite relativ mici, odată cu depășirea acestui prag vâscozitatea crește exponențial. Trebuie menționat faptul că acest combustibil este destinat utilizării în timpul sezonului cald. Valorile de vâscozitate au fost reprezentate și pentru temperaturi negative, deși simulările au fost făcute pentru intervalul $0 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Reprezentarea pentru temperaturile negative a fost făcută cu scopul de a arăta comportamentul extrem a vâscozității pentru acele temperaturi din cauza căruia funcționarea optimă devine imposibilă.

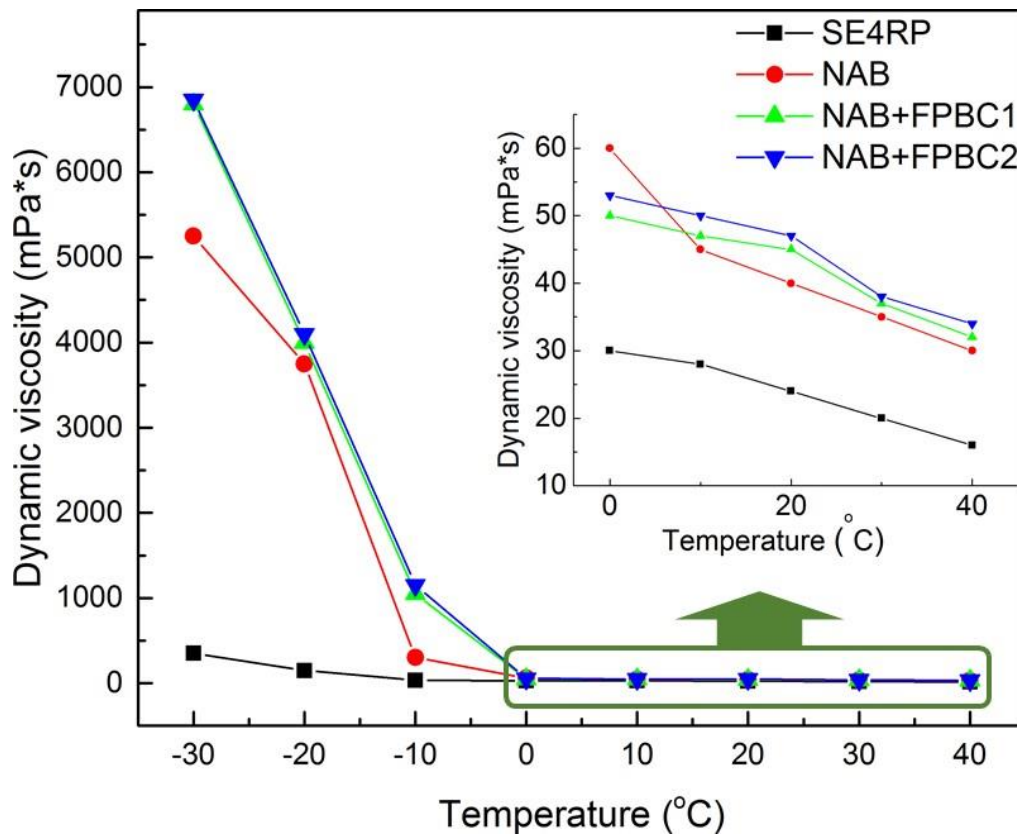


Figura 4.4: Reprezentarea grafică a dependenței de temperatură a vâscozității dinamice combustibililor studiați

În cazul combustibilului biodiesel, nedegumat și neaditivat, evoluția vâscozității dinamice, la temperatura constantă prezintă aceeași caracteristică, de tip logaritmă, respectiv exponențială ca și referința. Spre deosebire de referință, valorile vâscozității compușilor de origine vegetală la aceleași temperaturi sunt duble. Mai mult, odată cu trecerea în zona temperaturilor negative se observă o creștere a vâscozității mult mai accentuată. Deja la temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ combustibilul biodiesel având o vâscozitate de $300\text{ mPa}\cdot\text{s}$, valoare mai ridicată cu un ordin de mărime comparativ cu SE4RP. În domeniul de temperaturi de la $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ la $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ această intensificare a vâscozității este și mai ridicată, prezentând nu numai un ordin de mărime mai mult ci având o valoare de aproximativ 26 de ori mai mare. Această caracteristică a vâscozității dinamice a compușilor de origine vegetală determină utilizarea lui, în condiții optime, în domeniul temperaturilor pozitive, cu precădere la temperaturi de peste $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Datele în se găsesc în format tabelat în tabelul 4.1.

Temperatură (°C)	SE4RP	NAB	NAB+FPBC1	NAB+FPBC2
Vâscozitate dinamică (mPa*s)				
-30	350	5250	6800	6850
-20	150	3750	4000	4100
-10	35	300	1050	1150
0	30	60	50	53
10	28	45	47	50
20	24	40	45	47
30	20	35	37	38
40	16	30	32	34
Densitate (kg/m³)				
0	852	926.7	920	918
10	845	920	913.3	911
20	840	913.3	906	904
30	839	906	901	898
40	830	901	895	891
Tensiune superficială (mN/m)				
0	30	40	40	40
10	29	35	35	35
20	28	32	32	32
30	27.4	31	31	31
40	26.4	30	30	30

Tabel 4.1: Proprietățile fizice a combustibililor în funcție de temperatură

4.2 Studiul experimental a procesului de pulverizare

Pentru identificarea parametrilor care permit caracterizarea fineții pulverizării a fost folosit un ansamblu experimental compus dintr-un stand de injecție cu comandă manuală și un microscop electronic dotat cu o cameră digitală și capabilitate de procesare computerizată a imaginilor captate. Standul de injecție a fost dotat cu un injector prevăzut cu un pulverizator care are un singur orificiu. Injecția compusilor de origine vegetală investigați precum și a motorinei SE4RP de referință s-a făcut în mediu deschis, la presiune atmosferică. Pentru colectarea particulelor

pulverizate, ale combustibililor și a referinței [16] s-a folosit un recipient colector care conține un strat de apă distilată pentru evitarea deformării plastice a particulelor la impact. Ansamblul dispozitivului experimental este compus din stand injector și microscop optic. Microscopul Motic, utilizat la determinarea distribuției și caracterizării particulelor de combustibil injectat, a fost dotat cu patru obiective de amplificare și o cameră digitală de înaltă rezoluție, pentru achiziționarea imaginilor. Cele patru obiective ale microscopului, de puteri diferite de amplificare (4X, 10X, 40X și 100X) împreună cu obiectivele camerei digitale (0,5X, IX și 2X) dau o putere maximă de amplificare de până la 200 de ori.[17] Temperatura celor patru compuși injectați a fost stabilită în concordanță cu temperaturile pentru care a fost determinate proprietățile fizice ale acestora. Astfel, dacă vâscozitatea compușilor investigați au fost determinate pe plaja de temperatura de la $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ până la $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, parametrii de caracterizare a fineții pulverizării au fost determinați doar pentru domeniul temperaturilor pozitive: între $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, fiindcă densitatea și tensiunea superficială au fost determinate pentru acest interval. Pentru reducerea erorilor cât mai mult au fost preluate în medie 30 de imagini diferite, care au acoperită întreagă suprafață a recipientului colector și astfel întreaga zonă atinsă de particulele pulverizate. Diametrele microsferelor rezultate în urma injectării au fost determinate pentru fiecare sferă din fiecare imagine. Mediarea acestora permitând obținerea caracteristicilor medii și a distribuției microsferelor în funcție de caracteristicile compusului și a temperaturii acestuia. Astfel, se obține distribuția diametrelor particulelor pulverizate dintr-o imagine achiziționată în condițiile anterior menționate. Cu această metodă au fost determinate valorile diametrelor particulelor de combustibil SE4RP, NAB, NAB+FPBC1 și NAB+FPBC2 pulverizate în urma injectării combustibilului la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. În afară de componentele menționate anterior, dispozitivul experimental conține un rezervor pentru combustibilul studiat și o pompă manuală prin care se obține presiunea de injectare dorită. Injectorul este dotat cu un arc de reglaj prin care se poate modifica presiunea la care se deschide orificiul de injectare. Orificiul are un diametru de $300\text{ }\mu\text{m}$ și măsurătorile au fost efectuate la o presiune de injectare de 180 de atmosfere. Reconstruirea CAD al ansamblului întreg experimental este reprezentat în figura 4.5 și 4.6.

