



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Mecanică

Octavian JITARAŞU

Structuri uşoare pentru protecţie balistică

Lightweight structures for ballistic protection

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof. dr. ing. Simona LACHE

BRAŞOV, 2025

CUPRINS

	Pg. rezumat	Pg. teză
MULȚUMIRI.....	5	21
INTRODUCERE.....	6	22
1. Analiza critică a stadiului actual privind progresele recente și perspectivele materialelor și echipamentelor balistice	9	25
1.1 Considerații generale	9	25
1.2 Tipuri de amenințări balistice	9	28
1.2.1 Proiectile de calibru mic	10	29
1.2.2 Fragmente	11	30
1.2.3 Deformarea și deteriorarea proiectilelor	11	31
1.3 Considerații de proiectare pentru sistemele de protecție balistică. Clasificarea și analiza echipamentelor individuale de protecție	12	31
1.4 Nivelurile de protecție ale echipamentelor balistice	13	34
1.5 Materiale ceramice utilizate pentru protecție balistică.....	13	36
1.6 Fibre utilizate în aplicații balistice	14	41
1.7 Țesături utilizate pentru protecție balistică.....	15	43
1.7.1 Aspecte importante privind performanța țesăturilor utilizate pentru protecție balistică	15	49
1.8 Materiale compozite armate cu fibre de înaltă performanță utilizate pentru protecție balistică	16	52
1.8.1 Aspecte importante privind performanța materialelor compozite balistice armate cu fibre	16	58
1.9 Adezivi și rășini utilizate în structurile pentru protecție balistică.....	17	59
1.10 Materiale din cauciuc utilizate pentru protecția balistică	18	61
1.10.1 Mecanisme de absorbție a energiei la impact balistic în materialele din cauciuc	18	63
1.11 Concluzii	19	67
2. Scopul și obiectivele cercetării.....	21	69
3. Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice noi pentru echipamentele individuale de protecție flexibile și rigide.....	22	70
3.1 Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice flexibile	22	70
3.2 Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice rigide	22	72

3.3 Considerații privind greutatea și costul structurilor balistice flexibile și rigide.....	24	82
3.4 Concluzii	26	84
4. Analiza teoretică și experimentală a comportamentului hiperelastic al materialelor din cauciuc utilizate în structurile balistice noi.....	28	86
4.1 Abordarea analitică a impactului balistic asupra materialelor din cauciuc	25	86
4.2 Metodologia experimentală	28	88
4.2.1 Solicitarea la compresiune cvasi-statică.....	30	90
4.2.2 Solicitarea la tracțiune cvasi-statică	30	91
4.2.3 Solicitarea la compresiune prin sarcini aplicate dinamic	30	93
4.2.4 Testarea balistică	31	94
4.3 Rezultate experimentale și discuții	31	96
4.3.1 Analiza curbei tensiune-deformație la compresiune cvasi-statică a materialelor hiperelastice.....	31	96
4.3.2 Analiza curbei tensiune-deformație la tracțiune cvasi-statică a materialelor hiperelastice.....	32	97
4.3.3 Analiza curbei tensiune-deformație la compresiune dinamică a materialelor hiperelastice.....	32	99
4.3.4 Rezultate și observații ale testelor balistice	34	101
4.4 Modelarea numerică.....	35	104
4.4.1 Modelarea numerică a solicitării dinamice asupra materialelor din cauciuc analizate.....	35	104
4.4.2 Modelarea numerică a impactului balistic asupra materialelor din cauciuc.....	36	106
4.5 Validarea modelelor numerice. Corelarea rezultatelor numerice și experimentale.....	37	107
4.5.1 Validarea comportamentului dinamic.....	37	107
4.5.2 Validarea impactului balistic	38	109
4.6 Concluzii	38	113
5. Analiza teoretică și experimentală a noilor structuri balistice flexibile la impact cu viteză redusă.....	40	114
5.1 Abordarea analitică.....	40	114
5.1.1 Teoria impactului asupra unui singur fir textil.....	40	114
5.1.2 Modelul analitic pentru impactul balistic asupra structurilor textile.....	40	115
5.2 Mecanismul de rupere și evoluția deteriorării țesăturilor sub impact balistic	41	118
5.3 Metodologia experimentală	41	122

5.3.1 Testarea balistică	41	122
5.3.2 Rezultate experimentale și discuții.....	42	122
5.4 Modelarea numerică.....	43	128
5.4.1 Modelarea cu elemente finite	43	128
5.4.2 Modelarea constitutivă	44	129
5.4.3 Simularea penetrării.....	44	132
5.5 Validarea modelelor numerice. Corelarea rezultatelor numerice și experimentale.....	45	142
5.6 Concluzii	47	144
6. Analiza teoretică și experimentală a noilor structuri balistice rigide la impact cu viteză mare.....	49	146
6.1 Abordarea analitică.....	49	146
6.1.1 Modelul analitic pentru impactul balistic asupra plăcilor ceramice.....	49	146
6.1.2 Model analitic pentru impactul balistic asupra materialelor compozite armate cu fibre.....	49	148
6.2 Mecanismul de distrugere și evoluția deteriorării plăcilor ceramice sub impact balistic.....	50	154
6.2.1 Analiza impactului balistic asupra plăcilor ceramice.....	50	154
6.2.2 Mecanismul de penetrare al plăcilor ceramice	51	156
6.3 Mecanismul de distrugere și evoluția deteriorării materialelor compozite armate cu fibre la impact balistic.....	51	157
6.4 Metodologia experimentală	52	163
6.4.1 Testarea balistică	52	163
6.4.2 Rezultate experimentale și discuții.....	52	165
6.5 Modelare numerică.....	55	191
6.5.1 Modelarea cu elemente finite	55	191
6.5.2 Modelarea constitutivă	57	193
6.5.3 Simularea penetrării.....	57	197
6.6 Validarea modelelor numerice. Corelarea rezultatelor numerice și experimentale.....	60	260
6.7 Concluzii	61	264
7. Concluzii finale, contribuții originale și direcții viitoare de cercetare	63	266
7.1 Concluzii finale	63	266
7.2 Contribuții originale	66	269

7.3 Direcții viitoare de cercetare.....	68	271
BIBLIOGRAFIE	72	274
Lista de publicații	94	305

MULȚUMIRI

Prezenta teză de doctorat intitulată **“Structuri ușoare pentru protecție balistică”** prezintă rezultatele cercetării științifice desfășurate sub atenta supraveghere a doamnei Prof. dr. ing. Lache Simona. Îi sunt foarte recunoscător pentru sprijinul și încrederea pe care mi le-a acordat, pentru perseverența cu privire la acuratețea științifică și, cel mai important, pentru prezența solidă și îndrumarea exemplară pe parcursul cercetării. Îi sunt recunoscător pentru modelul admirabil pe care îl reprezintă, ca inginer mecanic și profesor.

Aș dori să mulțumesc membrilor comitetului meu științific îndrumător, domnului Prof. dr. ing. mat. Vlase Sorin, și doamnei Prof. dr. ing. Scutaru Maria Luminița pentru observațiile lor constructive cu privire la lucrarea mea de cercetare.

Doresc să îmi exprim recunoștința față de Departamentul de Inginerie Mecanică al Universității Transilvania din Brașov pentru sprijinul acordat pe durata întregii activități de cercetare, în special față de domnul Conf. univ. dr. ing. Velea Marian Nicolae pentru ajutorul său esențial în realizarea anumitor etape experimentale ale acestei cercetări. În plus, îi exprim recunoștința pentru încurajarea și sprijinul continuu din anii studenției, timp în care am explorat domeniul structurilor ușoare pentru protecție balistică.

Mulțumesc celor care mi-au oferit asistență pe parcursul cercetării, în special domnului Prof. dr. ing. Teodorescu Horațiu din cadrul Universității Transilvania din Brașov, precum și domnului Prof. dr. ing. Rotariu Adrian și domnului dr. ing. Matache Liviu din cadrul Academiei Tehnice Militare "Ferdinand I" din București, pentru sprijinul valoros acordat în realizarea mai multor etape experimentale ale acestei cercetări.

Sunt extrem de recunoscător și doresc să îmi exprim mulțumirile față de echipa din cadrul Centrului de Perfecționare Operații Speciale Navale și Divizionului 164 Forțe Navale pentru Operații Speciale, în special față de domnul Călin Ovidiu-Ioan, domnul Mogâlă Alexandru și domnul Bucur Eugen, pentru sprijinul și asistența acordată în realizarea experimentelor balistice.

În cele din urmă, doresc să îmi exprim recunoștința față de familia și prietenii mei pentru sprijinul și încurajarea lor.

Octavian JITARAȘU

INTRODUCERE

Echipamentele pentru protecție individuală au fost dezvoltate pentru a proteja utilizatorii de diverși factori de risc din mediu, cum ar fi substanțele chimice, focul, radiațiile UV și căldura, precum și pentru a-i apăra împotriva impacturilor balistice, fragmentelor ascuțite și rănilor produse prin înjunghiere. De-a lungul evoluției omenirii, a fost dezvoltată o gamă largă de soluții de protecție individuală pentru siguranța personală. În prezent, se depune un efort intens în a dezvolta tehnologii de protecție individuală pentru a spori siguranța, confortul și a reduce greutatea acestor structuri pentru protecție balistică.

Funcția principală a structurii balistice este de a reduce energia cinetică a unui proiectil în momentul impactului, reducând sau împiedicând în mod eficient pătrunderea acestuia în corpul purtătorului. Funcțiile secundare ale sistemelor balistice sunt de a proteja utilizatorul de o varietate de amenințări, menținând în același timp un nivel ridicat de confort. Este evident că niciun sistem balistic nu poate oferi protecție împotriva tuturor amenințărilor posibile. Prin urmare, performanța echipamentelor pentru protecție individuală este, de obicei, concepută pentru a îndeplini niveluri specifice de protecție configurate în funcție de scenariile de utilizare vizate.

Odată cu intensificarea amenințărilor, sistemele de protecție balistică au cunoscut o creștere substanțială în greutate pentru a asigura un nivel adecvat de protecție, această greutate suplimentară devenind o solicitare considerabilă pentru personalul combatant, cu impact negativ asupra mobilității și rezistenței fizice. De-a lungul timpului, nevoia de materiale cu greutate scăzută, cu performanțe ridicate și costuri reduse a înregistrat o creștere semnificativă. Această cerință tot mai accentuată a condus, în ultimele decenii, la intensificarea activităților de cercetare orientate spre dezvoltarea unor sisteme de protecție balistică cu greutate redusă. Multe dintre progresele înregistrate în ceea ce privește performanța structurilor balistice au rezultat din introducerea unor materiale noi sau îmbunătățite, demonstrând rolul esențial al inovării în domeniul materialelor pentru protecție balistică. Recent, cercetătorii s-au confruntat cu o provocare semnificativă: dezvoltarea materialelor balistice de înaltă calitate capabile să reziste la efectele balistice ale muniției moderne cu viteză ridicată. Acest lucru necesită soluții inovatoare și materiale performante pentru a garanta că sistemele balistice dezvoltate furnizează un nivel optim de protecție, menținând în același timp echilibrul necesar între greutate, performanță și cost.

Pentru a îmbunătăți performanța echipamentelor de protecție individuală trebuie abordate două provocări fundamentale. În primul rând, este necesară dezvoltarea unor materiale noi, capabile să depășească performanțele celor utilizate în prezent. În al doilea rând, este necesară dezvoltarea unor structuri balistice care să exploateze în mod eficient potențialul materialelor actuale, precum și al celor avansate, aflate în curs de dezvoltare. Aceasta implică configurarea materialelor într-un mod care să optimizeze proprietățile lor balistice. Simularea avansată și metodele experimentale sunt esențiale pentru abordarea eficientă a acestor provocări. Selectarea materialelor, configurația lor geometrică și modalitățile de integrare a materialelor sunt esențiale în proiectarea sistemelor balistice. Fiecare material component îndeplinește un rol specific, nu numai în disiparea energiei cinetice a proiectilelor sau în reducerea efectelor exploziilor, ci și în menținerea integrității structurale a sistemelor. Prin urmare, este important de observat că modul general de comportare al unui sistem balistic stratificat

În fața unei anumite amenințări este mai complex decât simpla sumă a comportamentelor componentelor sale individuale. Acest lucru subliniază importanța unei abordări cuprinzătoare în proiectarea și ingineria sistemelor balistice eficiente.

În ultimele decenii, materialele compozite erau utilizate împreună cu diverse metale pentru a obține protecția balistică necesară. Ceramica a înlocuit parțial metalele grele precum oțelul și aliajele de aluminiu în echipamentele pentru protecție individuală datorită performanțelor balistice superioare, inclusiv a progreselor semnificative în ceea ce privește rezistența specifică și duritatea. Structurile moderne balistice conțin de obicei o combinație de două materiale principale: un strat frontal ceramic (cel mai adesea) sau metalic, urmat de un ansamblu stratificat de materiale compozite laminate, armate cu fibre sau țesături. Această configurație hibridă utilizează proprietățile unice ale fiecărui material pentru a îmbunătăți eficiența globală a protecției balistice.

Pentru a obține o structură balistică eficientă din punct de vedere al costurilor și optimă din perspectiva confortului, este foarte importantă alegerea unei configurații adecvate, a materialelor corespunzătoare și a unor procese de fabricație bine adaptate cerințelor aplicative. Configurația optimă a vestelor antiglonț trebuie să echilibreze trei caracteristici contradictorii: protecție eficientă, mobilitate și confort. Acest echilibru permite structurilor balistice să ofere un nivel adecvat de protecție împotriva amenințărilor, menținând totodată libertatea de mișcare și confortul utilizatorului. Prin analiza atentă a acestor factori, pot fi dezvoltate sisteme balistice capabile să răspundă cerințelor riguroase ale protecției moderne.

Structurile balistice compozite moderne pot fi proiectate sub forma unor arhitecturi stratificate, care integrează componente precum ceramică, țesături și straturi de reducere a șocului, în vederea îmbunătățirii protecției balistice. Performanța fiecărui strat influențează în mod decisiv eficiența generală a sistemului balistic. În anumite configurații, un strat de cauciuc este integrat pentru a susține plăcile ceramice și pentru a contribui atât la îmbunătățirea performanței generale, cât și la creșterea confortului structural.

Obiectivul principal constă în elaborarea, dezvoltarea și optimizarea unor structuri balistice inovatoare, realizate prin tehnologii de fabricație eficiente din punct de vedere al costurilor și al complexității, care să reducă greutatea totală a echipamentului fără a compromite nivelurile ridicate de protecție. Scopul constă în dezvoltarea unor sisteme balistice care nu doar asigură un nivel de protecție superior, ci și optimizează mobilitatea și confortul utilizatorului, conferindu-le astfel un caracter funcțional sporit pentru utilizarea în medii operaționale solicitante.

În acest context, cercetarea realizată în cadrul prezentei teze se axează pe **dezvoltarea unei soluții inovatoare dedicate industriei protecției balistice. Această soluție are ca obiectiv furnizarea unui sistem balistic destinat echipamentelor de protecție individuală, caracterizat prin eficiență economică și capabil să ofere un nivel ridicat de protecție. În plus, această cercetare își propune să identifice principalele provocări și limitări tehnice asociate dezvoltării noii generații de materiale de protecție ușoare, inclusiv a compozitelor pe bază de cauciuc și să contureze o direcție strategică pentru optimizarea și perfecționarea acestora.**

În cele ce urmează, este oferită o sinteză a cercetării desfășurate în cadrul prezentei teze de doctorat.

Capitolul 1 prezintă o imagine de ansamblu asupra protecției balistice, evidențiind contribuția cauciucului în procesele de absorbție a energiei, atenuare a impactului și consolidare structurală a

sistemelor balistice avansate. Această introducere este urmată de o analiză critică a stadiului actual privind progresele actuale în domeniul protecției balistice, care fundamentează formularea obiectivelor științifice ale prezentei teze.

Capitolul 2 este dedicat prezentării succinte a scopului și obiectivelor urmărite pe parcursul cercetării.

Capitolul 3 explorează procesul de elaborare și dezvoltare a structurilor de protecție balistică, atât flexibile, cât și rigide, evidențiind rolul cauciucului în optimizarea capacității de absorbție a impactului și în creșterea integrității structurale a sistemelor. Sunt analizate diverse configurații ale panourilor compozite UHMWPE-cauciuc și ale plăcilor compozite cauciuc-ceramică pentru a optimiza disiparea energiei, flexibilitatea și rezistența balistică.

Capitolul 4 analizează comportamentul mecanic al cauciucului în contextul aplicațiilor balistice, cu accent pe proprietățile sale hiperelastice, capacitatea de absorbție a energiei și potențialul de reducere a efectelor generate de impact. Capitolul utilizează modelarea teoretică, simulările numerice și testele experimentale în vederea evaluării comportamentului materialelor din cauciuc și modul în care răspund în condiții extreme de încărcare, oferind o înțelegere a rolului lor în îmbunătățirea protecției balistice. Rezultatele obținute constituie o bază solidă pentru optimizarea structurilor compozite pe bază de cauciuc, având ca scop îmbunătățirea durabilității acestora și a capacității de disipare a energiei.

Capitolul 5 analizează integrarea cauciucului SBR-65 cu țesătura unidirecțională UHMWPE în scopul evaluării capacității de absorbție a energiei și a rezistenței la impact în cadrul configurațiilor balistice flexibile. Sunt investigate performanțele balistice ale structurilor textile, cu accent pe mecanismele de propagare a undelor, modurile de cedare ale materialului și contribuția stratului de cauciuc la îmbunătățirea eficienței protecției. Testările experimentale, completate de simulări numerice, vizează diferite configurații de panouri, evidențiind influența poziționării stratului de cauciuc asupra opririi progresive a proiectilului, a deformației feței posterioare și a performanței balistice generale a sistemului.

Capitolul 6 investighează integrarea cauciucului PUR-85 și a cauciucului SBR-65 cu plăci ceramice și țesături unidirecționale UHMWPE în vederea evaluării capacității de absorbție a energiei și a rezistenței la impact în configurații balistice rigide. Analiza include diverse modele de impact, mecanisme de disipare a energiei și procese de distrugere, evidențiind rolul cauciucului în amortizarea undelor de șoc și în consolidarea integrității structurale a ansamblului. Testele experimentale demonstrează eficiența configurațiilor hibride cauciuc-ceramică în îmbunătățirea performanței balistice generale.

Capitolul 7 prezintă contribuțiile originale și concluziile generale ale prezentei teze de doctorat. De asemenea, sunt propuse și discutate direcții de cercetare viitoare, care pot sprijini extinderea și aprofundarea rezultatelor obținute.

1. Analiza critică a stadiului actual privind progresele recente și perspectivele materialelor și echipamentelor balistice

1.1 Considerații generale

Balistica terminală descrie interacțiunea dintre proiectil și blindaj în etapa finală a traiectoriei, până la oprirea completă a proiectilului sau pătrunderea sa integrală prin structura de protecție. Această etapă presupune interacțiunea complexă dintre proiectil și materialul țintei, incluzând deformarea atât a proiectilului, cât și a blindajului, precum și mecanismele de transfer și disipare a energiei în cadrul structurii. Înțelegerea balisticii terminale este esențială pentru proiectarea unor sisteme de blindaj eficiente și pentru optimizarea capacităților de protecție ale materialelor.

Pe baza fenomenelor asociate transferului de energie între proiectil și țintă, a mecanismelor de disipare a energiei și a proceselor de distrugere implicate, evenimentul balistic poate fi clasificat în trei categorii principale: impact cu viteză redusă, impact cu viteză mare și impact cu viteză foarte mare. Această clasificare se bazează pe diferențele esențiale în mecanismele de transfer și disipare a energiei, precum și în procesele de distrugere a țintei, care apar pe măsură ce variază viteza proiectilului. Impactul la viteză redusă se produce la viteze sub 500 m/s, caracteristice amenințărilor generate de pistoale. În acest scenariu, glonțul se deformează în formă de "ciupercă" înainte de a fi oprit. Impactul la viteză mare se produce la viteze cuprinse între 500 și 1000 m/s, caracteristice amenințărilor generate de armele de asalt, în acest caz, glonțul tinzând să se fragmenteze la impact. Impactul la viteze foarte mari implică proiectile care se deplasează la viteze de peste 1000 m/s, cum ar fi cele provenite de la dispozitivele explozive improvizate (IED). În regimul de viteză foarte mare, materialele din zona de impact pot prezenta răspunsuri similare celor ale fluidelor comprimate, conducând la o interacțiune balistică extrem de complexă și dificil de modelat [2, 3].

Studiul balistic și dezvoltarea sistemelor performante de blindaj sunt determinate în primul rând de necesitatea de a răspunde la amenințări balistice specifice, în special în cazul proiectilelor, care diferă semnificativ în ceea ce privește viteza, energia și mecanismele de penetrare. Înțelegerea dinamicii impactului proiectilelor, a disipării energiei și a comportamentului materialelor oferă cunoștințele de bază necesare pentru proiectarea unor soluții de protecție eficiente. Cu toate acestea, eficacitatea oricărui sistem de blindaj depinde de capacitatea acestuia de a face față caracteristicilor unice ale diferitelor tipuri de amenințări balistice - de la gloanțe de pistol cu viteză redusă la muniția specifică armelor de asalt cu viteză mare și proiectilele cu viteză foarte mare provenite de la dispozitive explozive improvizate. În secțiunea următoare, tipurile de amenințări balistice vor fi analizate în detaliu, clasificându-le în funcție de viteză, energie și capacitatea lor de penetrare, examinând modul în care acești factori influențează dezvoltarea și performanța sistemelor balistice.

1.2 Tipuri de amenințări balistice

Amenințările balistice includ proiectile cu viteză redusă și foarte mare, inclusiv gloanțe, fragmente și alte obiecte similare, asociate în mod obișnuit cu operațiunile militare. Aceste tipuri de amenințări

reprezintă provocări majore pentru sistemele de protecție, datorită vitezei ridicate și potențialului lor de a produce daune considerabile. Amenințările balistice pot fi clasificate în patru clase principale [1, 9, 10, 11, 12]:

- *proiectilele de calibru mic* cu miez moale (de obicei din plumb) sau miez dur (din oțel sau carbură de tungsten) - sunt lansate de pistoale, puști și mitraliere;

- *proiectilele simulatoare de fragmente (FSP)* - sunt concepute pentru a reproduce acțiunile și efectele fragmentelor rezultate în urma detonării diferitelor tipuri de muniții, cum ar fi bombe, grenade sau obuze de artilerie;

- *proiectile sub formă de tijă* - caracterizate prin forma lor alungită, sunt special concepute pentru a penetra vehicule blindate;

- *proiectilele cu jet cumulativ (EFP)* - reprezintă amenințări avansate, concentrând energia explozivă pentru a forma proiectile de mare viteză capabile să penetreze blindajele. Acestea oferă capacități de penetrare semnificativ superioare față de proiectilele convenționale cu energie cinetică.

În conflictele de amploare, gloanțele și fragmentele reprezintă principala cauză a rănilor.

1.2.1 Proiectile de calibru mic

Gloanțele convenționale sunt realizate fie cu vârfuri rotunde (emisferice) și plate, utilizate în mod obișnuit la pistoale, fie cu vârfuri ascuțite (ogive și conice), caracteristice muniției pentru puști, așa cum este ilustrat în Figura 1.3. Geometria vârfului glonțului are un rol esențial în determinarea performanței sale, influențând stabilitatea în zbor, capacitatea de penetrare și efectele produse asupra țintei la impact.

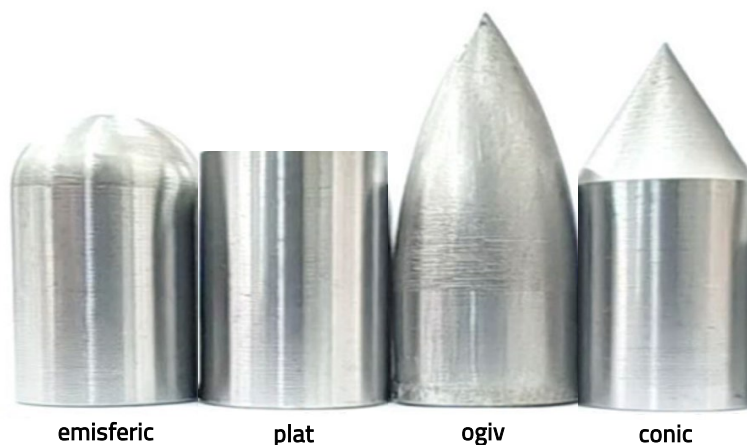


Figura 1.3 Diverse geometrii ale vârfului proiectilului [18]

În concluzie, configurația geometrică și materialele din care sunt fabricate gloanțele au un impact semnificativ în determinarea performanțelor acestora, inclusiv stabilitatea zborului, capacitatea de penetrare și efectele de impact. Tipurile de gloanțe menționate anterior sunt concepute pentru a îndeplini scopuri specifice contextelor militare, îmbunătățind eficacitatea în diverse situații operaționale. Această înțelegere aprofundată a caracteristicilor gloanțelor sprijină selecția adecvată a tipului de muniție, în funcție de cerințele tactice specifice ale scenariului operațional.

1.2.2 Fragmente

Fragmentele pot fi clasificate în două categorii: naturale și prefabricate. Un *fragment natural* se referă la un element de material care se rupe sau se separă în mod natural de un obiect mai mare, fără influența proceselor externe de modelare sau fabricare. Aceste fragmente pot apărea sub acțiunea diferitelor forțe, precum impactul, solicitările sau condițiile de mediu, având adesea forme neregulate. Fragmentele provenite de la armele de artilerie sunt, de obicei, fragmente naturale rezultate din "cămașa" proiectilului. Aceste fragmente sunt create prin distrugerea învelișului care înconjoară explozivul și sunt dispersate prin detonarea încărcăturii explozive. *Fragmentele prefabricate* sunt piese fabricate în mod intenționat, ambalate în interiorul sau în jurul amestecului exploziv pentru a-i spori efectul de fragmentare la detonare. Aceste fragmente, care pot include obiecte metalice precum cuie, piulițe, șuruburi sau bile din rulmenți, asigură o distribuție mai uniformă a fragmentării, îmbunătățind probabilitatea de impact și uniformitatea efectului asupra țintei. În consecință, fragmentele prefabricate sunt frecvent utilizate în compoziția munițiilor precum grenade, mine și dispozitive explozive improvizate. Obținerea unor date statistice concludente privind eficiența blindajului în fața amenințărilor generate de fragmente presupune, de regulă, efectuarea unui număr semnificativ de teste balistice repetate. Acest proces, adesea costisitor, consumator de timp și susceptibil la variabilitate ridicată a rezultatelor, poate fi realizat mai eficient și mai rentabil prin utilizarea proiectilelor simulatoare de fragmente (FSP) în testele de laborator, [Figura 1.5](#).



Figura 1.5 Proiectil simulator de fragmente (FSP)

Așa cum este ilustrat în [Figura 1.5](#), vârful plat cu margini ascuțite este conceput pentru a simula mecanismele de tăiere și penetrare. Această caracteristică reproduce modul în care fragmentele reale interacționează cu diverse materiale și le penetrează.

1.2.3 Deformarea și deteriorarea proiectilelor

Deformarea și deteriorarea unui proiectil la impactul cu ținta sunt influențate de compoziția miezului, de viteza de decelerare înregistrată în timpul impactului și de unghiul de impact. Pentru a analiza și a înțelege în detaliu diferitele mecanisme de deformare și deteriorare ale gloanțelor, acestea pot fi încadrate în următoarele categorii uzuale: deformarea în formă de ciupercă, desprinderea învelișului glonțului, eroziunea miezului, fragmentarea și deformarea (îndoirea) glonțului [[17](#), [25](#), [26](#), [27](#), [28](#), [29](#)].

Studiul privind amenințările balistice, inclusiv proiectilele de calibru mic, fragmentele și mecanismele de deformare ale acestora, evidențiază nevoia critică de sisteme eficiente de protecție balistică. Evaluarea comportamentului proiectilelor la impact, a capacităților lor de penetrare și a factorilor care influențează performanțele acestora oferă o înțelegere fundamentală a principiilor de proiectare a

echipamentelor individuale balistice și a altor structuri de protecție. Secțiunea următoare va analiza modul în care diferite modele de structuri balistice și materiale sunt adaptate pentru a reduce diversele amenințări discutate, asigurând o protecție optimă și echilibrând în același timp factori precum greutatea, flexibilitatea și durabilitatea.

1.3 Considerații de proiectare pentru sistemele de protecție balistică. Clasificarea și analiza echipamentelor individuale de protecție

Greutatea echipamentelor individuale pentru protecție balistică este esențială pentru mobilitatea purtătorului. O opțiune frecvent utilizată pentru aplicațiile balistice o reprezintă structurile metalice, în special cele fabricate din oțel. Cu toate acestea, greutatea metalelor este destul de mare și, prin urmare, nu este practică pentru proiectarea structurilor balistice ușoare. Materialele compozite laminate, care sunt în general mai ușoare decât metalele și dispun de proprietăți mecanice superioare, pot oferi performanțe comparabile cu cele ale oțelului și pot fi utilizate pe scară largă în structura echipamentelor de protecție balistică. Un sistem balistic stratificat este alcătuit din multiple straturi de materiale aparținând unor clase diferite (de obicei ceramică și fibre de înaltă performanță), cunoscut și sub denumirea de sistem balistic compozit ceramic, oferă un avantaj față de plăcile monolitice dure din ceramică sau oțel în ceea ce privește performanța balistică și limita balistică raportată la unitatea de masă. Această structură balistică este un ansamblu de materiale compozite laminate care conțin un strat frontal dur cu rezistență ridicată la compresiune și un strat suport, flexibil, cu rezistență ridicată la tracțiune [1, 30, 31]. Rolul de bază al acestei structuri este de a opri un glonț în momentul impactului. Funcția principală a stratului frontal este de a reduce viteza glonțului și de a-l deforma și fragmenta. Funcția stratului suport este de a reține fragmentele rezultate în urma cedării structurale, de a disipa energia cinetică rămasă a proiectilului și de a menține integritatea structurii [32, 33]. Materialele dure, precum plăcile ceramice (de exemplu alumină, carbură de siliciu, carbură de bor sau diborură de titan), sunt utilizate ca straturi frontale. Ceramica reprezintă un material optim pentru stratul frontal, datorită durității sale ridicate și densității reduse. Stratul suport este în mod normal fabricat din materiale compozite armate cu fibre (de exemplu aramidă, polietilenă cu greutate moleculară foarte mare, fibră de sticlă și fibră de carbon), caracterizate prin greutate scăzută și comportament flexibil. În anumite configurații balistice, încorporarea unui strat de cauciuc permite redistribuirea energiei de impact pe o suprafață mai mare. Stratul frontal și cel suport sunt asamblate prin intermediul unor adezivi specializați, cu performanțe balistice, care asigură coeziunea structurală a ansamblului [34].

Evoluția echipamentelor de protecție balistică, prezentată în această secțiune, urmărește obținerea unui echilibru între protecție, confort și mobilitate, răspunzând în același timp unor amenințări specifice prin utilizarea materialelor performante și a ansamblurilor stratificate. Cu toate acestea, eficacitatea acestor sisteme balistice nu este determinată doar de compoziția materialului sau de configurația acestora; depinde, de asemenea, de nivelul de protecție balistică pe care îl oferă împotriva diferitelor amenințări. În secțiunea următoare, vor fi discutate nivelurile standardizate de clasificare utilizate pentru a defini capacitățile balistice ale echipamentelor de protecție individuală. Aceste niveluri, care acoperă gama de protecție de la gloanțele de pistol cu viteză redusă până la proiectilele de mare viteză specifice armelor de asalt, au un rol esențial în ghidarea selecției și proiectării sistemelor balistice

pentru a satisface cerințele operaționale specifice. O bună înțelegere a acestor niveluri de protecție permite o interpretare aprofundată a modului în care structura balistică este concepută pentru a răspunde eficient diverselor scenarii de amenințare, contribuind la asigurarea siguranței și a performanței optime a purtătorului în medii operaționale variate și contexte tactice complexe.

1.4 Nivelurile de protecție ale echipamentelor balistice

Echipamentele de protecție individuală implică efectuarea unor testări balistice dedicate în vederea verificării conformității fiecărei componente cu cerințele minime de performanță, ca precondiție pentru implementarea lor în aplicații practice. Testul de rezistență balistică se efectuează în conformitate cu standardele privind structurile antiglonț stabilite de Statele Unite ale Americii și de Uniunea Europeană. Standardele de referință cel mai des utilizate sunt NIJ Standard-0101.07, care prezintă procedurile de testare, împreună cu NIJ Standard-0123.00, care descrie nivelurile de protecție balistică, și Home Office Body Armour Standard (2017) [56, 57, 58]. Aceste standarde oferă ghiduri detaliate privind tehnicile, echipamentele, condițiile de testare și terminologiile utilizate în evaluarea proprietăților de impact ale diverselor structuri balistice.

După stabilirea unei înțelegeri cuprinzătoare a standardelor și procedurilor de testare pentru echipamentele de protecție individuală, inclusiv evaluarea rezistenței balistice și clasificarea nivelurilor de protecție, vor fi analizate materialele care au un rol esențial în îmbunătățirea protecției balistice. Următoarea secțiune va investiga materialele ceramice utilizate pentru protecția balistică, examinând proprietățile, avantajele și aplicațiile acestora în dezvoltarea sistemelor performante de protecție balistică concepute pentru a oferi o rezistență superioară împotriva proiectilelor cu viteză mare.

1.5 Materiale ceramice utilizate pentru protecție balistică

Materialele ceramice uzuale sunt utilizate în configurațiile balistice sub formă de plăci monolitice, așa cum este ilustrat în [Figura 1.11a](#). Plăcile monolitice sunt considerate, în general, ca o singură structură rigidă, din material omogen. Acest tip de structură nu oferă, de obicei, capacitatea de a rezista la lovituri multiple atunci când este supusă impactului proiectilelor. Pentru a îmbunătăți protecția balistică, reducerea dimensiunii plăcilor este o strategie eficientă. Prin micșorarea dimensiunilor plăcilor, zona vulnerabilă la impact este semnificativ redusă în cazul compromiterii unei singure plăci. Această abordare de proiectare este cunoscută sub denumirea de "structură balistică de tip mozaic", așa cum este ilustrat în [Figura 1.11b](#). Aceste structuri au fost dezvoltate pentru a oferi rezistență la lovituri multiple. În structurile balistice de tip mozaic, multiple plăci ceramice sunt îmbinate într-un aranjament organizat (cu forme hexagonale, dreptunghiulare, pătrate, sferice sau cilindrice), astfel încât distrugerea unei plăci să limiteze propagarea fisurilor și să limiteze afectarea plăcilor adiacente.

Introducerea unui strat suplimentar de cauciuc pe suprafața ceramicii poate influența semnificativ performanța balistică a acesteia. Si și colab. [86] au efectuat teste balistice pe o structură din ceramică-metal întărită cu cauciuc poliuretan, analizând trei configurații diferite ale poziționării cauciucului: în față, la mijloc și în spate. Studiul concluzionează faptul că poliureea îmbunătățește semnificativ performanța balistică a structurii, în special atunci când este poziționată ca suprafață de impact.

Jitarășu și Lache [87] au efectuat simulări numerice și teste balistice utilizând diferite tipuri de proiectile pe diferite configurații de structuri compozite ceramice monolitice, inclusiv variante cu și fără strat de cauciuc aplicat ca suprafață de impact. Studiile lor au demonstrat că sistemele balistice compozite cu straturi de cauciuc oferă performanțe superioare de absorbție a energiei.

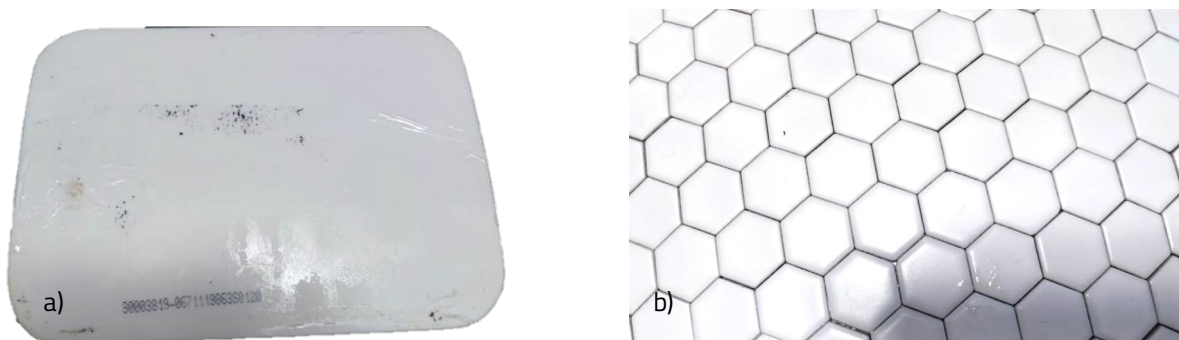


Figura 1.11 Configurații ale plăcilor ceramice utilizate în structurile balistice:

a) placă monolitică; b) plăci hexagonale de tip mozaic

Integrarea structurilor monolitice și de tip mozaic, poziționarea optimizată a straturilor de cauciuc și a altor materiale, poate optimiza performanța balistică, oferind o protecție ridicată împotriva unei varietăți de amenințări balistice. Procesul continuu de dezvoltare și optimizare a acestor configurații asigură adaptabilitatea sistemelor balistice la cerințele tot mai complexe ale mediilor operaționale moderne.

În urma evaluării caracteristicilor mecanice, a inovațiilor în materie de proiectare și a tehnicilor de fabricare a materialelor ceramice utilizate în structurile balistice, este esențial să fie luată în considerare o altă componentă fundamentală a sistemelor moderne de protecție: fibrele. Următoarea secțiune va explora diferitele tipuri de fibre utilizate în aplicațiile balistice, examinând proprietățile lor unice, caracteristicile de performanță și rolul esențial pe care îl au în creșterea eficacității generale a sistemelor balistice. Înțelegerea mecanismelor de interacțiune între materialele ceramice și fibrele de înaltă performanță permite fundamentarea concepției structurilor compozite optimizate, capabile să asigure un nivel ridicat de protecție balistică în fața unor amenințări multiple și variate.

