

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Mecatronică



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT EXTINS

**STUDIU EXPERIMENTAL ȘI NUMERIC PRIVIND
COMPORTAMENTUL BALISTIC AL PANOURILOR
HIBRIDE PENTRU PROTECȚIE INDIVIDUALĂ**

Doctorand

Ing. Christian POPESCU

Coordonator de doctorat

Prof. habil. dr. ing. Petre Lucian SEICIU

București

2026

Pagină albă

Mulțumiri

Îmi exprim recunoștința față de toate persoanele care m-au sprijinit și m-au îndrumat pe parcursul elaborării prezentei teze de doctorat.

Mulțumesc domnului profesor habil. dr. ing. Petre Lucian Seiciu, conducător științific al tezei, pentru îndrumarea profesionistă și pentru încurajările oferite de-a lungul perioadei de pregătire doctorală și de elaborare a lucrării.

Îi sunt profund recunoscător doamnei profesor dr. ing. Lorena Deleanu, pentru sprijinul acordat, în calitate de membru în comisia de coordonare, pentru comentariile critice pertinente și pentru soluțiile identificate în procesul de elaborare a rapoartelor și a tezei, precum și pentru îndrumarea oferită cu rigoare și profesionalism.

Mulțumesc membrilor comisiei de coordonare a lucrării, doamna dr. fiz. Simona Maria Sandu, domnul conf. dr. ing. Alexandru Nicolae Stoica și doamna conf. dr. ing. Georgiana Ionela Păduraru, pentru sprijinul constant și pentru implicarea în procesul de elaborare a tezei.

Realizarea încercărilor experimentale s-a efectuat împreună cu doamna dr. fiz. Simona Sandu, cu sprijinul personalului de la CCIACBRNE – Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN și Ecologie, București, din cadrul Laboratorului Echipamente de Protecție Balistică Individuală.

Adresez mulțumiri domnului dr. ing. Cătălin Pîrvu, din cadrul Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Aerospațială „Elie Carafoli” – INCAS, pentru recomandările oferite în conceperea modelului, precum și domnului dr. ing. George Ghiocel Ojoc, Autonomous Flight Technologies, pentru recomandările de utilizare și pentru asistența tehnică acordată în utilizarea software-ului Ansys Explicit Dynamics.

Pentru imaginile SEM obținute cu ajutorul microscopului electronic din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați, selectate cu răbdare, analizate și valorificate în susținerea investigațiilor privind mecanismele de cedare, adresez mulțumiri doamnei conf. dr. fiz. Alina Cantaragiu Cioromila.

Cu aleasă recunoștință, le mulțumesc soției și părinților mei pentru susținerea necondiționată și pentru sprijinul oferit de-a lungul acestei etape

Ing. Christian Popescu

Pagină albă

Cuprins

	Pag.
Mulțumiri.....	3
Cuprins.....	5
 CAPITOLUL 1	
DOMENIUL PROTECȚIE BALISTICE.....	7
1.1. Despre protecția balistică individuală.....	7
1.2. Categoriile ale sistemelor balistice individuale.....	7
1.2.1. Introducere.....	7
1.2.2. Sistemul de protecție balistică individuală „hard armor”.....	8
1.2.3. Sistemul de protecție balistică individuală „soft armor”.....	9
1.3. Materiale avansate folosite în protecția individuală.....	9
1.3.1. Fibre avansate utilizate pentru protecție balistică.....	9
1.3.2. Țesături balistice.....	10
1.4. Structurarea sistemelor de protecție balistică individuală.....	11
1.4.1. Hibridizarea materialelor balistice în panouri stratificate.....	11
1.4.2. Aranjamentul, succesiunea și orientarea straturilor în structura hibridă a panourilor de protecție.....	12
1.4.3. Sistemele de protecție balistică hibride.....	12
1.5. Stadiul actual al testelor cu panouri flexibile.....	13
1.6. Concluzii și direcții de cercetare.....	14
 CAPITOLUL 2	
ORGANIZAREA TEZEI.....	15
 CAPITOLUL 3	
MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A PROCESULUI DE IMPACT	
GLONȚ-ȚINTĂ.....	16
3.1. Rețele folosite în simularea numerică a impactului.....	16
3.2. Modelarea materialelor și a cedării.....	16
3.2.1. Modele constitutive de material.....	16
3.2.2. Criteriul deformației plastice echivalente maxime (EPS) pentru cedare.....	16
3.3. Modele ale impactului proiectil-panou balistic stratificat.....	17
3.3.1. Prezentarea modelului.....	17
3.3.2. Modelul impactului proiectil-panou balistic stratificat simplu.....	18
3.3.3. Modelul impactului proiectil-panou balistic stratificat cu stratul de Kevlar EXO.....	20
3.3.4. Modele constitutive de material în modelarea realizată.....	20
3.3.5. Cazul de impact cu panoul format din 15 straturi de Twaron T730 cu viteza de impact de 450 m/s.....	21
3.3.6. Cazul de impact cu panoul hibrid, format dintr-un strat de Kevlar EXO + 15 straturi de Twaron T730 cu viteza de impact de 450 m/s.....	25
3.3.7. Analiza tensiunilor echivalente pe straturi pentru cele două structuri.....	29
3.6. Concluzii privind rezultatele simulării impactului.....	32

CAPITOLUL 4

REALIZAREA STRUCTURILOR DE PROTECȚIE BALISTICĂ.....	33
4.1. Semifabricatele utilizate la realizarea structurilor balistice.....	33
4.2. Soluții noi de configurație a structurilor individuale pentru protecție balistică.....	36
4.3. Campania de testare a structurilor realizate – sinteză.....	36

CAPITOLUL 5

TESTAREA EXPERIMENTALĂ A PANOURILOR PROIECTATE, LA IMPACT BALISTIC, ȘI EVALUAREA REZULTATELOR.....	38
5.1. Standardizarea în domeniul protecției balistice.....	38
5.2. Metodologia experimentelor de impact balistic.....	38
5.3. Evaluarea performanțelor la impact pentru prima etapa a studiului prin rezultate experimentale.....	41
5.4. Evaluarea performanțelor la impact pentru a doua etapa a studiului – rezultate experimentale.....	47
5.5. Analiza deteriorării fibrelor aramidice din structurile testate - la nivel micro și macro.....	62
5.5.1. Pregătirea probelor care conțin fibre aramidice, pentru investigarea cu ajutorul microscopului electronic.....	62
5.5.2. Mecanisme de cedare a fibrelor aramidice în sistemele de protecție individuală.....	63
5.5.3. Analiza cu ajutorul microscopiei electronice (SEM) a panourilor din țesătură Twaron T730, după impactul balistic.....	64
5.5.4. Analiza cu ajutorul microscopiei electronice (SEM) a arhitecturii 1EXO15T, după impactul balistic.....	70
5.5.5. Clasificarea mecanismelor de cedare a fibrelor aramidice.....	74
5.6. Concluzii asupra studiului experimental al panourilor hibride de protecție individuală.....	75

CAPITOLUL 6

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	77
6.1. Importanța temei.....	77
6.2. Concluzii finale.....	78
6.3. Sinteza datelor experimentale privind caracteristicile panourilor hibride dezvoltate de autor.....	79
6.4. Contribuții personale.....	82
6.5. Direcții de cercetare deschise de teză.....	83

Lista lucrărilor științifice ale autorului.....	84
Bibliografie.....	87

CAPITOLUL 1

DOMENIUL PROTECȚIEI BALISTICE

1.1. Despre protecția balistică individuală

Obiectivul principal al cercetării în domeniul echipamentelor individuale de protecție balistică este dezvoltarea unui sistem vestimentar eficient, ușor de purtat, cu greutate redusă și prețuri accesibile, capabil să ofere rezistență eficientă la impacturi balistice. Performanța acestor sisteme textile de protecție este influențată de o serie de factori esențiali, precum: tipul și compoziția firelor, densitatea și structura țesăturii, unghiul de impact, forma proiectilului și viteza de impact a acestuia. Toți acești parametri influențează capacitatea materialului de a absorbi și disipa energia generată în urma unui impact balistic [31].

Dezvoltarea sistemelor de protecție corporală urmărește un echilibru între protecția balistică, masa redusă, flexibilitate și confort, prin optimizarea materialelor, a designului panourilor și a finisajelor [4], [6], [7], [26], [56], [67], [86], [89]. Țesăturile 2D și laminatele unidirecționale sunt frecvent utilizate datorită greutății reduse și rezistenței bune la impact [2], [40], iar soluțiile hibride, lipirea între straturi și modificările de suprafață pot crește absorbția energiei de impact [25], [61], [65]. În paralel, țesăturile 3D devin o direcție promițătoare datorită performanței balistice îmbunătățite [5], [17], [30].

Printre fibrele de înaltă performanță folosite la scară largă pentru sisteme individuale de protecție balistică sunt:

- fibrele aramidice, reprezentate prin mărcile comerciale Twaron® (marcă comercială înregistrată Teijin Aramid) [99], [100] și Kevlar® (marcă înregistrată DuPont) [108],
- fibrele de polietilenă de foarte mare densitate, reprezentate de mărcile Dyneema® (marcă înregistrată DSM Protective Materials, preluată de Avient Corporation) [103] și Spectra® (marcă înregistrată Honeywell) [104].

Acestea au fost folosite mult datorită faptului că dețin proprietăți de protecție bune și cerute de personalul în cauză, precum rezistență și tenacitate ridicată, greutate scăzută și o rezistență chimică bună [4].

1.2. Categoriile ale sistemelor balistice individuale

1.2.1. Introducere

Cererile crescute ale beneficiarilor pentru sisteme de protecție individuală au dus la îmbunătățiri semnificative atât în ceea ce privește materialele, cât și designul. O gamă largă de opțiuni de veste balistice sunt acum disponibile pe piață, oferind diferite niveluri de protecție împotriva diferitelor amenințări.

Indiferent de design-ul lor (Fig. 1.1b și c), toate sistemele de protecție constau, de obicei, din trei componente (Fig. 1.1a): husă, panouri balistice flexibile și panouri balistice dure.

- Husa unei veste balistice este, de regulă, confecționată din materiale sintetice de înaltă rezistență, precum Cordura® [115], nailon sau poliester, special alese pentru durabilitate, rezistență la abraziune și protecție împotriva umezelii;

- Panourile balistice sunt alcătuite din multiple straturi suprapuse de materiale special concepute pentru a rezista impactului proiectilelor și altor amenințări balistice;

Husa panourilor balistice are rolul de a proteja materialele balistice împotriva factorilor de mediu precum umezeală, praf, sau abraziune (frecare în mediu umed).

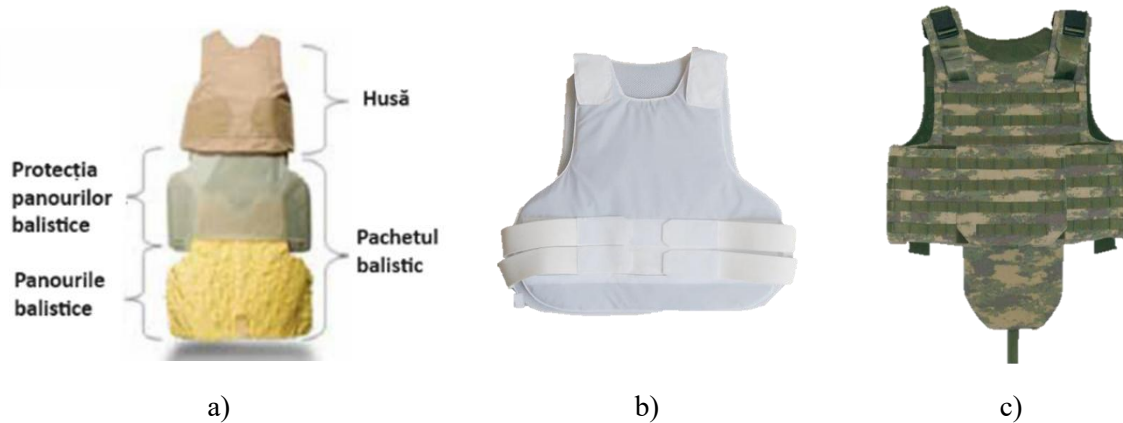


Fig. 1.1. (a) Compoziția sistemului de protecție individuală, (b) vestă ascunsă, (c) vestă tactică [2], [122]

1.2.2. Sistemul de protecție balistică individuală „hard armor”

Sistemul de protecție „hard armor”, conceput ca răspuns la limitările protecțiilor flexibile pe bază de material textil, împotriva munițiilor militare, a devenit standard în aplicațiile militare și de securitate, în care vitezele gloanțelor depășesc 500 m/s. Acesta integrează o armătură moale pe bază de material textil cu materiale rigide, precum plăci metalice (oțel sau aliaj de titan), plăci ceramice din alumină, carbură de siliciu, carbură de bor, plăci de polietilenă de foarte mare densitate sau compozite laminate. Acest tip de sistem de protecție este purtat în situații cu risc ridicat. Plăcile pot cântări între 1 kg și 4 kg fiecare [31].

Plăcile balistice opresc proiectilele prin disiparea energiei cinetice, în principal prin fracturarea controlată a stratului ceramic dur, mecanism diferit de deformarea plastică specifică armurilor metalice sau flexibile. Ceramica singură nu este suficientă, motiv pentru care plăcile moderne combină o ceramică monolitică (sau aliaje ceramice) cu suporturi textile de înaltă performanță, obținând duritate mare, rezistență la compresiune și masă redusă, ceea ce favorizează distrugerea proiectilului și distribuirea sarcinii de impact pe o suprafață mai mare, cu reducerea deformării posterioare (BFD) [31], [32], [96].

Conform lui Medvedovski [54], ceramica absoarbe energia prin micro- și macro-fisurare, în timp ce armurile metalice sau textile disipă energia prin deformare plastică și întinderea fibrelor [82], diferențele dintre aceste mecanisme fiind fundamentale pentru proiectarea sistemelor hibride [31], [53].

Dacă sistemele clasice utilizau plăci ceramice sprijinite pe panouri din fibre aramidice sau din UHMWPE, tendințele recente promovează plăci integral polimerice sau compozite, cu matrici termoplastice armate cu fibre UHMWPE ori aramidice, care oferă masă mai redusă, comportare mai bună la lovituri multiple și durabilitate mai mare la solicitări mecanice și de mediu [72].

1.2.3. Sistemul de protecție balistică individuală „soft armor”

Sistemul de protecție „soft armor” este un tip de protecție flexibilă și ușoară, realizată din material fibros adaptabil [66]. Aceasta se remarcă prin greutatea redusă, ușurința în mișcare a purtătorului și capacitatea îmbunătățită de rezistență la gloanțe [46], [74]. Poate fi utilizat individual sau în combinație cu sistemul de protecție „hard armor”, în funcție de gradul de amenințare. Datorită flexibilității și confortului oferit, este ideal pentru echipamentele balistice destinate armatei, poliției și gărzilor de corp [96], în situații cu risc redus [54], [96].

Sistemele „soft armor” sunt realizate din 20–50 de straturi textile balistice, cu masă redusă, oferind protecție eficientă împotriva amenințărilor de intensitate mică și medie, în special a muniției de pistol, menținând totodată un nivel ridicat de confort. Sunt utilizate frecvent structuri textile uni sau multi-direcționale, 2D și, mai nou, 3D, iar tipul țesăturii și arhitectura multistrat influențează direct performanța la impact și comportamentul la penetrare [2].

Sistemele „soft armor” limitează deformarea transversală și distribuie energia impactului pe o suprafață extinsă, mărinde eficiența protecției. La impact, energia cinetică a proiectilului se transformă în energie cinetică a țesăturii, energie de deformare a firelor și energie disipată prin frecare de alunecare, alături de alte mecanisme de absorbție [48]. Performanța balistică depinde de capacitatea materialului de a prelua, transfera și disipa rapid energia pentru a preveni cedarea locală timpurie, fiind influențată de proprietățile fibrelor, structura țesăturii, numărul de straturi, și de frecare, forma și traiectoria proiectilului [97].

După depășirea capacității de oprire, în special în straturile frontale, predomină mecanismele de cedare localizată, similare forfecării și ruperii la tracțiune din armurile metalice, incluzând ruperea fibrelor în jurul punctului de impact și smulgerea unui dop de material care avansează împreună cu proiectilul [34].

1.3. Materiale avansate folosite în protecția individuală

1.3.1. Fibre avansate utilizate pentru protecție balistică

Fibrele para-aramidice și caracteristicile lor

Printre fibrele cu rezistență și modul ridicat, para-aramidele se evidențiază prin stabilitatea lor termică excepțională, fără topire la temperaturi înalte, dar cu sensibilitate la radiațiile UV și absorbție redusă de apă. Fibrele aramidice, introduse inițial de compania DuPont în anii 1960, sunt poliamide aromatice obținute din acizi și amine aromatice, structura lor chimică favorizând legături intermoleculare puternice. Aceste tipuri de fibre sunt caracterizate prin rezistența ridicată și la compresiune, rezistența la abraziune, rezistența la degradarea chimică și rezistența la degradarea termică. În plus, au o stabilitate dimensională excelentă și un coeficient de dilatare termică foarte mic; și își recapătă rezistența balistică după uscare [3], [31].

Un alt avantaj major este comportamentul lor la temperaturi extreme: fibrele aramidice își păstrează proprietățile mecanice, chiar și după expuneri îndelungate la variații termice. Nu

se observă pierderi de rezistență la temperaturi de până la -196°C , iar materialul nu se topește, ci începe să se carbonizeze, abia la aproximativ 427°C [2].

Kevlar[®] [108] și Twaron[®] [99], [100] sunt două dintre cele mai utilizate materiale para-aramidice în realizarea sistemelor individuale de protecție balistică. Ambele se remarcă printr-o rezistență de până la cinci ori mai mare decât oțelul, păstrând totodată flexibilitatea și durabilitatea necesare pentru a face față cu succes impacturilor balistice de mare intensitate energetică [90], [92].

Kevlar[®] este denumirea comercială a unei fibre para-aramidică dezvoltată în 1965 de chimista Stephanie Kwolek, la compania DuPont. Inițial utilizată ca înlocuitor al oțelului în anvelope de curse, fibra a devenit rapid un material esențial în armura corporală modernă [1] [39], [87]. Datorită rezistenței foarte mari la tracțiune, modulului ridicat și tenacității excelente, țesăturile de Kevlar[®] pot absorbi cantități semnificative de energie la impact, fiind utilizate pe scară largă în veste antiglonț, căști balistice și alte sisteme de protecție [31], [50], [58], [59], [60].

Fibra de polietilenă cu masă moleculară foarte mare (UHMWPE)

UHMWPE, cunoscută sub numele de polietilenă cu masă moleculară foarte mare este un alt tip de fibră cu înaltă rezistență și modul ridicat, folosit în panoul balistic. Acest tip de fibră este folosit într-o varietate de produse pentru armuri corporale. UHMWPE a fost introdusă pentru prima dată la mijlocul anilor '80, de Allied-Signal, acum Honeywell Advanced Fibers and Composites (Colonial Heights, VA SUA), și DSM High Performance Fibers (Heerlen, Olanda) [23]. Fibrele din UHMWPE au proprietăți apropiate de cele ale para-aramidelor, dar aparțin familiei poliolefinelor, fiind formate din lanțuri extrem de lungi de polietilenă.

Prin laminarea straturilor unidirecționale sigilate între folii de polietilenă se pot realiza atât panouri flexibile, cât și plăci rigide pentru sisteme de protecție balistică. Fibrele UHMWPE combină modulul ridicat cu flexibilitate bună, ceea ce le permite să absoarbă eficient energia la solicitări dinamice de mare viteză. Limitările principale sunt temperatura de topire relativ scăzută și caracterul ne-higroscopic [4], [88].

Fibrele din UHMWPE au un punct de topire relativ scăzut, aproximativ $144\text{--}152^{\circ}\text{C}$, iar proprietățile lor mecanice (tenacitate și modul) tind să scadă la temperaturi ridicate și să crească la temperaturi sub zero. Conform datelor furnizate de producători, raportul rezistență–greutate poate fi cu până la 40 % mai mare decât la fibrele para-aramidice, oferind un avantaj important pentru realizarea armurilor balistice ușoare, dar eficiente energetic.

Dintre fibrele UHMWPE comerciale cu modul de elasticitate foarte ridicat se remarcă Dyneema (DSM) [103] și Spectra (Honeywell) [104], utilizate pe scară largă în aplicații balistice. Fibrele Spectra[™] sunt raportate ca având o rezistență de aproximativ zece ori mai mare decât oțelul și cu aproximativ 40 % mai mare decât a fibrelor aramidice, la aceeași masă specifică [4], [33].

1.3.2. Țesături balistice

În protecția balistică sunt utilizate frecvent țesături 2D, laminate unidirecționale (UD), structuri multiaxiale și țesături 3D [81]. Țesăturile biaxiale, triaxiale și chiar cuadriaxiale și laminatele UD sunt larg răspândite în veste antiglonț și în aplicații compozite [64], însă

țesăturile pot avea performanțe reduse la impact din cauza ondulației firelor, rezistenței scăzute la delaminare și comportării slabe la forfecare în plan.

Țesăturile 2D sunt cele mai simple și mai utilizate structuri textile în aplicații balistice, fiind realizate prin intercalarea firelor de urzeală și bătătură după un model prestabilit. Mai multe straturi pot fi suprapuse sau cusute în diferite direcții pentru a crește rezistența la penetrare balistică și la înjunghiere [13], [14]. Acoperirea cu elastomeri sau impregnarea cu fluide cu îngroșare la forfecare sau cu nanoparticule de siliciu poate îmbunătăți suplimentar performanța la impact [45]. Un parametru esențial este factorul de acoperire al țesăturii; valori între 0,6 și 0,95 sunt considerate optime pentru protecția balistică, în timp ce valori din afara acestui interval pot conduce la performanțe scăzute [23].

Țesăturile 3D au devenit un subiect de interes major în protecția balistică datorită comportării superioare la impact, evidențiată prin metode moderne de analiză și fabricație [29]. Literatura descrie structuri precum 3D angle-interlock (fire de legătură pe direcție de grosime, cu traiectorie „în unghi”), compozite 3D ortogonale, împletituri 3D, țesături complet sau parțial împletite și compozite tricotate multiaxial, toate demonstrând performanțe superioare celor 2D. Elementul distinctiv al acestor materiale îl reprezintă firele de legătură pe direcția Z, care conectează straturile de urzeală și bătătură, crescând densitatea areală și rezistența la delaminare. Aceste fibre transversale contribuie semnificativ la tenacitatea la distrugere și la capacitatea de absorbție a energiei în condiții de impact balistic [12], [29], [31].

1.4. Structurarea sistemelor de protecție balistică individuală

1.4.1. Hibridizarea materialelor balistice în panouri stratificate

Panourile hibride pentru protecție balistică utilizează fibre cu rezistență mare și densitate redusă (aramidice, UHMWPE) pentru a obține un raport optim între masă și performanță la impact. Performanța acestor structuri depinde puternic de combinația materialelor și de secvența de stivuire a straturilor. Studii numerice au arătat că, la aceeași grosime totală, ordinea și proporția laminatelor cu rigiditate mare și a celor mai ductile influențează semnificativ capacitatea de oprire a proiectilului [36].

Arhitectura textilă are, și ea, un rol decisiv. Modelele analitice și numerice indică faptul că straturile țesute plasate frontal oferă rezistență mai bună la forfecare, în timp ce straturile unidirecționale (UD), plasate posterior, preiau eficient solicitările la tracțiune, conducând la o disipare energetică superioară și la o corelare mai bună cu rezultatele experimentale [81].

Cercetările asupra hibridizării țesăturilor nețesute și țesute din UHMWPE au demonstrat că structurile hibride pot depăși performanța fiecărei arhitecturi utilizate separat, obținând limite balistice mai mari și o reținere superioară a fragmentelor [52]. Simulările numerice au confirmat mecanismele de deformare observate experimental.

Analize prin metoda elementelor finite au arătat că straturile frontale sunt dominate de cedare prin forfecare, iar cele posterioare prin tracțiune; astfel, materialele cu rezistență mare la forfecare sunt optime în față, iar cele cu rezistență la tracțiune în spate. Configurațiile hibride cu țesături UHMWPE pe fața de impact și straturi UD aramidice aranjate posterior au

demonstrat performanțe balistice superioare, cu un raport optim țesătură/UD de aproximativ 1:3, permițând reducerea masei totale a sistemului [21].

1.4.2. Aranjamentul, succesiunea și orientarea straturilor în structura hibridă a panourilor de protecție

Parametrii cei mai importanți pentru îmbunătățirea performanțelor balistice ale panourilor de protecție sunt [38], [55], [70]: natura și arhitectura straturilor, succesiunea straturilor, orientările straturilor.

În proiectarea panourilor balistice hibride, modul de dispunere a materialelor de protecție în straturile frontale și posterioare este esențial. În studiul realizat de Park et al., secvența de laminare a fost identificată ca un parametru critic în optimizarea performanței balistice a panourilor hibride multistrat alcătuite din țesături impregnate [65].

1.4.3. Sistemele de protecție balistică hibride

Hibridizare bazată pe deformarea transversală

Cunniff a arătat că schimbarea ordinii straturilor într-un panou hibrid poate cauza un răspuns mult diferit, dar că pot exista și combinații care sunt puțin sensibile la modificarea ordinii straturilor din panourile textile balistice [27]. Pentru a ilustra efectul restricționării deformăției transversale a țesăturilor, au fost testate mai multe sisteme eterogene, dar ar putea avea și atributul de hibride, de materiale textile țesute. Primul sistem, alcătuit dintr-un strat de țesătură Kevlar 29 de 1000 den, susținut de un strat de țesătură Spectra de 375 den, a avut o limită balistică de 269 m/s. Înversarea ordinii țesăturilor a determinat o limită balistică de numai 114 m/s. Într-un alt test cu aceiași parametri de impact, un strat de Kevlar 29 de 1000 den, susținut de un strat de Kevlar 49 de 1040 denier, a oferit o performanță balistică similară cu aceeași configurație inversată. În experimentul Kevlar 29/Spectra 1000 și în experimentul Kevlar 29/Kevlar 49, nepotrivirea proprietăților materialelor ar fi trebuit să producă o nepotrivire în semnătura deformăției transversale: materialul cu modul mai ridicat ar fi trebuit să prezinte o deformăția transversală mai redusă. Prin urmare, rezultatele experimente simple (cu 2 straturi numai) raportate de Cunniff [27] sunt neconcludente, dar au deschis o direcție de cercetare pentru panouri hibride, subliniind că testarea este necesară pentru a stabili performanța balistică, chiar dacă se cunosc și se ierarhizează caracteristice mecanice ale fiecărui strat.

În sisteme hibride Spectra® / Kevlar®, diferențele de deformare transversală duc la concentrarea tensiunilor în zona impactului, reducând performanța balistică [73]. Influența ordinii straturilor a fost confirmată experimental prin testarea configurațiilor inversate [84].

Hibridizare bazată pe moduri de rupere prin forfecare/ tracțiune

Chen et al. au arătat că țesăturile UD din UHMWPE sunt mai predispuse la cedare prin forfecare la impactul cu proiectile cu margini ascuțite, deoarece filamentele sunt fixate de matrice și nu se pot deplasa ușor pentru a redistribui tensiunile. În schimb, țesăturile clasice pot disipa solicitările prin îndreptarea ondulației firelor, smulgerea acestora și formarea de „ferestre”, fiind astfel mai potrivite pentru straturile frontale. Testele au demonstrat că panourile

hibride depășesc performanța sistemelor UD mono-material, cu un raport optim masic țesătură/UD de aproximativ 1:3 [22]. Acest raport a fost confirmat și în studiile cu țesături aramidice, unde o configurație cu ~70% UD și ~30% țesătură Twaron a oferit cea mai bună protecție antitraumă. Totuși, după imersie în apă, panourile 100% UD au prezentat performanțe superioare celor hibride și țesute, sugerând o stabilitate mai bună a structurilor UD în medii dificile [42].

Fibra UHMWPE este susceptibilă la deteriorarea termică cauzată de alunecarea proiectilului în țintă. Acest lucru duce la cedarea prematură și la propagarea limitată a unde transversale. Înlocuirea primelor câteva straturi din față cu materiale aramidice ignifuge îmbunătățește absorbția de energie cu 27,09% [10], [94]. S-a demonstrat că țesăturile și pâslele reduc adâncimea de deformare în timpul procesului de impact [93], [95].

1.5. Stadiul actual al testelor cu panouri flexibile

Tabelul 1.1 arată câteva studii recente, de referință, cu panouri flexibile pentru protecție balistică. Se poate observa diversitatea proiectilelor folosite, dar și tendința de a combina țesături de fibre aramidice și UHMWPE, unele dintre cele mai performante și în panouri simple. Dar rezultatele sunt dificil de comparat din cauza diversității dimensiunilor panourilor, a muniției folosite dar și a parametrilor selectați pentru evaluarea comportării la impact. Totuși BFD eset des întâlnit ca parametru de evaluare a calității panoului de protecție.

Tabelul 1.1. Cercetări științifice privind panouri flexibile

Autor an	Proba/ materialul	Dimenisuni (mm)	Muniția	Viteza proiectilelor (m/s)	Observații/ rezultate
Chang 2021 [20]	- Kevlar + STF - Kevlar + poliuree - Kevlar + poliuree + STF	130 × 130	9 mm FMJ .44 Magnum	conform NIJ 0101.06	valori BFD sub limita NIJ
Shih 2022 [83]	- Kevlar + STF - Kevlar + rășină epoxidică - Kevlar + poliuree	130 × 130	9 mm FMJ .44 Magnum	412 ± 6 442 ± 18	valori BFD 34 – 66 mm
Ribeiro 2022 [76]	analizează panouri balistice flexibile alcătuite din Kevlar/Twaron și UHMWPE	nespecificate	9mm FMJ .357 Magnum .44 Magnum	350 – 450 până la 700	eficiență ridicată a combinațiilor
Mudzi 2022 [57]	țesătură UHMWPE Spectra 900 laminată cu diferite filme	130 × 130	.357 Magnum	435,9 ± 9	Valori BFD 13,5-19 mm
Zhu 2023 [98]	UHMWPE + țesătură aramidică (PPTA)	nespecificate	9 mm FMJ	nespecificată	valori BFD 21 – 38 mm

Tabelul 1.1. Cercetări științifice privind panouri flexibile, continuare

Autor an	Proba/ materialul	Dimenisuni (mm)	Muniția	Viteza proiectilelor (m/s)	Observații/ rezultate
Kukle 2024 [44]	14 pachete balistice hibride diferite (Kevlar, UHMWPE, acoperiri de grafen, straturi de aerogel)	225 × 225	9 mm FMJ	425 – 440	valori BFD 17 – 39 mm
Leiva Palomera 2025 [47]	Kevlar 29 + poliuretan	300 × 250	9 mm FMJ .22	nespecificată	glonțul 9 mm a perforat toate probele
Kondor 2025 [43]	-Kevlar CT709 -Kevlar CT709 + rășină epoxidică -Kevlar CT709 + poliuree	300 × 300	9 mm Parabellum	nespecificată	validare prin simulări numerice
Alexe 2025 [8]	Analizează diferite pachete balistice hibride din literatură	nespecificate	9 mm FMJ .44 Magnum 5.56 × 45 mm	nespecificată	-

1.6. Concluzii și direcții de cercetare

Teza a avut ca obiectiv investigarea panourilor balistice hibride, pornind de la o arhitectură monomaterial testată pentru calibrele 9×19 mm FMJ și .357 SIG FMJ, ulterior optimizată prin hibridizare pentru îmbunătățirea disipării energiei și a rezistenței globale. Structurile au fost realizate din semifabricate avansate furnizate de Teijin Aramid (Twaron® T730 [99], [100]), DuPont (Kevlar® XDS002 [112], Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ [109]) și Avient Corporation (Dyneema® SB21 [113]).

Obiectivele au inclus documentarea actuală asupra panourilor hibride flexibile, proiectarea și fabricarea de configurații noi (inclusiv materiale recente, neraportate anterior în literatura open-source), testarea experimentală, dezvoltarea unui model FEM la nivel mezo pentru optimizare și analiza mecanismelor de cedare a panourilor prin imagistică de mare viteză, fotografie de înaltă rezoluție și microscopie electronică (SEM).

CAPITOLUL 2 ORGANIZAREA TEZEI

Figura 2.1 prezintă o diagramă sugestivă a organizării tezei.

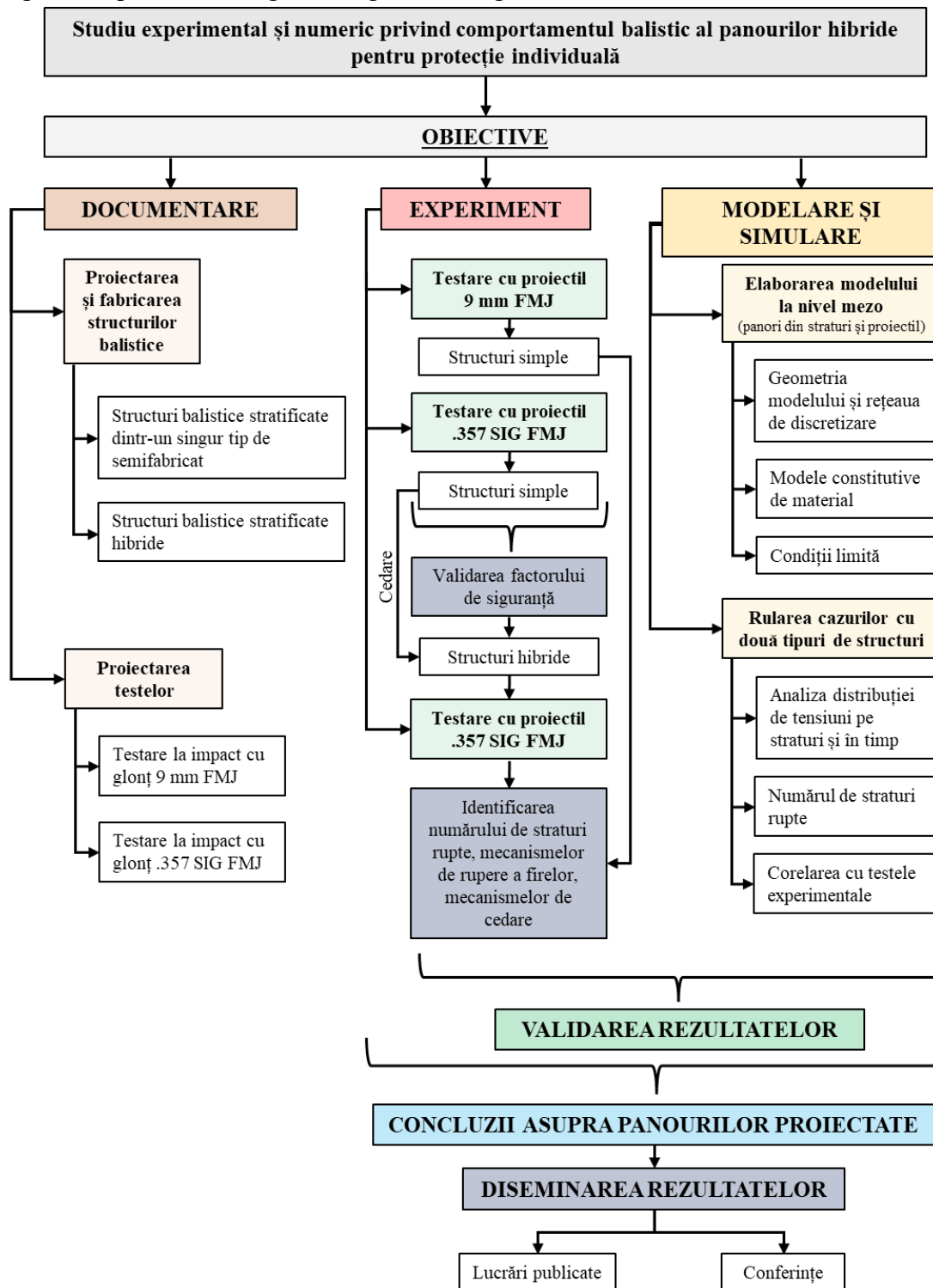


Fig. 2.1. Diagrama tezei

CAPITOLUL 3

MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A PROCESULUI DE IMPACT GLONȚ-ȚINTĂ

3.1. Rețele folosite în simularea numerică a impactului

Există două metode fundamentale pentru formularea ecuațiilor fizice care descriu fenomenele: metoda Euler și metoda Lagrange. Metoda Euler, considerată o metodă „spațială” este, de obicei, asociată cu metoda diferențelor finite (MDF). Metoda Lagrange, cunoscută drept o metodă „materială”, este reprezentată, în general, prin metoda elementelor finite (MEF) [37], [78], [79], [85].

3.2. Modelarea materialelor și a cedării

3.2.1. Modele constitutive de material

În analiza impactului dintre proiectil și panourile de protecție, utilizarea proprietăților materialelor independente de temperatură este justificată de observații termografice și de modele raportate în literatură. Studiile indică faptul că materiale precum compozitele armate cu fibre aramidice sau de sticlă își mențin proprietățile mecanice într-un interval larg de temperatură. Pentru impactul unui glonț de 9 mm, la viteze de 250–400 m/s, procesul este tratat ca fiind izoterm, deoarece efectele termice sunt reduse comparativ cu mecanismele dominante de cedare: rupere, deformare, delaminare și frecare [9], [37], [51].

Modelul biliniar cu durificare este frecvent utilizat în analizele ce implică deformări mari. Acest model definește curba tensiune-deformație pe baza limitei de curgere și a modulului tangent al materialului analizat. Panta primului segment al curbei corespunde modulului de elasticitate, E , iar panta celui de-al doilea segment reprezintă modulul tangent [63], [75], [101]. Se pot adopta și modele dependente de viteza de deformare [41], [80], dar există mai puține date experimentale din cauza complexității testelor și dispozitivelor de măsurare.

3.2.2. Criteriul deformației plastice echivalente maxime (EPS) pentru cedare

La modelarea impactului prin metoda elementului finit (FEM), în ANSYS Explicit Dynamics, criteriile de cedare a materialelor sunt esențiale pentru a descrie comportamentul materialului atunci când acesta este supus unor solicitări extreme. Alegerea corectă a criteriului de cedare influențează precizia rezultatelor, în special în simulările care implică deformații plastice, fisurare, rupere sau alte forme de deteriorare a materialului.

Criteriul presupune că inițierea ruperii are loc atunci când deformația plastică echivalentă, acumulată, atinge o valoare critică, specifică materialului. În cadrul simulărilor realizate cu ANSYS Explicit Dynamics, atingerea valorii critice a deformației plastice echivalente conduce la pierderea continuității cinematice prin separarea nodurilor comune elementelor adiacente, fără ștergerea elementelor din model. Această abordare permite conservarea masei și a energiei interne și oferă o descriere numeric stabilă a propagării fisurii în regim de impact. Criteriul EPS descrie condiția de inițiere a ruperii, fără a modela explicit

mecanismele micromecanice ale fracturii ductile. Cu toate acestea, datorită robusteții numerice și necesarului redus de parametri, acesta este larg utilizat în simulările de impact [11], [18], [91], [101].

În această teză, ruperea materialului este modelată în cadrul simulărilor de impact realizate cu ANSYS Explicit Dynamics (2023), utilizând criteriul de deformare plastică echivalentă maximă (equivalent plastic strain – EPS). Abordarea este una fenomenologică, frecvent utilizată în analizele dinamice explicite datorită robusteții numerice și necesarului redus de parametri de calibrare.