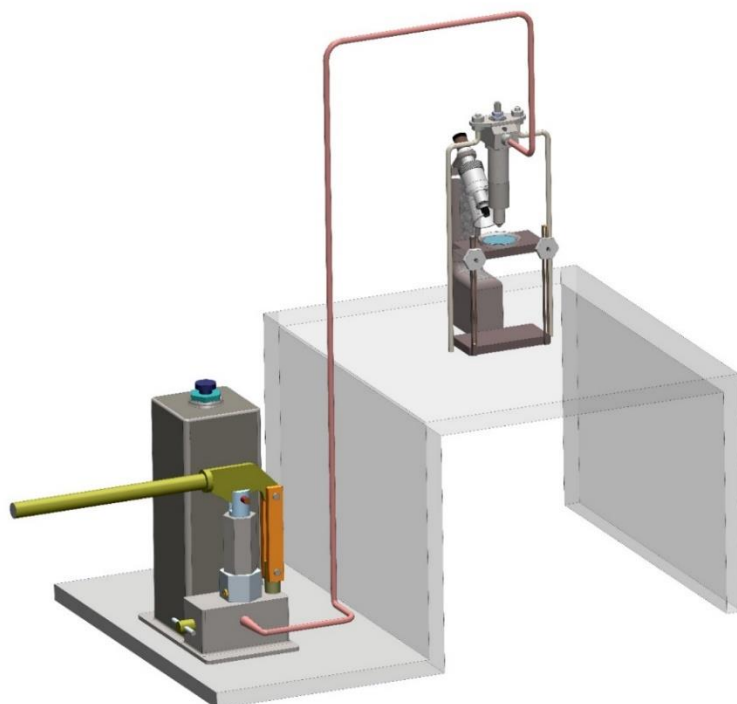


Figura 4.5 : Model CAD pentru ansamblul experimental (stand de injecție,microscop,rezervor)

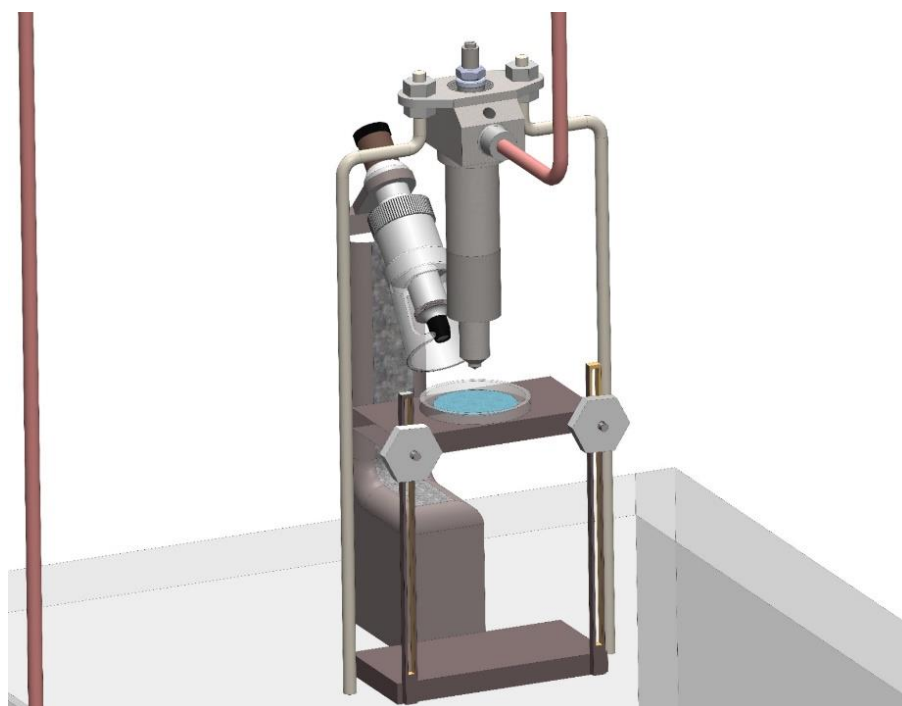


Figura 4.6 : Model CAD pentru ansamblul experimental (stand de injecție,microscop)

5. Software-ul Ansys

După cum a fost menționat anterior, lângă partea experimentală, cercetarea include o parte computațională. Simularea fenomenului de pulverizare a fost efectuată cu ajutorul softwareului Ansys 2017 Workbench, modulul Fluent. Teorema elementului finit este aplicată pe scală largă în domeniul fizicii fluidelor pentru simularea proceselor de curgere și există dovezi numeroase care evidențiază utilitatea acestuia. [18], [19]

4.1 Prezentare generală

Firma Ansys își are originile în Canonsburg, Texas. Dezvoltă și furnizează produse de CAE (computer aided engineering) pentru proiectare și testare de sisteme fizice pentru firme, instituții și ingineri din toată lumea. Denumirea Ansys este o prescurtare pentru Analysis Systems și programul vine cu multiple module care pot fi folosite pentru simulări în domeniul staticii, electronicii, rezistenței materialelor, fluxului de căldură, electromagnetismului, fizicii fluidelor etc. Metoda folosită de program este metoda elementului finit în fiecare modul fără excepție.

La pornirea programului apare lista cu toate modulele care sunt incluse în pachetul achiziționat de utilizator (figura 5.1) . În realizarea unei simulări, primul pas este de a selecta domeniul din care face parte fenomenul pentru care se realizează simularea.

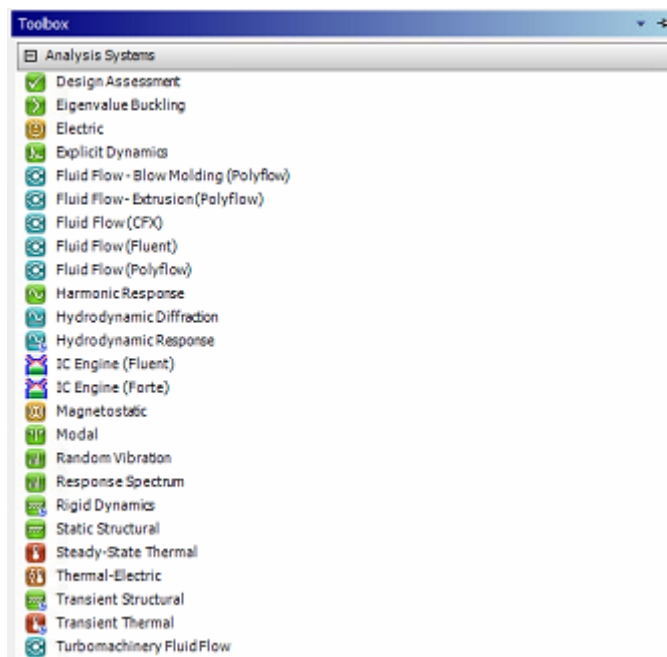


Figura 5.1 : Modulele din Ansys Workbench

Lângă aceste facilități, Workbench conține module suplimentare de realizarea geometriei în CAD, de post-procesarea simulărilor și o bază de date cu posibilitatea vizualizării unui număr mare de proprietăți fizice pentru materialele care sunt încorporate în module diferite (figura 5.2) .

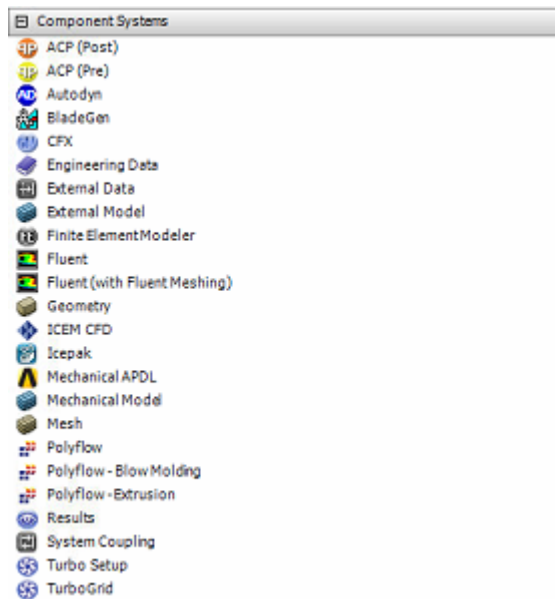


Figura 5.2 : Module suplimentare în Ansys Workbench

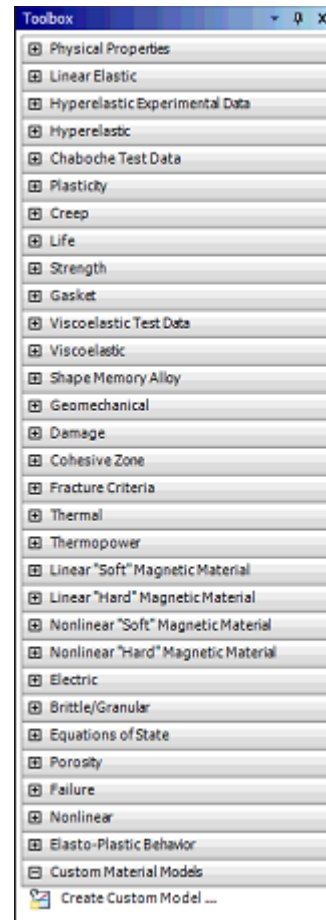


Figura 5.3 : Proprietăți fizice pentru materiale în Ansys

Modulul suplimentar engineering data preia o mulțime de proprietăți fizice pentru materialul selectat mai târziu. Cu această unealtă se poate găsi materialul optim pentru o anumită aplicație. Materialul de bază cu care lucrează programul în lipsa asociării unui alt material modelului este oțelul structural (structural steel). Modulul engineering data cu multitudinea de mărimi fizice care sunt încorporate în software sunt prezentate în figura 5.3. Este important de menționat că acest modul are opțiunea de a defini un material dând posibilitatea utilizatorului de a crea un material propriu care nu este inclus

în baza de date definindu-i toate proprietățile fizice necesare pentru realizare simulării dorite.

După alegerea modulului, apar pașii de urmat pentru realizarea simulării (figura 5.4).

