

ÎNCĂRCĂTURI DE PULBERE DE AZVÂRLIRE/PROPERGOL SOLID DE MARE ENERGIE OBTINUTE PRIN FABRICAȚIE ADITIVĂ

Etapa 3 Implementare date balistice ale elementelor de pulbere de azvârlire/propergol solid în modele de balistică interioară. Testare la impact a elementelor de pulbere de azvârlire/propergol solid

Activitatea 3.1 – Dezvoltare model de balistică interioară cu parametri globali

Balistica interioară este o știință tehnică având ca obiect studiul legității proceselor ce au loc în timpul mișcării proiectilului în interiorul țevii guri de foc sub acțiunea gazelor de pulbere sau în timpul combustiei încărcăturii de propulsie în camera de ardere a motoarelor-rachetă cu propergol solid.

Balistica interioară a gurilor de foc

Fenomenul tragerii – totalitatea proceselor ce se desfășoară în timpul mișcării proiectilului în țeava guri de foc sub acțiunea forței de presiune a gazelor de pulbere – studiat de balistica interioară este un fenomen complex (termochimic, mecanic, termodinamic și gazodinamic), foarte rapid, care constă, în principal, în transformarea energiei chimice a încărcăturii de pulbere, mai întâi în energie termică a gazelor de pulbere, iar apoi în energie cinetică de mișcare a acestora, a proiectilului și a părților reculante ale guri de foc (părțile care se deplasează în direcția opusă mișcării proiectilului).

Din cauza complexității și rapidității, fenomenul tragerii cu o gură de foc nu poate fi studiat în toată amploarea lui prin metode directe. Ca urmare, în vederea rezolvării problemelor teoretice și practice, Balistica interioară apelează adesea la schematizarea proceselor studiate prin adoptarea unor ipoteze simplificatoare, care permit soluționarea problemelor, la început într-o primă aproximație urmând ca, ulterior, să se îmbunătățească rezultatele obținute prin luarea în considerare a influenței factorilor neglijăți.

Pentru studiu, fenomenul tragerii cu o gură de foc este împărțit, adesea, pe perioade. Perioadele fenomenului tragerii cu o gură de foc pot fi următoarele:

- A. Perioada preliminară – începe în momentul aprinderii încărcăturii de pulbere, datorită gazelor fierbinți și particulelor solide incandescente ale amorsei, și ține până în momentul începerii mișcării proiectilului. Acestei perioade îi este caracteristică arderea pulberii la volum constant, când presiunea gazelor crește de la presiunea de amorsoare $p_a=1,96-4,90$ MPa până la presiunea de tăiere a brâului forțator în ghinturile țevii (presiunea de forțare) $p_0=24,5-49$ MPa.
- B. Perioada I – ține din momentul mișcării proiectilului până în momentul arderii încărcăturii de pulbere, perioadă în care pulberea arde la volum variabil, ca urmare a deplasării proiectilului în țeava guri de foc. La începutul perioadei I – când viteza proiectilului nu este încă prea mare – viteza de formare a gazelor este mai mare decât viteza de creștere a volumului dinapoia proiectilului și, prin urmare, presiunea gazelor de pulbere crește până la atingerea presiunii maxime $p_{\max}$. Ulterior, viteza proiectilului se mărește, ceea ce face ca, de la un anumit moment, viteza de creștere a volumului dinapoia proiectilului să fie mai mare decât viteza de formare a gazelor, fapt pentru care presiunea gazelor de pulbere începe să scadă și descrește până la terminarea arderii pulberii. Deoarece în această perioadă se efectuează de către gaze cea mai mare parte a lucrurilor mecanice, ea se mai numește și principală.
- C. Perioada a II-a – este cuprinsă între momentul terminării arderii încărcăturii de azvârlire și momentul când proiectilul părăsește gura de foc. În această perioadă, deși nu se mai formează gaze, cele existente în țeava guri de foc – posedând încă o mare rezervă de

energie – destinându-se, execută lucru mecanic sporind în continuare viteza proiectilului. La începutul perioadei a II-a viteza proiectilului este deja destul de mare și continuă să crească, fapt pentru care va străbate în timp scurt spațiul până la gura țevii. Din această cauză, se neglijează pierderile prin cedare de căldură și se poate considera că destinderea gazelor de pulbere este adiabatică, fapt pentru care această perioadă se mai numește și perioada destinderii adiabatică.

- D. Perioada a III-a – se desfășoară în afara gurii de foc, dar în imediata ei proximitate, când gazele de pulbere care se scurg din țevă după ieșirea proiectilului acționează atât asupra acestuia, cât și asupra țevii, fapt pentru care se mai numește și perioada acțiunii posterioare a gazelor. După ce proiectilul a părăsit țeava gurii de foc, gazele de pulbere – aflate încă la presiune și temperatură ridicate – se scurg din țevă cu viteză mult mai mare decât a proiectilului și, ca urmare, un timp contribuie la mărirea vitezei acestuia. Perioada acțiunii posterioare a gazelor asupra proiectilului durează până când viteza gazelor devine egală cu viteza proiectilului care, în acest moment, este maximă, iar asupra țevii durează până când presiunea gazelor din țevă scade până la aproximativ 0,174 MPa.

În funcție de ipotezele simplificatoare adoptate, modelul matematic, cu parametri globali, al fenomenului tragerii va replica fenomenul real într-o măsură mai mică sau mai mare. În general, următoarele ipoteze simplificatoare sunt acceptate:

- pulberea de azvârlire arde în conformitate cu legea geometrică;
- viteza de ardere este exprimată sub forma unei legi Vieille;
- presiunea la care pulberea arde este considerată o presiune medie;
- mișcarea gazelor de pulbere în țeava gurii de foc se consideră cvasipermanentă și unidimensională;
- lucrurile mecanice datorate mișcării de rotație a proiectilului se iau în considerație printr-un coeficient de masă fictivă;
- în timpul mișcării proiectilului în țeava gurii de foc, compoziția gazelor de pulbere nu se schimbă, ceea ce permite ca forța și covolumul să fie considerate constante, iar căldurile specifice la presiune constantă c_p și la volum constant c_v sunt egale cu valorile lor medii pentru întreaga gamă de variație a temperaturii;
- arderea încărcăturii de pulbere de azvârlire începe după arderea încărcăturii de inițiere, care produce presiunea p_a în camera de încărcare;
- deformarea plastică a brâului forțator pe ghinturile țevii este considerată instantanee și nu graduală, așa cum se întâmplă în realitate, considerând că proiectilul nu se mișcă până când gazele de ardere nu ating presiunea p_0 , denumită presiune de forțare;
- lucrurile mecanice pentru deformarea elastică a țevii și energia termică care se pierde prin scăparea gazelor printre brâul forțator și țevă nu se iau în considerație;
- mișcarea proiectilului este studiată până ce proiectilul părăsește țeava gurii de foc.

Sistemul de ecuații diferențiale asociat modelului de balistică interioară cu parametri globali este sintetizat în STANREC 4367 Ed. 4 – *Thermodynamic Interior Ballistic Model with Global Parameters*, fiind constituit din următoarele elemente:

- i) legea vitezei de ardere a pulberii de azvârlire;
- ii) legea geometrică de formare a gazelor de pulbere;
- iii) ecuația vitezei de formare a gazelor de pulbere;
- iv) ecuația de stare a gazului real;
- v) ecuația mișcării de translație a proiectilului;
- vi) ecuația mișcării de translație a părților reculante a gurii de foc;
- vii) ecuația de transformare a energiei termice în energie mecanică, unde lucrurile mecanice efectuate de gazele de pulbere, precum și diferitele forme de energie termică consumate în timpul tragerii cu o gură de foc sunt următoarele:
 - lucrul mecanic care se consumă pentru a imprima proiectilului mișcarea de translație în țeava gurii de foc;
 - lucrul mecanic care se consumă pentru a imprima proiectilului mișcarea de rotație în țeava gurii de foc;

- lucrul mecanic care se consumă pentru mișcarea gazelor și a pulberii nearese;
- lucrul mecanic care se consumă pentru a învinge frecare dintre proiectil și canalul țevii gurii de foc;
- lucrul mecanic care se consumă pentru deplasarea părților reculante ale gurii de foc;
- lucrul mecanic care se consumă pentru învingerea rezistenței aerului în canalul țevii gurii de foc;
- energia termică ce se consumă pentru încălzirea țevii.

Studiul de caz este realizat pentru tunul calibru 76 mm model 1942 unde elementele de pulbere din încărcătura de azvârlire sunt de tipul 9/7, adică elemente cilindrice de pulbere cu 7 canale. Elementele cilindrice cu 7 canale au un canal central iar celelalte 6 canale sunt amplasate radial în jurul acestuia, astfel încât distanța dintre oricare doua canale vecine să fie aceeași (Fig. 1).

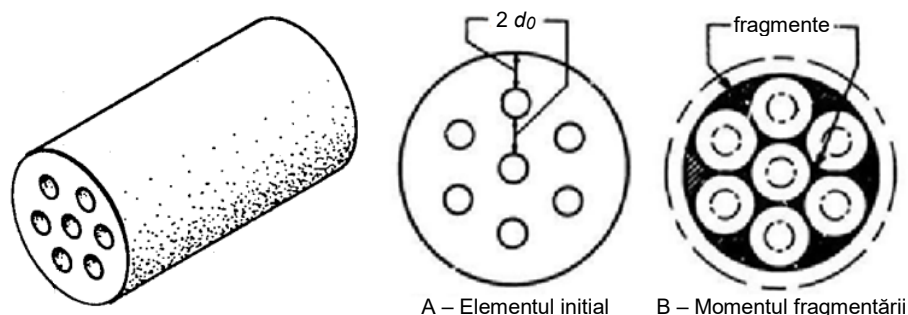


Fig. 1 Arderea cu fragmentare a elementului cilindric de pulbere cu 7 canale

În mod uzual dimensiunile elementului cilindric de pulbere cu 7 canale sunt următoarele:

- diametrul canalului $d_0 = e_1$, unde e_1 este semigrosimea elementului de pulbere;
- diametrul elementului $D_0 = 11d_0$;
- lungimea elementului $2c = (2 \div 2,5) D_0$.