3.3. Modele ale impactului proiectil-panou balistic stratificat

3.3.1. Prezentarea modelului

Acest subcapitol analizează impactul unui proiectil asupra a două configurații distincte de panouri balistice, diferențiate prin alcătuirea stratificată a panourilor. Primul model investigat este constituit din 15 straturi de Twaron T730, iar cel de-al doilea model este alcătuit din 1 strat de Kevlar EXO, urmat de 15 straturi de Twaron T730, având ca obiectiv evaluarea influenței introducerii unui strat suplimentar cu proprietăți mecanice diferite asupra comportamentului balistic al ansamblului. Trebuie subliniat că modelele de material s-au bazat pe literatură, iar pentru EXO am propus doar un model cu parametri îmbunătățiți, bazat pe observațiile de la rezultatele experimentale.

În continuare sunt prezentate modelele dezvoltate de autor: un model de impact proiectil–panou balistic stratificat realizat dintr-un singur tip de material, respectiv un model de impact proiectil–panou balistic stratificat alcătuit din două tipuri de materiale. Detaliile celor două modele sunt sintetizate în Tabelul 3.1 și Tabelul 3.2.

Tabelul 3.1. Detaliile modelului de impact proiectil-panou din 15 straturi Twaron T730

	Modelele constitutive de material
<i>Cămașa glonțului</i> (alamă - brass)	Bilinar cu durificare, omogen și izotrop
<i>Miezul</i> (plumb sau aliaj de plumb)	
<i>Straturile de Twaron T730</i>	
	Geometria
<i>Panoul</i> (15 Twaron T730)	15 straturi, grosime strat- 0,4 mm 120 mm x 120 mm
<i>Glonțul de .357 SIG</i>	grosimea cămășii – 0,6 mm
	Condiții la margine
<i>Panou</i>	Prindere rigidă în 2 laturi opuse
	Condiții de interacțiune
<i>Glonțul</i> (cămașă + miez)	Frecare Coeficient de frecare 0,5, Coeficient dinamic de frecare 0,5
<i>Panou 15 straturi Twaron</i>	Frecare Coeficient de frecare 0,2, Coeficient dinamic de frecare 0,5

Tabelul 3.2. Detaliile modelului de impact proiectil-panou dintr-un strat de Kevlar EXO și 15 straturi Twaron T730

	Modelele constitutive de material
Cămașa glonțului (alamă - brass)	Biliniar cu durificare, omogen și izotrop
Miezul (plumb sau aliaj de plumb)	
Straturile de Twaron T730	
Stratul de Kevlar EXO	
	Geometria
Panoul (1 exo+15 Twaron T730)	1 strat EXO, grosime 0,6 mm 15 straturi Twaron, grosime strat- 0,4 mm 120 mm x 120 mm
Glonțul de .357 SIG	grosimea cămășii – 0,6 mm
	Condiții la margine
Panou	Prindere rigidă în 2 laturi opuse
	Condiții de interacțiune
Glonțul (cămașă + miez)	Frecare Coeficient de frecare 0,5, Coeficient dinamic de frecare 0,5
Panou 1strat Kevlar EXO + 15 straturii Twaron T730	Frecare Coeficient de frecare 0,2, Coeficient dinamic de frecare 0,5

3.3.2. Modelul impactului proiectil-panou balistic stratificat simplu

Modelul realizat este alcătuit din mai multe corpuri: glonțul, care include două componente (cămașă și miez) conectate printr-o legătură de tip „frecare” și panoul de 15 straturi având condiția de interacțiune tot „frecare”. Introducând frecarea, simularea devine mai realistă. Luând în considerare frecarea, proiectilul este mai puțin deformat [62].

Panoul are o suprafață de 120 mm × 120 mm și 15 straturi cu prindere rigidă pe 2 laturi, având grosimea sumă a straturilor componente. Se simulează o singură lovitură pe centrul panoului.

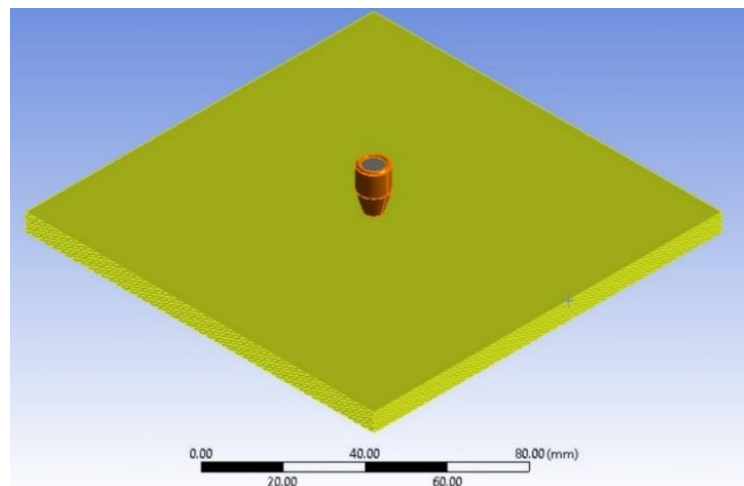
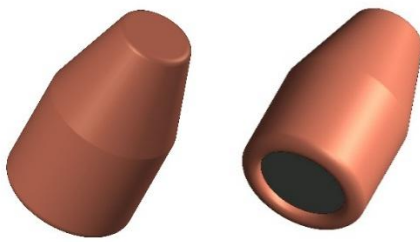
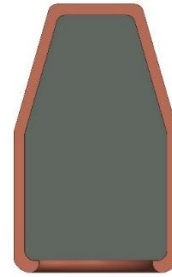


Fig. 3.1. Modelul cu 15 straturi Twaron T730

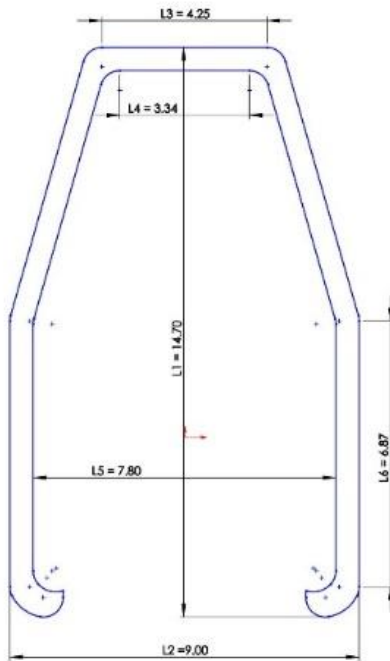
Glonțul de .357 SIG a fost desenat de autor, iar valorile parametrilor pentru geometrie sunt evidențiate în Figura 3.2, iar grosimea cămășii fiind 0,6 mm.



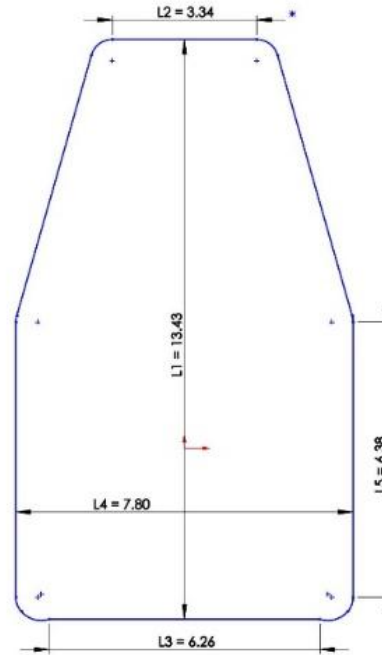
a) glonțul de .357 SIG modelat



b) secțiunea glonțul de .357 SIG modelat



c) dimensiunile geometrice ale cămășii



d) dimensiunile geometrice ale miezului

Fig. 3.2. Glonțul de .357 SIG modelat de către autor

În Figura 3.3 se observă elementele utilizate pentru fiecare corp și rețeaua de discretizare asociată modelului numeric. Proiectilul este reprezentat prin două corpuri distincte, discretizate cu o rețea generată automat, predominant din elemente tetraedrale. Partea frontală, cu geometrie conică, prezintă o rafinare a discretizării în zona de contact, pentru a surprinde mai bine fenomenele locale de impact. Structura de 15 straturi este discretizată cu elemente hexaedrale regulate, dispuse uniform, asigurând stabilitate numerică și o bună reprezentare a câmpurilor de tensiuni și deformații în timpul impactului. Dimensiunea elementelor este aleasă astfel încât să existe o tranziție coerentă între discretizarea proiectilului și cea a țintei, permițând o simulare corectă a interacțiunii dintre cele două corpuri.

Modelul numeric este discretizat într-un număr total de 219674 elemente finite și 441036 noduri, asigurând un nivel adecvat de rezoluție pentru surprinderea fenomenelor tranzitorii asociate impactului balistic.

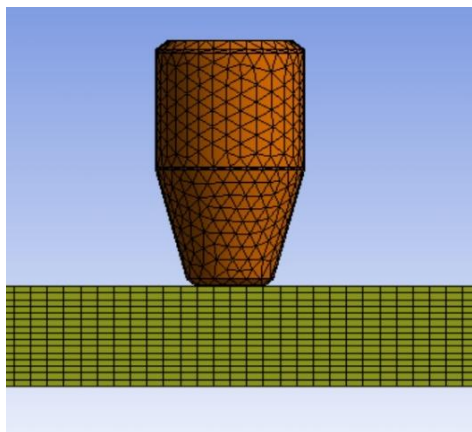


Fig. 3.3. Rețeaua de discretizare pentru glonț și straturile de Twaron T730

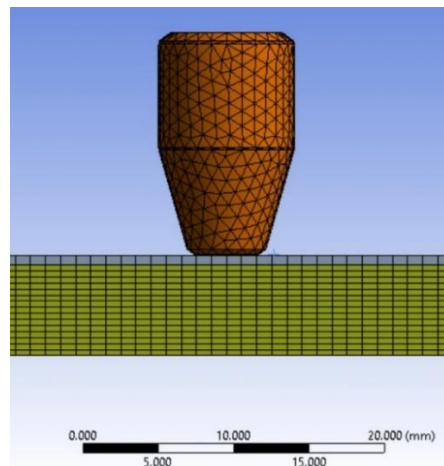


Fig. 3.4. Rețeaua de discretizare pentru glonț și panoul hibrid cu un strat Kevlar EXO și 15 straturi Twaron T730

3.3.3. Modelul impactului proiectil-panou balistic stratificat cu un strat de Kevlar EXO

Modelul realizat este alcătuit din mai multe corpuri: glonțul, care include două componente (cămașă și miez) conectate printr-o legătură de tip „frecare” și panoul format dintr-un strat de Kevlar EXO și 15 straturi Twaron T730, având condiția de interacțiune „cu frecare”.

Dimensiunile corpurilor modelului sunt următoarele: panoul are o suprafață de 120 mm × 120 mm și 15 straturi cu prindere rigidă pe 2 laturi. Se simulează o singură lovitură pe centrul plăcii.

Rețeaua de discretizare este aceeași ca la cazul anterior (Fig. 3.4). Acest modelul numeric include un total de 234049 elemente finite și 470313 noduri, indicând o discretizare mai densă comparativ cu modelul alcătuit exclusiv din straturi de Twaron T730, ca urmare a introducerii stratului suplimentar cu proprietăți mecanice diferite. Această abordare asigură o reprezentare fidelă a interacțiunilor dintre straturi și o captare adecvată a gradientilor de tensiune și deformație generate în timpul impactului.

3.3.4. Modele constitutive de material în modelarea realizată

În aceste simulări au fost utilizate următoarele modele constitutive de materiale:

- cămașa glonțului (alamă - brass) cu un model biliniar cu durificare, omogen și izotrop;
- miezul (din plumb sau aliaj de plumb) tot după un biliniar cu durificare, omogen și izotrop.

Straturile panourilor au caracteristicile mecanice din Tabelele 3.4, dar modelul constitutiv al stratului a fost considerat omogen și izotrop, biliniar cu durificare, o simplificare acceptată dacă modelul se comportă realist și pentru câteva cazuri (de exemplu, număr de straturi ale panoului) este validat prin teste experimentale.

Criteriul de cedare pentru fiecare strat și pentru cămașa proiectilului a fost deformația plastică echivalentă la rupere (notată EPS).

Tabelul 3.3. Proprietăți mecanice pentru cămașa și miezul glonțului

Proprietăți mecanice pentru cămașa		Proprietăți mecanice pentru miez	
Proprietate	Valoare	Proprietate	Valoare
Densitate [$kg\ mm^{-3}$]	8,30e-006	Densitate [$kg\ mm^{-3}$]	1,134e-005
Modulul lui Young [MPa]	1,2e+05	Modulul lui Young [MPa]	11000
Coeficientul lui Poisson	0,34	Coeficientul lui Poisson	0,44
Modulul în volum [Pa]	1,25e+11	Modulul în volum [Pa]	3,055e+10
Modulul la forfecare [Pa]	4,4477e+10	Modulul la forfecare [Pa]	3,819e+09
Temperatură [$^{\circ}C$]	22	Temperatură [$^{\circ}C$]	22
Model cu întărire biliniară izotropă		Model cu întărire biliniară izotropă	
Limita de curgere inițială [MPa]	70	Limita de curgere inițială [MPa]	15
Constantă de întărire [MPa]	2000	Constantă de întărire [MPa]	40
Temperatura [$^{\circ}C$]	22	Temperatura [$^{\circ}C$]	22
		Deformația plastică la rupere	2

Tabelul 3.4. Proprietăți mecanice ale straturilor de Twaron T730 și EXO

Proprietățile mecanice ale straturilor de Twaron T730		Proprietățile mecanice ale straturilor de EXO	
Proprietate	Valoare	Proprietate	Valoare
Densitate [$kg\ mm^{-3}$]	1,444e-006	Densitate [$kg\ mm^{-3}$]	1,444e-006
Modulul lui Young [MPa]	90000	Modulul lui Young [MPa]	90000
Coeficientul lui Poisson	0,35	Coeficientul lui Poisson	0,35
Modulul în volum [Pa]	1e+11	Modulul în volum [Pa]	1e+11
Modulul la forfecare [Pa]	3,3333e+10	Modulul la forfecare [Pa]	3,3333e+10
Temperatură [$^{\circ}C$]	22	Temperatură [$^{\circ}C$]	22
Model cu întărire biliniară izotropă		Model cu întărire biliniară izotropă	
Limita de curgere inițială [MPa]	400	Limita de curgere inițială [MPa]	800
Modulul tangent [MPa]	18000	Modulul tangent [MPa]	18000
Temperatură [$^{\circ}C$]	22	Temperatură [$^{\circ}C$]	22
Deformația plastică la rupere	0,095	Deformația plastică la rupere	0,15

Modelul utilizat este izoterm, în sprijinul acestei simplificări fiind aduse două argumente: pe de o parte, Explicit Dynamics nu acceptă modele adiabactice, iar pe de altă parte, cercetările din literatură arată că în intervalul de viteze de impact cuprins între 250 m/s și 450 m/s, influențele termice pot fi considerate neglijabile în analiza distrugerii proiectilului și țintei.

3.3.5. Cazul de impact cu panoul format din 15 straturi de Twaron T730 cu viteza de impact de 450 m/s

Frecarea între glonț și straturi influențează modul în care sarcinile sunt distribuite și transferate, împiedicând o mișcare mai rapidă a glonțului și contribuind la creșterea tensiunilor în material și la transformarea unei părți a energiei cinetice a proiectilului în energie de frecare.

În această simulare, la momentul $7,5 \times 10^{-6}$ s, se observă ruperea primului strat, conform graficului din Figura 3.5c, la o tensiune echivalentă de aproximativ 2464,1 MPa. Straturile 2 și 3 au tensiuni echivalente mari.

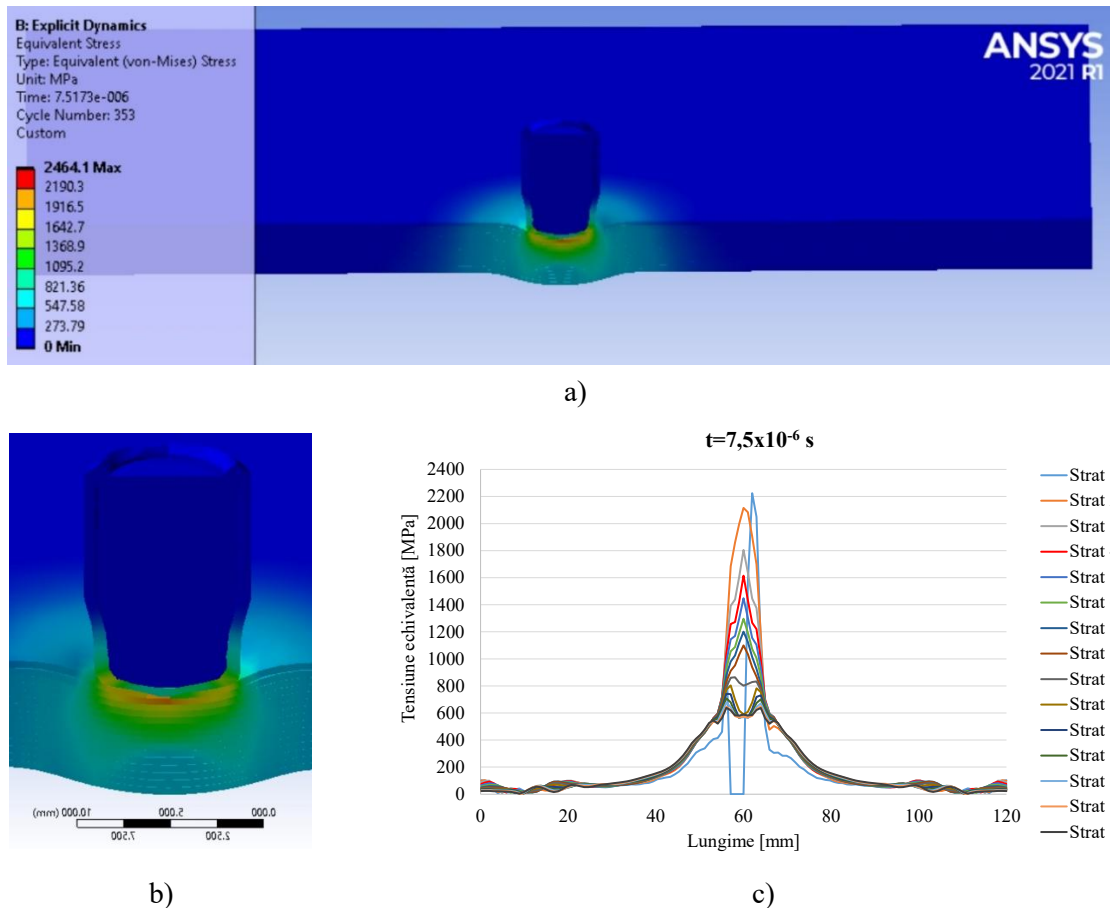


Fig. 3.5. Distribuția de tensiuni echivalente la impactul proiectilului .357 SIG cu panoul cu 15 straturi Twaron T730, la momentul $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s: a) vedere a secțiunii centrale prin sistem (prin axa proiectilului); b) detaliu în zona contactului direct (aceiași scară de culori ca în a)); graficul tensiunilor echivalente pe fiecare strat, în secțiunea centrală

La momentul $3,75 \times 10^{-5}$ s (Fig. 3.6), se evidențiază faza în care unda de șoc a pătruns deja în mai multe straturi, observându-se ruperea stratului 2 și 3, iar solicitarea maximă nu mai este limitată doar la stratul frontal. Vârful central foarte pronunțat indică zona de contact și transmiterea intensă a compresiei prin grosime, pe stratul 4 atingând valorile cele mai mari — semn al concentrării deteriorării în zona unde energia începe să fie disipată prin întinderea fibrelor și ondulara suprafeței.

Diferența mare între straturile 1–5 și cele din spate arată că procesul de absorbție este încă localizat în jumătatea frontală a pachetului. Zonele laterale mai ridicate (la 30–40 mm și 80–90 mm) reflectă începutul propagării undelor de încovoiere în planul plăcii, dar fără a domina încă răspunsul structural global.

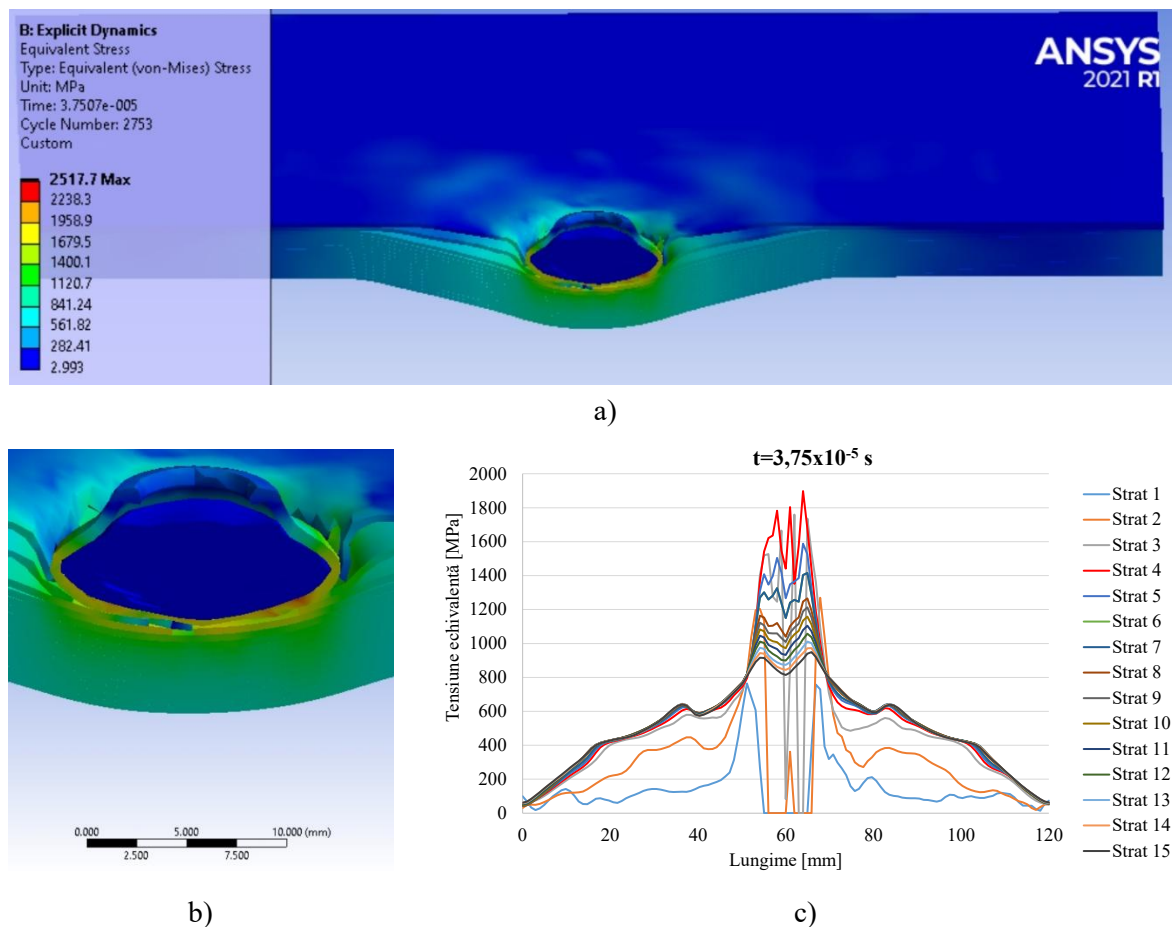


Fig. 3.6. Distribuția de tensiuni echivalente la impactul proiectilului .357 SIG cu panoul cu 15 straturi Twaron T730, la momentul $t = 3,75 \times 10^{-5}$ s: a) vedere a secțiunii centrale prin sistem (prin axa proiectilului); b) detaliu în zona contactului direct (aceiași scară de culori ca în a)); graficul tensiunilor echivalente pe fiecare strat, în secțiunea centrală

La momentul $1,5 \times 10^{-4}$ s (Fig. 3.7) distribuțiile de tensiune indică un regim clar post-impact (valori sub limita de curgere a modelului de material), dominat de vibrația globală a panoului. Zona centrală (45–80 mm) prezintă niveluri reduse și oscilante ale tensiunii pentru majoritatea straturilor, semn că energia locală a impactului a fost deja disipată, iar regiunea se află într-o fază de relaxare dinamică.

Maximele pronunțate din zonele laterale (15–30 mm și 95–110 mm) sunt asociate cu modurile de încovoiere ale straturilor și cu reflexia undelor la limitele panoului, nu cu penetrarea locală. Diferențele dintre straturi sunt moderate, ceea ce arată că structura lucrează acum ca un ansamblu, cu solicitări distribuite prin grosime și fără concentrații critice persistente în zona de impact.

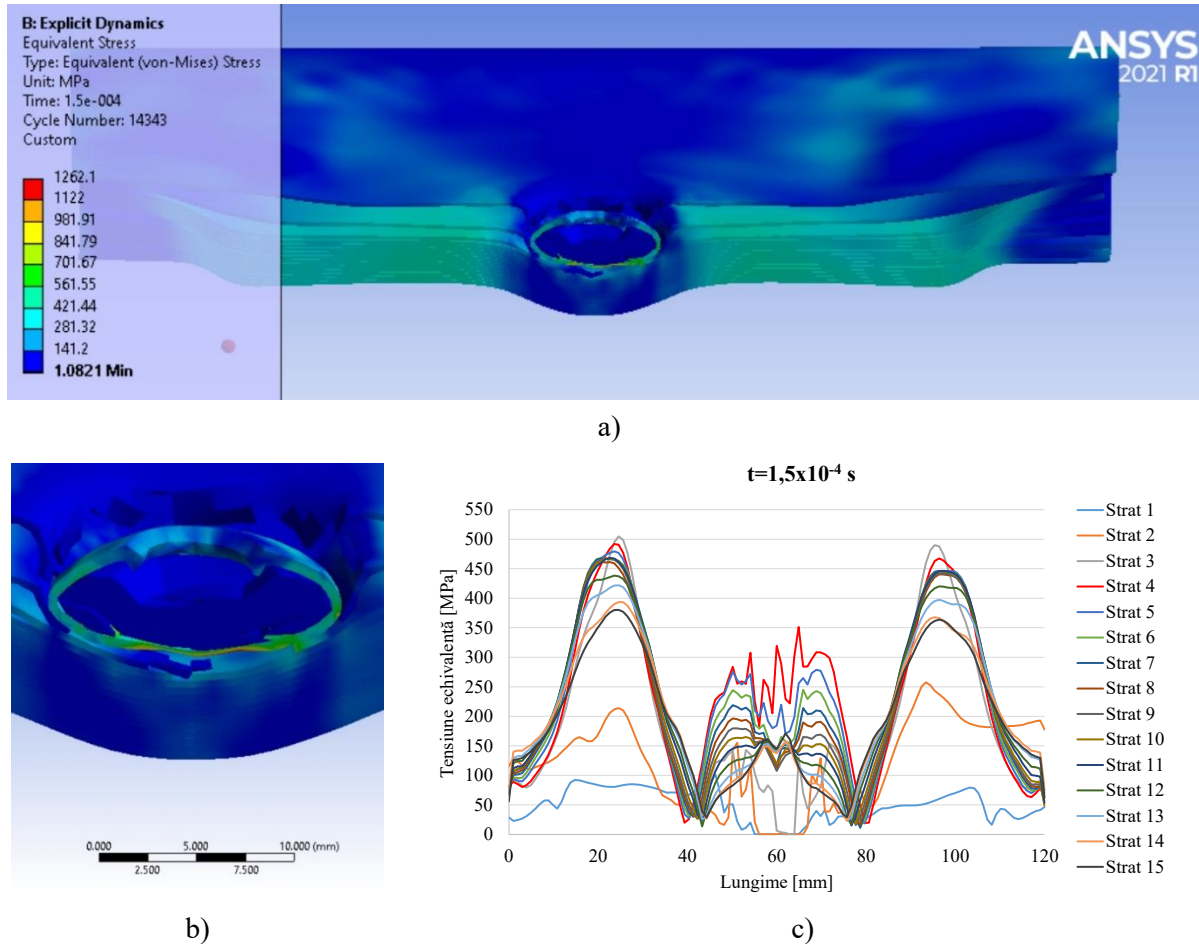
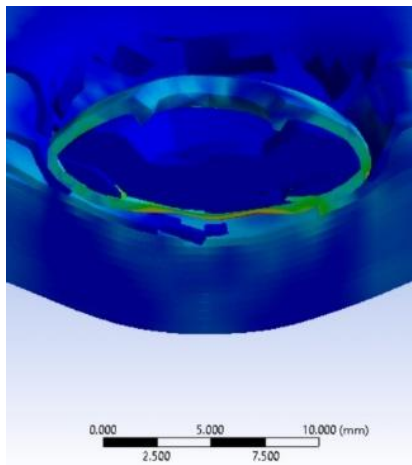


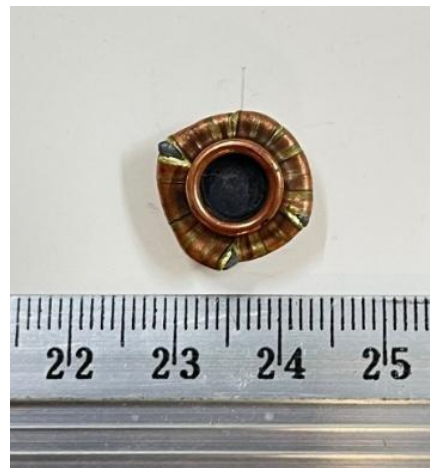
Fig. 3.7. Distribuția de tensiuni echivalente la impactul proiectilului .357 SIG cu panoul cu 15 straturi Twaron T730, la momentul $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s: a) vedere a secțiunii centrale prin sistem (prin axa proiectilului); b) detaliu în zona contactului direct (aceiași scară de culori ca în a)); graficul tensiunilor echivalente pe fiecare strat, în secțiunea centrală

În urma testelor balistice efectuate pe panoul alcătuit din 15 straturi de Twaron T730, testat cu muniție calibru .357 SIG, s-a constatat experimental că proiectilele corespunzătoare loviturilor 1 și 2 au fost oprite la nivelul stratului 4. Corelând aceste observații cu rezultatele obținute în modelul numeric, se confirmă tendința ca structura stratificată să absoarbă majoritatea energiei impactului în primele straturi frontale. Simularea arată o concentrare a deteriorării și a tensiunilor maxime în zona straturilor 1–4, ceea ce susține concluzia experimentală că, în anumite condiții de impact, un pachet de 15 straturi de Twaron T730 poate opri un glonț .357 SIG încă în primele 3–4 straturi ale configurației.

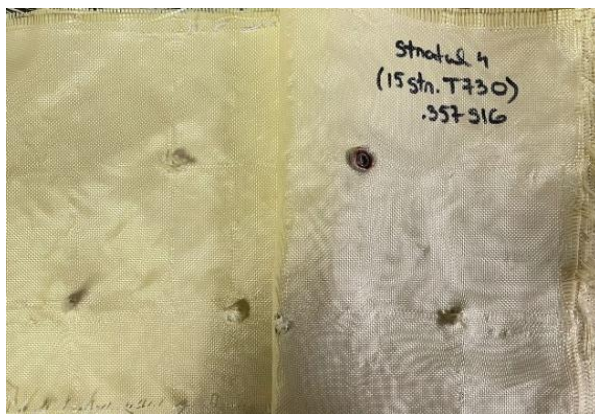
În Figura 3.8a este detaliat proiectilul rezultat din simulare iar în Figura 3.8b este fotografia glonțului .357 SIG oprit pe stratul 4. Forma deformată a proiectilului real este asemănătoare cu cea obținută în simulare, simularea putând fi considerată realistă astfel încât modelul să fie util pentru studiul impactului și pentru optimizarea panoului prin modificarea numărului de straturi.



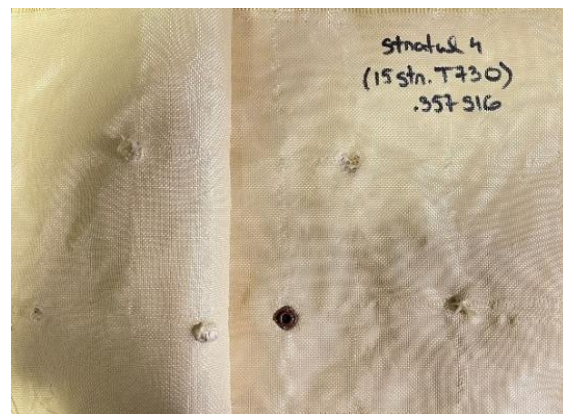
a) glonțul oprit în straturile 3-4 din modelul realizat



b) glonțul din lovitura 2, oprit în stratul 4



c) identificarea glonțului 1 pe stratul 4, din testările experimentale



d) identificarea glonțului 1 pe stratul 4, din testările experimentale

Fig. 3.8. Comparația model numeric – testări experimentale pentru panoul de 15 straturi
Twaron T730, testat cu glonț .357 SIG

3.3.6. Cazul de impact cu panoul hibrid, format dintr-un strat de Kevlar EXO + 15 straturi de Twaron T730 cu viteza de impact de 450 m/s

La momentul $7,5 \times 10^{-6}$ s (Fig. 3.9), nu se observă ruperea stratului EXO, dar tensiunile echivalente ating valori semnificative, apropiate de limita de rupere (2354,3 MPa pentru stratul 1, conform Figurii. 3.9a). Câmpul concentrat de tensiuni von Mises în stratul frontal, indică faptul că primul strat (stratul EXO) preia majoritatea solicitării locale, disipând energia prin deformare și inițiere de deteriorări. Straturile din spate sunt încă slab solicitate, ceea ce arată că unda de șoc nu a penetrat încă semnificativ pachetul stratificat, confirmând rolul critic al primului strat în atenuarea vârfului de tensiune.

Graficul din Figura 3.9c prezintă distribuția tensiunii echivalente pe fiecare strat, în secțiunea principală (care conține axa proiectilului), la momentul $7,5 \times 10^{-6}$ s, surprinzând propagarea inițială a undei de șoc în pachetul stratificat. Se observă un vârf pronunțat în zona centrală de impact, unde stratul 1 (EXO) atinge valorile maxime, semnificativ peste celelalte straturi și mai mare decât ce s-a obținut pentru același moment, dar pe panoul simplu. Scăderea progresivă a amplitudinii tensiunilor de la stratul 1 spre straturile mai adânci indică o atenuare

eficientă a undei de șoc prin grosime, datorată mecanismelor de deformare a fibrelor. Straturile din spate prezintă un răspuns mult mai difuz și de nivel redus, ceea ce arată că, în această fază timpurie a impactului, energia nu a fost încă transmisă integral către spatele panoului.

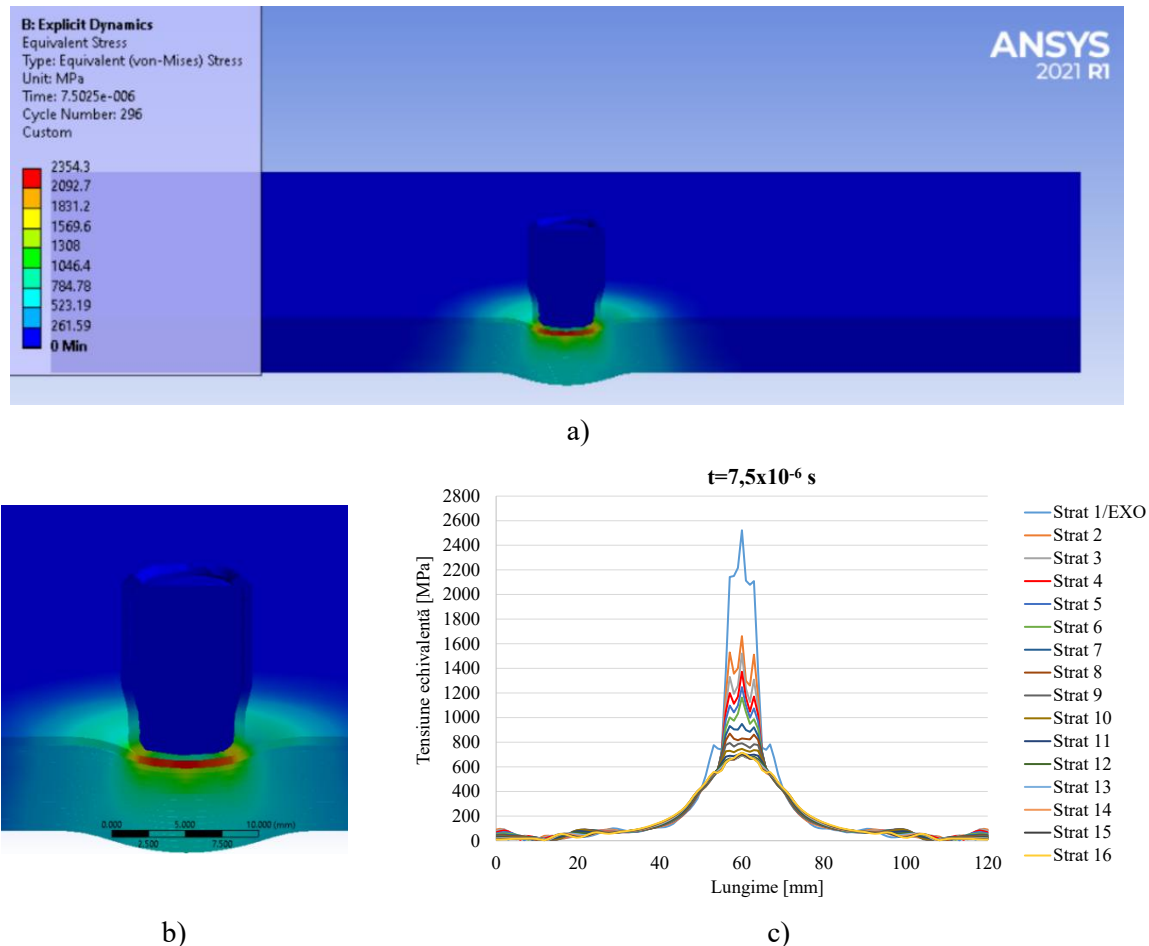


Fig. 3.9. Distribuția de tensiuni echivalente la impactul proiectilului .357 SIG cu panoul hibrid (1 strat EXO + 15 straturi Twaron T730), la momentul $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s: a) vedere a secțiunii centrale prin sistem (prin axa proiectilului); b) detaliu în zona contactului direct (aceiași scară de culori ca în a)); c) graficul tensiunilor echivalente pe fiecare strat, în secțiunea centrală

La momentul $3,75 \times 10^{-5}$ s, graficul din Figura 3.10c arată o fază mai avansată a propagării undei de șoc, când solicitarea nu mai este concentrată strict în punctul de impact, ci s-a distribuit spațial și prin grosimea pachetului. Vârful din stratul 1 rămâne cel mai ridicat, dar diferențele față de straturile 2–6 s-au redus, indicând transfer progresiv de sarcină către straturile interne. Forma cu două maxime laterale și o scădere locală în centru sugerează apariția unui regim dominat de deformare flexională și întindere membranară, nu doar compresiune locală. Straturile din spate încep să participe activ la preluarea eforturilor, ceea ce confirmă că energia impactului este redistribuită pe o zonă mai mare, reducând riscul de perforare locală, dar crescând solicitarea globală a panoului.