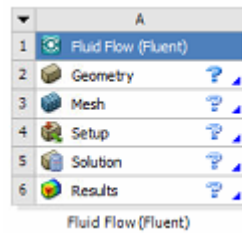


Figura 5.4 : Etapele definite de Ansys pentru realizarea unei simulări

Prima etapă este realizarea geometriei. Ansys 2017 are două software CAD încorporate: DesignModeler și Spaceclaim, însă utilizatorul poate să importe geometria specifică fenomenului simulat din alt program de grafică asistată de calculator. Aceste programe CAD ca și modulele de simulare au posibilitatea de a lucra atât cu geometrii bidimensionale cât și cu geometrii tridimensionale. La realizarea modelului CAD utilizatorul trebuie să țină cont de faptul că, etapa următoare este “meshing” – ul, adică discretizarea geometriei. Dacă aceasta conține detalii foarte fine în apropierea zonelor de interes, va scădea calitatea meshului. Unghiuri ascuțite, detalii de geometrie care acoperă mai multe ordini de mărime în dimensiune cauzează ca modulul meshing să asocieze geometriei elemente finite de asimetrie ridicată ceea ce rezultă scăderea calității acestuia, așa cum a fost prezentat în capitolul 3. Discretizarea de cât mai înaltă calitate este foarte importantă, deoarece ca și la orice calcul iterativ simularea va fi afectată de erori. Aceste erori, chiar dacă sunt mici la început, sunt propagate prin toată geometria care poate să cauzeze amplificarea substanțială a lor. [20],[21] În modulul meshing, utilizatorul poate să selecteze tipul elementelor (triunghi, pătrat, cub, tetraedre etc.) Există multiple setări legate de mărimea elementelor și tehnica cu care se realizează discretizarea. (figura 5.5).

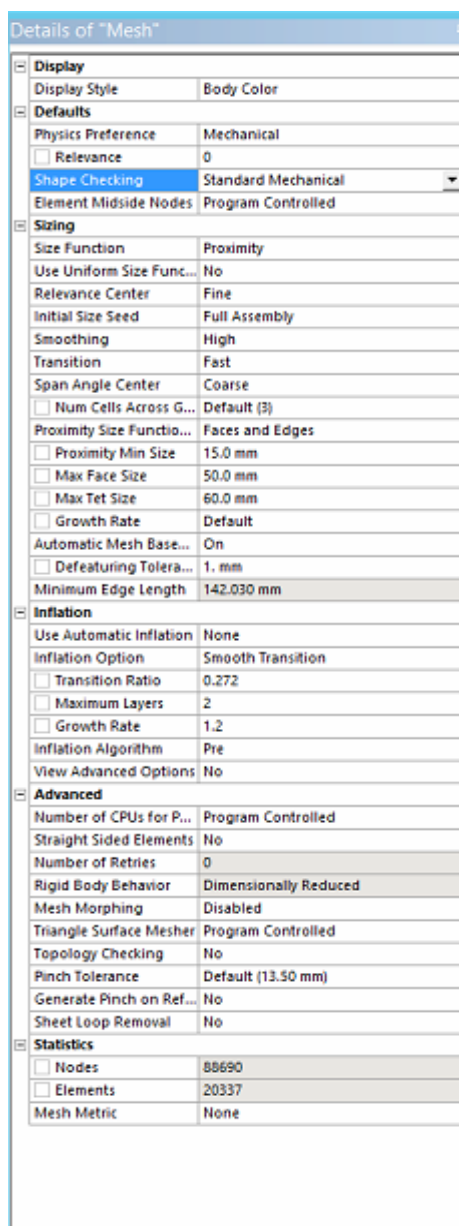


Figura 5.5 : Parametrii presetabile pentru discretizarea geometriei

Există patru funcții predefinite pentru evoluția mărimii elementelor:

- Uniform
- Proximity
- Curvature
- Adaptive

Uniform realizează o discretizare cu toate elementele de aceeași formă și

dimensiune. Această funcție realizează discretizările cele mai simple, dar de calitatea cea mai joasă și este recomandată utilizarea lor la modele simple, de înaltă simetrie.

Proximity are avantajul în cazul geometriilor care includ discontinuități, dând posibilitatea de a umple aceste scăpări cu un meshing alcătuit din mai multe straturi cu un gradient al schimbării mărimii acestora.

Curvature definește unghiuri optime dintre elemente de mesh și asigură o tranziție lină în cazul unei geometrii curbate.

Adaptive se folosește la geometrii cu multe detalii, deoarece calculatorul asociază fiecărei zone elementele de formă cea mai potrivită realizării discretizării fiecăreia. Așadar se pot folosi mai multe tipuri de elemente pentru realizarea unui singur meshing.

Dacă utilizatorul este interesat doar în fenomenele care au loc în anumite zone ale geometriei, se poate realiza o discretizare mai fină în apropierea acelor zone. De exemplu pe figura 5.6 se vede modelul cu discretizare mai fină în jurul punctului din stânga sus.

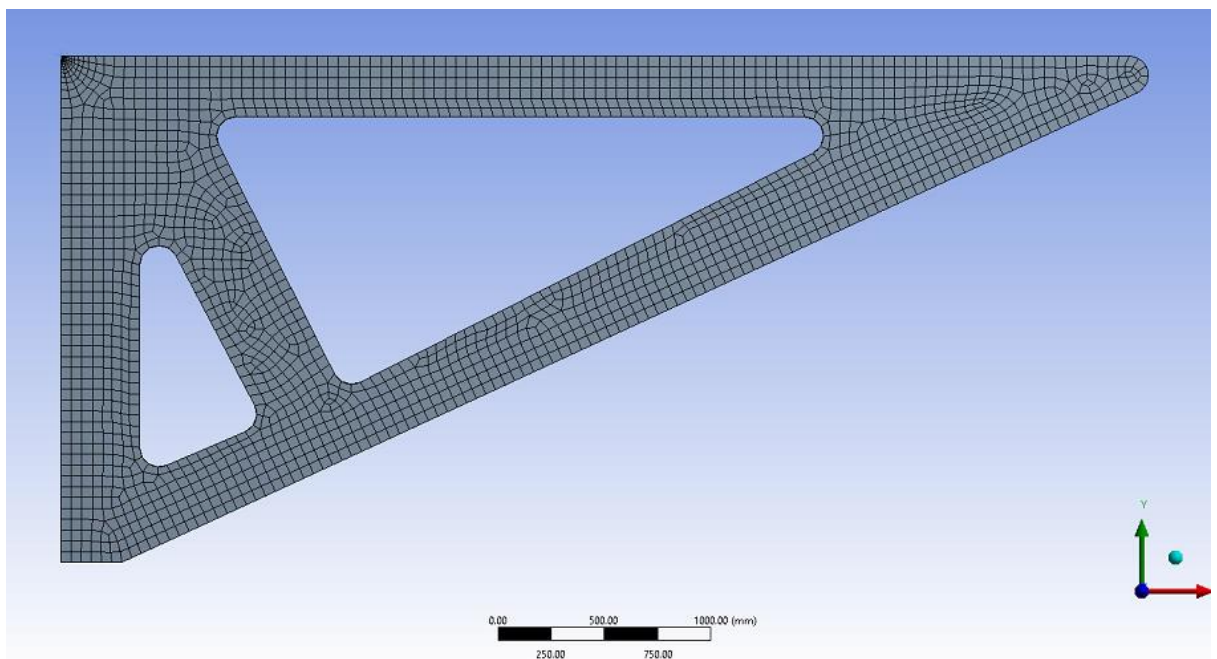


Figura 5.6 : Discretizare cu finețe variabilă

După realizarea discretizării, se poate verifica calitatea meshului realizat și se pot repara zonele cu discretizare de calitate mai scăzută pentru a îmbunătăți în prealabil calculele.