Datorită configurației, în condițiile arderii pe întreaga configurație a elementului de pulbere, elementele multicanal ard cu fragmentare. În timpul arderii, are loc pe de o parte reducerea diametrului exterior iar pe de altă parte lărgirea canalelor interioare. Fragmentarea are loc atunci când suprafețele generate prin lărgirea canalelor interioare și reducerea diametrului interior devin tangente. În cazul elementului cilindric de pulbere cu 7 canale, acest moment duce la apariția a 12 prisme, 6 mari și 6 mici.

Din acest motiv, se poate afirma că pulberile multicanal ard în 2 etape, fiecare dintre etape având propriul set de valori pentru caracteristicile de formă (Tab. 1):

- etapa I – până la fragmentarea elementelor de pulbere;
- etapa II – după fragmentarea elementelor de pulbere.

Tab. 1 Caracteristicile de formă ale pulberii cu 7 canale pentru $2c=25d_0$

Etapa de ardere	Dimensiuni	Frațiunea arsă	Caracteristicile de formă		
	$2e_1$		χ	λ	μ
Faza I	$2d_0$	0,855	0,720	0,245	-0,0556
Faza II	$0,532d_0$	1	1,238	-0,309	0

Pentru modelul de balistică interioară cu parametri globali, prezumăm că încărcătura de azvârlire este constituită din elemente de pulbere cilindrice cu 7 canale realizate prin fabricație aditivă din compoziția C4:

- densitate: $1,42 \text{ g/cm}^3$;
- forță: 1007 kJ/kg ;
- covolum: $1,029 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$;
- caracteristică viteză de ardere, pentru legea Vieille: $1,322 \cdot 10^{-9} \text{ m}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$;
- coeficient de putere, pentru legea Vieille: 1,016;
- temperatură de ardere, pentru densitatea de încărcare $\Delta = 0,8 \text{ g/cm}^3$: $2453,25 \text{ K}$;
- coeficient adiabatic, pentru densitatea de încărcare $\Delta = 0,8 \text{ g/cm}^3$: 1,2423.

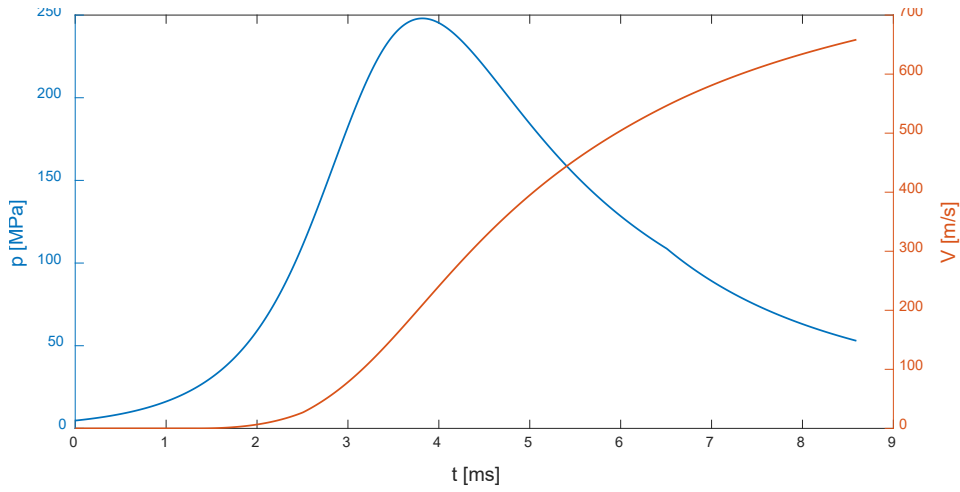


Fig. 2 Graficele presiunii și vitezei în funcție de timp pentru pulberea de azvârlire din compoziția C4

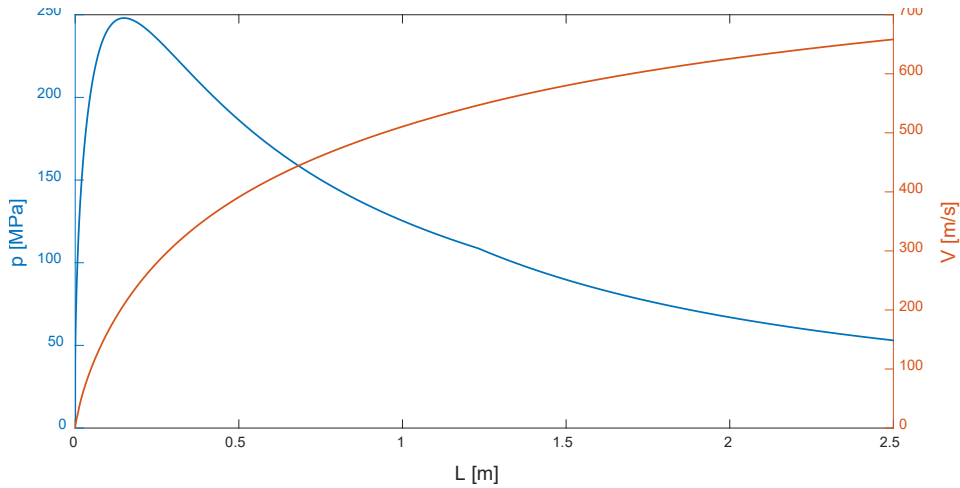


Fig. 3 Graficele presiunii și vitezei în funcție de spațiu pentru pulberea de azvârlire din compoziția C4

Balistica interioară a motoarelor-rachetă cu propergol solid

În cazul încărcăturilor de propulsie cu ardere frontală și al acelor cu ardere laterală și lungime mică, când suprafața de combustie se menține practic cvasiconstantă în timpul funcționării motorului-rachetă cu propergol solid, se poate considera că presiunea gazelor nu se modifică de-a lungul camerei de ardere. Implicit, viteza de ardere (lege Vieille) este constantă pe toată suprafața de ardere a încărcăturii de propulsie cu o asemenea geometrie. Într-o primă aproximație, se poate considera că arderea propergolului solid se produce în straturi paralele. Se adoptă ipoteza regimului de "stagnare", produsele de ardere fiind considerate gaze ideale. Compoziția chimică a amestecului produșilor de ardere se presupune "înghețată". De asemenea, se consideră că dispozitivul de amorsare a realizat o aprindere sigură și se neglijează masa și energia termică a produșilor de ardere rămași în cameră după terminarea fazei de amorsare.

Ecuția diferențială a presiunii de stagnare în camera de ardere (la intrarea în ajutoraj) are următoarea formă:

$$\frac{dp_0}{dt} = \frac{RT_0}{V_l} \left[A_a u_a \left(\rho_{prop} - \frac{p_0}{RT_0} \right) - C_D A_{cr} p_0 \right], \quad (1)$$

unde R este constanta amestecului gazos, T_0 temperatura de ardere din camera de ardere a motorului-rachetă, V_l volumul liber, A_a aria de ardere, u_a legea vitezei de ardere,

ρ_{prop} densitatea propergolului, $C_D = \sqrt{\gamma/RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} = \Gamma(\gamma)/\sqrt{RT_0}$ coeficientul de debit masic, γ coeficientul adiabatic (indicele izentropic) și A_{cr} aria secțiunii critice a ajutorajului.

Ecuția (1) și relația evidentă a vitezei de ardere

$$\frac{dw}{dt} = u_a \quad (2)$$

sunt rezolvate concomitent, sistemul de ecuații diferențiale de ordinul întâi astfel format având condițiile inițiale $p_0(t_0) = p_{amorsare}$ și $w(t_0) = 0$, unde w este grosimea arsă din propergolul solid.

Studiul de caz este realizat pentru motorul-rachetă de marș al loviturii echipate cu grenadă cumulativă antitanc PG-9V (Fig. 4).

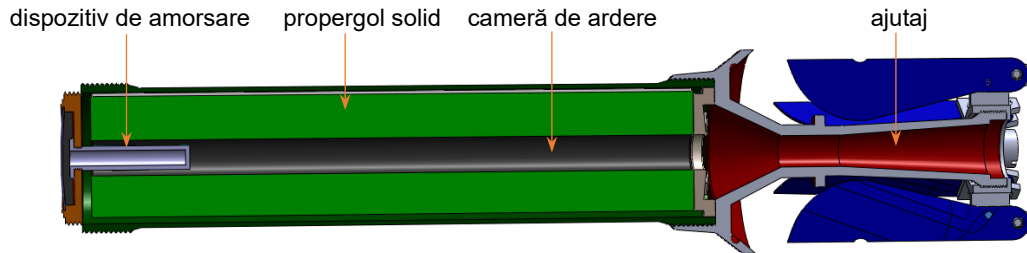


Fig. 4 Vedere de ansamblu pentru motorul-rachetă cu propergol solid

Pentru modelul de balistică interioară cu parametri globali, elementul propus de propergol solid are o geometrie tubulară și ar putea fi realizat prin fabricație aditivă din compoziția C4:

- densitate: $1,42 \text{ g/cm}^3$;
- caracteristică viteză de ardere, pentru legea Vieille: $1,322 \cdot 10^{-9} \text{ m/(Pa} \cdot \text{s)}$;
- coeficient de putere, pentru legea Vieille: 1,016;
- temperatură de ardere, la presiune constantă $p_0 = 10 \text{ MPa}$: 1819,39 K;
- constantă amestec produși de ardere, la presiune constantă $p_0 = 10 \text{ MPa}$: 432,5 J/(kg·K);
- coeficient adiabatic, la presiune constantă $p_0 = 10 \text{ MPa}$: 1,2863.