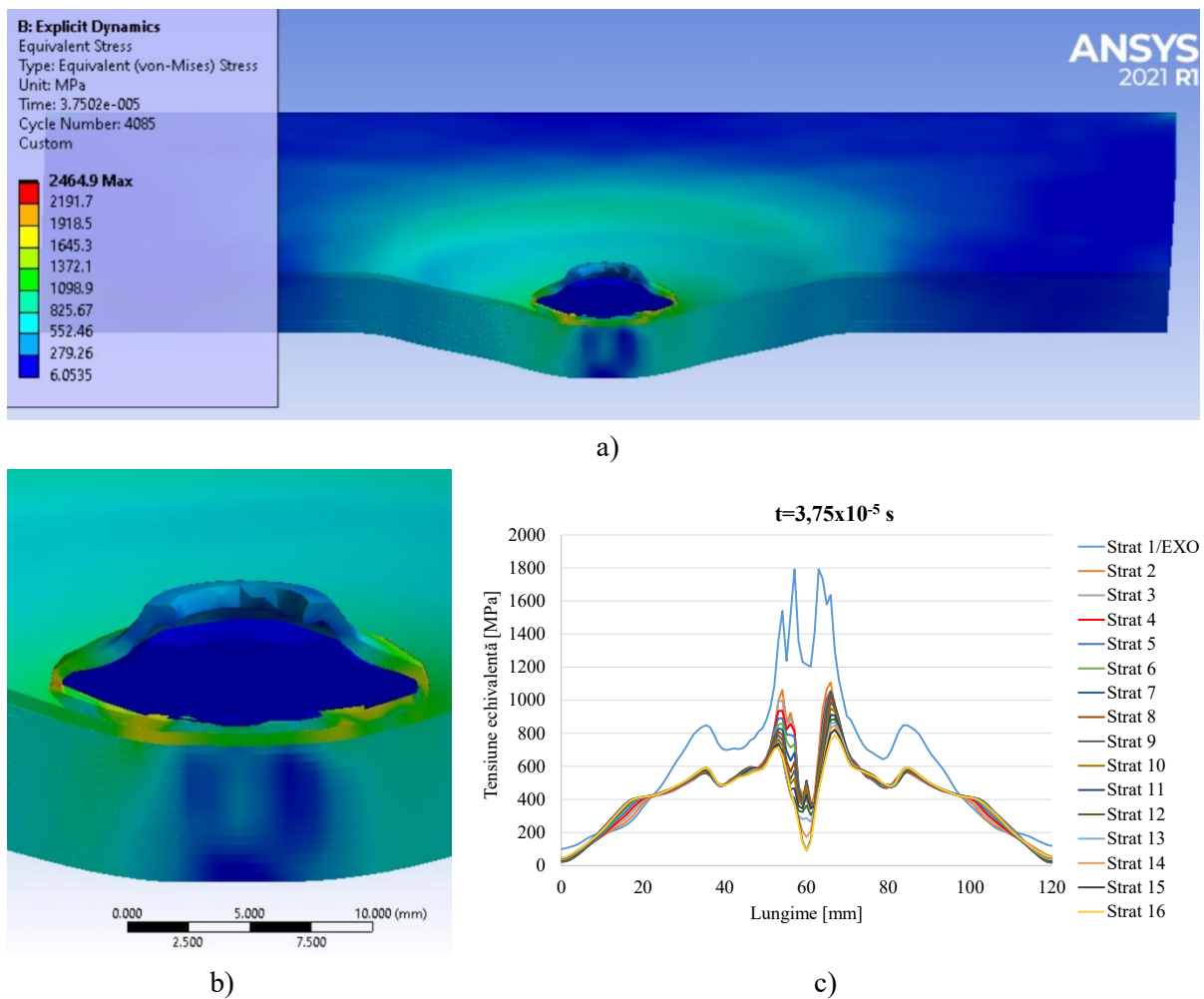


Fig. 3.10. Distribuția de tensiuni echivalente la impactul proiectilului .357 SIG cu panoul hibrid (1 strat EXO + 15 straturi Twaron T730), la momentul $t = 3,75 \times 10^{-5}$ s: a) vedere a secțiunii centrale prin sistem (prin axa proiectilului); b) detaliu în zona contactului direct (aceiași scară de culori ca în a)); c) graficul tensiunilor echivalente pe fiecare strat, în secțiunea centrală

Graficul la $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s (Fig. 3.11) arată un stadiu avansat al răspunsului structural, când comportarea este dominată de vibrația flexională globală a panoului. Distribuțiile devin mai uniforme între straturi, iar diferențele dintre ele sunt mult mai mici decât în fazele inițiale, semn că energia impactului a fost deja redistribuită prin întregul pachet laminat.

Se observă alternanțe de maxime și minime pe lungime, caracteristice modurilor proprii de vibrație ale plăcii (unde flexionale reflectate la margini). Stratul 1 nu mai concentrează solicitarea maximă locală, ceea ce indică faptul că faza critică de absorbție primară s-a încheiat, iar structura se află în regim de răspuns dinamic global, cu eforturi moderate dar distribuite pe suprafață mare.

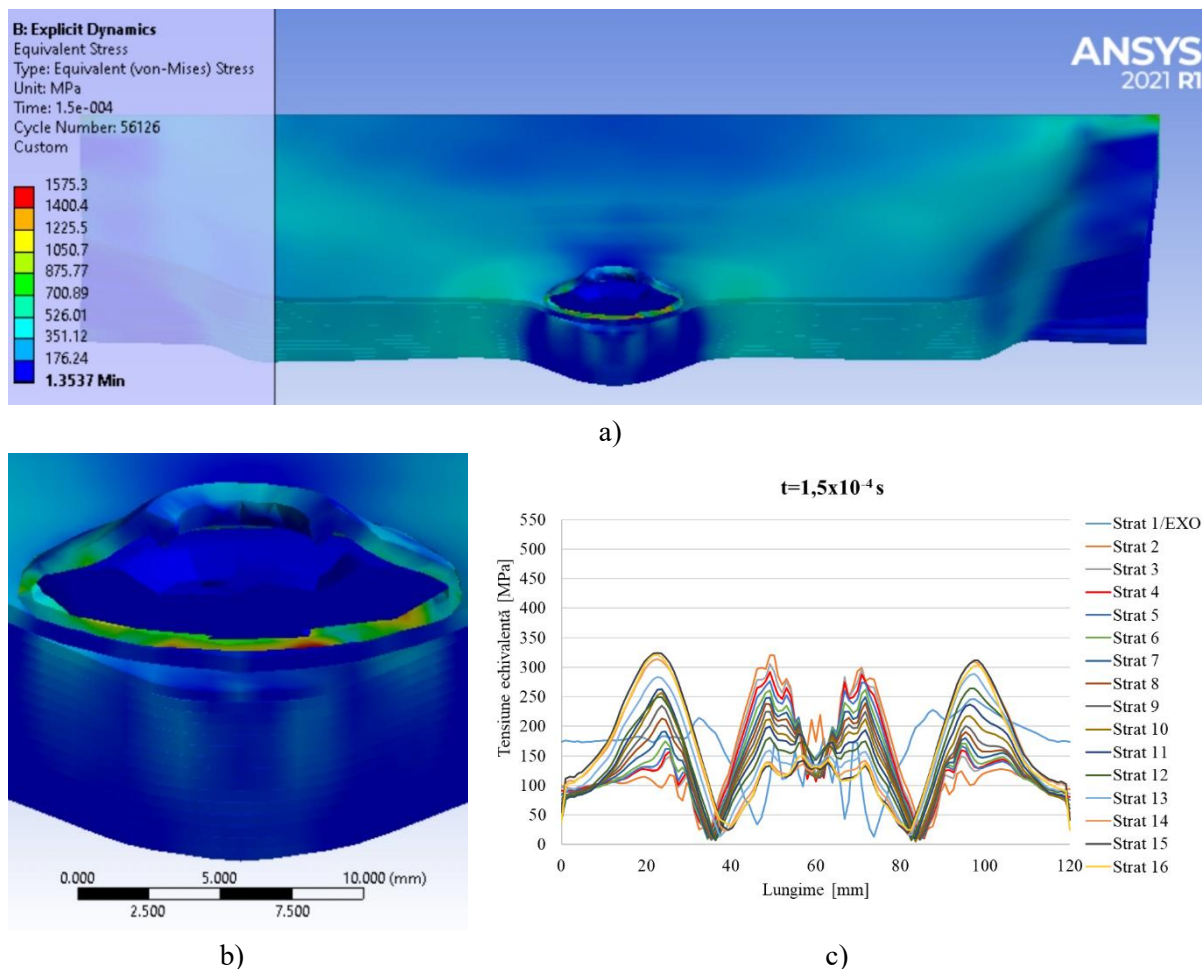
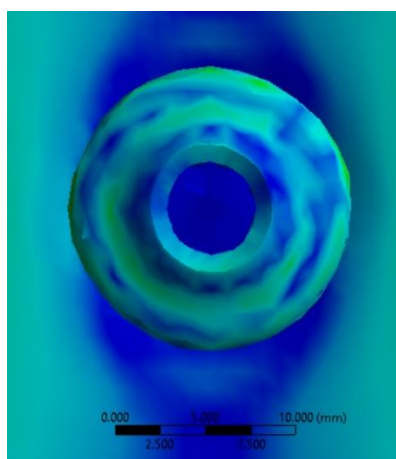


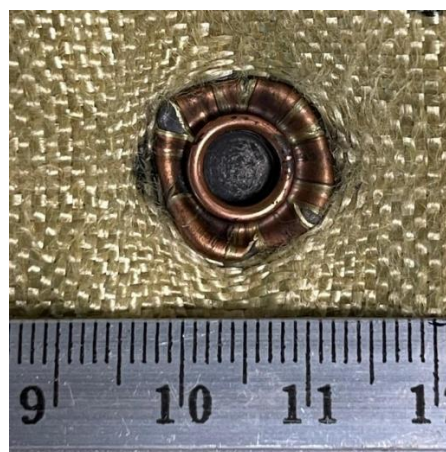
Fig. 3.11. Distribuția de tensiuni echivalente la impactul proiectilului .357 SIG cu panoul hibrid (1 strat EXO + 15 straturi Twaron T730), la momentul $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s: a) vedere a secțiunii centrale prin sistem (prin axa proiectilului); b) detaliu în zona contactului direct (aceiași scară de culori ca în a)); c) graficul tensiunilor echivalente pe fiecare strat, în secțiunea centrală

În urma testelor balistice realizate asupra panoului compus dintr-un strat de Kevlar EXO și 15 straturi de Twaron T730, utilizând muniție calibru .357 SIG, s-a constatat experimental că, în toate cele patru probe testate, fiecare dintre cele trei lovituri a fost oprită de stratul de Kevlar EXO (Fig. 3.12). Corelarea acestor observații experimentale cu rezultatele obținute din modelarea numerică confirmă rolul esențial al stratului de Kevlar EXO în absorbția majorității energiei de impact. Acest strat preia cea mai mare parte a solicitării locale, disipând energia prin deformare semnificativă și prin inițierea mecanismelor de deteriorare.

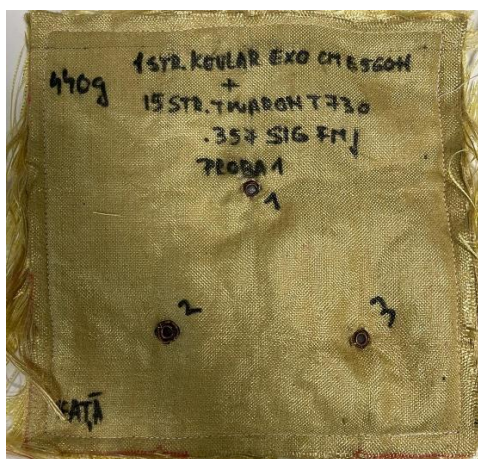
Rezultatele simulării evidențiază o concentrare a tensiunilor maxime și a degradărilor în zona stratului de Kevlar EXO, susținând concluzia experimentală conform căreia un pachet alcătuit dintr-un strat de Kevlar EXO și 15 straturi de Twaron T730 este capabil să oprească un proiectil de tip .357 SIG încă din primul strat.



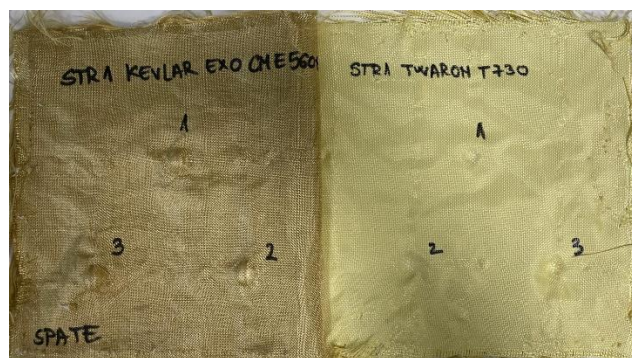
a) glonțul oprit în stratul de Kevlar EXO din modelul realizat



b) glonțul din lovitura 2, oprit în stratul de Kevlar EXO



c) identificarea glonțului 2 pe stratul de Kevlar EXO, din testările experimentale



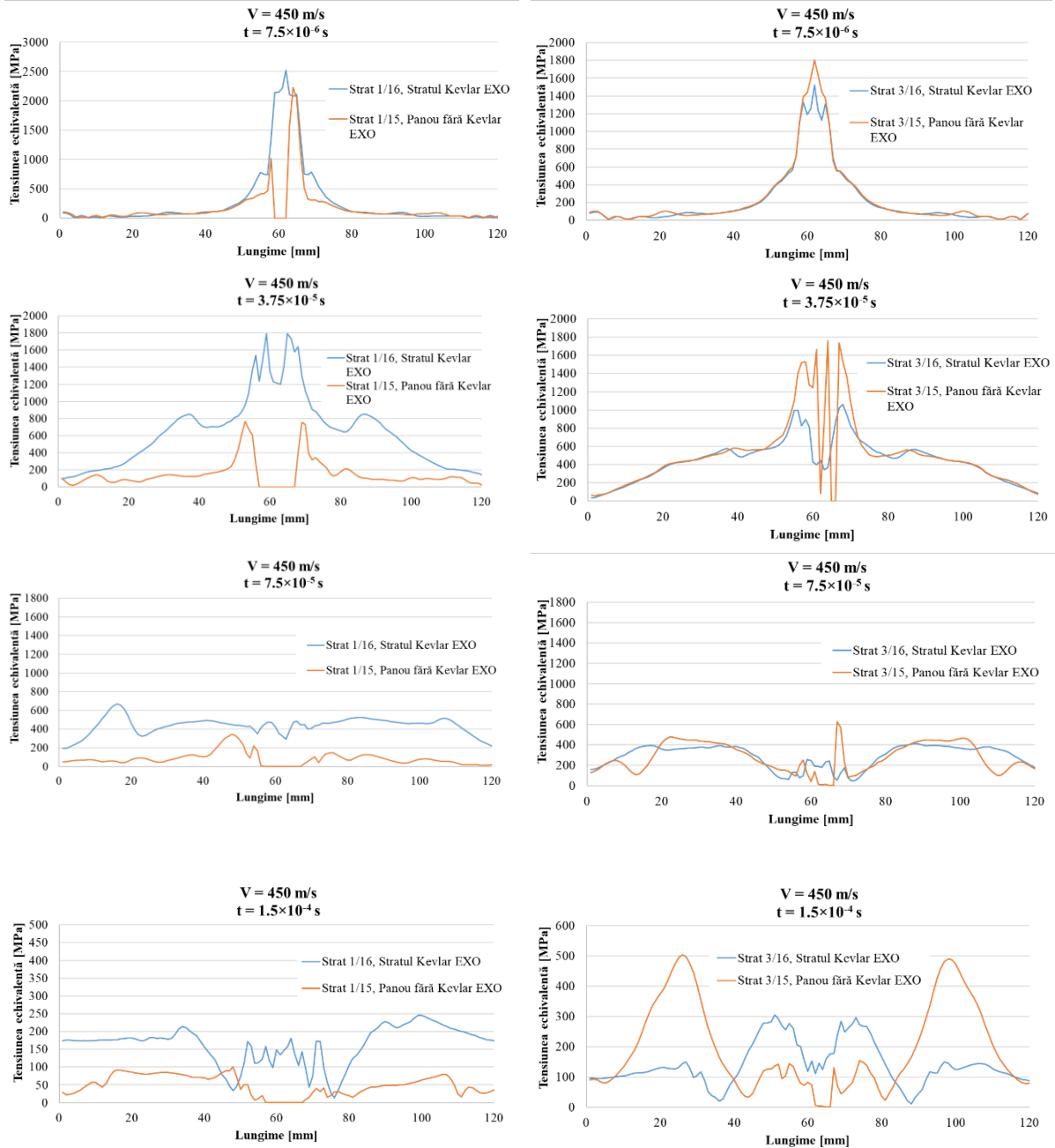
d) vedere din spate a stratului EXO, fără perforare completă

Fig. 3.12. Comparația model numeric – testări experimentale pentru panoul dintr-un strat de Kevlar EXO + 15 straturi Twaron T730, testat cu glonț .357 SIG

3.3.7. Analiza tensiunilor echivalente pe straturi pentru cele două structuri

Acest subcapitol prezintă distribuția tensiunilor echivalente (von Mises) la nivelul fiecărui strat component, pentru cele două configurații structurale analizate. Scopul este identificarea zonelor critice de solicitare și evidențierea modului în care arhitectura stratificată influențează mecanismele de preluare și disipare a eforturilor.

Graficele din Figura 3.13a arată că, imediat după impact ($t = 7 \times 10^{-6}$ s), structura cu Kevlar EXO dezvoltă un vârf de tensiuni echivalente mult mai ridicat și mai concentrat în zona impactului (~ 60 mm), ceea ce indică preluarea rapidă a solicitării și disiparea inițială a energiei în primul strat. Pe măsură ce timpul crește ($t = 3,75 \times 10^{-5}$ s $\rightarrow 1,5 \times 10^{-4}$ s), tensiunile în cazul structurii cu Kevlar EXO se redistribuie pe o lungime mai mare, păstrând însă niveluri superioare față de panoul fără EXO, semn că propagarea undei și încărcarea rămân mai bine „gestionate” de stratul frontal.



a) analiză pentru stratul 1

b) analiză pentru stratul 3

Fig. 3.13. Analiza tensiunilor echivalente pentru straturile 1 și 3 din structurile balistice, la viteza 450 m/s

În schimb, panoul fără EXO prezintă tensiuni mai reduse și mai puțin extinse, sugerând că energia este transmisă mai departe către straturile următoare în loc să fie absorbită predominant în stratul frontal. Evoluția confirmă rolul stratului de Kevlar EXO în concentrarea inițială a solicitării și în amortizarea/împrăștierea progresivă a tensiunilor, contribuind la oprirea proiectilului încă pe primul strat, chiar dacă acesta ar avea cedări localizate.

Pentru stratul 3 (Fig. 3.13b), imediat după impact ($t = 7 \times 10^{-6}$ s) se observă un vârf pronunțat de tensiuni în zona centrală pentru ambele configurații, însă panoul fără Kevlar EXO dezvoltă valori ușor mai mari, indicând o transmitere mai rapidă a undei de șoc către straturile

interioare. La momentele intermediare ($t = 3,75 \times 10^{-5}$ s și 7×10^{-5} s), diferența devine mai clară: structura fără EXO menține concentrații ridicate și oscilante ale tensiunilor echivalente în zona impactului, în timp ce varianta cu EXO prezintă o distribuție mai uniformă și valori mai reduse, semn că o parte semnificativă a energiei a fost deja disipată în straturile frontale. Spre finalul intervalului analizat ($t = 9,75 \times 10^{-5}$ s și $1,5 \times 10^{-4}$ s), tensiunile scad în zona centrală pentru ambele cazuri, dar panoul fără EXO arată creșteri mai mari în zonele laterale, sugerând o propagare mai amplă a solicitării. În ansamblu, evoluția confirmă că prezența stratului Kevlar EXO limitează transmiterea vârfurilor de tensiune către straturile profunde, reducând nivelul solicitărilor în stratul 3.

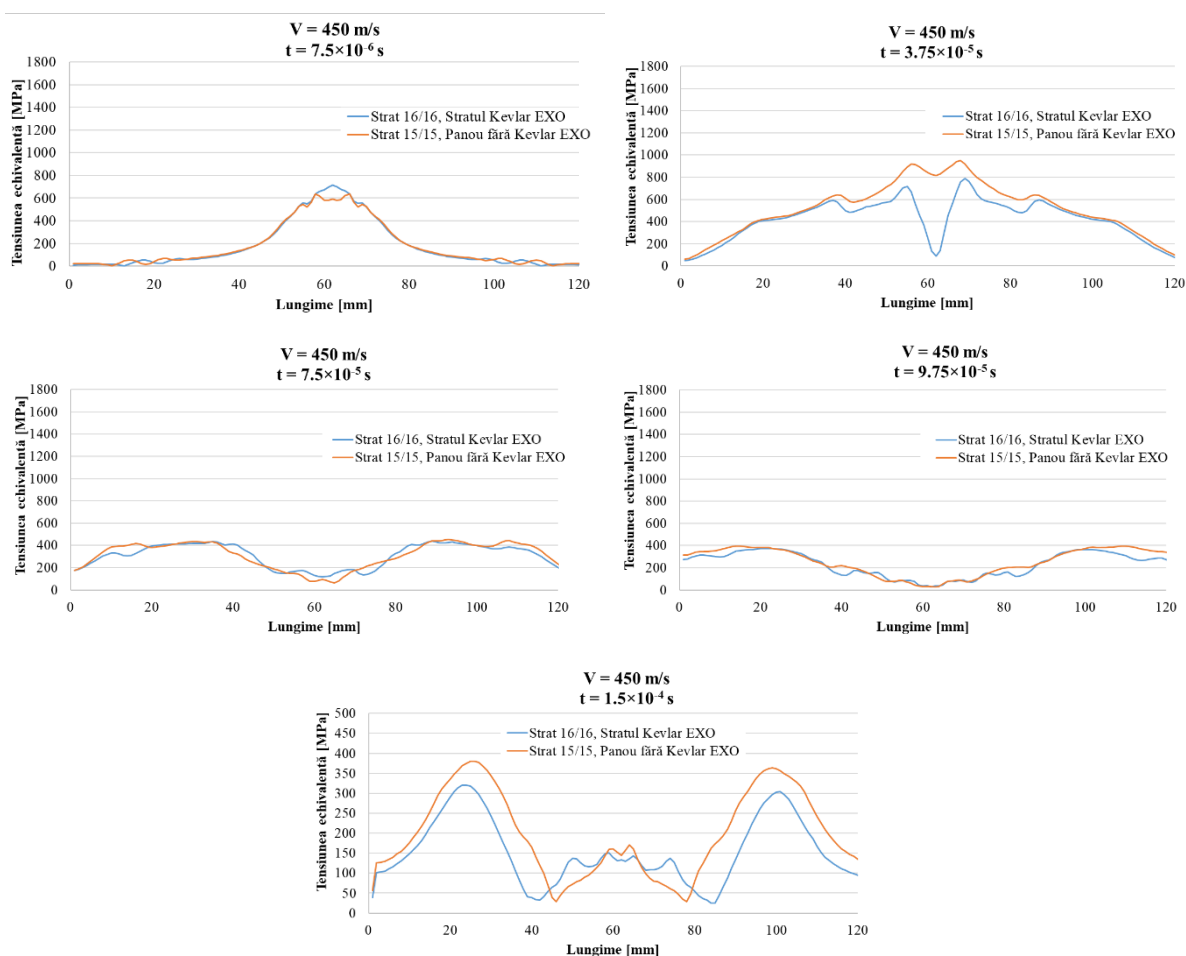


Fig. 3.14. Analiza tensiunilor echivalente pentru ultimul strat din structurile balistice la viteza 450 m/s

Pentru ultimul strat (Figura 3.14), la momentul inițial ($t = 7 \times 10^{-6}$ s) nivelul tensiunilor este încă redus și similar în ambele configurații, indicând că unda de șoc nu a ajuns încă semnificativ în zona posterioară. La $t = 3,75 \times 10^{-5}$ s apare o diferențiere clară: structura fără Kevlar EXO dezvoltă tensiuni mai mari și mai extinse, în timp ce varianta cu EXO prezintă un minim pronunțat în zona centrală, semn al atenuării undei pe parcursul traversării pachetului. Pe măsură ce răspunsul structural evoluează ($t = 7 \times 10^{-5}$ s și $9,75 \times 10^{-5}$ s), distribuțiile devin mai uniforme, dar panoul fără EXO menține niveluri ușor superioare, indicând o transmitere mai

importantă a energiei reziduale. La momentul final ($t = 1,5 \times 10^{-4}$ s), diferențele laterale sunt evidente, cu tensiuni mai ridicate în structura fără EXO, confirmând că prezența stratului frontal Kevlar EXO reduce semnificativ amplitudinea solicitărilor care ajung în ultimul strat.

3.6. Concluzii privind rezultatele simulării impactului

Eficiența unei astfel de simulări este strâns legată de cunoștințele operatorului în ceea ce privește modelarea comportamentului materialelor, de expertiza în utilizarea metodei elementelor finite și de înțelegerea proceselor ce se desfășoară în timpul impactului.

Simulările pot fi esențiale pentru evaluarea siguranței armurilor individuale sau a plăcilor balistice destinate blindajului, evidențiind detalii specifice ale procesului de distrugere a glonțului și ale interacțiunii acestuia cu ținta.

Acest capitol a prezentat două modele de impact între două tipuri de panou stratificat și un proiectil, .357 SIG, analizat la nivel macro (panoul format din straturi considerate omogene), evidențiind următoarele aspecte.

- Toate corpurile și materialele implicate au fost considerate în domeniul elasto-plastic, aplicând criteriul de cedare bazat pe deformarea plastică echivalentă la rupere (EPS - equivalent plastic strain). Spre deosebire de alte referințe bibliografice, unde unul dintre corpuri (de regulă, proiectilul) este considerat rigid, acest model presupune toate corpurile deformabile, ceea ce oferă un răspuns mai realist la impact, dar necesită o atenție deosebită în realizarea simulărilor.
- Ansamblul graficelor evidențiază că modelul virtual, atribuit stratului frontal din Kevlar EXO, concentrează și absoarbe cea mai mare parte a energiei de impact, reducând semnificativ transmiterea vârfurilor de tensiune către straturile interioare și către ultimul strat. În lipsa acestuia, solicitările se propagă cu intensitate mai mare pe grosimea panoului, cu valori mai mari și distribuții mai extinse ale tensiunilor în structura laminată. Evoluția temporală confirmă rolul EXO în atenuarea undei de șoc și în disiparea progresivă a energiei prin mecanisme de deformare și deteriorare locală.
- Simulările efectuate pe panouri similare, testate și experimental, au permis validarea modelului prin compararea numărului de straturi distruse.
- Analiza tensiunilor echivalente la diferite momente și pe diverse straturi a permis identificarea etapelor impactului, evidențiind clar fazele asociate cu penetrarea parțială.

Simularea numerică oferă un avantaj major prin posibilitatea de a urmări în detaliu câmpurile de tensiuni în timp și spațiu, informații dificil sau imposibil de obținut exclusiv experimental și, de asemenea modelarea permite testarea virtuală pentru a reduce numărul de panouri care ar fi testate pentru realizarea unui prototip.

CAPITOLUL 4

REALIZAREA STRUCTURILOR DE PROTECȚIE BALISTICĂ

4.1. Semifabricatele utilizate la realizarea structurilor balistice

Configurația tipică a unui echipament individual de protecție balistică include un sistem balistic alcătuit din multiple straturi de materiale cu rol principal de oprire a proiectilelor, introdus într-o husă textilă de protecție. Numărul straturilor variază în funcție de material și nivelul de protecție, iar acestea pot fi țesături, laminate unidirecționale sau structuri multiaxiale. Sistemele pot fi monomaterial sau hibride, iar ordinea și combinația straturilor influențează decisiv performanța; prezența unor straturi nebalistice pentru reducerea traumei face irelevantă comparația doar după numărul de straturi. Asamblarea panourilor flexibile se realizează prin simpla suprapunere în husă sau prin coasere, existând mai multe tehnici: coasere pe contur, în puncte/colțuri, prin linii paralele sau diagonale și prin matlasare (modele romb, pătrat etc.), fiecare influențând comportarea la impact și mobilitatea straturilor.

Pentru realizarea panourilor de protecție balistică s-au utilizat semifabricatele:

- Twaron® T730 (produs de Teijin Aramid AVE) [99], [100],
- Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H (produs de DuPont) [109],
- Kevlar® XD S002 (produs de DuPont) [112],
- Dyneema® SB21 (produs de DSM, ulterior Avient Corporation) [113].

Țesătură Twaron® T730

Țesătura Twaron T730 este o țesătură simplă, cu tex 168, bazată pe tenacitatea standard (T), proiectată pentru soluții de performanță balistică bazate pe economie care necesită o rezistență bună la gloanțe și fragmentare [114].

Tabelul 4.1. Caracteristici ale țesăturii T730 [99], [100]

Densitatea liniară [dtexnom] Urzeală/Bătătură	Tipul de Twaron Urzeală/ Bătătură	Densitatea firelor [pe 10 cm]		Masă pe suprafață [g/m ²]	Grosime [mm]	Rezistența minimă la tracțiune [N/5 cm x 1000]*	
		Urzeală	Bătătură			Urzeală	Bătătură
1680 f1000	1040	78	78	260	0,4	9,4	10

* formă standardizată de raportare a rezistenței la tracțiune pentru materiale textile

Țesătură Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H

Kevlarul EXO este o fibră para-aramidică copolimerică nouă, diferită structural de fibra aramidică clasică. Prin adăugarea unui monomer suplimentar, se obține o aliniere moleculară superioară, ceea ce duce la o rezistență crescută și o greutate redusă cu până la 30% față de versiunile anterioare.

Țesătura Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H este o țesătură 3D, realizată prin tehnologia patentată CoreMatrix [110], [111], [121] care combină mai multe straturi țesute de Kevlar cu un strat nețesut printr-un proces de infuzare a fibrelor discontinue în direcția Z (vertical), adăugând o a treia dimensiune de protecție. Eliminându-se cusăturile tradiționale, materialul permite o dispersie a energiei la impact pe toate direcțiile, nu doar pe axele X și Y.

Consolidarea prin fire Z nu doar stabilizează arhitectura stratificată a materialului, ci contribuie activ la mecanismele de protecție în timpul impactului. Firele orientate pe direcția grosimii mențin straturile textile strâns apropiate, reducând tendința acestora de a se separa sau de a aluneca unele peste altele sub acțiunea unei solicitări balistice. Această coeziune structurală îmbunătățește transferul și disiparea energiei cinetice, deoarece încărcarea nu mai este preluată doar de firele din plan, ci este distribuită tridimensional în întregul volum al semifabricatului. În consecință, firele Z devin parte integrantă a procesului de absorbție a energiei, limitând deformarea locală, întârziind propagarea fisurilor și contribuind la creșterea eficienței generale a sistemului de protecție [110]. La momentul actual, singurele caracteristici ale aceste țesături, care sunt publice, sunt cele prezentate în Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Caracteristici ale rolei de țesătură Kevlar EXO CoremAtrix CM E1100H [110]

Proprietate	Nominal	Minim	Maxim
Masă pe suprafață [g/m ²]	1146	1044	1248
Lățime [cm]	160	160	165
Grosime [mm]	2,26	1,98	2,54

Orientarea tridimensională (3D) a firelor este evidențiată în Figurile 4.1 și 4.2, unde se poate observa distribuția spațială a acestora pe direcțiile longitudinală, transversală și prin grosimea structurii textile. În Figura 4.1b se observă grosimea fibrei utilizate în această țesătură 3D.

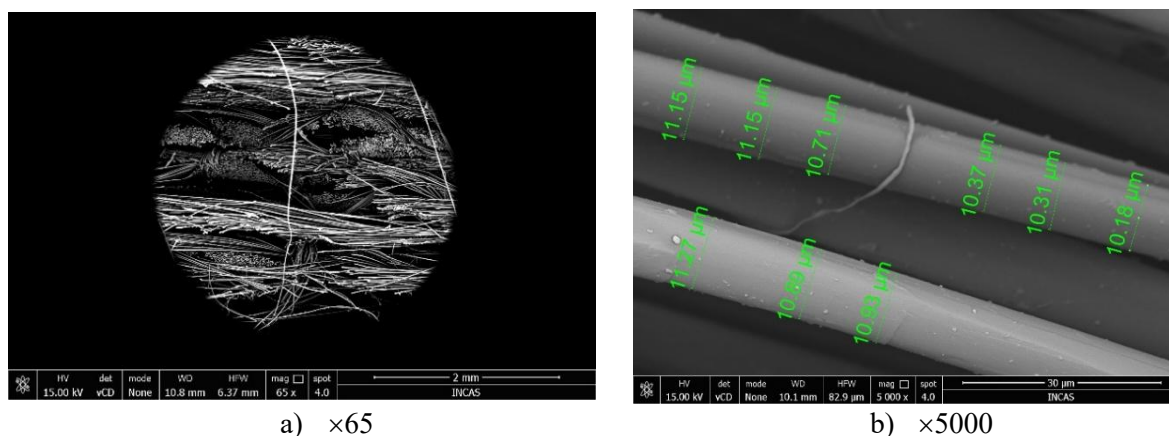
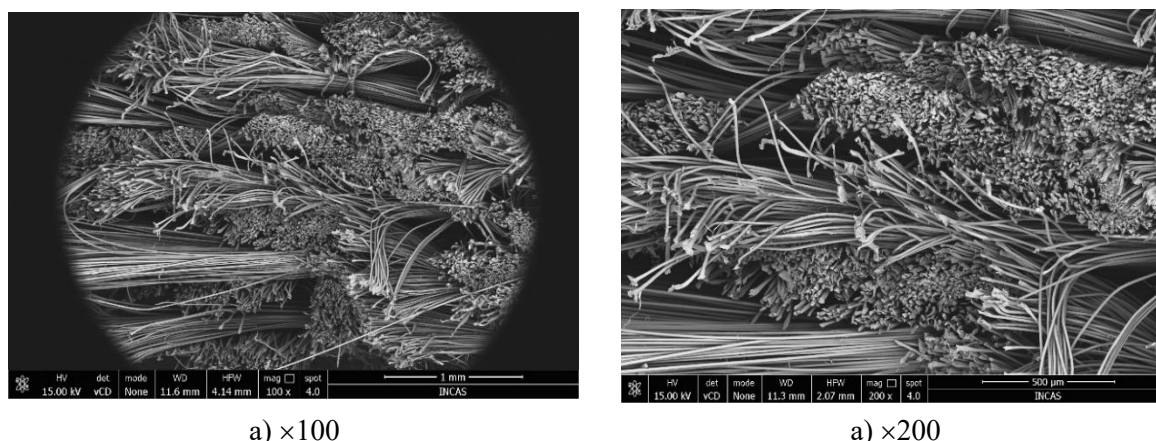


Fig. 4.1. Imagini ale țesăturii Kevlar EXO CoremAtrix CM E1100H, tăiată pe lățime



a) $\times 100$ a) $\times 200$
Fig. 4.2. Imagini ale țesăturii Kevlar EXO Corematrix CM E1100H, tăiată pe lungime

Țesătură Kevlar® XD S002

Kevlar® XD este rezultatul unei tehnologii dezvoltată de DuPont™, bazată pe structuri unidirecționale (UD) avansate, și o arhitectură 3D a firelor, care oferă un echilibru optim între performanță, protecție și greutate redusă. Semifabricatul Kevlar® XD S002, este un material balistic bidirecțional, cu performanțe superioare față de țesăturile aramidice standard UD 4-pliuri, ideal pentru vestele de protecție mai ușoare, eficiente și accesibile. Format din 4 straturi orientate $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ și livrat sub formă de rolă, acest produs permite combinarea cu alte materiale pentru a obține soluții balistice moi, cu un echilibru excelent între greutate redusă, protecție avansată și costuri mai mici. Performanța sa depinde de alinierea corectă a straturilor. Pentru menținerea calității, este esențială evitarea depozitării la temperaturi de peste 60°C și raze UV [112].

Tabelul 4.3. Caracteristici ale rolei de țesătură Kevlar XD S002 [112]

Masă pe suprafață [g/m^2]	Lățime [cm]	Lungime [m]
232	160	150

Prepreg Dyneema® SB21

Dyneema® SB21 este un semifabricat unidirecțional (UD) destinat structurilor balistice flexibile. Procesul de fabricare al semifabricatului începe cu obținerea fibrei de polietilenă. Se folosește un proces de gel-spinning, în care polietilena este dizolvată într-un solvent și extrudată în fire extrem de alinate. Fibrele rezultate au cristalinitate ridicată și modul elastic mare, oferind astfel rezistență foarte bună la tracțiune. Firele de polietilenă sunt aranjate paralel într-un singur strat, fără țesere. Se aplică o matrice termoplastică pe bază de elastomer, care leagă fibrele și le stabilizează [21].

Tabelul 4.4. Caracteristici ale materialului Dyneema® SB21 [16], [113]

Masă pe suprafață [g/m^2]	Grosime [mm]
140-150	0,15

4.2. Soluții noi de configurație a structurilor individuale pentru protecție balistică

Procesul de realizare a structurilor a constat în măsurarea și marcarea eşantioanelor, tăierea materialului cu ajutorul unei mașini de debitat materiale speciale, formarea de structuri balistice prin coaserea straturilor de dimensiunile 300 mm x 300 mm, având o arie de 0,09 m², ceea ce situează pachetele realizate pentru acest studiu la tipul de șablon NIJ-C-1 (0,09 m²) pentru suprafețe mici, conform NIJ 0101.06/2008 [116]. Pachetele au fost fixate prin coasere pe toate laturile la 8-10 mm de margini pentru a menține integritatea și ordinea straturilor. Pentru acest proces s-a folosit o mașină de cusut Juki LU-563 și ață tehnică din fibră aramică Nomex[®] tip Nc-tech cu titraj 40 tex/ 70.

- **Etapa I a studiului**

Prima parte a studiului s-a concentrat pe realizarea de structuri balistice din Twaron T730, cu variațiuni pe numărul de straturi. Astfel, după efectuare procesului de tăiere, acestea au fost aranjate în 3 tipuri de pachete în funcție de numărul de straturi. Aceste trei structuri creează o gamă scalabilă pentru comparație astfel se poate observa modul în care straturile suplimentare influențează absorbția energiei, rezistența la impact și modurile de cedare.

Structurile realizate sunt prezentate în Figura 4.3.

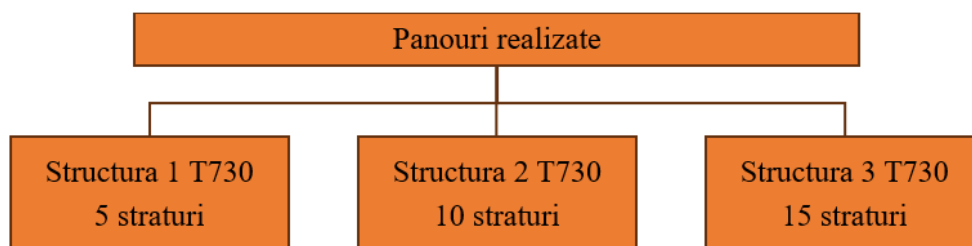


Fig. 4.3. Panouri realizate dintr-un singur tip de țesătură

- **Etapa a II-a studiului**

S-au realizat 5 tipuri de structuri, 4 hibride, câte 4 probe din fiecare arhitectură și una de referință, structurată numai cu 20 straturi de Twaron 730.

Pentru că panourile de 15 straturi T730 din prima etapa a campaniei de testare au avut BFD mare, aproape de limita admisă (44 mm, [116]) pentru muniția de .357 SIG, panoul de referință pentru etapa a II-a a studiului a fost alcătuit din 20 de straturi T730.

4.3. Campania de testare a structurilor realizate – sinteză

Panourile simple au fost realizate dintr-un singur tip de țesătură/ semifabricat și anume Twaron T730, având ca parametru numărul de straturi. Au fost realizate 3 tipuri de structuri stratificate pentru a fi testate cu două calibre, calibrul 9 mm FMJ și calibrul .357 SIG și o structură stratificată pentru a fi testată cu calibrul .357 SIG.