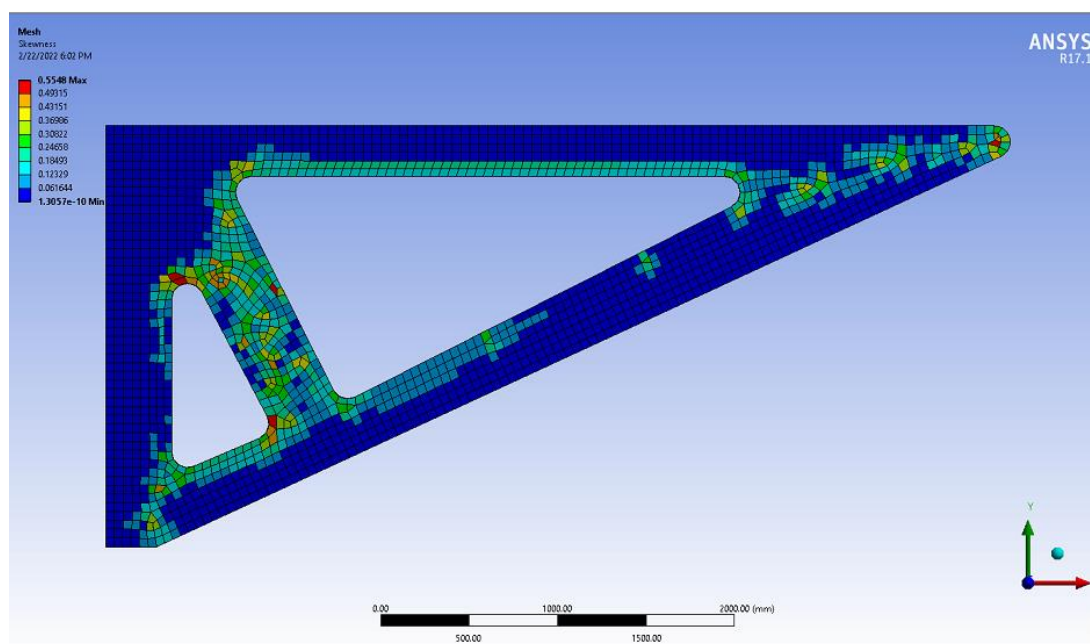


Figura 5.7: Asimetria (skewness) elementelor de mesh

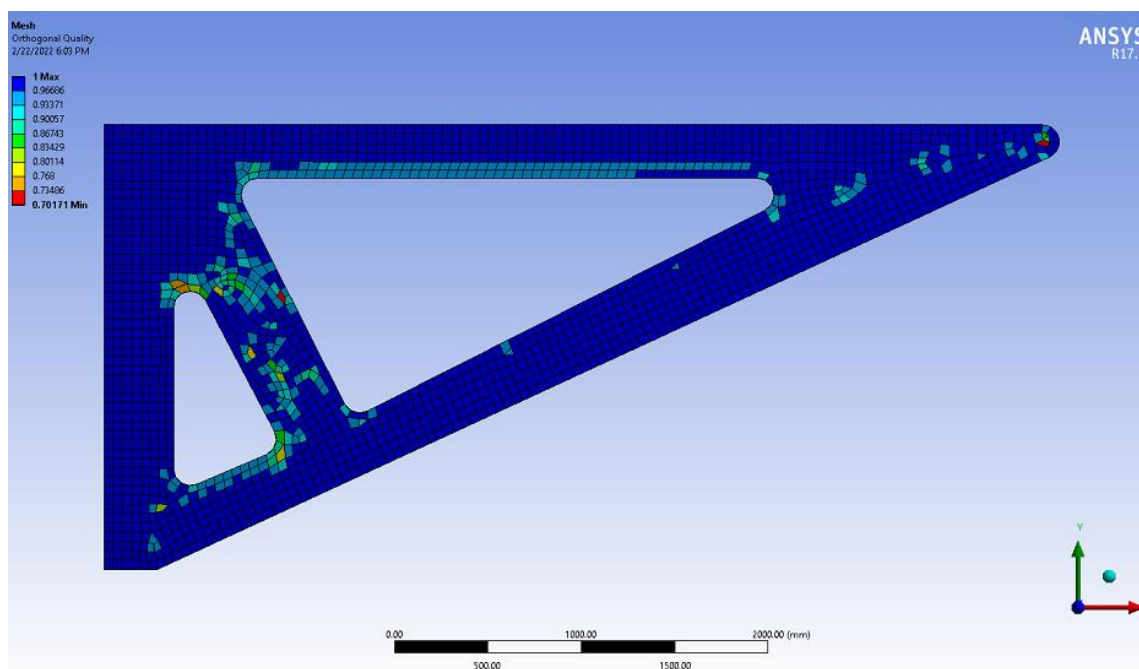


Figura 5.8: Ortogonalitatea elementelor de mesh

După cum a fost prezentat în capitolul 3, calitatea discretizării constă în cei doi parametri prezentați în figura 5.7 și figura 5.8. Se observă că elementele de asimetrie

ridicată și de ortogonalitate scăzută sunt aproximativ identice arătând meshingul de calitate mai scăzută în zonele respective.

Simularea proprie și metodele aferente vor fi prezentate cu ajutorul modelului realizat pentru această cercetare în următorul subcapitol.

5.2 Prezentarea modelului realizat pentru fenomenul studiat

Experimentele deja efectuate necesită crearea unei simulări în anumite cazuri. În cazul de față după ce rezultatele experimentale sunt în concordanță cu cele date de simulare, aceasta poate fi transformată astfel încât să realizeze fenomenul fizic studiat pentru condiții care sunt greu de produs în realitate (ex. temperaturi/presiuni foarte înalte sau scăzute).

Experimentul realizat pentru acest studiu se bazează pe fenomenele din fizica fluidelor, așadar va fi prezentat modul de funcționare și de realizare a modelului cu modulul Fluent din Workbench. Majoritatea problemelor din acest domeniu se rezolvă cu ajutorul ecuațiilor Navier – Stokes (5.2.1 și 5.2.2). Această pereche de ecuații diferențiale poate să fie rezolvată analitic numai pentru cazuri simple. Geometrii mai complicate necesită o soluție computațională, iterativă. Tehnica aplicării teoriei elementului finit în dinamica fluidelor se numește CFD (computational fluid dynamics).

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (5.2.1)$$

$$\rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} - \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (5.2.2)$$

Unde V – viteza, ρ – densitatea, p – presiunea totală, μ – vâscozitatea dinamică și g – accelerația gravitațională

Termenul $\rho \vec{g}$ reprezintă forțele exterioare, așadar dacă există o forță aplicată din exterior sau de natură electrostatică, aceasta trebuie introdusă în ecuație lângă acest termen.

Fenomenul studiat pentru cercetarea curentă este caracterizat de curgeri cu numărul Reynolds ridicat (puternic turbulent) și particule de combustibil cu diametre de ordinul micrometrilor. Simularea trebuie făcută astfel să aibă rezoluție suficientă pentru a urmări aceste particule.

În camera de ardere, injectarea combustibilului are loc într-o formă conică, așadar pentru cazul analizat, a fost realizată o geometrie simplă, conică care va conține amestecul de aer-combustibil pulverizat. (figura 5.9) .

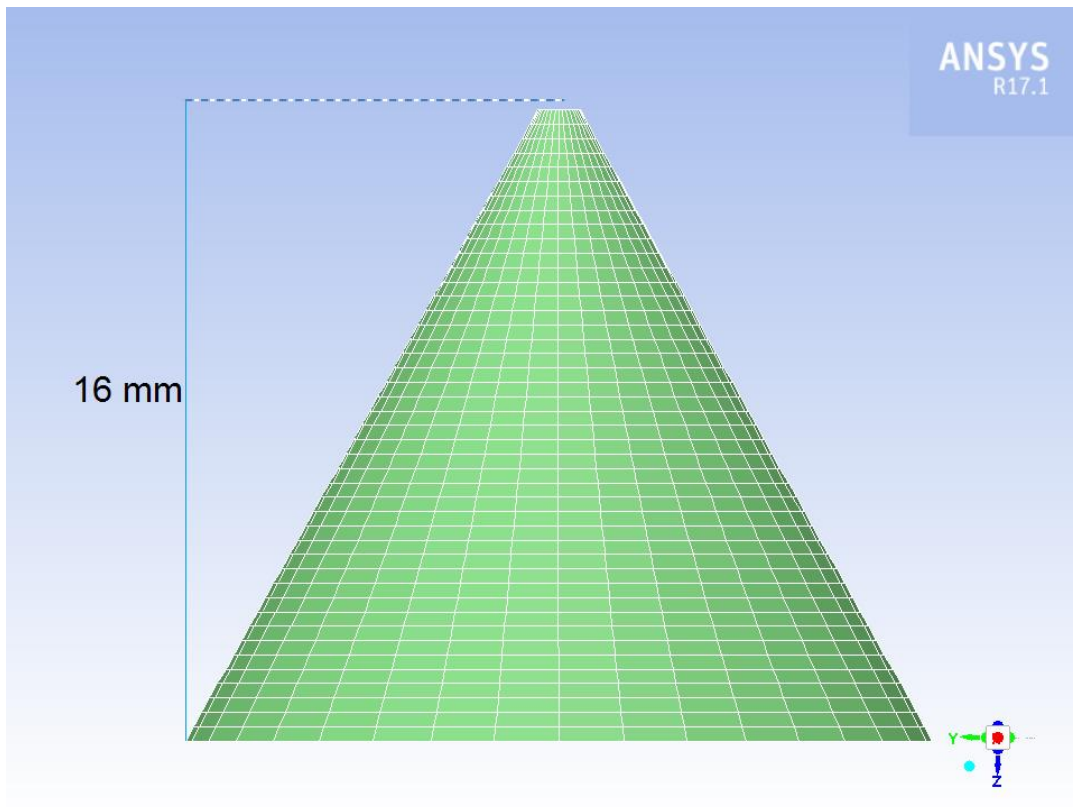


Figura 5.9: Geometria discretizată, conică pentru pulverizare

Acest mesh are următoarele caracteristicile de calitate prezentate în figura 5.10, care se consideră a fi în intervalul acceptabil.[22] , [23]

```
Mesh Quality:  
Minimum Orthogonal Quality = 1.92139e-01  
(Orthogonal Quality ranges from 0 to 1, where values close to 0 correspond to low quality.)  
Maximum Ortho Skew = 7.96565e-01  
(Ortho Skew ranges from 0 to 1, where values close to 1 correspond to low quality.)
```

Figura 5.10 : Parametrii de calitate a meshului

După realizarea meshului, următorul pas este setarea parametrilor și modelelor pe baza cărora calculatorul va efectua procesul iterativ pe geometria discretizată. Acești parametri se numesc condiții la limită (boundary conditions). Pentru acest proiect, condiții la limită sunt acele proprietăți care caracterizează procesul de injectare. Acestea sunt preluate din experimentele

fizice efectuate și sunt prezentate în tabelul 5.1. Acești parametri sunt identici pentru fiecare simulare (4 tipuri de combustibil cu câte 5 valori de temperatură).