1.6 Fibre utilizate în aplicații balistice

Dezvoltarea continuă în domeniul materialelor antiglonț, în special al vestelor balistice flexibile realizate din țesături, conduce la progrese în acest domeniu. În ultimele două decenii, au fost dezvoltate fibre cu proprietăți mecanice ridicate, destinate utilizării în aplicații de impact balistic. Aceste fibre au în general o greutate scăzută și au capacități mai mari de absorbție a energiei. În prezent, fibrele sintetice sunt clasa dominantă de materiale utilizate în vestele antiglonț, în special în industriile care necesită o stabilitate mecanică, termică și chimică superioară. Aceste fibre de înaltă performanță sunt materiale tehnice avansate, recunoscute pentru rezistența și rigiditatea (modulul de elasticitate) lor superioară, densitatea scăzută și capacitatea de a rezista la temperaturi ridicate, substanțe chimice, abraziune, oboseală mecanică și tăieturi [34, 89, 90].

Fibrele de aramidă și polietilenă cu greutate moleculară foarte mare (UHMWPE) sunt principalele materiale utilizate în fabricarea echipamentelor de protecție balistică. Aceste materiale prezintă o

rezistență superioară la tracțiune și o greutate redusă în comparație cu materialele alternative, fapt care le conferă o eficiență ridicată în aplicațiile balistice. Aceste performanțe mecanice superioare sunt influențate semnificativ de procesele de fabricare a fibrelor. De exemplu, metoda de filare umedă cu jet uscat utilizată la producerea fibrelor aramidice asigură o aliniere moleculară optimă, conducând la proprietăți superioare de rezistență la tracțiune și rigiditate. În mod similar, procesul de filare cu gel utilizat în cazul fibrelor de UHMWPE optimizează rezistența la tracțiune prin orientarea lanțurilor polimerice în timpul filării. Înțelegerea și optimizarea acestor tehnici de fabricație sunt esențiale pentru obținerea performanțelor mecanice dorite în cazul materialelor pentru protecție balistică [92, 122, 123].

Materialele prezentate în această secțiune, de la fibrele sintetice de înaltă performanță la cele naturale, asigură premisele necesare pentru fabricarea țesăturilor tehnice destinate să răspundă cerințelor ridicate ale protecției balistice. Secțiunea următoare va examina în detaliu modul în care aceste materiale sunt procesate în țesături tehnice de înaltă performanță, punând accent pe integrarea proprietăților mecanice, a capacității de absorbție a energiei și a arhitecturilor structurale, în vederea realizării unor textile specializate care contribuie la creșterea nivelului de protecție, flexibilitate și funcționalitate în aplicațiile balistice.

1.7 Țesături utilizate pentru protecție balistică

Țesăturile destinate protecției balistice joacă un rol esențial în structurile de protecție individuală și structurile de blindaj ale vehiculelor, fiind destinate opririi proiectilelor de mare viteză. Eficacitatea acestor țesături depinde de capacitatea lor de a absorbi și a disipa energia de impact. Acest proces presupune o interacțiune complexă între capacitatea locală de absorbție a energiei a țesăturilor și eficiența cu care energia absorbită este transferată către punctele de intersecție ale firelor, unde este disipată prin mecanisme de întindere și rupere a fibrelor. Țesăturile utilizate pentru protecție balistică pot fi clasificate în trei tipuri principale pe baza construcției lor: țesute, laminate unidirecționale (UD) și nețesute. Arhitectura acestor țesături poate fi clasificată în structuri 2D și 3D, țesăturile 2D având o formă plană, iar cele 3D prezentând o geometrie tridimensională mai complexă, capabilă să îmbunătățească absorbția și disiparea energiei.

1.7.1 Aspecte importante privind performanța țesăturilor utilizate pentru protecție balistică

Performanța țesăturilor destinate protecției balistice este influențată de o varietate de factori, inclusiv caracteristicile structurale ale țesăturilor și proprietățile proiectilelor. Printre factorii care influențează performanța țesăturilor se numără tipul și proprietățile fibrelor, arhitectura țesăturii și interacțiunea dintre straturi în momentul impactului. Interacțiunea dintre fire și dintre țesătură și proiectil joacă un rol esențial, fiind influențată de factori precum geometria și viteza proiectilului. Condițiile de mediu, inclusiv temperatura și umiditatea, pot afecta considerabil performanța acestor structuri.

Pe baza înțelegerii aprofundate a comportamentului țesăturilor balistice, secțiunea următoare se concentrează asupra materialelor compozite armate cu fibre de înaltă performanță, evidențiind tranziția de la soluțiile textile convenționale la arhitecturi multifuncționale cu performanțe superioare.

În timp ce țesăturile contribuie semnificativ la disiparea energiei și la protecția împotriva impactului, materialele compozite integrează aceste fibre într-o matrice de rășină, formând structuri rigide, cu greutate redusă și foarte durabile. Aceste materiale compozite valorifică proprietățile unice ale fibrelor, integrându-le cu sisteme de matrice special adaptate pentru a atinge performanțe balistice superioare. Următoarea secțiune va explora proiectarea, fabricarea și optimizarea performanțelor acestor materiale compozite armate cu fibre, evidențiind rolul lor în aplicațiile moderne, în care greutatea redusă și rezistența sporită la amenințări complexe sunt esențiale.

1.8 Materiale compozite armate cu fibre de înaltă performanță utilizate pentru protecție balistică

Materialele compozite sunt realizate prin combinarea a două sau mai multe materiale distincte pentru a crea o structură cu proprietăți noi sau îmbunătățite. Prin această integrare se obțin, în mod obișnuit, caracteristici de performanță superioare față de materialele tradiționale. De exemplu, materialele compozite pe bază de fibre, utilizate pe scară largă în aplicații balistice, utilizează proprietățile superioare ale fibrelor pentru a oferi o rezistență îmbunătățită la impact. Aceste materiale compozite nu oferă doar o durabilitate îmbunătățită, ci contribuie și la o reducere semnificativă a greutății, aspect esențial pentru aplicațiile în care mobilitatea și rezistența ridicată sunt criterii critice de performanță. În plus, materialele compozite prezintă o rezistență chimică și la intemperii foarte ridicată, făcându-le adecvate pentru utilizare în diverse medii. Varietatea materialelor de armare și a matricelor permite ajustarea proprietăților compozitelor. Selectarea și orientarea precisă a fibrelor permit obținerea de materiale compozite cu proprietăți direcționale, adaptate cerințelor structurale specifice. Această versatilitate face ca materialele compozite să fie ideale pentru aplicații care necesită proprietăți distincte în direcții diferite.

1.8.1 Aspecte importante privind performanța materialelor compozite balistice armate cu fibre

În timpul impactului balistic, diverși factori contribuie la deteriorarea materialelor compozite. Printre aceștia se disting fisurarea matricei, delaminarea, ruperea fibrelor și pierderile energetice generate de frecare care au loc între materialul compozit și proiectil. Mecanismele de absorbție a energiei în timpul unor astfel de impacturi sunt influențate în principal de pierderile generate de frecare. Acest proces de disipare a energiei implică alunecarea fibrelor, interacțiunea dintre straturile adiacente și interacțiunile care au loc între proiectil și materialul compozit. Aceste reacții la frecare sunt deosebit de pronunțate la viteze de impact reduse. Atunci când un material compozit este supus unui impact balistic, comportamentul structural rezultat poate fi diferențiat în reacții locale, limitate la zona de impact și reacții globale, care implică răspunsul întregii structuri la solicitarea balistică. La viteze mici, se observă de obicei o reacție globală, caracterizată prin propagarea undelor de tensiune. Pe măsură ce viteza de impact crește, această reacție globală se transformă într-o reacție locală, care se manifestă prin cedarea materialului prin forfecare sau prin perforare. În cazul vitezelor de impact reduse, există suficient timp pentru transferul și dispersarea energiei de impact pe o suprafață largă a materialului compozit. Această durată crescută a impactului facilitează generarea și propagarea undelor elastice, inclusiv a undelor de forfecare și de încovoiere, către limitele structurii. În consecință, capacitatea

materialului de a absorbi și disipa energia este îmbunătățită, diminuând riscul de cedare severă al compozitului [178].

Performanța ridicată a materialelor compozite a contribuit semnificativ la progresul tehnologiilor în domeniul protecției balistice, asigurând un echilibru optim între rezistența la impact și greutatea redusă. Cu toate acestea, în timp ce armăturile din fibre și matricile materialelor compozite sunt esențiale pentru absorbția energiei și reducerea zonelor distruse, adezivii și rășinile utilizate în cadrul acestor structuri joacă, de asemenea, un rol esențial. Aceste materiale de legătură influențează nu numai îmbinarea și integritatea materialelor, ci și comportamentul lor mecanic în condiții de solicitări crescute. Secțiunea următoare explorează adezivii și rășinile utilizate în structurile de protecție balistică, examinând contribuțiile acestora la disiparea energiei, coeziunea structurală și îmbunătățirea generală a performanței compozitelor în aplicații solicitante.

1.9 Adezivi și rășini utilizate în structurile pentru protecție balistică

Straturile intermediare de adeziv un rol esențial în cadrul structurilor balistice compozite, influențând în mod decisiv comportamentul acestora la impact. Studii recente, precum cele realizate de Shen și colab. [210] și Bașer și colab. [211] au arătat că variația grosimii stratului de adeziv, în special în structurile compozite ceramice, poate influența capacitatea de absorbție a energiei, reducerea delaminării straturilor ceramice și controlul tensiunilor de forfecare. O grosime mai mare a stratului de adeziv îmbunătățește absorbția energiei prin distribuirea tensiunii de la stratul ceramic la stratul suport compozit, în timp ce o grosime mai mică a stratului de adeziv ajută la prevenirea curburii și fragmentării plăcilor ceramice. În plus, forța de adeziune și alungirea la rupere a stratului de adeziv reprezintă factori esențiali pentru performanța în condiții de impacturi multiple, deoarece influențează coeziunea între straturile de material ale compozitului și capacitatea de a controla eficient degradarea structurală în urma solicitărilor repetate.

Rășinile au un rol esențial în cadrul sistemelor balistice, acționând ca lianți care fixează fibrele utilizate pentru protecție balistică, menținându-le poziția și orientarea optimă pentru a rezista impactului proiectilelor. Aceste rășini nu numai că ajută la distribuirea uniformă a sarcinii între fibre pe timpul impactului, dar împiedică și propagarea microfisurilor și sporesc durabilitatea structurii. Deși rășinile în sine nu au proprietăți de rezistență balistică, acestea sunt esențiale pentru legarea și fixarea fibrelor de armare, contribuind la distribuirea energiei cinetice prin mecanisme precum fisurarea matricei, delaminarea, forfecarea fibrelor, ruperea la tracțiune și alunecarea prin frecare. Selectarea tipului de rășină poate influența în mod semnificativ energia totală absorbită și efectele rezultate în urma impactului balistic.

Secțiunea următoare va fi dedicată utilizării cauciucului în aplicațiile balistice, explorând proprietățile sale distinctive, inovațiile privind integrarea sa în sistemele balistice și rolul său tot mai important în satisfacerea cerințelor impuse de războiul și securitatea modernă. În calitate de material multifuncțional și de înaltă performanță, cauciucul are potențialul de a redefini limitele protecției balistice, oferind soluții inovatoare pentru provocări complexe, asigurând totodată un nivel optim de siguranță, flexibilitate și eficiență.

1.10 Materiale din cauciuc utilizate pentru protecția balistică

În domeniul protecției balistice, selectarea materialelor este extrem de importantă pentru a asigura atât siguranța, cât și eficiența sistemului de protecție balistică. Printre multitudinea de materiale disponibile, cauciucul a dobândit un rol central în diverse aplicații balistice. Proprietățile sale unice precum flexibilitatea, absorbția energiei și rentabilitatea îl fac o alegere atractivă în proiectarea soluțiilor de protecție. Flexibilitatea cauciucului îi permite deformarea în condiții de efort mecanic și revenirea la forma inițială odată ce solicitarea este eliminată. Această caracteristică este esențială în aplicațiile balistice, deoarece permite materialului să absoarbă și să disipeze energia de impact, reducând potențialul de penetrare și de deformare a feței posterioare. Datorită naturii sale viscoelastice, cauciucul are capacitatea de a transforma o parte semnificativă a energiei de impact în căldură, reducând astfel forța transmisă prin material [227]. O altă caracteristică a cauciucului este capacitatea sa de a absorbi energia cinetică. La impact, cauciucul se deformează, iar acest proces de deformare absoarbe energia, reducând forța transmisă prin material. Capacitatea cauciucului de a se deforma la impact contribuie la absorbția energiei cinetice a proiectilelor, sporind eficiența sistemului de protecție. Densitatea relativ scăzută a cauciucului contribuie la aplicabilitatea sa în aplicațiile balistice în care greutatea este un factor critic. Utilizarea cauciucului permite proiectarea unor sisteme de protecție ușoare fără a compromite performanța. Acest avantaj este deosebit de important în cazul echipamentelor de protecție individuală, unde greutatea excesivă poate limita mobilitatea și eficiența. În plus față de proprietățile sale mecanice, cauciucul este, de asemenea, un material cu eficiență economică ridicată. Disponibilitatea și ușurința fabricării contribuie la accesibilitatea sa. În plus, durabilitatea cauciucului contribuie la extinderea ciclului de viață, reducând necesitatea înlocuirii frecvente și, prin urmare, costurile pe termen lung. Cauciucul are o rezistență foarte bună la diverși factori de mediu, inclusiv fluctuațiile de temperatură, umiditatea și radiațiile UV. Această combinație de costuri inițiale reduse și durabilitate recomandă cauciucul drept o opțiune eficientă din punct de vedere economic pentru aplicațiile balistice.

Utilizarea optimizată a cauciucului în aplicații militare evidențiază capacitatea și eficiența acestuia în îmbunătățirea protecției balistice. Fie că este utilizat în sisteme balistice, structuri defensive, poligoane de tragere sau dispozitive de reținere a proiectilelor, materialele din cauciuc contribuie în mod semnificativ la reducerea forțelor de impact, absorbția undelor de șoc și îmbunătățirea siguranței în medii de luptă și de antrenament. Având în vedere progresele continue în ingineria materialelor din cauciuc și tehnologia compozitelor, se anticipează o extindere semnificativă a rolului cauciucului în aplicațiile balistice moderne.

1.10.1 Mecanisme de absorbție a energiei la impact balistic în materialele din cauciuc

În timpul impactului balistic, cauciucul suferă solicitări la compresiune și deformări semnificative, acestea reprezentând principalele mecanisme de absorbție a energiei. Natura vâscoelastică a cauciucului îi conferă capacitatea de a se deforma la viteze mari de impact, specifice impacturilor balistice, disipând energia cinetică și reducând forțele transmise prin material. Acest proces de deformare implică atât comportamente de natură elastică, cât și plastică, ceea ce face ca materialul să absoarbă eficient energia. Straturile de cauciuc pot acționa ca amortizoare, absorbind și disipând

energia de impact pe o suprafață mai mare, îmbunătățind astfel rezistența balistică a structurilor de protecție. În timpul deformării, o parte din energia cinetică a proiectilului este transformată în căldură în interiorul materialului din cauciuc. Această disipare a căldurii contribuie la capacitatea generală de absorbție a energiei a cauciucului. Elasticitatea intrinsecă a cauciucului generează un efect de relaxare elastică, prin care materialul tinde să își recupereze forma inițială după deformare. Această relaxare elastică poate disipa și mai mult energia și reduce riscul de cedare a materialului în cazul unor impacturi repetate.

Straturile de cauciuc prezintă o capacitate ridicată de a rezista la lovituri multiple, datorită elasticității lor, proprietăților de absorbție a energiei și comportamentului lor de recuperare elastică după impact. La impactul cu proiectile de mare viteză, materialele din cauciuc suferă deformări localizate, absorbind energia cinetică prin mecanisme de deformare elastică. Spre deosebire de materialele casante, care se fisurează și se fragmentează la impact, straturile de cauciuc tind să distribuie solicitarea mecanică pe o suprafață mai mare și să își recupereze treptat forma, ceea ce le face eficiente pentru impacturi repetate. Capacitatea materialului de a rezista la impacturi multiple fără deteriorări structurale semnificative este îmbunătățită de rezistența ridicată la tracțiune și de alungirea la rupere, care previn cedarea severă chiar și atunci când este perforat.

1.11 Concluzii

Reunind progresele în știința materialelor, ingineria aplicată și concepția structurală, sistemele de protecție balistică sunt dezvoltate pentru a face față unor amenințări balistice tot mai sofisticate. Evoluția sistemelor balistice tradiționale de la structuri metalice la materiale compozite de înaltă performanță, ceramică și structuri hibride evidențiază cercetarea continuă pentru îmbunătățirea protecției, mobilității și eficienței.

Progresul sistemelor moderne de protecție balistică este determinat în primul rând de dezvoltarea materialelor inovatoare. Materialele compozite, fibrele de înaltă performanță, ceramica, adezivii și rășinile sunt esențiale în dezvoltarea capacităților de protecție. Materialele ceramice precum alumina (Al_2O_3), carbura de siliciu (SiC) și carbura de bor (B_4C) oferă o duritate foarte ridicată, permițându-le să fragmenteze și să erodeze proiectilele la impact. Integrarea lor în sistemele hibride, în special în cazul structurilor balistice de tip mozaic, îmbunătățește performanța în cazul loviturilor multiple și reduce extinderea zonei afectate de impact. Straturile suport integrate cu straturile ceramice îmbunătățesc și mai mult absorbția energiei prin reținerea fragmentelor și redistribuirea forțelor de impact. Fibrele, în special aramida (de exemplu, Kevlar) și polietilena cu greutate moleculară foarte mare (UHMWPE) prezintă o rezistență mecanică ridicată la tracțiune, menținând în același timp o greutate specifică scăzută. Acestea contribuie la consolidarea compozitelor și la menținerea flexibilității, asigurând totodată o absorbție ridicată a energiei. Adezivii și rășinile au un rol esențial în menținerea integrității structurale a materialelor compozite, facilitând distribuția uniformă a tensiunilor între straturi și contribuind la optimizarea comportamentului sistemelor stratificate în fața solicitărilor intense generate de impacturi balistice.

Cauciucul s-a impus, în contextul acestor progrese, ca un material inovator pentru îmbunătățirea proiectării și eficienței sistemelor balistice moderne. Proprietățile sale distincte, precum elasticitatea,

absorbția de energie și controlul propagării fisurilor, răspund eficient provocărilor majore în proiectarea sistemelor moderne balistice. Capacitatea cauciucului de a absorbi și redistribui energia de impact îmbunătățește semnificativ performanța sistemelor balistice având la bază materiale compozite și ceramice. Aplicațiile esențiale ale cauciucului în cadrul sistemelor balistice includ:

- a) *absorbția și distribuția energiei* - straturile de cauciuc, în special în configurațiile în formă de fagure de albine, îmbunătățesc disiparea energiei cinetice, reducând traumele balistice și deformarea feței posterioare a structurilor balistice. Această caracteristică este esențială pentru reducerea leziunilor suferite de purtător;
- b) *îmbunătățirea rezistenței la lovituri multiple* - în cadrul structurilor balistice de tip mozaic, utilizarea cauciucului pentru îmbinarea plăcilor ceramice contribuie la limitarea extinderii fisurilor și la protejarea plăcilor adiacente în cazul unui impact. Această caracteristică este evidentă în condițiile în care sunt anticipate lovituri succesive cu proiectile;
- c) *prevenirea propagării fisurilor* - prezența cauciucului între plăcile ceramice împiedică propagarea fisurilor pe întreaga suprafață a sistemului balistic, asigurând astfel menținerea integrității structurale chiar și în urma impacturilor cu nivel energetic ridicat;
- d) *îmbunătățirea performanțelor dinamice* - studiile au demonstrat că materialele din cauciuc utilizate ca straturi intermediare în configurațiile structurilor balistice îmbunătățesc semnificativ rezistența acestor sisteme la solicitări dinamice, inclusiv la reducerea undelor de șoc generate de impacturile cu viteză mare.

În plus, flexibilitatea cauciucului contribuie la confortul și ergonomia echipamentelor de protecție individuală, asigurând că acestea își mențin eficiența operațională. Utilizarea sa în sistemele de blindaj ale vehiculelor îmbunătățește, de asemenea, adaptabilitatea prin oferirea de soluții ușoare care nu compromit integritatea structurală.

Această abordare cuprinzătoare a sistemelor de protecție balistică stabilește premisele pentru rolul pe care cauciucul îl poate avea în dezvoltarea acestui domeniu. Prin gestionarea unor provocări precum absorbția energiei, limitarea zonei distruse în urma impactului, rezistența la lovituri multiple și rentabilitatea, cauciucul s-a impus ca o componentă esențială în proiectarea sistemelor moderne balistice. Cercetările viitoare în domeniul materialelor compozite pe bază de cauciuc și al tehnologiilor de îmbinare elastomerică sunt esențiale pentru îmbunătățirea durabilității și performanței sistemelor de protecție balistică.

Având în vedere analiza critică a stadiului actual al sistemelor de protecție balistică și concluziile formulate pe baza acesteia, această teză de doctorat își propune să dezvolte o soluție inovatoare de sistem balistic, în vederea îmbunătățirii performanței echipamentelor de protecție individuală, utilizând materiale ușoare și la costuri scăzute. După cum se prezintă în detaliu în capitolul 2, cercetarea se concentrează pe integrarea materialelor de înaltă performanță, în special a cauciucului, pentru a optimiza rezistența la impact, absorbția de energie și performanța la lovituri multiple, în conformitate cu standardele de protecție stabilite.

2. Scopul și obiectivele cercetării

Scopul principal al acestei teze de doctorat constă în dezvoltarea unei soluții inovatoare de sistem balistic, având în vedere îmbunătățirea performanței echipamentelor de protecție individuală prin utilizarea de materiale cu greutate redusă și costuri scăzute. Cercetarea realizată are ca scop identificarea unei soluții inovatoare care să răspundă limitărilor actuale în fabricarea structurilor balistice din materiale ușoare de înaltă performanță, punând accent pe reducerea atât a greutății, cât și a costurilor de producție ale sistemelor și componentelor de protecție. Un aspect esențial al acestei cercetări îl reprezintă integrarea materialelor cu proprietăți superioare de absorbție a energiei, precum cauciucul, menținând totodată o rezistență ridicată la impact și conformitatea cu cerințele standardelor balistice. Structurile nou propuse și analizate în această cercetare trebuie să asigure un echilibru optim între factori critici precum rezistența la impact, menținerea integrității structurale după impact, rezistența la lovituri multiple și disiparea eficientă a energiei, cu scopul de a reduce trauma balistică și deformarea feței posterioare a structurii balistice. Prin această abordare, se va facilita progresul în dezvoltarea tehnologiilor de protecție balistică de ultimă generație, având ca rezultate creșterea nivelului de siguranță, optimizarea performanțelor și extinderea utilizării acestora în sectoare militare și civile.

Pentru îndeplinirea scopului principal al tezei, au fost formulate următoarele obiective:

1. Analiza critică a stadiului actual în domeniul structurilor ușoare pentru protecție balistică;
2. Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice noi pentru echipamentele individuale de protecție flexibile și rigide, în conformitate cu standardele stabilite de organisme de reglementare;
3. Analiza teoretică și experimentală a comportamentului hiperelastic al materialelor din cauciuc utilizate în structurile balistice noi;
4. Analiza teoretică și experimentală a noilor structuri balistice flexibile la impact cu viteză redusă;
5. Analiza teoretică și experimentală a noilor structuri balistice rigide la impact cu viteză mare.

3. Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice noi pentru echipamentele individuale de protecție flexibile și rigide

Progresul continuu în domeniul materialelor de protecție balistică a condus la explorarea unor structuri compozite inovatoare care combină flexibilitatea și rezistența. Sistemele tradiționale balistice utilizează materiale rigide pentru a absorbi energia proiectilelor, dar noile sisteme care încorporează componente hiperelastice, cum ar fi cauciucul, oferă o absorbție îmbunătățită a energiei și o reducere a efectelor impactului. Acest capitol prezintă proiectarea și dezvoltarea structurilor de protecție balistică flexibile și rigide, concentrându-se pe selectarea materialelor, optimizarea arhitecturii stratificate și optimizarea structurală.

3.1 Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice flexibile

Structurile balistice flexibile, denumite panouri compozite UHMWPE - cauciuc, sunt alcătuite din două straturi de materiale distincte: o țesătură unidirecțională din polietilenă cu masă moleculară foarte mare (UHMWPE UD – Dyneema HB26), cu o densitate de 970 kg/m^3 , și un strat de cauciuc stiren-butadienic (SBR-65), având o duritate de 65 Shore A și o densitate de 1530 kg/m^3 .

În cadrul acestei cercetări au fost utilizate trei configurații diferite de panouri compozite UHMWPE - cauciuc, luând în considerare amplasarea stratului de cauciuc. Prima configurație (PE-RCP-S) constă dintr-un strat de cauciuc SBR-65, plasat între două straturi de UHMWPE UD. Stratul de cauciuc are o grosime de 5 mm, iar fiecare strat de UHMWPE UD este compus din 9 lamine suprapuse, cu o grosime individuală de 0,2 mm. Următoarele două configurații sunt alcătuite dintr-un strat de cauciuc SBR-65 și un strat de UHMWPE UD. Grosimea stratului de cauciuc este aceeași ca în prima configurație, iar stratul de UHMWPE UD este compus din 18 lamine suprapuse, fiecare cu o grosime de 0,2 mm. Singura diferență dintre cele două configurații este amplasarea stratului de cauciuc. În a doua configurație (PE-RCP-F), stratul de cauciuc este amplasat ca suprafață de impact, în timp ce în a treia configurație (PE-RCP-B), stratul de cauciuc este amplasat pe suprafața din spate a panoului balistic, ca strat suport.

3.2 Proiectarea și dezvoltarea structurilor balistice rigide

Metodologia de pregătire a structurilor balistice rigide pentru testare este ilustrată în [Figura 3.3](#) și implică mai multe etape importante. În prima etapă, structurile tip fagure de albine din cauciuc au fost tăiate manual la dimensiuni precise, [Figura 3.3b](#), urmate de asamblarea unui model hexagonal de plăci ceramice de tip mozaic, în care plăcile au fost inserate în cavitățile fagurelui, [Figura 3.3c](#). Odată ce toate componentele au fost pregătite, s-a procedat la dispunerea succesivă a straturilor de material, [Figura 3.3d](#). Pentru a îmbunătăți integritatea structurală și a reduce concentrațiile de tensiune la interfețele dintre materiale, două straturi de țesătură din polietilen tereftalat armat cu fibre de polietilen tereftalat (SrPET) au fost inserate la fiecare interfață (de exemplu, cauciuc-ceramică, ceramică-ceramică etc.), [Figura 3.3e](#), îmbunătățind rezistența la tracțiune și aderența. Structura asamblată a fost apoi fixată cu

ajutorul unei folii de întindere, închisă într-o folie de ambalare în vid și sigilată cu bandă adezivă la ambele capete, [Figura 3.3f](#), pentru a asigura condiții ermetice pentru procesul ulterior de călire. Probele, [Figura 3.3g](#), au fost tratate printr-un proces de călire asistată de vid într-un cuptor, unde presiunea și temperatura controlată au favorizat îmbinarea adecvată a straturilor și eliminarea golurilor de aer, [Figura 3.3h](#). După finalizarea ciclului de călire, structura compozită balistică întărită a fost îndepărtată din sacul de vid, obținându-se o configurație consolidată, cu rezistență la impact, pregătită pentru testare balistică, [Figura 3.3i](#).

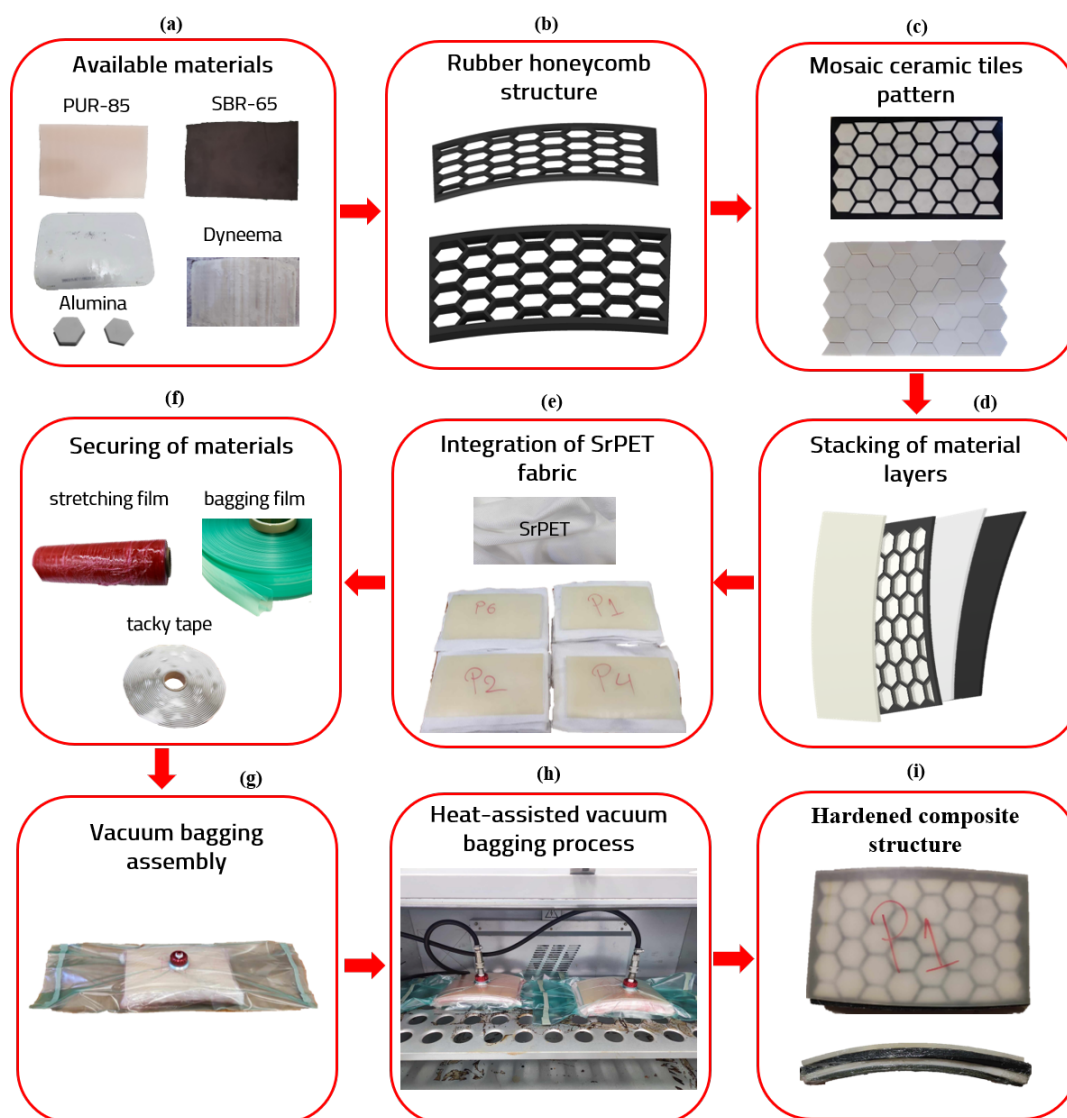


Figura 3.3 Diagrama de flux privind pregătirea structurilor balistice rigide pentru testare

În cadrul metodologiei experimentale descrise, au fost utilizate șapte configurații diferite de plăci compozite cauciuc-ceramică, luând în considerare două aspecte: dispunerea plăcilor ceramice și prezența stratului de cauciuc tip fagure de albine în interiorul structurii. Prima configurație (P1) constă dintr-un strat frontal din cauciuc PUR-85, urmat de două straturi de plăci ceramice hexagonale de tip mozaic, dispuse în mod decalat. Plăcile ceramice sunt separate la interfață prin benzi elastice, fiind susținute de o structură fagure din cauciuc SBR-65. Aceasta este urmată de un strat de Dyneema HB26 și de un strat suport din cauciuc SBR-65. Straturile ceramice și din cauciuc, inclusiv structura tip fagure, au o grosime de 5 mm. Stratul din UHMWPE UD este format din 30 de lamine suprapuse, fiecare cu o

grosime de 0,2 mm. A doua configurație (P2) urmează același model ca prima, însă diferă prin dispunerea celor două straturi de plăci ceramice, care sunt suprapuse direct, fără utilizarea structurilor de tip fagure. Dispunerea și grosimea straturilor corespund celor din prima configurație. A treia configurație (P3) include un strat frontal din cauciuc PUR-85, urmat de o placă ceramică monolitică, un strat din Dyneema HB26 și un strat suport din cauciuc SBR-65. Grosimea straturilor rămâne constantă în raport cu primele două configurații, cu excepția plăcii ceramice monolitice, care are o grosime de 10 mm. A patra configurație (P4) menține structura de bază a primei configurații, cu diferența că cele două straturi de plăci ceramice sunt aranjate într-o suprapunere aliniată. A cincea configurație (P5) menține structura de bază a celei de-a doua configurații, cu diferența că cele două straturi de plăci ceramice sunt aranjate într-o suprapunere aliniată. A șasea configurație (P6) include un strat frontal din cauciuc PUR-85, urmat de un strat de plăci ceramice hexagonale de tip mozaic, un strat din Dyneema HB26 și un strat suport din cauciuc SBR-65. Plăcile ceramice sunt separate la interfață prin benzi elastice, fiind susținute de o structură fagure din cauciuc SBR-65. Grosimea straturilor rămâne consecventă cu celelalte configurații, cu excepția stratului ceramic și a structurii din cauciuc în formă de fagure, care au o grosime de 10 mm. Ultima configurație (P2) urmează același model ca a șasea, însă diferă prin dispunerea stratului de plăci ceramice, fiind plasat fără utilizarea structurii de tip fagure din cauciuc.

3.3 Considerații privind greutatea și costul structurilor balistice flexibile și rigide

Greutatea sistemelor de protecție balistică reprezintă un factor esențial care influențează mobilitatea și eficiența operațională. Structurile balistice flexibile, realizate în general din țesături din fibre de înaltă performanță, precum aramida sau UHMWPE, asigură o flexibilitate superioară și o masă redusă, de obicei sub 3-5 kg pentru un sistem complet de vestă antiglonț. În schimb, structurile balistice rigide care încorporează straturi frontale ceramice și straturi suport compozite oferă niveluri mai ridicate de protecție, însă pot avea o greutate cuprinsă între 6-12 kg, în funcție de configurație. Sistemele tradiționale de protecție balistică realizate din plăci metalice, cum ar fi cele din oțel sau aluminiu, asigură un nivel bun de protecție, însă contribuie semnificativ la creșterea masei totale, aceasta depășind adesea 15-20 kg.

Tabelul 3.1 Analiza estimativă a greutății și costului structurilor balistice flexibile

Configurație	Structura materialelor componente	Greutate aprox. (kg)	Cost estimat (€)
PE-RCP-S	UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65 / UHMWPE UD	0,270	25,80
PE-RCP-F	cauciuc SBR-65 / UHMWPE UD	0,270	25,80
PE-RCP-B	UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65	0,270	25,80
PE	UHMWPE UD	0,196	52,77
PE-R	UHMWPE UD/ Epoxi	0,226	53,70
K-U-R	Kevlar UD/ Epoxi	0,282	71,53
K-F-R	Țesătură Kevlar/ Epoxi	0,331	32,79

Tabelul 3.1 și Tabelul 3.2 prezintă sinteze comparative ale configurațiilor balistice flexibile și rigide analizate în acest studiu, incluzând detalii privind structura materialelor componente, greutatea

aproximativă și costul de producție estimat. În cazul structurilor balistice flexibile (Tabelul 3.1), primele trei configurații (PE-RCP-S, PE-RCP-F și PE-RCP-B) corespund modelelor propuse și dezvoltate în cadrul acestei lucrări, în care sunt utilizate UHMWPE UD și cauciuc SBR-65 pentru a îmbunătăți flexibilitatea, absorbția energiei și a reduce costurile. Celelalte configurații balistice flexibile se bazează pe soluții convenționale, care utilizează Kevlar sau UHMWPE în combinație cu matrici epoxidice. În cazul plăcilor balistice rigide (Tabelul 3.2), configurațiile P1–P7 corespund sistemelor stratificate dezvoltate în această cercetare, integrând componente ceramice (monolitice sau de tip mozaic), straturi de cauciuc, UHMWPE UD și SrPET. Celelalte configurații (C_{mos-K} , C_{mos-PE} , C_{mono-K} , and $C_{mono-PE}$) corespund soluțiilor structurale convenționale, alcătuite în general din composite ceramice și straturi suport din Kevlar sau UHMWPE.

Configurațiile propuse (PE-RCP-S, PE-RCP-F și PE-RCP-B), care integrează straturi de UHMWPE UD și cauciuc SBR-65, prezintă avantaje competitive în ceea ce privește masa redusă și costul scăzut, în comparație cu soluțiile balistice flexibile existente, la aceeași grosime. Aceste configurații sunt mai ușoare și mai economice, oferind o alternativă rentabilă la panourile flexibile convenționale. În contrast, configurațiile realizate doar din UHMWPE UD combinate cu matrici epoxidice sau Kevlar prezintă mase mai mari și costuri de producție mai ridicate. Deși configurațiile pe bază de Kevlar pot oferi o protecție balistică fiabilă, acestea cresc în general masa totală a sistemului și necesită investiții mai mari în materiale. Utilizarea cauciucului SBR-65 în structurile propuse îmbunătățește flexibilitatea și absorbția energiei fără a crește semnificativ greutatea, ceea ce le recomandă ca soluții potrivite pentru aplicații în care mobilitatea, confortul și rentabilitatea sunt esențiale.