Tabelul 4.5. Structurile balistice realizate

Arhitectură	Orientare	Material	Număr straturi	Masa calculată [g]	Densitatea de suprafață [kg/m ²]	Codificare
Arhitectura 1	față ↓ spate	Twaron T730	20	480	5,33	20T
Arhitectura 2	față ↓ spate	Twaron T730	7	440	4,88	7T5D8T
		Dyneema® SB21	5			
		Twaron T730	8			
Arhitectura 3	față ↓ spate	Twaron T730	8	400	4,44	8T2D7T
		Dyneema® SB21	2			
		Twaron T730	7			
Arhitectura 4	față ↓ spate	Twaron T730	15	460	5,11	15T4XD
		Kevlar® XD S002	4			
Arhitectura 5	față ↓ spate	Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H	1	440	4,88	1EXO15T
		Twaron T730	15			

Panourile hibride au fost realizate din combinații de semifabricate, aranjate în straturi. Au fost realizate 4 tipuri de structuri stratificate hibride pentru a fi testate cu calibrul .357 SIG.

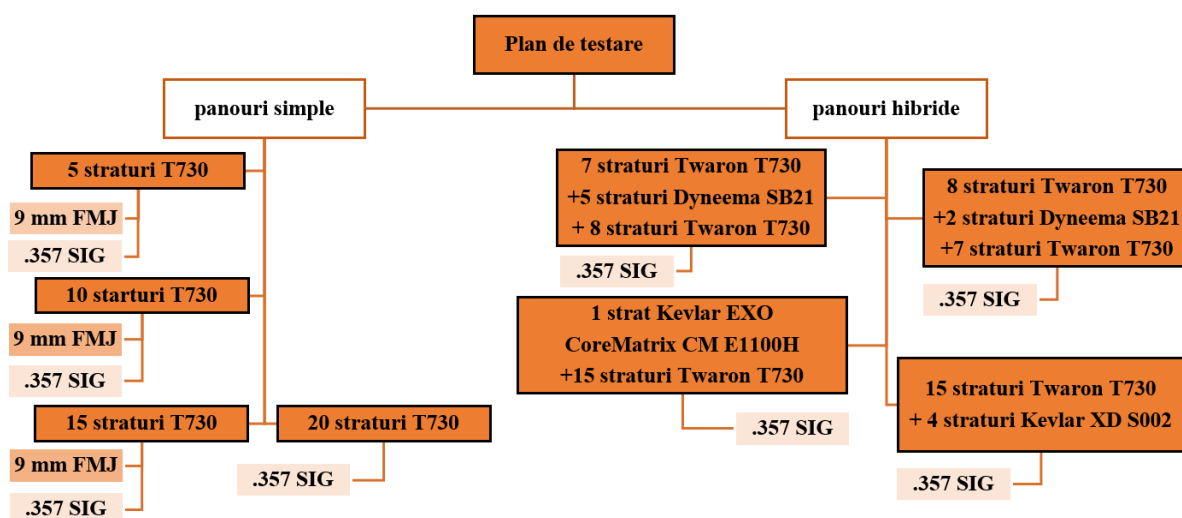


Fig. 4.4. Planul de teste pentru evaluarea comportării panourilor realizate la impact balistic

CAPITOLUL 5

TESTAREA EXPERIMENTALĂ A PANOURILOR PROIECTATE LA IMPACT BALISTIC ȘI EVALUAREA REZULTATELOR

5.1. Standardizarea în domeniul protecției balistice

Prin desfășurarea unui proces iterativ de dezvoltare a sistemelor individuale de protecție, rezultatele obținute pot fi aplicate de utilizatorii finali, organizații economice și guvernamentale care, prin natura activităților lor, necesită sisteme de protecție balistică de înaltă performanță, ușoare și eficiente din punct de vedere al costurilor [68].

Standardele și metodele de testare sunt indispensabile pentru validarea protecției balistice, deoarece performanța acestor echipamente nu poate fi apreciată vizual. În condiții reale de impact, materialele suferă solicitări dinamice diferite de cele statice, astfel că evaluarea corectă se realizează prin teste balistice sau explozive, cât mai apropiate de realitate [15].

5.2. Metodologia experimentelor de impact balistic

Programul de testare experimentală s-a realizat în două etape.

Etapa I a avut ca scop evaluarea comportării structurilor de protecție balistică realizate în prima parte a studiului, la acțiunea gloanțelor de 9 mm FMJ și .357 SIG FMJ, prin trageri în poligon și verificarea parțială a conformității standardului Ballistic Resistance of Body Armor, NIJ Standard-0101.06 [116], U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice, 2008. Parțialitatea conformității vine din faptul că pentru a obține un nivel de protecție, este necesară testare cu două calibre specifice nivelurilor de protecție. În cazul NIJ 0101.06, muniția folosită se încadrează la nivelul de protecție II (muniția 9 mm FMJ) și nivelul de protecție IIIA (muniția .357 SIG FMJ). În cazul NIJ 0101.07 [117], muniția folosită se încadrează la nivelul de protecție NIJ HG1, cu excepția faptului că în standard este menționată muniția .357 Magnum JSP, iar în testele experimentale s-a utilizat .357 SIG FMJ.

Etapa a II-a a avut ca scop evaluarea comportării structurilor de protecție balistică realizate în urma hibridizării structurii de bază, la acțiunea gloanțelor de .357 SIG FMJ, prin trageri în poligon. Eliminarea muniției de 9 mm FMJ s-a realizat deoarece structura balistică de bază identificată a prezentat un comportament favorabil la impactul cu glonțul de 9 mm FMJ.

Din cauza constrângerilor financiare, evaluarea performanței sistemelor de protecție balistică se bazează frecvent pe abordări statistice, utilizând un număr limitat de trageri experimentale. În fazele incipiente ale studiului, cercetarea a fost afectată suplimentar de dificultatea achiziției materialelor specifice domeniului, considerate resurse strategice în contextul tensiunilor și conflictelor recente din Orientul Mijlociu și Europa de Est. În consecință, testările au fost realizate în condiții strict controlate și cu resurse restrânse, reflectând atât provocările logistice, cât și contextul geopolitic actual.

Etapa I

Teste au fost structurate pe 2 categorii, astfel:

- caracterizarea rezistenței balistice a structurilor realizate integral din țesătură Twaron T730 cu număr definit de straturi: 5 straturi, 10 straturi și 15 straturi, prin testarea la acțiunea glonțului de 9 mm FMJ,

- caracterizarea rezistenței balistice a structurilor realizate integral din țesătură Twaron T730 (5 straturi, 10 straturi, 15 straturi), prin testarea la acțiunea glonțului de .357 SIG FMJ.

Testele s-au efectuat astfel:

- pentru pachetele de 300 mm x 300 mm, trei focuri pe un pachet, central, în triunghi echilateral cu latura de 120 mm, fiind testate câte două panourile mai subțiri și opt pachete pentru configurația cu cel mai mare număr de straturi de țesătură Twaron T730 (15), astfel,
- pentru structura din Twaron T730 cu 5 straturi - 2 pachete - 2 calibre,
- pentru structura din Twaron T730 cu 10 straturi - 2 pachete - 2 calibre,
- pentru structura din Twaron T730 cu 15 straturi - 8 pachete - 2 calibre.

Etapa a II-a

Pentru muniția de .357 SIG FMJ, teste au fost structurate pe 5 categorii, astfel:

- caracterizarea rezistenței balistice a arhitecturii 20T,
- caracterizarea rezistenței balistice a arhitecturii 7T5D8T,
- caracterizarea rezistenței balistice a arhitecturii 8T2D7T,
- caracterizarea rezistenței balistice a arhitecturii 15T4XD,
- caracterizarea rezistenței balistice a arhitecturii 1EXO15T,

Testele s-au efectuat astfel:

- pentru pachetele de 300 mm x 300 mm, trei focuri pe un pachet, fiind testate câte patru pachete pentru fiecare configurație, numărul de pachete testate fiind,
- pentru arhitectura 20T - 4 pachete - 1 calibru,
- pentru arhitectura 7T5D8T - 4 pachete,
- pentru arhitectura 8T2D7T - 4 pachete,
- pentru arhitectura 15T4XD - 4 pachete,
- pentru arhitectura 1EXO15T - 4 pachete.

Campania de testare s-a realizat cu sprijinul „Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN și Ecologie” București, în cadrul Laboratorului Echipamente de Protecție Balistică Individuală.

Aparatura utilizată în programul de testare experimentală

Pentru desfășurarea activităților de testare balistică s-au utilizat următoarele echipamente de bază:

- bancul de tragere, care este alcătuit dintr-un suport, pe o platformă metalică fixată rigid de sol, țeava balistică de calibrul necesar și sistemul de ochire tip laser,
- sistemul de măsurare a vitezei, un cronograf alcătuit din 2 zone de detectare pe bază de senzori optici, plasate la distanță de 1 m, care măsoară timpul necesar glonțului pentru a parcurge distanța dintre senzori, rezultând viteza glonțului. S-a utilizat un cronograf model B472 Precision Light Screen de la HPI GmbH cu domeniu de viteze 30-3000 m/s [118].
- suportul de fixare a probelor cu materialul suport (plastilină). Cutia destinată materialului suport are dimensiunile de 610 mm pe laturile bazei și o înălțime de 140

mm. Partea din spate trebuie să fie detașabilă și realizată din lemn sau placaj, având o grosime de 19,1 mm. Conform specificațiilor din NIJ, tipul de plastilină indicat este Roma Plastilina nr. 1. Materialul trebuie să fie compact, fără goluri interne, iar suprafața sa expusă trebuie să fie netedă și ușor de uniformizat.

- dispozitivul de măsurare a adâncimii – șubler de adâncime cu precizie de măsurare de $\pm 0,1$ mm.
- cameră climatică pentru condiționarea probelor la $20 \pm 5^\circ\text{C}$,
- etuvă pentru condiționarea muniției,
- termohigrometru cu precizie de măsurare de o unitate

Pe lângă echipamentele de bază, s-a utilizat și o cameră ultrarapidă poziționată în diagonală sau în fața probei. Camera ultrarapidă este model Photron Fastcam SA-Z. S-a utilizat un obiectiv Tamron AF-S SP 70-200 mm f/2,8 [119].

Pentru filmarea cu camera de filmare ultrarapidă, s-au folosit următoarele setări ale camerei: frecvența de achiziție 20.000 cadre pe secundă; timp de expunere 1/48; rezoluție 1024×1024 pixeli.

Materialul suport (plastilina balistică)

Pentru utilizarea corectă în testele balistice, plastilina trebuie să aibă o suprafață netedă, omogenă și ușor de nivelat, fără goluri sau defecte.

Condițiile mediului ambiant în laboratorul de testare:

- temperatura: $21 \pm 5^\circ\text{C}$;
- umiditate relativă: în intervalul 30-70%;
- presiunea atmosferică: 764 ± 15 mm Hg.

Condițiile de testare care au fost respectate pentru încercarea panourilor balistice sunt cele date în standardul NIJ 0101.06 [116]. În pregătirea pentru testarea sistemelor de protecție, echipamentul și configurația trebuie să urmeze instrucțiuni specifice pentru a asigura rezultate consistente și precise (Figura 5.1). Panoul de protecție se montează la 5 m de gura țevii balistice, iar țeava trebuie aliniată perpendicular pe suprafața probei, atât în plan vertical, cât și în plan orizontal [116].

Armament folosit a fost țeavă balistică calibru 9 mm, cu distanța de tragere de 5 m. Măsurarea deformației pe fața posterioară (BFD) a pachetului se face în plastilină balistică, conform NIJ 0101.06/2008 [116].

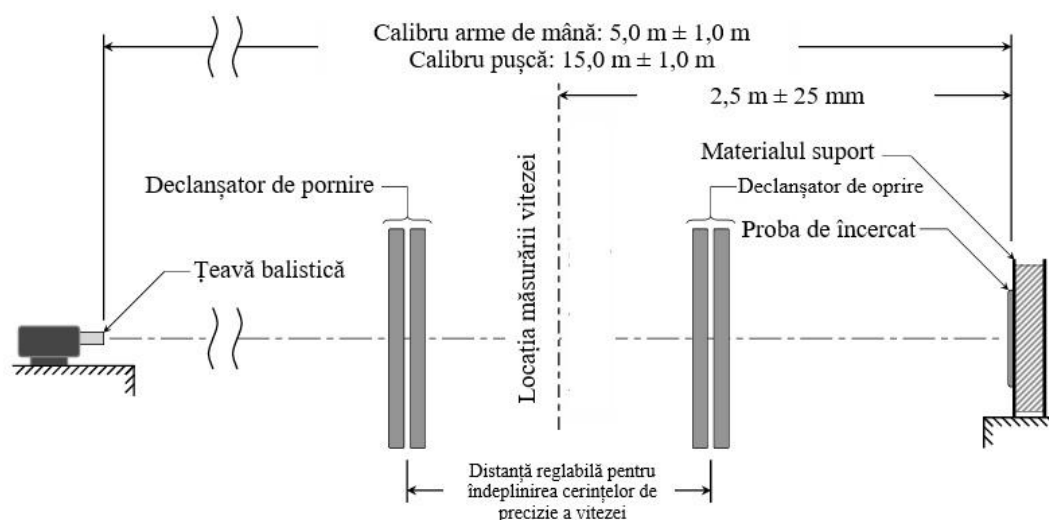


Fig. 5.1. Amplasarea probei față de dispozitivul de tragere [116]

5.3. Evaluarea performanțelor la impact pentru prima etapa a studiului prin rezultate experimentale

Prima parte a studiului s-a concentrat pe realizarea de structuri balistice din Twaron T730 având ca parametru numărul de straturi. Au fost realizate 6 structuri pentru a fi testate cu două calibre, calibrul 9 mm și calibrul .357 SIG [71].

Tabelul 5.1. Masa calculată a structurilor din Twaron T730

Material	Număr straturi	Nr. structuri	Masa calculată a structurii [g]	Densitatea de suprafață [kg/m ²]
Twaron T730	5	2	120	1,33
	10	2	220	2,44
	15	2	360	4,00

Comportarea la impactul gloanțelor de 9 mm FMJ pentru un pachet balistic de 15 straturi Twaron T730

Tabelul 5.2. Rezultate experimentale pentru panoul de 15 straturi T730 [71]

Nr. lovitură	Probă	Viteza măsurată (m/s)	Penetrare rezultată	BFD (mm)
1	15 straturi T730 cusute pe 4 laturi (Proba 1)	370	PP	36
2		376	PP	35
3		372	PP	36

PP – penetrare parțială

În Figura 5.2 se pot observa cadre extrase din filmarea cu camera ultrarapidă, unde se evidențiază comportamentul structurii de protecție la impactul cu glonțul de 9 mm FMJ.

Secvența de impact asupra probei evidențiază cinci etape distincte de deformare. Inițial, glonțul generează o deformare localizată în zona de contact. Urmează formarea

conului balistic pe partea opusă, pe măsură ce undele de tensiune se propagă radial. Zona afectată se extinde, iar țesătura prezintă ondulații și creste. În etapa de deformare maximă, energia este disipată, iar glonțul este frânat. În final, țesătura se stabilizează, păstrând o deformare reziduală semnificativă.

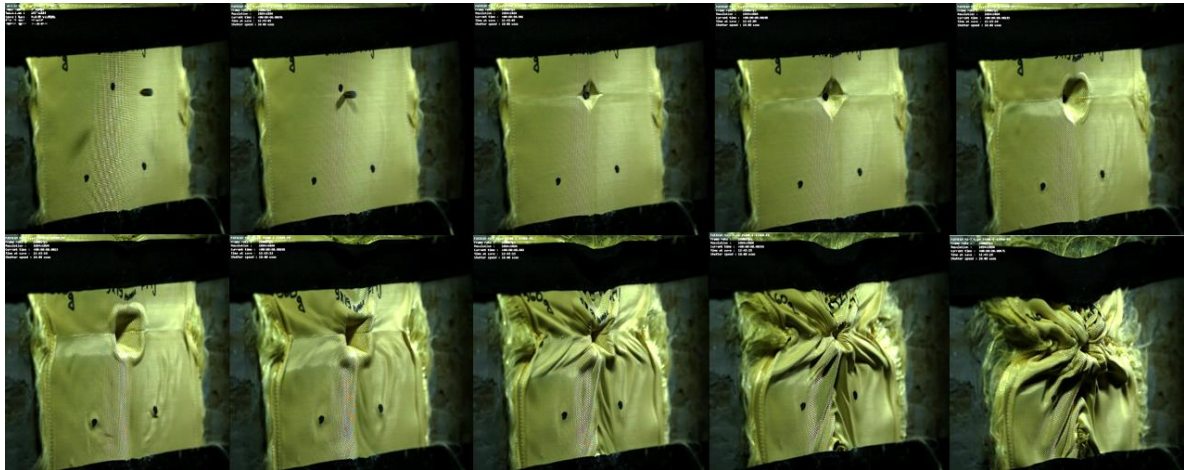


Fig. 5.2. Lovitura 1 pe panoul cu 15 straturi T730. Momente pe durata impactului glonțului de 9 mm FMJ capturat cu camera de filmare ultrarapidă la 20000 de cadre/secundă

Pentru a stabili dacă panoul va oferi suficientă protecție, adâncimea urmei în plastilina suport, obținută din cauza deformării panoului în timpul impactului, trebuie măsurată și examinată (Fig. 5.3a). Cerințele standard prezentate în secțiunea 7.8.8 din standard NIJ 0101.06/2008 afirmă că toate adâncimile măsurate ale BFD rezultate trebuie să fie de 44 mm sau mai puțin [116].

Comportarea structurală a probei de 15 straturi T730 poate fi considerată adecvată, deformările formate în plastilina balistică, evidențiate în Figura 5.3b-c, prezintă dimensiuni și morfologii similare, indicând o distribuție uniformă a energiei de impact și un răspuns structural consistent.

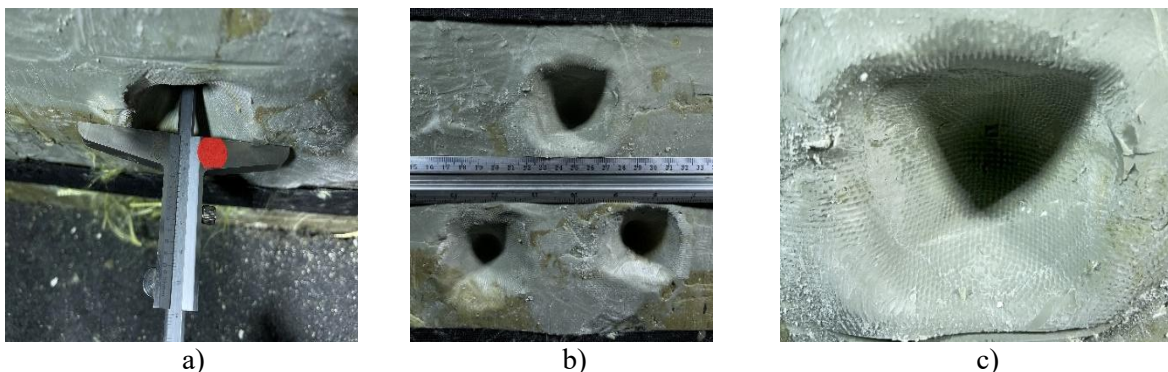


Fig. 5.3. Vederea frontală a materialului suport după impactarea probei de 15 straturi T730 cu glonțul de 9 mm: a) Măsurarea deformăției în plastilină balistică, conform NIJ 0101.06/2008, b) vedere a celor 3 lovituri succesive; c) detaliu al unei deformății în materialul suport [71]

Figura 5.4 prezintă vederea frontală și posterioară a panoului de protecție balistică alcătuit din 15 straturi de Twaron T730, după testare. Se observă zonele de impact pe fața

frontală și amprente corespunzătoare de deformare pe fața posterioară, fără perforarea completă a panoului.



Fig. 5.4. Vedere față (a) - spate (b) a sistemul de protecție alcătuit din 15 straturi Twaron T730, după testarea cu glonțul de 9 mm FMJ

Figura 5.5 evidențiază, prin mărimi locale, zonele de impact corespunzătoare celor trei lovituri observate în Figura 5.4, pentru panoul alcătuit din 15 straturi de Twaron T730. Se observă deformarea locală a țesăturii, ruperea și alungirea fibrelor în zona centrală de impact, precum și redistribuirea eforturilor către fibrele adiacente, fără apariția perforării complete, ceea ce confirmă mecanismul predominant de absorbție a energiei prin întinderea și deteriorarea progresivă a fibrelor.

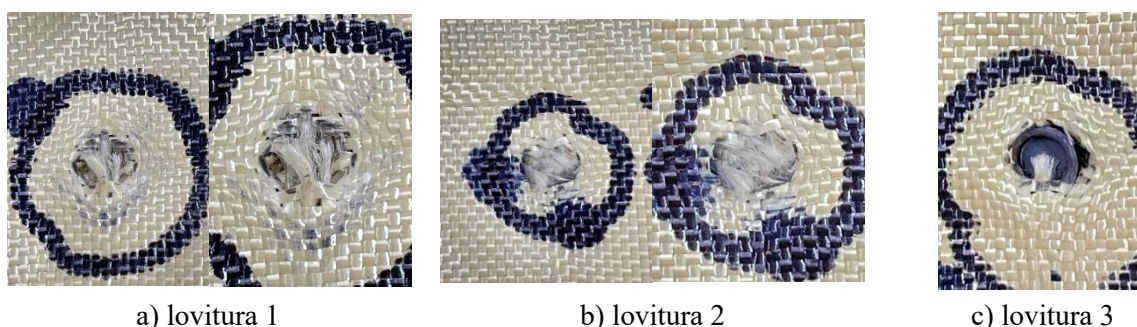
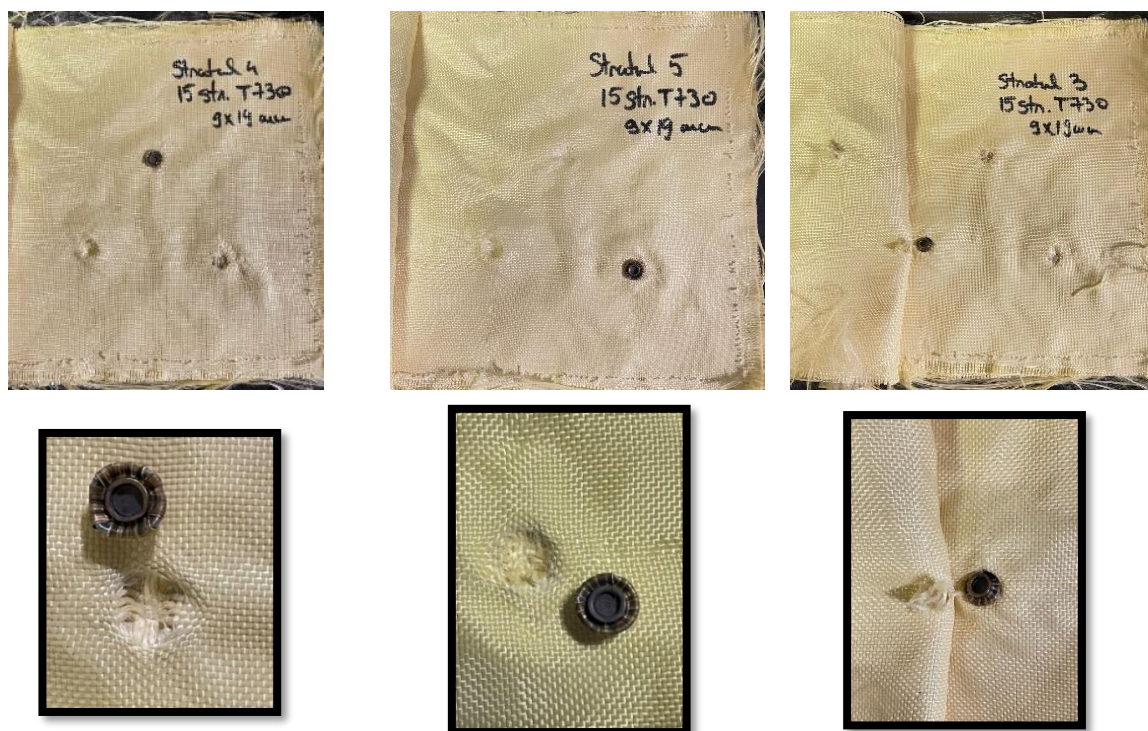


Fig. 5.5. Fotografii cu detaliile loviturilor pe panoul cu 15 straturi T730 (muniție 9 mm FMJ)

După terminarea campaniei de testare, în cazul probelor care au reținut glonțul, s-a efectuat desfacerea acestora strat cu strat pentru a identifica unde s-a oprit glonțul. Se poate observa în Figura 5.6 faptul că sistemul de protecție alcătuit din 15 straturi de țesătură aramidică T730, a reușit să oprească glonțul primei lovituri în stratul al 4-lea, pe stratul 5 pentru lovitura 2 și pe stratul 3 pentru lovitura 3.



a) lovitura 1, $V_0 = 370$ m/s b) lovitura 2, $V_0 = 376$ m/s c) lovitura 3, $V_0 = 372$ m/s

Fig. 5.6. Straturile în care s-au oprit glonțele de pe panoul de 15 straturi Twaron T730

Determinarea rezistenței la impactul gloanțelor de .357 SIG pentru un pachet balistic de 15 straturi Twaron T730

Muniție: cartuș calibru .357 SIG, glonț FMJ.

Armament: țeavă balistică calibru .357 SIG.

Distanța de tragere: 5 m.

Măsurarea deformației pe fața posterioară (BFD) a pachetului se face în plastilină balistică, conform NIJ 0101.06/2008 [116].

Se observă din Tabelul 5.8 că pentru a doua lovitură, BFD a fost egală cu limita admisă în NIJ 0101.06, iar a treia lovitură a cauzat o penetrare totală, ceea ce nu se recomandă, chiar exclude, utilizarea panoului cand amenințările sunt de tip .357 SIG.

Tabelul 5.3. Rezultate experimentale pentru panoul de 15 straturi T730

Nr. lovitură	Probă	Viteza măsurată (m/s)	Penetrare rezultată	BFD (mm)
1	15 straturi T730	445	PP	40
2	cusute pe 4 laturi	447	PP	44
3	(Proba 1)	447	PT*	-

*PT – penetrare totală

În Figura 5.7 sunt prezentate cadre extrase din filmarea cu camera ultrarapidă, unde se evidențiază comportamentul structurii de protecție alcătuită din 15 straturi Twaron T730 la impactul cu glonțul .357 SIG.

Secvența de impact evidențiază etape distincte de deformare: deformare localizată inițială, propagarea radială a undelor de tensiune și formarea conului balistic pe fața opusă, urmate de extinderea zonei afectate și apariția ondulațiilor/crestelor în țesătură. Pentru loviturile 1 și 2, energia este disipată prin întinderea și deteriorarea progresivă a fibrelor, iar proiectilul este oprit, rămânând o deformare reziduală. În cazul loviturii 3, acumularea deteriorărilor reduce capacitatea de absorbție, ceea ce conduce la cedarea locală a structurii și la perforare completă.



Fig. 5.7. Imagini succesive ale impactului pentru proba 15 straturi T730 cu glonțul de .357 SIG capturate cu camera de filmare ultrarapidă la 20000 de cadre/s, Lovitura 1, momentul impactului glonțului de .357 SIG

Figura 5.8 prezintă vederea frontală și posterioară a panoului de protecție balistică alcătuit din 15 straturi de Twaron T730, după testare. Se observă zonele de impact pe fața frontală, amprente corespunzătoare de deformare pe fața posterioară și perforarea completă a panoului, la lovitura 3. Lovitura din dreapta jos se distinge prin perforare totală, fiind caracterizată de formarea unui orificiu de trecere în materialul suport, în timp ce celelalte două lovituri au generat doar deformări plastice locale, indicând o absorbție parțială, dar eficientă, a energiei de impact.

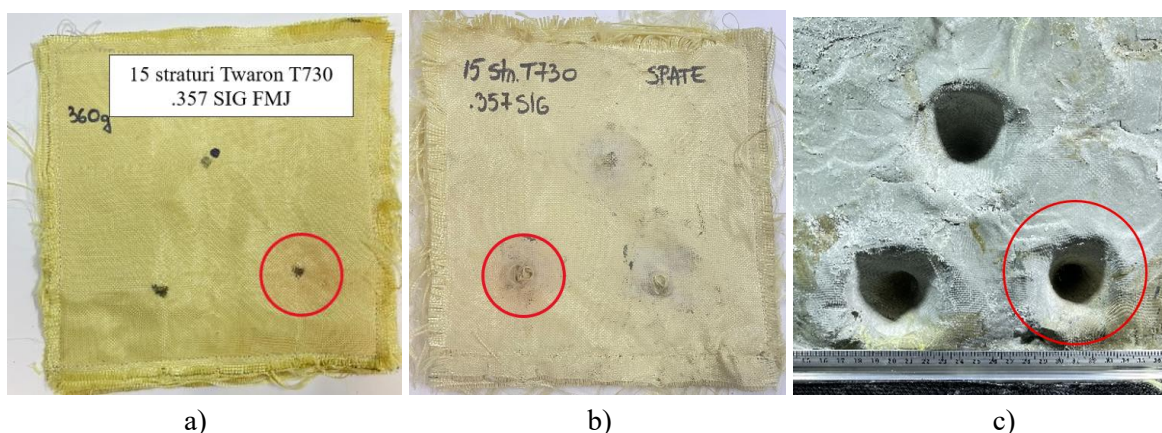
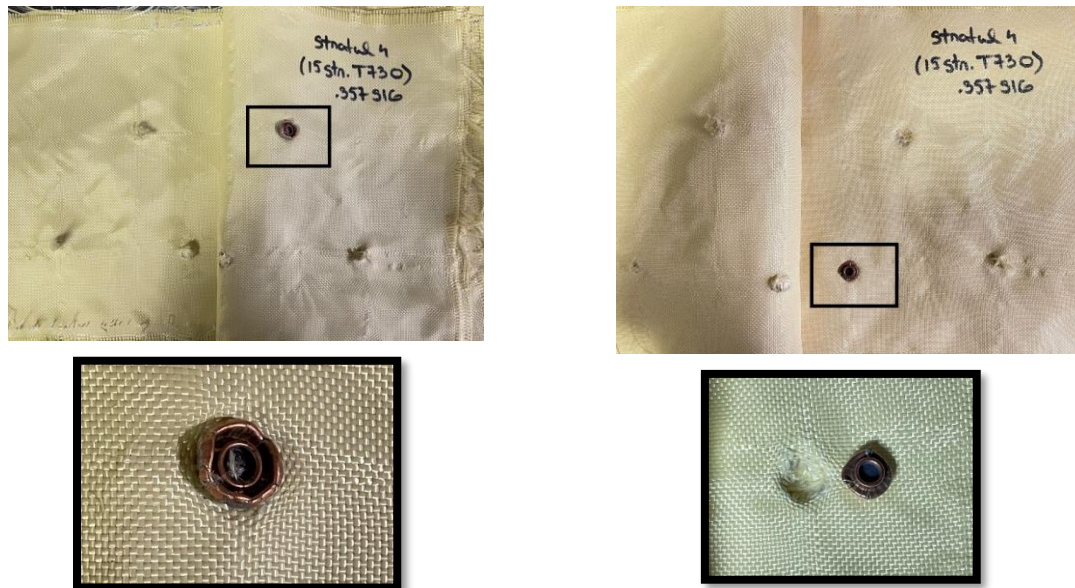


Fig. 5.8. Vedere față (a) – spate (b) a sistemul de protecție alcătuit din 15 straturi Twaron T730, după testarea la glonț .357 SIG, (c) Deformațiile în materialul suport ale celor 3 lovituri executate pe probă și evidențierea penetrării totale

În Figura 5.9 este evidențiată poziția loviturii care a penetrat total pachetul deși variația vitezei este foarte mică comparativ cu celelalte lovituri (vezi Tabelul 5.3).

Toate structurile alcătuite din 5 și 10 straturi de Twaron T730, testate la impact cu muniție de 9 mm și .357 SIG, au fost perforate complet de fiecare lovitură, pentru ambele tipuri de calibru.



a) lovitura 1, $V_0 = 445$ m/s

b) lovitura 2, $V_0 = 447$ m/s

Fig. 5.9. Straturile în care s-au oprit gloțele de pe panoul de 15 straturi de Twaron T730

Concluziile primei etape a studiului

În urma testelor efectuate pe panourile balistice, în care au fost trase câte trei focuri pe fiecare panou, rezultatele arată că două dintre panouri au suferit penetrare parțială:

- panoul format din 15 straturi de țesătura T730 testată la impactul cu calibrul de 9 mm FMJ a rezistat la toate cele trei focuri trase;
- panoul format din 15 straturi de țesătură T730 testată la impactul cu calibrul .357 SIG a rezistat la 2 focuri trase, la al treilea având loc o penetrare totală.

Acest lucru indică faptul că acele două panouri au demonstrat o capacitate satisfăcătoare de protecție balistică împotriva proiectilelor de 9 mm FMJ și au reușit să oprească proiectilele înainte de a permite penetrarea completă a panoului. Aceste constatări evidențiază eficacitatea panourilor în ceea ce privește protecția împotriva impactului balistic al proiectilului de 9 mm FMJ și sugerează că acestea ar putea fi adecvate pentru diverse aplicații de protecție.

Pentru confirmarea, cu relevanță statistică, a capacității structurii de a opri ambele tipuri de proiectile, este necesară efectuarea unor teste suplimentare. În consecință, în prima fază a celei de-a doua etape a studiului, vor fi evaluate câte trei structuri alcătuite din 15 straturi de Twaron T730 pentru fiecare calibru analizat: 9 mm și .357 SIG.

5.4. Evaluarea performanțelor la impact pentru a doua etapa a studiului – rezultate experimentale

Evaluarea statistică pentru structura de 15 straturi din Twaron T730 testată cu două calibre

Pentru evaluarea statistică a structurii de 15 straturi din Twaron T730 s-au realizat 6 probe suplimentare, 3 pentru testarea cu 9 mm și 3 pentru testarea cu .357 SIG.

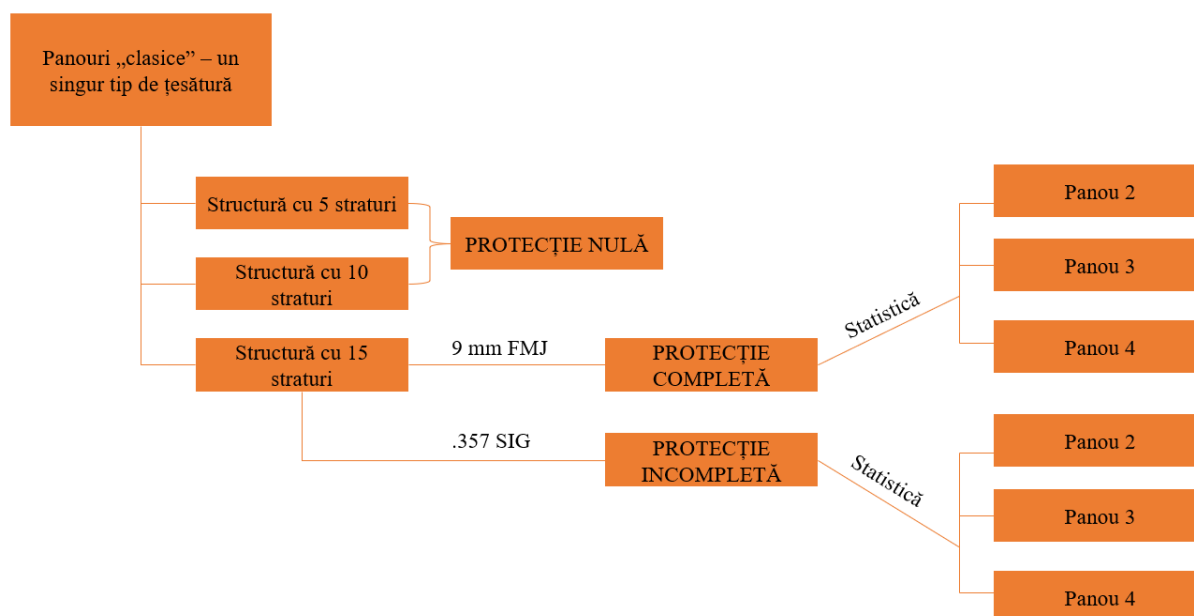


Fig. 5.10. Schema campaniei de testare pentru validarea structurilor din 15 straturi Twaron T730

Verificarea rezistenței la impactul gloanțelor de 9 mm FMJ pentru structura balistică din 15 straturi Twaron T730

Muniție: Cartuș calibru 9x19 mm Luger, glonț FMJ (full metal jacket).

Armament: Țeavă balistică calibru 9 mm.

Distanța de tragere: 5 m.

Măsurarea deformației pe fața posterioară (BFD) a pachetului se face în plastilină balistică, conform NIJ 0101.06/2008 [116].

Pentru 12 măsurători ale vitezei proiectilului, prezentate în Tabelul 5.4, s-au determinat:

- viteza medie - 367,33 m/s; deviația standard - 5,38 m/s, ceea ce reprezintă doar 1,46% din viteza medie; valoarea maximă - 376 m/s; valoarea minimă - 355 m/s.

Valorile obținute indică o bună repetabilitate a răspunsului balistic, cu amprente în materialul suport situate sub limita admisă de standardul NIJ 0101.06 [116] și de ediția 07 [117] a standardului NIJ, confirmând capacitatea structurii de a absorbi eficient energia impactului.

Tabelul 5.4. Rezultate experimentale

Probă	Nr. lovitură	Viteza măsurată (m/s)	Penetrare rezultată	BFD (mm)
15 straturi T730 Proba 1	1	370	PP	36
	2	376	PP	35
	3	372	PP	36
15 straturi T730 Proba 2	1	355	PP	36
	2	371	PP	38
	3	368	PP	37
15 straturi T730 Proba 3	1	366	PP	37
	2	368	PP	41
	3	369	PP	40
15 straturi T730 Proba 4	1	361	PP	37
	2	366	PP	42
	3	366	PP	40

Verificarea rezistenței la impactul gloanțelor de .357 SIG pentru structura balistică din 15 straturi Twaron T730

Pentru 12 măsurători ale vitezei proiectilului, prezentate în Tabelul 5.5, s-au determinat:

- viteza medie - 440 m/s; deviația standard - 4,30 m/s, ceea ce reprezintă doar 0,97% din viteza medie); valoarea maximă - 447 m/s; valoarea minimă - 435 m/s.

Tabelul 5.5. Rezultate experimentale

Probă	Nr. lovitură	Viteza măsurată (m/s)	Penetrare rezultată	BFD (mm)
15 straturi T730 Proba 1	1	445	PP	40
	2	447	PP	44
	3	447	PT	-
15 straturi T730 Proba 2	1	441	PP	54
	2	435	PP	50
	3	440	PP	68
15 straturi T730 Proba 3	1	436	PT	-
	2	437	PP	55
	3	440	PP	47
15 straturi T730 Proba 4	1	438	PT	-
	2	435	PP	41
	3	439	PT	-

Pentru calibrul .357 SIG se observă o dispersie mai mare a valorilor BFD față de 9 mm, unele depășind pragul de 44 mm care reprezintă limita admisă de standardul NIJ 0101.06 [116], ceea ce indică funcționarea structurii aproape de limita maximă de performanță.

Analiza statistică arată că panoul din 15 straturi de Twaron T730 oferă protecție adecvată la 9 mm FMJ, valorile BFD respectând cerințele standardului (≤ 44 mm, cu limită absolută de 50 mm). Pentru .357 SIG, însă, structura nu asigură protecție corespunzătoare: chiar și proba fără perforare completă a înregistrat valori BFD peste 50 mm, indicând o atenuare insuficientă a traumei.