Tabel 5.1 : Parametrii constanți pentru simulări

Numărul de duze	1
Diametrul orificiului duzei	300 μm
Presiunea de injectare	180 atm
Presiunea în camera de ardere	1 atm
Debitul masic al combustibilului	1 g/s

În program injecția se definește prin setarea unui model multifazic de curgere (aer + combustibil) și cu ajutorul următorilor parametri: poziția, presiunea de injectare, temperatura, debitul masic și direcția.

În afară de injecție este necesară setarea a două modele, una pentru curgere și una pentru fărâmițare (modul de rupere a uleiului în bucăți). Am folosit un model de curgere turbulentă în loc de laminară deoarece în industria auto, injectările au loc cu viteze foarte ridicate (~ 100 m/s) ceea ce induce formarea vârtejurilor caracteristice curgerii turbulente. Modelul poartă numele de k-epsilon ([24],[25]) și presupune ecuații (care guvernează fenomenul simulat) care favorizează găsirea soluției optime pentru aceste tipuri de curgeri. Modelul celălalt este pentru fărâmițare (breakup model). Pentru aplicația acutală am ales modelul Wave-breakup model ([26],[27]) care presupune două constante. Valorile acestor constante au fost setate astfel încât rezultatele din simulare să fie în concordanță cu cele din experimente validând astfel modelul și asigurând corectitudinea rezultatelor pentru simulări neefectuate fizic. Acest model se folosește în cazul curgerilor cu numere Reynolds mari și consideră o fărâmițare proporțională cu viteza relativă între cele două faze (lichid și gaz / uleiul și aerul).

Modulul Fluent dă posibilitatea de a defini materiale care nu se află în baza de date, așadar pentru acest model am beneficiat de acest avantaj al softwareului.

Materialele de pulverizat (SE4RP, NAB, NAB+FPBC1 și NAB+FPBC2) au fost definite prin mărimile fizice care sunt importante din punctul de vedere a pulverizării și variația acestora în funcție de temperatură. Aceste mărimi sunt incluse în tabelul 5.1 pentru fiecare combustibil și temperatură. Dependența de temperatură a acestor mărimi se definește prin punctele experimentale

obținute, iar calculatorul presupune o dependență liniară între aceste puncte. Această tehnică de definire a proprietăților fizice se numește *piecewise-linear* ([28],[29]) (figura 5.11) .

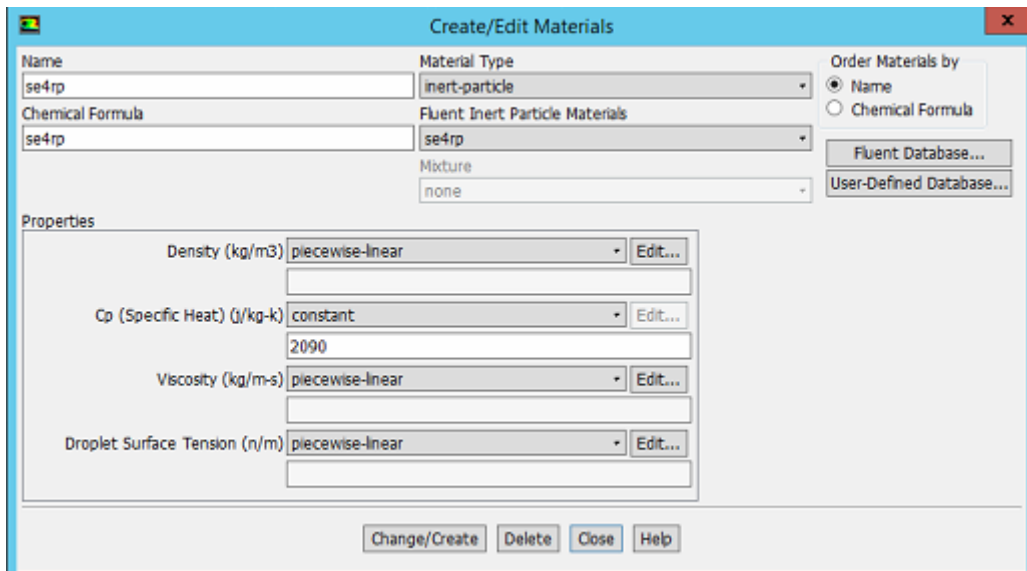


Figura 5.11: Modul de definire a proprietăților fizice pentru un material

După cum a fost prezentat în capitolul 3, simularea lucrează cu valori reziduale pe care încearcă să le minimizeze ([30], [31]). Abaterea maximă acceptată la care trebuie să ajungă programul cu precizia este de asemenea presetabilă și are mai mulți parametri (figura 5.12) .

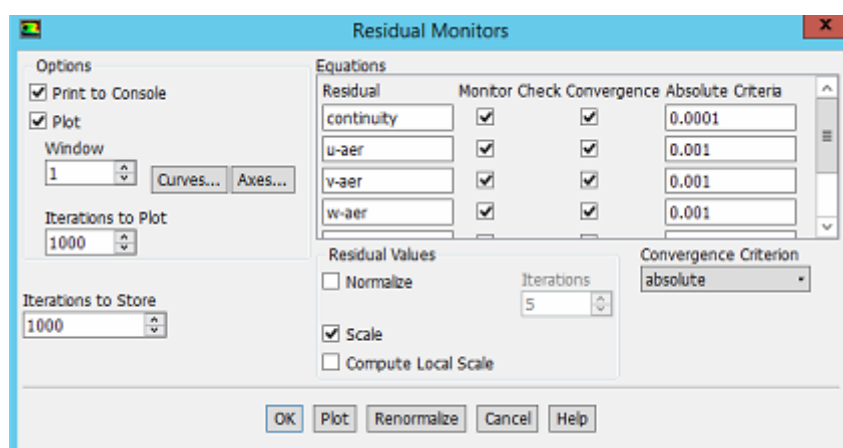


Figura 5.12: Presetarea rezidualelor maxime permise

După parcurgerea acestor etape, urmează setarea numărului pașilor de timp (time steps) și durata unui pas de timp. Produsul acestor două dă durata totală a fenomenului simulat. De asemenea trebuie setat numărul de iterații cu care un time step este simulat. Acestea se setează de preferință,

dar este recomandat includerea unui număr de iterații / pas de timp suficient de mare astfel încât soluția să se afle în interiorul limitelor permise de erori presetate anterior (figura 5.12).

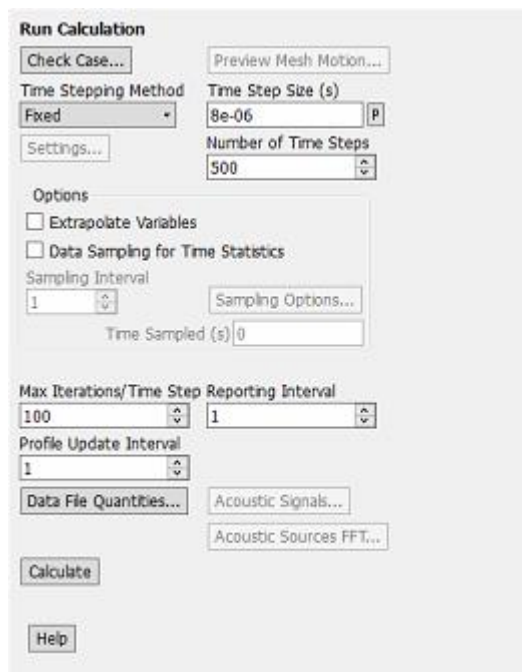


Figura 5.13: Setarea parametrilor de durată

Se poate întâmpla, ca în timpul calculului programul sesizează divergența rezidualelor neputând oferi o soluție. În acest caz modelul trebuie modificat astfel încât să fie posibilă continuarea calculelelor. În timpul simulării, rezidualele sunt monitorizate în timp real și utilizatorul poate să le urmărească (figura 5.14).