Tabelul 3.2 Analiza estimativă a greutății și costului structurilor balistice rigide

Configurație	Structura materialelor componente	Greutate aprox. (kg)	Cost estimat (€)
P1	cauciuc PUR-85 / 2x Al_2O_3 moz. + cauciuc SBR-65 fagure/ UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65/ SrPET	1,867	79,16
P2	cauciuc PUR-85 / 2x Al_2O_3 moz./ UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65/ SrPET	1,845	82,53
P3	cauciuc PUR-85 / Al_2O_3 mono./ UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65/ SrPET	2,131	83,75
P4	cauciuc PUR-85 / 2x Al_2O_3 moz. + cauciuc SBR-65 fagure / UHMWPE UD/ SBR-65 rubber/ SrPET	1,867	79,16
P5	cauciuc PUR-85 / 2x Al_2O_3 moz./ UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65/ SrPET	1,845	82,53
P6	cauciuc PUR-85 / Al_2O_3 moz. + cauciuc SBR-65 fagure / UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65/ SrPET	1,867	79,16
P7	cauciuc PUR-85 / Al_2O_3 moz./ UHMWPE UD/ cauciuc SBR-65/ SrPET	1,845	82,53
C_{mos-K}	Al_2O_3 moz./ țesătură Kevlar/ Epoxi	1,828	84,33
C_{mos-PE}	Al_2O_3 moz./ UHMWPE UD/ Epoxi	1,650	152,17
C_{mono-K}	Al_2O_3 mono./ țesătură Kevlar/ Epoxi	2,035	87,57
$C_{mono-PE}$	Al_2O_3 mono./ UHMWPE UD/ Epoxi	1,857	155,41

Configurațiile de plăci rigide propuse (P1–P7), care integrează ceramică (Al_2O_3), cauciuc SBR-65, cauciuc PUR-85, UHMWPE UD și SrPET, asigură un echilibru optim între greutate, nivel de protecție și costuri.

Aceste configurații prezintă greutate comparabile sau mai mici în raport cu structurile compozite ceramice existente, menținând în același timp un cost de producție mai accesibil. În schimb, configurațiile convenționale care integrează ceramică cu Kevlar sau UHMWPE utilizând rășină epoxidică (configurațiile C_{mos} and C_{mono}) sunt, în general, mai costisitoare, în special când se folosește UHMWPE. Deși aceste sisteme tradiționale oferă o rezistență balistică ridicată, utilizarea matricei epoxidice crește atât complexitatea, cât și costul procesului de fabricație. Integrarea elementelor din cauciuc în configurațiile dezvoltate îmbunătățește disiparea energiei, crește rezistența la lovituri multiple și reduce deformarea feței posterioare a structurii balistice, menținând în același timp greutatea redusă. Astfel, aceste configurații sunt adecvate pentru sistemele moderne pentru protecție împotriva impactului, combinând rezistență balistică ridicată cu mobilitatea sporită și costuri de producție eficiente.

3.4 Concluzii

Proiectarea și dezvoltarea structurilor de protecție balistică flexibile și rigide s-a axat pe utilizarea panourilor compozite UHMWPE-cauciuc și a plăcilor compozite cauciuc-ceramică. Analiza a implicat evaluarea mai multor configurații structurale, metode de stratificare și tehnici de pregătire pentru a îmbunătăți performanța mecanică și rezistența balistică a structurilor finale.

Structurile balistice flexibile s-au bazat pe țesătura unidirecțională din UHMWPE și cauciucul SBR-65, fiind dezvoltate în trei configurații distincte, pentru a evalua influența dispunerii stratului de cauciuc asupra disipării energiei și flexibilității. Pe de altă parte, structurile balistice rigide au încorporat straturi suplimentare formate din ceramică, cauciuc PUR-85 și o structură din cauciuc în formă de fagure, îmbunătățind semnificativ rezistența la impact balistic. Pentru a influența distribuția energiei de impact și eficiența absorbției de energie, a fost utilizată dispunerea decalată și aliniată a plăcilor ceramice. Stratul de armare SrPET a fost utilizat pentru a optimiza integritatea structurală, reducând riscurile de delaminare. Structurile rigide rezultate au prezentat o curbă ușoară, favorizând mobilitatea, adaptarea ergonomică și distribuția uniformă a impactului. Călirea asistată de vid a contribuit la consolidarea materialului și la creșterea flexibilității și durabilității structurilor balistice rigide.

Structurile balistice flexibile și rigide dezvoltate oferă o bază solidă pentru cercetări și optimizări ulterioare, în special în ceea ce privește amplasarea configurațiilor straturilor de cauciuc, optimizarea aranjamentelor plăcilor ceramice și perfecționarea strategiilor de armare hibride. Aceste îmbunătățiri sunt esențiale pentru dezvoltarea de noi materiale de protecție, capabile să asigure performanță balistică superioară, o disipare eficientă a energiei și o rezistență structurală ridicată în condiții de impact.

În plus față de performanțele mecanice, a fost efectuată o analiză comparativă a greutății și a costurilor atât pentru configurațiile balistice flexibile, cât și pentru cele rigide. Structurile balistice flexibile propuse, care integrează UHMWPE UD și cauciuc SBR-65 în diverse configurații de stratificare, s-au dovedit a fi mai rentabile și mai ușoare decât structurile convenționale bazate pe Kevlar sau UHMWPE consolidate cu matrice epoxidice. În mod similar, configurațiile de plăci rigide propuse (P1–P7) au demonstrat o combinație echilibrată între greutatea redusă și costurile scăzute de producție, comparativ cu structurile compozite ceramice tradiționale. Aceste rezultate confirmă caracterul practic

și eficient al configurațiilor propuse, fiind adecvate pentru aplicații care necesită atât mobilitate crescută, cât și protecție balistică superioară la costuri reduse.

Cauciucul, ca o componentă esențială în absorbția energiei și a șocului de impact, joacă un rol esențial în îmbunătățirea performanței și eficacității acestor structuri balistice. Capitolul următor cuprinde analize teoretice și experimentale dedicate investigării comportamentului hiperelastic al materialelor din cauciuc utilizate în structurile balistice flexibile și rigide, aspect esențial pentru caracterizarea răspunsului mecanic la sollicitări dinamice și balistice.

4. Analiza teoretică și experimentală a comportamentului hiperelastic al materialelor din cauciuc utilizate în structurile balistice noi

Cerințele în continuă creștere de materiale pentru protecție balistică ușoare și flexibile a condus la cercetări ample în domeniul materialelor compozite pe bază de cauciuc. Datorită comportamentului lor hiperelastic, materialele din cauciuc prezintă o capacitate semnificativă de absorbție a energiei de deformare, ceea ce le recomandă ca soluții optime pentru aplicații balistice. Spre deosebire de materialele tradiționale rigide, cauciucul poate suferi deformări mari, menținându-și integritatea structurală și îmbunătățind astfel capacitatea de dispersie și absorbție a solicitărilor de impact. Acest capitol explorează abordări teoretice și experimentale pentru a înțelege comportamentul mecanic al cauciucului în condiții extreme de încărcare. Prin analiza potențialului energetic de deformare, a mecanismelor de propagare a undelor de șoc și a modurilor de rupere, se realizează o evaluare cuprinzătoare a performanței cauciucului în noile structuri balistice. Secțiunea următoare se concentrează pe modelarea analitică a impacturilor balistice, simulări numerice și investigații experimentale destinate evaluării și îmbunătățirii capacității de protecție a materialelor din cauciuc.

4.1. Abordarea analitică a impactului balistic asupra materialelor din cauciuc

Modelele de material hiperelastic descriu comportamentul materialelor prin intermediul potențialului energetic de deformare, care depinde de invarianții tensorului de deformare. La viteze mari de deformare, caracteristice impactului balistic, cauciucul se comportă ca un material hiperelastic incompresibil.

Cauciucul este foarte sensibil la variațiile vitezei de impact, ceea ce duce la modificări ale proprietăților sale mecanice în condiții de deformare rapidă. În regimuri de deformare cu rate ridicate, cauciucul prezintă o creștere a rigidității, însoțită de o diminuare a extensibilității și a capacității de relaxare elastică, așa cum au evidențiat Khodadadi și colab. [235], respectiv Jitarașu și Lache [87]. Prin urmare, cauciucul devine predispus să se comporte ca un material casant și să cedeze sub acțiunea unui impact balistic de mare viteză. În condițiile unor deformări lente, comportamentul viscoelastic al cauciucului permite disiparea eficientă a energiei și absorbția tensiunilor de tracțiune. Cu toate acestea, în cazul impacturilor de mare viteză, materialul nu dispune de suficient timp pentru a se deforma elastic, ceea ce conduce la o cedare localizată datorată reducerii capacității de relaxare.

4.2. Metodologia experimentală

Diagrama de flux care descrie metodologia de cercetare aplicată acestui capitol este prezentată în [Figura 4](#). Au fost analizate două tipuri de cauciuc: SBR-65 și PUR-85, [Figura 4.1a](#). Duritatea materialelor din cauciuc a fost determinată prin testarea cu un durometru, [Figura 4.1b](#) și a fost evaluată conform scalei Shore A. Mai multe epruvete au fost pregătite, [Figura 4.1c](#) și apoi supuse unor serii de încercări la compresiune și tracțiune cvasi-statică, [Figura 4.1d](#), pentru a determina curbele tensiune-deformare ale celor două materiale, [Figura 4.1d1](#). Ulterior, au fost efectuate o serie de teste la compresiune prin

aplicarea unor sarcini dinamice, utilizând un dispozitiv pneumatic de lansare cu o singură treaptă, [Figura 4.1e](#), ceea ce a permis obținerea semnalelor forță–acelerație în funcție de timp, [Figura 4.1e1](#).

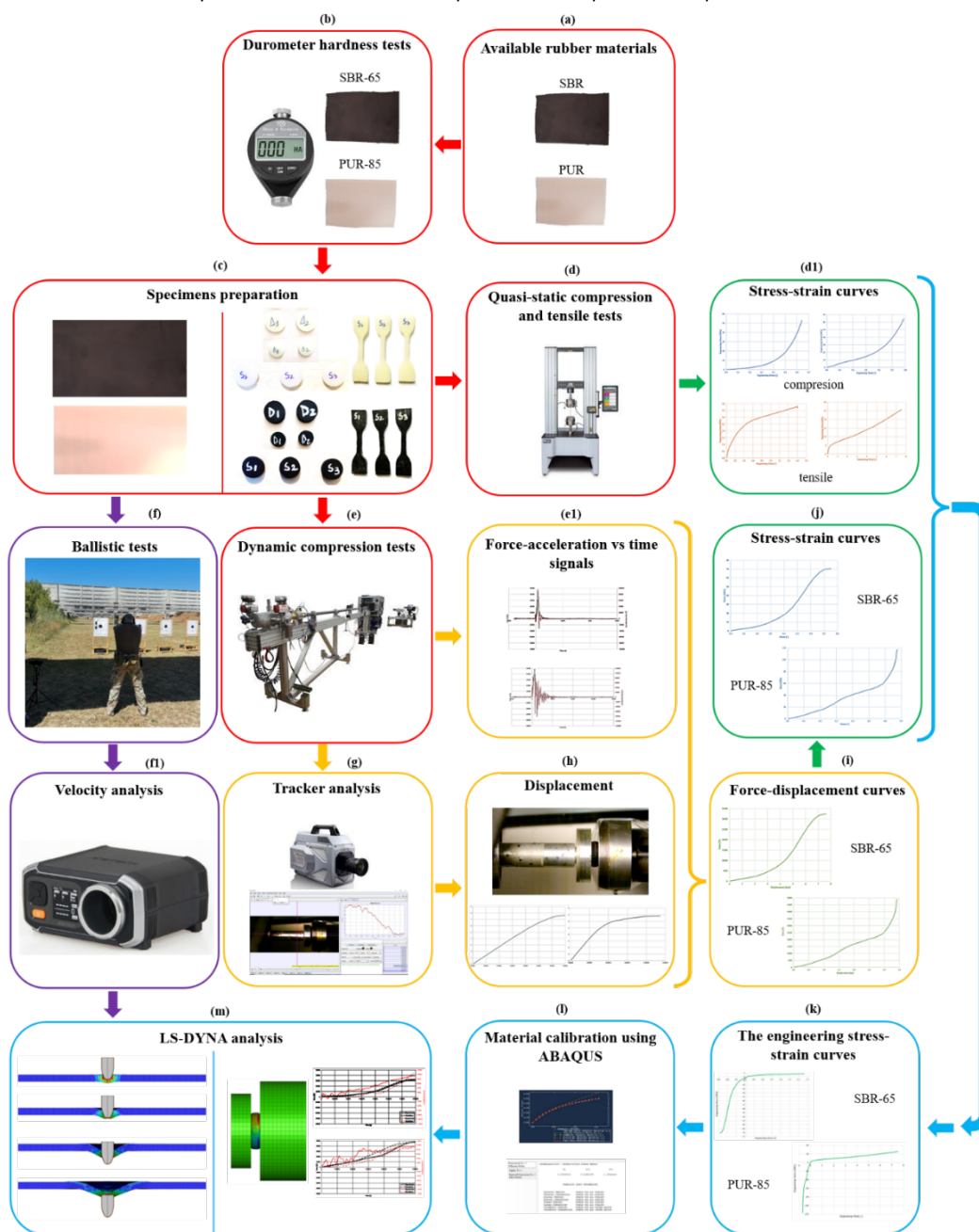


Figura 4.1 Diagrama de flux a metodologiei de cercetare

În plus, au fost efectuate teste balistice, [Figura 4.1f](#), pentru a evalua rezistența materialelor din cauciuc la impactul cu proiectilul, oferind informații esențiale cu privire la performanța lor balistică. Viteza inițială a proiectilului a fost măsurată cu ajutorul unui cronograf, [Figura 4.1f1](#), asigurând un calcul precis al condițiilor de impact și al transferului de energie cinetică. Ulterior, utilizând imaginile înregistrate cu camera Photron și prelucrate cu ajutorul software-ului Tracker, [Figura 4.1g](#), a fost determinată deplasarea epruvetei în condiții de încărcare dinamică, [Figura 4.1h](#), ceea ce a permis stabilirea curbelor forță–deplasare pentru cele două materiale, [Figura 4.1i](#). Prin asocierea datelor privind deplasarea epruvetei cu măsurătorile forței în timp, s-a determinat curba tensiune–deformare, [Figura 4.1j](#). Concomitent, a fost construit un model numeric destinat predicției comportamentului celor două

materiale din cauciuc. Datele obținute atât din testele la tracțiune cvasi-statică, cât și din testele la compresiune dinamică au fost combinate pentru a genera o curbă reprezentativă, [Figura 4.1k](#), care a fost ulterior integrată în programul numeric Abaqus/ CAE pentru calibrarea coeficienților modelului constitutiv hiperelastice, [Figura 4.1l](#). Coeficienții calibrați au fost integrați în software-ul LS-DYNA pentru simularea și analiza răspunsului celor două materiale din cauciuc în condiții de încărcare dinamică și balistică, [Figura 4.1m](#).

4.2.1. Solicitarea la compresiune cvasi-statică

În prima etapă, au fost efectuate o serie de teste la compresiune cvasi-statică pentru a determina comportamentul mecanic al celor două materiale din cauciuc în condiții de încărcare statică. Dimensiunile epruvetelor au fost stabilite conform standardului ISO 815-1:2019 (E) [\[266\]](#). Epruvetele din cauciuc SBR-65 au fost tăiate dintr-o placă cu grosimea de 10 mm, sub formă cilindrică, cu diametrul de 30 mm. Epruvetele din cauciuc PUR-85 au fost tăiate dintr-o placă subțire de 5 mm, de asemenea sub formă cilindrică cu diametrul de 30 mm.

4.2.2. Solicitarea la tracțiune cvasi-statică

Într-o etapă ulterioară, au fost realizate teste la tracțiune, în conformitate cu standardele ASTM D412 și ISO 37:2017(E) [\[267, 268\]](#). Epruvetele au fost confecționate din cauciuc SBR-65 și PUR-85, având o grosime de 5 mm.

4.2.3. Solicitarea la compresiune prin sarcini aplicate dinamic

Un dispozitiv pneumatic de lansare cu o singură treaptă a fost utilizat pentru testarea dinamică a materialelor din cauciuc la diverse viteze de impact. În acest experiment au fost utilizate epruvete din cauciuc SBR-65 și PUR-85 cu formă cilindrică și diametre de 30 mm și 20 mm. Grosimea epruvetelor a fost menținută ca în testele anterioare: 10 mm pentru SBR-65 și 5 mm pentru PUR-85. Diferențele de grosime ale epruvetelor (10 mm pentru cauciucul SBR-65 și 5 mm pentru cauciucul PUR-85) au fost alese în funcție de proprietățile specifice ale materialelor și de cerințele de testare. Cauciucul SBR-65, fiind mai deformabil și mai puțin rigid, a impus utilizarea unei epruvete cu o grosime mai mare pentru a asigura măsurători precise ale comportamentului său la compresiune, atât în condiții cvasi-statice, cât și dinamice. În schimb, cauciucul PUR-85, caracterizat printr-o rigiditate și o duritate mai mare, a permis obținerea unor rezultate uniforme utilizând epruvete mai subțiri, fără a compromite precizia rezultatelor.

Pentru a asigura o încărcare uniformă a epruvetelor, s-a utilizat la un proiectil cu vârf plat din aluminiu, având o masă de 0,655 kg. Testele dinamice au fost înregistrate cu ajutorul unei camere Photron de mare viteză, setată la 60.000 de cadre pe secundă. Pentru fiecare epruvetă realizată au fost efectuate două seturi de teste dinamice. Toate testele cvasi-statice și dinamice au fost realizate la temperatura constantă a camerei de 25°C.

4.2.4. Testarea balistică

Testele balistice efectuate pe cele două materiale din cauciuc s-au executat într-un poligon de tragere din Mangalia, România, aparținând Ministerului Apărării Naționale. Epruvetele din cauciuc testate au avut o grosime de 10 mm, permițând evaluarea rezistenței balistice și a capacității de absorbție a energiei în condiții de impact.

A fost utilizat un pistol calibru 9 mm (GLOCK 17) cu un glonț cu vârf rotund și cămașă complet metalică (FMJ RN), având o masă de 8 g și un diametru de 9 mm. Glonțul este alcătuit dintr-un miez de plumb și o cămașă din alamă.

Probele din cauciuc au fost poziționate la o distanță de 5 metri față de gura țeavii. Pentru măsurarea vitezei proiectilului a fost utilizat un cronograf AC6000 BT, determinându-se o viteză la gura țeavii de 361 m/s. Un calculator balistic a fost folosit pentru a determina viteza de impact a proiectilului, luând în considerare factori de tragere precum coeficientul balistic al glonțului, viteza la gura țeavii, masa glonțului și condițiile atmosferice (altitudine, temperatură și viteza vântului). Valoarea vitezei de impact a proiectilului a fost stabilită la 356 m/s, pe baza măsurărilor efectuate.

4.3. Rezultate experimentale și discuții

4.3.1. Analiza curbei tensiune-deformație la compresiune cvasi-statică a materialelor hiperelastice

Diagramele tensiune-deformație obținute în urma testelor la compresiune cvasi-statică ale celor două materiale hiperelastice sunt prezentate în Figura 4.12. Figura 4.12a și Figura 4.12b ilustrează curbele tensiune-deformație pentru cele trei epruvete testate, din cauciuc SBR-65 și PUR-85, fiecare fiind reprezentată împreună cu curba medie, evidențiind comportamentul mecanic specific al fiecărui material în raport cu solicitarea aplicată.

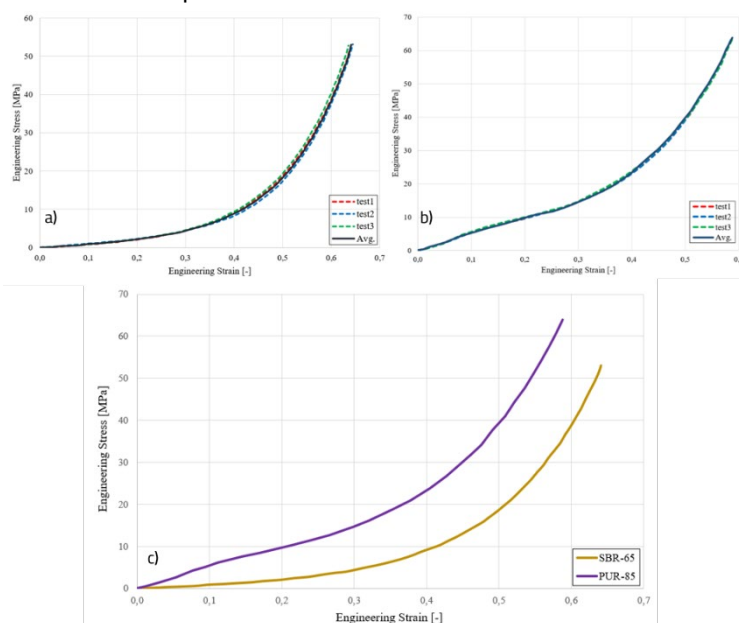


Figura 4.12 Curbele de tensiune-deformație obținute pe baza testelor de compresiune cvasi-statică: a) curba medie pentru cele trei teste mecanice ale materialului SBR-65; b) curba medie pentru cele trei teste mecanice ale materialului PUR-85; c) curbele medii tensiune-deformație pentru cele două materiale din cauciuc

Figura 4.12c prezintă curbele medii tensiune-deformație pentru cauciucurile SBR-65 și PUR-85. Sunt evidențiate diferențele dintre proprietățile mecanice ale celor două materiale, oferind o reprezentare vizuală clară a comportamentului lor în condiții de testare identice.

4.3.2. Analiza curbei tensiune-deformație la tracțiune cvasi-statică a materialelor hiperelastice

Curbele tensiune-deformație ale celor două materiale hiperelastice sunt prezentate în Figura 4.13. Similar cu secțiunea anterioară, curbele tensiune-deformație pentru cele trei epruvete testate, din cauciuc SBR-65 și PUR-85 au fost trasate, alături de curba medie corespunzătoare, așa cum este ilustrat în Figura 4.13a și Figura 4.13b.

În Figura 4.12c și Figura 4.13c se poate observa că o creștere a durității cauciucului este corelată cu o creștere a tensiunii dezvoltate în material. Rezultatele demonstrează faptul că variațiile durității influențează direct performanța mecanică a materialelor din cauciuc la aceleași valori de deformație în cadrul testelor cvasi-statice.

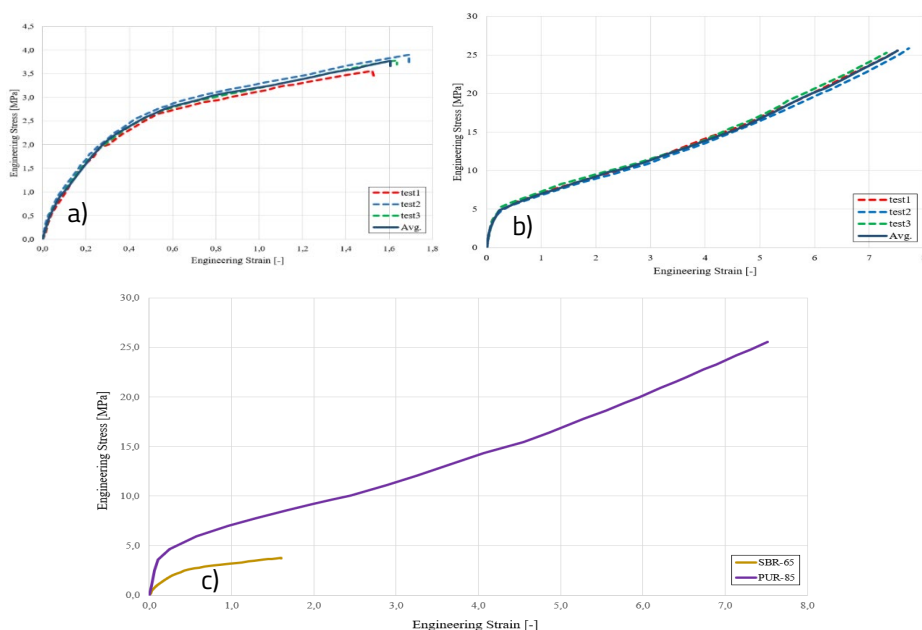


Figura 4.13 Curbele de tensiune-deformație obținute pe baza testelor de tracțiune cvasi-statică: a) curba medie pentru cele trei teste mecanice ale materialului SBR-65; b) curba medie pentru cele trei teste mecanice ale materialului PUR-85; c) curbele medii tensiune-deformație pentru cele două materiale din cauciuc

4.3.3. Analiza curbei tensiune-deformație la compresiune dinamică a materialelor hiperelastice

Datele experimentale privind compresiunea dinamică a celor două materiale hiperelastice cu durități diferite au fost prelucrate pentru a obține curbele tensiune-deformație la viteze mari de impact. Imaginile înregistrate în timpul testelor, împreună cu istoricul achiziției de date referitoare la forță, accelerație și măsurătorile epruvetelor după testare, au fost utilizate pentru analiza curbelor tensiune-deformație.

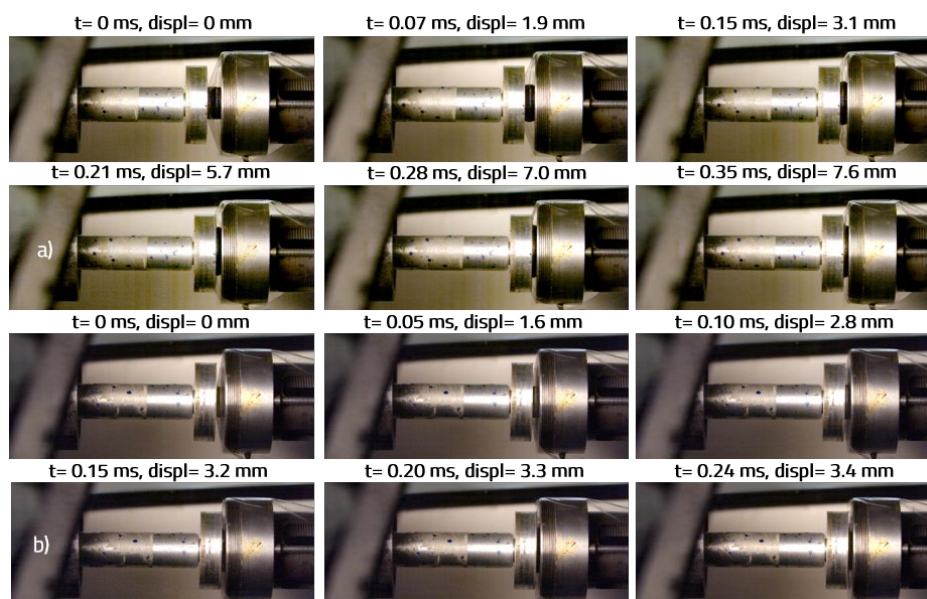


Figura 4.15 Compresiunea dinamică a epruvetelor hiperelastice:

a) cauciuc SBR-65; b) cauciuc PUR-85

Folosind imaginile înregistrate cu camera Photron și software-ul Tracker, au fost determinate viteza de impact a proiectilului și deplasarea epruvetei. Viteza de impact a proiectilului variază între 12 și 16 m/s. Testele la compresiune dinamică înregistrate cu camera de mare viteză sunt prezentate în [Figura 4.15](#).

Prin corelarea deplasării epruvetei cu variația forței în timp, s-a obținut curba tensiune-deformație, ilustrată în [Figura 4.16](#).

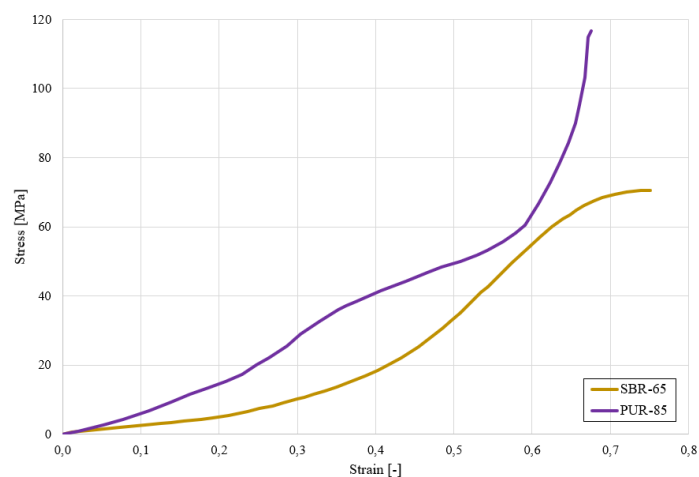


Figura 4.16 Curbele tensiune-deformație obținute pe baza testelor de compresiune dinamică

Se poate concluziona faptul că răspunsul dinamic al celor două materiale din cauciuc testate diferă la viteze mari de deformație, iar proprietățile lor mecanice sunt clar dependente de timp. De asemenea, similar testelor cvasi-stactice, o creștere a durității cauciucului corespunde unei creșteri a tensiunii în material.

4.3.4. Rezultate și observații ale testelor balistice

Figura 4.17 ilustrează penetrarea glonțului și mecanismul de deteriorare a plăcii din cauciuc SBR-65 supusă impactului balistic. Figura oferă o reprezentare detaliată atât a feței de impact (orificiul de intrare), Figura 4.17a, cât și a feței posterioare (orificiul de ieșire) a cauciucului, Figura 4.17b, însoțită de vederi macroscopice și microscopice (cu mărire de 60X).

Figura 4.17a prezintă orificiul de intrare creat de proiectil la contactul inițial cu suprafața din cauciuc. Imaginea macroscopică evidențiază o perforare circulară și bine conturată, cu un diametru mult mai mic decât diametrul proiectilului ($d_{s_SBR} = 1,5 \text{ mm}$), indicând o compresiune localizată a materialului și o cedare prin forfecare în punctul de impact.

Figura 4.17b prezintă orificiul de ieșire format de proiectil la impactul cu placa din cauciuc SBR-65. Imaginea macroscopică evidențiază o perforare ușor neregulată și parțial închisă, sugerând că materialul a manifestat o recuperare parțial-elastică după impact. Totuși, imaginea microscopică relevă o deteriorare extinsă a materialului ($d_{r_SBR} = 2,5 \text{ mm}$), cu rupturi vizibile și un model de fisurare radială, indicând o cedare localizată la întindere datorată concentrației extreme de tensiune. Expansiunea spre exterior a marginilor fisurate sugerează că proiectilul a perforat complet stratul de cauciuc, dar cu o disipare semnificativă a energiei.

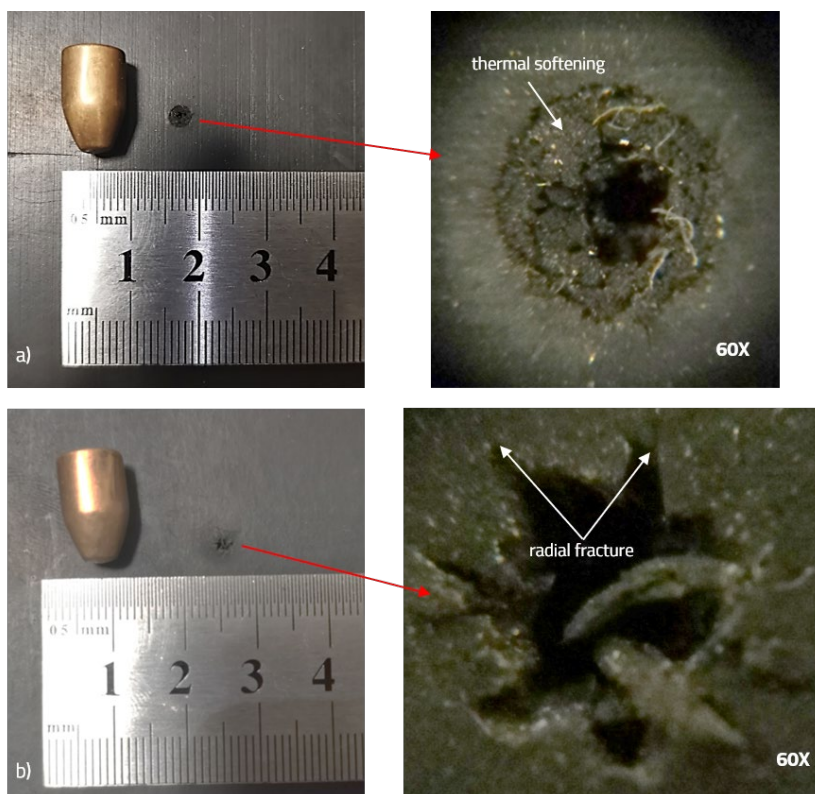


Figura 4.17 Orificiul de penetrare a glonțului în cauciucul SBR-65:
a) fața de impact; b) fața posterioară

Figura 4.18 ilustrează comportamentul de penetrare al glonțului în cauciucul PUR-85 sub impact balistic.

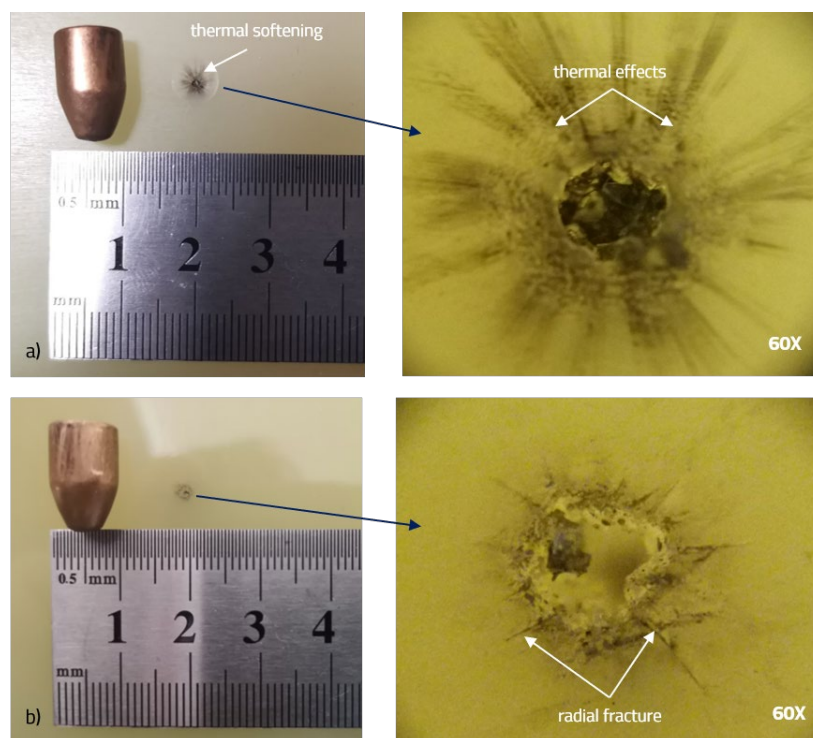


Figura 4.18 Orificiul de penetrare a glonțului în cauciucul PUR-85:
a) fața de impact; b) fața posterioară

Imaginea macroscopică a feței de impact, [Figura 4.18a](#), prezintă un orificiu de intrare mic și bine definit ($d_{s_PUR} = 1 \text{ mm}$), cu deteriorări minime la suprafață, sugerând că glonțul a perforat materialul cu o deformare laterală redusă. Comparativ cu materialul SBR-65, cauciucul PUR-85 prezintă un profil de penetrare mai bine conturat, indicând un răspuns mai localizat la impact datorită rigidității sale ridicate. Imaginea microscopică a feței posterioare, [Figura 4.18b](#), evidențiază un model clar de fisuri radiale în jurul orificiului de ieșire. Fisurile care se extind radial sugerează o rupere prin întindere cauzată de propagarea tensiunii în material.

4.4. Modelarea numerică

4.4.1. Modelarea numerică a solicitării dinamice asupra materialelor din cauciuc analizate

Pentru a descrie comportamentul celor două materiale din cauciuc și caracteristicile lor hiperelastice, a fost realizată o analiză numerică utilizând modelul constitutiv Mooney-Rivlin.

Curba tensiune-deformație a fost obținută pe baza testelor uniaxiale la compresiune și tracțiune cvasi-statică, împreună cu testele la compresiune dinamică, care au furnizat datele de intrare pentru modelul *MAT_MOONEY_RIVLIN_RUBBER. Pentru a crea un model numeric precis al materialelor hiperelastice în condiții de solicitare dinamică, curbele tensiune-deformație utilizate au inclus atât domeniul de compresiune (valori negative), cât și domeniul de tracțiune (valori pozitive). Prin combinarea datelor obținute din testele uniaxiale la tracțiune cvasi-statică și din testele la compresiune dinamică, a fost generată o curbă reprezentativă, prezentată în [Figura 4.20](#).

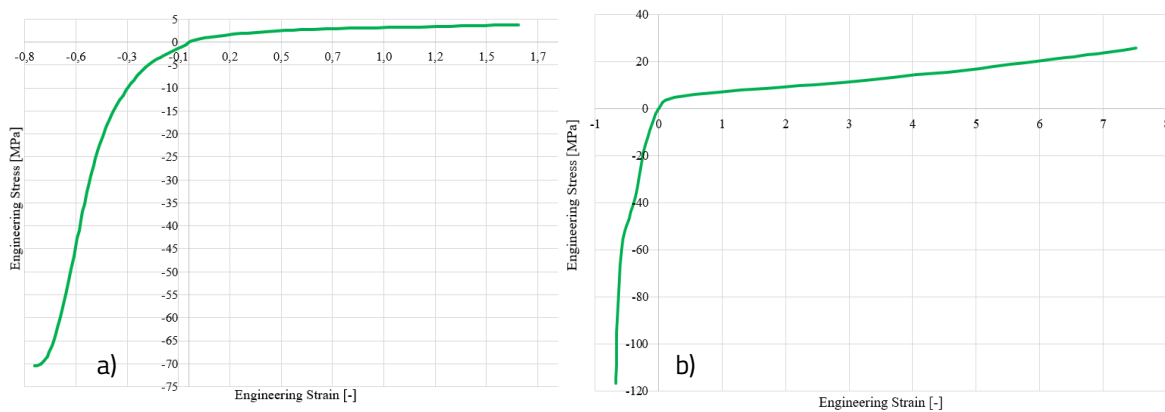


Figura 4.20 Curba tensiune-deformație utilizată pentru modelul Mooney-Rivlin:

a) cauciuc SBR-65; b) cauciuc PUR-85

Coeficienții C_{10} și C_{01} pentru modelul constitutiv Mooney-Rivlin au fost calibrați utilizând software-ul Abaqus/CAE.

Criteriul utilizat pentru cedarea cauciucului este deformația principală maximă. În timp ce testele la tracțiune cvasi-statică indică faptul că alungirea la rupere pentru cauciucul SBR-65 este de aproximativ 160%, iar pentru cauciucul PUR-85 depășește 750%, rezultatele obținute dintr-un set extins de simulări arată că alungirea la rupere a materialelor hiperelastice este estimată la 140% pentru cauciucul SBR-65 și 760% pentru cauciucul PUR-85 în condiții de solicitare dinamică.