În vederea obținerii unei structuri balistice capabile să ofere protecție simultană împotriva ambelor tipuri de amenințări, autorul propune dezvoltarea unor arhitecturi hibride, având ca punct de plecare structura alcătuită din 15 straturi de Twaron T730. Având în vedere eficiența demonstrată a acestei configurații în fața proiectilelor de calibru 9 mm FMJ, autorul a decis ca testarea structurilor hibride să se concentreze exclusiv asupra muniției de calibru .357 SIG, pentru a evalua potențialul de îmbunătățire a performanței balistice în acest context, pentru acest studiu iar panoul de referință să fie format din 20 de straturi Twaron T730.

S-au realizat 5 tipuri de structuri dintre care 4 hibride, câte 4 probe din fiecare arhitectură. Structurile realizate sunt prezentate în Tabelul 5.6.

Tabelul 5.6. Structurile balistice realizate pentru panouri hibride, testate cu .357 SIG

Arhitectură	Orientare	Material	Număr straturi	Masa calculată [g]	Densitatea de suprafață [kg/m ²]	Codificare
Arhitectura 1 (de referință)	față ↓ spate	Twaron® T730	20	480	5,33	20T
Arhitecturi hibride						
Arhitectura 2	față ↓ spate	Twaron® T730	7	440	4,88	7T5D8T
		Dyneema® SB21	5			
		Twaron® T730	8			
Arhitectura 3	față ↓ spate	Twaron® T730	8	400	4,44	8T2D7T
		Dyneema® SB21	2			
		Twaron T730	7			
Arhitectura 4	față ↓ spate	Twaron® T730	15	460	5,11	15T4XD
		Kevlar® XD S002	4			
Arhitectura 5	față ↓ spate	Kevlar® EXO™	1	440	4,88	1EXO15T
		CoreMatrix™ CM E1100H				
		Twaron® T730	15			

Se constată o diferență de masă între panoul simplu și panourile hibride, în favoarea acestora din urmă. Raportat la numărul de straturi adăugate și masa totală, arhitectura 5 prezintă

un raport optim, în timp ce arhitectura 3 se remarcă prin cea mai redusă masă dintre configurațiile analizate.

Pentru fiecare structură au fost realizate patru probe identice, destinate testării balistice cu proiectile de calibru .357 SIG. Fiecare probă a fost supusă la trei lovituri succesive. După finalizarea testării, probele au fost desfăcute strat cu strat, în vederea identificării nivelului de penetrare și a straturilor care au reținut proiectilele, în situațiile în care nu s-a produs perforarea completă a structurii. Această procedură a permis, totodată, recuperarea gloanțelor pentru analiza ulterioară.

În cadrul acestui rezumat sunt evidențiate și analizate structurile care au demonstrat cele mai ridicate performanțe balistice, selectate pe baza rezultatelor experimentale și a criteriilor de eficiență stabilite în cadrul studiului.

Determinarea rezistenței la impactul gloanțelor de .357 SIG pentru arhitectura 7T5D8T

Muniție: Cartuș calibru .357 SIG, glonț FMJ (full metal jacket).

Armament: Țeavă balistică calibru .357 SIG.

Distanța de tragere: 5 m.

Măsurarea deformației pe fața posterioară (BFD) a pachetului se face în plastilină balistică, conform NIJ 0101.06/2008 [116].

Tabelul 5.7. Rezultate experimentale pentru arhitectura 7T5D8T

Probă	Nr. lovitură	Viteza măsurată (m/s)	Penetrare rezultată	BFD (mm)	Stratul unde s-a oprit glonțul
7T5D8T Proba 1	1	442	PP	31	S5
	2	442	PP	35	S5
	3	443	PP	32	S3
7T5D8T Proba 2	1	449	PP	26	S7/7
	2	448	PP	33	S4/7
	3	451	PP	26	S6/7
7T5D8T Proba 3	1	453	PP	34	S5/7
	2	452	PP	29	S7/7
	3	452	PP	28	S7/7
7T5D8T Proba 4	1	450	PP	32	S7/7
	2	449	PP	27	S7/7
	3	450	PP	31	S7/7

Valorile BFD se situează în intervalul aproximativ 26–35 mm, cu o medie aritmetică de ~30,3 mm, mult sub limita de referință de 44 mm impusă de standardul NIJ 0101.06 [116], în timp ce vitezele de impact sunt consistente (442–453 m/s). Aceste rezultate indică o absorbție eficientă a energiei și confirmă performanța superioară a arhitecturii hibride, contribuția straturilor de Dyneema fiind esențială în reducerea deformării pe fața posterioară.

Imagini detaliate ale fiecărui strat pentru o probă reprezentativă sunt prezentate în figurile 5.11-5.16. Pentru identificarea stratului care a oprit proiectilul, pachetul balistic este deschis controlat pe trei laturi, iar straturile sunt examinate secvențial pentru a determina punctul în care acestea încep să se separe cu ușurință. Acest punct marchează limita de penetrare a glonțului: straturile superioare sunt perforate sau deteriorate, în timp ce cele inferioare rămân intacte sau doar deformate. Deoarece separarea afectează integritatea pachetului, documentarea fotografică se realizează în ordine inversă, de la ultimul strat către primul, urmând exact succesiunea analizei.

În Figura 5.11 se poate observa că stratul 7 din setul de 8 straturi Twaron T730 poziționat pe partea posterioară a arhitecturii 7T5D8T, este ultimul strat în care una din cele 3 lovituri a fost reținută, pe stratul 8/8 (Fig. 5.11a) fiind doar urme în urma impactului. Se pot observa pe primul strat de Dyneema, urmele lăsate de lovituri, însă fără ruperea sau deteriorarea stratului.

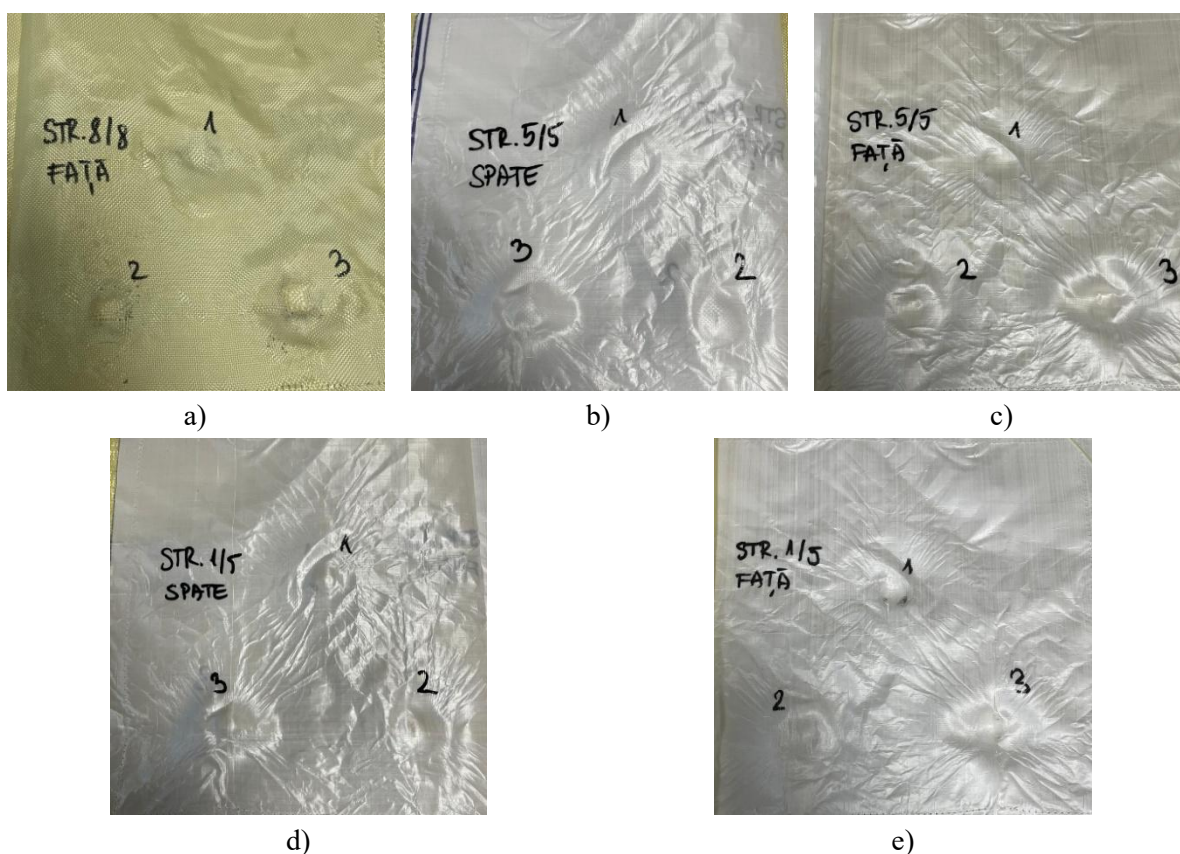
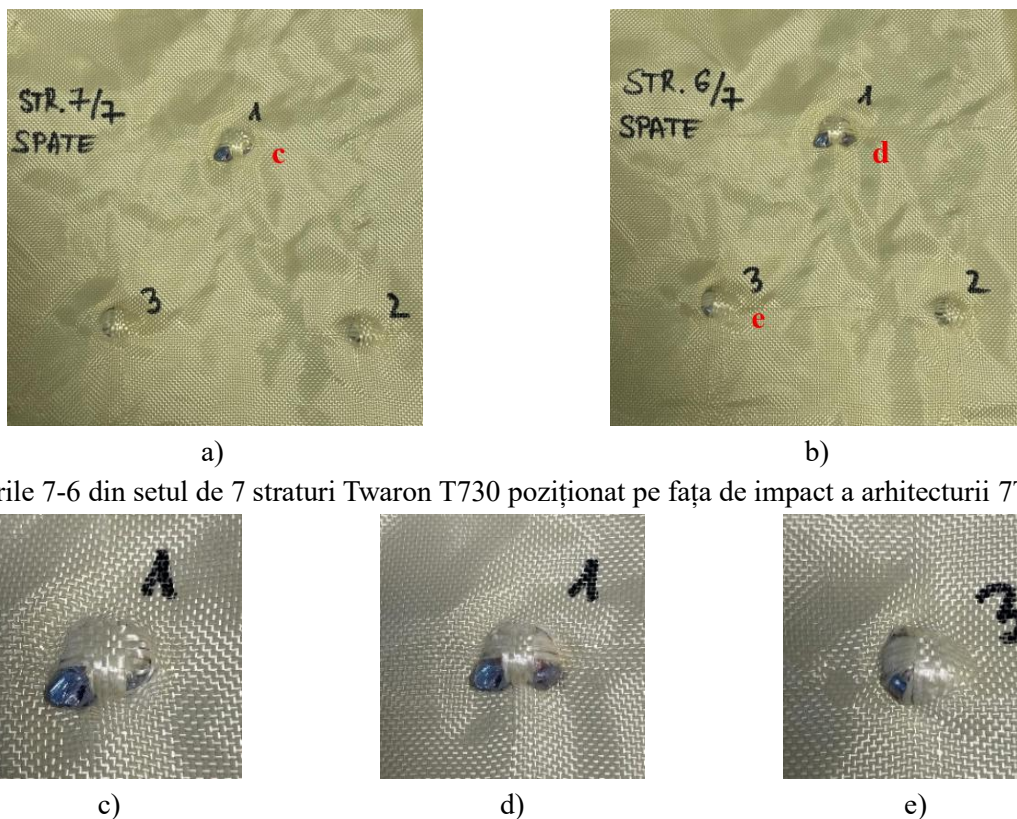


Fig. 5.11. Imagini ale straturilor componente. Stratul 8 din setul de 8 straturi Twaron T730 poziționat pe partea posterioară a arhitecturii 7T5D8T (a); Straturile 5-1 din setul de 5 straturi Dyneema poziționat în interiorul arhitecturii 7T5D8T (b-e)

Figura 5.12 ilustrează examinarea straturilor 7–6 a din setul de 7 straturi Twaron T730 poziționat pe fața de impact a arhitecturii hibride 7T5D8T. Imaginile de ansamblu (față și spate) evidențiază pozițiile celor trei lovituri, iar marcajele a–c permit corelarea acestora cu detaliile fotografice mărite din partea inferioară a figurii. Pentru lovitura 1, se observă că glonțul a fost oprit pe suprafața stratului 7 (Fig. 5.12a și c), fapt confirmat de detaliul fotografic corespunzător (glonțul 1 – stratul 7, spate), unde proiectilul este vizibil la nivelul

țesăturii, fiind parțial încastrat și înconjurat de fibre deformate. Această observație indică o absorbție eficientă a energiei în straturile frontale, fără propagarea semnificativă a deteriorării către straturile următoare.

În cazul loviturii 3, stratul 6 este cel care a captat glonțul (Fig. 5.12b și e), însă deteriorarea produsă este redusă. Detaliile fotografice arată urme clare de comprimare locală generate de impact, fără ruperea sau tăierea firelor de Twaron, ceea ce sugerează că energia reziduală a proiectilului a fost deja considerabil diminuată înainte de a ajunge la acest nivel. În ansamblu, imaginile confirmă rolul esențial al straturilor 6-7 în faza finală de oprire a proiectilului și evidențiază eficiența mecanismelor de disipare progresivă a energiei în structura multistrat..



Straturile 7-6 din setul de 7 straturi Twaron T730 poziționat pe fața de impact a arhitecturii 7T5D8T

Fig. 5.12. Examinarea secvențială a straturilor componente ale panoului testat cu proiectil .357 SIG, straturile care au oprit proiectilul: a) stratul 7 spate; b) stratul 6 spate; c) detaliu al loviturii 1, stratul 7 spate; d) detaliu al loviturii 1, stratul 6 spate; e) detaliu al loviturii 3, stratul 6 spate.

Figura 5.13 prezintă examinarea straturilor 5–4 din setul de 7 straturi Twaron T730 poziționat pe fața de impact a arhitecturii hibride 7T5D8T, evidențiind modul de interacțiune al celor trei lovituri cu structura textilă.

În cazul loviturii 2, se observă că stratul 4 a reușit să oprească glonțul, aspect confirmat de detaliile fotografice (Figura 5.13e). Fibrele din zona de impact prezintă o întindere și o compactare intensă sub proiectil, ceea ce indică o disipare eficientă a energiei cinetice a proiectilului prin deformare plastică a țesăturii. Totodată, sunt vizibile câteva fire rupte, asociate poziționării oblice a glonțului în material, care a generat solicitări locale de forfecare.

Această orientare sugerează și influența probabilă a primei lovituri, care a modificat starea inițială a țesăturii și a contribuit la mecanismul de cedare observat.

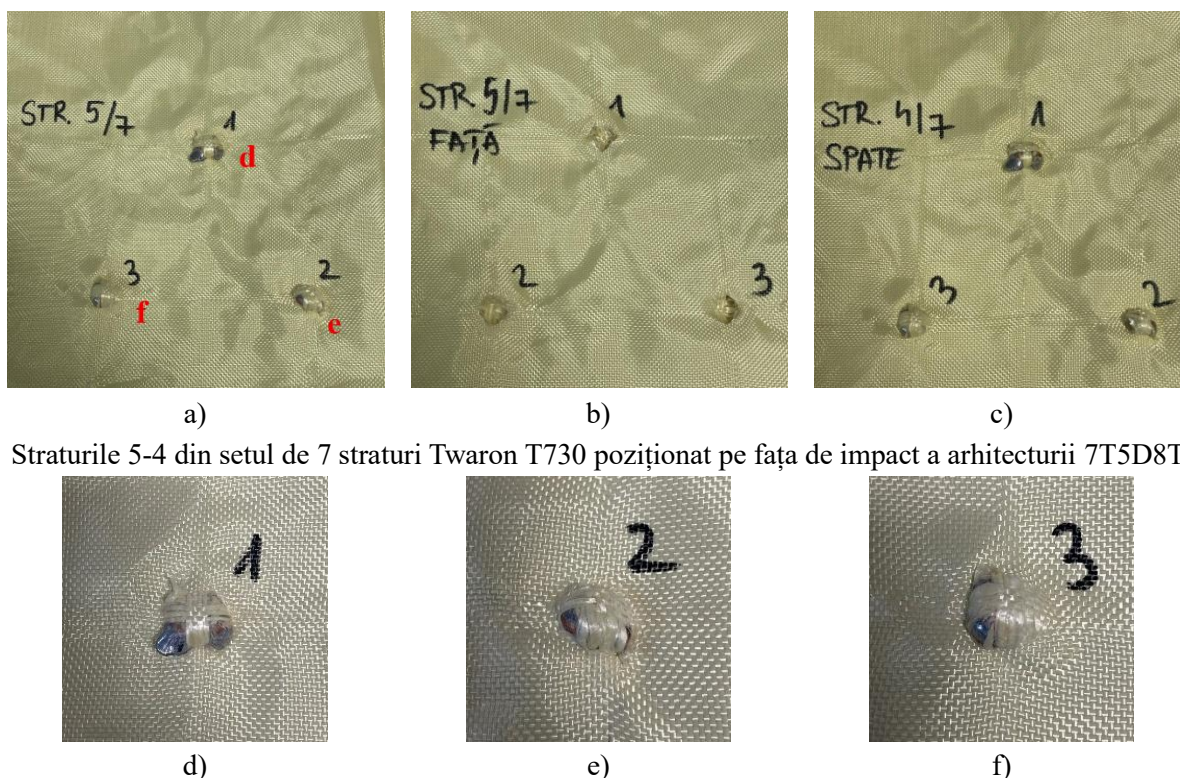
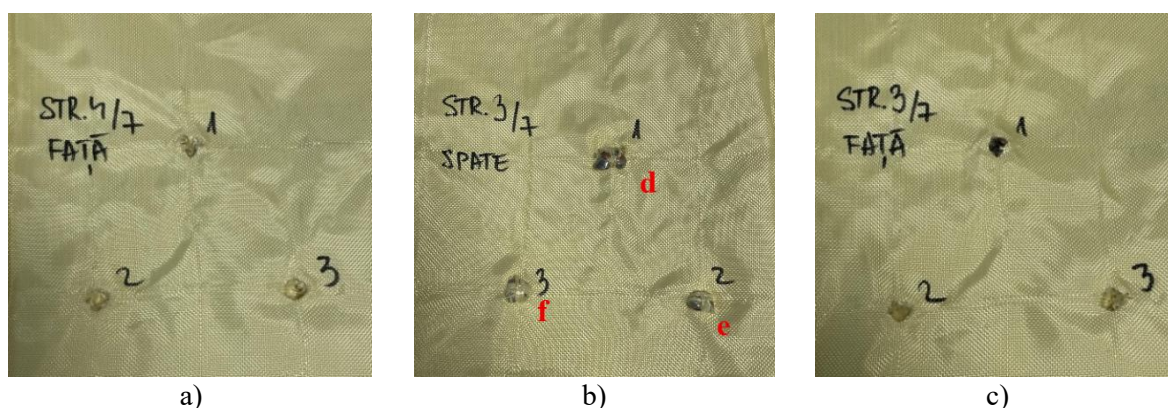


Fig. 5.13. Examinarea straturilor componente care au reținut proiectilul, pentru panoul 7T5D8T: a) stratul 5 spate; b) stratul 5, față; c) stratul 4, spate; detalii ale zonei de reținere a proiectilului pe spatele stratului 5: d) lovitura 1; e) lovitura 2; f) lovitura 3.

În imaginile d–f din Figura 5.14 se observă modul în care fibrele sunt întinse și compactate pe suprafața proiectilului, adoptând o orientare radială și transversală, ceea ce indică un mecanism dominant de preluare a sarcinii prin întindere. Poziționarea fibrelor pe glonț evidențiază o „înfășurare” parțială a acestuia, care contribuie la creșterea frecării și la disiparea eficientă a energiei reziduale.



Straturile 4-3 din setul de 7 straturi Twaron T730 poziționat pe fața de impact a arhitecturii 7T5D8T

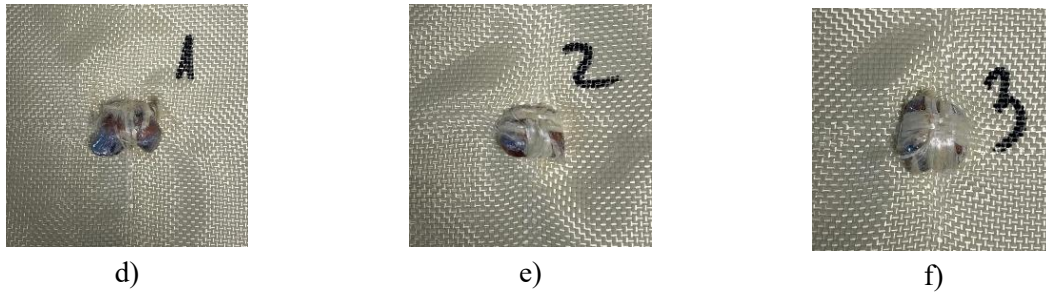


Fig. 5.14. Examinarea straturilor componente care au reținut proiectilul, pentru panoul 7T5D8T: a) stratul 4, față; b) stratul 3, spate; c) stratul 3, față; detalii ale zonei de reținere a proiectilului pe spatele stratului 3: d) lovitura 1; e) lovitura 2; f) lovitura 3.

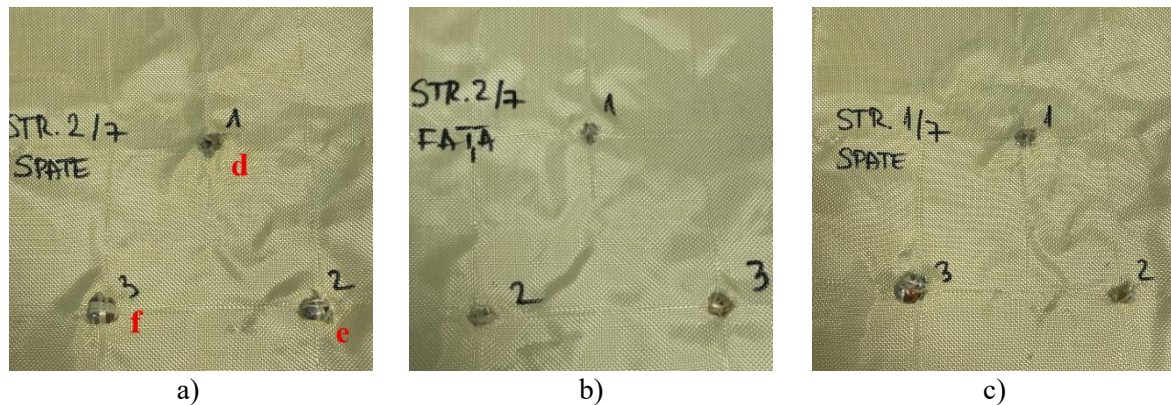
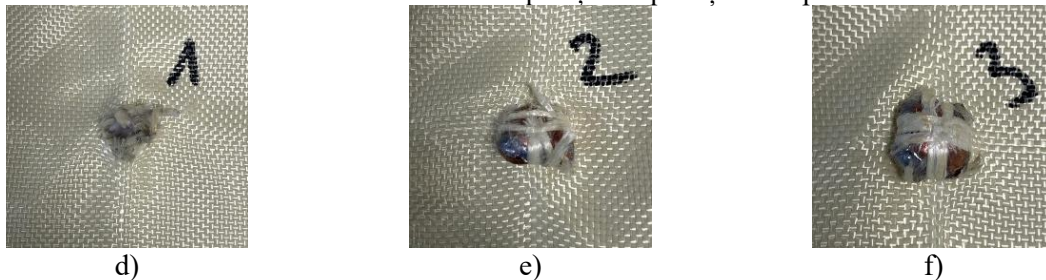
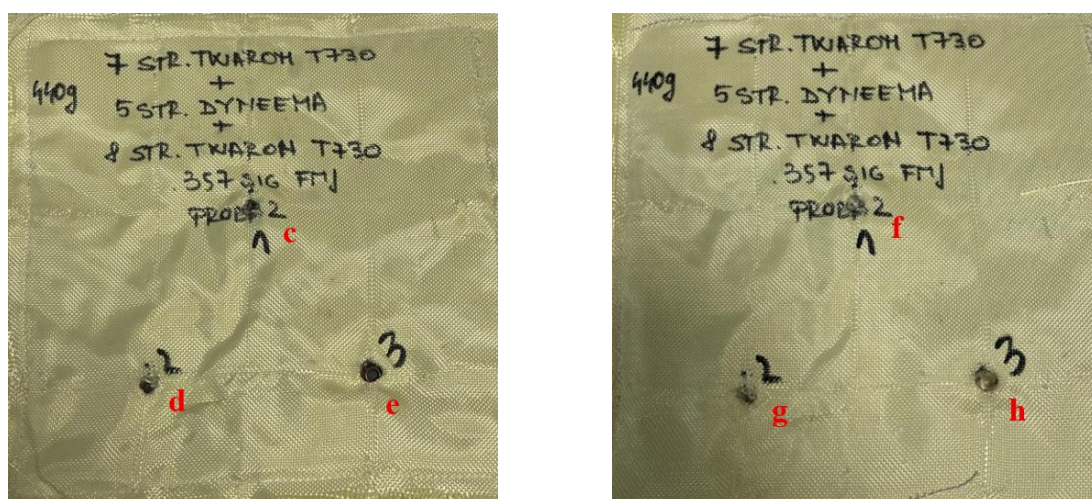


Fig. 5.15. Examinarea straturilor componente care au reținut proiectilul, pentru panoul 7T5D8T: a) stratul 2, spate; b) stratul 2, față; c) stratul 1, spate; detalii ale zonei de reținere a proiectilului pe spatele stratului 2: d) lovitura 1; e) lovitura 2; f) lovitura 3.



În Figura 5.15, imaginile d–f, se observă glonțul parțial vizibil, iar fibrele de Twaron prezintă deformări locale limitate, indicând traversarea stratului cu energie reziduală ridicată.

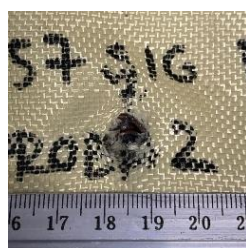
Figura 5.16 prezintă detalii ale zonelor de impact corespunzătoare stratului 1/7 al pachetului din Twaron, poziționat pe fața de impact a arhitecturii hibride. În imaginea (a) sunt evidențiate pozițiile gloanțelor reținute în structură, iar în imaginea (b) aceleași zone după extragerea proiectilelor, observându-se cavități bine definite. Detaliile mărite arată fibre puternic compactate și pliate în jurul glonțului (e).



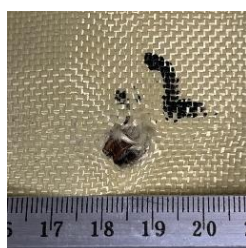
a)

b)

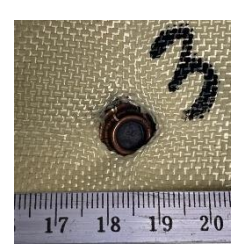
Stratul 1 din setul de 7 straturi Twaron T730 poziționat pe fața de impact a arhitecturii 7T5D8T, cu gloanțele în pachet (a) și cu gloanțele extrase (b)



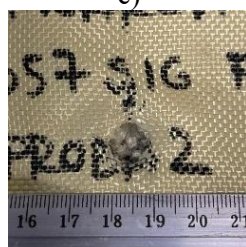
c)



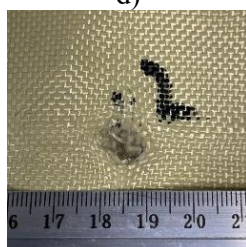
d)



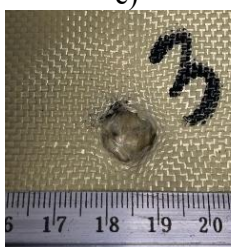
e)



f)



g)



h)

Fig. 5.16. Examinarea straturilor componente care au reținut proiectilul, pentru panoul 7T5D8T:

a) stratul 1, față; b) stratul 1, față, după extragerea gloanțelor; detalii ale zonei de reținere a proiectilului pe fața stratului 1: c) lovitura 1; d) lovitura 2; e) lovitura 3; f) lovitura 1 (fără glonț); g) lovitura 2 (fără glonț); h) lovitura 3 (fără glonț)

Figurile 5.11-5.16 oferă o reprezentare vizuală a straturilor din pachetul alcătuit din 7 straturi de Twaron T730 + 5 straturi Dyneema + 8 straturi de Twaron T730 (proba 2), atât din perspectivă frontală, cât și spatele stratului. În urma testării, s-a constatat o penetrare parțială, manifestată prin deteriorarea primelor 7 straturi de semifabricat. Imaginile surprind starea completă a pachetului după expunerea la trei proiectile.

În cazul structurii 7T5D8T, analiza rezultatelor experimentale indică faptul că stratul 7 din setul de 7 straturi Twaron T730 poziționat pe fața de impact a arhitecturii 7T5D8T, luând în calcul toate cele 12 lovituri, a reținut 50% din loviturile aplicate.

Determinarea rezistenței la impactul gloanțelor de .357 SIG pentru arhitectura 1EXO15T

Tabelul 5.8 prezintă caracteristicile impactului pentru panoul hibrid 1EXO15T

Tabelul 5.8. Rezultate experimentale pentru structura 1EXO15T

Probă	Nr. lovitură	Viteza măsurată (m/s)	Penetrare rezultată	BFD (mm)	Stratul unde s-a oprit glonțul
1EXO15T Proba 1	1	446	PP	30	S1/1
	2	443	PP	36	S1/1
	3	448	PP	35	S1/1
1EXO15T Proba 2	1	451	PP	25	S1/1
	2	450	PP	36	S1/1
	3	451	PP	30	S1/1
1EXO15T Proba 3	1	450	PP	34	S1/1
	2	451	PP	30	S1/1
	3	450	PP	35	S1/1
1EXO15T Proba 4	1	452	PP	31	S1/1
	2	452	PP	29	S1/1
	3	449	PP	36	S1/1

BFD se situează în intervalul aproximativ 25–36 mm, cu o medie de ~32,3 mm, mult sub limita de 44 mm, impusă de standardul NIJ 0101.06 [116], în timp ce vitezele de impact variază într-un interval îngust (443–452 m/s). Aceste rezultate indică o absorbție eficientă a energiei și confirmă contribuția semnificativă a stratului Kevlar EXO la reducerea deformării pe fața posterioară, fără a afecta stabilitatea balistică a structurii.

Imaginile corespunzătoare fiecărui strat din structura 1EXO15T sunt prezentate în Figurile 5.17 - 5.18. Lipsa deteriorărilor semnificative pe stratul final indică faptul că proiectilele nu au traversat un număr important de straturi; energia impactului s-a disipat în principal în zonele superioare ale arhitecturii. Aceasta sugerează că integritatea structurală a pachetului a rămas în mare parte conservată, iar protecția oferită de straturile superioare a fost eficientă.

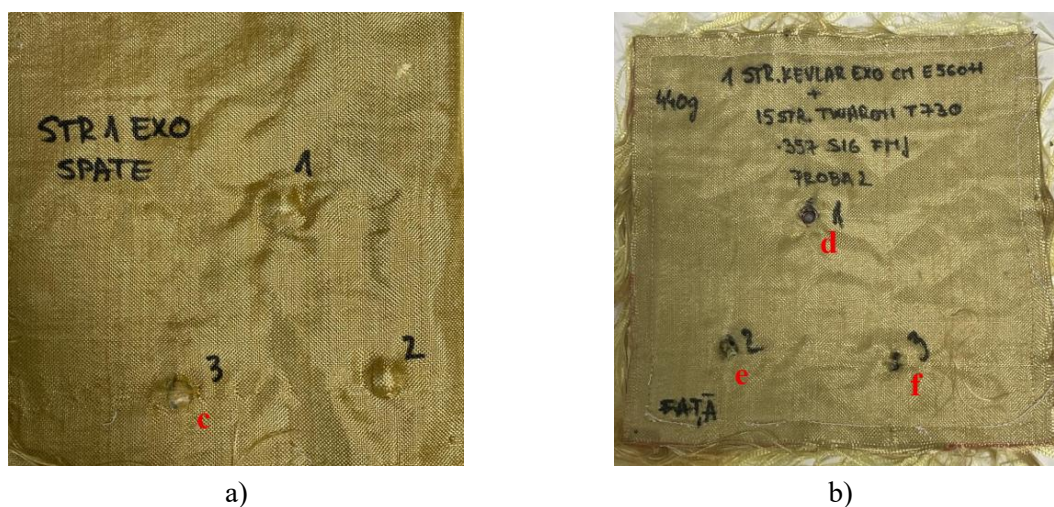
Detaliile mărite din Figura 5.17a și b evidențiază aceeași zonă de intrare în două stări diferite: în imaginea din stânga (a), glonțul este păstrat în țesătură, văzut din față, fiind parțial vizibil și înconjurat de fibre puternic întinse și compactate; în imaginea din dreapta (b), glonțul a fost extras, rămânând o cavitate bine definită, care evidențiază modul de redistribuire și ancorare a fibrelor de Twaron în timpul opririi proiectilului.



Fig. 5.17. Imagini ale stratului 1 (țesătură EXO), din panoul hibrid 1EXO15T: a) stratul 1, spate, cu detaliu al loviturii 3; b) stratul 1, față, cu detaliu al loviturii 3.

Imaginile din Figura 5.18 prezintă stratul 1 din Kevlar EXO poziționat pe fața de impact a arhitecturii, testat la impact cu muniție .357 SIG, pentru trei lovituri distincte. Pentru loviturile 1 și 2, se observă doar deformări locale ale țesăturii, fără penetrare vizibilă, indicând o absorbție excepțională a energiei reziduale. În cazul loviturii 3, glonțul a străpuns foarte puțin stratul, aspect evidențiat prin apariția unei protuberanțe locale bine definite pe fața posterioară și prin detaliul mărit (a), unde proiectilul este parțial vizibil. Fibrele din zona de impact sunt puternic compactate și întinse în jurul glonțului, ceea ce sugerează că stratul Kevlar EXO a funcționat ca strat final de frânare, limitând penetrarea și prevenind perforarea completă, în ciuda energiei cumulative a impacturilor succesive.

Figura 5.19b arată un mecanism de captare foarte eficient a glonțului, caracterizat prin „înfășurarea” proiectilului de către fibrele de Kevlar. Glonțul este strâns prins în țesătură, fiind vizibil un contact între fibre și mantaua acestuia, cu fibre puternic compactate și pliate radial în jurul proiectilului. Acest mod de ancorare indică un transfer gradual al energiei energiei cinetice a proiectilului și o frânare progresivă, care explică capacitatea materialului de a stopa proiectilul într-un singur strat.



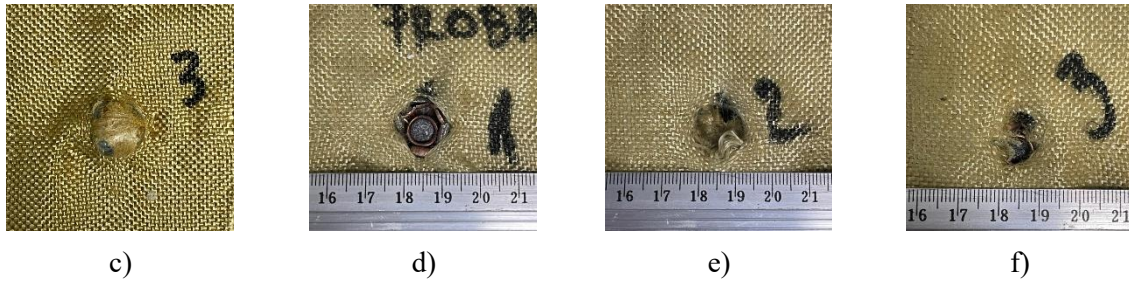


Fig. 5.18. Examinarea stratului EXO care a reținut proiectilul, pentru panoul 1EXO15T730:
a) stratul 1, spate; b) stratul 1, față; detalii ale zonei de reținere a proiectilului pe fața stratului 1: c)
lovitura 3, spate; d) lovitura 1; e) lovitura 2; f) lovitura 3, față.

Stratul din Kevlar EXO a demonstrat un comportament balistic excepțional, reușind să oprească proiectilele .357 SIG într-un singur strat, fără apariția perforării complete nici a acestui strat, chiar și în condiții de impact repetat. Această performanță evidențiază capacitatea ridicată a materialului de a absorbi și disipa energia cinetică a proiectilului prin mecanisme eficiente de deformare și ancorare a fibrelor.

Calculul limitei superioare de toleranță conform NIJ 0101.07

Atunci când orice măsurătoare BFD depășește 44,0 mm, trebuie să existe o certitudine de 95 % că 80 % din toate adâncimile BFD vor fi de 44,0 mm sau mai mici. Această cerință poate fi verificată utilizând o limită de toleranță statistică. Se preconizează că o parte declarată din întreaga populație a tuturor măsurătorilor BFD se va situa la sau sub limita superioară de toleranță statistică. Pentru a realiza acest lucru, se presupune că populația măsurătorilor BFD este distribuită normal, iar limita superioară de toleranță, BFD_U , trebuie să fie $\leq 44,0$ mm. Limita superioară de toleranță este definită mai jos [117]:

$$BFD_U = BFD_{ave} + k_1 s \quad (5.2)$$

Media valorilor BFD, BFD_{ave} , este calculată în felul următor:

$$BFD_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N BFD_i \quad (5.3)$$

N reprezintă numărul de măsurători BFD pe un model particular, rezultate din lovituri corecte, și în care dimensiunea, starea de condiționare și amenințarea de testare sunt identice. BFD_i sunt măsurătorile BFD individuale. Abaterea standard a eșantionului, s , se calculează după cum se arată mai jos:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (BFD_i - BFD_{ave})^2} \quad (5.4)$$

Factorul k_1 , pentru un interval de toleranță unilateral s-a calculat conform NIJ [117] pentru setul de date experimentale

Pentru analiza măsurătorilor BFD în conformitate cu cerințele acestui standard NIJ, probabilitatea ca nicio măsurătoare BFD să nu depășească 44,0 mm trebuie să fie de cel puțin 80%. După efectuarea calculelor pentru factorul k_1 , valoarea acestuia este: $k_1 = 1,568$

Tabelul 5.9 sintetizează valorile individuale ale BFD obținute experimental pentru fiecare arhitectură balistică proiectată, corespunzătoare unui total de 12 lovituri pentru fiecare configurație. Datele permit evaluarea dispersiei rezultatelor și a repetabilității

comportamentului balistic, precum și compararea directă a performanței între arhitecturile analizate.

Tabelul 5.9. Seturi de date obținute experimental pentru fiecare arhitectură proiectată

Codul arhitecturii panoului	Valori individuale BFD (mm) pentru 12 lovituri											
20T	35	42	42	28	32	31	44	31	34	43	34	32
7T5D8T	31	35	32	26	33	26	34	29	28	32	27	31
8T2D7T	35	39	40	29	35	32	42	30	38	33	28	31
15T4XD	44	42	34	29	37	34	38	31	32	34	30	34
1EXO15T	30	36	35	25	36	30	34	30	35	31	29	36

Tabelul 5.10 prezintă rezumatul statistic al rezultatelor balistice obținute pentru arhitecturile analizate, incluzând media aritmetică a BFD, abaterea standard a eșantionului și limita superioară de toleranță (BFD_U). Valorile evidențiază diferențe clare între configurații, arhitecturile hibride având, în general, medii BFD mai reduse și dispersii mai mici, ceea ce indică un comportament balistic mai stabil.