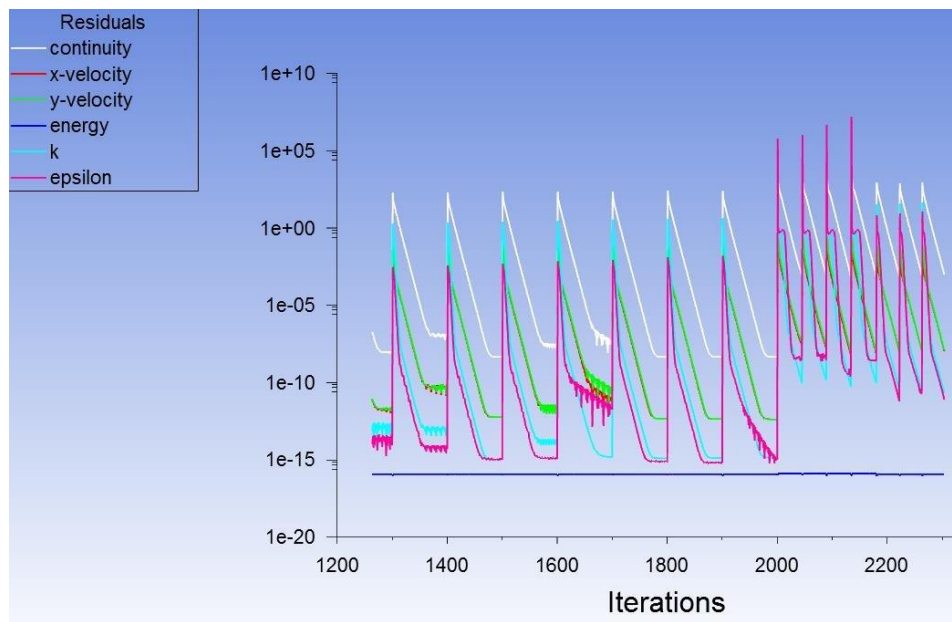


Figura 5.14 : Reziduale monitorizate în timp real

După parcurgerea numărului de pași de timp setați de utilizator și atingerea convergenței pentru fiecare, simularea se sfârșește și urmează etapa de post-procesare, adică exportarea și prelucrarea datelor relevante din punctul de vedere a analizei efectuate de utilizator. [32]

6. Rezultate și interpretări

Obținerea rezultatelor fizice și din simulări constă în analiza conului de amestec de aer și combustibil pulverizat. Combustibilul este prezent în formă de particule/picături de diametre de ordinul sutelor de micrometri. Procesul de fărâmițare are un rol esențial. Cu cât este mai mare suprafața de contact între aer și picăturile de combustibil, cu atât interacțiunea este mai bună și rezultă o ardere mai apropiată de ardere completă. Cu alte cuvinte, scăderea diametrului mediu al picăturilor rezultă creșterea eficienței de combustie. Din acest motiv din simulări au fost scoase rezultatele care arată diametrul mediu a picăturilor de aer pe baza conului de 16 mm. Aceste măsurători au fost efectuate și cu dispozitivul experimental cu ajutorul microscopului optic și procesarea imaginii obținute.

Comparația rezultatelor computaționale cu cele experimentale sunt cuprinse în tabelul 6.1 și figura 6.1.

Tabel 6.1 : Diametre medii simulate și experimentale pentru cele patru tipuri de combustibil și cele cinci temperaturi studiate

Temperatura (°C)	Diametrul mediu a particulelor pe baza conului de amestec (μm)							
	SE4RP		NAB		NAB+FPBC1		NAB+FPBC2	
Rezultate Exp/sim	EXP	SIM	EXP	SIM	EXP	SIM	EXP	SIM
0	161	169	225	230	220	224	225	229
10	90	96	191	199	185	193	187	179
20	66	60	148	140	145	141	145	140
30	48	54	81	88	78	84	82	83
40	32	35	67	62	60	64	63	57

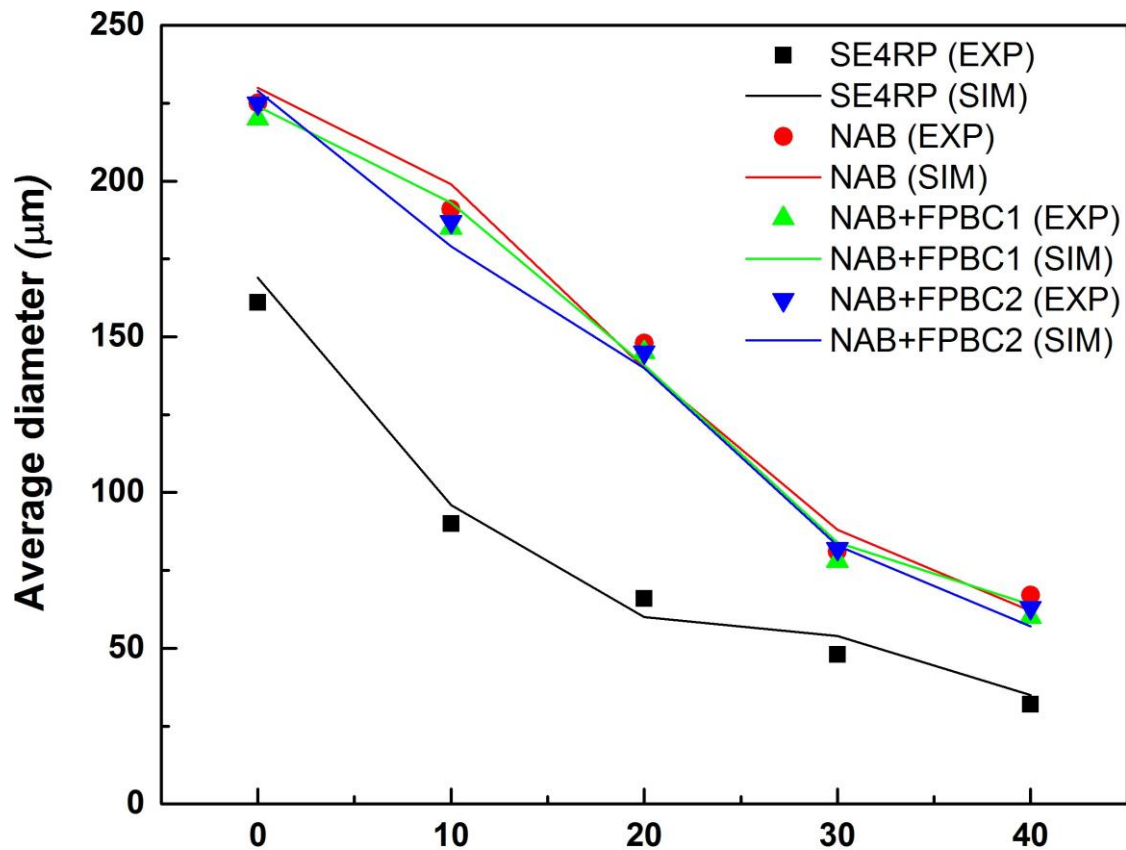


Figura 6.1 : Diametre medii simulate și experimentale pentru cele patru tipuri de combustibil și cele cinci temperaturi studiate

Simulările prezintă concordanță cu măsurători fizice de diametru în limita unei erori de aproximativ 8% . Așadar, modelul computațional se validează prin măsurători de diametru mediu. Un alt tip de investigație, dar care este legată tot de diametrul picăturilor este stabilirea distribuției particulelor în funcție de diametre. Compararea acestor tipuri de rezultate este prezentată în figura 6.2 pentru motorină de referință SE4RP.

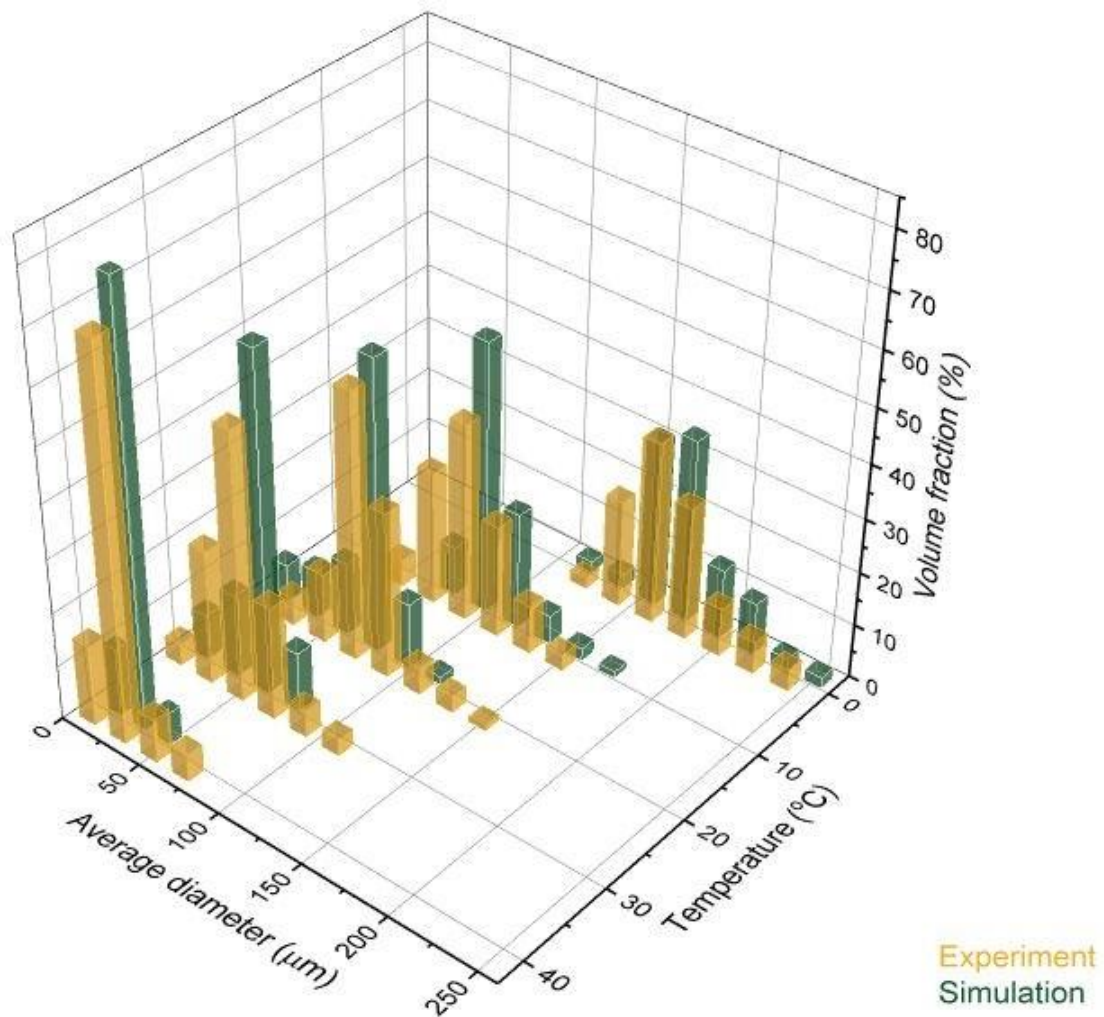


Figura 6.2 : Distribuția picăturilor în funcție de diametrul lor (experimental vs. simulat)