4.4.2. Modelarea numerică a impactului balistic asupra materialelor din cauciuc

Pentru a modela și analiza impactul balistic dintre glonțul de 9 mm și cele două materiale din cauciuc, a fost dezvoltat un model numeric utilizând software-ul LS-DYNA.

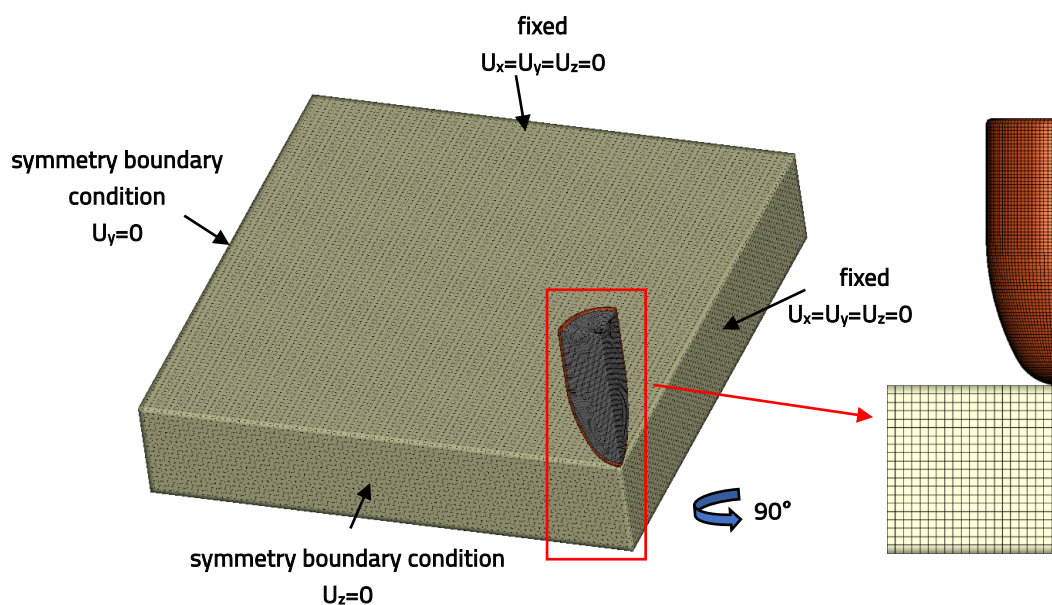


Figura 4.21 Modelul cu elemente finite și condițiile la limită pentru impactul balistic asupra materialelor din cauciuc

S-a considerat că impactul este perfect normal, iar simetria dublă a fost luată în considerare, ceea ce înseamnă că a fost modelată doar o pătrime din ansamblu, așa cum este ilustrat în [Figura 4.21](#). Această abordare este frecvent utilizată în simulările de impact balistic pentru a reduce costurile de calcul. Pentru analiză au fost utilizate elemente solide.

Deoarece deformarea proiectilului este neglijabilă și nerelevantă pentru analiza numerică, din motive de optimizare a timpului de calcul, modelul *MAT_RIGID a fost atribuit ambelor componente (miezul de plumb și cămașa de alamă).

Interacțiunea dintre glonț și stratul din cauciuc a fost modelată utilizând opțiunea CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE, iar contactul dintre părțile aceluiași corp a fost realizat folosind algoritmul CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE.

Sensibilitatea la discretizare a fost analizată considerând o dimensiune a elementului finit de 0,5 mm pentru stratul de cauciuc și de 0,2 mm pentru proiectil, așa cum este ilustrat în [Figura 4.21](#).

4.5. Validarea modelelor numerice. Corelarea rezultatelor numerice și experimentale

4.5.1. Validarea comportamentului dinamic

Curbele forță-acelerație în funcție de timp pentru materialele din cauciuc SBR-65 și PUR-85 obținute din simulările la compresiune dinamică au fost comparate cu datele corespunzătoare din testele experimentale, așa cum este ilustrat în [Figura 4.22](#).

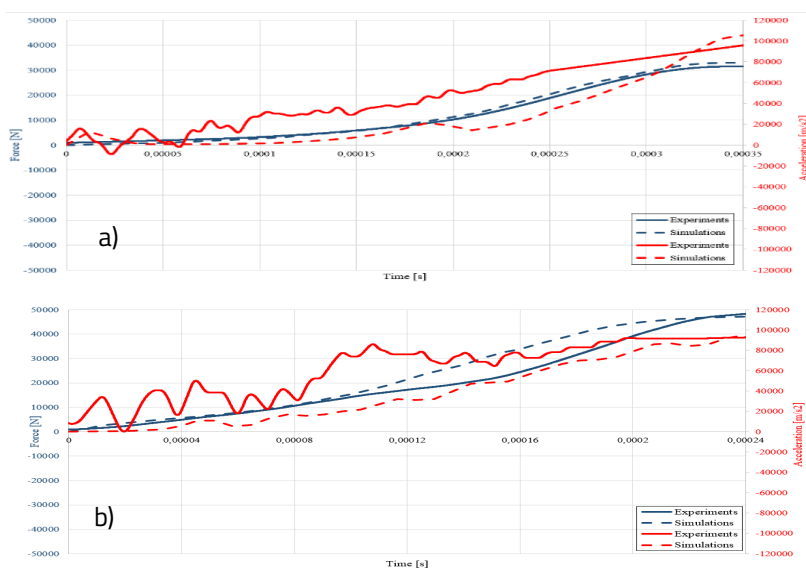


Figura 4.22 Curbele experimentale și numerice forță-acelerație în funcție de timp obținute în timpul compresiunii dinamice a epruvetelor: a) cauciuc SBR-65; b) cauciuc PUR-85

Ambele grafice evidențiază o legătură strânsă între rezultatele numerice și cele experimentale. Există o potrivire evidentă între curbele forță-acelerație în funcție de timp obținute experimental și cele obținute numeric. Predicția comportamentului materialelor din cauciuc realizată prin modelul constitutiv este în foarte bună concordanță cu rezultatele experimentale investigate în cadrul acestei lucrări.

Nu în ultimul rând, rezultatele simulării compresiunii dinamice realizate pe cele două materiale hiperelastice sunt prezentate în [Figura 4.23](#), prin deplasarea epruvetelor în diferite etape ale procesului de compresiune.

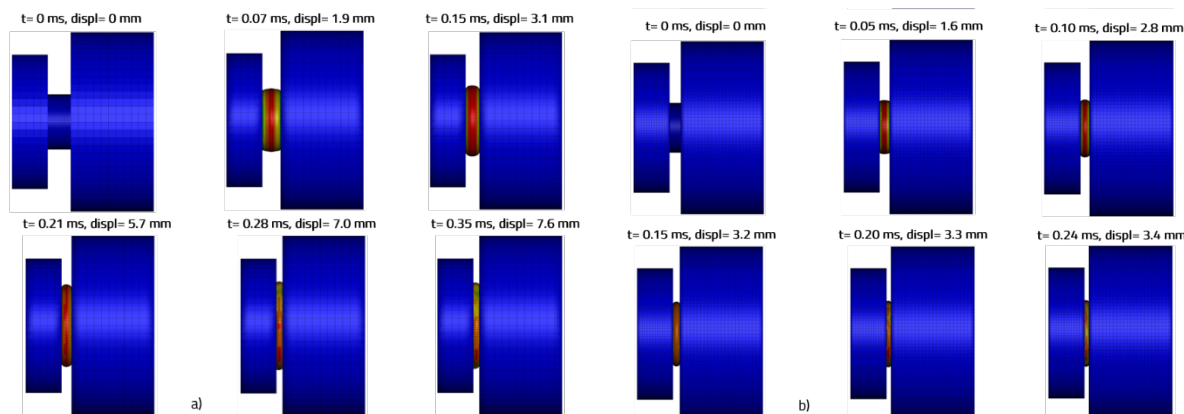


Figura 4.23 Simulare numerică a compresiunii dinamice a epruvetelor hiperelastice:
a) cauciuc SBR-65; b) cauciuc PUR-85

[Figura 4.15](#) și [Figura 4.23](#) evidențiază o bună corelație între rezultatele numerice și cele experimentale în ceea ce privește deformația epruvetelor pentru cele două materiale hiperelastice supuse compresiunii dinamice.

4.5.2. Validarea impactului balistic

Pentru a simula comportamentul la impact dintre glonțul de 9 mm și cele două materiale din cauciuc, s-a presupus că evenimentul balistic are loc la un impact perfect normal, procesul de penetrare fiind simulat la o viteză de 356 m/s.

Compararea simulărilor numerice și rezultatelor experimentale pentru cauciucurile SBR-65 și PUR-85, în condiții de impact balistic, demonstrează o corelație puternică, confirmând acuratețea modelelor computaționale în predicția comportamentului materialelor. În ciuda unor variații în ceea ce privește expansiunea orificiului de ieșire și relaxarea materialului după impact, mecanismul principal de răspuns la impact, observat experimental, a fost reprezentat fidel numeric, confirmând utilitatea acestor modele pentru predicția comportamentului cauciucului la impacturi cu viteză mare și pentru optimizarea proiectării sistemelor de protecție balistică.

4.6. Concluzii

Studiul materialelor din cauciuc SBR-65 și PUR-85, realizat atât în condiții numerice, cât și experimentale, a oferit informații valoroase privind comportamentul lor mecanic și performanța balistică. Integrarea rezultatelor obținute din testele cvasi-stactice, dinamice și balistice a permis o înțelegere completă a modului în care aceste materiale își manifestă comportamentul mecanic în funcție de viteza de deformare și condițiile de impact. Modelele numerice dezvoltate utilizând simulări cu elemente finite în software-ul LS-DYNA au demonstrat un grad ridicat de concordanță cu rezultatele

experimentale, și totodată surprinzând cu acuratețe propagarea undei de șoc, mecanismele de penetrare și modelele de cedare ale materialelor.

Atât cauciucul SBR-65, cât și cauciucul PUR-85 prezintă avantaje distincte atunci când sunt utilizate ca materiale de protecție, performanța lor variind semnificativ în funcție de condițiile de solicitare. Cauciucul SBR-65, datorită elasticității ridicate, capacității superioare de absorbție a energiei și capacității de deformare, s-a dovedit a fi extrem de eficient în distribuirea forțelor de impact și reducerea transmiterii energiei cinetice. Comportamentul său mecanic permite o amortizare eficientă a impactului, evidențiind potențialul de utilizare ca strat suport în plăcile balistice, unde poate contribui la absorbția și disiparea energiei, reducând concentrarea tensiunilor și trauma balistică transmisă. În contrast, cauciucul PUR-85, caracterizat printr-o duritate mai ridicată și o rezistență sporită la impact, a prezentat un răspuns mecanic mai rigid, manifestând deformare localizată și o degradare specifică materialelor casante, în special la viteze mari de deformare. Capacitatea sa de a rezista la multiple impacturi fără deteriorări semnificative îl recomandă drept material adecvat pentru utilizare ca strat de impact într-un sistem de plăci balistice, în special atunci când este folosit în asociere cu plăci ceramice. Prin dispunerea sa peste stratul ceramic, cauciucul PUR-85 poate contribui la fragmentarea și reținerea proiectilului, prevenind ricoșeul și daunele secundare provocate de fragmentarea proiectilului sau a ceramicii, menținând în același timp integritatea structurală a sistemului balistic. Această abordare stratificată valorifică punctele forte ale fiecărui material pentru a crea o structură balistică mai eficientă, capabilă să reziste impacturilor de mare viteză, reducând în același timp deteriorările structurale și transmiterea energiei către purtător.

5. Analiza teoretică și experimentală a noilor structuri balistice flexibile la impact cu viteză redusă

În capitolul anterior a fost discutată abordarea analitică a impactului balistic asupra materialelor din cauciuc, alături de o analiză detaliată a comportamentului mecanic al cauciucurilor SBR-65 și PUR-85 în condiții de solicitare cvasi-statică, dinamică și balistică. Pe baza acestor rezultate, prezentul capitol tratează aspectele legate de integrarea cauciucului SBR-65 cu țesătura unidirecțională din UHMWPE pentru a evalua capacitatea de absorbție a energiei și eficiența în îmbunătățirea performanțelor de protecție ale configurațiilor balistice flexibile. O evaluare corectă a eficienței structurilor hibride de protecție impune, în primul rând, examinarea comportamentului țesăturilor supuse solicitărilor balistice. Capitolul debutează cu o abordare analitică, punând în evidență principiile fundamentale ale teoriei impactului asupra unui singur fir și extinzând ulterior analiza către un model analitic aplicabil impactului balistic asupra structurilor textile. Ulterior, sunt analizate mecanismele de cedare ale materialului și evoluția proceselor de deteriorare în țesăturile supuse impactului de mare viteză, evidențiind aspecte esențiale ale răspunsului structural, ale mecanismelor de disipare a energiei, precum și ale interacțiunii cu straturile din cauciuc utilizate în aplicațiile de protecție balistică.

5.1. Abordarea analitică

5.1.1. Teoria impactului asupra unui singur fir textil

Răspunsul balistic al panourilor textile stratificate este studiat inițial prin observarea reacției unui singur fir la impactul cu proiectilul. Un model analitic al unui singur fir ajută la înțelegerea mecanismelor de impact balistic pentru aceste țesături stratificate, integrând diverși factori interni și externi. Când un singur fir este supus unui impact balistic, acesta suferă atât deformații longitudinale, cât și transversale. La momentul impactului, unde de deformare longitudinală și transversală se propagă spre exterior din punctul de impact, fiecare având viteze diferite. Observațiile experimentale indică o deformare transversală de formă triunghiulară care crește în timp până la ruperea firului. Unda longitudinală, deplasându-se cu viteza sunetului în material (c_0), induce o tensiune (σ_0) și o deformare (ε_0). Unda transversală, propagându-se cu o viteză c_1 în urma undei longitudinale, modifică mișcarea materialului astfel încât aceasta să se alinieze cu cea a proiectilului. În spatele frontului de undă transversală, toate vitezele particulelor corespund vitezei proiectilului (V). Pe măsură ce impactul continuă, deformarea firului atinge punctul său de rupere, ducând la cedarea sa. Comportamentul și vitezele de propagare ale acestor unde sunt influențate de modulul de elasticitate, densitatea și tensiunea inițială aplicată firului [1, 128].

5.1.2. Modelul analitic pentru impactul balistic asupra structurilor textile

În momentul în care vârful glonțului lovește firele de urzeală și bătătură ale unei țesături, fibrele sunt supuse unor solicitări intense. Acest lucru generează o undă longitudinală de deformare care se propagă departe de zona de contact, însoțită de o undă de deformare transversală. Propagarea undelor

de deformare longitudinală se realizează prin fire cu viteza sunetului în material. Valoarea ridicată a vitezei de propagare transversală contribuie semnificativ la disiparea eficientă și rapidă a energiei de impact în structurile textile. În cazul impacturilor de mare viteză, nu toate firele sunt angajate simultan în procesul de absorbție a energiei, ceea ce poate conduce la ruperea prematură a unor fire individuale. Acest fenomen indică faptul că energia absorbită în faza inițială de către țesătură poate fi relativ redusă, subliniind importanța obținerii unei viteze ridicate de propagare a undei transversale pentru optimizarea capacității generale de rezistență la impact. Atât undele longitudinale, cât și cele transversale se propagă continuu prin fire până când deformarea atinge punctul de rupere.

Pornind de la înțelegerea de bază a textilelor utilizate în aplicațiile balistice, secțiunea următoare abordează materialele compozite armate cu fibre de înaltă performanță, care reprezintă un progres semnificativ în tehnologiile de protecție balistică. Deși țesăturile oferă absorbție optimă de energie și rezistență la impact, compozitele integrează aceste fibre de înaltă performanță cu matrici de rășină pentru a forma structuri rigide, ușoare și foarte durabile. Aceste compozite valorifică proprietățile unice ale fibrelor, integrându-le cu sisteme de matrice adaptate pentru a obține performanțe balistice superioare. Secțiunea următoare va explora proiectarea, fabricarea și optimizarea performanței acestor compozite armate cu fibre, dar și rolul lor semnificativ în aplicațiile moderne, unde rezistența sporită la amenințări complexe și greutatea redusă sunt esențiale.

5.2. Mecanismul de rupere și evoluția deteriorării țesăturilor sub impact balistic

Comportamentul unei țesături la impact balistic prezintă similitudini cu cel al unui singur fir. Atunci când un proiectil lovește o țesătură, se generează atât unde transversale, cât și longitudinale, fenomen analog cu cel observat în cazul impactului asupra unui singur fir. Undele de tensiune se formează în punctul de impact, propagându-se de-a lungul firelor către marginile țesăturii și reflectându-se înapoi. Aceste unde sunt parțial transmise și reflectate în punctele de intersecție dintre firele de urzeală și de bătătură. Viteza de propagare a undelor de tensiune de-a lungul firelor este influențată de densitatea și rigiditatea acestora, afectând capacitatea de disipare a energiei de către țesătură. Energia cinetică a proiectilului este disipată prin deformarea fibrelor și prin frecarea dintre fibre cauzată de alunecarea sau deplasarea relativă dintre acestea. Microstructura și proprietățile de frecare ale fibrelor influențează semnificativ capacitatea țesăturii de absorbție a energiei. În cazul țesăturilor stratificate, energia este absorbită de straturi succesive până la oprirea proiectilului. Contactul fizic dintre straturi facilitează atât transferul de energie în plan, cât și cel transversal, rezultând o absorbție de energie mai mare în cazul structurilor textile stratificate [31].

5.3. Metodologia experimentală

5.3.1. Testarea balistică

Structurile balistice sunt realizate conform standardelor internaționale stabilite de Statele Unite ale Americii și Uniunea Europeană, așa cum a fost discutat în primul capitol. Principalul obiectiv al acestor sisteme este de a opri pătrunderea proiectilelor. Standardul Home Office Body Armour (nivel de

protecție H01) a fost utilizat pentru testarea panourilor compozite UHMWPE-cauciuc, ceea ce înseamnă că panourile balistice pot oferi rezistență împotriva unui glonț de 9 mm cu vârf rotund și cămașă complet metalică (FMJ RN), cu o masă de 8 g și o viteză de $365 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$ [35]. Pentru a preveni leziunile organelor interne cauzate de impactul balistic, adâncimea de deformare a feței posterioare a stratului suport din plastilină (BFD) trebuie să fie mai mică de 44 mm, în conformitate cu acest standard.

Testele balistice au fost efectuate pe cele trei configurații prezentate anterior într-un poligon de tragere din Mangalia, România, aparținând Ministerului Apărării Naționale. A fost aplicată aceeași metodologie de testare balistică ca și în cazul celor două tipuri de materiale din cauciuc, utilizându-se un pistol GLOCK 17 cu glonț de 9 mm, unde viteza la gura țeavii (361 m/s) a fost măsurată cu ajutorul unui cronograf AC6000 BT, iar viteza de impact (356 m/s) a fost determinată utilizând un calculator balistic. Pentru determinarea adâncimii de penetrare a panourilor balistice a fost utilizat un șubler. După examinarea balistică, panourile compozite UHMWPE-cauciuc au fost secționate pentru a identifica tipurile de deteriorare și pentru a determina mecanismele de cedare ale materialelor.

5.3.2. Rezultate experimentale și discuții

Figura 5.9 ilustrează deteriorarea cauzată de impactul proiectilului și mecanismele de cedare ale materialului în configurația PE-RCP-B.

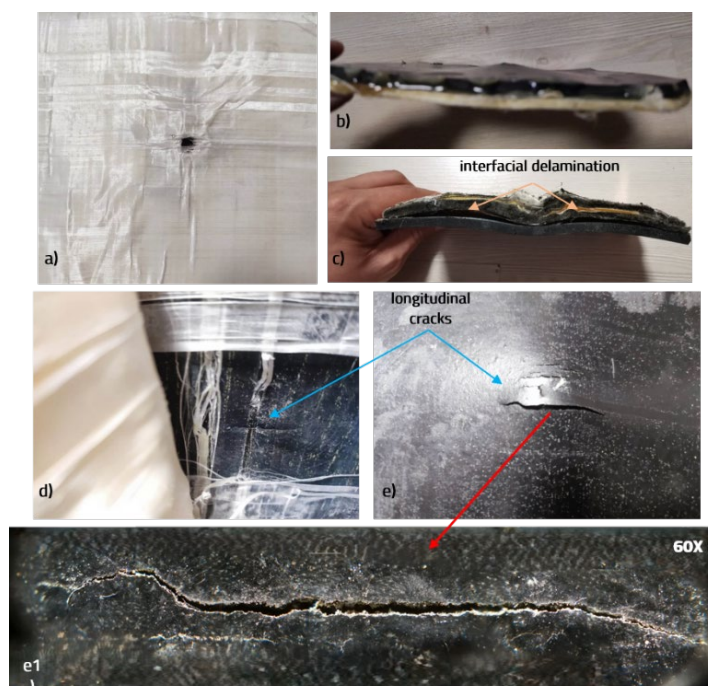


Figura 5.9 Deteriorarea cauzată de impactul proiectilului în configurația PE-RCP-B:

- a) orificiul de pătrundere al glonțului; b) deformarea feței posterioare a panoului balistic; c) secțiune transversală a panoului balistic; d) fisuri în stratul de cauciuc – față de impact; e) fisuri în stratul de cauciuc – față posterioară

Configurația PE-RCP-B evidențiază eficiența utilizării țesăturii UHMWPE UD împreună cu un strat suport din cauciuc în protecția balistică, panoul reușind să oprească proiectilul și să reducă deformarea feței posterioare a panoului balistic.

Figura 5.10 ilustrează deformarea glonțului după impactul cu cele trei configurații menționate anterior. În Figura 5.10c (configurația PE-RCP-B) proiectilul a suferit o deformare plastică extremă, formând o structură asemănătoare unui bol sau unor petale, cu ruperea completă a cămășii metalice. Fisurarea radială extinsă sugerează că proiectilul a fost supus unei solicitări crescute la impact. Stratul suport din cauciuc din această configurație a contribuit la supunerea proiectilului unei solicitări suplimentare în timpul decelerării acestuia, conducând la fragmentarea și separarea cămășii. Această deformare extremă indică faptul că proiectilul și-a pierdut integritatea structurală înainte ca perforarea să poată avea loc.



Figura 5.10 Deformarea proiectilului după impact: a) configurația PE-RCP-S; b) configurația PE-RCP-F; c) configurația PE-RCP-B

Aceste rezultate confirmă faptul că cele trei configurații balistice cauciuc-UHMWPE UD influențează semnificativ comportamentul proiectilului la impact, mecanismele de absorbție a energiei și de cedare a materialului structurilor, afectând totodată deformarea și integritatea proiectilului.

5.4. Modelare numerică

5.4.1. Modelarea cu elemente finite

Pentru a modela și analiza impactul balistic dintre glonțul de 9 mm și cele trei configurații de panouri compozite UHMWPE-cauciuc investigate, a fost dezvoltat un model numeric utilizând software-ul LS-DYNA. S-a considerat că impactul este perfect normal, iar simetria dublă a fost luată în considerare, ceea ce a permis modelarea doar a unui sfert din panoul de armură. Pentru analiză au fost utilizate elemente solide. Interacțiunea dintre glonț și diferitele straturi ale panoului balistic (UHMWPE și cauciuc) a fost modelată utilizând CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE. Contactul dintre părțile aceluiași corp a fost realizat folosind algoritmul CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE.

Pentru a simula efectul de separare dintre fiecare strat de UHMWPE și dezlipirea stratului de cauciuc de UHMWPE, a fost aplicat algoritmul de contact TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE.

5.4.2. Modelarea constitutivă

Modelul MAT_JOHNSON_COOK a fost utilizat pentru componentele metalice ale glonțului de 9 mm. Ecuația EOS_GRUNEISEN a fost folosită pentru a defini limita vitezei de deformare în procesul de compresiune a proiectilului.

Modelul de material pentru straturile de UHMWPE a fost definit ca MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL, bazat pe criteriul Chang-Chang.

Pentru a menține stabilitatea numerică, în simulări au fost integrate măsuri suplimentare de control al cedării materialului. Rezistența la rupere la tracțiune a fost setată la 0,4 și a fost introdusă prin comanda MAT_ADD_EROSION pentru a identifica și elimina elementele foarte distorsionate [277].

5.4.3. Simularea penetrării

Pentru a simula comportamentul la impact dintre glonțul de 9 mm și cele trei configurații de panouri flexibile compozite UHMWPE-cauciuc, s-a presupus un impact perfect normal, iar procesul de penetrare a fost simulat la o viteză de impact de 356 m/s.

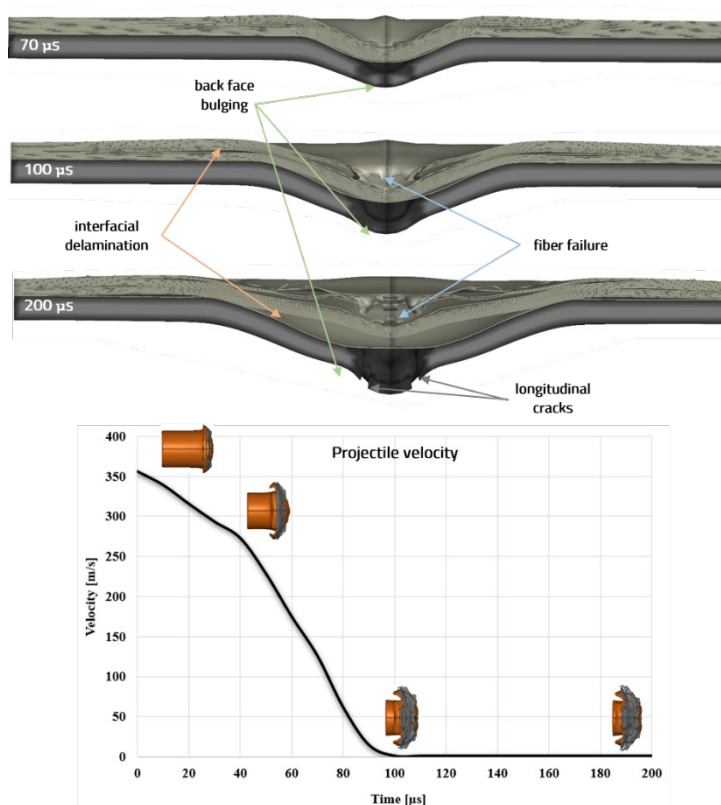


Figura 5.16 Stadiul de deteriorare al configurației PE-RCP-B

Figura 5.16 prezintă simularea numerică a răspunsului la impact al configurației PE-RCP-B. Graficul din partea de jos a figurei ilustrează decelerarea vitezei proiectilului în timp, evidențiind disiparea

progresivă a energiei de-a lungul procesului de penetrare. Se observă o scădere progresivă a vitezei proiectilului, cu o decelerație semnificativă între 60 și 100 μ s, corespunzătoare momentului în care undele de tensiune ajung la stratul suport din cauciuc. În general, [Figura 5.16](#) surprinde răspunsul dinamic al configurației PE-RCP-B, demonstrând modul în care straturile UHMWPE UD absorb energia inițială a impactului, în timp ce stratul din cauciuc contribuie la disiparea tensiunilor reziduale și la prevenirea perforării. Mecanismele de deteriorare observate, inclusiv ruperea fibrelor, delaminarea, deformarea feței posterioare și fisurarea stratului de cauciuc, validează eficiența structurii compozite în oprirea proiectilelor prin absorbția progresivă a energiei și interacțiunea dintre materiale.

[Figura 5.18](#) ilustrează deformarea plastică a proiectilului de 9 mm după impact, în cele trei configurații diferite de panouri compozite.

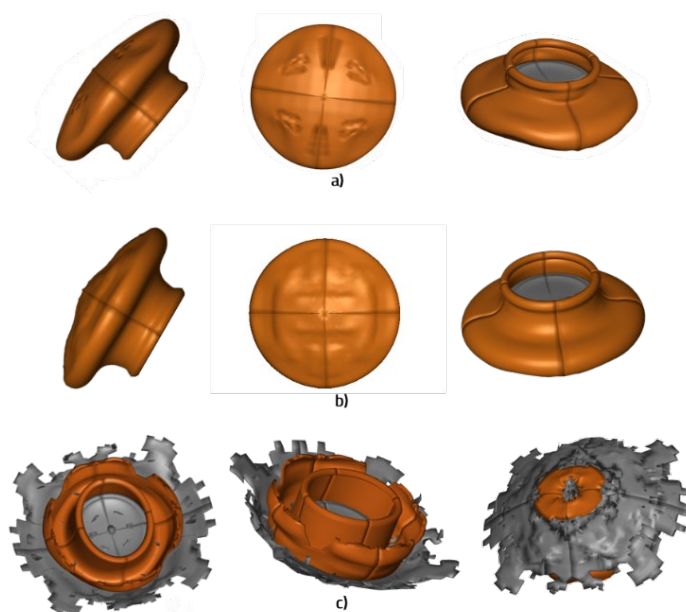


Figura 5.18 Deformarea proiectilului după impact: a) configurația PE-RCP-S;
b) configurația PE-RCP-F; c) configurația PE-RCP-B

În general, [Figura 5.18](#) oferă o perspectivă asupra comportamentului proiectilului la impact în diferite configurații, confirmând că straturile din cauciuc și UHMWPE UD joacă un rol esențial în disiparea energiei și controlul deformării. Efectul de expansiune radială observat în configurațiile PE-RCP-S și PE-RCP-F evidențiază o deformare plastică progresivă, în timp ce fragmentarea extinsă în configurația PE-RCP-B sugerează un mecanism de oprire mai brusc și mai forțat. Această simulare numerică confirmă faptul că performanța la impact a acestor configurații balistice variază semnificativ în funcție de poziția stratului de cauciuc în cadrul structurii compozite.

5.5. Validarea modelelor numerice. Corelarea rezultatelor numerice și experimentale

Experimentele balistice și modul de distrugere al panourilor balistice sugerează că deteriorarea structurilor flexibile are loc prin două moduri distincte de cedare a materialului. Primul mod este forfecarea prin perforare, care apare atunci când penetrarea are loc dacă tensiunea de forfecare indusă depășește rezistența critică la forfecare a materialului. Pe suprafața de impact a configurațiilor PE-RCP-S și PE-RCP-B, este prezent un orificiu de perforare bine definit, cu același diametru ca cel al

proiectilului. Pentru stratul frontal de UHMWPE UD, forfecarea prin perforare este mecanismul de cedare dominant. Mai multe straturi de UHMWPE UD cedează prin acest mecanism, dar proiectilul păstrează o energie reziduală semnificativă. Straturile intacte de UHMWPE UD absorb energia cinetică reziduală a proiectilului prin mecanisme de deformare la tracțiune. În această etapă, proiectilul înaintază simultan cu straturile în mișcare de UHMWPE UD, determinând alungirea stratului de cauciuc în configurația PE-RCP-B, în timp ce îl perforează în configurația PE-RCP-S. Stratul de cauciuc cedează în cele din urmă prin rupere la tracțiune. În configurația PE-RCP-B, deși stratul de cauciuc nu este perforat complet, el prezintă deteriorări considerabile pe suprafața posterioară. În stratul de cauciuc din zona de impact sunt vizibile fisuri longitudinale. [Figura 5.9e](#) prezintă dezvoltarea unor fisuri secundare care se ramifică din fisura longitudinală principală, indicând evoluția progresivă a deteriorării în zona afectată. Aceste fisuri longitudinale contribuie la cedarea finală la tracțiune a materialului. Când un proiectil lovește suprafața panourilor balistice, exercită o forță substanțială într-un interval extrem de scurt. Această solicitare bruscă și intensă induce deformări și tensiuni rapide în straturile de cauciuc și UHMWPE UD. Pe măsură ce proiectilul pătrunde în primele straturi de UHMWPE UD și este oprit de panoul compozit, are loc un transfer rapid de energie, generând niveluri ridicate de tensiune în materiale, în special în stratul de cauciuc. Dacă stratul de cauciuc nu are timp suficient să se întindă sau să se deformeze progresiv, concentrațiile locale de tensiune pot depăși rezistența sa la tracțiune, ducând la formarea fisurilor ca mecanism de disipare a energiei acumulate.

Al doilea mod de cedare a materialului este deformarea, fiind asociată cu delaminarea. În configurația PE-RCP-S, unde stratul de cauciuc este poziționat între două straturi de UHMWPE UD, trei straturi de UHMWPE UD sunt penetrate, iar deformarea feței posterioare măsoară aproximativ 10,5 mm. În configurația PE-RCP-F, unde stratul de cauciuc este poziționat frontal, sunt penetrate doar două straturi de UHMWPE UD, însă deformarea feței posterioare crește la aproximativ 11 mm. Pe de altă parte, în configurația PE-RCP-B, unde stratul de cauciuc este poziționat pe fața posterioară, trei straturi de UHMWPE UD sunt penetrate, însă deformarea feței posterioare este ușor mai mică, de aproximativ 8,5 mm. Aceste rezultate indică faptul că poziționarea stratului de cauciuc influențează semnificativ deformarea feței posterioare a panourilor balistice.

În urma testelor balistice, proiectilele recuperate au fost examinate, așa cum este prezentat în [Figura 5.10](#) și [Figura 5.18](#). Acestea și-au păstrat greutatea inițială după impact, indicând faptul că deformarea plastică a fost efectul dominant, iar eroziunea a fost neglijabilă. Gloanțele au suferit o expansiune circumferențială semnificativă și o reducere a lungimii, conform detaliilor prezentate în [Tabelul 5.4](#).

Tabelul 5.4 Diametrului și lungimea proiectilelor înainte și după impact

Configurația	Stare inițială (mm)		Stare finală (mm)			
			Simulare		Experiment	
	Diametru	Lungime	Diametru	Lungime	Diametru	Lungime
PE-RCP-S	9	15	14,31	9,08	14,1	9,2
PE-RCP-F			17,08	8,58	16,4	8,9
PE-RCP-B			24,10	9,06	23,3	9,6

5.6. Concluzii

Acest capitol a investigat performanța balistică a unei structuri balistice flexibile noi, compusă din fibre unidirecționale din polietilenă cu greutate moleculară foarte mare (UHMWPE UD-Dyneema HB26) și cauciuc stiren-butadienic (SBR-65). Au fost dezvoltate trei configurații diferite de panouri balistice, diferențiindu-se prin poziționarea stratului de cauciuc: ca strat frontal, strat intermediar sau strat suport. Au fost realizate teste experimentale pentru a evalua performanța balistică a celor trei configurații. Testele experimentale au fost efectuate în conformitate cu standardul Home Office Body Armour, împotriva amenințărilor de nivel H01. În paralel, a fost dezvoltat un model numeric pentru cele trei configurații, care a fost validat pe baza rezultatelor experimentale. Atât simulările, cât și rezultatele experimentale au confirmat că toate configurațiile au reușit să împiedice pătrunderea proiectilului. Simulările numerice au demonstrat, de asemenea, că poziționarea stratului de cauciuc influențează semnificativ decelerarea proiectilului, configurația cu stratul de cauciuc dispus ca strat suport obținând cea mai bună performanță. În plus, măsurătorile deformării feței posterioare au indicat faptul că structura PE-RCP-B a generat cea mai mică valoare, sugerând o eficiență balistică îmbunătățită atunci când stratul de cauciuc este poziționat ca strat suport.

Analiza proiectilelor recuperate după impact a relevat faptul că gloanțele au suferit o deformare plastică semnificativă, dar și-au păstrat greutatea inițială, indicând că eroziunea nu a avut un rol în procesul de deformare. Deformarea proiectilelor a variat în funcție de poziționarea stratului de cauciuc. În configurațiile PE-RCP-S și PE-RCP-F, proiectilele au prezentat o deformare caracteristică în formă de ciupercă, în timp ce în configurația PE-RCP-B, gloanțele au evidențiat o deformare severă, formând o structură asemănătoare unui bol, cu separarea completă a cămășii de miezul din plumb. Această observație indică faptul că în configurația PE-RCP-B s-a produs cea mai ridicată concentrare de tensiune asupra proiectilului, conducând la o deformare plastică extremă și la cedarea structurală a acestuia.

Au fost identificate două mecanisme principale de cedare a materialelor în panourile balistice flexibile: perforarea prin forfecare și deformarea părții posterioare. Perforarea prin forfecare a fost dominantă în straturile de UHMWPE UD, unde proiectilul a penetrat mai multe straturi înainte de a fi oprit. În configurațiile PE-RCP-S și PE-RCP-B, stratul de cauciuc a prezentat fisuri longitudinale de-a lungul zonei de impact, indicând o cedare la tracțiune cauzată de propagarea undelor de tensiune. Comportamentul hiperelastic al stratului de cauciuc a fost evidențiat în configurația PE-RCP-F, unde orificiul de perforare a fost semnificativ mai mic decât calibrul proiectilului, demonstrând capacitatea materialului de recuperare elastică. Deformarea părții posterioare a avut loc din cauza delaminării straturilor de material. Configurația PE-RCP-B a înregistrat cea mai mică deformare a feței posterioare (aproximativ 8,5 mm), evidențiind o rezistență superioară la impact. Aceste rezultate sugerează că poziționarea stratului de cauciuc joacă un rol esențial în controlul dispersiei undelor de tensiune și disiparea energiei.

Această cercetare contribuie la dezvoltarea unor soluții balistice flexibile cu greutate redusă și costuri accesibile. Integrarea straturilor de UHMWPE UD cu cele din cauciuc îmbunătățește performanța balistică prin absorbția energiei, redistribuirea tensiunilor și deformarea elastică. Rezultatele sugerează că poziționarea stratului de cauciuc pe suprafața posterioară a structurii optimizează performanța

balistică prin reducerea deformării feței posterioare și îmbunătățirea disipării energiei proiectilului. Concluziile obținute sunt relevante pentru dezvoltarea viitoarelor soluții balistice flexibile, oferind capabilități de protecție îmbunătățite fără creșterea grosimii sau greutateii materialului.

Pe baza acestor rezultate, capitolul următor explorează analiza teoretică și experimentală a structurilor balistice rigide noi, supuse impactului la viteză mare. Această investigație se concentrează asupra configurațiilor în care stratul de cauciuc SBR-65 este poziționat ca strat suport sau integrat într-o structură tip fagure de albine cu plăci ceramice încorporate, în timp ce un strat de cauciuc PUR-85 este utilizat ca strat frontal, plasat deasupra plăcilor ceramice.