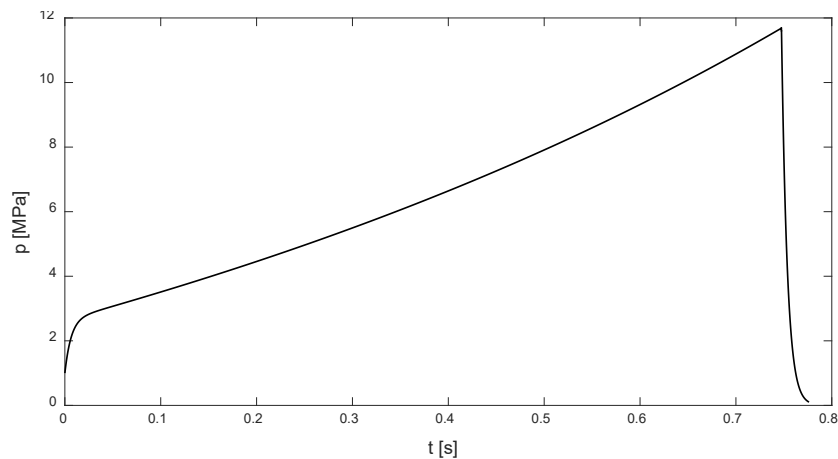


Fig. 5 Graficul presiunii de stagnare în timpul funcționării motorului-rachetă

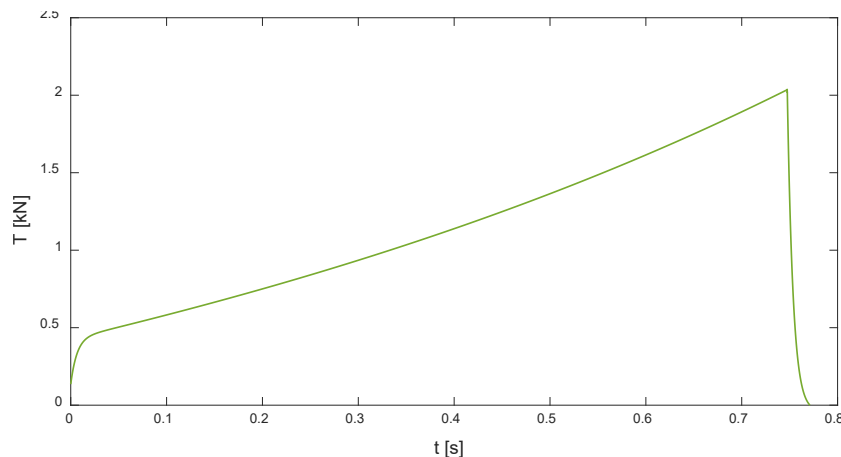


Fig. 6 Graficul forței de tracțiune asigurate de funcționarea motorului-rachetă

Activitatea 3.2 – Dezvoltare modele de balistică interioară 1D/2D pentru sisteme de armament care utilizează încărcături de pulbere de azvârlire și motoare-rachetă cu propergol solid

Modelare și simulare numerică 2D pentru sisteme de armament care utilizează încărcături de pulbere de azvârlire

Modelarea și simularea numerică a ciclului balistic cu ajutorul programului FLUENT, în cazul tunului calibru 76 mm model 1942, se bazează pe ecuațiile generale ale mecanicii fluidelor și pe ecuația de stare a gazului real, la care se atașează relația vitezei de ardere și ecuația de mișcare a proiectilului, pentru descrierea condițiilor pe frontierele mobile ale elementelor de pulbere și proiectilului.

În pofida tipului încărcăturii de azvârlire (pulbere cilindrică cu 7 canale) și complexității sistemului de armament considerat, simetria axială a anumitor părți componente din acesta face posibilă abordarea problemei de dinamica fluidelor numerică (CFD) în domeniul 2D ca problemă axial-simetrică pe un model echivalent. Modelul echivalent propus precum și modul de stabilire a echivalenței sunt prezentate în continuare (Fig. 7).

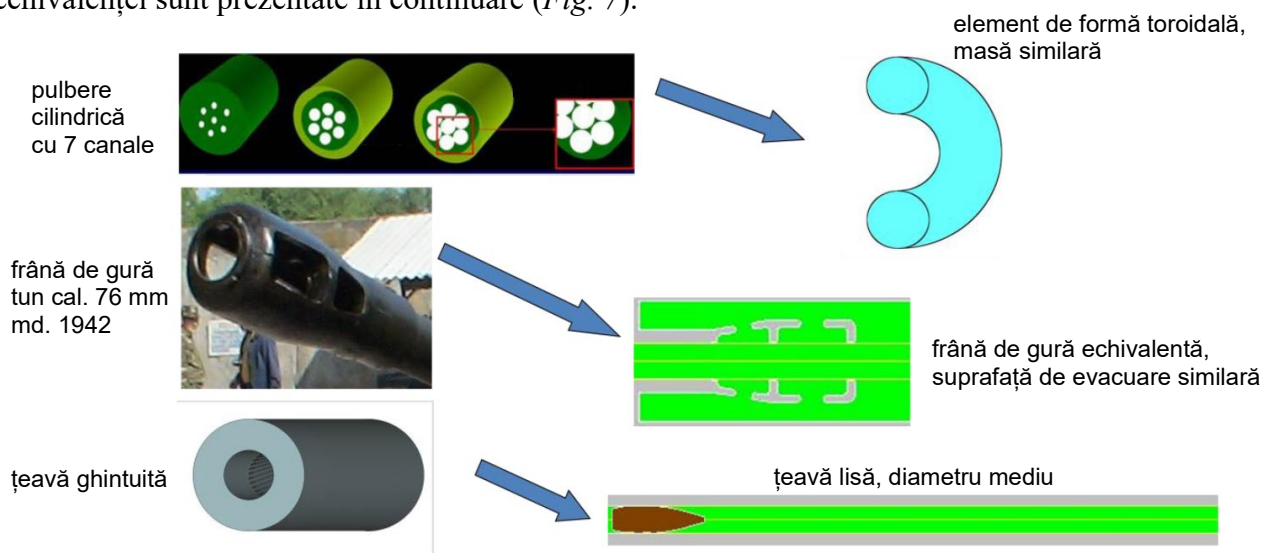


Fig. 7 Modelul de echivalență realizat pornind de la modelul fizic real

Modelul echivalent instituit se bazează pe următoarele considerente fundamentale (condiții de echivalență):

- proprietățile fizico-chimice ale pulberii echivalente și ale gazului generat să fie aceleași ca și în cazul real;
- masa pulberii de azvârlire în cazul modelului propus trebuie să fie aceeași cu masa pulberii de azvârlire reale;
- densitatea pulberii echivalente să fie aceeași cu cea reală;
- masa elementului de pulbere echivalent trebuie să fie aceeași cu media maselor elementelor de pulbere reală (element mediat de pulbere reală), conducând implicit la același număr de elemente de pulbere în ambele cazuri echivalent și real;
- debitul produselor de ardere pe elementul de pulbere să fie același atât în cazul pulberii echivalente cât și în cazul pulberii reale;
- fracțiunea de pulbere arsă dintr-un element să fie aceeași în ambele cazuri;
- ariile suprafețelor de evacuare a gazelor ale frânei de gură (model real și model echivalent) trebuie să aibă aceleași valori;
- volumul camerei de încărcare a modelului echivalent să fie același cu cel real;
- volumul țevii gurii de foc pentru modelul echivalent să fie același cu cel real, adică aria secțiunii țevii echivalente să fie aceeași cu aria secțiunii reale a țevii ghintuite și lungimea țevii pentru modelul realizat să fie aceeași cu lungimea reală a țevi.

În rezolvarea problemei propuse, s-au folosit următoarele capacități oferite de către programul FLUENT:

- adoptarea și utilizarea unui gaz "real" ținând cont de covolumul gazelor de pulbere reale și de faptul că parametrii gazelor de pulbere generate în țeavă sunt variabili cu temperatura, prin intermediul funcțiilor definite de utilizator (User-Defined Function – UDF);
- posibilitatea introducerii unor condiții pe frontieră variabile prin accesul direct asupra anumitor variabile prin intermediul unui program scris cu ajutorul limbajului de programare C++ (UDF);
- posibilitatea modelării mișcărilor reale ce au loc în țeava gurii de foc pe timpul tragerilor (arderea elementelor de pulbere, mișcarea elementelor de pulbere în țeavă, mișcarea proiectilului în țeavă și în afara acesteia etc) utilizând opțiunea "Dynamic Mesh";
- posibilitatea culegerii de date din diverse puncte ale domeniului de calcul și scrierea acestora în fișiere externe prin intermediul unui program scris cu ajutorul limbajului de programare C++, în vederea validării modelului teoretic;
- posibilitatea medierii valorilor obținute pe fiecare celulă din domeniul de calcul prin intermediul unui program scris cu ajutorul limbajului de programare C++, pentru parametrii curgerii în scopul realizării unor comparații cu anumite modele de calcul;
- utilizarea unui model de transfer termic la peretele țevi și proiectilului;
- evaluarea anumitor mărimi (flux masic, presiunea gazului pe diferite suprafețe, cantitatea de căldură etc) în vederea unui control riguros asupra modelului formulat.