Tabelul 5.10. Caracteristici ale valorilor BFD pentru fiecare arhitectură

Codul arhitecturii panoului	Media aritmetică a BFD (mm)	Abaterea standard a eșantionului, s (mm)	Limita superioară de toleranță, BFD_U (mm)
20T	35,67	5,72	44,63
7T5D8T	30,33	5,19	38,47
8T2D7T	34,33	4,59	41,54
15T4XD	34,92	4,60	42,13
1EXO15T	32,25	4,52	39,35

Limita superioară de toleranță pentru BFD, BFD_U în NIJ 0101.07 [117] rămâne un criteriu esențial pentru evaluarea riscului de traumă prin deformare la impact; valoarea de referință este 44 mm, iar interpretarea rezultatelor trebuie făcută printr-un cadru statistic care diferențiază comportamentul „sub limită”, „ușor peste” și „semnificativ sub limită”, luând în calcul dispersia și energia de impact.

Tabelul 5.11. Interpretarea rezultatelor ținând seama de valoarea BFD_U

Cod arhitectură	Limita superioară de toleranță, BFD_U (mm)	Interpretare
20T	44,63	Ușor peste limita de 44 mm – variație mai mare
7T5D8T	38,47	Semnificativ sub limita de 44 mm – deformare uniformă la impact repetat și absorbție eficientă a energiei cinetice a proiectilului
8T2D7T	41,54	Sub limita de 44 mm – dispersie redusă, comportament stabil
15T4XD	42,13	Sub limita de 44 mm – dispersie redusă, comportament stabil
1EXO15T	39,35	Semnificativ sub limita de 44 mm – deformare uniformă datorată energiei de impact și absorbție eficientă a acesteia

Structura de referință din 20 straturi Twaron T730 prezintă cea mai ridicată valoare BFD_U apropiată de limita maxim admisă, indicând o capacitate mai redusă de control al deformării pe fața posterioară.

Arhitecturile hibride evidențiază valori BFD_U semnificativ mai mici, confirmând eficiența introducerii straturilor din Dyneema și Kevlar. Cea mai bună performanță este obținută de arhitectura 1EXO15T, care prezintă cea mai scăzută limită superioară de toleranță, urmată de 7T5D8T, demonstrând o reducere clară a riscului de depășire a pragului impus de standardele balistice.

Comportamentului la impact al materialelor de protecție prin imagini capturate cu camera de filmare ultrarapidă

În Figura 5.19 sunt prezentate imagini succesive ale impactului loviturii 1 pentru arhitecturile 20T, 7T5D8T, 8D2D7T, 15T4XD și 1EXO15T, cu glonțul de .357 SIG capturate cu camera de filmare ultrarapidă la 20000 de cadre/secundă. Camera utilizată și specificațiile acesteia sunt menționate la subcapitolul 5.2.

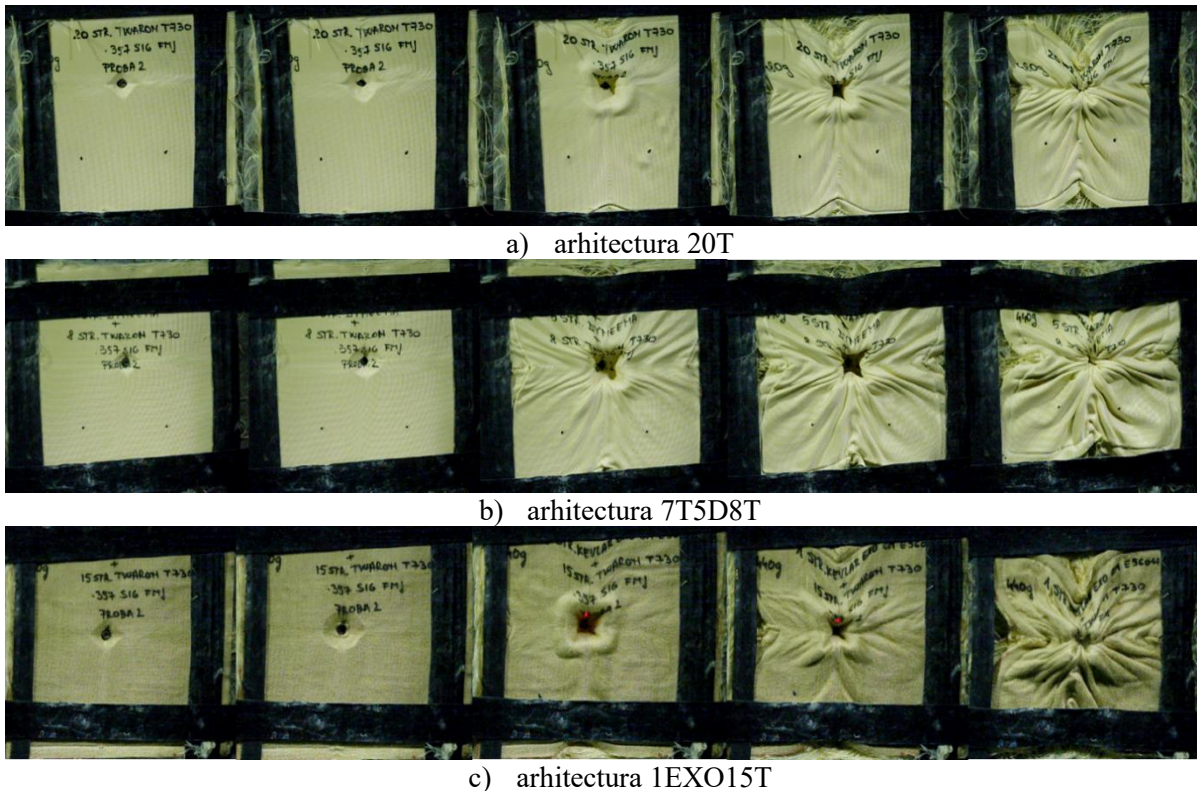


Fig. 5.19. Imagini succesive ale impactului loviturii 1 cu glonțul de .357 SIG, capturate cu camera de filmare ultrarapidă la 20000 de cadre/secundă

Analiza comparativă evidențiază în mod clar faptul că răspunsul materialului este determinat de felul în care energia cinetică este preluată, distribuită și disipată prin întindere, forfecare, compresie locală și eventual rupere progresivă. În toate seturile (Fig. 5.19a și c) se observă aceeași secvență generală: inițial apare o perturbație punctuală în zona de contact (impactul), urmată de formarea unui „con” de deformare (*în engleză „bulging”*) și de propagarea tensiunilor către margini; ulterior, în funcție de arhitectura materialului, fie se

produce perforarea, fie deformarea se extinde pe o suprafață mai mare, indicând o absorbție mai eficientă a energiei proiectilului prin deformare plastică și întindere.

Arhitectura 20T. În primul set (Fig. 5.19a), materialul are o reacție predominant locală la impact, cu o deformare inițială relativ mică, urmată de o creștere progresivă a adâncimii și a diametrului zonei deformat. Se remarcă, ulterior, o „înflorire” radială a materia-lului, care sugerează că straturile sunt capabile să redistribuie tensiunile către margini, înainte de apariția unei rupei majore. Deformarea capătă un aspect de cute radiale, tipic pentru mate-riale flexibile, în care energia este absorbită prin întinderea fibrelor și alunecarea relativă între straturi. Chiar dacă deformarea este amplă, nu se observă o oprire completă a fenomenului în cadrele finale, ceea ce indică penetrarea avansată a straturilor, cu pierdere graduală de energie.

Arhitectura 7T5D8T. Al doilea panou (Fig. 5.19b) prezintă un comportament asemănător ca mecanism, dar cu o diferență importantă: deformarea pare să se extindă mai rapid și mai uniform în plan, iar „conul” de deformare are o geometrie mai simetrică. În primele cadre, impactul produce o zonă centrală de compresie, după care materialul se tensionează radial, iar cutele se organizează mai coerent. Acest tipar sugerează o structură care permite o transmitere mai eficientă a unde de șoc către margini, ceea ce înseamnă că energia glonțului este disipată pe o arie mai mare. Din perspectivă mecanică, aceasta este o semnătură a unei capacități mai bune de absorbție prin deformare globală, cu reducerea concentrării de tensiune strict în punctul de impact. În același timp, creșterea amplitudinii deformării indică faptul că materialul cedează în principal prin întindere.

Arhitectura 1EXO15T. În al cincilea set (Fig. 5.19c), diferența majoră este amplitudinea foarte mare a deformării și caracterul de membrană al răspunsului: materialul se comportă ca o suprafață tensionată care preia energia prin întindere globală, iar pliurile radiale sunt foarte evidente. Se observă o propagare rapidă a deformării către margini, ceea ce sugerează o capacitate ridicată de distribuție a tensiunilor și, implicit, o disipare mai eficientă a energiei pe întreaga structură. Deformarea extremă arată că materialul nu se fracturează fragil imediat, deci poate absorbi energie prin deformare plastică/elastică.

Examinarea comparativă a gloanțelor .357 SIG extrase din structurile balistice realizate de autor

În Figura 5.20 sunt prezentate imagini comparative cu gloanțele calibru .357 SIG, tip FMJ, extrase din structurile balistice 20T, 7T5D8T și 1EXO15T. Aceste imagini au rolul de a evidenția caracteristicile morfologice ale proiectilelor după impact și identificarea modificărilor survenite în urma interacțiunii cu structura balistică.

Se poate observa faptul că deformarea proiectilelor, în toate cele 3 cazuri, este destul de asemănătoare în cazul loviturii 1.

Proiectilele recuperate din arhitecturile 20T și 7T5D8T după lovitura 1 (Fig. 5.20a, b), precum și din arhitectura 1EXO15T după lovitura 2 (Fig. 5.20c), prezintă deformări puternic neregulate. Unele sunt aplatizate lateral și manifestă o expansiune accentuată, cu petale larg deschise și o cavitate frontală mult mai vizibilă. Cămașa metalică prezintă numeroase fisuri, iar în anumite cazuri se observă o separare parțială între segmentele cămășii și miezul de plumb,

sugerând un proces de „decojire” cauzat de tensiunile extreme. La unele proiectile, zona din jurul cavității frontale pare aproape „sfâșiata”, aspect compatibil cu o decelerare foarte bruscă.

Proiectilele .357 SIG rezultate din loviturile 2–3 (Fig. 5.20a, b), precum și din lovitura 1 în arhitectura 1EXO15T (Fig. 5.20c), prezintă caracteristici morfologice similare.

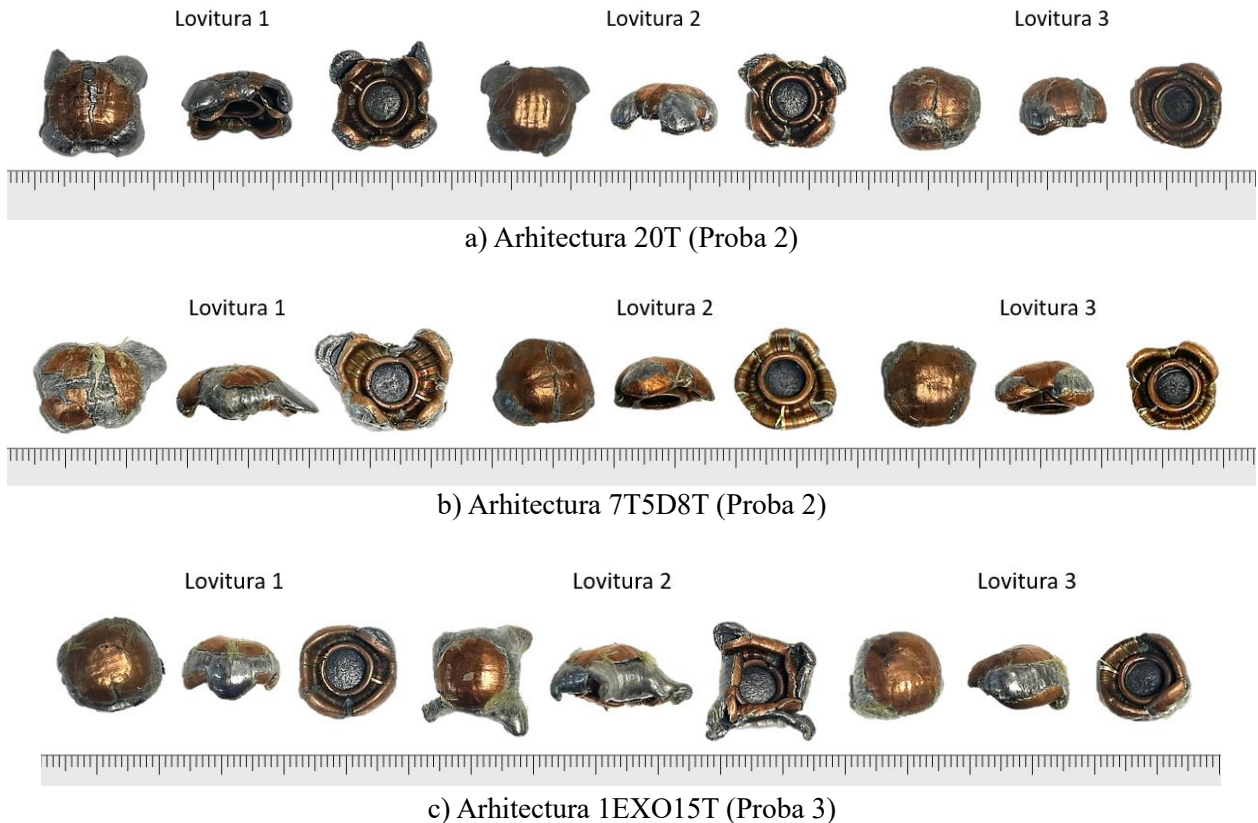


Fig. 5.20. Gloanțe .357 SIG extrase din structurile balistice testate

Deformarea este moderată, cu un efect de mushrooming simetric și cu menținerea formei generale a proiectilului. Vârful apare vizibil aplatizat, iar cămașa este rulată în petale groase. Se observă fisuri radiale scurte și mici zone de deschidere la marginea cămășii, însă fără rupturi extinse sau pierderi semnificative de material. Suprafața cuprată este încă vizibilă pe porțiuni mari, ceea ce sugerează abraziune moderată și o păstrare bună a integrității cămășii.

Din perspectiva mecanicii materialelor, diferențele observate pot fi explicate prin raportul dintre rezistența mediului și ductilitatea cămășii. În medii care induc o presiune frontală mare și uniformă, cămașa se deformează plastic și se rulează în petale relativ simetrice, iar fisurile apar în principal ca efect al tensiunilor de întindere la marginea expansiunii.

5.5. Analiza deteriorării fibrelor aramidice din structurile testate, la nivel micro și macro

5.5.1. Pregătirea probelor care conțin fibre aramidice, pentru investigarea cu ajutorul microscopului electronic

Pregătirea probelor care conțin fibre aramidice pentru microscopia electronică (SEM) implică mai multe etape pentru a asigura imagini de înaltă calitate. Acest lucru ar putea fi

aplicat, cu aspecte diferențiate, și la alte fibre polimerice. În acest studiu, probele sunt acoperite cu un strat de aliaj de aur de 6 nm, cu ajutorul echipamentului Sputter Coater, iar parametrii dispozitivului de acoperire sunt: presiunea vidului - 6 mbar, intensitatea curentului de plasmă - aproximativ 18 mA și distanța de lucru - 50 mm. Imaginile SEM au fost obținute cu ajutorul microscopului electronic de baleiaj FEI Quanta 200. Caracteristicile sale includ rezoluție - 4 nm, putere de mărire - 1 milion de ori, software pentru: comandă, software de analiză cu spectrometru EDX etc. [19], [102].

5.5.2. Mecanisme de cedare a fibrelor aramidice în sistemele de protecție individuală

Modurile de deteriorare în filamente, fire și țesături pot fi observate atât la nivel micro, cât și la nivel macro.

Ruperea localizată a firului apare când fibrele se fracturează aproape simultan, de regulă în punctul cel mai ascuțit de contact cu penetratorul, fiind însoțită de un sunet specific și o scădere bruscă a sarcinii. Mecanisme principale sunt întinderea axială și forfecarea pe grosime, iar cedarea survine când deformația depășește limita de rupere. Această limită scade odată cu creșterea vitezei de deformare [68].

Cedarea în puncte diferite apare când fibrele unui fir se rup în locații variate de-a lungul lungimii, nu doar în zona de impact, putând surveni între punctul lovirii și marginile de prindere. Acest tip de rupere indică o distribuție mai largă a deformației, cauzată de variații în direcția și repartizarea forțelor sau de neuniformități structurale. Consecința este o degradare mai progresivă și mai puțin concentrată, care poate reduce eficiența protecției [68].

Scoaterea / tragerea firului din țesătură apare atunci când niciuna dintre fibrele dintr-un fir nu se rupe, dar un capăt al firului este tras afară din rețeaua țesăturii. Acest tip de distrugere poate apărea doar în cazul firelor slăbite sau neprinse (de obicei, pe margine). Forța necesară pentru tragerea firului din rețea este determinată de forța de frecare dintre firul în cauză și celelalte fire perpendiculare cu care se intersectează. Pe măsură ce firul este tras, numărul de fire cu care se intersectează descrește treptat, ceea ce duce la o scădere a sarcinii măsurate [68].

Fibrilarea este un mod de distrugere în care fibrele se fragmentează longitudinal în filamente mai fine. Procesul este favorizat de abraziunea de-a lungul fibrei, la care se adaugă efectele tracțiunii, iar în structurile stratificate contribuie și frecarea interstrat, generând abraziune transversală. Fenomenul poate duce la despicarea fibrelor, mai ales la impactul cu proiectilele semisferice, ogivale sau conice, iar manifestarea este similară cu cea din sistemele monostrat [28].

Arcuirea, bombarea sau nealinierea firelor ortogonale reprezintă un alt mecanism de deteriorare observat în țesăturile multistrat, în special în straturile din spate ale pachetului de material. Lim și colab. [49] au subliniat că arcuirea devine mai evidentă în aceste straturi, unde proiectilul, după ce a fost considerabil încetinit de straturile anterioare, încearcă să pătrundă printr-o abordare cu muchie. Acest fenomen de „arcuire” sau „bombare” apare atunci când firele din țesătură nu rămân perfect aliniate, având o curbura în direcția pătrunderii proiectilului.

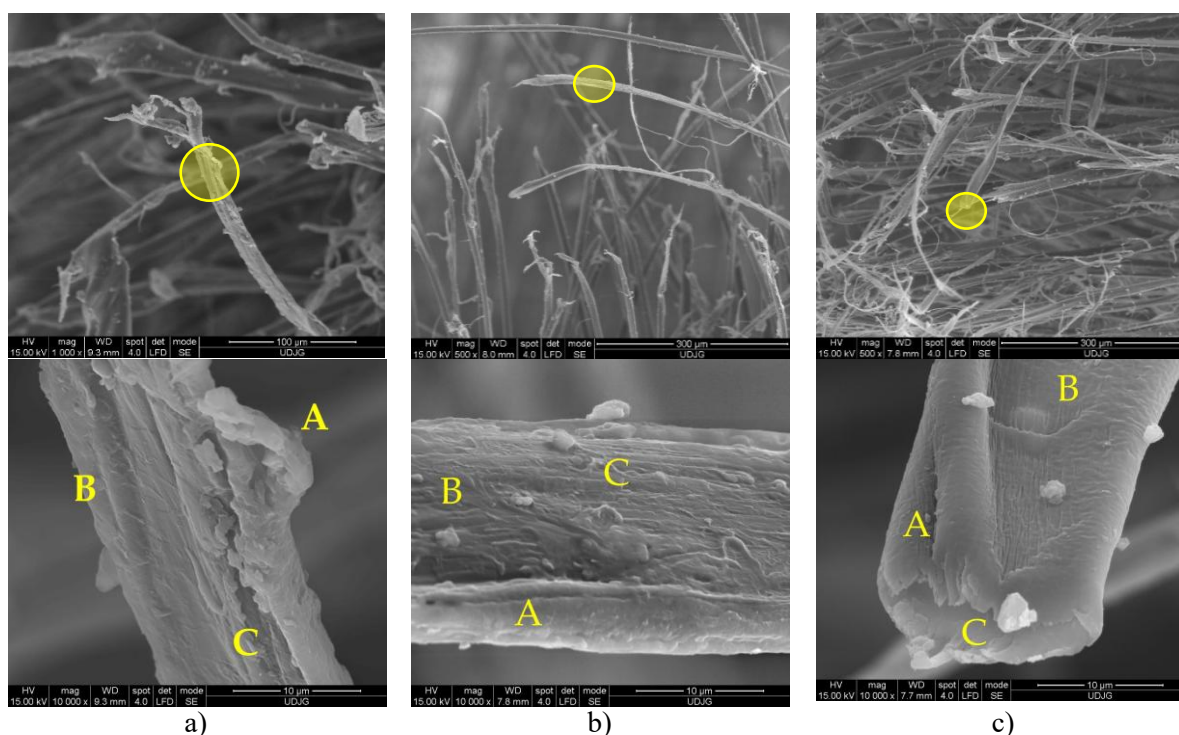


Fig. 5.23. Microstructuri caracteristice fibrelor aramidice deteriorate [19]: a) fibră din primul strat al unui panou din 5 straturi de Twaron T730, lovit de un proiectil FMJ de 9 mm ($V_0=371$ m/s); (b) fibră din primul strat al unui panou din 5 straturi de Twaron T730, lovit de un proiectil .357 SIG ($V_0=448$ m/s); c) același strat, altă fibră [19]

Cedări observate în imaginile SEM pentru o fibră aramidică deteriorată sunt prezentate astfel (Fig. 5.23):

a) fibră din primul strat al unui panou format din 5 straturi de Twaron T 730, lovit de un FMJ de 9 mm ($V_0=371$ m/s): detaliul din cerc a fost mărit ($\times 10000$) și se observă A - fragment de înveliș parțial desprins din miez, cu o structură de tip fulg vizibilă, B - microfibrile cu legături laterale mai mici, C - fibrilație evidentă;

b) fibră din primul strat al unui panou realizat din 5 straturi de Twaron T 730 (masă specifică 260 g/m^2), lovit de un proiectil .357 SIG ($V_0=448$ m/s): A – înveliș (teacă) cu fibrilație, B - traseu dezordonat, lângă literă observându-se o bandă cu capete încâlcite, C - fibrile cu aliniere dreaptă.

c) același strat, altă fibră: la o mărire de ($\times 10000$) se observă pe capătul rupt al fibrei A - fibrilație, B - desprinderea micro blocului scurt în zona capetelor încâlcite ale macromoleculelor, C - suprafața ruptă a capătului fibrei, care dezvăluie două niveluri de fibrile. Posibil ruperea acestei fibrile să se fi obținut prin forfecare, deoarece capetele rupte ale fibrilelor nu sunt întinse.

Impactul la viteză mare generează tensiuni și deformări localizate asupra fibrelor aramidice, provocând ruperea acestora. Imaginile SEM din Figura 5.24 sunt luate la o mărire redusă pentru a evidenția modul în care aceeași țesătură se comportă în condiții balistice diferite. Primul strat al fiecărui panou prezintă mai multe fire rupte, dar este dificil să se asocieze imaginea cu panouri diferite (panourile cu 5 straturi au penetrare totală pentru ambele proiectile, iar panourile cu 15 straturi opresc gloanțele).

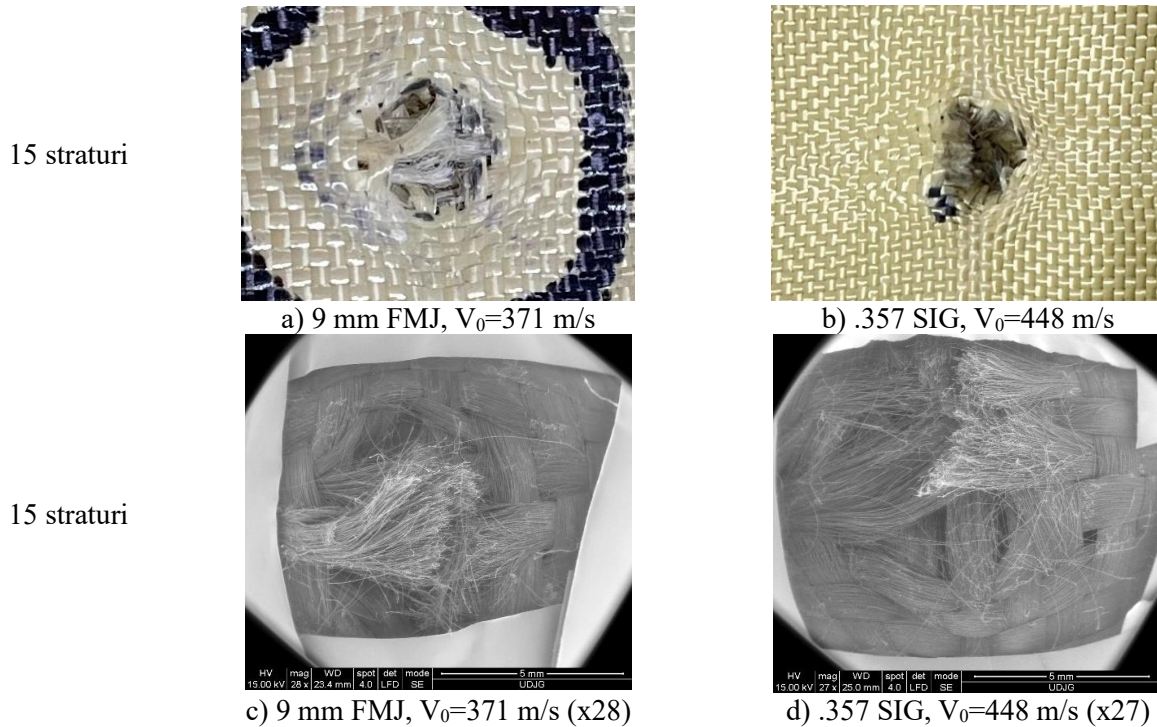


Fig. 5.24. Vedere a orificiului generat de impactul glonțului asupra panourilor studiate, realizate din țesătură Twaron T730. Condițiile de testare au fost temperatura aerului: $21 \pm 3^\circ\text{C}$, umiditatea relativă: 47%, presiunea atmosferică: 760 ± 15 mm Hg [19].

Vârful turtit al proiectilului .357 SIG comprimă firele și produce ruperea locală a fibrelor; un efect similar apare la 9 mm FMJ. În panourile mai subțiri, fibrele rămân mai ordonate datorită deformabilității mai mari. După perforare, apare efectul de biciuire, care duce la încălcire accentuată, mai pronunțată la viteze mari.

Delaminarea poate fi analizată la diferite niveluri:

- la scară microscopică, aceasta constă în desprinderea fibrelor de matricea lor,
- în timp ce la nivel mezzo sau macroscopic, devine vizibilă separarea straturilor.

Straturile multiple de țesătură aramidică sunt frecvent utilizate în confecționarea vestelor balistice, însă forțele generate de impact pot duce la separarea acestora, reducând astfel eficiența lor în absorbția energiei.

Toate imaginile SEM din Figura 5.25 sunt luate din primul strat al unui panou format din 5 straturi de țesătură Twaron T730 după ce a fost lovit de un proiectil .357 SIG, cu o viteză de impact de 448 m/s.

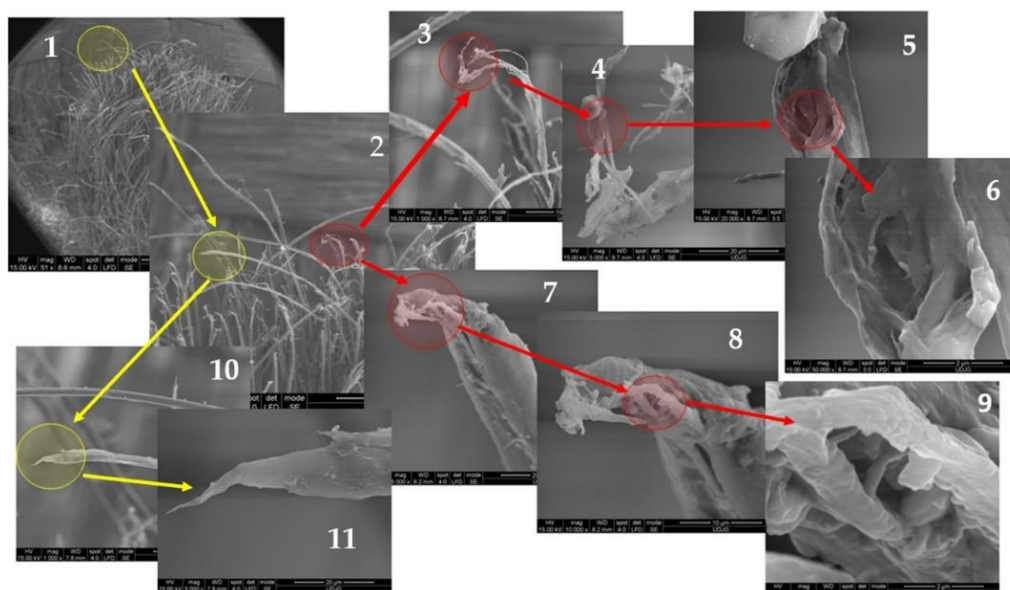


Fig. 5.25. Mărire pas cu pas pentru evidențierea diferitelor mecanisme de rupere a fibrelor aramidice, după impactul balistic [19].

Săgețile în culorile roșu și galben indică următoarea mărire a unui câmp de interes. Astfel, imaginile SEM din Figura 5.25 sunt detaliate astfel

1 - imaginea SEM cu cea mai mică mărire ($\times 50$); aceasta prezintă un fir principal (firul care suportă direct lovitura proiectilului și care, de obicei, prezintă cel mai mare grad de deteriorare), dar identificarea mecanismelor de rupere a fibrelor nu este încă vizibilă;

2 - o mărire a imaginii SEM 1 (la $\times 200$), în care sunt identificate două fibre deteriorate care urmează să fie discutate; am marcat aceste două fibre cu un cerc roșu și unul galben; aceste culori sunt păstrate în imaginile următoare dacă fibra este aceeași ca în cercul inițial;

3 - un detaliu al fibrei rupte, cu o subțiere (sau gătuire) a capătului fibrei rupte ($\times 1000$), care arată fibrile rupte, cu dimensiuni diferite care indică zone cu proprietăți mecanice diferite din cauza discontinuității în ordinea și dimensiunea moleculară;

4 - următoarea mărire ($\times 5000$) arată cum acționează fibrilația în această fibră, relevând fibrilația neuniformă;

5 - detaliu al unei diviziuni locale între fibrile ($\times 20000$);

6 - un detaliu al zonei cu fibrilație ($\times 50000$);

7 - un detaliu al cercului roșu din imaginea 2, la o mărire mai mare ($\times 5000$) care a evidențiat o tăietură prin forfecare cu subțierea capătului fibrei, reflectând procesul de mare viteză (impactul ballistic);

8 - un detaliu al capătului rupt al fibrei ($\times 10000$);

9 - ($\times 50000$) sunt vizibile microfibrile foarte subțiri între fibrile, pe direcția fibrei;

10 - imaginea prezintă fibra pe o lungime de aproximativ 100 micrometri ($\times 1000$), prezentând mai multe mecanisme de rupere: ruperea capătului prin tensiune, gătuirea fibrei, scindarea locală a fibrelor;

11 - detaliul fibrei rupte ($\times 5000$) sugerează o rupere bruscă în tensiune, cu o porțiune scurtă de fibrilă cu o formă conică, ceea ce înseamnă cedarea polimerului.

Figura 5.26 ilustrează diferitele tipuri de deformare a fibrelor, oferind exemple de gâtuire și aplatizare menționate anterior. Gâtuirea apare în zonele cu tensiune maximă, ducând la îngustarea și, în final, ruperea fibrelor. Aplatizarea este cauzată de presiunea exercitată de proiectil, modificând forma fibrelor și influențând comportamentul materialului la impact.

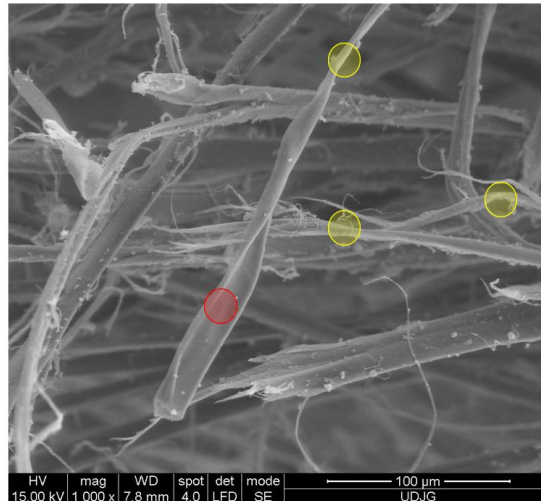


Fig. 5.26. Fibre deteriorate de pe fața stratului 1, dintr-un panou de 15 straturi de Twaron T730, lovit de un proiectil .357 SIG, $V_0=448$ m/s. Deformarea fibrelor: cercuri galbene - gâtuire, cercuri roșii - aplatizarea [19]

Analiza mecanismelor de cedare ale fibrelor aramidice la mărimi de la $\times 27$ la $\times 10000$, pentru un panou de 15 straturi Twaron T730, testat cu muniția 9 mm

În Figura 5.27 se arată modul prin care se realizează analiza mecanismelor de cedare prin mărirea succesivă a zonelor de interes. Pe baza acestor imagini se realizează următoarea descriere:

- a) o mărire relativ mică, $\times 28$, care se poate obține și cu un obiectiv performant la un aparat de fotografiat, pune în evidență mărimea orificiului rămas pe primul strat și evidențiază firele principale (cele rupte parțial sau total de proiectil), și cele secundare (fire presate lateral de trecerea proiectilului), atât pe bățatură cât și pe urzeală;
- b) la o mărire de $\times 1000$, arată o fibră despăcată la vârf, cu fibrilele vizibile, dar nu în detaliu, îndoite (de trecerea forțată a proiectilului, după ruperea fibrei);
- c) la o mărire de $\times 2000$, fibra are vizibile zonele deteriorate prin fibrilare, aplatizare, ruperea prin întindere a fibrilelor de capăt;
- d) la $\times 5000$, aceste mecanisme se văd mai bine, cu întinderi (subțieri) locale la capetele rupte;

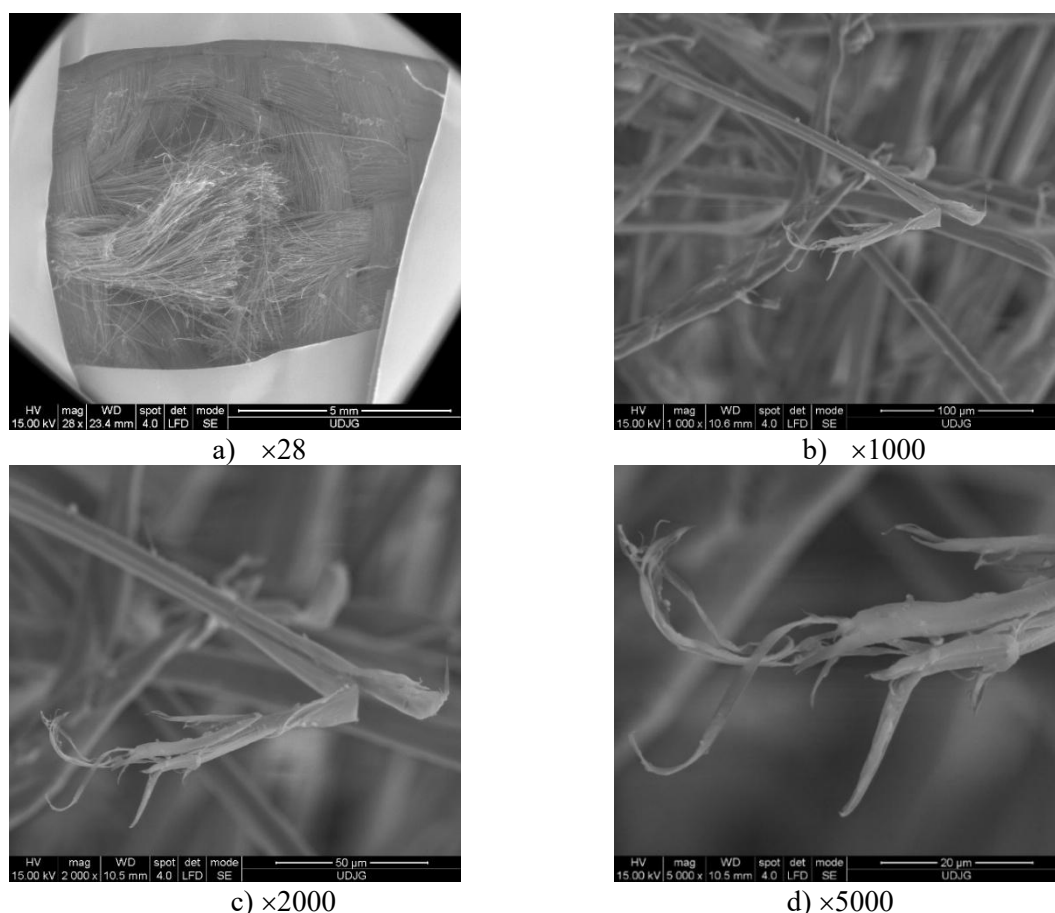


Fig. 5.27. Mărirea de la $\times 28$ la $\times 10.000$ în cazul structurii de 15 straturi Twaron T730, testat cu muniția 9 mm.