6. Analiza teoretică și experimentală a noilor structuri balistice rigide la impact cu viteză mare

În capitolul anterior, analiza teoretică și experimentală s-a concentrat asupra unor structuri balistice flexibile inovatoare, supuse impactului la viteză redusă, evidențiind rolul straturilor de UHMWPE UD și cauciuc SBR-65 în îmbunătățirea absorbției de energie și a rezistenței balistice. Pe baza acestor concluzii, prezentul capitol își orientează atenția către impactul balistic cu viteză mare asupra configurațiilor rigide, în care plăcile ceramice, cauciucul SBR-65 și cauciucul PUR-85 sunt integrate în structuri compozite. Obiectivul constă în evaluarea capacității de absorbție a energiei și a eficienței de protecție oferite de aceste materiale în îmbunătățirea performanței balistice a structurilor balistice rigide. Pentru a atinge acest scop, este esențială înțelegerea comportamentului compozitelor care integrează materiale ceramice și fibre în condiții de impact balistic, inclusiv a mecanismelor de distrugere și a evoluției deteriorării materialelor. Prin integrarea modelării analitice, a testării experimentale și a simulărilor numerice, acest capitol oferă o evaluare cuprinzătoare a interacțiunii dintre aceste materiale în condiții de impact extrem, furnizând informații valoroase pentru optimizarea proiectării sistemelor de protecție balistică de generație viitoare.

6.1. Abordarea analitică

6.1.1. Modelul analitic pentru impactul balistic asupra plăcilor ceramice

Modelarea evenimentelor de impact balistic asupra plăcilor ceramice reprezintă o provocare complexă, care necesită atât abordări numerice, cât și analitice pentru a trata aspecte precum fractura și propagarea fisurilor. Există diverse modele disponibile, de la cele simplificate, precum modelul lui Florence [278], până la modele mai detaliate, precum cele propuse de Walker și Anderson [279], sau de Zaera și Sanchez-Galvez [280], fiecare oferind niveluri diferite de complexitate pentru aplicații specifice.

După analiza modelării analitice a impacturilor balistice asupra structurilor ceramice, este la fel de important a fi luat în considerare rolul compozitelor pe bază de fibre în structurile moderne de protecție. Secțiunea următoare analizează modelele analitice ale impactului balistic asupra compozitelor armate cu fibre, examinând mecanismele lor de absorbție a energiei, modurile de degradare și răspunsul structural în condiții de impact la viteză mare. Înțelegerea acestor modele este esențială pentru optimizarea proiectării structurilor balistice hibride care combină ceramica și compozitele armate cu fibre, în vederea obținerii unei rezistențe balistice superioare.

6.1.2. Model analitic pentru impactul balistic asupra materialelor compozite armate cu fibre

În momentul în care un proiectil penetrează un material compozit, acesta generează tensiuni instantanee care se propagă prin material sub formă de unde, cu viteze care depind de caracteristicile fizico-mecanice ale materialului. Aceste unde de tensiune se propagă în toate direcțiile, cauzând deformații care pot fi analizate utilizând abordări 1D, 2D sau 3D. Analiza simplificată 1D și 2D pentru

plăcile subțiri presupune o deformare uniformă pe întreaga grosime a plăcii. Totuși, plăcile cu grosime mai mare prezintă variații ale distribuției deformațiilor și tensiunilor de-a lungul grosimii, ceea ce impune o analiză 3D mai complexă pentru a ține cont de propagarea undelor. Scopul principal al formulării analitice este estimarea energiei absorbite prin diferite mecanisme, a forței de contact, precum și a vitezei și deplasării proiectilului în timp. În plus, se urmărește determinarea limitei balistice și a duratei contactului pentru diferite grosimi ale laminatelor. Această analiză cuprinzătoare ajută la înțelegerea dinamicii impactului și la optimizarea proiectării structurilor laminate pentru performanțe balistice îmbunătățite. Mulți cercetători, precum Daniel și Liber [283], Sierakowski și Chaturvedi [284], Xue și colab. [285], Naik și colab. [286, 287], Paradela, Sanchez-Galvez și colab. [288, 289], Bresciani și colab. [290], Langston [291] și Jintao și Moubin [277], au utilizat, în general, două strategii pentru a studia penetrarea proiectilelor de mare viteză în ținte compozite: propagarea undelor de tensiune și bilanțul energetic. Dezvoltarea unui model analitic care să simuleze cu acuratețe dinamica mecanismului de penetrare reprezintă o provocare majoră, din cauza complexității procesului implicat.

După stabilirea modelelor analitice pentru impactul balistic asupra ceramicii și compozitelor armate cu fibre, precum și înțelegerea rolului acestora în absorbția energiei și a comportamentului structural, devine esențială analiza mecanismelor de cedare a materialului și a evoluției deteriorării în plăcile ceramice supuse impactului balistic. Secțiunea următoare se concentrează asupra comportamentului mecanic al plăcilor ceramice atunci când sunt supuse proiectilelor de mare viteză, analizând procesele de distrugere induse de impact, propagarea undelor de tensiune și mecanismele de penetrare care influențează performanța lor balistică.

6.2. Mecanismul de distrugere și evoluția deteriorării plăcilor ceramice sub impact balistic

6.2.1. Analiza impactului balistic asupra plăcilor ceramice

Când un proiectil lovește o placă ceramică, transferul de energie se manifestă prin trei moduri distincte [69, 87]:

- a) proiectilul pătrunde atât prin fața frontală (de impact), cât și prin fața posterioară a plăcii ceramice, traversând-o complet și continuând deplasarea cu o viteză reziduală semnificativă. Acest comportament indică faptul că energia de impact a proiectilului depășește capacitatea ceramicii de a disipa sau absorbi energia;
- b) proiectilul pătrunde parțial în placa ceramică, dar este complet oprit în interiorul acesteia. Materialul ceramic reușește să absoarbă în întregime energia cinetică a proiectilului, prevenind penetrarea completă;
- c) proiectilul perforează complet placa ceramică, atingând fața posterioară, însă fără a mai păstra energie reziduală. Viteza de impact la care are loc această perforare completă definește limita balistică a materialului.

6.2.2. Mecanismul de penetrare al plăcilor ceramice

La impact balistic, plăcile ceramice prezintă un comportament distinct față de alte materiale, influențat de susținerea periferică și de prezența unei structuri suport. În momentul în care o structură suport este atașată, placa ceramică dezvoltă o rezistență ridicată la penetrare datorită rezistenței sale mari la compresiune, provocând o deformare semnificativă a proiectilului. Dacă viteza de impact a proiectilului este insuficientă, acesta fie se va fragmenta, fie va ricoșa, fenomen cunoscut sub denumirea de "oprire la interfață". Dacă proiectilul rezistă impactului inițial, ceramica se va fragmenta, prin inițierea fisurilor la tracțiune care formează inele circulare în jurul zonei de impact. Aceste fisuri se propagă prin ceramică până la stratul suport, unindu-se într-o formă conică. În absența stratului suport, s-ar produce o expulzare de material, perforând placa ceramică. În prezența acestui strat, tensiunea este redistribuită circumferențial, generând fisuri radiale. Ulterior, se inițiază fisuri laterale în planul suprafeței de impact. Stratul suport reține fragmentele reziduale ale proiectilului și particulele ceramice sfărâmate, ceea ce contribuie la formarea de microfisuri și microcavități, pulverizând placa ceramică și erodând proiectilul. În cazul unor impacturi multiple asupra aceleiași plăci ceramice, primul impact va urma comportamentul descris anterior, însă impacturile ulterioare vor pătrunde prin placă fără o rezistență semnificativă, reducând eficiența de protecție a ceramicii. Pentru a reduce acest efect, structurile balistice sunt proiectate cu multiple plăci ceramice (de tip mozaic), pentru a limita propagarea fisurilor și a menține integritatea structurală [2, 55, 87].

În urma analizei mecanismelor de cedare ale materialului și a evoluției deteriorării în plăcile ceramice supuse impactului balistic, este la fel de important să fie investigat răspunsul compozitelor armate cu fibre în condiții similare. Secțiunea următoare explorează mecanismele de cedare ale materialului, procesele de disipare a energiei și degradarea structurală în compozitele armate cu fibre, evidențiind rolul acestora în îmbunătățirea protecției balistice prin mecanisme precum delaminarea, ruperea fibrelor și cedarea prin forfecare. Înțelegerea acestor comportamente este esențială pentru optimizarea comportamentului structurilor balistice hibride, care integrează atât materiale ceramice, cât și compozite, pentru o rezistență superioară la impact.

6.3. Mecanismul de distrugere și evoluția deteriorării materialelor compozite armate cu fibre la impact balistic

În momentul în care o structură compozită este supusă impactului unui proiectil, aceasta suferă diverse forme de deformare și deteriorare. Inițierea și amploarea acestor deformări sunt influențate de prezența unor factori precum viteza și geometria proiectilului, proprietățile fibrelor, caracteristicile matricei și aderența interfaței dintre fibre și matrice. În urma impactului balistic, se generează o undă de compresiune în zona de contact. Această undă se propagă prin grosimea materialului și, la atingerea suprafeței posterioare, se reflectă sub forma unei unde de tracțiune, care poate conduce la delaminare. Aderența scăzută între fibre și matrice are un rol semnificativ în timpul impactului, deoarece favorizează delaminarea compozitului. Acest proces de delaminare permite fibrelor să se alungească până la rupere. Cu toate acestea, este necesar un anumit grad de rigiditate structurală. O aderență mai ridicată între fibre și matrice poate fi utilizată, în funcție de nivelul de amenințare, pentru a îmbunătăți performanța generală a materialului. Structurile compozite prezintă, în general, o rezistență ridicată la

impacturi balistice, datorită capacității lor de a disipa eficient energia implicată. Această disipare are loc prin mai multe moduri de deteriorare, inclusiv fisurarea matricei, cedarea fibrelor și delaminarea. Totuși, delaminarea inițială reduce semnificativ rezistența mecanică a compozitelor pe bază de fibre. Acest mecanism contribuie la disiparea energiei prin inducerea alungirii fibrelor, permițându-le să absoarbă o parte semnificativă din energia de impact, deși în același timp conduce la degradarea proprietăților mecanice ale materialului. Mecanismul de cedare al compozitelor implică adesea o combinație între cedarea fibrelor prin forfecare și ruperea acestora la tracțiune. Una dintre limitările compozitelor armate cu fibre constă în ruperea efectivă a fibrelor, cauzată de delaminarea în cadrul matricei. Proiectilele cu vârf ascuțit pot induce tensiuni de forfecare, determinând ruperea fibrelor prin forfecare, în timp ce solicitările la încovoiere determină cedarea fibrelor prin întindere.

6.4. Metodologia experimentală

6.4.1. Testarea balistică

Standardul Home Office pentru structuri balistice de protecție individuală (nivel special de protecție – glonț L17A1) a fost utilizat pentru testarea plăcilor compozite cauciuc-ceramică, indicând faptul că panourile balistice pot oferi rezistență împotriva unui glonț de 5,56 mm M855, cu o masă de 4,01 g și o viteză de $920 \text{ m/s} \pm 15 \text{ m/s}$ [35]. Pentru a proteja organele interne împotriva leziunilor nepenetrante, adâncimea de deformare a feței posterioare a stratului suport din plastilină (BFD) trebuie să fie mai mică de 30 mm, în conformitate cu acest standard.

Testele balistice au fost realizate pe plăcile balistice rigide descrise anterior într-un poligon de tragere din Mangalia, România, aparținând Ministerului Apărării Naționale. A fost utilizată o pușcă de asalt de calibru 5,56 mm (carabină M4), cu muniție 5,56x45 mm NATO (tip M855). Glonțul M855 este alcătuit dintr-un vârf perforant din oțel, un miez din plumb și o cămașă din cupru.

Structurile rigide au fost dispuse la o distanță de 15 metri față de gura țevii. Conform caracteristicilor tehnico-tactice ale armei de asalt și ale gloanțului, viteza inițială a proiectilului a fost determinată ca fiind de 922 m/s. Pentru a determina viteza de impact a proiectilului, a fost utilizat un calculator balistic, ținând cont de factori de tragere precum coeficientul balistic al gloanțului, viteza la gura țevii, masa gloanțului și condițiile atmosferice, cum ar fi altitudinea, temperatura și viteza vântului. Viteza de impact a proiectilului a fost determinată ca fiind 902 m/s. Pentru evaluarea traumei balistice în cadrul testelor experimentale s-a utilizat plastilină Koh-I-Noor. Adâncimea de penetrare în panourile balistice a fost măsurată cu ajutorul unui șubler.

6.4.2. Rezultate experimentale și discuții

Figura 6.14 ilustrează orificiul de penetrare al gloanțului în stratul de cauciuc PUR-85 (configurația P1), în urma impactului cu un proiectil M855 la o viteză de 902 m/s. Figura 6.14a reprezintă suprafața de impact a stratului de cauciuc PUR-85, care acționează ca element inițial de absorbție a energiei. Orificiul de intrare ($d_{s_P1} = 1 \text{ mm}$) în stratul de cauciuc PUR-85 prezintă o zonă de ruptură localizată, unde impactul proiectilului a provocat deplasarea materialului și propagarea radială a fisurilor. Imaginea de înaltă rezoluție din partea dreaptă evidențiază un profil de perforare neuniform și neregulat, indicând

viteze mari de deformare și concentrarea tensiunilor în momentul impactului. Marginile înnegrite din jurul orificiului sugerează încălzirea localizată și degradarea indusă de interacțiunea prin frecare dintre glonț și stratul de cauciuc, ca urmare a impactului cu proiectilul. Modelul radial de deteriorare din jurul zonei de penetrare indică propagarea undei de șoc prin stratul din cauciuc, conducând la ruperea și fisurare localizată a materialului. Natura acestei perforări sugerează un mecanism combinat de cedare a materialului: forfecare localizată, rupere la tracțiune și cedare la compresie. Figura 6.14b ilustrează suprafața posterioară a stratului de cauciuc PUR-85, evidențiind orificiul de ieșire al glonțului ($d_{r_P1} = 1,5 \text{ mm}$). Imaginea de înaltă rezoluție din partea dreaptă oferă o reprezentare detaliată a orificiului de penetrare în stratul de cauciuc, unde sunt evidente mecanismele de cedare prin tracțiune și rupere. Marginile neregulate și contururile ascuțite ale orificiului sugerează o cedare a materialului ductilă și fragilă, influențată de interacțiunile undelor de tensiune dintre interfața ceramică-cauciuc. Ceramica pulverizată indică faptul că acumularea localizată a tensiunilor și propagarea undei de șoc au cauzat microfisuri și delaminare la interfața dintre straturi în zona de impact. Zona externă de deteriorare difuză evidențiază prezența unor viteze mari de deformare și reflexia undelor de tensiune la interfața cauciuc-ceramică, contribuind la disiparea energiei și la creșterea rezistenței balistice a panoului de protecție.

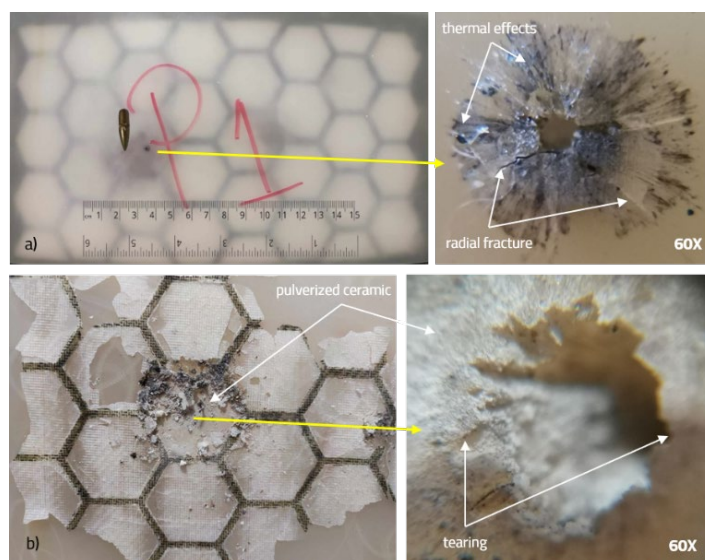


Figura 6.14 Orificiul de penetrare al glonțului în stratul de cauciuc PUR-85 (configurația P1): a) suprafața de impact; b) suprafața posterioară

Straturile din UHMWPE UD joacă un rol esențial în disiparea energiei și oprirea proiectilului în structura compozită din configurația P1. Figura 6.16a oferă informații detaliate privind efectele de penetrare, mecanismele de cedare a materialului și comportamentul mecanic al straturilor de UHMWPE UD în urma impactului balistic. În Figura 6.16a, locația impactului este clar vizibilă, indicând deteriorarea localizată a materialului în straturile de UHMWPE UD, ca urmare a pătrunderii proiectilului prin straturile ceramice anterioare. Modelul de deteriorare sugerează că proiectilul a reținut o cantitate semnificativă de energie cinetică reziduală după perforarea straturilor ceramice, ceea ce a condus la cedarea fibrelor prin forfecare. Suprafața posterioară a straturilor de UHMWPE UD, prezentată în Figura 6.16b, evidențiază o deformare bine definită, indicând o absorbție ridicată de energie și mecanisme progresive de cedare a materialului în structura balistică. Această proeminență structurală este rezultatul unei deformări localizate în afara planului, a straturilor compozite, o caracteristică frecvent

întâlnită în materialele balistice pe bază de fibre, unde cedarea la tracțiune predomină în locul perforării imediate.

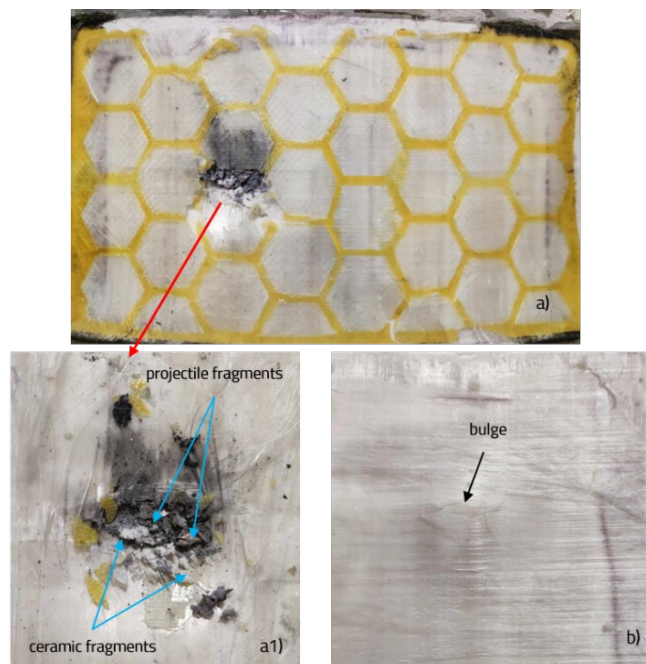


Figura 6.16 Orificiul de penetrare al glonțului în straturile de UHMWPE UD (configurația P1): a) suprafața de impact; b) suprafața posterioară

Figura 6.29 ilustrează deteriorarea observată în stratul suport din cauciuc SBR-65 din configurația P4. Figura 6.29a, reprezentând suprafața de impact a stratului de cauciuc, evidențiază o zonă de concentrare a tensiunilor, marcată de o deformare localizată, asociată cu o decolorare albă la interfața cu țesătura SrPET. Această zonă de concentrare a tensiunilor este înconjurată de fisuri concentrice fine, care indică modul în care undele de tensiune generate în momentul impactului s-au propagat prin structura balistică. Prezența acestor fisuri concentrice indică un transfer semnificativ de energie de la proiectil către straturile superioare ale structurii, reflectând un proces intens de disipare a energiei în zona de impact.

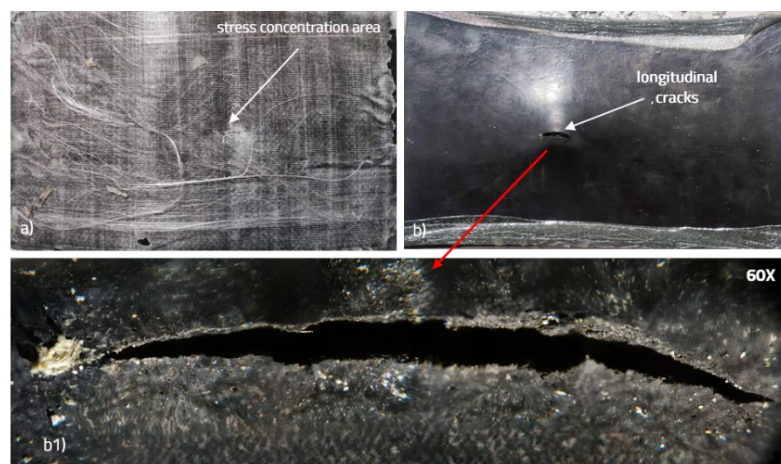


Figura 6.29 Deteriorarea suprafeței posterioare a stratului din cauciuc SBR-65 (configurația P4): a) suprafața de impact; b) fisuri în stratul de cauciuc –suprafața posterioară

Figura 6.29b, reprezentând suprafața posterioară a stratului de cauciuc SBR-65, prezintă o fisură longitudinală vizibilă, extinsă de-a lungul direcției de impact. Această fisură longitudinală s-a format ca

urmare a întinderii extreme a stratului de cauciuc în condițiile unui impact la viteză ridicată. Pe măsură ce proiectilul a fost decelerat progresiv în interiorul straturilor de UHMWPE UD, transmiterea forței către stratul suport din cauciuc a provocat solicitări de tip tracțiune în material. Cu toate acestea, din cauza concentrării locale a tensiunilor și a distribuției asimetrice a sarcinii (cauzată de locația impactului în straturile ceramice – la intersecția dintre plăcile ceramice adiacente), materialul din cauciuc nu a putut reveni complet la forma inițială, ceea ce a condus la o cedare sub forma unei fisuri longitudinale.

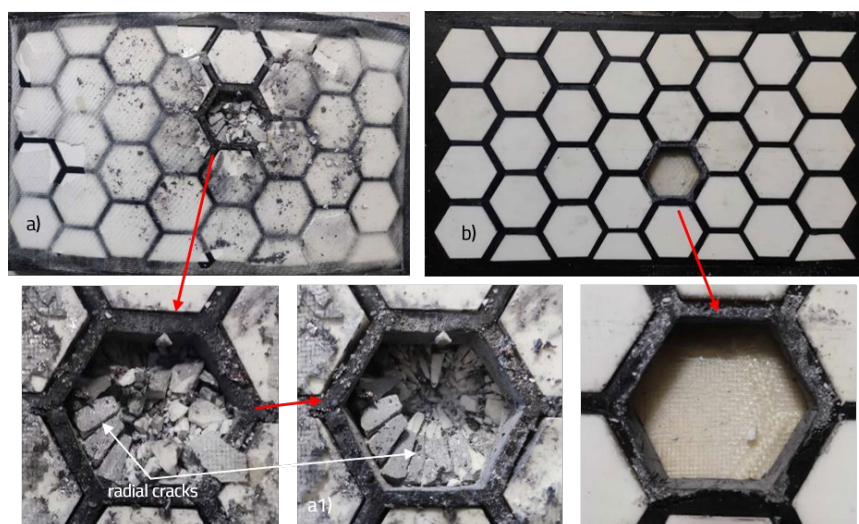


Figura 6.35 Orificiul de penetrare al glonțului în stratul ceramic (configurația P6):
a) suprafața de impact; b) suprafața posterioară

Figura 6.35 ilustrează orificiul de penetrare al glonțului în stratul ceramic din configurația P6, după impactul balistic. În Figura 6.35a, suprafața de impact a stratului ceramic prezintă un impact localizat în centrul unei plăci hexagonale, care a condus la o fragmentare extinsă. Plăcile hexagonale din jur au rămas intacte, indicând faptul că structura tip fagure din cauciuc a limitat propagarea fisurilor către plăcile adiacente. Figura 6.35a1, realizată după îndepărtarea unei părți din fragmentele ceramice, arată centrul zonei de impact, evidențiind fisuri radiale care se propagă spre exterior din punctul de penetrare, comportament specific materialelor casante în condiții de impact la viteză mare. În Figura 6.35b, este prezentată suprafața posterioară a stratului ceramic, unde se observă o perforare distinctă în placa hexagonală corespunzătoare. Se remarcă faptul că rețeaua elastică din jurul marginilor plăcii a rămas intactă, ceea ce sugerează că structura tip fagure din cauciuc de a limitat eficient propagarea fisurilor în plăcile adiacente. Configurația P6 demonstrează un control mai bun al propagării fisurilor datorită rețelei elastice în formă de fagure.

6.5. Modelarea numerică

6.5.1. Modelarea cu elemente finite

Pentru a modela și analiza impactul balistic dintre glonțul M855 și configurațiile rigide de plăci balistice investigate, a fost dezvoltat un model numeric utilizând software-ul LS-DYNA. Impactul a fost considerat perfect normal, iar simetria dublă a fost luată în calcul, ceea ce înseamnă că a fost modelat doar un sfert din panoul balistic, așa cum se arată în Figura 6.43. Pentru plăcile ceramice, straturile de cauciuc și proiectilul au fost utilizate elemente de tip *solid*, iar elemente de tip *shell* au fost folosite pentru

straturile din UHMWPE UD. În cazul materialului UHMWPE, alegerea elementelor de tip shell s-a făcut în principal datorită eficienței computaționale și adecvării acestora pentru simularea materialelor stratificate cu grosime redusă. În majoritatea configurațiilor, cu excepția configurațiilor P1 și P4, straturile de Dyneema HB26 nu au fost perforate, indicând faptul că fibrele au acționat în principal ca straturi de absorbție a energiei. Ținând cont de acest comportament, utilizarea elementelor de tip *shell* s-a dovedit a fi alegerea optimă din mai multe motive. În primul rând, elementele de tip *shell* reduc semnificativ costul computațional și timpul de simulare, oferind totodată o reprezentare realistă a răspunsului mecanic al straturilor din UHMWPE UD. Această eficiență este foarte valoroasă în cazul sistemelor balistice stratificate, unde apar interacțiuni complexe între diferitele componente. În al doilea rând, asigurarea consistenței între configurațiile analizate a reprezentat un aspect esențial al metodologiei aplicate. Utilizarea aceluiași tip de element în toate simulările asigură comparabilitatea rezultatelor și previne apariția unor eventuale inconsistențe în urma utilizării unor formulări diferite în configurații distincte. În cele din urmă, deși scopul principal al studiului a fost analiza rolului straturilor din cauciuc în limitarea propagării fisurilor, mecanismele de deformare și cedare ale straturilor din UHMWPE UD au rămas esențiale pentru înțelegerea procesului de disipare a energiei.

Studiul de față adoptă o abordare simplificată de modelare numerică, în care proiectilul este simulat fără cămașa din cupru, așa cum este ilustrat în [Figura 6.43](#), asigurând astfel eficiență computațională fără a compromite acuratețea rezultatelor de simulare a procesului de penetrare.

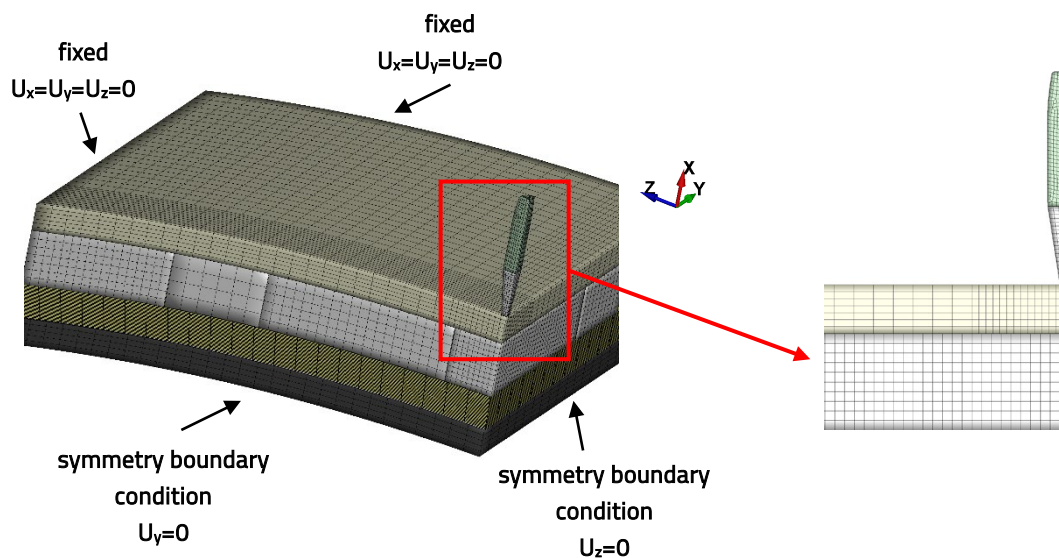


Figura 6.43 Modelul cu elemente finite și condițiile la limită

Interacțiunea dintre glonț și diferitele straturi ale panoului balistic (UHMWPE, cauciuc și ceramică) a fost modelată utilizând algoritmul `CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE`. Contactul dintre părțile aceluiași corp a fost realizat prin algoritmul `CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE`.

Pentru a simula comportamentul de delaminare al straturilor din țesătura SrPET, care acționează ca material de legătură la interfața dintre diferite straturi, a fost aplicat algoritmul de contact `TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE`. În acest caz, valorile coeficienților NFLS și SFLS au fost setate la 85 MPa și 25 MPa [\[301, 302\]](#).

6.5.2. Modelarea constitutivă

Modelul de material MAT_JOHNSON_COOK a fost utilizat pentru simularea vârfului perforant din oțel al proiectilului. Ecuația de stare EOS_LINEAR_POLYNOMIAL a fost implementată pentru a modela cu acuratețe relația dintre presiune, densitate și energia internă în materialul din oțel, în condiții de viteze mari de deformare și presiuni ridicate. Pentru această formulare, valoarea modulului volumetric a fost aleasă ca 164 GPa, asigurând o reprezentare realistă a compresibilității materialului și a rezistenței acestuia la deformări volumetrice în timpul impactului balistic [305].

Modelul de material MAT_PLASTIC_KINEMATIC a fost utilizat pentru miezul din plumb al proiectilului. Acest model de material este destinat simulării plasticității cu întărire izotropă și cinematică, având opțiunea de a include efectele vitezei de deformare, în conformitate cu modelul Cowper-Symonds.

În cazul materialelor ceramice, a fost utilizat modelul MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS pentru a reproduce comportamentul materialelor casante în condiții de deformări mari. În cadrul acestui model se presupune că rezistența la tracțiune a ceramicii este mult mai scăzută decât rezistența la compresiune și că odată ce materialul ceramic se fisurează, acesta își pierde complet rezistența la tracțiune.

6.5.3. Simularea penetrării

Pentru a simula comportamentul la impact dintre glonțul M855 și plăcile compozite cauciuc-ceramică, evenimentul balistic a fost considerat ca având un impact perfect normal, iar procesul de penetrare a fost simulat la o viteză de impact de 902 m/s.

Rezultatele simulării evidențiază modul în care regiunile de contact între materiale, structurile de tip fagure și modul de dispunere al plăcilor ceramice influențează distribuția tensiunilor și absorbția energiei în structurile balistice. Principalele concluzii relevă existența unor compromisuri între concentrarea localizată a tensiunilor, benefică pentru rezistența la impact, și redistribuirea tensiunilor pe o zonă mai mare, care contribuie la reducerea deteriorării structurii. Observațiile următoare sintetizează aceste concluzii principale, evidențiind comportamentele mecanice fundamentale observate în diferite configurații balistice.

În momentul în care o structură de tip fagure din cauciuc este integrată în spatele plăcilor ceramice, stratul frontal de cauciuc PUR-85 este supus unor tensiuni locale foarte ridicate în timpul impactului. Simularea indică, de fapt, valori maxime ale tensiunii în cauciucul PUR-85 de ordinul 70–80 MPa în configurațiile în care o structură de tip fagure susține plăcile ceramice. De exemplu, într-o configurație cu suprapunere directă a straturilor ceramice și o structură tip fagure (configurația P4), tensiunea în stratul de cauciuc PUR-85 a atins o valoare de 79,8 MPa în timpul impactului. Aceste tensiuni sunt semnificativ mai mari decât cele observate în configurațiile fără structuri de tip fagure. Aceasta se datorează faptului că structura de tip fagure și plăcile ceramice segmentate localizează forța de impact într-o zonă mai restrânsă; rețeaua elastică de tip fagure constrânge mișcarea laterală și reflectă undele de tensiune înapoi în cauciuc și ceramică, de-a lungul axei de impact. Practic, prezența structurii de tip fagure împiedică dispersarea rapidă a energiei de impact către zonele adiacente, determinând astfel ca stratul de cauciuc PUR-85 să suporte o sarcină extrem de intensă, concentrată direct în punctul de impact al proiectilului. Undele de tensiune în cauciuc sunt puternic concentrate, iar simulările au

evidențiat modele simetrice de propagare a undelor din punctul de impact, indicând faptul că energia este absorbită într-o regiune localizată. În concluzie, atunci când este atașată o structură din cauciuc de tip fagure, stratul frontal din cauciuc este supus unor tensiuni foarte mari (peste 70 MPa), deoarece structura redirectionează undele de șoc (în special dacă straturile ceramice sunt perfect aliniate). Comportamentul observat evidențiază riscul de fisurare localizată a plăcii ceramice direct impactate, în timp ce structura de tip fagure atenuează transmiterea undelor de tensiune către plăcile adiacente, reducând astfel extinderea deteriorării. Astfel, structura de tip fagure generează un compromis funcțional: asigură tensiuni locale foarte mari (și absorbție de energie eficientă) în cauciuc și ceramică, dar izolează impactul pe o suprafață redusă.

În cadrul simulărilor au fost analizate și cazurile în care proiectilul lovește la intersecția dintre plăcile ceramice adiacente. Acest scenariu generează un profil de tensiuni diferit în cauciucul PUR-85 și în structura suport. Atunci când impactul este centrat pe o singură placă ceramică, acea placă suportă întreaga sarcină; însă, în cazul unui impact la intersecția plăcilor, două sau mai multe plăci ceramice distribuie forța de impact, iar structura prezintă inițial o elasticitate ușor mai mare. Ca urmare, stratul de cauciuc PUR-85 este supus unei tensiuni maxime ușor mai reduse în cazul unui impact la intersecție, comparativ cu un impact centrat. De exemplu, în cazul configurației P5_INT, tensiunea maximă în stratul de cauciuc PUR-85 a fost de aproximativ 52 MPa, mai mică decât valorile de 65–80 MPa înregistrate pentru impacturile centrate. Această reducere se datorează faptului că forța de impact este distribuită între mai multe plăci ceramice și în spațiul dintre ele.

Propagarea undelor de tensiune prin structura balistică este vizibil influențată atunci când stratul de tip fagure este eliminat. În configurații precum P2 (fără strat intermediar de cauciuc între plăcile ceramice), unda de tensiune se propagă printr-un mediu mai continuu și omogen (contact ceramică–ceramică), ceea ce conduce la o amortizare mai redusă la interfețe. Rezultatele simulării indică faptul că în absența structurii de tip fagure din cauciuc, o proporție mai mare din energia de impact este transmisă mai departe, dar și mai uniform. Această modificare are două efecte notabile. În primul rând, stratul frontal din cauciuc PUR-85 suportă impactul direct al unde de tensiune, deoarece unda se propagă fără atenuare substanțială. În al doilea rând, după primul strat ceramic, tensiunea este mai puțin localizată, al doilea strat ceramic și stratul suport preluând unda de tensiune pe o suprafață mai extinsă. De fapt, stratul suport din cauciuc SBR-65 în configurația P2 a prezentat o deformare a feței posterioare mai redusă comparativ cu P1, ceea ce sugerează că tensiunea nu a fost concentrată într-o regiune localizată pe direcția impactului (cum se întâmplă în prezența structurii de tip fagure), ci s-a dispersat pe o zonă mai largă.

Plăcile ceramice din structurile balistice rigide sunt supuse unor tensiuni foarte variabile, în funcție de configurație (mozaic vs. monolitic, prezența structurii tip fagure, aranjamentul plăcilor etc.). În general, cele mai ridicate valori ale tensiunilor au fost înregistrate în configurația cu placă ceramică monolitică, în timp ce plăcile ceramice de tip mozaic au prezentat tensiuni maxime mai reduse, dar o deteriorare mai controlată. Mai exact, în cazul unei singure plăci ceramice, monolitice (configurația P3), simularea a indicat o tensiune de impact de aproximativ 5,5 GPa în punctul de contact cu proiectilul. Această valoare extremă este generată de faptul că întreaga placă ceramică acționează ca o singură unitate structurală, fără discontinuități care să faciliteze disiparea energiei, fiind astfel forțată să absoarbă întreaga undă de șoc până la punctul de cedare. În contrast, în configurațiile cu plăci ceramice hexagonale de tip mozaic (P1, P2 etc.), tensiunea de impact inițială în placa lovită a avut valori cuprinse

între 3–4 GPa. Placa de dimensiuni mai mici poate ceda la o forță mai redusă, iar fisurile care se formează eliberează o parte din tensiune, placa fracturându-se și limitând astfel acumularea de tensiune. Prezența unei structuri de tip fagure din cauciuc în jurul plăcilor ceramice de mozaic limitează și mai mult creșterea valorii tensiunii în fiecare placă individuală, prin absorbția parțială a sarcinii sau redirectionarea acesteia către materiale adiacente. Un alt factor important este alinierea verticală a celor două straturi ceramice: atunci când placa din al doilea strat se află direct dispusă sub cea din primul strat (configurație aliniată), unda de tensiune rezultată din impactul primului strat este transmisă direct către cel de-al doilea strat, generând o tensiune concentrată ridicată în stratul secundar. De exemplu, configurația P4 a prezentat o propagare directă a undelor de tensiune. În contrast, în configurația P1, unde plăcile ceramice sunt decalate, impactul proiectilului asupra unei plăci din primul strat nu este transmis direct către o placă corespunzătoare din al doilea strat. Astfel, tensiunea generată este redistribuită prin stratul de cauciuc, propagându-se către mai multe plăci din stratul secundar și contribuind la disiparea energiei într-o zonă extinsă. Această dispunere decalată a determinat un model de deteriorare mai dispersat al ceramicii în stratul secundar și, în general, la valori mai reduse ale tensiunilor maxime în fiecare placă individuală din al doilea strat, în timp ce placa din primul strat continuă să preia cea mai mare parte a energiei de impact. În plus, prezența unui strat intermediar de tip fagure permite absorbția parțială a tensiunii transmise în ceramică. Simulările au evidențiat că, în prezența unui strat elastic atașat, al doilea strat ceramic este solicitat de o undă de tensiune mai uniform distribuită și de amplitudine redusă, comparativ cu situațiile în care structura de tip fagure lipsește.