În cazul sistemului de armament analizat, a cărui configurație interioară este variabilă, s-a utilizat o rețea de discretizare dinamică care permite transformarea domeniului în funcție de modul în care evoluează deflagrația pulberii, mișcarea de transport și interacțiunile (ciocniri de tip elastic) ale elementelor de pulbere precum și în funcție de mișcarea proiectilului în țeavă, în așa fel încât în orice moment al analizei fenomenului, domeniul ocupat de produsele de combustie să fie umplut de elemente de volum finit cu dimensiuni controlate. În analiza numerică aplicată s-a folosit o rețea nestructurată, triunghiulară, care prezintă avantajul unui control mai eficient la rediscrretizarea dinamică.



Fig. 8 Discretizarea modelului echivalent analizat – detaliu în zona proiectilului

Având în vedere faptul că problema analizată are o complexitate deosebită și dat fiind faptul că solver-ul bazat pe presiune, datorită modului de lucru segregat al acestuia, oferă o rezolvare mult mai rapidă decât solver-ul bazat pe densitate, s-a optat pentru acest prim mod de lucru. Dezavantajul major solver-ul bazat pe presiune, implementat implicit în cadrul programului FLUENT, este acela că nu conține integrat un mod de definire și de lucru al unui gaz real. Acest aspect a condus la realizarea unui model matematic (UDF), prin intermediul căruia solver-ul bazat pe presiune conduce la obținerea unei soluții corecte pentru cazul implementării unui gaz real atât în țeava sistemului de armament cât și în mediul ambient din proximitate, odată cu părăsirea gurii de foc de către proiectil.

Modelul fizic este caracterizat de proprietățile materialelor care se găsesc în stare solidă și care suferă prin combustie o transformare de fază (elementele de pulbere), de proprietățile materialelor care se află în stare de fluid compresibil (produsele de combustie și aerul), precum și de materialele solide care formează țeava, tubul cartuș și proiectilul, și care deși nu influențează în mod direct parametrii gazodinamici, datorită faptului că permit transferul termic, reduc energia gazelor de pulbere formate. Toate aceste aspecte importante ale fenomenului real sunt luate în considerare în modelarea numerică realizată.

Gazele formate prin combustia pulberii de azvârlire reprezintă un amestec complex de specii chimice, care datorită variațiilor de temperatură și presiune suferă disocieri, recombinații, ionizări etc. În modelarea și simularea realizată s-a considerat faptul că prin combustie se

generează un gaz nereactiv din punct de vedere chimic ale cărui proprietăți au fost determinate teoretic prin calcul termochimic la volum constant, pentru compoziția C4:

- masă molară, la 2453,25 K: 20,232 kg/kmol;
- căldură specifică la presiune constantă, la 2453,25 K: 2620,9 J/(kg·K);
- coeficient adiabatic, la 2453,25 K: 1,2423;
- vâscozitate dinamică, la 2453,25 K: $0,75903 \cdot 10^{-4}$ Pa·s;
- conductibilitate termică, la 2453,25 K: 0,34252 W/(m·K);
- viteză sunet, la 2453,25 K: 1119,1 m/s.

Modelarea și simularea numerică a balisticii interioare aferentă sistemului de armament calibru 76 mm model 1942 a permis determinarea variației unor parametrii importanți ai curgerii după cum se poate observa în cele ce urmează. Se prezintă variațiile parametrilor presiune și viteză la trei momente de timp reprezentative ale fenomenului tragerii: aprinderea pulberii de azvârlire cu evoluția flăcării în masa încărcăturii de azvârlire (Fig. 9-10), un moment aflat în vecinătatea realizării presiunii maxime în țeava gurii de foc (Fig. 11-12) și părăsirea țevi de către proiectil cu începutul formării câmpului curgerii la gura țevii (Fig. 13-14).