De asemenea, se poate observa pe această reprezentare o bună concordanță a distribuției diametrelor. Distribuția nu este de tip Gaussian deoarece nu este simetrică față de axa centrală a imaginii grafice. Aceasta se numește distribuție Rosin-Rammler și este mai aplatizată în direcția valorilor mai mari de diametru decât în direcția celor mai mici. Explicația este că picăturile mai mici se formează din picăturile mai mari, care inițial acoperă un interval de diametre cu distribuție uniformă. “Fotografierea” acestui fenomen la o distanță finită față de punctul de injecție (16 mm în cazul de față) va da o imagine intermediară între distribuția uniformă și starea total pulverizată (după distanță infinită, toate picăturile au diametrul mediu a distribuției precedente). Asimetria distribuției provine din faptul că aproape toate picăturile se formează din picături mai mari decât diametrul lor final, așadar particule cu diametre mai apropiate

de cele ale particulelor inițiale/formatoare au o distribuție mai uniformă și un număr mai mare într-un interval mai larg deoarece în aceste stări se ajunge prin mai puține rupturi decât în stări de diametre mai scăzute.

Distribuția Rosin – Rammler are următoarea formulă matematică:

$$Y = e^{(-d/D)^n} \quad (6.1)$$

și este prezentă în cazul mai multor fenomene din natură, de exemplu distribuția mărimilor bulelor de spumă. Ecuația se explică în felul următor: Frațiunea de masă a particulelor cu diametre mai mari decât o valoare d este egală cu Y , iar D și n sunt parametri constanți (constanta de dimensiune și parametrul de distribuție). [33], [34]

Se remarcă faptul că, odată cu creșterea temperaturii, distribuția devine mai strânsă și cu coloana centrală din ce în ce mai accentuată, adică odată cu creșterea temperaturii, starea de fărâmițare se apropie de cea a fărâmițării totale, când toate picăturile au aceeași dimensiune.

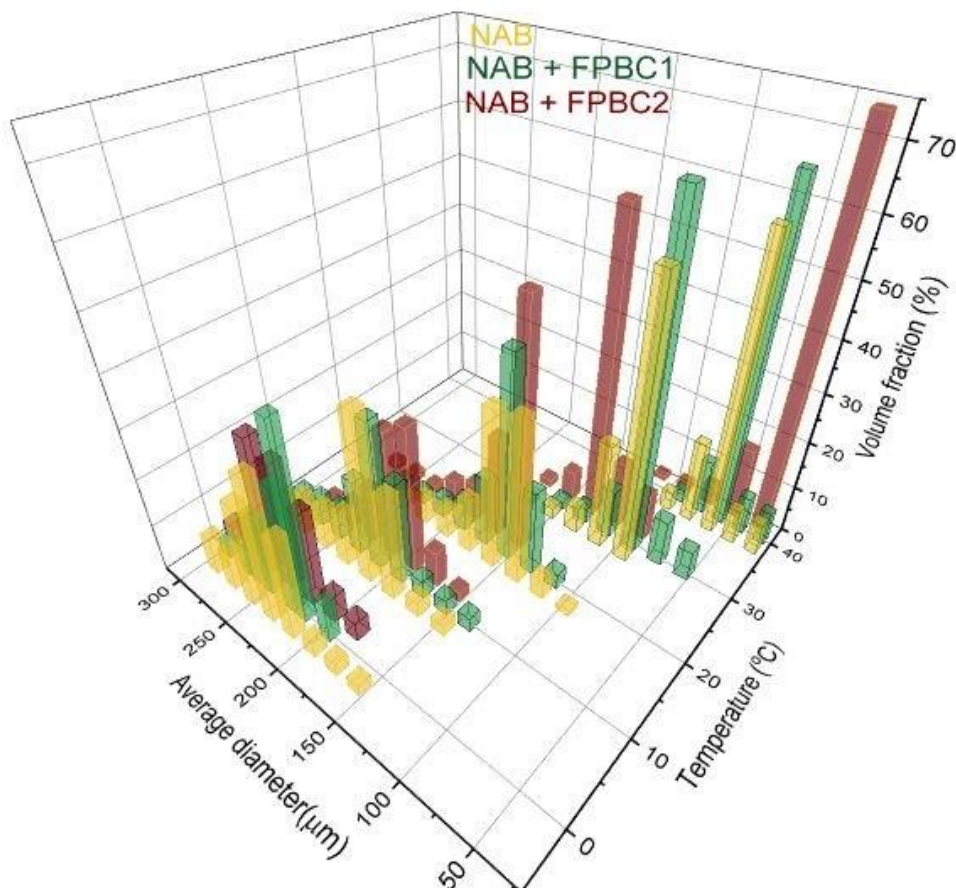


Figura 6.3 : Comparația distribuțiilor uleiului NAB neaditvat cu celor aditivate

Se observă acest tip de distribuție și pentru ceilalți combustibili, însă valorile lor de diametre medii și forma distribuției lor seamănă foarte mult, deoarece proprietățile lor fizice se diferă foarte puțin (figura 6.3).

S-a realizat reprezentarea conului de amestec în funcție de tipul de combustibil și temperaturile studiate pentru a arăta deplasarea diametrului mediu în funcție de temperatură. Figura 6.4 reflectă tendințele observate și discutate pentru distribuții și diametre medii.

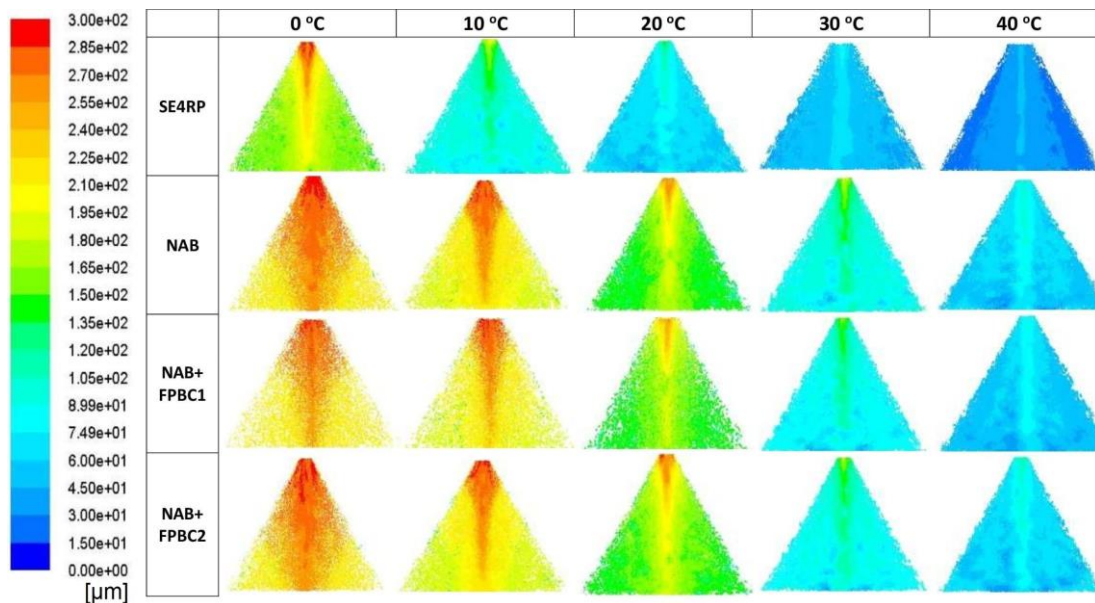


Figura 6.1: Reprezentarea vizuală a conului de amestec pentru fiecare condiție studiată în funcție de diametrul picăturilor