Rezultatele simulării permit o comparație între utilizarea unei singure plăci ceramice groase și a două plăci ceramice mai subțiri, suprapuse, dar cu o grosime totală echivalentă. Simularea sugerează că placa ceramică monolitică (cu grosimea egală cu cea a celor două plăci stratificate) este mai eficientă în gestionarea tensiunilor de impact, din mai multe puncte de vedere. În primul rând, placa monolitică asigură o distribuție mai bună a sarcinii pe întreaga sa suprafață. Datorită caracterului continuu al plăcii, atunci când proiectilul o lovește, tensiunea se poate propaga radial, fără întrerupere, în interiorul plăcii. Unda de tensiune nu este întreruptă de o interfață la jumătatea grosimii, ci se disipă atât radial, cât și în profunzime. Aceasta a dus la o absorbție internă semnificativă a energiei, evidențiată de faptul că deformarea feței posterioară a structurii balistice a fost mai mică în configurația P3. Stratul suport din cauciuc SBR-65, în această configurație, a prezentat doar o deformare redusă, fără rupturi sau întinderi severe, indicând că o mare parte din energia proiectilului a fost disipată prin fisurarea ceramicii, fără a fi transmisă brusc spre celelalte straturi de material. Cu alte cuvinte, placa monolitică a reținut tensiunile localizate în interiorul său, protejând straturile ulterioare. În contrast, în cazul unui sistem ceramic stratificat în două straturi, proiectilul perforează primul strat și pătrunde cu energie reziduală în al doilea, acest mecanism secvențial de cedare putând duce la concentrarea tensiunilor în stratul secundar ceramic și în celelalte straturi. Un alt aspect esențial este concentrarea tensiunilor la interfețe: în cazul celor două plăci suprapuse, interfața dintre ele acționează ca o zonă de reflexie a undelor de șoc. Aceste reflexii pot amplifica tensiunile în stratul frontal sau pot transmite unde secundare în stratul posterior, în timp ce o placă monolitică nu are astfel de discontinuități interne care să genereze reflexii suplimentare. Astfel, placa ceramică monolitică reduce numărul interfețelor de reflexie a undelor de șoc, ceea ce este benefic pentru prevenirea concentrațiilor de tensiune. În plus, la fel ca în configurațiile P6 și P7, placa continuă încorporează un volum mai mare de material, ceea ce ajută la oprirea proiectilului mai eficient. Pe de altă parte, sistemul compus din două straturi succesive tinde să

concentreze deteriorarea în zona interfeței, permițând uneori proiectilului să pătrundă mai adânc înainte ca energia să fie complet disipată. Rezultatele experimentale confirmă faptul că, în configurațiile cu un singur strat ceramic (precum P3, P6 și P7), deformarea stratului suport din cauciuc SBR-65 a fost mai redusă în raport cu cea observată în cazul sistemelor ceramice stratificate, indicând un transfer de energie diferit.

Din punct de vedere mecanic, penetrarea simulată a structurilor compozite cauciuc-ceramică evidențiază modul în care tipul configurației și alegerea materialelor controlează propagarea tensiunii și a energiei în timpul unui impact la o viteză ridicată. Stratul frontal din cauciuc PUR-85 demonstrează o capacitate ridicată de absorbție a energiei prin deformări mari, indicând o reducere eficientă a undelor de tensiune și implicând o deteriorare locală a materialului. Includerea unui strat intermediar de tip fagure din cauciuc între plăcile ceramice modifică semnificativ distribuția tensiunilor: acesta tinde să localizeze și să intensifice tensiunile de-a lungul traiectoriei proiectilului, protejând în același timp regiunile adiacente și limitând propagarea fisurilor. Eliminarea stratului de tip fagure are efectul opus – distribuie tensiunea mai uniform în întreaga structură, reducând deformările extreme într-un singur punct, dar putând crește deteriorarea generală a stratului frontal de cauciuc și a ceramicii, din cauza transmisiei mai directe a unde de șoc. În cadrul configurațiilor analizate, se conturează un model clar: interfețele dintre materiale sau dintre plăci prezintă atât avantaje, cât și dezavantaje – ele pot disipa și redirectiona tensiunea, protejând astfel anumite zone, dar pot deveni și puncte de concentrare sau reflexie a tensiunii, care amplifică deteriorarea în alte moduri. Configurația stratului ceramic (mozaic vs. monolitic, o singură placă vs. două) influențează decisiv modul în care proiectilul este oprit. O placă ceramică monolitică distribuie sarcina de impact și poate absorbi o cantitate mare de energie (adesea având performanțe mai bune decât un sistem stratificat în prevenirea propagării tensiunii în straturile posterioare), dar cedează într-un mod necontrolat, afectând întreaga placă. Plăcile ceramice de tip mozaic, în special atunci când sunt separate elastic, limitează deteriorarea în zona de impact și previn propagarea fisurilor, dar transferă mai multă tensiune către straturile suport.

Rezultatele simulării evidențiază faptul că prin ajustarea interfețelor dintre straturi și a dispunerii materialelor, se poate obține o distribuție optimă a tensiunilor, evitând concentrațiile de tensiune (care pot duce la perforare sau deformare excesivă a feței posterioare) și îmbunătățind capacitatea structurii balistice de a absorbi și dispersa energia cinetică a proiectilului.

6.6. Validarea modelelor numerice. Corelarea rezultatelor numerice și experimentale

Adâncimea și diametrul craterului format în materialul suport din plastilină, observate în timpul testelor experimentale, sunt detaliate în [Tabelul 6.4](#).

Tabelul 6.4 Deformarea feței posterioare a structurii după impactul balistic

Configurație	Adâncimea craterului (mm)		Diametrul craterului (mm)	Obs.
	Simulări	Experimente		
P1	12,67	8,9	62	
P1_INT	12,04			
P2	8,8	7	58	
P3	4,05	4,5	45	
P4	7,81			

Configurație	Adâncimea craterului (mm)		Diametrul craterului (mm)	Obs.
	Simulări	Experimente		
P4_INT	15,6	10,5	65	fisuri longitudinale
P5	6,95			
P5_INT	7,94	7,9	56	
P6	5,71	4,7	59	
P6_INT	22,6			
P7	5,5	5,6	60	
P7_INT	6,84			

Atunci când sunt comparate rezultatele experimentale cu cele numerice, se poate observa că valorile adâncimii de penetrare în simulările numerice sunt mai mari decât cele obținute în testele experimentale, cu excepția configurațiilor P3 și P7, unde acestea sunt ușor mai scăzute. Această diferență se explică prin faptul că în analiza numerică proiectilul a fost constrâns să lovească frontal, în timp ce, în realitate, este foarte dificil de obținut un contact perfect frontal, iar o parte din energia cinetică a proiectilului a fost disipată prin schimbarea direcției la interfața dintre straturi. În schimb, în simulările numerice, proiectilul a pătruns perpendicular pe suprafața țintei, iar energia sa cinetică a fost absorbită prin eroziune.

Rezultatele experimentale demonstrează o corelație între diametrul craterului, intensitatea impactului și deformarea observată pe fața posterioară. Diametrul craterului reflectă nu doar transferul de energie în punctul de impact, ci și răspunsul materialului suport din plastilină și modul de deteriorare al straturilor frontale. Este de remarcat faptul că anumite configurații precum P1 și P4_INT prezintă diametre accentuate ale craterului, care corespund cu valori ridicate ale adâncimii de penetrare, indicând un transfer mai amplu de energie și cedări de material localizate mai pronunțate.

Analiza comparativă între rezultatele experimentale și cele numerice pentru configurațiile balistice rigide demonstrează o corelație puternică în ceea ce privește comportamentul la penetrare, distribuția tensiunilor, eroziunea proiectilului și deformarea feței posterioare. Modelul numeric reproduce cu succes mecanismele principale de deteriorare, inclusiv fisurarea ceramicii, propagarea undelor de tensiune și disiparea energiei prin straturile de cauciuc PUR-85 și SBR-65. Formarea fisurilor radiale și circumferențiale, formarea conoidului în stratul ceramic și modelele de eroziune ale proiectilului corespund în mod realist observațiilor experimentale, susținând consistența simulării. Totuși, există mici discrepanțe, cauzate de presupunerea idealizată a unui impact perfect frontal, precum și de absența unor efecte minore, cum ar fi unghiul de impact sau ricoșeul proiectilului. În ciuda acestor abateri minore, corespondența generală între rezultate confirmă validitatea modelului numeric pentru analiza rezistenței la impact și disipării energiei în configurațiile de plăci balistice rigide.

6.7. Concluzii

Acest capitol a oferit o analiză teoretică și experimentală detaliată a unor structuri balistice rigide inovatoare supuse impactului la viteză mare, concentrându-se asupra eficienței configurațiilor balistice compozite. Studiul a demonstrat că integrarea plăcilor ceramice cu materiale compozite armate cu fibre și straturi de cauciuc îmbunătățește capacitatea de absorbție a energiei, reducând efectele de

penetrare ale proiectilului. Prin modelare analitică, testare experimentală și simulări numerice, au fost obținute informații esențiale privind mecanismele de deteriorare și comportamentul structural al acestor materiale în condiții de impact balistic.

Prezența materialelor din cauciuc SBR-65 și PUR-85 contribuie suplimentar la îmbunătățirea rezistenței la impact. Aceste materiale acționează ca straturi de absorbție a energiei, prin reducerea transmisiei undelor de tensiune și reducerea deformării suprafeței posterioare, aspect esențial pentru diminuarea riscului de rănire a purtătorului. Rezultatele evidențiază că variațiile în configurația straturilor de cauciuc au un impact semnificativ asupra performanței balistice generale a sistemului, prin modificarea modului de propagare a undelor de tensiune și a comportamentului la fisurare. De exemplu, structurile de tip fagure din cauciuc contribuie la limitarea propagării fisurilor în plăcile ceramice adiacente, păstrând integritatea structurii sub acțiunea impacturilor succesive. Un aspect important este eficiența cauciucului PUR-85 ca strat frontal de absorbție a energiei în sistemele de protecție balistică. Rezultatele experimentale arată că PUR-85 joacă un rol semnificativ nu doar în reducerea forței de impact, ci și în reținerea fragmentelor ceramice și a celor provenite din proiectil, reducând astfel riscul de leziuni secundare.

Analiza comparativă a diferitelor configurații balistice a evidențiat variații în mecanismele de cedare ale materialului și integritatea structurală a sistemelor. Prezența sau absența straturilor intermediare de cauciuc între plăcile ceramice suprapuse a influențat semnificativ propagarea fisurilor și disiparea energiei. Configurațiile cu straturi ceramice suprapuse direct au prezentat zone distruse mai extinse, în timp ce sistemele dotate cu interfețe din cauciuc au demonstrat o redistribuire mai eficientă a tensiunilor și o rezistență sporită la impacturi multiple.

Rezultatele experimentale obținute în urma testelor balistice cu proiectilul de 5,56 mm M855 confirmă predicțiile teoretice privind valorile adâncimii de penetrare, deformarea materialelor și modurile de distrugere. Măsurătorile adâncimii de penetrare arată că aceste compozite hibride respectă standardele de rezistență balistică, cu niveluri de deformare încadrate în limitele acceptabile pentru protecția personalului. Integrarea straturilor suport din UHMWPE UD și cauciuc SBR-65 s-a dovedit a fi eficientă în reducerea traumei balistice și în creșterea durabilității structurii.

7. Concluzii finale, contribuții originale și direcții viitoare de cercetare

Această teză de doctorat cuprinde o cercetare amplă asupra materialelor și structurilor moderne pentru protecție balistică. Pornind de la o analiză aprofundată a literaturii de specialitate, a fost identificată și formulată problema de cercetare: dezvoltarea unei soluții inovatoare de structură de protecție, menită să îmbunătățească performanța balistică a echipamentelor individuale, utilizând materiale ușoare și eficiente din punct de vedere al costurilor. În prima fază, au fost concepute configurații noi de structuri balistice stratificate, atât panouri flexibile cât și plăci rigide, care integrează materiale din cauciuc, compozite armate cu fibre de înaltă performanță și ceramică. Ulterior, aceste configurații au fost supuse modelării teoretice, simulărilor numerice și testărilor experimentale în condiții de impact balistic. Rezultatele obținute demonstrează că integrarea materialelor ceramice cu straturi compozite armate cu fibre și cauciucuri poate duce la o creștere semnificativă a capacității de absorbție a energiei și a rezistenței balistice, comparativ cu soluțiile clasice. Au fost obținute informații esențiale privind mecanismele de deformare și cedare ale fiecărui material în cadrul acestor sisteme hibride, oferind o bază solidă pentru dezvoltarea viitoarelor soluții optimizate de structuri balistice.

7.1 Concluzii finale

Următoarele concluzii principale pot fi formulate în urma cercetării realizate în cadrul acestei teze:

1. Straturile de cauciuc prezintă o capacitate esențială de absorbție a energiei de impact. Cercetarea a confirmat faptul că straturile din cauciuc SBR-65 și PUR-85 joacă un rol important în reducerea forțelor de impact. Comportamentul hiperelastic al cauciucului îi permite să suporte deformări mari și să absoarbă o cantitate semnificativă de energie de deformare în timpul impactului. Testele cvasi-stactice, dinamice și balistice au arătat că materialele SBR-65 și PUR-85 prezintă comportamente mecanice distincte. În mod notabil, la viteze mari de deformare (care simulează impactul balistic), cauciucul mai dur, PUR-85, a prezentat o reducere semnificativă a ductilității, alungirea la rupere scăzând de la aproximativ 760% în regim de solicitare statică la 240% în condiții balistice. Cauciucul PUR-85 a manifestat tendințe de cedare specifice materialelor casante, cu apariția fisurilor localizate, în locul unei întinderi uniforme. În contrast, cauciucul SBR-65, ușor mai maleabil, a menținut o elasticitate mai ridicată și nu a prezentat fracturi premature, deși alungirea sa efectivă a scăzut de la 140% la 110% în regim balistic. Aceste experimente, alături de simulările corespunzătoare folosind modelul Mooney-Rivlin, au validat modelele numerice ale materialelor din cauciuc, demonstrând o corelație strânsă între răspunsurile tensiune-deformație simulate și cele observate experimental. În ansamblu, straturile de cauciuc s-au dovedit a fi eficiente în absorbția energiei, reducând amplitudinea undelor de tensiune și intensitatea forței transmise către straturile următoare. Acest comportament susține importanța lor în proiectarea pachetelor balistice.

2. Cauciucul PUR-85 contribuie eficient la reducerea riscului provocării de leziuni colaterale prin reținerea fragmentelor ceramice și a celor provenite din proiectil. Rezultatele experimentale arată că materialul PUR-85 are un rol important nu doar în reducerea forței de impact, ci și în reținerea fragmentelor ceramice și a celor din proiectil, contribuind astfel la reducerea riscului leziunilor secundare. Atunci când un proiectil cu o viteză mare penetrează straturile ceramice, acestea se

fragmentează și pot reprezenta un pericol pentru purtător. Cauciucul PUR-85 absoarbe și reține aceste fragmente, împiedicând dispersia lor și reducând astfel riscul de apariție a leziunilor cauzate de proiectilele secundare. Acest comportament contribuie semnificativ la creșterea nivelului general de siguranță al structurii, fapt ce recomandă materialul ca fiind potrivit pentru echipamentele individuale de protecție utilizate în domeniul militar și al forțelor de ordine.

3. Interacțiunea dintre materialele compozite și cauciuc contribuie semnificativ la absorbția șocurilor și la îmbunătățirea performanței balistice. Laminele compozite pe bază de fibre, în special panourile din UHMWPE unidirecțional (Dyneema® HB26), au fost utilizate ca straturi suport în structurile flexibile și ca straturi intermediare de disipare a energiei în structurile rigide. Testele de impact balistic efectuate asupra materialelor UHMWPE au evidențiat multiple mecanisme de absorbție a energiei și de cedare a materialului: întinderea și ruperea fibrelor, delaminarea straturilor, cedarea prin forfecare și deformarea feței posterioare. Capacitatea materialului UHMWPE de a se deforma în afara planului fără a-și pierde integritatea structurală este benefică pentru absorbția energiei cinetice reziduale și pentru reducerea traumei balistice. Cercetarea a arătat că aceste straturi de fibre au reținut fragmente din proiectil și au disipat energia prin ruperea fibrelor la tracțiune, prevenind perforarea completă în toate configurațiile testate. Atunci când aceste straturi sunt integrate cu structuri din cauciuc (conform analizelor prezentate în Capitolul 5), fibrele și cauciucul interacționează eficient pentru a dispersa și absorbi șocul, determinând o reducere semnificativă a deformării feței posterioare. Această interacțiune fibră-cauciuc îmbunătățește semnificativ performanța balistică: fibrele asigură rezistența la penetrare (prin forța de tracțiune), în timp ce cauciucul decelerează proiectilul și absoarbe șocul, rezultând un sistem de protecție mai eficient.

4. Configurația ceramică de tip mozaic îmbunătățește controlul propagării fisurilor și capacitatea de rezistență la impacturi multiple. În cazul amenințărilor generate de gloanțe cu viteză ridicată, prezența plăcilor ceramice ca față secundară de impact s-a dovedit a fi esențială. Materialele ceramice provoacă deformarea vârfului proiectilului și îl erodează, fragmentându-se în acest proces și absorbind astfel o parte semnificativă din energia de impact. În testele prezentate în Capitolul 6, realizate cu muniție 5,56×45 mm NATO (viteză de impact de 902 m/s), stratul ceramic frontal s-a fragmentat și s-a pulverizat, disipând energie prin propagarea fisurilor și eroziunea proiectilului. O constatare importantă este că deși ceramica este foarte eficientă în disiparea inițială a energiei, depinde de straturile suport (frontal și posterior) pentru a reține fragmentele și pentru a absorbi forțele reziduale – în mod izolat, materialul ceramic este prea casant pentru a opri complet un proiectil fără a se fragmenta. Modelele de deteriorare ale plăcilor ceramice au variat în funcție de configurația acestora: o singură placă ceramică monolitică a prezentat tendința de a genera fisuri radiale și circumferențiale extinse pe toată suprafața după impact. În schimb, plăcile ceramice segmentate de tip mozaic au localizat deteriorarea, cu precădere în placa în contact direct cu proiectilul. Această diferență confirmă faptul că divizarea ceramicii în plăci mai mici (model mozaic) poate preveni propagarea extinsă a fisurilor, menținând zonele învecinate intacte pentru rezistență la impacturi multiple – o caracteristică esențială pentru structurile balistice utilizate în scenarii reale de luptă.

5. Amplasarea optimă a cauciucului în panourile balistice flexibile reduce deformarea feței posterioare a panourilor și trauma balistică. Valoarea reală a materialelor studiate devine evidentă atunci când acestea sunt integrate în sisteme hibride stratificate, iar cercetarea a oferit concluzii importante privind performanța diverselor configurații. În structurile balistice flexibile (formate din

UHMWPE și cauciuc SBR-65), au fost comparate trei configurații: cauciucul a fost plasat ca strat frontal, intermediar și strat suport. Testele balistice realizate cu gloanțe de 9 mm au arătat că toate cele trei panouri hibride au împiedicat perforarea structurilor. Cu toate acestea, poziționarea cauciucului a avut un impact semnificativ asupra decelerării proiectilului și a deformării feței posterioare (BFD). În mod specific, configurația care a utilizat cauciucul ca și strat suport (PE-RCP-B) a generat cea mai rapidă decelerare a proiectilului și a produs cea mai redusă deformare pe fața posterioară. Analiza proiectilelor după impact a indicat faptul că atunci când stratul de cauciuc este plasat ca strat suport, glonțul este oprit după ce a perforat straturile frontale de UHMWPE, suferind o deformare pronunțată, până la separarea cămășii de cupru de miezul din plumb, ca urmare a decelerării bruște. Acest strat din cauciuc dispus ca strat suport a absorbit energia reziduală și s-a deformat, contribuind la reducerea traumei transmise purtătorului. În contrast, dispunerea cauciucului în față sau la mijloc a oprit de asemenea glonțul, dar a permis o deformare ușor mai vizibilă și a lăsat glonțul relativ mai intact (cu deformare clasică în formă de ciupercă). Aceste rezultate evidențiază faptul că succesiunea straturilor este esențială: un strat suport din cauciuc este foarte eficient în reducerea traumei balistice, în timp ce un strat frontal de cauciuc poate disipa o parte din energie încă de la început, dar nu reduce la fel de mult deformarea feței posterioare. Este important de remarcat faptul că structura flexibilă hibridă a depășit performanțele unui material textil simplu, demonstrând că inserarea chiar și a unui strat subțire de cauciuc îmbunătățește semnificativ absorbția de energie.

6. Straturile intermediare de tip fagure de albine din cauciuc îmbunătățesc integritatea structurală și rezistența la impacturi multiple în plăcile rigide. Pentru configurațiile rigide, destinate protecției împotriva proiectilelor de mare viteză, teza a analizat mai multe aranjamente stratificate, care combină plăci ceramice, straturi de cauciuc SBR-65 și PUR-85 și straturi din UHMWPE UD. Au fost dezvoltate șapte configurații (P1–P7) pentru a analiza variabile precum: arhitectura ceramică de tip mozaic vs. monolitică și prezența unei interfețe de cauciuc de tip fagure vs. suprapunere directă a plăcilor ceramice. Testele balistice cu muniție 5,56 mm M855 au demonstrat că integrarea acestor materiale diferite poate opri proiectilele de mare viteză, fără penetrare completă, și cu deformări pe fața posterioară în limite acceptabile. Un rezultat notabil a fost observat în configurațiile cu două straturi ceramice. Atunci când două straturi ceramice de tip mozaic au fost suprapuse fără strat intermediar de amortizare, deteriorarea a fost mai pronunțată. În schimb, în configurațiile în care a fost integrat un strat intermediar de tip fagure din cauciuc, cauciucul a separat eficient cele două straturi și a împiedicat propagarea fisurilor de la un strat ceramic la altul. Prezența acestui strat flexibil din cauciuc contribuie la creșterea rezistenței la impacturi multiple, deoarece un impact asupra unei plăci nu compromite plăcile adiacente. De asemenea, stratul intermediar din cauciuc a reținut numeroase fragmente ceramice, împiedicând dispersarea lor spre stratul posterior, permițând astfel stratului compozit din fibre să rămână intact și să absoarbă eficient energia reziduală și fragmentele proiectilului. În toate testele pe panouri rigide, combinația dintre stratul frontal din cauciuc PUR-85, stratul ceramic dur și straturile suport absorbante de energie (UHMWPE și SBR-65) s-a dovedit a fi eficientă: proiectilele au fost fie puternic erodate, fie fragmentate la contactul cu ceramica, iar masa reziduală a acestora a fost oprită de către straturile compozite și cauciuc, generând deformări pe fața posterioară în limitele de siguranță. În plus, stratul din cauciuc PUR-85 a contribuit la reținerea fragmentelor ceramice și a celor din proiectil, reducând astfel riscul leziunilor secundare.

7. Configurațiile balistice nou dezvoltate prezintă o eficiență superioară din punct de vedere al greutății și costului. Structurile balistice flexibile și rigide propuse în această cercetare au atins un echilibru optim între greutate redusă, performanță balistică îmbunătățită și costuri de producție mai scăzute. Configurațiile flexibile care integrează UHMWPE UD și cauciuc SBR-65 sunt mai ușoare și mai economice decât structurile flexibile convenționale pe bază de Kevlar sau UHMWPE impregnate cu rășină epoxidică, fără a compromite capacitatea de protecție. De asemenea, configurațiile de plăci rigide, care combină plăci ceramice de tip mozaic, straturi de cauciuc, UHMWPE UD și SrPET, au demonstrat niveluri de protecție comparabile sau superioare la greutate și costuri mai reduse în comparație cu plăcile compozite ceramice tradiționale. Aceste rezultate confirmă aplicabilitatea practică a sistemelor propuse, în special în domenii care necesită un echilibru între mobilitate, protecție și eficiență economică, cum ar fi echipamentele destinate forțelor armate și structurilor de ordine publică.

8. Conexiunea mecanică între straturi fără impregnare cu rășină, utilizând țesătura SrPET, îmbunătățește integritatea structurală, reduce tensiunile la interfețe și contribuie la reducerea greutății în structurile rigide. Spre deosebire de sistemele balistice rigide convenționale, care se bazează pe rășini epoxidice pentru adeziunea între straturi, configurațiile dezvoltate în această teză au încorporat țesătura SrPET ca agent de legătură. Această îmbinare fără rășină elimină greutatea suplimentară și complexitatea de fabricație asociate matricelor epoxidice, menținând totodată o conexiune mecanică eficientă între straturi. În plus, utilizarea țesăturii SrPET contribuie la reducerea concentrațiilor de tensiune la nivelul interfețelor dintre materiale, aspect care ajută la menținerea integrității structurale a sistemului în timpul impacturilor cu viteză mare. Integrarea eficientă a țesăturii SrPET în configurațiile rigide evidențiază potențialul acestui material ca soluție ușoară și performantă de îmbinare pentru sistemele de protecție balistică de generație viitoare.

În general, rezultatele acestei cercetări oferă informații valoroase pentru optimizarea sistemelor de protecție balistică de generație viitoare. Se validează, prin această cercetare, faptul că structurile hibride, care combină proprietățile materialelor ceramice, compozitelor armate cu fibre și cauciucurilor, oferă o protecție superioară împotriva amenințărilor de mare viteză. Cercetările viitoare ar putea analiza noi combinații de materiale, configurații geometrice alternative și tehnologii avansate de fabricație pentru a optimiza performanța balistică. De asemenea, modelarea computațională extinsă și testările experimentale sub diverse condiții de impact ar putea contribui la creșterea preciziei în predicția comportamentului la impact și a eficienței sistemelor de protecție.

Această cercetare contribuie la fundamentarea științifică a proiectării sistemelor de protecție avansate, prin analiza aprofundată a mecanismelor de absorbție a energiei și a modurilor de cedare ale materialelor în condiții de impact balistic, facilitând astfel dezvoltarea de soluții eficiente, optimizate din punct de vedere al greutății și adaptabilității, destinate utilizării în context militar și operațional.

7.2 Contribuții originale

Această cercetare doctorală oferă perspective inovatoare în domeniul materialelor pentru protecție balistică și al dezvoltării lor, iar contribuțiile originale ale autorului sunt sintetizate după cum urmează:

1. **Evaluarea aprofundată** a stadiului actual al sistemelor balistice de protecție individuală, cu accent pe **utilizarea materialelor, configurația structurală și metodologiile de evaluare a performanței**. Această analiză constituie o referință valoroasă pentru cercetătorii din domeniu, oferind o înțelegere clară a provocărilor actuale și direcțiilor relevante pentru dezvoltarea viitoare a structurilor balistice de înaltă performanță. **Se acordă o atenție deosebită rolului materialelor din cauciuc** în procesul de dezvoltare a structurilor de protecție, ca element semnificativ în creșterea capacității de absorbție a energiei și în îmbunătățirea performanței balistice generale.

2. **Dezvoltarea unei soluții inovatoare de sistem balistic utilizând materiale ușoare și eficiente din punct de vedere al costurilor**, cu capacitate sporită de absorbție a energiei. Studiul propune și validează **configurații noi de structuri balistice flexibile și rigide**, care integrează materiale din cauciuc, precum panouri UHMWPE–cauciuc și plăci compozite ceramică–cauciuc cu structuri din cauciuc de tip fagure, demonstrând, pentru prima dată, eficiența acestora în **reducerea deformării feței posterioare a structurilor balistice, creșterea rezistenței la impacturi multiple și îmbunătățirea performanței balistice generale**, în comparație cu structurile compozite tradiționale.

3. **Determinarea experimentală a proprietăților materialelor hiperelastice utilizate în modelarea numerică**. Această cercetare prezintă **date experimentale originale** și analiza comportamentului materialelor hiperelastice SBR-65 și PUR-85 cu durități diferite, testate în condiții de solicitare cvasi-statică, la viteze mari de deformare și în regim balistic. Obiectivul principal a fost determinarea comportamentului mecanic și a capacității de absorbție a energiei acestor materiale. Rezultatele testelor au fost utilizate pentru determinarea constantelor de material necesare modelării constitutive, în special pentru **modelul hiperelastic Mooney-Rivlin**. Aceste constante, calibrate prin teste de compresie la viteze mari de deformare, au permis simularea precisă a comportamentului cauciucului în aplicațiile balistice. Datele obținute constituie o referință fundamentală pentru modelarea componentelor din cauciuc utilizate în sistemele balistice.

4. **Dezvoltarea de metodologii experimentale pentru testarea materialelor din cauciuc și a structurilor balistice**. O contribuție semnificativă constă în formularea unor metodologii experimentale complete, concepute atât pentru **caracterizarea materialelor**, cât și pentru **evaluarea sistemelor balistice**. Au fost stabilite protocoale de testare personalizate pentru caracterizarea comportamentului epruvetelor din cauciuc în condiții variate de solicitare, precum și pentru evaluarea performanței balistice a structurilor balistice flexibile și rigide. Aceste metodologii contribuie la standardizarea practicilor de testare pentru materiale și structuri balistice de nouă generație.

5. **Dezvoltarea și validarea modelului numeric**. Această cercetare integrează simulări cu elemente finite și date experimentale pentru evaluarea performanței configurațiilor balistice flexibile și rigide nou dezvoltate. A fost dezvoltat un **model numeric personalizat utilizând software-ul LS-DYNA**, care a inclus un model constitutiv Mooney-Rivlin, calibrat pentru cauciucurile SBR-65 și PUR-85 pe baza datelor experimentale obținute. Pentru materialele UHMWPE și ceramice, parametrii constitutivi au fost selectați din surse relevante din literatura de specialitate, asigurând o reprezentare realistă a comportamentului mecanic al acestora în condiții de impact balistic. Simulările impacturilor balistice au fost în concordanță cu rezultatele experimentale în ceea ce privește fenomenul de perforare, mecanismele de cedare ale materialului și deformarea feței posterioare.

6. Contribuție semnificativă la înțelegerea mecanismelor de absorbție a energiei și de gestionare a deteriorării în sistemele balistice și echipamentele de protecție individuală. Această cercetare oferă perspective originale asupra modului în care performanța balistică poate fi îmbunătățită prin interacțiunea materialelor și configurarea structurală. Un rezultat semnificativ este evidențierea rolului structurilor din cauciuc în reducerea amplitudinii și dispersarea undelor de tensiune; plasarea unui strat din cauciuc între suprafața ceramică și stratul compozit pe bază de fibre reduce reflexia undei de șoc și favorizează dispersia energiei, ceea ce conduce la creșterea rezistenței la impacturi multiple. Studiul demonstrează că segmentarea straturilor ceramice în modelul de tip mozaic, încorporate în structura de tip fagure din cauciuc, permite o distrugere controlată a plăcilor și împiedică propagarea fisurilor în afara zonei de impact. O altă contribuție importantă constă în înțelegerea mecanismelor de interacțiune dintre materiale: performanța îmbunătățită nu rezultă doar din proprietățile individuale ale cauciucului, ceramicii și fibrelor, ci mai ales din modul în care acestea interacționează. De exemplu, s-a demonstrat că straturile din cauciuc rețin fragmentele ceramice și părți ale proiectilului, acționând ca strat absorbant intern, reducând riscul leziunilor secundare. Aceste constatări oferă direcții valoroase pentru dezvoltarea sistemelor balistice de nouă generație, în special în abordarea provocării reale de a proteja împotriva impacturilor primare și a fragmentărilor secundare.

7. Integrarea eficienței în ceea ce privește greutatea și costurile în dezvoltarea structurilor balistice. Configurațiile propuse, atât cele flexibile, cât și cele rigide, reușesc să atingă un **echilibru superior între nivelul de protecție, greutate și cost de producție**. Structurile flexibile dezvoltate în cadrul studiului au demonstrat o reducere semnificativă a greutății și costuri mai scăzute de fabricare, în comparație cu soluțiile convenționale pe bază de rășină epoxidică. De asemenea, configurațiile rigide propuse au asigurat protecție balistică eficientă, cu **o greutate și un cost mai redus** decât soluțiile ceramice compozite tradiționale.

8. Conexiunea mecanică între straturi fără impregnare cu rășină folosind țesătura SrPET ca abordare inovatoare pentru îmbunătățirea coeziunii mecanice și reducerea greutății sistemului. Spre deosebire de sistemele balistice compozite convenționale care utilizează matrici din rășină epoxidică, această cercetare propune utilizarea țesăturii SrPET ca agent de îmbinare, eliminând necesitatea adezivilor cu greutate crescută. Utilizarea țesăturii SrPET permite îmbinarea straturilor fără rășină, ceea ce conduce la reducerea concentrațiilor de tensiune la interfețe, îmbunătățirea coeziunii mecanice și o scădere semnificativă a greutății totale a structurii. Această abordare simplifică procesul de fabricație și contribuie la dezvoltarea unor sisteme balistice ușoare, durabile și eficiente din punct de vedere structural, în special pentru aplicațiile cu plăci rigide.

7.3 Direcții viitoare de cercetare

Pe baza rezultatelor obținute și ținând cont de limitările identificate, pot fi formulate mai multe direcții viitoare de cercetare pentru a îmbunătăți în continuare tehnologia de protecție balistică:

1. Extinderea explorării materialelor. Studiile viitoare ar putea viza o gamă mai largă de materiale din cauciuc și compozite. De exemplu, cercetarea asupra unor tipuri alternative de cauciuc ar putea identifica materiale cu proprietăți superioare de absorbție a energiei sau cu o durabilitate crescută în diverse condiții de mediu. O analiză parametrică privind duritatea și grosimea straturilor de cauciuc ar

putea contribui la definirea domeniilor optime de utilizare în funcție de nivelul dorit de protecție, având în vedere că rezultatele prezentei cercetări indică o tendință de comportament casant a cauciucului la impact. De asemenea, se poate investiga utilizarea unor fibre de armare diferite (de exemplu fibrele de aramidă de tip Kevlar®, fibrele de sticlă de înaltă rezistență sau materiale textile pe bază de nano-fibre aflate în curs de dezvoltare) și a țesăturilor hibride, fie ca alternativă, fie ca supliment la UHMWPE. Aceste materiale ar putea oferi performanțe îmbunătățite împotriva anumitor tipuri de amenințări (de exemplu, aramida are o rezistență termică superioară, ceea ce ar putea fi relevant în cazul proiectilelor incendiare sau trasoare). O altă direcție de cercetare este explorarea materialelor ceramice avansate (precum carburile de siliciu sau de bor) pentru stratul frontal de impact. Acestea ar putea contribui la reducerea greutateii sau la îmbunătățirea rezistenței la impacturi multiple, dar necesită testare împreună cu straturile intermediare din cauciuc, deoarece caracterul lor casant pronunțat ar putea interacționa diferit cu straturile de acoperire.

2. Testarea rezistenței la impacturi multiple și a durabilității. Deși cercetarea de față a abordat calitativ rezistența la impacturi multiple (în special în cazul configurațiilor de tip mozaic), sunt necesare teste balistice dedicate pentru a cuantifica numărul de lovituri pe care noile configurații balistice le pot suporta înainte de a fi penetrate. Experimentele viitoare ar trebui să implice tragerea mai multor proiectile asupra aceluiași panou (în puncte diferite și, eventual, în același punct) pentru a evalua comportamentul interfețelor cauciuc-ceramică la lovituri succesive. Astfel de teste ar permite validarea îmbunătățirilor presupuse în ceea ce privește rezistența la impacturi multiple, atribuite utilizării structurilor de tip fagure din cauciuc. În plus, se impune realizarea unor studii privind durabilitatea pe termen lung. Materialele din cauciuc pot suferi degradări ca urmare a expunerii la radiații UV, temperaturi extreme sau solicitări repetate. Evaluarea modului în care performanța balistică se modifică în urma degradării accelerate în timp a panourilor (prin cicluri termice, expunere la umiditate etc.) sau în urma uzurii mecanice convenționale este esențială pentru aplicabilitatea practică a acestora. Menținerea aderenței între straturi (cauciuc-ceramică, cauciuc-țesătură) pe termen lung este de o importanță critică; cercetările viitoare ar putea analiza utilizarea unor adezivi îmbunătățiți sau chiar aplicarea unor tehnici de vulcanizare pentru fixarea cauciucului pe substraturi ceramice, în scopul prevenirii delaminării în condiții de impact. Totodată, monitorizarea efectelor condițiilor de mediu asupra durtății și elasticității straturilor de cauciuc va contribui la optimizarea proiectării structurilor balistice pentru diverse tipuri de climat și scenarii operaționale.

3. Modelarea numerică avansată pentru simulări predictive. Modelele numerice dezvoltate în cadrul acestei teze pot fi extinse și optimizate în continuare. O direcție de evoluție constă în integrarea unor modele de material mai avansate pentru cauciucuri, cum ar fi modelele viscoelastice sau viscoplastice dependente de viteză, capabile să reproducă mai precis tranziția comportamentului cauciucului către regimuri casante. În mod similar, îmbunătățirea modelării procesului de fisurare pentru materialele ceramice ar permite simularea scenariilor cu impacturi multiple, precum și a interacțiunilor complexe de fragmentare. În ceea ce privește UHMWPE, care a fost modelat în această lucrare utilizând elemente de tip *shell*, în cazul structurilor rigide, cercetările viitoare ar putea beneficia de utilizarea elementelor solide pentru a obține o reprezentare mai realistă și mai detaliată a comportamentului acestui material în condiții variate de solicitare, în special în ceea ce privește numărul straturilor deteriorate.