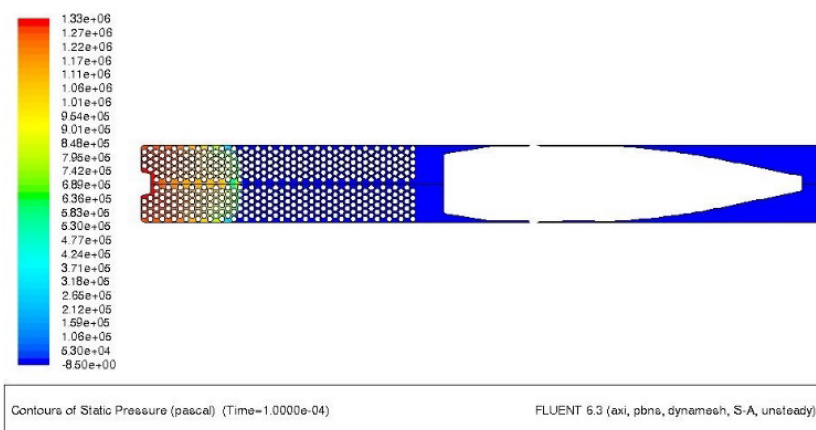


Fig. 9 Distribuția presiunii în țeava gurii de foc la $t = 0,1$ ms

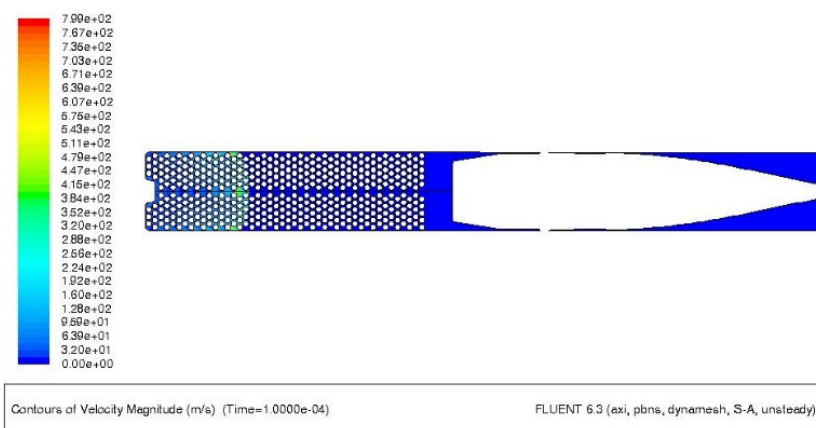


Fig. 10 Distribuția vitezei în țeava gurii de foc la $t = 0,1$ ms

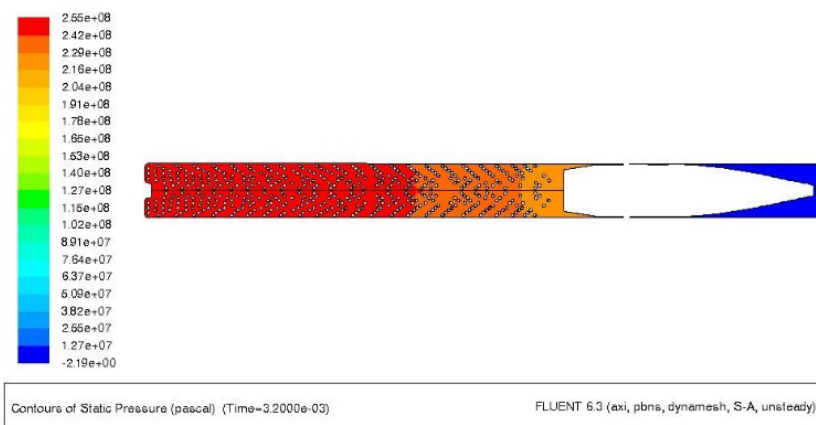


Fig. 11 Distribuția presiunii în țeava gurii de foc la $t = 3,2$ ms

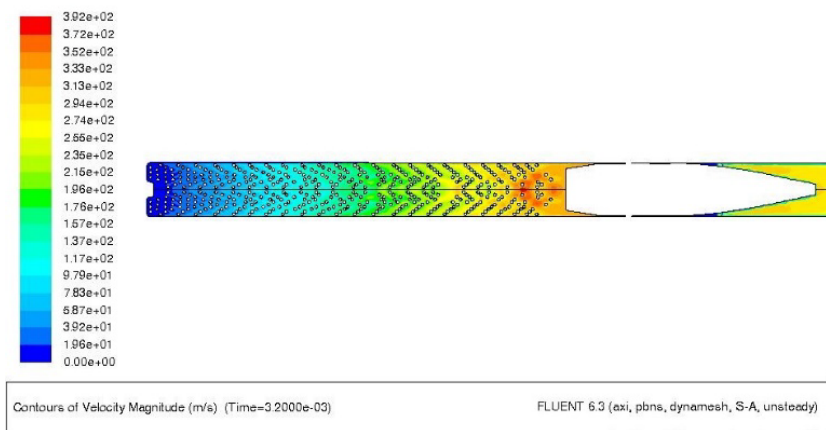


Fig. 12 Distribuția vitezei în țeava gurii de foc la $t = 3,2 \text{ ms}$

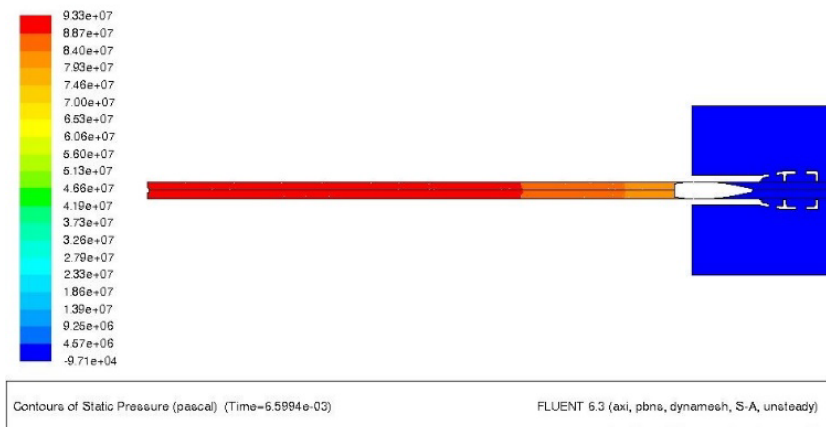


Fig. 13 Distribuția presiunii în țeava gurii de foc la $t = 6,6 \text{ ms}$

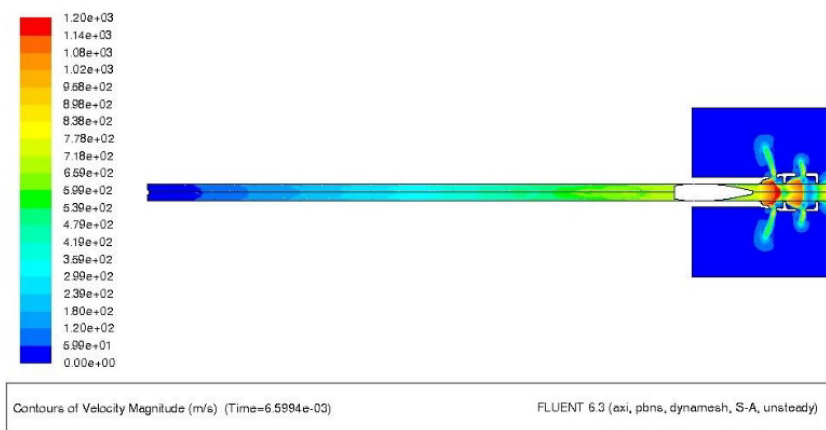


Fig. 14 Distribuția vitezei în țeava gurii de foc la $t = 6,6 \text{ ms}$

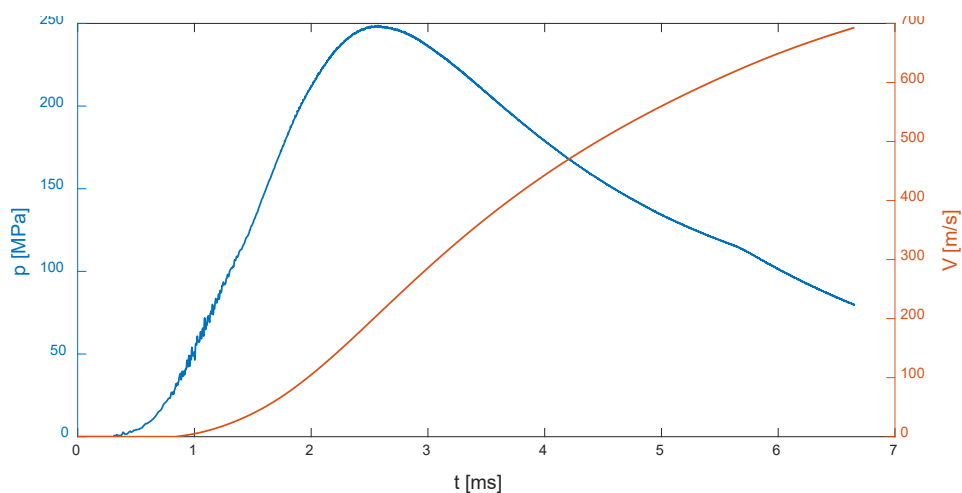


Fig. 15 Graficele presiunii și vitezei în funcție de timp pentru pulberea de azvârlire din compoziția C4

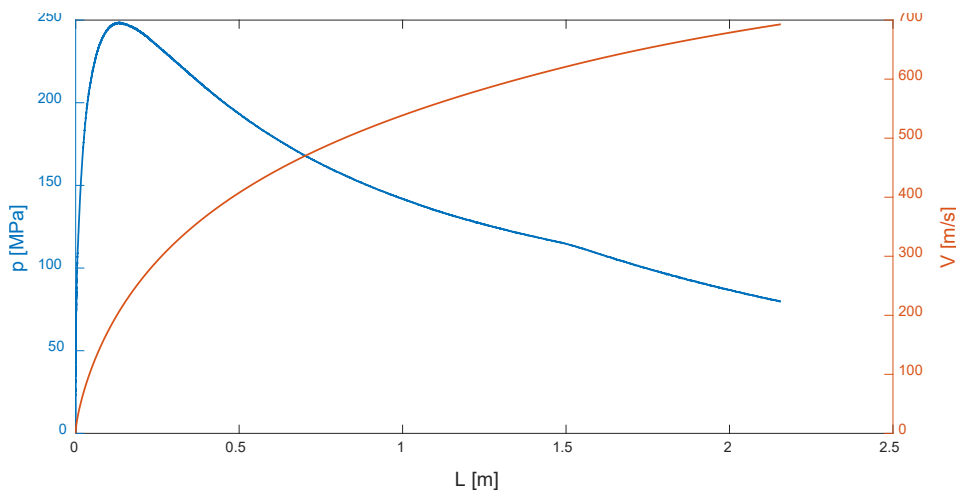


Fig. 16 Graficele presiunii și vitezei în funcție de spațiu pentru pulberea de azvârlire din compoziția C4

Modelare și simulare numerică 2D pentru motoare-rachetă cu propergol solid

În cazul modelării și simulării numerice 2D în programul FLUENT pentru motorul-rachetă de marș al loviturii echipate cu grenadă cumulativă antitanc PG-9V, elementele utilizate și validate anterior – solver bazat pe presiune, discretizare dinamică a rețelei nestructurate pentru mediul fluid, formată din elemente triunghiulare (Fig. 17), funcție definită de utilizator pentru regresia suprafeței de ardere a propergolului solid etc. – își regăsesc aplicabilitatea.

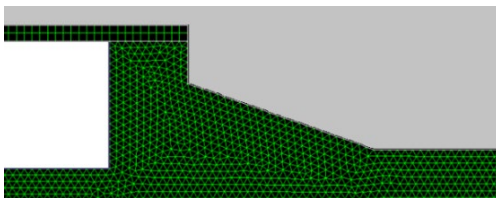


Fig. 17 Discretizarea mediului de lucru – detaliu din zona ajutajului

Singura diferență notabilă o constituie modalitatea de determinare a proprietăților de material pentru amestecul produșilor de combustie (mediul de lucru) – calcul termochimic la presiune constantă – rezultați în urma arderii propergolului solid din compoziția C4:

- masă molară, la 1819,39 K: 19,224 kg/kmol;
- căldură specifică la presiune constantă, la 1819,39 K: 1973,1 J/(kg·K);
- coeficient adiabatic, la 1819,39 K: 1,2863;
- vâscozitate dinamică, la 1819,39 K: $0,61608 \cdot 10^{-4}$ Pa·s;
- conductibilitate termică, la 1819,39 K: 0,22345 W/(m·K);
- viteză sunet, la 1819,39 K: 1006,1 m/s.

Dintre rezultatele obținute, sunt reprezentate grafic, în cele ce urmează, variațiile parametrilor presiune și viteză la începutul, mijlocul și sfârșitul perioadei active din modelarea și simularea 2D, asociată funcționării motorului-rachetă cu propergol solid din compoziție C4.

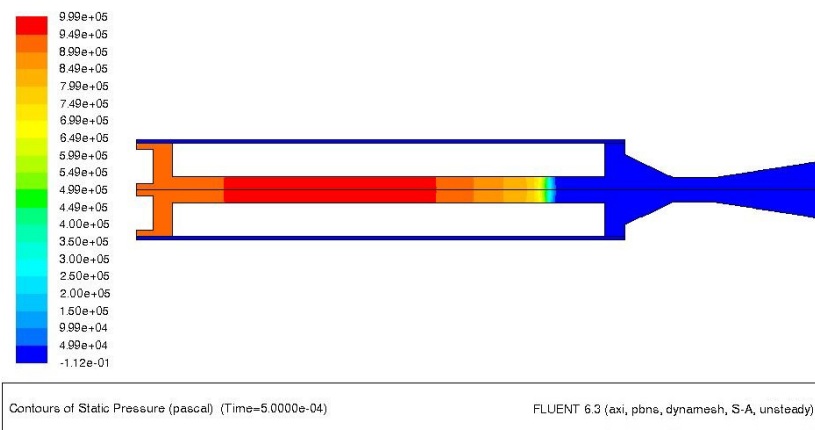


Fig. 18 Distribuția presiunii în motorul-rachetă cu propergol solid la $t = 0,5$ ms

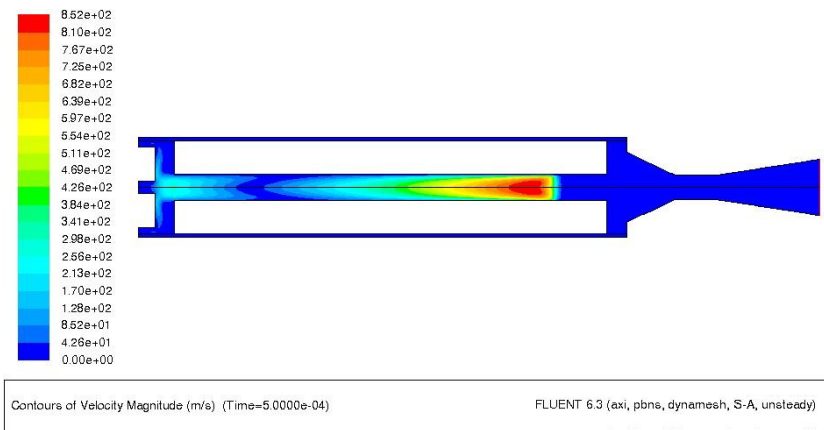


Fig. 19 Distribuția vitezei în motorul-rachetă cu propergol solid la $t = 0,5 \text{ ms}$