Analiza mecanismelor de cedare ale fibrelor aramidice la mărimi de la $\times 27$ la $\times 50000$, pentru un panou de 15 straturi Twaron T730, testat cu muniția .357 SIG

Figura 5.28 prezintă imagini SEM ale fibrelor distruse, aflate chiar pe conturul orificiului de intrare a poriectilului .357 SIG, pe primul strat al panoului format din 15 straturi Twaron T730: a) la mărire mică ($\times 27$) se poate observa modul de rupere al unui fir prin forfecare, dar mecasime de cedare la nivel de fibră încă nu se văd; c) la $\times 500$ încep să se observe detalii ale cedării fibrelor: ruperi specifice ale fibrelor, la forfecare și întindere cu separarea și alungirea diferențiată a capetelor rupte; d) la $\times 1000$ firele observate în imagine au cedat în mod diferit, unele la forfecare, altele la tracțiune, se observă și fibre deformate plastic, alte cu fibrilație intensă, localizate pe fibră, nu pe capătul rupt; imaginea reflectă varietatea mecasimelor de cedare și implicit mecanismele de absorbție a energiei cinetice a proiectilului; e) detaliul la $\times 5000$ al capătului rupt prin întindere: distribuția lungimilor diferite de rupere a fibrilelor de diferite dimensiuni în secțiune indică o rupere progrsivă a lor, ceea ce favorizează absorbția energiei proiectilului, și deci, încetinirea lui; f) – imaignini la $\times 10000$ a unei fibre rupte prin forfecare; fibrilele nu sunt separate clar, s-au deformat schimbându-și poziția; secțiunea prezintă decât urme de tăiere ,fără deformarea tipică a fibrei aramidice la tăieri cu viteză mică, indicând un proces foarte rapid;

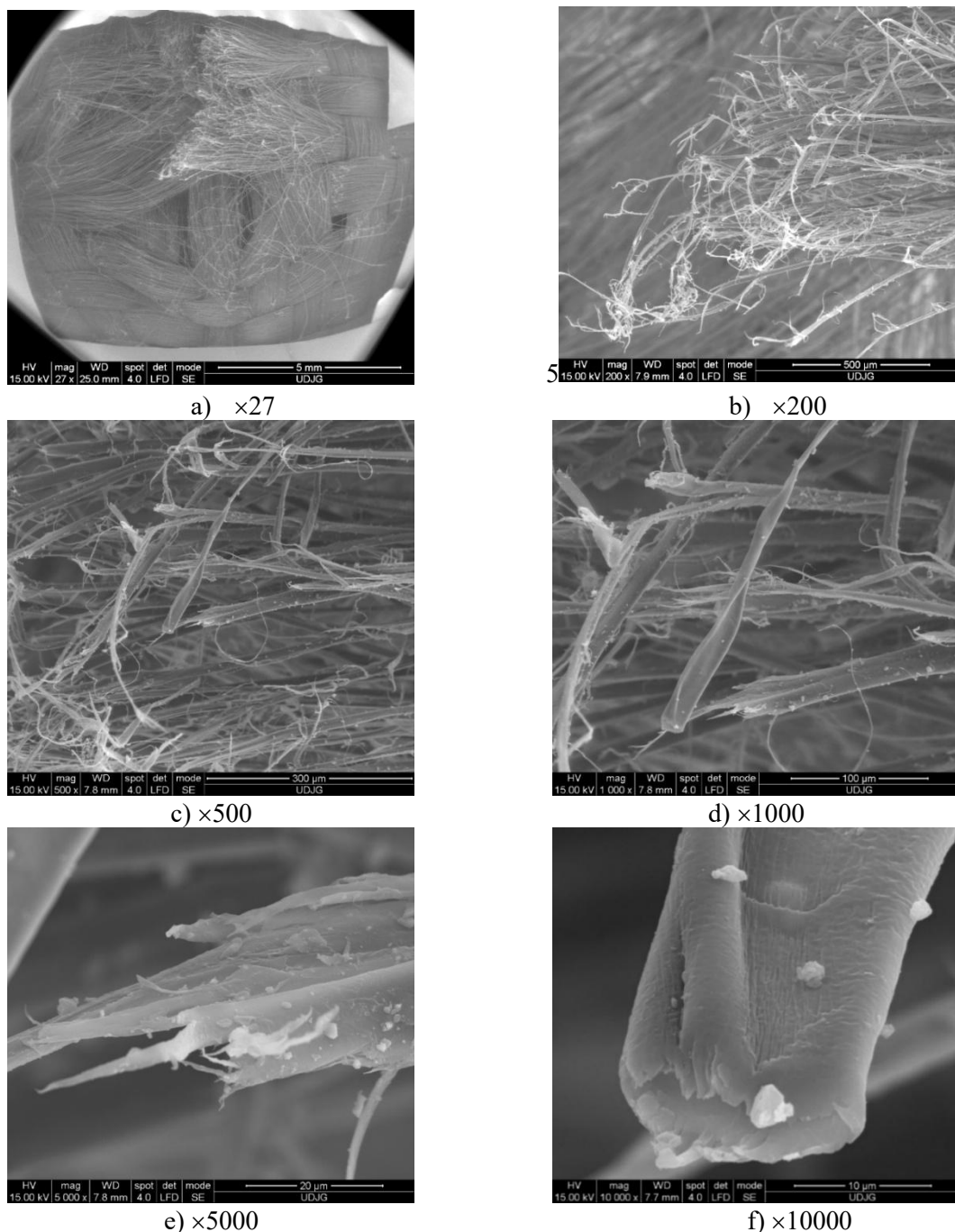


Fig. 5.28. Mărire de la $\times 27$ la $\times 10000$, în cazul panoului de 15 straturi Twaron T730, testat cu muniția .357 SIG

5.5.4. Analiza cu ajutorul microscopiei electronice (SEM) a arhitecturii 1EXO15T, după impactul balistic

Figura 5.29 prezintă fotografiile ale structurii testate, realizate dintr-un strat de Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H și 15 straturi de Twaron® T730, cusute pe toate laturile la 8-10 mm de margini. Panourile au dimensiunile 300 mm $\times$ 300 mm, iar distanța dintre lovituri este de 120 mm.



Fig. 5.29. Panou realizat dintr-un strat Kevlar® EXO™ și 15 straturi de Twaron T730: după testarea cu glonțul .357 SIG FMJ (3 lovituri)

Figura 5.30 prezintă comparația dintre aspectul macroscopic și morfologia la microscop electronic de baleiaj (SEM) a deteriorării la impact.

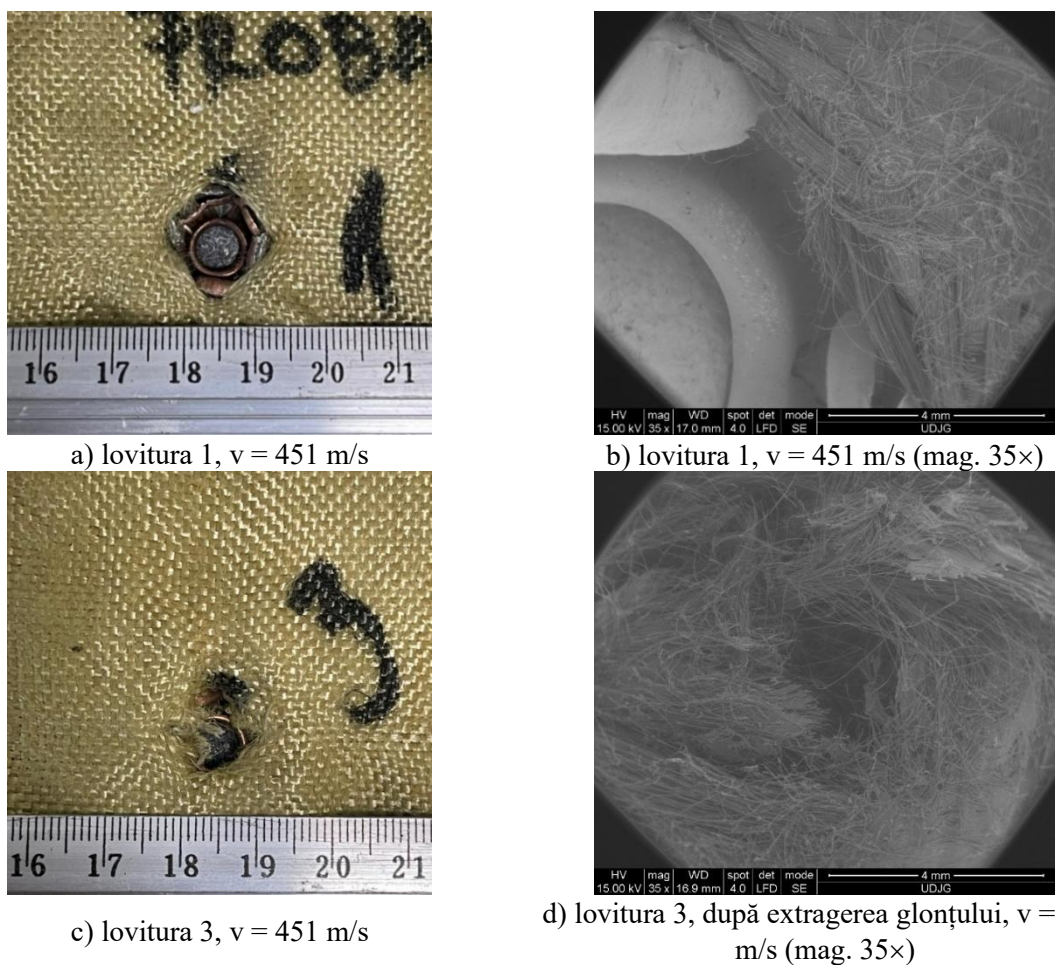


Fig. 5.30. Vedere a orificiului generat de impactul gloanțelor .357 SIG FMJ asupra structurii 1EXO20T.

Imaginile macro (a și c) evidențiază dimensiunea orificiului de intrare și zona afectată la nivelul suprafeței materialului. Imaginile SEM (b și d) arată detalii microstructurale, precum fibrilele rupte, smulse și delaminările locale ale structurii dar și glonțul (cămașa și miezul). Se observă un mecanism predominant de rupere prin tracțiune și forfecare a fibrelor, cu zone extinse de fibrilare. Corelarea macro–micro confirmă disiparea energiei prin deformare progresivă și fragmentarea rețelei de fibre.

Setul de imagini SEM, din Figura 5.31, surprinde, la niveluri succesive de magnificare, evoluția mecanismelor de cedare ale fibrelor de Kevlar EXO din zona de impact balistic (lovitura 1), oferind o perspectivă coerentă asupra modului în care acest material disipă energia proiectilului, în cazul unei țesături de tip 3D, cum este acesta.

La magnificare $\times 1000$ (Fig 5.31c) se evidențiază deformarea severă a rețelei fibroase tridimensionale, cu fibre dezaliniat, întinse și smulse din arhitectura inițială. Configurația 3D a țesăturii favorizează redistribuirea sarcinilor pe direcții multiple, inclusiv prin firele de legătură, reducând localizarea ruperii și contribuind la creșterea capacității globale de absorbție a energiei.

Creșterea magnificării la $\times 2000$ (Fig. 5.31d) arată că cedarea fibrelor nu este de tip fragil, ci are loc printr-un proces progresiv, dominat de deschiderea longitudinală a fibrelor și decoeziunea internă. Se observă separarea fasciculelor și apariția microfibrilelor alungite, indicând transferul gradual al sarcinii de la structura macroscopică a țesăturii 3D către nivelul microstructural al fibrei.

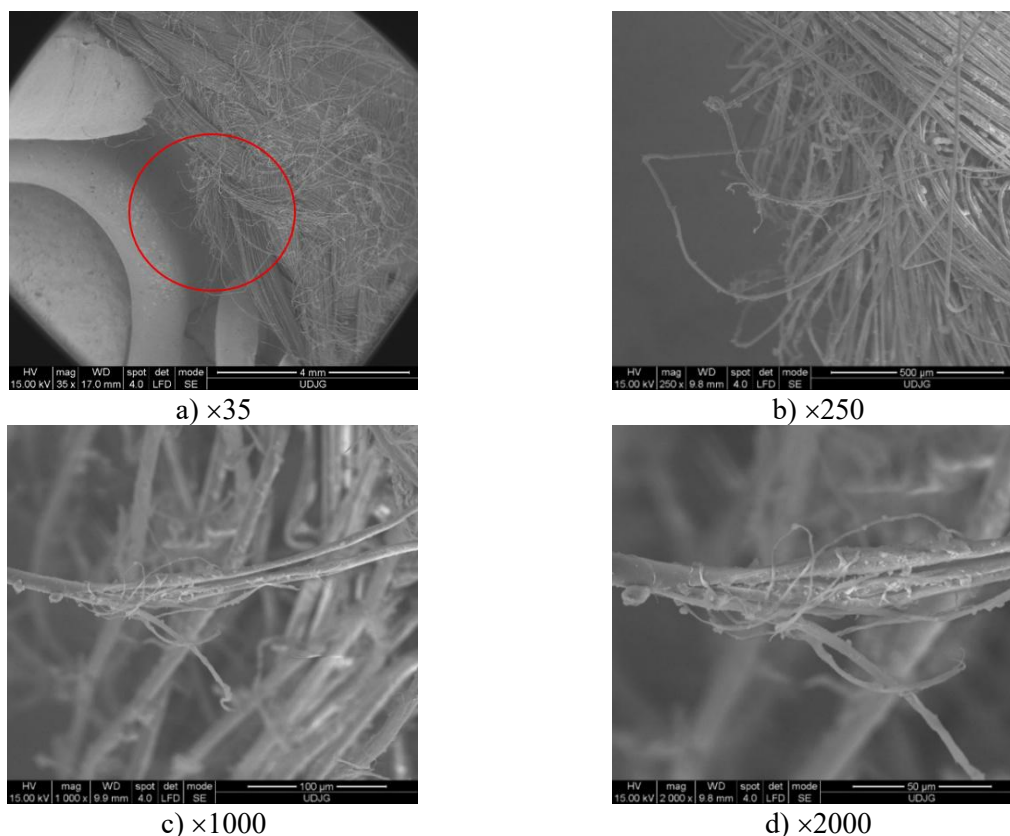


Fig. 5.31. Mărire de la $\times 35$ la $\times 2000$ a zonei de intrare a glonțului (lovitura 1), în cazul arhitecturii 1EXO15T, testat cu muniția .357 SIG

Setul de imagini SEM din Figura 5.32, ilustrează în mod coerent mecanismele de deteriorare ale fibrelor de Kevlar la impact (lovitura 2), evidențiind comportamentul multiscalar al materialului. La magnificări reduse ($\times 200$) se observă dezorganizarea accentuată a arhitecturii textile 3D în zona de impact, cu fibre puternic deplasate, îndoite și smulse, ceea ce indică redistribuirea solicitărilor pe direcții multiple și implicarea firelor interlaminare în preluarea energiei. La magnificări intermediare ($\times 1000$) devin evidente deformarea plastică severă a fibrelor, curbările pronunțate și deschiderea longitudinală a acestora, semn al transferului progresiv al sarcinii de la nivel structural către nivelul fibrei individuale. Morfologia neregulată a suprafețelor de cedare, confirmă caracterul predominant mecanic al degradării, dominat de tracțiune, forfecare și îndoire.

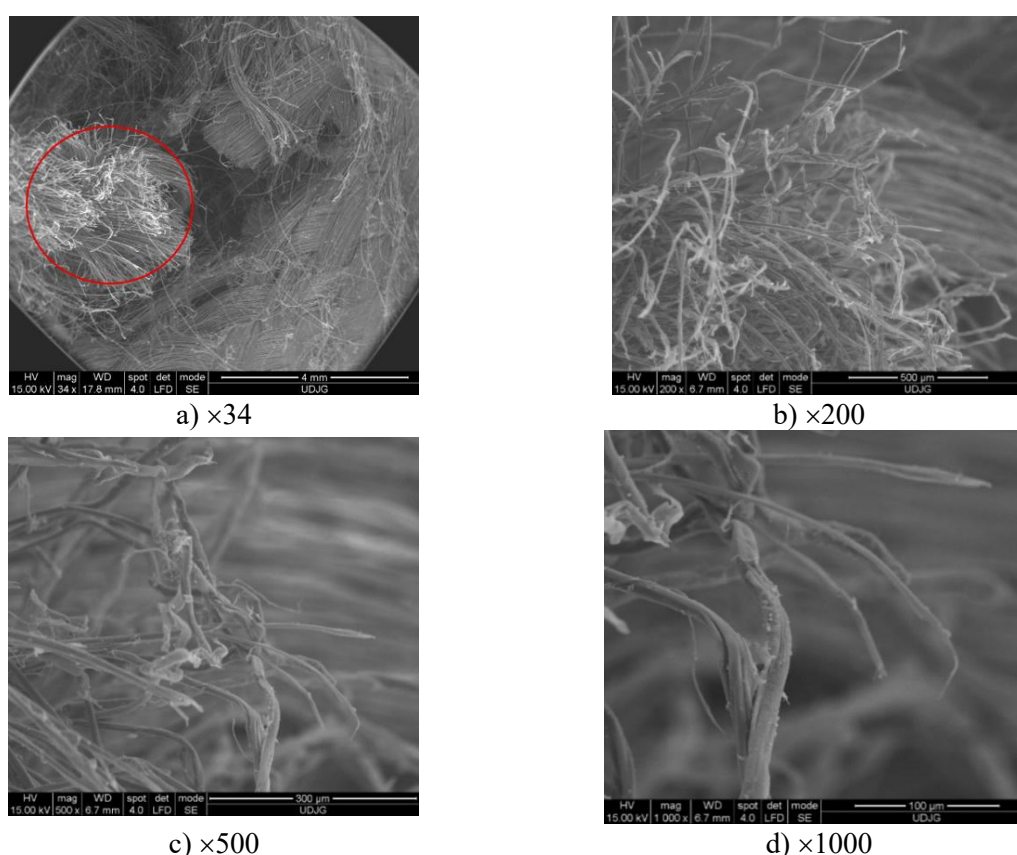


Fig. 5.32. Mărire de la $\times 34$ la $\times 1000$ a zonei de intrare a glonțului (lovitura 2), în cazul arhitecturii 1EXO15T, testat cu muniția .357 SIG

Setul de imagini SEM din Figura 5.33 corespunzător zonei de intrare a glonțului (lovitura 3), evidențiază în mod clar evoluția mecanismelor de deteriorare pe un domeniu larg de magnificări.

La magnificări de $\times 1000$ (Figura 5.33b), devin evidente modurile diferite de cedare ale fibrelor individuale, marcate prin zone de îndoire severă, exfoliere longitudinală și rupere progresivă. Fibrele prezintă margini neregulate și suprafețe aspre, indicând o cedare controlată, nu fragilă. Elementele evidențiate sugerează inițierea decoeziunii interne și desprinderea fasciculelor fibrilare sub acțiunea combinată a tracțiunii și forfecării.

La magnificări de $\times 5000$ (Figura 5.33c, d), se disting clar procesele de fibrilare și delaminare internă, cu apariția unor terminații subțiate, ascuțite, rezultate din alungirea și separarea progresivă a microfibrilelor. Prezența particulelor aderente pe suprafața fibrelor este asociată cu material rezidual provenit fie din abraziunea intensă locală, fie din interacțiunea directă cu proiectilul în momentul impactului.

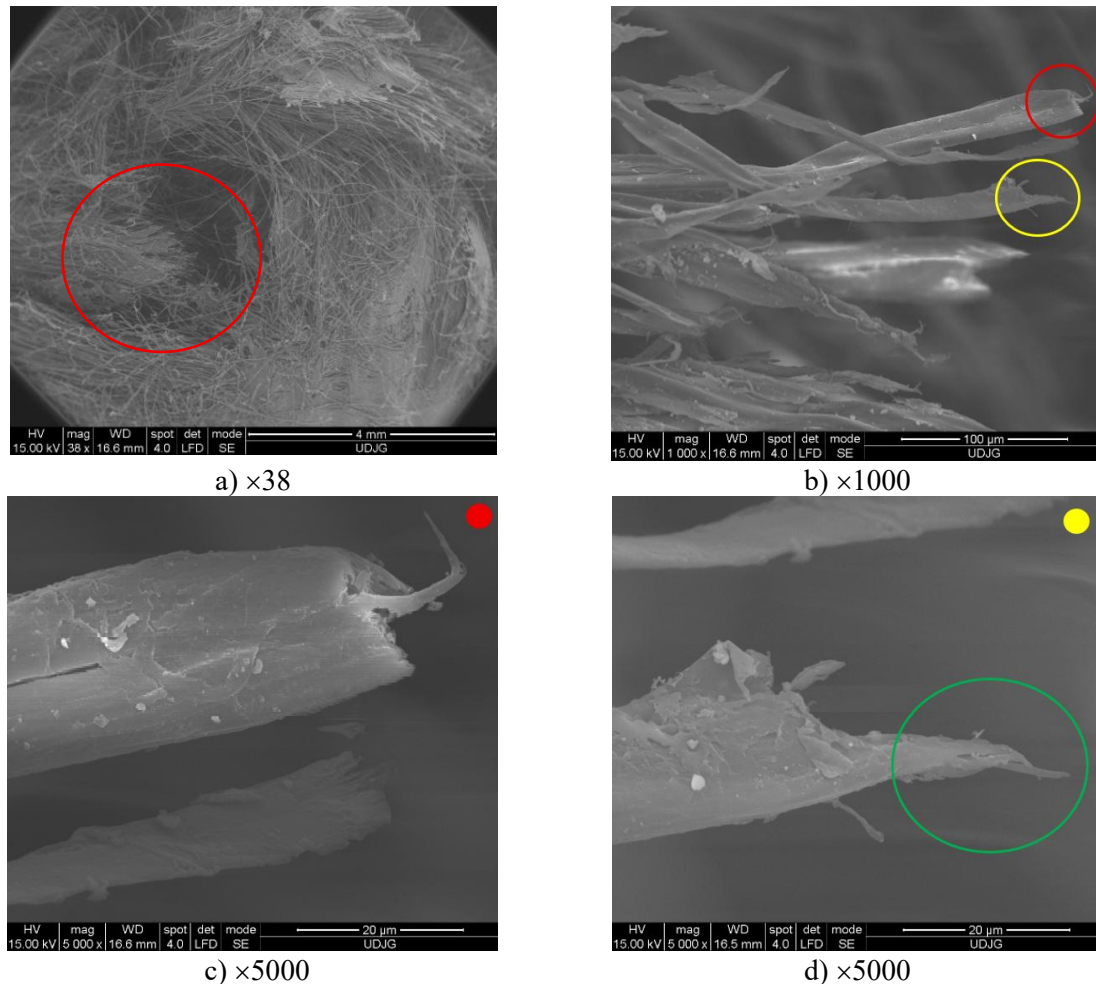


Fig. 5.33. Mărire de la $\times 38$ la $\times 5000$ a zonei de intrare a glonțului (lovitura 3), în cazul arhitecturii 1EXO15T, testat cu muniția .357 SIG

5.5.5 Clasificarea mecanismelor de cedare a fibrelor aramidice

Figura 5.34 oferă o clasificare a mecanismelor de rupere ale fibrelor aramidice observate la impact balistic și alte aplicații similare. În lucrarea [19], se analizează trei tipuri de deteriorare mecaică ale fibrelor aramidice, care pot apărea în diferite tipuri de atacuri, precum lovituri balistice, lovituri cu cuțit și lovituri cu țepușă. Fiecare dintre aceste tipuri de deteriorare poate afecta fibrele aramidice într-un mod distinct. Există asemănări și diferențe între acestea pentru a înțelege cum materialele de protecție reacționează în fața diferitelor tipuri de amenințări.

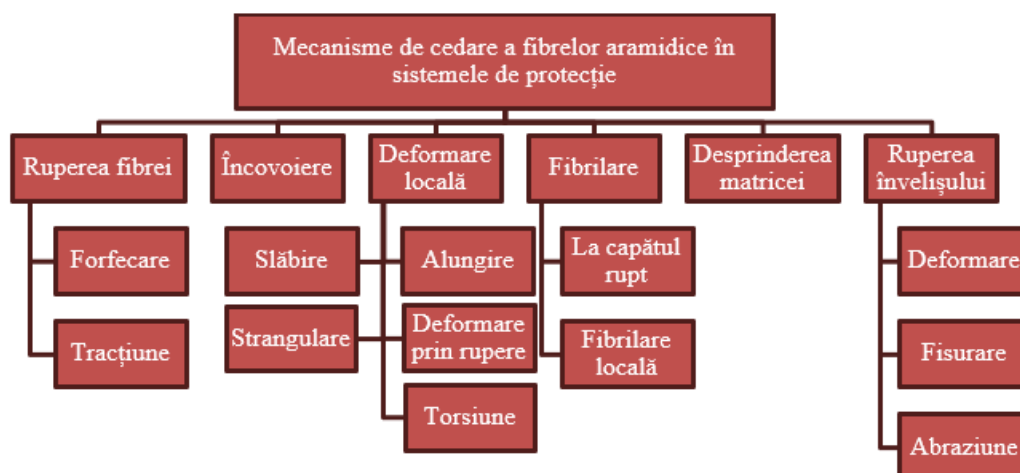


Fig. 5.34. Clasificarea mecanismelor de cedare mecanică pentru fibre aramidice utilizate pentru sistemele de protecție individuală [19]

5.6. Concluzii asupra studiului experimental al panourilor hibride de protecție individuală

Programul experimental a fost structurat în două etape complementare. În prima etapă a fost analizată comportarea panourilor balistice monomaterial, realizate dintr-un singur tip de semifabricat, supuse impactului muniției 9 mm FMJ și .357 SIG FMJ. Testările au fost efectuate într-un laborator specializat, în condiții controlate, conform metodologiei specifice evaluării protecției balistice. Fiecare configurație a fost supusă unui număr de 12 trageri, corespunzător limitei minime prevăzute de standardul National Institute of Justice pentru determinarea performanței balistice [116][117].

Rezultatele obținute au evidențiat nivelul de performanță al structurilor monomaterial și au fundamentat necesitatea optimizării arhitecturale prin hibridizare.

A doua etapă a fost dedicată evaluării structurilor hibride, testate exclusiv cu muniție .357 SIG FMJ, considerată reprezentativă pentru un nivel de amenințare superior. Această direcție a fost determinată de performanțele limitate observate în cazul panourilor monomaterial, alcătuite din 15 straturi de țesătură Twaron T730. Configurațiile hibride au integrat materiale relativ recente pe piața echipamentelor de protecție balistică — Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H, Kevlar® XD S002 și Dyneema® SB21 — pentru care literatura de specialitate oferă încă un număr restrâns de studii aplicative. În context național, investigarea acestor soluții este limitată, ceea ce conferă cercetării un caracter de actualitate și relevanță pentru domeniul protecției balistice din România.

Pentru structurile hibride au fost determinați parametrii BFD, toate configurațiile înregistrând adâncimi de deformare sub limita de 44 mm impusă de NIJ [116][117]. Analiza statistică a inclus determinarea valorilor medii și a limitelor superioare de toleranță (BFD_U), în concordanță cu metodologia NIJ [117], asigurând robustețea evaluării.

Comparativ cu panoul de referință, realizat din 20 straturi Twaron T730, soluțiile hibride au demonstrat performanțe superioare. Configurațiile 8T2D7T și 15T4XD au prezentat valori

medii BFD apropiate, în timp ce 7T5D8T și 1EXO15T au înregistrat cele mai reduse valori, cea din urmă evidențiindu-se suplimentar printr-o variabilitate statistică mai scăzută.

În ansamblu, hibridizarea a condus la reduceri ale parametrului BFD_U cu 5,6 – 13,80% și ale BFD_{ave} cu până la 14,97%, confirmând eficiența configurațiilor propuse în raport cu structura monomaterial de referință. Toate configurațiile hibride au menținut limita superioară de toleranță sub pragul de 44 mm, spre deosebire de panoul de referință 20T, care a depășit ușor această valoare.

Rezultatele evidențiază faptul că hibridizarea reprezintă nu doar o soluție tehnică de optimizare structurală, ci și o direcție cu potențial economic, prin utilizarea strategică a materialelor performante în zonele critice ale panoului și menținerea unei mase areale controlate. Configurația 7T5D8T a indicat cea mai ridicată marjă de siguranță din perspectiva deformării posterioare, iar 1EXO15T a evidențiat un compromis favorabil între performanță balistică, stabilitate statistică și masă.

Din punct de vedere metodologic, cercetarea a valorificat integral infrastructura experimentală disponibilă în România, combinând măsurători balistice instrumentate (determinarea vitezei cu cronograf), înregistrări cu cameră de mare viteză, analize macro- și mezo-scopice ale zonelor afectate, precum și investigații microstructurale prin microscopie electronică. Abordarea multi-scară și integrarea analizei statistice conform standardului NIJ [117] demonstrează capacitatea realizării unor cercetări experimentale complexe în domeniul protecției balistice individuale în cadrul infrastructurii existente la nivel național.

Investigația post-testare a constituit o etapă analitică esențială în astfel de studii de cercetare, nu doar una descriptivă. Documentarea fotografică sistematică a zonelor de impact a fost corelată cu analiza mezoscopică și cu examinarea microstructurală prin microscopie electronică (SEM), ceea ce a permis identificarea și interpretarea mecanismelor dominante de cedare: fibrilație progresivă, rupere localizată a fibrelor, și redistribuire a tensiunilor în planul țesăturii.

Corelarea observațiilor microstructurale cu parametrii balistici determinați experimental a oferit suport concluziilor formulate și a consolidat interpretarea diferențelor dintre configurațiile analizate.

Investigațiile post-testare au avut un rol esențial și în raport cu modelul numeric prezentat în Capitolul 3. Determinarea experimentală a numărului de straturi rupte și analiza mecanismelor dominante de cedare au furnizat un criteriu fizic direct pentru evaluarea adecvării ipotezelor de modelare.

Concordanța dintre rezultatele numerice și observațiile experimentale privind extinderea deteriorării în grosimea panoului confirmă validitatea abordării adoptate și susține coerența demersului integrat experimental–numeric. Astfel, analiza multi-scară realizată în cadrul prezentului capitol consolidează fundamentarea mecanică a modelului și reduce caracterul pur teoretic al predicțiilor acestuia.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1. Importanța temei

Teza de doctorat intitulată „Studiu experimental și numeric privind comportamentul balistic al panourilor hibride pentru protecție individuală” se înscrie în demersurile științifice dedicate creșterii nivelului de siguranță al persoanelor expuse riscurilor generate de agresiuni armate de tip individual. Lucrarea contribuie la dezvoltarea și optimizarea soluțiilor moderne de protecție balistică individuală, prin investigarea detaliată – atât prin metode experimentale, cât și prin modelare numerică – a modului în care panourile hibride răspund la impactul proiectilelor. În acest context, cercetarea are o finalitate profund aplicativă, vizând reducerea vulnerabilității umane în situații critice și, implicit, salvarea de vieți omenești prin îmbunătățirea performanțelor echipamentelor de protecție individuală.

Scopul lucrării a fost îndeplinit, întrucât autorul a realizat proiectarea, testarea și evaluarea comportamentului unui grup de panouri de protecție balistică, acestea putând fi propuse pentru utilizări practice. Dacă se analizează rezultatele din punct de vedere al nivelurilor de maturitate tehnologică (TRL), se poate considera că acest studiu a parcurs nivelurile TRL 1 până la nivelul TRL 4¹, urmând ca variantele de panou hibrid mai performante în privința protecției balistice să continue nivelurile următoare de maturitate tehnologică.

Pe durata programului de studii doctorale, autorul a beneficiat de sprijinul și expertiza unor specialiști cu experiență în domeniile modelării, analizării, realizării și testării panourilor de protecție, de la următoarele instituții:

- Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN și Ecologie, București,
- Universitatea Națională de Științe și Tehnologie „Politehnica București”,
- Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați,
- Institutul Național de Cercetări Aerospațiale „Elie Carafoli” - INCAS București,
- Autonomous Flight Technologies.

Expertiza personalului și infrastructura disponibilă au contribuit la extinderea limitelor individuale de cercetare și la elaborarea unei analize aprofundate a temei abordate.

Programul experimental s-a desfășurat în două etape. Prima etapă a vizat evaluarea comportării structurilor de protecție balistică realizate dintr-un singur tip de semifabricat, la impactul muniției 9 mm FMJ și .357 SIG FMJ, prin trageri în poligon, precum și verificarea parțială a conformității cu standardul NIJ 0101.07 [117]. Conformitatea a fost considerată parțială întrucât nivelurile de protecție impun testarea cu combinații specifice de calibre, iar muniția utilizată a acoperit doar parțial cerințele acestor niveluri iar numărul de teste pe un tip de panou a fost mai mic decât cerințele din standardul american. A doua etapă a urmărit evaluarea structurilor hibride, testate exclusiv cu muniție .357 SIG FMJ, deoarece autorul a

¹ **TRL 1** – Principiile de bază sunt observate și raportate; **TRL 2** – Conceptul tehnologic este formulat; **TRL 3** – Dovada experimentală a conceptului (proof of concept); **TRL 4** – Tehnologia este validată în laborator; **TRL 5** – Componente validate într-un mediu relevant; **TRL 6** – Demonstrarea tehnologiei într-un mediu relevant; **TRL 7** – Demonstrarea prototipului în mediu operațional; **TRL 8** – Sistem complet și calificat; **TRL 9** – Sistem validat în condiții reale de operare (utilizare efectivă) [120]

considerat mai riscantă această amenințare, și având în vedere că panourile simple, inițial testate, din 15 straturi de țesătură Twaron T730 au avut caracteristici nefavorabile. Panourile hibride, proiectate de autor, au inclus materiale lansate relativ recent pe piața specifică (Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H (produs de DuPont) [110], Kevlar® XD S002 (produs de DuPont) [112] și Dyneema® SB21 (produs de DSM, ulterior Avient Corporation) [113], și pentru care sunt foarte puține studii raportate în literatura de specialitate, sau chiar deloc.

6.2. Concluzii finale

Prezentul studiu de cercetare se constituie ca o lucrare unitară, integrând o analiză sintetică a contribuțiilor relevante raportate în literatura științifică de specialitate, o expunere sistematică a materialelor avansate utilizate în domeniul protecției balistice, precum și o evaluare critică a investigațiilor experimentale privind performanțele balistice ale materialelor și panourilor de protecție realizate pe baza țesăturilor tehnice speciale.

Din punct de vedere structural, lucrarea este organizată în 6 capitole interdependente, a căror succesiune logică facilitează interpretarea comportării materialelor stratificate hibride realizate pe bază de semifabricate din fibre speciale, fundamentată pe datele obținute prin simulări numerice și prin testări experimentale realizate de autor.

Sistemele de protecție balistică se caracterizează printr-o diversitate semnificativă de configurații structurale, materiale și combinații ale acestora. Varietatea interacțiunilor la impact, a mecanismelor de cedare și a modificărilor de comportament ale materialelor implicate impune o abordare sistematică a proiectării protecției balistice și o analiză detaliată a mecanismelor de cedare. Modelele analitice, empirice și semi-empirice urmăresc descrierea comportării sistemelor de protecție în situații particulare, având însă, de regulă, o aplicabilitate limitată la intervale restrânse ale parametrilor de influență și adesea la un anumit tip de amenințare.

Modelarea impactului glonț-pachet stratificat, realizată pentru configurații stratificate simple și hibride, a evidențiat rolul esențial al stratului de Kevlar EXO, poziționat ca prim strat peste pachetul din Twaron T730. Rezultatele experimentale prezentate în Capitolul 5 arată că structura alcătuită exclusiv din Twaron T730 a înregistrat atât penetrări parțiale, cât și penetrări totale la impactul cu glonțul modelat, în timp ce structura hibridă a prezentat exclusiv penetrări parțiale, cu oprirea proiectilului în primul strat. Este de menționat faptul că proprietăți ale straturilor de Twaron T730 au fost luate din catalogul firmei Teijin, în schimb, proprietățile stratului de Kevlar EXO sunt nevalidate experimental, fiind doar un studiu de simulare pentru optimizarea structurii hibride.

Autorul a realizat validarea modelului numeric prin compararea numărului de straturi afectate cu rezultatele obținute experimental pentru structuri similare. În cazul structurii stratificate simple, alcătuită din 15 straturi de Twaron T730, pentru situațiile de penetrare parțială s-au înregistrat experimental patru straturi distruse, în timp ce modelul numeric a indicat distrugerea a trei straturi. Pentru structura stratificată hibridă, compusă dintr-un strat de Kevlar EXO și 15 straturi de Twaron T730, atât în experimente, cât și în simulare, proiectilul a fost oprit în stratul de Kevlar EXO. Modul de fragmentare al proiectilului în simulări este

similar cu cel observat experimental; totuși, în testele reale s-a constatat o deformare și o deteriorare mai pronunțată a proiectilului comparativ cu rezultatele obținute prin simulare.

Utilizarea simulărilor numerice în studiul impactului oferă un avantaj major prin furnizarea rapidă de date relevante în procesul de dezvoltare a produselor destinate protecției la impact, fie că este vorba despre modele experimentale sau prototipuri. Aplicarea metodei elementelor finite în simularea impactului reprezintă o etapă importantă în proiectarea sistemelor de protecție, facilitând evaluarea influenței parametrilor de interes asupra rezistenței la impact a structurii, chiar dacă acuratețea rezultatelor nu este întotdeauna deplină. Corelarea rezultatelor numerice cu datele experimentale permite optimizarea configurațiilor constructive, contribuind la reducerea semnificativă a timpului, costurilor și resurselor umane necesare desfășurării campaniilor experimentale extinse.

Au fost folosite materiale Twaron T730, dar și materiale mai recente, de-abia intrate pe piață în acest domeniu: Kevlar EXO CoreMatrix CM E1100H, Kevlar XD S002 și Dyneema SB21. Fluxul tehnologic de realizare a structurilor stratificate a inclus o succesiune de etape bine definite: eșantionarea materialelor, debitarea acestora cu echipamente specializate, configurarea arhitecturilor stabilite, asamblarea prin coasere a pachetelor stratificate și, în etapa finală, efectuarea determinărilor privind masa structurilor obținute.

Rezultatele campaniei experimentale, incluzând descrierea aparaturii de măsurare și monitorizare utilizate, a procedurii de încercare și a standardelor aplicabile în cadrul testelor. Analiza rezultatelor obținute la testele balistice, realizată pe baza documentării fotografice, a înregistrărilor video de mare viteză și a investigațiilor prin microscopie cu scanare electronică (SEM), evidențiază faptul că structurile hibride de protecție balistică proiectate de autor ating performanțe care susțin recomandarea utilizării acestora în prototipuri. Coroborarea imaginilor SEM, a fotografiilor la scară macroscopică și a secvențelor video a permis identificarea și descrierea mecanismelor de cedare specifice acestor configurații de structuri balistice, precum și analiza dinamicii procesului de impact.

6.3. Sinteza datelor experimentale privind caracteristicile panourilor hibride dezvoltate de autor

Pentru structurile hibridizate, autorul a determinat parametrii caracteristici ai BFD, prezentați în Tabelul 6.1. Pe baza valorilor limită superioare calculate, s-a constatat că pentru toate pachetele testate adâncimea deformării a fost sub 44 mm, limita impusă de standardul elaborat de National Institute of Justice [116] pentru evaluarea armurilor individuale, menținută și în versiunea actualizată a standardului. Se observă că hibridizarea studiată în această teză a dat rezultate mai bune față de panoul simplu din 20 straturi T730. Două tipuri de panou, 8T2D7T și 15T4XD au avut media BFD de 41,54 mm și respectiv 42,13 mm, mai mici dar apropiate de valoarea pentru panoul simplu. Pentru celelalte două tipuri de panouri hibride, 7T5D8T și 1EXO15T au avut cele mai mici valori ale BFD. Panoul 1EXO15T are și cea mai mare reducere a deviației standard, reflectând o comportare mai uniformă atât la impact multiplu, dar și a celor 4 panouri testate.

Diferența în procente pentru caracteristicile analizate arată că panourile hibride au avut BFD_U cu 5,6% până la 13,80% mai mici, iar BFD_{av} a fost și ea mai mică decât panoul simplu, de referință, dar numai cu 2,10% pentru 15T4XD și cu maxim 14,97% pentru panoul 7T5D8T. Deși cu o diferență procentuală mai mică, de 9,58% pentru BFD_{av}, panoul 1EXO15T, panoul a demonstrat, de asemenea, performanțe îmbunătățite comparativ cu structura de referință.

Tabelul 6.1. Analiza comparativă a parametrilor statistici rezultați din testarea structurilor hibride

Simbol, unitate de măsură	Arhitec- tură simplă	Arhitecturi hibride							
	20T	7T5D8T	Δ față de 20T	8T2D7T	Δ față de 20T	15T4XD	Δ față de 20T	1EXO15T	Δ față de 20T
N	12	12		12		12		12	
BFD_U [mm]	44.63	38.47	-13.80	41.54	-6.92	42.13	-5.60	39.35	-11.83
BFD_{av} [mm]	35.67	30.33	-14.97	34.33	-3.76	34.92	-2.10	32.25	-9.587
S_d [mm]	5.72	5,19	-9.27	4.59	-19.76	4.60	-19.58	4.52	-20.97
m_c [g]	480.00	440.00	-8.33	400.00	-16.67	460.00	-4.17	440.00	-8.33
ρ_{arie} [kg/m ²]	5.33	4.88	-8.44	4.44	-16.70	5.11	-4.13	4.88	-8.44
N – numărul de lovituri; BFD_U – limita superioară de toleranță; BFD_{av} – media aritmetică a valorilor BFD S_d – deviația standard a valorilor BFD; m_c – masa calculată; ρ_{arie} [kg/m²] – densitatea de suprafață Δ față de 20T este diferența, în procente, a variației parametrului panoului I față de panoul considerat de referință, 20T; $\Delta \text{ față de } 20T = \frac{X_i - X_{20T}}{X_{20T}} \times 100$ [%] în care i este unul din panourile hibride 7T5D8T – 7 straturi Twaron T730 + 5 straturi Dyneema SB21 + 8 straturi Twaron T730 8T2D7T – 8 straturi Twaron T730 + 2 straturi Dyneema SB21 + 7 straturi Twaron T730 15T4XD – 15 straturi T730 + 4 straturi Kevlar® XD S002 1EXO15T – 1 strat Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H + 15 straturi Twaron T730									

O reprezentare grafică a caracteristilor panourilor testate (Fig. 6.1) permite formularea unor concluzii utile pentru selectarea unuia sau altuia din aceste panouri.