4. Optimizare structurală și dezvoltarea unor configurații inovatoare de sisteme balistice. Pe baza concluziilor obținute, se pot elabora concepte structurale complet noi pentru sistemele de protecție balistică. O direcție promițătoare constă în investigarea arhitecturilor textile tridimensionale și a structurilor auxetice pentru componenta fibrelor – de exemplu, țesături tridimensionale sau inserții sub formă de rețele auxetice, care, combinate cu straturi de cauciuc, ar putea dispersa energia de impact într-un mod și mai eficient. Instrumentele de optimizare topologică pot fi aplicate în proiectarea plăcilor de tip mozaic sau a geometriei structurii de tip fagure din cauciuc, cu scopul de a îmbunătăți absorbția de energie, menținând totodată o masă redusă.

5. Extinderea în noi domenii de aplicare. Inovațiile propuse în cadrul acestei cercetări au implicații ce depășesc sfera structurilor de protecție individuală. Vehiculele militare și blindajul aeronavelor ar putea beneficia de abordarea stratificată propusă. Cercetările viitoare ar putea testa configurațiile de tip cauciuc-ceramică-fibre împotriva unor amenințări balistice de calibru superior (de exemplu, 7,62 mm perforant sau 12,7 mm), pentru a evalua potențialul de utilizare în protecția vehiculelor. Conceptul utilizării unui strat de cauciuc pentru reținerea fragmentelor poate fi transpus direct în dezvoltarea unor căptușeli interne pentru vehicule blindate. Spre exemplu, aplicarea unui strat compozit cauciuc-fibră, prin lipire pe suprafața interioară a blindajului metalic, ar putea contribui semnificativ la reducerea riscului de rănire al echipajului, prin limitarea propagării fragmentelor rezultate în urma impactului. Această ipoteză reprezintă o direcție promițătoare de cercetare, ce merită investigată în continuare. Un alt domeniu relevant este cel al proiectării căștilor balistice: căștile de luptă moderne ar putea integra un strat ceramic subțire pentru protecția împotriva proiectilelor de mare viteză, completat de un strat de aramidă și un strat de spumă sau cauciuc, destinat reducerii traumei balistice. Rezultatele acestei teze oferă o bază solidă pentru selectarea materialului din cauciuc adecvat în acest scop. În domeniul securității publice, îmbunătățirile demonstrate în fața proiectilelor de calibrul 9 mm sugerează că integrarea unor straturi din cauciuc în vestele antiglonț ar putea permite atingerea standardelor de protecție cu o cantitate redusă de material (și, implicit, o greutate mai mică), ceea ce ar îmbunătăți confortul și ergonomia echipamentului. Testele viitoare ar putea explora și aplicabilitatea cauciucului în structurile anti-înjunghiere, întrucât acesta ar putea contribui la disiparea energiei generate de loviturile cu arme albe.

6. Sisteme inteligente cu adaptare dinamică pentru protecție balistică. Privind la perspectivele pe termen lung, combinarea concluziilor obținute în această cercetare cu tehnologiile emergente deschide direcții promițătoare. Una dintre acestea este integrarea de senzori și sisteme de monitorizare a stării funcționale în structura balistică – de exemplu, inserarea de senzori piezoelectricsi sau componente electronice flexibile în straturile de cauciuc, cu scopul de a detecta impactul sau de a măsura gradul de deformare. Având în vedere capacitatea cauciucului de a se deforma, acesta poate suporta astfel de inserții fără a compromite integritatea structurală. O placă balistică avariata ar putea transmite un semnal utilizatorului sau echipei de mentenanță, indicând necesitatea înlocuirii – un aspect esențial în contextul scenariilor cu impacturi multiple.

7. Investigarea influenței structurilor de tip fagure din cauciuc asupra limitei balistice (V_b). Pornind de la concluziile prezentei teze, cercetările viitoare ar trebui să analizeze modul în care structurile de tip fagure din cauciuc influențează limita balistică în configurațiile balistice rigide. Integrarea structurilor de tip fagure din cauciuc între plăcile ceramice adiacente de tip mozaic, are ca efect creșterea distanței dintre zonele de impact și introducerea unei flexibilități localizate. Aceasta

poate influența inițierea degradării în plăci, propagarea fisurilor și dinamica transferului de energie în cadrul sistemului. Separarea structurală astfel creată poate conduce, în funcție de modul de distribuție și disipare a energiei în interfață și în segmentele ceramice, fie la creșterea, fie la scăderea valorii limitei balistice. Pentru cuantificarea acestor efecte, se impun studii experimentale și numerice detaliate privind influența distanțării plăcilor și a geometriei structurii de tip fagure asupra V_{bl} , cu scopul de a obține o înțelegere aprofundată a localizării degradării, a integrității plăcilor și a comportamentului la impacturi multiple. Rezultatele acestor cercetări ar putea fundamenta strategii optime de proiectare a spațierii și interfețelor, în vederea îmbunătățirii protecției, menținând totodată eficiența din punct de vedere al greutateii și al costurilor.

8. Investigarea influenței dimensiunii celulelor și a grosimii pereților în structurile de tip fagure din cauciuc asupra comportamentului la impact și a capacității de absorbție a energiei. Cercetările viitoare ar trebui să se concentreze asupra modului în care dimensiunea celulelor și grosimea pereților structurilor de tip fagure din cauciuc influențează performanța balistică a configurațiilor balistice rigide. Acești parametri geometrici controlează flexibilitatea locală, comportamentul de disipare a energiei și distribuția tensiunilor în timpul impactului. Celulele de dimensiuni mai mici pot favoriza o dispersie mai eficientă a energiei la interfața cu stratul ceramic, în timp ce pereții mai groși pot conferi o rigiditate sporită și o rezistență mai mare la deformație. Sunt necesare studii experimentale și numerice sistematice pentru a determina configurația optimă a structurii de tip fagure, care să asigure un echilibru între absorbția energiei, eficiența din punct de vedere al greutății și capacitatea de reținere a fragmentelor – în special în condiții de impacturi multiple la viteze ridicate.

În concluzie, prezenta teză de doctorat nu doar că a oferit răspunsuri clare la întrebările de cercetare inițiale privind rolul cauciucului, fibrelor și ceramicii în structurile balistice, ci a deschis totodată noi direcții de cercetare și posibilități concrete de îmbunătățire în ceea ce privește proiectarea, performanța și eficiența economică a sistemelor de protecție balistică. Prin realizarea unui echilibru între rezistența la impact, capacitatea de absorbție a energiei, masa redusă și eficiența costurilor, această cercetare contribuie la dezvoltarea noilor generații de structuri balistice. Rezultatele obținute constituie un fundament solid pentru cercetările viitoare orientate spre dezvoltarea unor sisteme de protecție care să ofere un nivel superior de siguranță, păstrând totodată caracterul ușor și practic necesar utilizării în aplicații militare și civile. Direcțiile de cercetare viitoare recomandate în această lucrare vor sprijini acest demers, asigurând valorificarea continuă a informațiilor dobândite privind mecanismele de absorbție a impactului și interacțiunile dintre materiale, în vederea conceperii unor echipamente de protecție mai eficiente și mai performante.

BIBLIOGRAFIE

1. Rosenberg, Z., Dekel, E. *Terminal Ballistics, 3rd ed.*; Springer Nature Switzerland AG: Cham, Switzerland, 2020.
2. Nauman, S., Cristian, I. *Smart textiles for the protection of armoured vehicles*. In: Chapman, R.A., Ed. *Smart textiles for protection*. Woodhead Publishing Series in Textiles, 2013; pp. 306-337.
3. Naik, N.K. *Ballistic impact behavior of composites: analytical formulation*. In: Silberschmidt, V.V., Ed. *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; 69: 425-470.
4. Yadav, R., Naebe, M., Wang, X., Kandasubramanian, B. *Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems*. RSC Advances, 2016; 6 (116): 115145-115174.
5. Yunanda, W.W., Gunadi, G.I., Kasim, K. *Metal as a Ballistic-Resistant Lightweight Protective Material in the Military Field*. International Journal of Social Science Research and Review, 2022, 5 (12): 287-296.
6. Ranaweera, P., Bambach, M.R., Weerasinghe, D., Mohotti, D. *Ballistic impact response of monolithic steel and tri-metallic steel-titanium-aluminium armour to nonrigid NATO FMJ M80 projectiles*. Thin-Walled Structures, 2023; 182 (Part A): 110200.
7. Jitarășu, O. *Hybrid composite materials for ballistic protection. A numerical analysis*. Review of the Air Force Academy, 2019; 17 (2): 47-56.
8. National Research Council. *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*. Washington, DC: The National Academies Press, 2011.
9. Fras, T., Colard, R., Reck, B. *Modelling of Ballistic Impact of Fragment Simulating Projectiles against Aluminum Plates*. 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, 2015.
10. Frueh, P., Heine, A., Riedel, W., Wickert, M. *Protection Capabilities of HHA and UHA Steels against Long-Rod Kinetic Energy Penetrators*. 30th International Symposium on Ballistics, Long Beach, California, United States of America, 2017.
11. Zhang, Z., Li, H., Wang, L., Zhang, G., Zong, Z. *Formation of Shaped Charge Projectile in Air and Water*. Materials (Basel), 2022; 15 (21): 7848.
12. Salkičević, M. *Numerical simulations of the formation behavior of explosively formed projectiles*. Defense and Security Studies, 2022; 3: 1-14.
13. Sharma, M., Kar, S. *Estimation of Trajectory of High-Speed Artillery Shell*. Defence Science Journal, 2023; 73 (3): 313-321.
14. Sutejo, M.F., Ruyat, Y., Marsono, M. *Ballistics Study of Mortar Weapon Technology*. International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT), 2024; 45 (2): 703-710.

15. Fayed, A.I.H., Abo El Amam Y.A., Elgohary, D.H. *Investigating the Behavior of Manufactured Rocket Propelled Grenade (RPG) Armour Net Screens from Different Types of High Performance Fibers*. International Journal of Science and Research (IJSR), 2019; 8 (5): 2088.
16. Chauhan, R., Copeland, C.C., Murray, M. *Improvised Explosive Devices: Anesthetic Implications*. Current Anesthesiology Reports, 2018; 8: 71–77.
17. Helliker, A. *Ballistic threats: Bullets and fragments*. In: Bhatnagar, A., Ed. *Lightweight Ballistic Composites* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 87–114.
18. Petrudi, A.M., Vahedi, K., Rahmani, M., Petrudi, M.M. *Numerical and analytical simulation of ballistic projectile penetration due to high velocity impact on ceramic target*. Frattura ed Integrità Strutturale, 2020; 54: 239–261.
19. Blumenthal, R., Rossouw, S.H. *Full-Metal Jacket Mild Steel Core Ammunition: A Case Report*. American Journal of Forensic Medicine and Pathology, 2023; 44 (4): e109–e116.
20. Watson, K.E., Henwood, B.J., Hewins, K., Roberts, A., Hazael, R. *Ballistic impact of hollow-point ammunition on porcine bone*. Journal of Forensic Sciences, 2023; 68 (4): 1107–1444.
21. Waghmare, N.P., Gupta, K., Naik, J., Anand, V.R. *Characteristics of Fired Bullet on Different Target Materials*. Journal of Forensic Sciences and Criminal Investigation, 2019; 12 (2): 555833.
22. Piasta, K., Kupidura, P. *Perspective Armour-Piercing Intermediate Cartridge Projectile*. Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, 2023; 14 (1) :89–104.
23. Champion, H.R., Holcomb, J.B., Young, L.A. *Injuries from Explosions: Physics, Biophysics, Pathology, and Required Research Focus*. Journal of Trauma and Acute Care Surgery. 2009; 66 (5): 1468–1477.
24. Bhatnagar, A. *Lightweight Fiber-Reinforced Composites for Ballistic Applications*. In: Beaumont, P.W.R., Zweben, C.H., Eds. *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier Ltd, 2018; pp. 527–544.
25. Kędzierski, P., Morka, A., Stanisławek, S., Surma, Z. *Numerical modeling of the large strain problem in the case of mushrooming projectiles*. International Journal of Impact Engineering. 2020; 135: 103403.
26. Hazell, P.J., Appleby-Thomas, G.J., Philbey, D., Tolman, W. *The effect of gilding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile*. International Journal of Impact Engineering. 2013; 54: 11–18.
27. Di Benedetto, G., Matteis, P., Scavino, G. *Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores*. International Journal of Impact Engineering. 2018; 115: 10–18.
28. Dong, K., Jiang, K., Jiang, C., Wang, H., Tao, L. *Study on Mass Erosion and Surface Temperature during High-Speed Penetration of Concrete by Projectile Considering Heat Conduction and Thermal Softening*. Materials. 2023; 16 (9): 3604.
29. Sun, Q., Sun, Y., Li, R., Deng, G., Hu, J. *The failure and fracture modes of 35CrMnSi steel projectile with simulated charge penetrating rock at about 1000 m/s*. Engineering Failure Analysis. 2019; 97: 617–634.

30. Gomes, G.A. *Designing military uniforms with high-tech materials*. In: Wilusz, E., Ed. Military Textiles. Woodhead Publishing Series in Textiles, 2008; pp. 183–203.
31. Natarajan, V.D. *Materials selection for ballistics*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. Composite Solutions for Ballistics. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 55–76.
32. Cronin, J., Kinsler, R., Allen, J. *Testing of armor systems*. In: Bhatnagar, A., Ed. Lightweight Ballistic Composites (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 311–326.
33. Yahaya, R., Hidayah, N., Norhayaty, Z., Nor Hafizah, M.J., Sapuan, S.M., Iyas R.A. *Levels of ballistic protection and testing*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. Composite Solutions for Ballistics. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 77–108.
34. El Messiry, M. *Protective armor engineering design*. Apple Academic Press, 2019.
35. Quéfélec, B., Dartois, M. *Ceramic-faced molded armor*. In: Bhatnagar, A., Ed. Lightweight Ballistic Composites (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 369–391.
36. **Jitarășu, O.** *NUMERICAL SIMULATION OF BALLISTIC IMPACT PERFORMANCE OF COMPOSITE ARMOUR PLATE BY TYPICAL PROJECTILE*. In: Cioacă, C., Gherman, L., Eds. Military Applications of Modeling and Simulation. Wydawnictwo ASzWoj, Warsaw, 2021; pp. 157–174.
37. **Jitarășu, O.**, Cășeriu, B. *Numerical Analysis of the Ballistic Impact Behavior of 2D Woven Fabrics*. Open Access Library Journal. 2024; 11: e12108.
38. Arora, S., Majumdar, A., Butola, B.S. *Soft armour design by angular stacking of shear thickening fluid impregnated high-performance fabrics for quasi-isotropic ballistic response*. Composite Structures. 2020; 233: 111720.
39. Ralph, C., Baker, L., Archer, E., McIlhagger, A. *Optimization of soft armor: the response of homogenous and hybrid multi-ply para-aramid and ultra-high molecular weight polyethylene fabrics under ballistic impact*. Textile Research Journal. 2023; 93 (23–24): 5168–5186.
40. Zhou, Y., Ma, M., Nur, A., Zhang, R., Xiong, Z., Lin, Y., Xiang, Y., Zhang, Z. *An overview on the ballistic performance of woven-fabric-based flexible protective systems: Experimental and numerical studies*. Thin-Walled Structures. 2024; 205 (Part A): 112394.
41. Naveen, J., Jayakrishna, K., Sultan, M.T.H., Amir, S.M.M. *Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour- A Mini Review*. Frontiers in Materials. 2020; 7: 608139.
42. Chang, C-P., Shih, C-H., You, J-L., Youh, M-J., Liu, Y-M., Ger, M-D. *Preparation and Ballistic Performance of a Multi-Layer Armor System Composed of Kevlar/Polyurea Composites and Shear Thickening Fluid (STF)-Filled Paper Honeycomb Panels*. Polymers. 2021; 13 (18): 3080.
43. Ribeiro, M.P., da Silveira P.H.P.M., de Oliveira Braga, F., Monteiro, S.N. *Fabric Impregnation with Shear Thickening Fluid for Ballistic Armor Polymer Composites: An Updated Overview*. Polymers (Basel). 2022; 14 (20): 4357.

44. Sitotaw, D.B., Ahrendt, D., Kyosev, Y., Kabish, A.K. *A Review on the Performance and Comfort of Stab Protection Armor*. Autex Research Journal. 2021; 22 (1): 96-107.
45. Bhatia, D., Jaswal, P., Sinha, S. *Women's body armor: A comprehensive review of design, performance, and ergonomics*. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2024; 19.
46. Kumar, N. *Bulletproof Vest and Its Improvement – A Review*. International Journal of Scientific Development and Research. 2016; 1 (1): 34-39.
47. da Luz, F.S., Garcia, Filho, F.d.C., Oliveira, M.S., Nascimento, L.F.C., Monteiro, S.N. *Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison*. Polymers. 2020; 12 (9): 1920.
48. Das, S., Prathasana, K., Nitin, P.A., JayaPriya, K.R.L., Mathivanan, V. *Protection from ballistic threats: an exploration of textile materials for bullet-resistant outerwear*. Zastita materijala. 2024.
49. Chen, X. *Introduction*. In: Chen, X., Ed. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 1-10.
50. Mohammed M.N., Al-Zubaidi, S., Bahrain, S.H.K., Sapuan, S.M. *State-of-the-art review on recent advances and perspectives of ballistic composite materials*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. *Composite Solutions for Ballistics*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 3-54.
51. Fonseca, L.C., Peixoto, F., Nichele, J. *Estimation of Ballistic Limit Velocity Using the Finite Element Method*. XXVI Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil. 2023.
52. Nilakantan, G., Nutt, S. *Effects of fabric target shape and size on the V_{50} ballistic impact response of soft body armor*. Composite Structures. 2014; 116: 661-669.
53. Sun, D. *Ballistic performance evaluation of woven fabrics based on experimental and numerical approaches*. In: Chen, X., Ed. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 409-435.
54. Kim, J-H., Baik, S., Fu, J., Park, J-H. *Ballistic limit velocity of small caliber projectiles against SS400 steel plates: Live fire experiments and empirical models*. Defence Technology. 2024; 41: 22-34.
55. Carlucci, D.E., Jacobson, S.S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition, Third Edition*. CRC Press. 2018.
56. National Institute of Justice. *Ballistic Resistance of Body Armor. NIJ Standard 0101.07*. U.S. Department of Justice, Washington, DC. 2023.
57. National Institute of Justice. *Specification for NIJ Ballistic Protection Levels and Associated Test Threats. NIJ Standard 0123.00*. U.S. Department of Justice, Washington, DC. 2023.
58. Home Office. *Body Armour Standard (2017)*. Centre for Applied Science and Technology. 2017.
59. Mrozek, R., Edwards, T., Bain, E., Cole, S., Napadensky, E., Freney, R. *Developing an Alternative to Roma Plastilina #1 as a Ballistic Backing Material for the Ballistic Testing of Body Armor*. In: Kimberley, J., Lamberson, L., Mates, S., Eds. *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1*. Conference

- Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. 2019; pp. 297–299.
60. Zhang, T.G., Graham, M.J., Satapathy, S.S. *Modeling the Rebound of Ballistic Roma Plastilina No. 1 Clay*. DEVCOM Army Research Laboratory. 2022.
 61. Gautam, P.C., Gupta, R., Sharma, A., Singh, M. *Determination of Hugoniot Elastic Limit (HEL) and Equation of State (EOS) of Ceramic Materials in the Pressure Region 20 GPa to 100 GPa*. Procedia Engineering. 2017; 173:198-205.
 62. Cheng, Y., Song, C., Tan, Y., Yue, S., Li, G., Qiu, Y., Xu, T., Liu, Y., Gao, F., Yu, Q. *Theoretical Calculation Method for the Hugoniot Elastic Limit of Hard Rock Based on Ideal Elastoplastic Model*. Shock and Vibration. 2021; 4: 1-8.
 63. Shevchenko, V.Y., Oryshchenko, A.S., Lepin, V.N. et al. *Measurement of the Hugoniot Elastic Limit in Ideal Ceramics*. Glass Physics and Chemistry. 2023; 49 (Suppl 1): S1–S7.
 64. da Silveira, P.H.P.M., da Silva, T.T., Ribeiro, M.P., de Jesus, P.R.R., Gomes, A.V., *A Brief Review of Alumina, Silicon Carbide and Boron Carbide Ceramic Materials for Ballistic Applications*. Academia Letters. 2021; pp. 1-11.
 65. Aprilya, S., Aritonang, S. *Comparison of Al_2O_3 , SiC, and B_4C as Ballistic-Resistant Body Armor*. International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT). 2024; 42: 413-418.
 66. Boldin, M.S., Berendeev, N.N., Melekhin, N.V., Popov, A.A., Nokhrin, A.V., Chuvildeev, V.N. *Review of ballistic performance of alumina: Comparison of alumina with silicon carbide and boron carbide*. Ceramics International. 2021; 47 (18): 25201-25213.
 67. Rashid, M.T., Aleem, A., Akbar, S., Rauf, A., Shuaib, M. *Numerical simulation of armor capability of Al_2O_3 and SiC armor tiles*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016; 146 (1): 012049.
 68. Crouch, I.G., Franks, G.V., Tallon, C., Thomas, S., Naebe, M. *Glasses and ceramics*. In: Crouch, I.G., Ed. The Science of Armour Materials. Woodhead Publishing in Materials. 2017; pp. 331-393.
 69. Gallo, L., Boas, M.O.C.V., Rodrigues, A.C.M., Melo, F.C.L., Zanutto, E.D. *Transparent glass–ceramics for ballistic protection: materials and challenges*. Journal of Materials Research and Technology. 2019; 8 (3): 3357-3372.
 70. Dresch, A.B., Venturini, J., Arcaro, S., Montedo, O.R.K., Bergmann, C.P. *Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review*. Ceramics International. 2021; 47 (7) Part A: 8743-8761.
 71. Stupar, S. *Ballistic composites, the present and the future*. In: Mhadhbi, M., Ed. Smart and Advanced Ceramic Materials and Applications. IntechOpen. 2022; pp. 33-50.
 72. Andraskar, N.D., Tiwari, G., Goel, M.D. *Impact response of ceramic structures – A review*. Ceramics International. 2022; 48 (19 Part A): 27262-27279.
 73. Lv, X., Yin, Z., Yang, Z., Chen, J., Zhang, S., Song, S., Yu, G. *Review on the Development of Titanium Diboride Ceramics*. Recent Progress in Materials. 2024; 06 (02): 1-48.

74. Nadda, J. *Influence of Boundary Conditions on Ceramic/Metal Plates under Ballistic Loads*. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2015; 7 (3): 97-101.
75. Fejdyś, M., Kośła, K., Kucharska-Jastrzębek, A., Landwijt, M. *Hybride Composite Armour Systems with Advanced Ceramics and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Fibres*. Fibres and Textiles in Eastern Europe. 2016; 24(3):79-89.
76. Jiang, A., Li, Y., Li, D., Hou, H. *Study on Anti-Penetration Performance of Semi-Cylindrical Ceramic Composite Armor against 12.7 mm API Projectile*. Crystals, 2022; 12 (10): 1343.
77. Wu, H.L., Miao, C., Mu, X.M., Cui, X.Z., Yang, Z.Z., Lu, R.J., Dang, W., Bai, L.H., Wu, X. *Study on ballistic performance of a spherical cylindrical ceramic armor structure*. Journal of Physics: Conference Series, 2023; 2478: 072010.
78. Acar, E., Çelikbaş, D. *Effect of sphere radius and bullet hitting location on the ballistic performance of alumina ceramic tile*. Procedia Structural Integrity. 2022; 35: 269-278.
79. Hu, P., Zhao, F., Yang, H., Cheng, Y., Liu, J., Zhang, P. *The effect of ceramic column shape on the ballistic performance of the SiC/UHMWPE composite armor-Numerical simulation*. Journal of Physics: Conference Series, 2023; 2478: 112007.
80. Wang, J.H., Shi, X.M., Wang, Q., Xia, X., Fang, X.Z., Zeng, T., Zhang, L.J., Ye, C.J. *Study on ballistic performance of metal matrix ceramic ball composite*. Journal of Physics: Conference Series, 2023; 2478: 112005.
81. Jitaraşu, O. *Numerical investigation on the impact of various construction designs of ceramic mosaic armour on ballistic resistance*. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 2024; 86 (4): 181-196.
82. Zhang, R., Han, B., Lu, T.J. *Confinement effects on compressive and ballistic performance of ceramics: a review*. International Materials Reviews. 2021; 66 (5): 287-312.
83. Zhao, Z-N., Han, B., Li, F-H., Zhang, R., Su, P-B., Yang, M., Zhang, Q., Zhang, Q-C., Lu, T-J. *Enhanced bi-layer mosaic armor: experiments and simulation*. Ceramics International. 2020; 15 (46): 23854-23866.
84. Guodong, G., Shah, A., Larry, D.P. *Numerical Analysis of Ceramic Mosaic Armor Subjected to Ballistic Impact*. International Journal of Composite Materials. 2021; 11 (1): 5-12.
85. Alam, S., Aboagye, P. *Numerical Modeling on Ballistic Impact Analysis of the Segmented Sandwich Composite Armor System*. Applied Mechanics 2024; 5: 340-361.
86. Si, P., Liu, Y., Yan, J., Bai, F., Huang, F. *Ballistic Performance of Polyurea-Reinforced Ceramic/Metal Armor Subjected to Projectile Impact*. Materials. 2022; 15: 3918.
87. Jitaraşu, O., Lache, S. *Ballistic performance of monolithic rubber-ceramic composite armor*. Journal of Composite Materials. 2024; 58 (5): 689-706.
88. Usman, J., Othman, M.H.D., Ismail, A.F., Rahman, M.A., Jaafar, J., Raji, Y.O., Gbadamosi, A.O., El Badawy, T.H., Said, K.A.M. *An overview of superhydrophobic ceramic membrane surface modification for oil-water separation*. 2021; 12: 643-667.

89. Pico, D., Steinmann, W. *Synthetic Fibres for Composite Applications*. In: Rana, S., Figueiro, R., Eds. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications. Textile Science and Clothing Technology. Springer, Singapore, 2016; pp. 135–170.
90. Crouch, I.G., Arnold, L., Pierlot, A., Billon, H. *Fibres, textiles and protective apparel*. In: Crouch, I.G., Ed. The Science of Armour Materials. Woodhead Publishing in Materials. 2017; pp. 269-330.
91. Sugimoto, Y., Irisawa, T., Hatori, H., Inagaki, M. *Yarns of carbon nanotubes and reduced graphene oxides*. Carbon; 2020; 165: 358-377.
92. Tam, T., Bhatnagar, A. *High-performance ballistic fibers and tapes*. In: Bhatnagar, A., Ed. Lightweight Ballistic Composites (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 1-39.
93. Sun, H., Kong, H., Ding, H., Xu, Q., Zeng, J., Jiang, F., Yu, M., Zhang, Y. Improving UV Resistance of Aramid Fibers by Simultaneously Synthesizing TiO₂ on *Their Surfaces and in the Interfaces Between Fibrils/Microfibrils Using Supercritical Carbon Dioxide*. Polymers; 2020, 12 (1): 147.
94. Dixit, D., Pal, R., Kapoor, G., Stabenau, M. *Lightweight composite materials processing*. In: Bhatnagar, A., Ed. Lightweight Ballistic Composites (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 157-216.
95. da Silva, L.F., Lavoratti, A., Pereira, I.M., Dias, R.R., Amico, S.C., Zattera, A.J. *Development of multilaminar composites for vehicular ballistic protection using ultra-high molecular weight polyethylene laminates and aramid fabrics*. Journal of Composite Materials. 2018; 53 (14): 1907-1916.
96. Bucur, F., Rotariu, A., Matache, L-C., Baciuc, F., Jiga, G., Trană, E. *Experimental and Numerical Study on the Behavior of Dyneema® HB26 Composite in Compression*. Materiale Plastice. 2020; 57 (2): 113-122.
97. Saleem, I.A., Ahmed, P.S., Abed, M. *Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact*. Materials Today: Proceedings. 2022; 56 (5): 2516-2524
98. Weerasinghe, D., Breen, S., Wang, H., Mohotti, D., Hazell, P.J., Escobedo-Diaz, J.P. *Impact resistance and yarn pull-out behaviour of polymer spray-coated UHMWPE fabrics*. Materials Today Communications. 2022; 33: 104473.
99. Wu, Y., Lu, W., Yu, Y., Ma, M., Ren, W., Xu, L., Gao, G. *Dynamic response mechanisms of thin UHMWPE under high-speed impact*. Thin-Walled Structures. 2024; 205, Part A: 112391.
100. Crouch, I.G., Sandlin, J., Thomas, S. *Polymers and fibre-reinforced plastics*. In: Crouch, I.G., Ed. The Science of Armour Materials. Woodhead Publishing in Materials. 2017; pp. 203-268.
101. Balasubramanian, M. *Introduction to Composite Materials*. In: Rana, S., Figueiro, R., Eds. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications. Textile Science and Clothing Technology. Springer, Singapore, 2016; pp. 1–38.

102. Bhatnagar, N., Asija, N. *Durability of high-performance ballistic composites*. In: Bhatnagar, A., Ed. *Lightweight Ballistic Composites* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 231-283.
103. Naik, N.K. *Analysis of woven fabric composites for ballistic protection*. In: Chen, X., Ed. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 217-262.
104. Webster, G.A.T. *Nonwoven and crossplied ballistic materials*. In: Bhatnagar, A., Ed. *Lightweight Ballistic Composites* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 55-85.
105. Carr, D.J., Crawford, C. *High performance fabrics and 3D materials*. In: Bhatnagar, A., Ed. *Lightweight Ballistic Composites* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 41-53.
106. Fu, H-D., Feng, X-Y., Liu, J-X., Yang, Z-M., He, C., Li, S-K. *An investigation on anti-impact and penetration performance of basalt fiber composites with different weave and lay-up modes*. *Defence Technology*. 2020; 16 (4): 787-801.
107. Hu, P., Ge, S., Dou, S., Lv, Z., Li, M., Zhao, Z., Zhang, P., Wang, J., Sun, Z.M. *Ultralight M5 Aerogels with Superior Thermal Stability and Inherent Flame Retardancy*. *Chemistry and Sustainability*. 2024; 18 (3): e202401062.
108. Sun, B., Yu, J. *High-Performance Composites and Their Applications*. In: Yang, Y., Yu, J., Xu, H., Sun, B., Eds. *Porous lightweight composites reinforced with fibrous structures*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017; pp. 341-368.
109. Singh, N., Kumar, P. *Polybenzimidazole Fiber (PBI): Synthetic Fibre from Benzimidazole*. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. 2020; 8 (1): 742-744.
110. Zhou, H., Jia, B., Huang, H., Mou, Y. *Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete*. *Materials*. 2020; 13 (6): 1362.
111. Rani, M., Sehrawat, M., Sharma, S., Bharadwaj, S., Chauhan, G.S., Dhakate, S.R., Singh, B.P. *Carbon nanotube-based soft body armor: Advancements, integration strategies, and future prospects*. *Diamond and Related Materials*. 2024; 148: 111446.
112. Ameer H., Ahmad, S., Nawab, Y., Ali, Z., Ullah, T. *Natural fiber-reinforced composites for ballistic protection*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. *Composite Solutions for Ballistics*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 229-248.
113. Braga, F.O., Bolzan, L.T., Ramos, F.J.H.T.V., Monteiro, S.N., Lima, E.P., da Silva, L.C. *Ballistic Efficiency of Multilayered Armor Systems with Sisal Fiber Polyester Composites*. *Materials Research*. 2017; 20 (Suppl. 2): 767-774.
114. Ribeiro, M.P., Neuba, L.M., da Silveira, P.H.P.M., da Luz, F.S., Figueiredo, A.B-H.S., Monteiro, S.N., Moreira, M.O. *Mechanical, thermal and ballistic performance of epoxy composites reinforced with Cannabis sativa hemp fabric*. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021; 12: 221-233.

115. Reis, R.H.M., Nunes, L.F., da Luz, F.S., Candido, V.S., da Silva, A.C.R., Monteiro, S.N. *Ballistic Performance of Guaruman Fiber Composites in Multilayered Armor System and as Single Target*. Polymers. 2021; 13 (8): 1203.
116. Abhilash, R.M., Venkatesh, G.S., Chauhan, S.S. *Development of bamboo polymer composites with improved impact resistance*. Polymers and Polymer Composites. 2021; 29 (9_suppl): S464-S474.
117. Bharathi, V.S., Vinodhkumar, S., Saravanan, M.M. *Strength characteristics of banana and sisal fiber reinforced composites*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021; 1055: 012024.
118. Nurazzi, N.M., Asyraf, M.R.M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H.A., Rafiqah, S.A., Sabaruddin, F.A., Kamarudin, S.H., Norrrahim, M.N.F., Ilyas, R.A., Sapuan, S.M. *A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications*. Polymers. 2021; 13 (4): 646.
119. Azevedo, A.R.G., Lima, T.E.S., Reis, R.H.M., Oliveira, M.S., Candido, V.S., Monteiro, S.N. *Guaruman fiber: A promising reinforcement for cement-based mortars*. Case Studies in Construction Materials. 2022; 16: e01029.
120. Bergmann, F., Stadlmayr, S., Millesi, F., Zeitlinger, M., Naghilou, A., Radtke, C. *The properties of native Trichonephila dragline silk and its biomedical applications*. Biomaterials Advances. 2022; 140: 213089.
121. Gao, X., Zhu, D., Fan, S., Rahman, M.Z., Guo, S., Chen, F. *Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: a review*. Journal of Materials Research and Technology. 2022; 19: 1162-1190.
122. Fei, T. *High-performance fibers for textiles*. In: Miao, M., Xin, J.H., Eds. Engineering of High-Performance Textiles. The Textile Institute Book Series. Woodhead Publishing, 2018; pp. 27-58.
123. Wang, Z., Sangroniz, L., Xu, J., Zhu, C., Müller, A. *Polymer Physics behind the Gel-Spinning of UHMWPE Fibers*. Macromolecular Rapid Communications. 2024; 45 (15): 2400124.
124. Bilisik, K., Karaduman, N.S., Bilisik, N.E. *Fiber Architectures for Composite Applications*. In: Rana, S., Figueiro, R., Eds. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications. Textile Science and Clothing Technology. Springer, Singapore, 2016; pp. 75-134.
125. Bastovansky, R., Smetanka, L., Kohar, R., Mishra, R.K., Petru, M. *Comparison of Mechanical Property Simulations with Results of Limited Flexural Tests of Different Multi-Layer Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites*. Polymers. 2024; 16 (11): 1588.
126. Zhou, Y., Yao, W., Zhang, Z., Lin, Y., Xiong, Z., Zhao, Y., Wang, M. *Ballistic performance of the structure-modified plain weaves with the improved constraint on yarn mobility: Experimental investigation*. Composite Structures. 2022; 280: 114913.
127. Zhang, D., Gu, Y., Zhang, Z., Jia, M., Yue, S., Li, G. *Effect of off-axis angle on low-velocity impact and compression after impact damage mechanisms of 3D woven composites*. Materials & Design. 2020; 192: 108672.

128. Chen, X., Chu, Y. / *Failure mechanisms and engineering of ballistic materials*. In: Chen, X., Ed. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 263-304.
129. Boussu, F., Provost, B., Lefebvre, M., Coutellier, D. *New Textile Composite Solutions for Armouring of Vehicles*. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019; 2019: 1-14.
130. Wu, Z., Zhang, L., Ying, Z., Ke, J., Hu, X. *Low-velocity impact performance of hybrid 3D carbon/glass woven orthogonal composite: Experiment and simulation*. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 196: 108098.
131. Wei, Q., Yang, D., Gu, B., Sun, B. *Numerical and experimental investigation on 3D angle interlock woven fabric under ballistic impact*. *Composite Structures*. 2021; 266: 113778.
132. Kazemianfar, B., Nami, M.R. *Influence of oblique low velocity impact on damage behavior of 2D and 3D woven composites: Experimental and numerical methods*. *Thin-Walled Structures*. 2021; 167: 108253.
133. Kazemianfar, B., Nami, M.R. *Can a 3D woven GFRP composite really provide better impact resistance compared to a 2D woven GFRP composite at all of the thicknesses?* *Structures*. 2022; 35 (3): 36-45.
134. Zhang, R., Han, B., Zhong, J-Y., Qiang, L-S., Ni, C-Y., Zhang, Q., Zhang, Q-C., Li, B-C., Lu, T.J. *Enhanced ballistic resistance of multilayered cross-ply UHMWPE laminated plates*. *International Journal of Impact Engineering*. 2022; 159: 104035.
135. Zhang, R., Qiang, L-S., Han, B., Zhao, Z-Y., Zhang, Q-C., Ni, C-Y., Lu, T.J. *Ballistic performance of UHMWPE laminated plates and UHMWPE encapsulated aluminum structures: Numerical simulation*. *Composite Structures*. 2020; 252: 112686.
136. Zhao, Z-N., Han, B., Zhang, R., Zhang, Q., Zhang, Q-C., Ni, C-Y., Lu, T.J. *Enhancement of UHMWPE encapsulation on the ballistic performance of bi-layer mosaic armors*. *Composites Part B: Engineering*. 2021; 221: 109023.
137. Wu, Y., Lu, W., Yu, Y., Ma, M., Gao, G. *The energy absorption characteristics and structural optimization of titanium/UHMWPE fiber metal laminates under high-speed impact*. *International Journal of Impact Engineering*. 2025; 195: 105097.
138. Cao, M., Chen, Li., Xu, R., Fang, Q. *Effect of the temperature on ballistic performance of UHMWPE laminate with limited thickness*. *Composite Structures*. 2021; 277: 114638.
139. Chen, L., Cao, M., Fang, Q. *Ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene laminate with different thickness*. *International Journal of Impact Engineering*. 2021; 156: 103931.
140. Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B.S., Arora, S., Bhattacharjee, D. *Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels*. *Composite Structures*. 2021; 255: 112941.
141. Patnaik, P.K., Swain, P.T.R., Mishra, S.K., Purohit, A., Biswas, S. *Recent developments on characterization of needle-punched nonwoven fabric reinforced polymer composites – A review*. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 26 (2): 466-470.