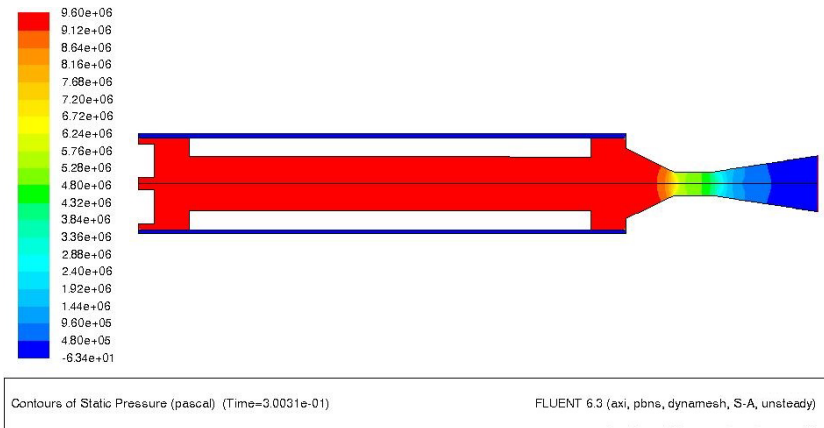


Fig. 20 Distribuția presiunii în motorul-rachetă cu propergol solid la $t = 0,3 \text{ s}$

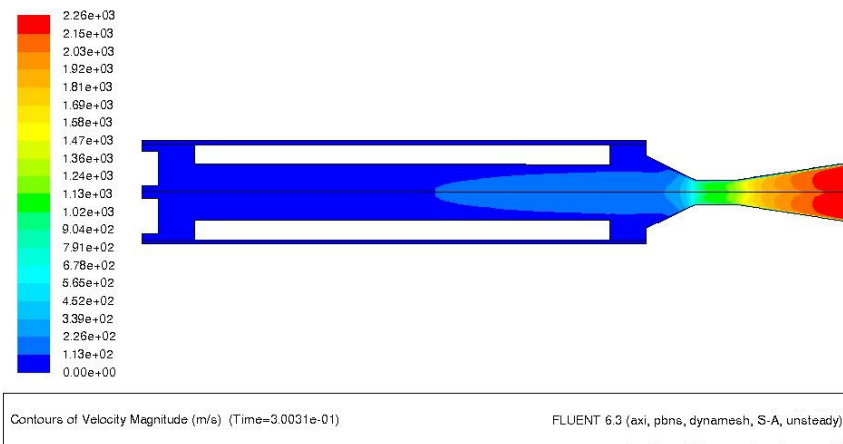


Fig. 21 Distribuția vitezei în motorul-rachetă cu propergol solid la $t = 0,3 \text{ s}$

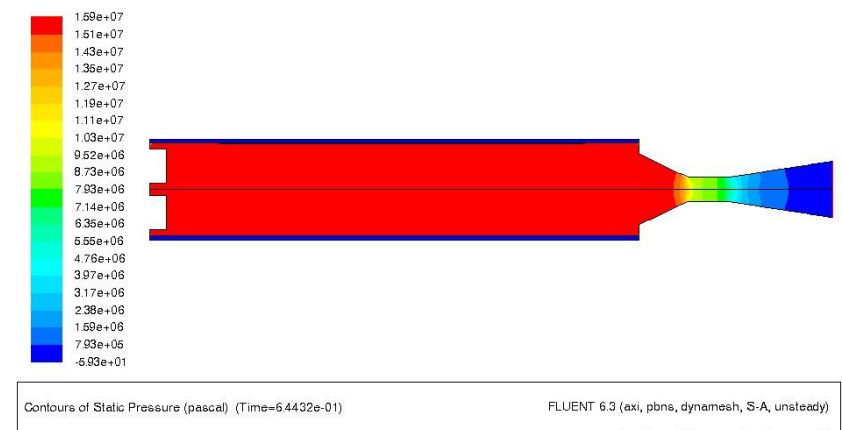


Fig. 22 Distribuția presiunii în motorul-rachetă cu propergol solid la $t = 0,64 \text{ s}$

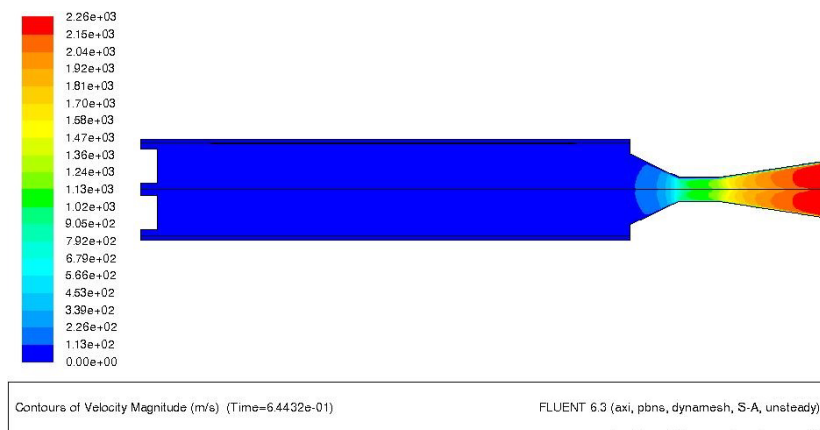


Fig. 23 Distribuția vitezei în motorul-rachetă cu propergol solid la $t = 0,64$ s

Valoarea supraunitară a coeficientului de putere ν din legea Vieille va conduce, în marea majoritate a cazurilor, la o ardere instabilă în motoarele-rachetă cu propergol solid abținut prin fabricație aditivă din compoziția C4; din acest motiv, imediat după realizarea amorsării, în modelarea și simularea numerică 2D realizată în programul FLUENT apare fenomenul de creștere masivă a presiunii (Fig. 24) și, implicit, a forței de tracțiune (Fig. 25), nefiind neapărat o instabilitate numerică (fenomen *carbuncle*).

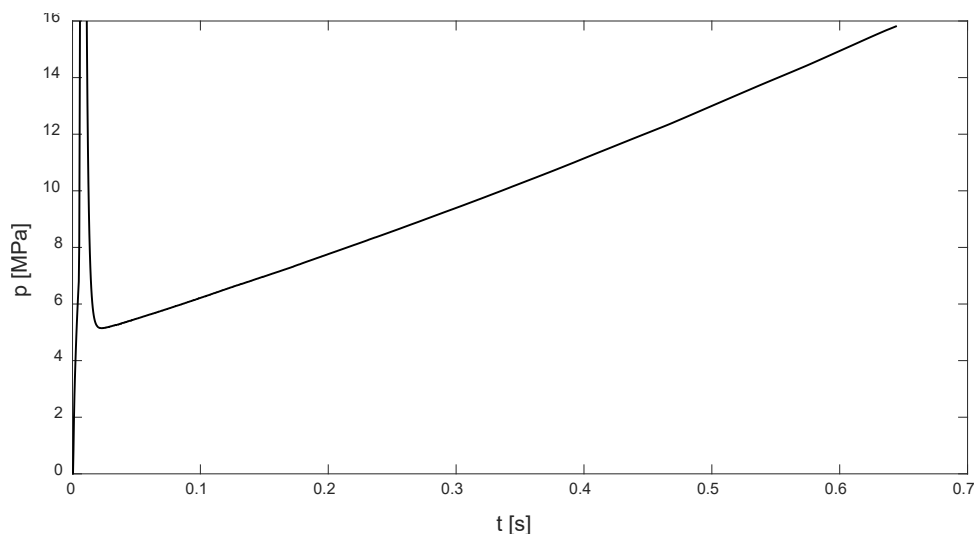


Fig. 24 Graficul presiunii la intrarea în ajutoraj, în timpul funcționării motorului-rachetă

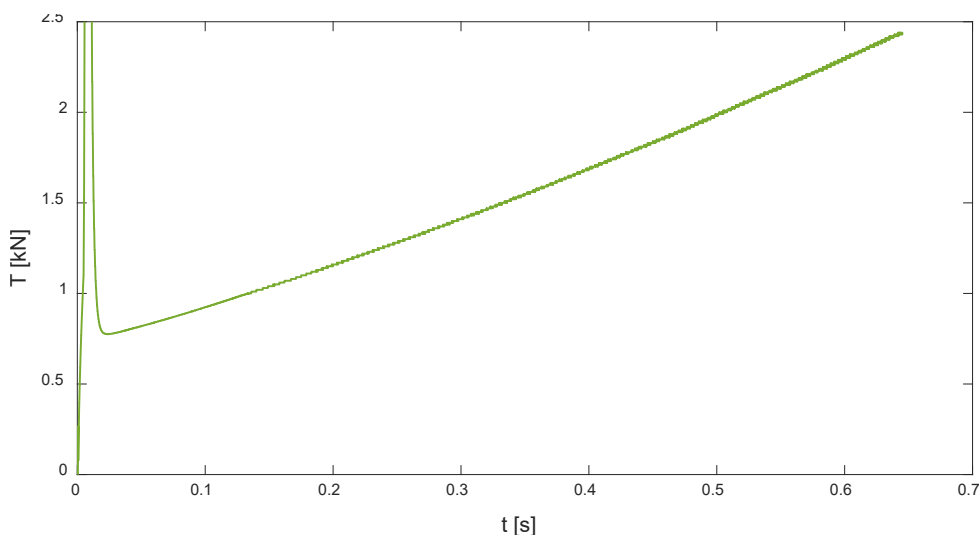


Fig. 25 Graficul forței de tracțiune asigurată de funcționarea motorului-rachetă

Activitatea 3.3 – Testare la impact a elementelor de pulbere de azvârlire/propergol solid

Strategia de testare și evaluare s-a bazat pe caracterul de noutate al produsului testat. Din acest motiv, s-a urmărit stabilirea prin teste mecanice a comportamentului materialului energetic la solicitări cvasistatice și dinamice. Numai valorile obținute în urma testelor permit încadrarea materialului energetic din perspectiva pretabilității: lipsa unei rezistențe mecanice adecvate împiedică utilizarea acestuia în încărcături de azvârlire sau propulsie, chiar dacă performanțele balistice sunt cele dezirabile.