- Panoul simplu are toate caracteristicile mai puțin favorabile comparativ cu panourile hibride proiectate de autor.
- Panourile 7T5D8T și 1EXO15T au valorile cele mai mici pentru BFD_U și BFD_{av}, la aceeași masă și densitate de suprafață.

Panoul de referință, 20T are BFD_U = 44.63 mm → ușor peste limita NIJ (44 mm)

Panoul hibrid 7T5D8T are cea mai bună performanță din punct de vedere al BFD (medie și limită superioară).și oferă cea mai mare marjă față de pragul NIJ:

- BFD_U = 38.47 mm (-13.8%) → cea mai mare reducere

- $BFD_{av} = 30.33 \text{ mm}$ (-15.0%) $\rightarrow$ cea mai mică medie
- $Sd = 5.19$ (-9.3%)
- Masă -8.3%

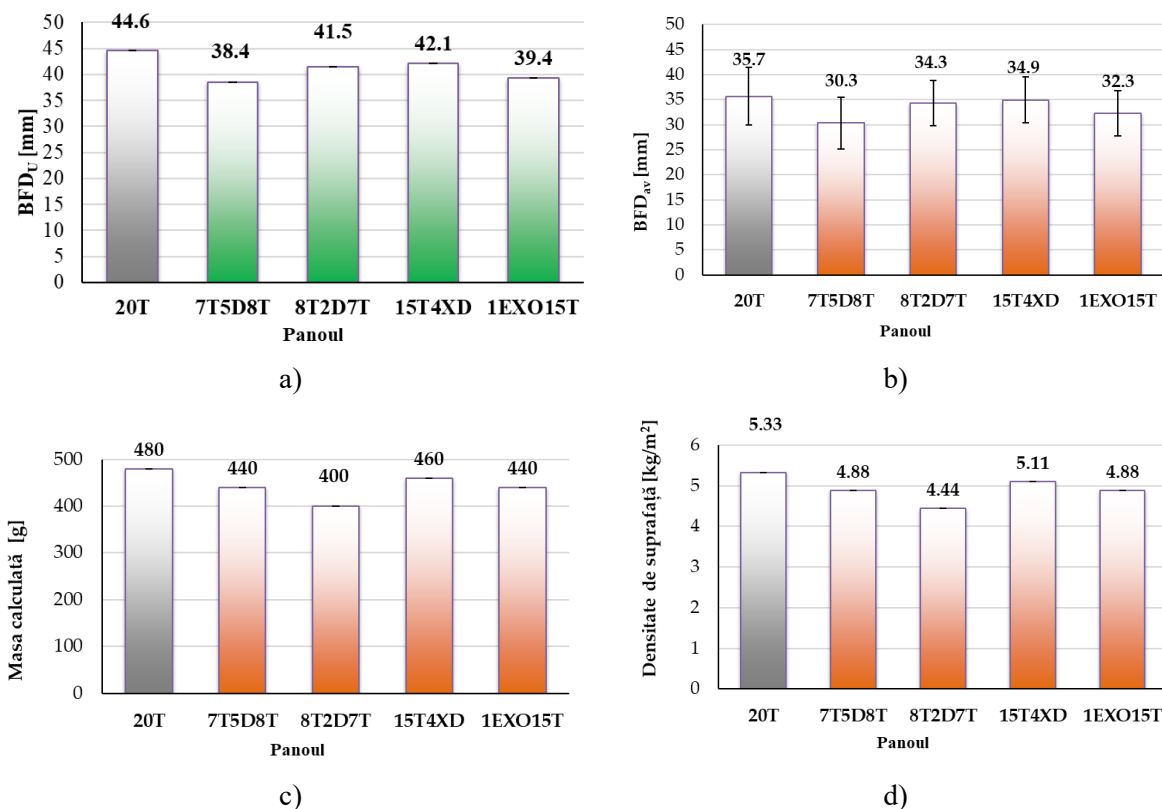


Fig. 6.1. Caracteristicile panourilor testate

Panoul hibrid 8T2D7T este cel mai eficient din punct de vedere al masei, dar performanța balistică este îmbunătățită moderat, dar foarte stabilă.

- $BFD_U = 41.54 \text{ mm}$ (-6.9%)
- $BFD_{av} = 34.33 \text{ mm}$ (-3.8%)
- $Sd = 4.59$ (-19.8%)
- Masă -16.7% (cea mai mare reducere)

Panoul 15T4XD are o îmbunătățire modestă a BFD, o stabilitate bună, dar câștig limitat față de panoul de referință.

- $BFD_U = 42.13 \text{ mm}$ (-5.6%)
- $BFD_{av} = 34.92 \text{ mm}$ (-2.1%)
- $Sd = 4.60$ (-19.6%)
- Masă -4.2%

Panoul 1EXO15T are un foarte bun compromis între performanță și stabilitate, cea mai bună consistență statistică și este sub pragul NIJ și are masă redusă:

- $BFD_U = 39.35 \text{ mm}$ (-11.8%)
- $BFD_{av} = 32.25 \text{ mm}$ (-9.6%)

- $S_d = 4.52$ (-21.0%) → cea mai mică dispersie
- Masă -8.3%

În concluzie, analiza comparativă a evidențiat faptul că toate configurațiile hibride au condus la valori ale limitei superioare de toleranță (BFD_U) sub pragul NIJ de 44 mm, spre deosebire de panoul de referință 20T, care a depășit ușor această limită. Configurația 7T5D8T a înregistrat cele mai mici valori ale deformării posterioare, atât medii, cât și la limita superioară, oferind cea mai mare marjă de siguranță față de criteriul NIJ. Configurația 1EXO15T a evidențiat cel mai bun compromis între performanță și stabilitate statistică, prezentând o reducere semnificativă a BFD, cea mai mică dispersie a rezultatelor și o masă areală redusă comparativ cu panoul de referință. Rezultatele confirmă importanța optimizării arhitecturii structurale în îmbunătățirea performanței balistice, fără creșterea masei sistemului.

6.4. Contribuții personale

Rezultatele obținute în cadrul studiului, printr-o abordare integrată ce corelează investigațiile experimentale cu simulările numerice, au condus la evidențierea următoarelor contribuții originale în domeniul proiectării și testării materialelor destinate protecției balistice:

- analiza sistematică a documentației relevante pentru fundamentarea studiului teoretic și experimental, precum și structurarea unui corpus bibliografic extins referitor la caracteristicile materialelor balistice și la performanțele acestora, utilizate de-a lungul timpului în realizarea echipamentelor individuale de protecție balistică pe bază de fibre aramidice și polietilenă cu masă moleculară foarte mare;
- identificarea și argumentarea tendinței de utilizare a strategiilor de hibridizare, aplicate în vederea optimizării configurațiilor pachetelor de protecție balistică individuală;
- dezvoltarea unui model numeric la nivel mezo al impactului proiectil-panou stratificat, utilizat pentru compararea prin simulare a rezistenței la impact a două configurații structurale distincte. Modelul a fost implementat pentru a evalua influența introducerii unui strat de Kevlar EXO în configurația de bază alcătuită din 15 straturi de Twaron T730. Rezultatele numerice au fost validate prin corelare cu datele experimentale obținute în laborator, criteriul de validare fiind reprezentat de numărul de straturi afectate. Pe baza simulărilor efectuate, se propune optimizarea structurii prin reducerea graduală a numărului de straturi de Twaron T730, cu menținerea performanțelor balistice ale ansamblului;
- analiza rezultatelor campaniei de testare cu scopul de a valida avantajele hibridizării structurii stratificate inițiale monomaterial;
- determinarea și analiza parametrilor asociați amprente în materialul suport (BFD), precum și investigarea mecanismelor distructive dezvoltate în pachetele balistice testate. Rezultatele obținute sunt relevante pentru compararea răspunsului la impact cu cel al altor configurații raportate în literatura de specialitate și pentru optimizarea performanțelor structurilor de protecție.
- campania de testare a avut ca scop testarea de arhitecturi hibride comparate sistematic, având un cadru statistic clar conform NIJ 0101.07, s-a analizat limita de toleranță (nu doar media). S-a realizat o corelare structură – dispersie – conformitate; rezultatele evidențiază o optimizare structurală, nu doar o caracterizare.

- analiza mecanismelor de cedare a materialelor implicate în impact cu ajutorul macro fotografiei, a înregistrărilor video de mare viteză și a imaginilor SEM,
- diseminarea rezultatelor cercetării a fost realizată prin valorificarea unei părți a contribuțiilor personale în lucrări științifice prezentate la conferințe internaționale de specialitate, precum și prin publicarea de articole în reviste de profil.
- în cadrul cercetării a fost concepută, împreună cu specialiști din Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN – Laboratorul Echipamente de Protecție Balistică Individuală, București, o metodologie proprie de testare pentru pachetele balistice dezvoltate de autor. Totodată, a fost organizat și documentat integral programul experimental, incluzând definirea articolelor de testare, modul de realizare al acestora, stabilirea condițiilor și locației de încercare, selectarea și utilizarea instrumentației de măsurare, precum și tipologia testelor efectuate. Derularea campaniilor de încercări pentru echipamentele individuale de protecție balistică s-a realizat cu ajutorul infrastructurii experimentale performante disponibile în cadrul Laboratorului Echipamente de Protecție Balistică Individuală.

6.5. Direcții de cercetare deschise de teză

Direcțiile de continuare a acestei cercetări sunt orientate către conceperea unor echipamente individuale de protecție cu greutate redusă, dar capabile să ofere rezistență ridicată la amenințări multiple:

- obținerea și caracterizarea de materiale hibride noi, pe baza fibrelor speciale (fibre aramidice, fibre de sticlă, fibre de carbon și polietilenă), la nivel de structuri balistice hibride;
- testarea structurilor obținute, la impact balistic;
- ierarhizarea și selecția variantelor constructive care oferă protecție balistică;
- modelarea numerică a fenomenelor de impact la diferite scări de analiză, de la nivel micro (fibră), la nivel mezo (fire) la nivel macroscopic (straturi), în vederea optimizării rapide a soluțiilor de arhitectură a structurilor acestora, urmată de testarea soluțiilor îmbunătățite prin simulare;
- realizarea și testarea unor produse de tip vestă de protecție balistică, dezvoltate pe baza arhitecturilor 1EXO15T și 7T5D8T, cu respectarea cerințelor standardelor în vigoare, acestea fiind identificate ca cele mai performante în urma analizelor efectuate.
- proiectarea și încercarea unor structuri hibride în alte configurații decât cele realizate, plecând de la rezultatele obținute;

Lista lucrarilor științifice
Ing. Christian Popescu
ORCID 0009-0006-2275-7532

Articole indexate Web of Science Core Collection and Scopus

1. Deleanu, L., Totolici Rusu, V., Ojoc, G. G., Cristea, G. C., Boțan, M., Vasiliu, A. V., & **Popescu, C.** (2024). The behaviour of stratified fabrics of aramid fibres under stabbing conditions. *Polymers*, 16(7), 882., DOI: 10.3390/polym16070882
WOS:001200973600001
2. Ceoromila, A. C., Deleanu, L., **Popescu, C.**, Lom, I., Vasiliu, A. V., **Seiciu, P. L.**, ... & Sandu, S. M. (2025). SEM Investigation of Failure Mechanisms in Twaron® Aramid Fibers Used for Personal Armors. *Polymers*, 17(8), 1058.
<https://doi.org/10.3390/polym17081058>, **WOS:001474511000001**
3. Ojoc G.-G., Rusu V. T., **Popescu C.**, Pirvu C., Deleanu L., Influence of friction in a case of impact simulation, *INCAS Bulletin*, Volume 12, Issue 4, 2020, pp. 145-154, DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.4.13

Alte lucrări indexate (pe lista Wos)

(<https://www.webofscience.com/wos/author/record/72420841>)

4. Pîrvu, C., **Popescu, C.**, Deleanu, L., Vasiliu, A.V. & Ojoc, G.G. (2025). Aspects of Ballistic Panels Made of Unidirectional Aramid Fabrics, Tested Against 9 mm FMJ Projectile. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 31(3), 2025. 120-128. <https://doi.org/10.2478/kbo-2025-0087>
Accession Number RC:157974615_S24; eISSN 2451-3113
5. Călinescu, D., Sandu, M. D., Dumitrescu, R., **Popescu, C.**, Alexe, F., & Margin, C. (2024). Approaches to handling major incidents involving chemical, biological, radiological, and nuclear hazards. In *International Conference Knowledge-Based Organization* (Vol. 30, No. 3). Pp. 43-48, DOI: 10.2478/kbo-2024-0083
Accession Number RC:146871840_S24; eISSN 2451-3113

6. Deleanu, L., Rusu, V. T., Ojoc, G. G., Cristea, G. C., Boțan, M., Vasiliu, A. V., & **Popescu, C.** (2024). Panels made of composite coated aramid fabrics, under spike weapon attack. In *International Conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION* (Vol. 30, No. 3). <https://doi.org/10.2478/kbo-2024-0085>
Accession Number RC:141806652_S24; eISSN 2451-3113
7. **Popescu, C.**, Sandu, S., Deleanu, L., Șeiciu, L., & Călinescu, D. (2024). Experimental Study of Twaron T730 For Two Threats. In *International Conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, Vol. 30, No. 3, pp. 121-128, DOI10.2478/kbo-2024-0093
Accession Number RC:147085397_S24; eISSN 2451-3113
8. Titire, L. C., Ojoc, G. G., **Popescu, C.**, & Deleanu, L. (2023). Simulation of an impact on an aramid fabric panel by a 357 projectile. In *International Conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, Vol. 29, No. 3, pp. 1-9, <https://doi.org/10.2478/kbo-2023-0068>
Accession Number RC:141277410_S24; eISSN 2451-3113
9. Ojoc, G. G., Titire, L. C., Pirvu, C., & **Popescu, C.** (2022, October). A ballistic impact model for evaluating a preliminary higher level from simulation and tests on a glass fiber composite. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1262, No. 1, p. 012057). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/1262/1/012057 (Prezentată și la 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022))

Lucrări prezentate la conferințe internaționale

10. **Popescu, C.**, Vasiliu, A.V., Călinescu, D., Cristea, G.C., Sandu, S.M. & Deleanu, L. (2025). Aspects of Ballistic Panels Made of Endumax XF33, Tested Against Different Projectiles. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 31(3), 2025. 134-141. <https://doi.org/10.2478/kbo-2025-0089>
11. Pirvu, C., **Popescu, C.**, Deleanu, L., Vasiliu, A.V. & Ojoc, G.G. (2025). Aspects of Ballistic Panels Made of Unidirectional Aramid Fabrics, Tested Against 9 mm FMJ Projectile. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 31(3), 2025. 120-128. <https://doi.org/10.2478/kbo-2025-0087>

Lucrări științifice în jurnale românești

12. Avasiloaiei C., Lăzăroaie C., **Popescu C.**, Cercetări experimentale pentru obținerea spumelor ceramice cu aplicații militare, *Revista Tehnica Militară*, numărul 1/2020, pp. 3-7. https://www.acttm.ro/rtm/2020/nr1_2020.pdf
13. **Popescu C.**, Alexe F., Bugean I., Evaluarea mediului de lucru în condiții de tragere cu armamentul de infanterie, armamentul de artilerie și activitățile de distrugere, *Revista*

Tehnica Militară, numărul 1/2022, pp. 77-92. https://www.acttm.ro/wp-content/uploads/2023/03/TEHNICA-MILITARA-nr-1_2022_TIPAR.pdf

14. **Popescu C.**, Călinescu D., Sandu S., Bugean A., Noi materiale și structuri de protecție la efectele exploziilor, Revista Tehnica Militară, numărul 1/2023, pp. 13-27. https://www.acttm.ro/wp-content/uploads/2024/07/TEHNICA-MILITARA-nr-1_2023_TIPAR.pdf

Premii

15. Vasiliu, A. V., **Popescu, C.**, Boțan, M., Pîrvu, C., Azamfirei, V., Badea, S. M., & Deleanu, L. (2025, November 21–23). *Could an Endumax Plate Replace Ceramics in Ballistic Protection?* **Gold Medal and Certificate of Excellence**, EURO POLITEHNICUS 2025 – International Innovation and Invention Show, 2nd edition, Bucharest, Romania. „Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu.
16. Ojoc, G. G., **Popescu, C.**, Constandache, M., Azamfirei, V., Badea, S. M., & Deleanu, L. (2025, November 21–23). *Quadraxial Glass Fiber Composite for Ballistic Protection*. **Gold Medal and Special Award**, EURO POLITEHNICUS 2025 – International Innovation and Invention Show, 2nd edition, Bucharest, Romania. „Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu

BIBLIOGRAFIE

1. Abdulghaffar, H. (2015). Study on the arrangement of fabric materials for multi-layer soft body armor based on their mechanical properties. *Journal of Fashion Technology and Textile Engineering*, 3(3), 1-5. <https://doi.org/10.4172/2329-9568.1000126>
2. Abtew, M. A., Boussu, F., & Bruniaux, P. (2021). Dynamic impact protective body armour: A comprehensive appraisal on panel engineering design and its prospective materials. *Defence Technology*, 17(6), 2027-2049. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.03.016>
3. Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., & Hong, Y. (2021). Dynamic impact surface damage analysis of 3D woven para-aramid armour panels using NDI technique. *Polymers*, 13(6), 877. <https://doi.org/10.3390/polym13060877>
4. Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite structures*, 223, 110966. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110966>
5. Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2020). Effect of structural parameters on the deformational behaviors of multiply 3D layer-by-layer angle-interlock para-aramid fabric for fiber-reinforcement composite. *Journal of Composites Science*, 4(4), 145. <https://doi.org/10.3390/jcs4040145>
6. Abtew, M. A., Loghin, C., Cristian, I., Boussu, F., Bruniaux, P., Chen, Y., & Wang, L. (2019). Mouldability and its recovery properties of 2D plain woven para-aramid fabric for soft body armour applications. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 27(6 (138)). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.4468>
7. Ahmad, M. R., Ahmad, W. Y. W., Salleh, J., & Samsuri, A. (2008). Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems. *Materials & Design*, 29(7), 1353-1358. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2007.06.007>
8. Alexe, G. G., Carp, G. B., Tiganescu, T. V., & Buruiana, D. L. (2025). Enhancing the Performance of Materials in Ballistic Protection Using Coatings—A Review. *Technologies*, 14(1), 13. <https://doi.org/10.3390/technologies14010013>
9. Alonso, L., Martínez-Hergueta, F., Garcia-Gonzalez, D., Navarro, C., García-Castillo, S. K., & Teixeira-Dias, F. (2020). A finite element approach to model high-velocity impact on thin woven GFRP plates. *International Journal of Impact Engineering*, 142, 103593. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103593>
10. Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B. S., Arora, S., & Bhattacharjee, D. (2021). Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels. *Composite Structures*, 255, 112941. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112941>
11. Bao, Y., & Wierzbicki, T. (2004). On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International journal of mechanical sciences*, 46(1), 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006>
12. Bilisik, K., Karaduman, N. S., Bilisik, N. E., & Bilisik, H. E. (2013). Three-dimensional fully interlaced woven preforms for composites. *Textile Research Journal*, 83(19), 2060-2084. <https://doi.org/10.1177/00405175134877>
13. Bilisik, K., & Korkmaz, M. A. H. M. U. T. (2010). Multilayered and multidirectionally-stitched aramid woven fabric structures: experimental characterization of ballistic performance by considering the yarn pull-out test. *Textile research journal*, 80(16), 1697-1720. <https://doi.org/10.1177/004051751036595>
14. Bilisik Kadir, A., & Turhan, Y. (2009). Multidirectional stitched layered aramid woven fabric structures and their experimental characterization of ballistic performance. *Textile Research Journal*, 79(14), 1331-1343. <https://doi.org/10.1177/0040517509104275>
15. Bhatnagar, A. (Ed.). (2016). *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*. Woodhead Publishing.

16. Bogajczyk, M., Cegla, M., Habaj, W., & Podgã, P. (2017). Selected Issues of Lightweight Bulletproof Vests Design and Testing. In *30th International Symposium on Ballistics*. DOI 10.12783/ballistics2017/16900.
17. Boussu, F., Cristian, I., & Nauman, S. (2015). General definition of 3D warp interlock fabric architecture. *Composites Part B: Engineering*, 81, 171-188. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.013>.
18. Brünig, M., Gerke, S., & Zistl, M. (2019). Experiments on damage and fracture mechanisms in ductile metals under non-proportional loading paths. In *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials* (pp. 19-33). Cham: Springer International Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/651/1/012009
19. Ceoromila, A. C., Deleanu, L., Popescu, C., Lom, I., Vasiliu, A. V., Seiciu, P. L., ... & Sandu, S. M. (2025). SEM Investigation of Failure Mechanisms in Twaron® Aramid Fibers Used for Personal Armors. *Polymers*, 17(8), 1058. <https://doi.org/10.3390/polym17081058>
20. Chang, C. P., Shih, C. H., You, J. L., Youh, M. J., Liu, Y. M., & Ger, M. D. (2021). 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*, 13(18), 3080. <https://doi.org/10.3390/polym13183080>
21. Chen, X. (Ed.). (2016). Advanced fibrous composite materials for ballistic protection. Woodhead Publishing. DOI: 10.1016/C2014-0-01733-9
22. Chen, X., Zhou, Y., & Wells, G. (2014). Numerical and experimental investigations into ballistic performance of hybrid fabric panels. *Composites Part B: Engineering*, 58, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.019>
23. Chitrangad. (1993). Hybrid ballistic fabric (U.S. Patent No. 5,187,003). U.S. Patent and Trademark Office.
24. Chu, Y. (2015). *Surface modification to aramid and UHMWPE fabrics to increase inter yarn friction for improved ballistic performance* (Master's thesis). University of Manchester, UK
25. Chu, Y., Chen, X., Sheel, D. W., & Hodgkinson, J. L. (2014). Surface modification of aramid fibers by atmospheric pressure plasma-enhanced vapor deposition. *Textile research journal*, 84(12), 1288-1297. <https://doi.org/10.1177/0040517513515311>
26. Crouch, I. G. (2019). Body armour—New materials, new systems. *Defence Technology*, 15(3), 241-253. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.002>.
27. Cuniff, P. M. (1992). An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. *Textile Research Journal*, 62(9), 495-509, <https://doi.org/10.1177/004051759206200902>.
28. De Koning, C. A. M., & Van Dreumel, W. H. M. (1983). Mechanical Joining of Aramid Fibre Composites: An Experimental Study. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2(2), 130-137. <https://doi.org/10.1177/073168448300200206>.
29. Dewangan, M. K., & Panigrahi, S. K. (2021). Factors influencing the ballistic impact mechanisms of textile composite materials: A review. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(5), 1901-1923. <https://doi.org/10.1002/pat.5236>
30. Dufour, C., Wang, P., Boussu, F., & Soulat, D. (2014). Experimental investigation about stamping behaviour of 3D warp interlock composite preforms. *Applied Composite Materials*, 21(5), 725-738. DOI: 10.1007/s10443-013-9369-9
31. Elgohary, D. H. (2025). Technological aspects of body armour textiles for ballistic protection application. *The Journal of The Textile Institute*, 116(4), 535-549. DOI: 10.1080/00405000.2024.2343162
32. Fejdyś, M., Kośła, K., Kucharska-Jastrzābek, A., & Łandwijt, M. (2021). Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 57(1), 149-161. <https://doi.org/10.1007/s41779-020-00516-7>
33. Finckenor, M. M. (2017). *Comparison of high-performance fiber materials properties in simulated and actual space environments* (No. NASA/TM-2017-219634).
34. G Ganor, J. (2021). *Body Armor: And Light Ballistic Armor Materials and Systems*. Adept Press. ISBN-13: 9798985020205

35. Ghid ANSYS Explicit Dynamics Analysis (2024). ANSYS, Inc., USA
36. Grujicic, M., Pandurangan, B., Koudela, K. L., & Cheeseman, B. A. (2006). A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors. *Applied Surface Science*, 253(2), 730-745. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.01.016>
37. Grujicic, M., Snipes, J., Ramaswami, S., Avuthu, V., Yen, C. F., & Cheeseman, B. (2016). Unit-cell-based derivation of the material models for armor-grade composites with different architectures of ultra-high molecular-weight polyethylene fibers. *International Journal of Structural Integrity*, 7(4), 458-489, doi: 10.1108/IJSI-06-2015-0015
38. Jantharat, P., McCuiston, R. C., Gamonpilas, C., & Kochawattana, S. (2014). Influence of the laminate configurations of transparent armor on its ballistic protection. *Key Engineering Materials*, 608, 253-258. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.608.253](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.608.253)
39. Jeyasri, J., Ajith, M., Darshan, N. C., ManiBharathi, K., & Sivasankar, C. (2019). *Design and fabrication of bulletproof vest*. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(5), 87-90. ISSN-2349-5162
40. John, J., & Chen, X. (2012, September). 2D/3D woven fabrics for ballistic protection. In *4th world conference on 3D fabrics and their applications*.
41. Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics*, 21(1), 31-48.
42. Karahan, M., Kuş, A., & Eren, R. (2008). An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 35(6), 499-510. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.04.003>
43. Kondor, I. P., Liska, J., & Kovács, Z. F. (2025). Ballistic performance of lightweight armor aramid fabric with different bounding technologies. *Fibers*, 13(8), 106. <https://doi.org/10.3390/fib13080106>
44. Kukle, S., Valisevskis, A., Briedis, U., Balgale, I., & Bake, I. (2024). Hybrid Soft Ballistic Panel Packages with Integrated Graphene-Modified Para-Aramid Fabric Layers in Combinations with the Different Ballistic Kevlar Textiles. *Polymers*, 16(15), 2106. <https://doi.org/10.3390/polym16152106>
45. Lee, Y. S., Wetzels, E. D., & Wagner, N. J. (2003). The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *Journal of materials science*, 38(13), 2825-2833. DOI: [10.1023/A:1024424200221](https://doi.org/10.1023/A:1024424200221)
46. Lefebvre, M., Boussu, F., Coutellier, D., & Vallee, D. (2012). Influence of the vacuum resin process, on the ballistic behaviour of lightweight armouring solutions. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 26, p. 01051). EDP Sciences. DOI <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122601051>
47. Leiva Palomera, D. F., Fernández Abreu, M. E., Valín Rivera, J. L., Valín Fernández, M., Ferreira de Amorim Júnior, W., Valenzuela Diaz, F. R., ... & Ketterer, C. I. G. (2025). Analysis of the Ballistic Effectiveness of the Hybrid Composite of Polyurethane and Kevlar 29 with Different Grammage. *Polymers*, 17(3), 372. <https://doi.org/10.3390/polym17030372>
48. Liang, Y., Chen, X., & Soutis, C. (2022). Review on manufacture of military composite helmet. *Applied Composite Materials*, 29(1), 305-323. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09944-5>
49. Lim, J. S., Lee, B. H., Lee, C. B., & Han, I. S. (2012). Effect of the weaving density of aramid fabrics on their resistance to ballistic impacts. [10.4236/eng.2012.412A119](https://doi.org/10.4236/eng.2012.412A119)
50. Lim, J. S. (2013). Ballistic behavior of heracron®-based composites: Effect of the number multifilaments on high-speed projectiles. <https://doi.org/10.4236/mnsms.2013.33011>
51. Ma, D., Manes, A., Amico, S. C., & Giglio, M. (2019). Ballistic strain-rate-dependent material modelling of glass-fibre woven composite based on the prediction of a meso-heterogeneous approach. *Composite Structures*, 216, 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.102>
52. Martinez-Hergueta, F., Ridruejo, A., González, C., & LLorca, J. (2018). Ballistic performance of hybrid nonwoven/woven polyethylene fabric shields. *International Journal of Impact Engineering*, 111, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.08.011>

53. Mawkhlieng, U., & Majumdar, A. (2019). Soft body armour. *Textile Progress*, 51(2), 139-224. <https://doi.org/10.1080/00405167.2019.1692583>
54. Medvedovski, E. (2010). Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 36(7), 2103-2115. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>
55. Min, S., Chu, Y., & Chen, X. (2016). Numerical study on mechanisms of angle-ply panels for ballistic protection. *Materials & Design*, 90, 896-905. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.019>
56. Min, S., Chai, Y., Chu, Y., & Chen, X. (2019). Effect of panel construction on the ballistic performance of multiply 3D through-the-thickness angle-interlock fabric reinforced composites. *Polymers*, 11(2), 198. <https://doi.org/10.3390/polym11020198>.
57. Mudzi, P., Wu, R., Firouzi, D., Ching, C. Y., Farncombe, T. H., & Selvaganapathy, P. R. (2022). Use of patterned thermoplastic hot film to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric. *Materials & Design*, 214, 110403.. 110403. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110403>
58. Naveen, J., Jayakrishna, K., Hameed Sultan, M. T. B., & Amir, S. M. M. (2020). Ballistic performance of natural fiber based soft and hard body armour-a mini review. *Frontiers in Materials*, 7, 608139. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.608139>
59. Nikky, A., & Rao, D. P. S. (2018). A review on materials & ballistic energy absorption of body armour. *IJRSI V*, 93-99. ISSN 2321-2705
60. Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H. A., Rafiqah, S. A., ... & Sapuan, S. M. (2021). A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. *Polymers*, 13(4), 646. DOI: [10.3390/polym13040646](https://doi.org/10.3390/polym13040646)
61. Öberg, E. K., Dean, J., & Clyne, T. W. (2015). Effect of inter-layer toughness in ballistic protection systems on absorption of projectile energy. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.09.006>.
62. Ojoc, G. G., Rus, V. T., Popescu, C., Pirvu, C., & Deleanu, L. (2020). Influence of friction in a case of impact simulation. *INCAS Bulletin*, 12(4), 145-154. [10.13111/2066-8201.2020.12.4.13](https://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.4.13)
63. Ojoc, G. G. (2022). *Un studiu teoretic și experimental al pachetelor de protecție balistică pentru blindaje pe bază de fibre de sticlă* (Doctoral dissertation, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați).
64. Othman, A. R., & Hassan, M. H. (2013). Effect of different construction designs of aramid fabric on the ballistic performances. *Materials & Design*, 44, 407-413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.061>.
65. Park, J. L., Chi, Y. S., & Kang, T. J. (2013). Ballistic performance of hybrid panels composed of unidirectional/woven fabrics. *Textile Research Journal*, 83(5), 471-486. <https://doi.org/10.1177/0040517512444337>.
66. Perry, A. (2018). Ballistic-resistant body armor: Problems and coping strategies. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 10(4).
67. Pinkos, J., & Stempien, Z. (2020). Numerical and experimental comparative analysis of ballistic performance of packages made of biaxial and triaxial Kevlar 29 fabrics. *Autex Research Journal*, 20(2), 203-219. DOI 10.2478/aut-2020-0015
68. Pirvu, C. (2015). *Contribuții la studiul experimental și numeric al pachetelor de protecție balistică cu fibre aramidice* (Doctoral dissertation, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați).
69. Pîrviu, C., Popescu, C., Deleanu, L., Vasiliu, A.V. & Ojoc, G.G. (2025). Aspects of Ballistic Panels Made of Unidirectional Aramid Fabrics, Tested Against 9 mm FMJ Projectile. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 31(3), 2025. 120-128. <https://doi.org/10.2478/kbo-2025-0087>
70. Pol, M. H., Liaghat, G. H., & Hajiarazi, F. (2013). Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation. *Journal of Composite Materials*, 47(13), 1563-1573. <https://doi.org/10.1177/0021998312449768>.
71. Popescu, C., Sandu, S., Deleanu, L., Șeiciu, L. & Călinescu, D. (2024). Experimental Study of Twaron T730 for Two Threats. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 30(3), 2024. 121-128. <https://doi.org/10.2478/kbo-2024-0093>

72. Popescu, C., Vasiliu, A.V., Călinescu, D., Cristea, G.C., Sandu, S.M. & Deleanu, L. (2025). Aspects of Ballistic Panels Made of Endumax XF33, Tested Against Different Projectiles. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 31(3), 2025. 134-141. <https://doi.org/10.2478/kbo-2025-0089>
73. Porwal, P., & Phoenix, S. (2008). Effects of layer stacking order on the V 50 velocity of a two-layered hybrid armor system. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 3(4), 627-639. <https://doi.org/10.2140/jomms.2008.3.627>.
74. Regassa, Y., Likeleh, G., & Uppala, R. (2014). Modeling and simulation of bullet resistant composite body armor. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, 1(3), 39.
75. Resapu, R. R., & Perumahanthi, L. R. (2021). Numerical study of bilinear isotropic & kinematic elastic–plastic response under cyclic loading. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1647-1654. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.812>
76. Ribeiro, M. P., da Silveira, P. H. P. M., de Oliveira Braga, F., & Monteiro, S. N. (2022). Fabric impregnation with shear thickening fluid for ballistic armor polymer composites: an updated overview. *Polymers*, 14(20), 4357. <https://doi.org/10.3390/polym14204357>
77. Richard, C., Bresson, B., Bès, M., Schittecatte, L., Le Roux, S., Didane, N., ... & Marcellan, A. (2023). Mechanisms of damage and fracture of aramid fibers: Focus on the role of microfibril cooperativity in fracture toughness. *Journal of Polymer Science*, 61(20), 2549-2558. DOI: 10.1002/pol.20230400
78. Rotariu, A. N. (2017). *Balistică terminală: formarea și accelerarea impactorilor*. Editura Academiei Tehnice Militare.
79. Sava, M., Hadăr, A., Păraușanu, I., Petrescu, H. A., Baciuc, F., & Marinell, S. M. (2016, June). Validation of the numerical model of single-layer composites reinforced with carbon fiber and aramid. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1738, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.4952316>
80. Schwer, L. E. (2007). An overview of the LS-DYNA material models. *Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference*, Salzburg, Austria.
81. Shanazari, H., Liaghat, G. H., Hadavinia, H., & Aboutorabi, A. (2017). Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/woven composite panels. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(4), 545-563. <https://doi.org/10.1177/0892705715604680>.
82. Shbool, M., Al-Abdallat, Y., Abdul Jawwad, A. K., Alsharairi, S., Abu Ghannam, L., Abu-Khajil, E. E., & Badwan, A. (2021). Examining the effect of nano-additions of rare earth elements on the hardness of body armor ceramic. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 28(1), 64-72. DOI: [10.56042/ijems.v28i1.28158](https://doi.org/10.56042/ijems.v28i1.28158)
83. Shih, C. H., You, J. L., Lee, Y. L., Cheng, A. Y., Chang, C. P., Liu, Y. M., & Ger, M. D. (2022). Design and ballistic performance of hybrid plates manufactured from aramid composites for developing multilayered armor systems. *Polymers*, 14(22), 5026. <https://doi.org/10.3390/polym14225026>
84. Shimek, M., & Fahrenthold, E. (2012). Effects of weave type on ballistic performance for aramid, UHMWPE, and hybrid fabrics. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA* (p. 1508). <https://doi.org/10.2514/6.2012-1508>
85. Simons, J. W., Erlich, D. C., & Shockey, D. A. (2001). Finite element design model for ballistic response of woven fabrics. *SRI International*, 9.
86. Sun, D., Chen, X., & Wells, G. (2014). Engineering and analysis of gripping fabrics for improved ballistic performance. *Journal of Composite Materials*, 48(11), 1355-1364. <https://doi.org/10.1177/002199831348599>
87. Tam, D. K. Y., Ruan, S., Gao, P., & Yu, T. (2012). High-performance ballistic protection using polymer nanocomposites. In *Advances in military textiles and personal equipment* (pp. 213-237). Woodhead Publishing. DOI: [10.1016/B978-1-84569-699-3.50010-4](https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-699-3.50010-4)
88. Vasiliu, A. V., Popescu, C., Boțan, M., Pîrvu, C., Azamfirei, V., Badea, S. M., & Deleanu, L. (2025). *Endumax plate could replace ceramics in ballistic protection* [Conference presentation]. EURO Politehnicus.

89. Wang, H., Hazell, P. J., Shankar, K., Morozov, E. V., Escobedo, J. P., & Wang, C. (2017). Effects of fabric folding and thickness on the impact behaviour of multi-ply UHMWPE woven fabrics. *Journal of materials science*, 52(24), 13977-13991.
90. Wanger, L. (2006). Military and law enforcement applications. *Lightweight ballistic composites*. Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England: Woodhead Publishing, 1e25.
91. Xue, L. (2007). Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *International journal of solids and structures*, 44(16), 5163-5181.
92. Yang, H. H. (1993). *Kevlar aramid fiber*. John Wiley & Sons.
93. Yang, Y., & Chen, X. (2018). Determination of materials for hybrid design of 3D soft body armour panels. *Applied Composite Materials*, 25(4), 861-875. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9716-y>
94. Yang, Y., & Chen, X. (2017). Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) uni-directional laminate for hybrid design. *Composite Structures*, 174, 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.033>.
95. Yang, Y., Ling, T., Liu, Y., & Xue, S. (2021). Synergistic effect of hybrid ballistic soft armour panels. *Composite Structures*, 272, 114211. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114211>
96. Yilmazcoban, I., & Doner, S. (2016). Ballistic protection evaluation of sequencing the composite material sandwich panels for the reliable combination of armor layers. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 342-346. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.342>
97. Zeng, H., Yuan, Z., Qiu, J., & Chen, X. (2018). Finite element study on the influence of structural parameters on the ballistic performance of 3D networked fabrics. *Applied Composite Materials*, 25(4), 891-903. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9721-1>
98. Zhu, L., Gao, W., Dikin, D. A., Percec, S., & Ren, F. (2023). Anti-ballistic performance of PPTA/UHMWPE laminates. *Polymers*, 15(10), 2281. <https://doi.org/10.3390/polym15102281>
99. Twaron- a versatile high-performance fiber, Twaron Product Brochure - <https://pdf.directindustry.com/pdf/teijin-aramid/twaron-product-brochure/18087-309129.html>
100. A true all-around para-aramid performe – Twaron, Aramid by Teijin Brochure
101. ***ANSYS, Inc. LS-DYNA User's Guide – Failure: Plastic Strain Failure. Documentație tehnică ANSYS Help (2025).
102. Broșură tehnică FEI Quanta 200 Scanning Electron Microscope, https://www.dental.umaryland.edu/media/sod/core-imaging/facility/information_about_FEI_Quanta_SEM.pdf (accessed 4.12.2024).
103. Broșură Dyneema Composites
104. Broșură Honeywell Spectra® Fiber
105. NATO 2022 Strategic Concept Adopted by Heads of State and Government at the NATO Summit in Madrid, 2022.
106. A Strategic Compass for Security and Defence, 2022.
107. Strategia Națională de Apărare a Țării pentru Perioada 2025-2030, Administrația Prezidențială, România, 2020.
108. Ghid tehnic Kevlar Aramid Fibe
109. Tech Data Sheet - Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H
110. Development Product Specification Kevlar® EXO™ CoreMatrix™ CM E1100H
111. Dupont CoreMatrix Tehnology Brochure
112. Dupont Kevlar XD S002 Technical Data Sheet
113. DSM Dyneema SB21
114. Teijin – Ballistic materials handbook. Aramids by Teijin
115. Fișă tehnică Cordura Classic Fabric
116. NIJ Standard – 0101.06, Ballistic Resistance of Body Armor, 2008
117. NIJ Standard – 0101.07, Ballistic Resistance of Body Armor, 2023

- 118. Fișă tehnică B472 Precision Light Screen (Proposed Training Schedule for B251 System The proposed training schedule is as follows)
- 119. Fișă tehnică SA-Z FASTCAM series by Photron
- 120. Technology readiness level definitions and descriptions ([TRL Explanations_1.pdf](#))
- 121. European Patent Office. (2023). EP 3974174 B1: Ballistic material made from woven ballistic fabric layer(s) and hydro-entangled non-woven fibers
- 122. www.stimpex.ro