142. Martínez-Hergueta, F., Ridruejo, A., González, C., Llorca, J. *Ballistic performance of hybrid nonwoven/woven polyethylene fabric shields*. International Journal of Impact Engineering. 2018; 111: 55-65.
143. Zhou, Y., Ding, S., Zhang, Z., Li, H., Lin, Y., Sun, M., Wang, M. *The Ballistic responses of thread-quilted plain weaves with increased yarn–yarn friction*. Thin-Walled Structures. 2022; 171: 108762.
144. Zhou, Y., Ding, S., Zhang, Z.W., Xiong, Z., Sun, J., Liu, X. *The responses of stitched ultra-high-molecular-weight polyethylene woven fabrics upon ballistic impact*. Journal of Industrial Textiles. 2022; 51 (5_suppl): 8764S-8787S.
145. Khan, M.I., Umair, M., Nawab, Y. *Use of auxetic material for impact/ballistic applications*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. Composite Solutions for Ballistics. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 199-228.
146. Nguyễn, H., Figueiro, R., Ferreira, F., Nguyễn, Q. *Auxetic materials and structures for potential defense applications: An overview and recent developments*. Textile Research Journal. 2023; 93 (23-24): 5268-5306.
147. Shah, I.A., Khan, R., Koloor, S.S.R., Petrú, M., Badshah, S., Ahmad, S., Amjad, M. *Finite Element Analysis of the Ballistic Impact on Auxetic Sandwich Composite Human Body Armor*. Materials. 2022; 15 (6): 2064.
148. Vo, D.M.P., Hoffmann, G., Cherif, C. *Novel Weaving Technology for the Manufacture of 2D Net Shape Fabrics for Cost Effective Textile Reinforced Composites*. Autex Research Journal. 2018; 18 (3): 251-257.
149. Memon, S.I., Peerzada, M.H., Jhatial, R.A., Fahad, R. *Modification of 2D Conventional Weaving Machine for the Fabrication of High Performance Woven Preforms: Part-I: Design and Manufacturing of Warp Creel*. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology. 2020; 39 (1): 205-212.
150. Perera, Y.S., Muwanwella, R.M.H.W., Fernando, P.R. Fernando, S.K., Jayawardana, T.S.S. *Evolution of 3D weaving and 3D woven fabric structures*. Fashion and Textiles. 2021; 8:11.
151. Chen, X. *Design and Manufacture of 3D Woven Textiles*. In: Kyosev, Y., Boussu, F., Eds. Advanced Weaving Technology. Springer Nature Switzerland AG. 2022; pp. 449–474.
152. Liu, Y., Pan, Z., Yu, J. Hong, X., Ying, Z., Wu, Z. *Numerical simulation of 3D angle-interlock woven fabric forming and compression processes*. International Journal of Material Forming. 2024; 17: 24.
153. Guo, W., Chang, H., Ni, J., Zhu, K., Gao, B., Yang, D., Gao, Y.T. *Low-velocity impact performance of ultra-high molecular weight polyethylene/aramid-polyester core-spun yarn hybrid composites*. Journal of Industrial Textiles. 2023; 53: 152808372311540.
154. Venkataraman, D., Shabani, E., Park, J.H. *Advancement of Nonwoven Fabrics in Personal Protective Equipment*. Materials. 2023; 16 (11): 3964.

155. Singha, K., Maity, S., Pandit, P., Mondal, M.I.H. *Introduction to protective textiles*. In: Mondal, M.I.H., Ed. The Textile Institute Book Series. Protective Textiles from Natural Resources. Woodhead Publishing. 2022; pp. 3–38.
156. Abtew, M.A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., Cristian, I. *Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses*. Composite Structures. 2019; 223: 110966.
157. Cunniff, P. *Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems*. Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, 1999; pp. 1303–1310.
158. Haris, A., Tan, V.B.C. *Effects of spacing and ply blocking on the ballistic resistance of UHMWPE laminates*. International Journal of Impact Engineering. 2021; 151: 103824.
159. May, B., Critchley, R., Carr, D., Peare, A., Downen, K. *Ballistic protective properties of material representative of English civil war buff-coats and clothing*. International Journal of Legal Medicine. 2020; 134: 1949–1956.
160. Jiang, Y., Peng, K., Wang, Y., Xie, J., Lu, X., Zhang, P., Fu, Y. *Optimizing core yarn twist levels for enhanced mechanical properties of aramid-wrapped yarns and fabrics*. Journal of Industrial Textiles. 2025; 55.
161. Gong, R.H., *Yarn to Fabric: Specialist Fabric Structures*. In: Sinclair, R. Ed. Textiles and Fashion. Materials, Design and Technology. Woodhead Publishing Series in Textiles. 2015; pp. 337–354.
162. Peinado, J., Wang, L.J., Olmedo, A., Santiuste, C. *Influence Of Stacking Sequence On The Impact Behaviour Of Uhmwpe Soft Armor Panels*. Composite Structures. 2022; 286 (10): 115365.
163. Petyukov, A.V., Bobrova, A.I., Grishin, I.R. Ivanov, D.A., Sotskii, M.Y. *PHYSICOMATHEMATICAL MODELING OF PROJECTILE PENETRATION INTO FLEXIBLE FABRIC TARGETS*. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2024; 65: 543–553.
164. Ingle, S., Yerramalli, C.S., Guha, A., Mishra, S. *Effect of material properties on ballistic energy absorption of woven fabrics subjected to different levels of inter-yarn friction*. Composite Structures. 2021; 266: 113824.
165. Steinke, K., Sodano, H.A. *Improved inter-yarn friction and ballistic impact performance of zinc oxide nanowire coated ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE)*. Polymer. 2021; 231: 124125.
166. Hasan-Nezhad, H., Yazdani, M., Jeddi, M. *High- and low-velocity impact experiments on treated STF/3D glass fabrics*. Thin-Walled Structures. 2022; 171: 108720.
167. Mishra, V.D., Mishra, A., Singh, A., Verma, L., Rajesh, G. *Ballistic impact performance of UHMWP fabric impregnated with shear thickening fluid nanocomposite*. Composite Structures. 2022; 281: 114991.
168. Tang, F., Dong, C., Yang, Z., Kang, Y., Huang, X., Li, M., Chen, Y., Cao, W., Huang, C., Guo, Y., Wei, Y. *Protective performance and dynamic behavior of composite body armor with shear stiffening gel as buffer material under ballistic impact*. Composites Science and Technology. 2022; 218: 109190.

169. Xu, Y.J., Zhang, H., Huang, G.Y. *Ballistic performance of B4C/STF/Twaron composite fabric*. Composite Structures. 2022; 279: 114754.
170. Khodadadi, A., Liaghat, G., Taherzadeh-Fard, A., Shahgholian-Ghahfarokhi, D. *Impact characteristics of soft composites using shear thickening fluid and natural rubber—A review of current status*. Composite Structures. 2021; 271: 114092.
171. Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B.S. *A review on current status and development possibilities of soft armour panel assembly*. Journal of Materials Science. 2023; 58: 14997–15020.
172. Weerasinghe, D., Bambach, M.R., Mohotti, D., Wang, H., Jiang, S. Hazell, P.J., Escobedo-Diaz, J.P. *Development of a Coated Fabric Armour System of Aramid Fibre and Rubber*. Thin-Walled Structures. 2022; 179: 109679.
173. Yang, Y., Ling, T., Liu, Y., Xue, S. *Synergistic effect of hybrid ballistic soft armour panels*. Composite Structures. 2021; 272: 114211.
174. Chen, X., Zhou, Y., Wells, G. *Numerical and experimental investigations into ballistic performance of hybrid fabric panels*. Composites Part B: Engineering. 2014; 58: 35–42.
175. Wang, C., Su, D., Xie, Z., Zhang, K., Wu, N., Han, M., Zhou, M. *Low-velocity impact response of 3D woven hybrid epoxy composites with carbon and heterocyclic aramid fibres*. Polymer Testing. 2021; 101: 107314.
176. Bao, J-W., Wang, Y-W., An, R., Cheng, H-W., Wang, F-C. *Investigation of the mechanical and ballistic properties of hybrid carbon/ aramid woven laminates*. Defence Technology. 2022; 18 (10): 1822–1833.
177. Wu, S., Xu, Z., Hu, C., Zou, X., He, X. *Numerical simulation study of ballistic performance of Al2O3/aramid-carbon hybrid FRP laminate composite structures subject to impact loading*. Ceramics International. 2022; 48 (5): 6423–6435.
178. Shaker, K. *Mechanical characterization*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. Composite Solutions for Ballistics. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 269–298.
179. Demircioglu, T.K., Balikoglu, F., Beyaz, S., Bülbül, B. *Effect of lead metaborate as novel nanofiller on the ballistic impact behavior of Twaron® /epoxy composites*. Composites Communications. 2021; 27: 100832.
180. Sukanya, N.M., Sundaram, S.K. *Ballistic behaviour of nanosilica and rubber reinforced kevlar/epoxy composite targets*. Engineering Failure Analysis. 2022; 142: 106845.
181. Jen, Y-M., Chen, Y-J., Yu, T-H. *Improving the Impact Resistance and Post-Impact Tensile Fatigue Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites by Embedding the Carbon Nanoparticles in Matrix*. Polymers. 2024; 16 (24): 3589.
182. Wang, B., Tian, W., Wang, C., Wang, Q. *Research on Interlayer Toughening and Damage Detection of Laser-Induced Graphene and Short Kevlar Fibers Aramid Fiber/Epoxy Resin Composites*. Polymers. 2024; 16 (23): 3380.

183. Costa, U.O., Filho, F.C.G., Gómez-del Río, T., Rodrigues, J.G.P., Simonassi, N.T., Monteiro, S.N., Nascimento, L.F.C. *Mechanical Properties Optimization of Hybrid Aramid and Jute Fabrics-Reinforced Graphene Nanoplatelets in Functionalized HDPE Matrix Nanocomposites*. *Polymers*. 2023; 15 (11): 2460.
184. da Cunha, J.S.C., Nascimento, L.F.C., Costa, U.O., Bezerra, W.B.A., Oliveira, M.S., Marques, M.F.V., Soares, A.P.S., Monteiro S.N. *Ballistic Behavior of Epoxy Composites Reinforced with Amazon Titica Vine Fibers (*Heteropsis flexuosa*) in Multilayered Armor System and as Stand-Alone Target*. *Polymers*. 2023; 15 (17): 3550.
185. Meliande, N.M., Oliveira, M.S., Lemos, M.F., Pereira, A.C., Figueiredo, A.B.-H.S., Monteiro, S.N., Nascimento, L.F.C. *Thermal Behavior of Curaua-Aramid Hybrid Laminated Composites for Ballistic Helmet*. *Polymers*. 2023; 15 (15): 3214.
186. Jiao-Wang, L., Charca, S., Valverde, B., Loya, J. A., Santiuste, C. *Experimental Analysis of Hybrid Panels Combining Flax/PLA Composite with UHMWPE and Steel Under Ballistic Impact*. *Journal of Natural Fibers*. 2024; 22(1): 2445574.
187. Marchi, B.Z., Silveira, P.H.P.M., Bezerra, W.B.A., Nascimento, L.F.C., Lopes, F.P.D., Candido, V.S., Silva, A.C.R., Monteiro, S.N. *Ballistic Performance, Thermal and Chemical Characterization of Ubim Fiber (*Geonoma baculifera*) Reinforced Epoxy Matrix Composites*. *Polymers*. 2023; 15 (15): 3220.
188. Chaves, Y.S., Monteiro, S.N., Nascimento, L.F.C., Rio, T.G. *Mechanical and Ballistic Properties of Epoxy Composites Reinforced with Babassu Fibers (*Attalea speciosa*)*. *Polymers*. 2024; 16 (7): 913.
189. Ghiaskar, A., Nouri, M.D. *High-velocity impact behavior of lignin/NR/hemp green composite: a comparative study*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022; 44: 413.
190. Ghiaskar, A., Nouri, M.D. *A novel flexible biocomposite with hemp woven fabric and natural rubber based on lignin green filler: investigation numerical and experimental under high-velocity impact*. *Physica Scripta*. 2023; 98: 105307.
191. Kumar, T.S.M., Joladarashi, S., Kulkarni, S.M. Doddamani, S. *Optimization of process parameters for ballistic impact response of hybrid sandwich composites*. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023; 17: 1099-1111.
192. Mardiyati, Y., Putra, D.A., Fauziah, L., Rachman, O.A., Hariyanto, A., Steven, S. *Development of sansevieria trifasciata/natural rubber composites for a soft body armor application*. *Composites Part C: Open Access*. 2023; 12: 100407.
193. Gowda, D., Bhat, R.S. *Bio-inspired helicoidal hemp/basalt/polyurethane rubber bio-composites: Experimental, numerical and analytical ballistic impact study with residual velocity prediction using artificial neural network*. *Industrial Crops and Products*. 2024; 222 (Part 2): 119600.
194. Mahesh, V. *Conceptual design on optimal thickness selection of natural compliant composite for ballistic protection*. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024; 18: 1949–1954.
195. Francesconi, L., Aymerich, F., *Effect of Z-pinning on the impact resistance of composite laminates with different layups*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018; 114: 136-148.

196. Behrooz, Z., Nosrati, H., Tehrani, M. *High velocity impact properties of composites reinforced by stitched and unstitched glass woven fabrics*. Journal of Industrial Textiles. 2022; 51 (3_suppl): 4540S-4553S.
197. Muñoz, R., Martínez-Hergueta, F., Gálvez, F., González, C., Llorca, J. *Ballistic performance of hybrid 3D woven composites: Experiments and simulations*. Composite Structures. 2015; 127: 141-151.
198. Chen, F., Peng, Y., Chen, X., Wang, K., Liu, Z., Chen, C. *Investigation of the Ballistic Performance of GFRP Laminate under 150 m/s High-Velocity Impact: Simulation and Experiment*. Polymers. 2021; 13 (4): 604.
199. Key, C.T., Alexander, C.S., *Experimental Testing and Numerical Modeling of Ballistic Impact on S-2 Glass/SC15 Composites*. Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2018; 4: 373-386.
200. Malikov, A., Golyshev, A. *Investigation of the Resistance to High-Speed Impact Loads of a Heterogeneous Materials Reinforced with Silicon Carbide Fibers and Powder*. Materials. 2023; 16 (2): 783.
201. Peng, L., Tan, M.T., Zhang, X., Han, G., Xiong, W., Al Teneiji, M., Guan, Z.W. *Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures*. Composite Structures. 2022; 282: 115019.
202. Scazzosi, R., Souza, S.D.B., Amico, S.C., Giglio, M., Manes, A. *Experimental and numerical evaluation of the perforation resistance of multi-layered alumina/aramid fiber ballistic shield impacted by an armor piercing projectile*. Composites Part B: Engineering. 2022; 230: 109488.
203. Shi, Y., Pinna, C., Soutis, C. *Low-velocity impact of composite laminates: damage evolution*. In: Silberschmidt, V.V. Ed. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; 69: 117-146.
204. Bhat, A., Naveen, J., Jawaid, M., Norrrahim, M.N.F., Rashedi, A., Khan, A. *Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armoursystems for ballistic applications – A review*. Journal of Materials Research and Technology. 2021; 15: 1300-1317.
205. Minak, G., Fotouhi, M., Ahmadi, M. *Low-velocity impact on laminates*. In: Silberschmidt, V.V. Ed. Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; 69: 147-165.
206. Pasquali, M., Gaudenzi, P. *Effects of curvature on high-velocity impact resistance of thin woven fabric composite targets*. Composite Structures. 2017; 160: 349-365.
207. Tiwari, G., Khaire, N. *Ballistic performance and energy dissipation characteristics of cylindrical honeycomb sandwich structure*. International Journal of Impact Engineering. 2022; 160: 104065.
208. Wu, C., Zhao, P., Chang, Z., Li, L., Zhang, D. *An experimental and numerical investigation of ballistic penetration behaviors of deployable composite shells*. Acta Astronautica. 2024; 224: 533-545.
209. Jabbar, M., Nasreen, A. *Composite fabrication and joining*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. Composite Solutions for Ballistics. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 177-197.

210. Shen, Y., Wang, Y., Du, S., Yang, Z., Cheng, H., Wang, F. *Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors*. Journal of Materials Research and Technology. 2021; 13: 1496-1508.
211. Başer, T.T., Karataş, Ç., Karadağlı, E., Toksoy, A.K. *Investigation of the effect of adhesive type for ballistic armor applications*. International Journal of Protective Structures. 2024; 0 (0).
212. Alil, L.C., Barbu, C., *Materials used in ballistic protection - the current stage and trends*. Impact of Socio-economic and Technological Transformations at National, European and International Level (ISETT), Institute for World Economy, Romanian Academy. 2015; 8.
213. Alil, L.C. *Theoretical Study on Adhesives Used in Ballistic Protection Structures and Transparent Armor*. Scientific Bulletin. 2015; 20 (1): 86-91.
214. Thakur, N., Bharj, R.S., Kumar, P. *Effect of Type of Adhesive Material on the Strength of Bullet-Proof Glass: A Parametric Study*. Asian Review of Mechanical Engineering. 2019; 8 (1): 8-10.
215. İbiş, M.Ö., Kahraman, Y., Genel, K. *Effect of adhesive on ballistic performance of multi-layered steel*. International Journal of Impact Engineering. 2023; 176: 104559.
216. Jull, E.I.L., Dekker, R., Amaral, L. *Impact of adhesive layer properties on ceramic multi-layered ballistic armour systems: A review*. Defence Technology. 2024;
217. Ozturk, F., Cobanoglu, M., Ece, R.E. *Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry*. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2024; 37 (9): 3084-3116.
218. Shabaridharan, K., Bhattacharyya, A. *Metallic Fibers for Composite Applications*. In: Rana, S., Figueiro, R., Eds. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications. Textile Science and Clothing Technology. Springer, Singapore, 2016; pp. 205–230.
219. Iredale, R.J., Ward, C., Hamerton, I. *Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides*. Progress in Polymer Science. 2017; 69: 1-21.
220. Maxineasa, S.G., Taranu, N. *Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP*. In: Pacheco-Torgal, F., Melchers, R.E., Shi, X., De Belie, N., Van Tittelboom, K., Sâez, A., Eds. Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2018; pp. 673-721.
221. Lee, C.H., Khalina, A., Nurazzi, N.M., Norli, A., Harussani, M.M., Rafiqah, S.A., Aisyah, H.A., Ramli, N. *The Challenges and Future Perspective of Woven Kenaf Reinforcement in Thermoset Polymer Composites in Malaysia: A Review*. Polymers. 2021; 13 (9): 1390.
222. Zhu, X., Yin, S., Liu, L., Yi, W., Luo, G., Zhao, Z., Chen, W. *Effects of temperature on mechanical properties and impact resistance of carbon fiber/bismaleimide resin composites*. Journal of Materials Research and Technology. 2025; 34: 2553-2569.
223. Çuvalci, H., Erbay, K., İpek, H. *Investigation of the Effect of Glass Fiber Content on the Mechanical Properties of Cast Polyamide*. Arabian Journal for Science and Engineering. 2014; 39: 9049–9056.
224. Zhang, X., Hao, H., Shi, Y., Cui, J. *The mechanical properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at high strain rates*. Butyral (PVB) at high strain rates. 2015; 93: 404-415.

- 225.Maddah, H.A. *Polypropylene as a Promising Plastic: A Review*. American Journal of Polymer Science. 2016; 6 (1): 1-11.
- 226.Jogur, G., Nawaz, A.K., Das, A., Mahajan, P., Alagirusamy, R. *Impact properties of thermoplastic composites*. Textile Progress. 2018; 50 (3): 109–183.
- 227.Karl, J., Kirsch, F., Faderl, N., Perko, L., Fras, T. *Optimizing Viscoelastic Properties of Rubber Compounds for Ballistic Applications*. Applied Sciences. 2020; 10 (21): 7840.
- 228.Fras, T. *Experimental and Numerical Study on a Non-Explosive Reactive Armour with the Rubber Interlayer Applied against Kinetic-Energy Penetrators—The ‘Bulging Effect’ Analysis*. Materials. 2021; 14 (12): 3334.
- 229.Asemani, S.S., Liaghat, G., Ahmadi, H., Anani, Y., Charandabi, S.C., Khodadadi. *Analysis of Ballistic Impact Performance and Shear Effect on Elastomeric and Thermoset Composites*. International Journal of Applied Mechanics. 2022; 14 (2): 2250013.
- 230.Ji, Y., Li, X., Zhou, L., Liu, X. *Experimental and Numerical Study on Ballistic Impact Response of Vehicle Tires*. Latin American Journal of Solids and Structures. 2023; 20 (7): e506.
- 231.Zochowski, P., Cegła, M., Szczurowski, K., Mączak, J., Bajkowski, M., Bednarczyk, E., Grygoruk, R., Magier, M., Pyka, D., Bocian, M., Jamroziak, K., Gieleta, R., Prasufa, P. *Experimental and numerical study on failure mechanisms of the 7.62× 25mm FMJ projectile and hyperelastic target material during ballistic impact*. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2023; 35: 1745–1767.
- 232.Doddamani, S., Kulkarni, S.M., Joladarashi, S., Kumar, T.S.M., Gurjar, A.K. *Enhancing energy absorption in rubber–sand (Ru–San) composite blocks against ballistic impact: a multi-objective optimisation approach*. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2024; 7: 4039–4055.
- 233.Li, Z., Zhang, Z., Ren, Z., Gao, S., Liu, Z. *Research on damage behavior of silicone rubber under dynamic impact*. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2024; 164 (2): 104775.
- 234.Asavavisithchai, S., Marlaiwong, T., Nuttayasakul, N. *Developement of Composite Armors Using Natural Rubber Reinforced with Steel Wire Mesh for Ballistic Resistance*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018; 409: 012001.
- 235.Khodadadi, A., Liaghat, G., Shahgholian-Ghahfarokhi, D., Chizari, M., Wang, B. *Numerical and experimental investigation of impact on bilayer aluminum-rubber composite plate*. Thin-Walled Structures. 2020; 149: 106673.
- 236.Kasim, H. *Investigation on the ballistic performance of rubber-aluminum (AA7075-T651) laminated plates reinforced with borosilicate glass balls*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2022; 236 (2) :280-298.
- 237.Klosak, M., Bendarma, A., Jankowiak, T., Bahi, S., Rusinek, A. *Aluminium-Rubber Composite – Experimental and Numerical Analysis of Perforation Process at Ambient and High Temperatures*. Acta Polytechnica Hungarica. 2022; 19 (11): 85-105.

238. Fadly, M.S., Bakri, B., Anwar, K., Chandrabakty, S., Mustafa, M., Naharuddin, N., Fauzan, F. *Evaluation of Projectile Penetration Position on Perforated Plate on Ballistic Resistance of Composite Sandwich Panels*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023; 1157: 012033.
239. Mosa, M.H., Fahem, A.F., Guthai, A.T. *Experimental investigation of perforated multi-layered composite armor subjected to ballistic impact*. Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences. 2024; 17: 016–021.
240. Choudhury, S., Yerramalli, C.S., Guha, A., Ingle, S. *Prediction and mitigation of behind armor blunt trauma in composite plate armor using rubber backing or air gaps*. European Journal of Mechanics / A Solids. 2022; 93: 104533.
241. Jassem, A.E., Jawad, A.J., Samarmad, A.O., Hamzah, A.F. *Numerical and Experimental Study of Multi-layer Armors for Personal Protection*. Physics and Chemistry of Solid State. 2022; 23 (3): 550-558.
242. Jitarășu, O., Lache, S., Velea, M.N. *Impact performance analysis of a novel rubber-composite combat helmet*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2023; 237 (7): 1755-1767.
243. Abdelal, N.R. *A shield of defense: Developing ballistic composite panels with effective electromagnetic interference shielding absorption*. Defence Technology. 2024; 35: 123-136.
244. Khodadadi, A., Liaghat, G., Ahmadi, H., Bahramian, A.R., Razmkhah, O. *Impact response of Kevlar/rubber composite*. Composites Science and Technology. 2019; 184: 107880.
245. Liu, Q., Guo, B., Chen, P., Su, J., Arab, A., Ding, G., Yan, G., Jiang, H., Guo, F. *Investigating ballistic resistance of CFRP/polyurea composite plates subjected to ballistic impact*. Thin-Walled Structures. 2021; 166: 108111.
246. Mahesh, V., Joladarashi, S., Kulkarni, S.M. *Comparative study on ballistic impact response of neat fabric, compliant, hybrid compliant and stiff composite*. Thin-Walled Structures. 2021; 165: 107986.
247. Weerasinghe, D., Bambach, M.R., Mohotti, D., Wang, H., Hazell, P.J. *High-velocity projectile impact response of rubber-coated aramid Twaron fabrics*. International Journal of Mechanical Sciences. 2022; 229: 107515.
248. Sidiq, M.F., Wibowo, A., Adewijaya, P. *Composite bulletproof vest reinforced rubberized coir*. AIP Conference Proceedings. 2024; 2952 (1): 090018.
249. Braga, F.O., Milanezi, T.L., Monteiro, S.N., Louro, L.H.L., Gomes, A.V., Lima, E.P. *Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems*. Journal of Materials Research and Technology. 2018; 7 (4): 541-549.
250. Sangamesh, R., Ravishankar, K.S., Kulkarni, S.M. *Ballistic Impact Study on Jute-Epoxy and Natural Rubber Sandwich Composites*. Materials Today: Proceedings. 2018; 5 (2): 6916-6923.

251. Wang, X., Zhang, J., Bao, L., Yang, W., Zhou, F., Liu, W. *Enhancement of the ballistic performance of aramid fabric with polyurethane and shear thickening fluid*. Materials & Design. 2020; 196: 109015.
252. Jitaraşu, O., Lache, S., Velea, M.N. *Mechanical characterization of hyper-elastic rubber materials used as protective layers for structures operating under high dynamic loading conditions*. (submitted to the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science).
253. Somarathna, H.M.C.C., Raman, S.N., Badri, K.H., Mutalib, A.A., Mohotti, D., Ravana, S.D. *Quasi-Static Behavior of Palm-Based Elastomeric Polyurethane: For Strengthening Application of Structures under Impulsive Loadings*. Polymers. 2016; 8 (5): 202.
254. Papagiannis, P., Azariadis, P., Papanikos, P. *Evaluation and optimization of footwear comfort parameters using finite element analysis and a discrete optimization algorithm*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; 254 (16): 162010.
255. Thomas, S., George, S.C., Thomas, S. *Rigid Amorphous Phase: Mechanical and Transport Properties of Nitrile Rubber/Clay Nanocomposites*. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. 2017; 33 (2): 103-126.
256. Tarodiya, R., Levy, A. *Surface erosion due to particle-surface interactions - A review*. Powder Technology. 2021; 387: 527-559.
257. Vinith, K.S.K., Sreenaveen, S., Sarveshnarayanan, G., Muthukumar, S. *Experimental Testing of Rubber Materials for Enhancement of Suspension Bush Performance*. Journal of Physics: Conference Series. 2024; 2837: 012014.
258. Liu, Y., Li, R., Zhou, P. *Interlayer Material Interactions on Shaped Charge Jet Protection Performance of Passive Armor*. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1855: 012026.
259. Ucar, H., Basdogan, I. *Dynamic characterization and modeling of rubber shock absorbers: A comprehensive case study*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2018; 37(3): 509–518.
260. Lei, J., Xuan, Y., Liu, T., Duan, F., Sun, H., Wei, Z. *Static and dynamic mechanical behavior and constitutive model of polyvinyl chloride elastomers for design processes of soft polymer materials*. Advances in Mechanical Engineering. 2020; 12 (6): 1–12.
261. Jebur, Q.H., Jweeg, M.J., Al-Waily, M., Ahmad, H.Y., Resan, K.K. *Hyperelastic models for the description and simulation of rubber subjected to large tensile loading*. Archives of Materials Science and Engineering. 2021; 108 (2): 75-85.
262. Zhao, Z., Yuan, X., Zhang, W.Z., Niu, D., Zhang, H. *Dynamical modeling and analysis of hyperelastic spherical shells under dynamic loads and structural damping*. Applied Mathematical Modelling. 2021; 95: 468-483.
263. Chen, Y., Guo, H., Sun, M., Lv, X. *Tensile Mechanical Properties and Dynamic Constitutive Model of Polyurea Elastomer under Different Strain Rates*. Polymers. 2022; 14 (17): 3579.

- 264.Hou, J., Lu, X., Zhang, K., Jing, Y., Zhang, Z., You, J., Li, Q. *Parameters Identification of Rubber-like Hyperelastic Material Based on General Regression Neural Network*. Materials. 2022; 15 (11): 3776.
- 265.Naik, N., Kumar, S., Ratnaveer, D., Joshi, M., Akella, K. *An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors*. International Journal of Damage Mechanics. 2013; 22 (2): 145-187.
- 266.ISO 815-1:2019(E). *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of compression set - Part 1: At ambient or elevated temperatures*.
- 267.ASTM D 412. *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension*.
- 268.ISO 37:2017(E). *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties*.
- 269.Billon, H.H., Robinson, D.J. *Models for the ballistic impact of fabric armour*. International Journal of Impact Engineering. 2001; 25 (4): 411-422.
- 270.Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T.A., Powers, B. *Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric*. International Journal of Mechanical Sciences. 2006; 48: 33-43.
- 271.Pandya, K.S., Kumar, S., Nair, N., Patil, P., Naik, N. *Analytical and Experimental Studies on Ballistic Impact Behavior of 2D Woven Fabric Composites*. International Journal of Damage Mechanics. 2015; 244: 471-511.
- 272.Ryan, S. *Analytical techniques and mathematical modelling*. In: Crouch, I.G., Ed. The Science of Armour Materials. Woodhead Publishing in Materials. 2017; pp. 395-481.
- 273.Sastranegara, A., Putra, K.E., Halawa, E., Sutisna, N.A., Topa, A. *Finite Element Analysis on ballistic impact performance of multi-layered bulletproof vest impacted by 9 mm bullet*. SINERGI. 2023; 27 (1): 15-22.
- 274.Ma, D., Scazzosi, R., Manes, A. *Modeling approaches for ballistic simulations of composite materials: Analytical model vs. finite element method*. Composites Science and Technology. 2024; 248: 110461.
- 275.Malcu, A., Puică, C.C., Noja, G.F., Krupenschi, B. *Experimental and numerical investigation regarding the impact behaviour of 7,62 mm bullet steel core with a multilayered armour plate*. Proceedings of the 8th International Scientific Conference SEA-CONF. 2022; pp. 26-38.
- 276.Zhai, J., Zhao, Y., Hao, L., Shang, B., Song, L., Qi, C. *Numerical investigation of ballistic impact performance about ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under high velocity impact*. Journal of Materials, Processing and Design. 2024; 8 (1): 156-166.
- 277.Jintao, L., Moubin, L. *An analytical model to predict the impact of a bullet on ultra-high molecular weight polyethylene composite laminates*. Composite Structures. 2022; 202: 115064.
- 278.Florence, A.L. *Interaction of Projectiles and Composite Armor. Part II*. AMMRC CR 69-15, Stanford Research Institute, Palo Alto, CA, August 1969.

- 279.Walker, J.D., Anderson, C.E. *An analytical model for ceramic-faced light armors*. 16th International Symposium on Ballistics, San Francisco, CA, September, 1996; pp. 23–28.
- 280.Zaera, R., Sánchez-Gálvez, V. *Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armors*. International Journal of Impact Engineering. 1998; 21 (3): 133–148.
- 281.Bresciani, L.M., Manes, A., Giglio, M. *An analytical model for ballistic impacts against ceramic tiles*. Ceramics International. 2018; 44 (17): 21249-21261.
- 282.Wang, Z., Li, P. *A model incorporating damage evolution to predict the penetration behavior of a ceramic target subjected to the long projectile impact*. International Journal of Impact Engineering. 2020; 135: 103393.
- 283.Daniel, I.M., Liber, T. *Wave Propagation in Fiber Composite Laminates*. Part II, NASA CR-135086. 1976.
- 284.Sierakowski, R.L., Chaturvedi, S.K. *Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites*. Wiley. 1997.
- 285.Xue, P., Peng, X., Cao, J. *A non-orthogonal constitutive model for characterizing woven composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2003; 34 (2): 183-193.
- 286.Naik, N.K., Shrirao, P. *Composite structures under ballistic impact*. Composite Structures. 2004; 66 (1-4): 579-590.
- 287.Naik, N.K., Shrirao, P., Reddy, B.C.K. *Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation*. International Journal of Impact Engineering. 2006; 32: 1521-1552.
- 288.Paradela, L.S., Sanchez-Galvez, V. *Analytical simulation of high-speed impact onto composite materials targets*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2013; 48 (5): 282-290.
- 289.Sanchez-Galvez, V., Paradela, L.S., Gálvez, F. *Analytical simulation of high-speed impact onto hybrid glass/carbon epoxy composites targets*. International Symposium on Dynamic Response and Failure of Composite Materials. 2014; 88: 101-108.
- 290.Bresciani, L.M., Manes, A., Giglio, M. *An analytical model for ballistic impacts against plain-woven fabrics with a polymeric matrix*. International Journal of Impact Engineering. 2015; 78: 138-149.
- 291.Langston, T. *An analytical model for the ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene composites*. Composite Structures. 2017; 179: 245-257.
- 292.Doddamani, S., Kulkarni, S.M., Joladarashi, S., Mohan Kumar, T.S., Gurjar, A.K. *Analysis of light weight natural fiber composites against ballistic impact: A review*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2023; 6 (3): 450-468.
- 293.Choudhury, S., Yerramalli, C.S., Guha, A. *Analytical modeling of the ballistic impact performance of glass fabric – epoxy composites at low temperatures*. International Journal of Impact Engineering. 2023; 176: 104565.
- 294.Popa, I-D., Dobrița, F. *Considerations on Dop (Depth Of Penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection*. Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series. 2017; 69 (1): 162 – 166.

- 295.Savio, S.G., Madhu, V. *Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test*. International Journal of Impact Engineering. 2018; 113: 161-167.
- 296.Crouch, I.G. *Introduction to armour materials*. In: Crouch, I.G., Ed. The Science of Armour Materials. Woodhead Publishing in Materials. 2017; pp. 1-54.
- 297.Karahan, M., Ahmed, H.I. *Simulation of ballistic composites*. In: Nawab, Y., Sapuan, S.M., Shaker, K., Eds. Composite Solutions for Ballistics. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2021; pp. 299-339.
- 298.Rajan, S.D. *Numerical analysis of ballistic composite materials*. In: Bhatnagar, A., Ed. Lightweight Ballistic Composites (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016; pp. 327-348.
- 299.Nsiampa, N., Coghe, F., Dyckmans, G. *Numerical investigation of the bodywork effect (K-effect)*. DYMAT-9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. 2009; 2: 1561-1566.
- 300.Børvik, T., Dey, S., Clausen, A.H. *Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles*. International Journal of Impact Engineering. 2009; 36: 948–964.
- 301.Kazemahvazi, S., Schneider, C., Deshpande, V.S. *A constitutive model for self-reinforced ductile polymer composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2015; 71: 32-39.
- 302.Nagarajan, Y.R., Farukh, F., Kandan, K. *The Influence of Architecture on the Tensile and Flexural Properties of Single-Polymer Composites*. Journal of Composites Science. 2025; 9 (1): 40.
- 303.Senthil, K., Iqbal, M.A., Bhargava, P., Gupta, N.K. *Experimental and Numerical Studies on Mild Steel Plates against 7.62 API Projectiles*. In: 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics. New Delhi, India, 11-14 December 2016, pp. 369–374.
- 304.Jørgensen, K.C., Swan, V. *Modeling of Armor-piercing Projectile Perforation of Thick Aluminum Plates*. In: 13th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2014.
- 305.Pintilie, D., Puică, C., Pîrvulescu, C., Pupăză, C. *Research on the impact of a projectile with complex kinematics on an armor plate*. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2020; 82 (4): 213 – 224.
- 306.Khan, M.K., Iqbal, M.A. *Damage and Ballistic Evaluation of Ceramic-Metal Composite Target against Cylindrical Projectile*. Engineering Failure Analysis. 2022; 131 (3): 105903.
- 307.Shibao, W., Zhonghai, X., Hu, C., Zou, X., He, X. *Numerical simulation study of ballistic performance of Al2O3/aramid-carbon hybrid FRP laminate composite structures subject to impact loading*. Ceramics International. 2022; 48 (5): 6423-6435.

Lista de publicații

Rezultatele cercetării desfășurate în cadrul acestei teze de doctorat au fost diseminate prin intermediul a șapte articole științifice. Trei dintre aceste articole au fost transmise către reviste științifice recunoscute în domeniu pe plan internațional, dintre care două au fost deja publicate, iar unul se află în prezent în proces de evaluare. Pe parcursul desfășurării cercetării, autorul a prezentat rezultatele preliminare în cadrul unei conferințe naționale. Lista completă a publicațiilor este prezentată mai jos.

1. **Jitarașu, O.** *Hybrid composite materials for ballistic protection. A numerical analysis.* Review of the Air Force Academy, 2019; 17 (2): 47-56.
2. **Jitarașu, O.** Numerical Simulation of Ballistic Impact Performance of Composite Armour Plate by Typical Projectile. In: Cioacă, C., Gherman, L., Eds. Military Applications of Modeling and Simulation. Wydawnictwo ASzWoj, Warsaw, 2021; pp. 157-174.
3. **Jitarașu, O.,** Lache, S. Comportarea la impact a țesăturilor 2D utilizate pentru protecția balistică. Conferința AFCO 2021 (Absolvenți în Fața Companiilor), 2021; 18 mai, Brașov, România.
4. Cășeriu, B., **Jitarașu, O.,** Blaga, P. *Aspects regarding the dynamics of a prototype of remote-controlled logistics transport platform.* Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, 2022; 2 (65): 241-250.
5. **Jitarașu, O.,** Lache, S., Velea, M.N. *Impact performance analysis of a novel rubber-composite combat helmet.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2022; 237 (7): 1755-1767. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544062221132700>, FI=1.758 (2022), SRI=0.703 (2022).
6. **Jitarașu, O.,** Lache, S. *Ballistic performance of monolithic rubber-ceramic composite armor.* Journal of Composite Materials. 2024; 58 (5): 689-706, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00219983231226412>, FI=2.9 (2023), SRI=1.033 (2022).
7. **Jitarașu, O.,** Cășeriu, B. *Numerical Analysis of the Ballistic Impact Behavior of 2D Woven Fabrics.* Open Access Library Journal. 2024; 11: e12108.
8. **Jitarașu, O.** *Numerical investigation on the impact of various construction designs of ceramic mosaic armour on ballistic resistance.* UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 2024; 86 (4): 181-196.
9. **Jitarașu, O.,** Lache, S., Velea, M.N. *Mechanical characterization of hyper-elastic rubber materials used as protective layers for structures operating under high dynamic loading conditions* (trimis spre publicare în Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science; articol în curs de evaluare).