În principiu, aceste teste oferă informații importante asupra proprietăților mecanice la compresiune ale materialelor energetice, pentru deformări variind de la valori mici la valori mari. Deoarece performanța și siguranța în serviciu sunt influențate de răspunsul mecanic al materialelor energetice la acțiunea factorilor operaționali, măsurătorile au fost realizate pentru a-i replica cât mai fidel pe aceștia din urmă.

Pentru evaluarea conformității elementelor de pulbere de azvârlire/propergol solid din punct de vedere al proprietăților mecanice, corelat cu siguranța și susceptibilitatea în utilizare, au fost verificate/evaluate următoarele cerințe de performanță și specifice:

- i) modulul de elasticitate la compresiune, conform STANAG 4443 Ed. 1 – *Explosive, Uni-Axial Compressive Test*;
- ii) tensiunea maximă, conform STANAG 4443 Ed. 1;
- iii) deformația relativă la tensiunea maximă, conform STANAG 4443 Ed. 1;
- iv) tensiunea în punctul ρ (punctul ρ corespunde valorii după limita de proporționalitate unde derivata de ordinul 2 a tensiunii în raport cu deformația relativă este minimă), conform STANAG 4443 Ed. 1;
- v) deformația relativă în punctul ρ , conform STANAG 4443 Ed. 1;
- vi) tensiunea maximă la impact.

Testele de compresiune s-au efectuat cu eșantioane paralelipedice, cu dimensiuni aproximative de $10 \times 10 \times 7$ mm, care s-au obținut prin decupare dintr-o placă obținută prin fabricație aditivă. Din acest motiv, cele două suprafețe de așezare pe platanele mașinilor prezintă asperități cu o textură diferită (Fig. 26).

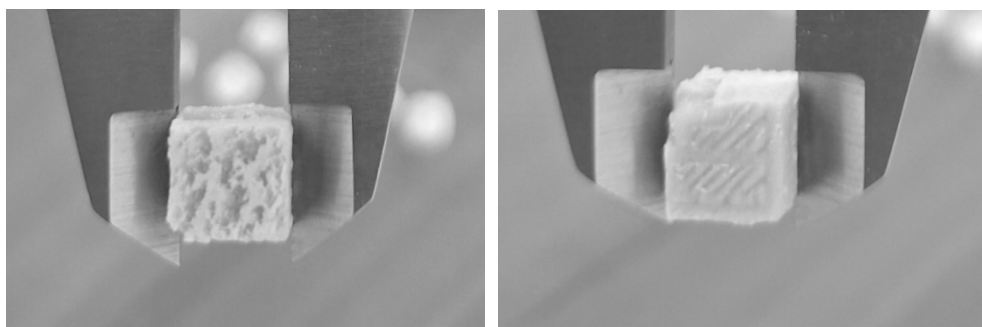


Fig. 26 Aspectul suprafețelor de așezare pe platane: suprafața lipită pe placa de imprimare (stânga) și suprafața superioară rezultată prin imprimare 3D (dreapta)



Fig. 27 Măsurarea dimensiunilor inițiale ale eșantioanelor

Teste dinamice

Testele dinamice s-au efectuat în cadrul Academiei Tehnice Militare “Ferdinand I” cu un sistem balistic cu aer comprimat – tun Taylor (Fig. 28).



Fig. 28 Sistemul balistic cu aer comprimat

Eșantioanele au fost amplasate pe suprafața de impact a țintei cu ajutorul unei folii adezive transparente, conform imaginii de mai jos. Nu s-au folosit lubrifianți pentru reducerea frecării dintre eșantioane și suprafețele de așezare.



Fig. 29 Eșantion paralelipipedic amplasat pe suprafața de impact a țintei

Pentru fiecare test în parte s-a consemnat forța înregistrată de senzorul dispus în țintă, precum și accelerațiile suferite de accelerometrul montat la baza proiectilului, și s-a măsurat grosimea remanentă a eșantionului. Suplimentar, testele au fost monitorizate de camera de filmare ultrarapidă PHOTRON SAZ, pentru o rată de eșantionare de 20000 cadre/secundă. Proiectilul folosit pentru impact a avut o masă totală de 650 grame, iar viteza de impact a fost variată în intervalul 2-6 m/s, valori care au asigurat deformații remanente între 3 și 60 %. Analiza post-test a eșantioanelor, prin aspectare, a relevat faptul că fisurile apar în eșantioane care suferă deformații remanente prin compresiune în intervalul 8-13 %. În tabelul cu datele relevante, Tabelul 2, este trecută valoarea maximă care apare din cauza acestor oscilații.

Tab. 2 Date înregistrate în urma testelor dinamice

Nr. test	Viteza de impact [m/s]	Forța maximă [kN]	Grosimea finală [mm]	Deformație compresiune [%]	Tensiunea maximă [MPa]	Observații
1	1,9	1,99	6,98	2,92	19,64	fără fisuri
2	3,6	3,39	6,21	13,26	33,44	fisuri inițiate
3	5,35	4,82	4,08	44,54	46,83	puternic fisurată

Nr. test	Viteza de impact [m/s]	Forța maximă [kN]	Grosimea finală [mm]	Deformație compresiune [%]	Tensiunea maximă [MPa]	Observații
4	5,85	5,32	3,06	58,36	64,62	puternic fisurată
5	2,39	2.46	6,80	7,77	30,66	fără fisuri
6	4,08	4,10	5,28	27,57	41,92	fisuri inițiate
7	3,7	3,20	5,90	19,61	36,96	fisuri inițiate

Locul de apariție inițială a fisurilor sunt suprafețele laterale (Fig. 30). Semnalul măsurat cu traductorul de forță se evidențiază prin prezența unor oscilații puternice în prima parte, fără semnificație fizică (Fig. 31).



Fig. 30 Aspectul post-test al epruvetei din testul nr. 3 cu fisuri evidente pe suprafețele laterale, orientate oblic

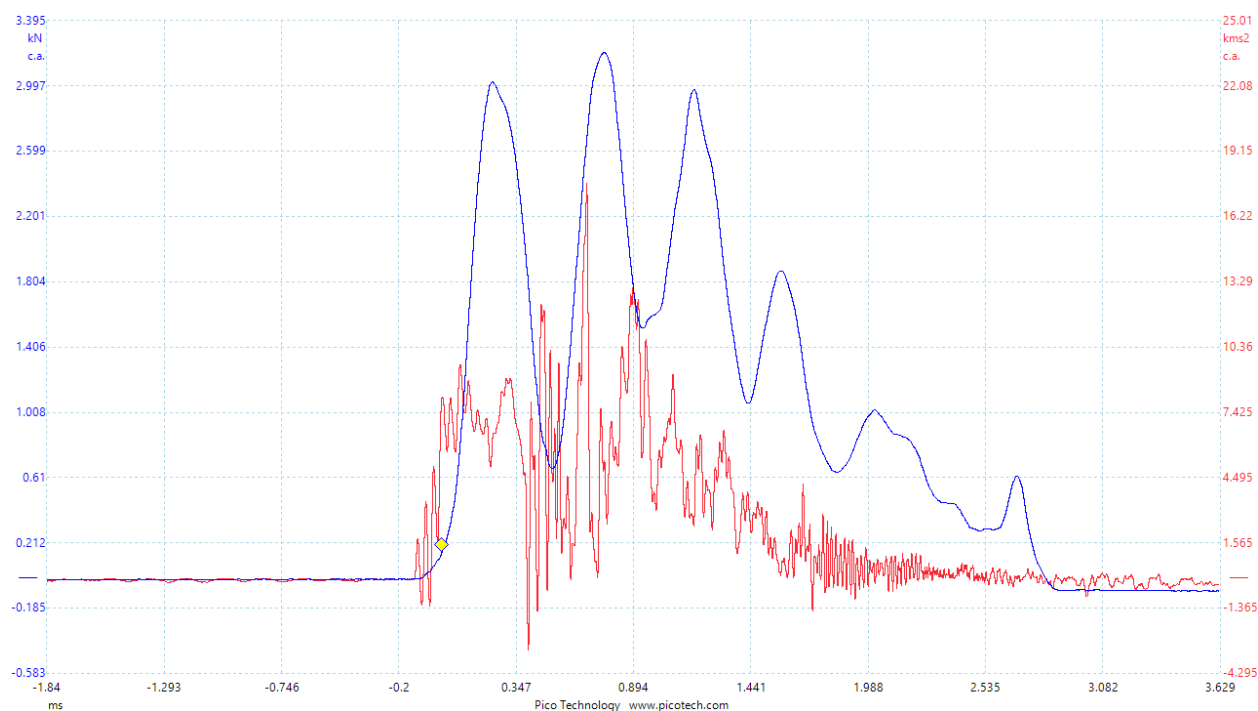


Fig. 31 Datele achiziționate cu traductorul de forță (culoare albastru) și accelerometrul (culoare roșu) pentru testul nr. 7

Teste statice

Activitatea de testare s-a desfășurat în cadrul Centrului de testare și inovare pentru apărare CBRN și ecologie cu mașina universală de încercări mecanice Titan 10. Viteza de deplasare a bacurilor a fost stabilită la 2 mm/min cu o forță maximă de 500 N. Nu s-au folosit lubrifianți pentru reducerea frecării dintre eșantioane și suprafețele bacurilor

Rezultatul brut obținut în testele de compresiune conform ISO 8124-1 este prezentat în Fig. 307. Pragul de alunecare observat la o solicitare de 30 N marchează așezarea bacurilor mașinii. Ca urmare, această alunecare a fost compensată în procesarea ulterioară a datelor. O parte din testele efectuate (Testele 2-4) au fost întrerupte pentru sarcini mai mici de 500 N pentru a evidenția deformația limită pentru care eșantioanele își păstrează integritatea (nu apar fisuri vizibile în corpul acestora). Profilul curbelor este unul specific materialelor polimerice compozite, cu trei faze: o prima zonă cu o creștere rapidă a forței, urmată de a doua zonă caracterizată de un platou cu valoare cvasiconstantă, fără un punct distinct de maxim, iar în final se remarcă din nou o creștere rapidă a forței.