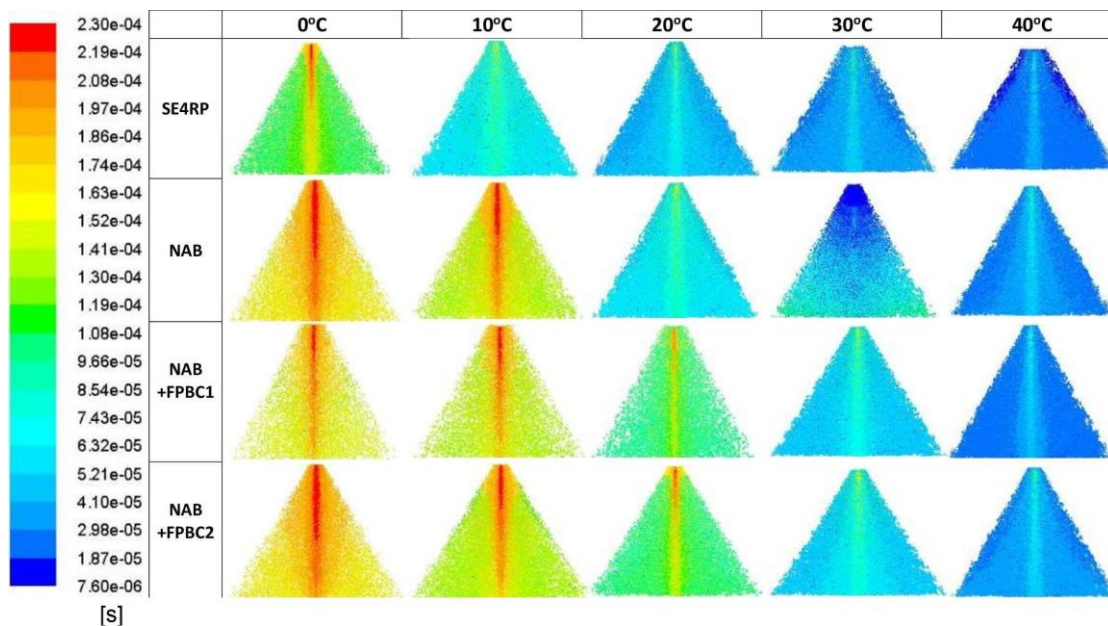


Figura 6.2 : Timpul de viață a picăturilor înainte de rupere pentru toate condițiile studiate

În final, cu ajutorul simulărilor s-au obținut rezultate legate de timpul de viață a unei picături înainte de a suferi o nouă rupere (figura 6.5).

Timpul de viață a particulelor scade cu creșterea temperaturii, cu cât este mai mare temperatura cu atât au loc mai multe ruperi. Cu creșterea numărului ruperilor, distribuția devine mai apropiată de funcție delta (fărâmițare totală), adică pe măsură ce crește temperatura, combustia va deveni din ce în ce mai eficientă.

Concluzii

Rezultatele experimentale sunt în concordanță cu cele obținute prin simulări în limita erorilor de măsură. Așadar, scopul creării unui model computațional pentru fenomenul de pulverizare studiat a fost atins. Având în vedere această concordanță pentru rezultatele obținute pentru motorina de referință SE4RP, celelalte simulări care analizează NAB, NAB+FPBC1 și NAB+FPBC2 devin dovedite și pot să fie folosite pentru a extrage alte tipuri de rezultate, precum timpul mediu de viață a picăturilor în cazul de față. Posesia acestor rezultate ajută la tragerea mai multor concluzii, față de cazul în care cercetătorul are la dispoziție doar rezultatele experimentale. Simulările CFD (computational fluid dynamics) au confirmat că pe măsură ce crește temperatura combustibilului pulverizat, crește și eficiența de fărâmițare, adică suprafața de contact specific devine mai mare între aer și picăturile de ulei. La fel, forma distribuției diametrelor picăturilor (de tip Rosin-Rammler) de combustibil tinde către funcția delta (fărâmițare totală) cu creșterea temperaturii. Concluzia generală este că nu numai temperatura, ci și tipul combustibilului influențează calitatea pulverizării. Având în vedere faptul că uleiurile bio au densitate și vâscozitate mai mare decât combustibilii fosili, este mai greu de atins starea de pulverizare optimă.

Măsurătorile de timp mediu de viață și reprezentarea conului întreg de amestec ar fi fost foarte greu de executat fizic, așadar această cercetare este o evidență pentru puterea, simplitatea și utilitatea tehnologiei CFD, însă trebuie menționat că simulările nu o să înlocuiască niciodată datele experimentale în forma lor actuală, deoarece fiecare simulare necesită o validare fizică, dar metoda CFD bazată pe teoria elementului finit rămâne o unealtă puternică atât pentru cercetători cât și pentru ingineri.

Bibliografia

- [1] Peter H Poole, Ivan Saika-Voivod and Francesco Sciortino *Density minimum and liquid–liquid phase transition* Published IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Condensed Matter Volume 17, Number 43 2005
- [2] Ir. R. Rutgers *Relative viscosity and concentration* J. Phys.: Condens volume 2 pages 305–348 1962
- [3] Howard D. Goodfellow, Eric F. Curd *Adjacent Fluid Layer* ScienceDirect 2020
- [4] <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/viscosity-of-liquids-and-gases> (accesat la data 12.05.2022)
- [5] Abtin Ameri *Improving the Numerical Stability of Higher Order Methods with Applications to Fluid Dynamics* ResearchGate 2019
- [6] Zahir U Ahmed, Roger E Khayat, Philippe Maissa and Christian Mathis *Axisymmetric annular curtain stability* Fluid Dyn. Res. p 8-12 2017
- [7] Domingo-Alvarez P, Pierre B, Ghislain L, Vincent M and Frederic G *Impact of Spray Droplet Distribution on the Performances of a Kerosene Lean/Premixed Injector Flow*, Turbulence and Combustion pages 7-8 2019
- [8] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reynolds-number> (accesat la data 12.05.2022)
- [9] F.J. Salvador et. al: *Complete modelling of a piezo actuator last-generation injector for diesel injection systems* ResearchGate 2012
- [10] C. Tuzu, G. Motoiu: *Motoare diesel* Editura tehnică, București 1971
- [11] Karan Kumar Pradhan, Snehashish Chakraverty, *Finite Element Method* Computational Structural Mechanics, 2019
- [12] Katsunari Okamoto *Finite element method* Fundamentals of Optical Waveguides (Second Edition), 2006
- [13] Dumitru Marincas *Combustibili, lubrifianți și materiale speciale pentru automobile* Editura Didactică și Pedagogică București 1983

- [14] Jordi-Roger R, Grau B, Rita P *Characterization of the Surface Tension of Vegetable Oils to be Used as Fuel Diesel Engines* Elsevier Ltd. p 236-237 2012
- [15] <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/surface-tension> (accesat la data 12.05.2022)
- [16] Rompetrol S.A. www.rompetrol.ro (accesat la data 12.05.2022)
- [17] Motic Group, www.motic.com (accesat la data 12.05.2022)
- [18] Ambarita H, Siregar M R, Kishinami K, Daimaruya M, Kawai H *Application of CFD* J. Phys.: Conf. Ser. p 10-11 2019
- [19] Luis B and Chol-Bum K *A Review on Liquid Spray Models for Diesel Engine Computational Analysis* Army Research Laboratory p 15-16 2014
- [20] Carlos Lozano, Jorge Ponsin *Singularity and Mesh Divergence of Inviscid Adjoint Solutions at Solid Walls* Researchgate 2022
- [21] Lin Shi, Yizhou Yu *Inviscid and incompressible fluid simulation on triangle meshes* 2004
- [22] Rao V. Garimella Mikhail J. Shashkov Patrick M. Knupp *Triangular and quadrilateral surface mesh quality optimization using local parametrization* ScienceDirect: Journal of computational physics 2004
- [23] Aaron Katz Venkateswaran Sankaran *Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes* ScienceDirect: Journal of computational physics 2011
- [24] El-Tahry, S H *K-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows* J. Energy 1983
- [25] Osama A. Marzouk E. David Huckaby *Simulation of a Swirling Gas-Particle Flow Using Different k-epsilon Models and Particle-Parcel Relationships* Engineering Letters 2010
- [26] Haobu Gao Xiangrong Li Jiye Xue Honglin Bai Xu He Fushui Liu *A modification to the WAVE breakup model for evaporating diesel spray* ScienceDirect: Applied Thermal Engineering 2016
- [27] Franz. X. Tanner *Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays* SAE International 1997
- [28] David Gratton Karen Willcox *Reduced-Order, Trajectory Piecewise-Linear Models for Nonlinear Computational Fluid Dynamics* CFD Methods: Design & Applications 2012
- [29] Hiroaki Nishikawa *Accurate Piecewise Linear Continuous Approximations to One-Dimensional Curves: Error Estimates and Algorithms* CFD Notes 1998

[30] Peter Knoedel Stefanos Gkatzogiannis Thomas Ummenhofer *Practical aspects of welding residual stress simulation* ScienceDirect: Journal of Constructional Steel Research 2017

[31] Strubelj L, Tiselj I *CFD simulation of Kelvin-Helmholtz instability* International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005

[32] ANSYS Fluent User's Guide (november 2013)

[33] M V Zapevalov, N S Sergeev , G V Redreev *Impact of Spray Droplet Distribution on the Performances of a Kerosene Lean/Premixed Injector* Earth Environ. Sci. 2021

[34] X.C. Fu, J.J. Xia, Y. Chen, L.S. Jing, Z.M. Bao, T. Chen, X.Z. Zhang, C.Hu, R.J. Wang and H.S. Yan *Comparison of two analysis methods on bubble size distribution* J. Phys.: Conf. Ser. p 2-5 2017