Din punct de vedere tehnic interes prezintă doar primele doua zone deoarece, în cea de-a treia zonă, chiar dacă eșantionul este complet fisurat, materialul strivit între bacurile mașinii se întinde pe o suprafață foarte mare și se opune deformării, fără a furniza informații utile cu privire la comportamentul elementelor de pulbere.

Prima zonă, unde predomină deformațiile de natură elastică, a fost folosită pentru determinarea modului de elasticitate și a limitei de proporționalitate. La trecerea de la prima zonă la cea de-a doua apare punctul ρ , iar în a doua zonă în care predomină deformațiile plastice, apar și fisurile. Testele întrerupte au arătat că fisurile nu se inițiază pentru deformări mai mici de aproximativ 13-15%.

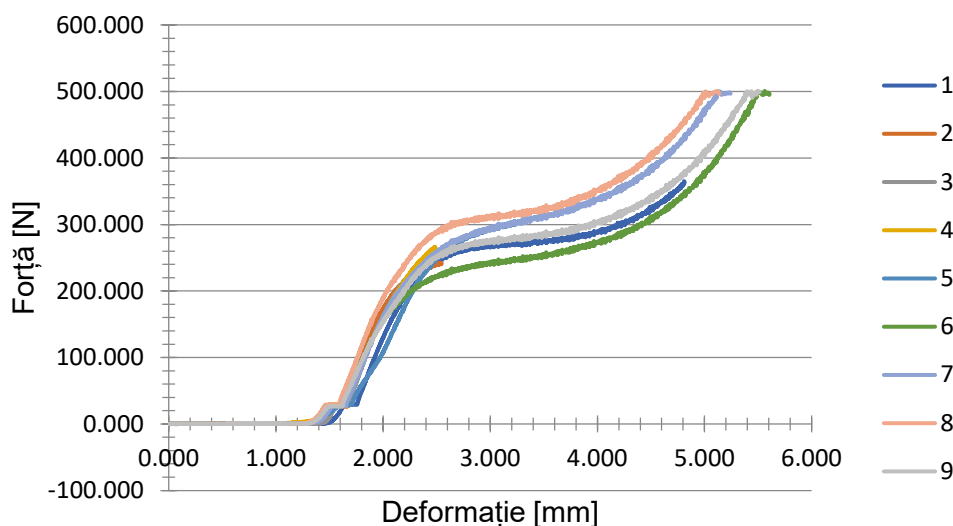


Fig. 32 Datele brute măsurate de mașina universală de încercări Titan 10

Tab. 3 Date înregistrate în urma testelor statice

Nr. test	Modul de elasticitate [MPa]	Punctul de tensiune maximă		Punctul ρ		Observații
		Tensiune [MPa]	Deformație [%]	Tensiune [MPa]	Deformație [%]	
1	33	3,13	0,108	2,64	0,172	fisuri inițiate
2	37	deformația maximă 0,142 fără atingerea punctului de maximum				fără fisuri
3	33	deformația maximă 0,128 fără atingerea punctului de maximum				fără fisuri
4	32	deformația maximă 0,153 fără atingerea punctului de maximum				fără fisuri
5	27	3,37	0,154	2,81	0,232	fisuri inițiate
6	28	2,50	0,105	2,10	0,182	fisuri inițiate
7	33	3,45	0,120	2,68	0,210	fisuri inițiate

Nr. test	Modul de elasticitate [MPa]	Punctul de tensiune maximă		Punctul ρ		Observații
		Tensiune [MPa]	Deformație [%]	Tensiune [MPa]	Deformație [%]	
8	32	3,15	0,114	2,54	0,182	fisuri inițiate
9	33	3,32	0,116	2,62	0,188	fisuri inițiate

Deoarece nu există un punct de maxim evident în calcule s-a folosit ca reper palierul cvasi-constant, așa cum se prezintă în Fig. 33. Punctul de maxim s-a considerat a fi primul punct în care linia ce definește palierul cvasi-constant se confundă cu acesta, iar pentru definirea punctului ρ s-a folosit intersecția dintre panta ce definește modulul de elasticitate și linia ce definește palierul cvasi-constant. Se observă că punctul de maxim astfel definit aproximează cu o bună precizie punctul de maxim vizibil pe curba $\sigma(\epsilon)$ trasată pentru valorile naturale.

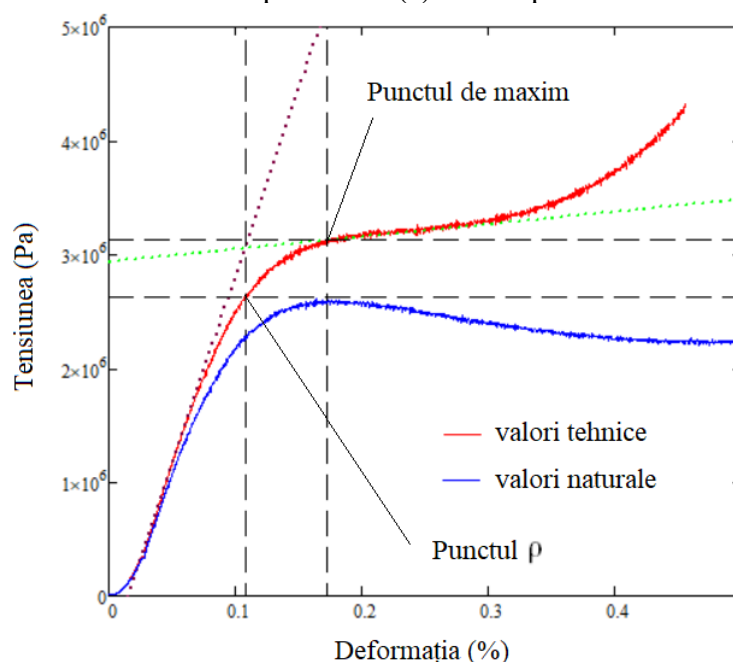


Fig. 33 Modul de identificare a punctului de maxim și a punctului ρ pentru datele de la testul nr. 1

Principalele concluzii ale testării și evaluării sunt prezentate în cele ce urmează:

- testele statice au relevat un comportament specific compozitelor polimerice, fără existența unui punct de maximum distinct, ci cu un platou cu valoare cvasi-constantă care a fost utilizat pentru calcularea tensiunii maxime;
- diferența de un ordin de mărime a tensiunilor măsurate în regim dinamic, față de cele măsurate în domeniul static, poate fi explicată parțial prin existența unor oscilații puternice în semnalul înregistrat de traductorul de forță și, totodată, prin existența unei vâscozități induse de natura compozită a materialului pulberii, particulele de hexogen, care reprezintă 70 % din masa materialului, deplasându-se prin matricea polimerică atunci când se produc deformații mari;
- testele dinamice au arătat că viteza de solicitare ridicată nu modifică comportamentul ductil, observat în solicitările statice, eșantioanele, chiar și după o deformare foarte mare și apariția unor fisuri cu alunecare în plan diagonal, rămân ca un singur corp, fără fragmente suplimentare;
- solicitările statice care s-au limitat la deformații relative maxime de aproximativ 13-15 % nu au condus la fisurarea eșantioanelor;
- la solicitările dinamice fisurile în eșantioane apar la deformații relative remanente cuprinse în intervalul 8-13 %;
- deși majoritatea rezultatelor testelor statice sunt grupate, există și teste în care valorile măsurate se distanțează vizibil de valorile medii.



Detalii privind exploatarea și diseminarea rezultatelor sunt prezentate în cele ce urmează:

A. Cerere de brevet de invenție:

- IORGA O., MARIN A., MUNTEANU M., EPURE C., GRIGORIU N., *Amestec exploziv pentru pulberi de azvârlire/reactive obținute prin fabricare aditivă sau extrudare la cald*, Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci, Cerere de brevet nr. a2024 00193 din 19.04.2024.

B. Capitol de carte:

- NOJA G.F., MĂRMUREANU M.I., ROTARIU A.N., IORGA O., DÎRLOMAN F.M., MALCIU A., *Aspecte privind viitorul munițiilor de artilerie. Fabricarea aditivă a pulberilor de azvârlire/propergoli solizi*. În: George BUCĂȚA, Florin ILIE, Stelian POPESCU (coordonatori) – *Artileria modernă și tehnologiile avansate*, Editura Academiei Forțelor Terestre “Nicolae Bălcescu”, Sibiu, 2024, pp. 124-167, ISBN: 978-973-153-561-6.



Fig. 34 Extras din coperta cărții (coperta I și a IV-a)