



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București



Centrul Universitar Pitești

Școala Doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

Materiale și structuri inteligente utilizate pentru creșterea performanțelor securității pasive a automobilelor

Ana-Gabriela BADEA

Conducător științific:

Prof. univ. habil. dr. ing. Ștefan Lucian TABACU

2025



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București



Centrul Universitar Pitești

Școala Doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMATUL EXTINS -

Materiale și structuri inteligente utilizate pentru creșterea performanțelor securității pasive a automobilelor

Ana-Gabriela BADEA

Conducător științific:

Prof. univ. habil. dr. ing. Ștefan Lucian TABACU

Mentori:

Prof. univ. habil. dr. ing. Dinel POPA

Conf. univ. dr. fiz. Cătălin Marian DUCU

Prof. univ. dr. ing. Sebastian PÂRLAC

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Conf. univ. dr. ing. Laurențiu Daniel RĂCILĂ

Universitatea din Craiova

2025

Această lucrare reprezintă rezultatul unei etape importante pentru definirea mea ca inginer și deschide drumul către profesia de cadru didactic. Le mulțumesc profesorilor mei, care cu pasiune și dedicare, au reușit să îmi stârnească curiozitatea și să-mi trezească dorința de a explora mai profund domeniul ingineriei de autovehicule, însuflându-mi curajul de a merge mai departe, astfel după urmarea studiilor de licență și masterat în cadrul facultății noastre, alegerea de a continua a venit firesc.

Îndrumătorului meu, domnului profesor Ștefan Tabacu, îi adresez recunoștință și sincere mulțumiri pentru îndrumare, suport, împărtășirea cunoștințelor și experiențelor profesionale, exigența constructivă și sprijinul oferit de-alungul stagiului doctoral. De asemenea, îi mulțumesc pentru încrederea acordată în ceea ce privește activitatea didactică.

Mulțumesc domnului profesor Cătălin Ducu pentru suportul acordat, explicațiile, sugestiile și discuțiile purtate de-alungul acestei perioade. De asemenea le adresez mulțumiri domnilor profesori Popa Dinel, Sebastian Pârlac și Laurențiu Răcilă pentru îndrumarea și sprijinul oferit.

Totodată, îi mulțumesc domnului profesor Adrian Clenci, pentru motivare, încredere, susținere și conversații. Îi sunt recunoscătoare pentru oportunitatea de a avea o experiență profesională în Franța, în cadrul Universite Polytechnique Hauts-de-France, INSA Hauts-de-France, această experiență lărgindu-mi perspectivele.

Le mulțumesc tuturor colegilor mei, o parte dintre ei fiindu-mi profesori, care m-au primit și integrat, acum 4 ani, în familia departamentului nostru, Autovehicule și Transporturi. Doamnei Helene Șuster pentru că a fost alături de mine, m-a susținut și a avut încredere în mine. Îi sunt recunoscătoare colegei mele Ionela Aparaschivei pentru colaborare, susținere și ajutor. Adresez mulțumiri domnului profesor Ion Tabacu pentru efortul depus în corectarea lucrării.

Prietenilor mei le mulțumesc pentru că au avut curajul să creadă că voi reuși, pentru că m-au susținut moral, încurajat și îmi sunt mereu aproape.

Și nu în ultimul rând, mulțumesc familiei mele, fratelui lui meu Mihai, mamei mele Cati și familiei mele extinse pentru susținerea permanentă, înțelegerea și încrederea acordată.

PREFAȚĂ.....	5
Capitolul I. INTRODUCERE.....	8
<i>Obiectivele lucrării.....</i>	<i>8</i>
<i>Rezumatul capitolului I.....</i>	<i>9</i>
Capitolul II. CARACTERIZAREA MATERIALELOR UTILIZATE PENTRU CONSTRUCȚIA STRUCTURILOR DE SIGURANȚĂ	14
Capitolul III. STRUCTURI AUXETICE DE TIP RE-ENTRANT.....	18
Capitolul IV. STRUCTURI AUXETICE DE TIP ANTI-TETRA-CHIRAL.....	20
Capitolul V. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE VIITOARE	22
<i>5.1 Concluzii generale.....</i>	<i>22</i>
<i>5.2 Contribuții personale.....</i>	<i>25</i>
<i>5.3 Perspective viitoare de cercetare.....</i>	<i>25</i>
<i>5.4 Listă de lucrări publicate</i>	<i>26</i>
BIBLIOGRAFIE (Selectivă).....	27

PREFAȚĂ

Industria auto este un domeniu în continuă evoluție, unde cerințele legate de siguranță, eficiență energetică, performanță și sustenabilitate determină inovații constante în designul și construcția vehiculelor.

Odată cu intensificarea procesului de urbanizare se dezvoltă și industria constructoare de autovehicule. Se observă gradul ridicat de intensificare a traficului rutier ceea ce conduce la creșterea evenimentelor rutiere. De asemenea, transportul rutier are o contribuție majoră în creșterea nivelului de emisii poluante și gaze cu efect de seră (CO_2). În acest context, este necesar să se adopte măsuri pentru a reduce emisiile poluante prin utilizarea tehnologiilor mai curate și mai eficiente din punct de vedere energetic, cum ar fi vehiculele electrice sau hibride, precum și prin dezvoltarea de alternative durabile și mai eficiente din punct de vedere energetic la autovehiculele cu motoare cu combustie internă. O altă metodă pentru scăderea nivelului de combustibil și implicit a emisiilor poluante, o reprezintă reducerea masei automobilului.

Tendențele actuale în ceea ce privește mobilitatea rutieră și ingineria de automobile sunt:

- electromobilitatea – creșterea producției de autovehicule electrice, dezvoltarea de baterii de nouă generație, extinderea infrastructurii;
- automobile autonome – tehnologie ce permite creșterea gradului de automatizare a vehiculelor, ceea ce poate reduce accidentele și îmbunătăți eficiența și confortul călătoriei;
- transport alternativ – dezvoltarea de modele alternative de transport, cum ar fi bicicletele electrificate, trotinetele și vehiculele cu transport partajat (car-sharing), pentru a oferi opțiuni mai durabile și mai accesibile pentru călătorii scurte;
- infrastructură inteligentă în transport;
- materiale avansate și optimizarea design-ului;
- sustenabilitatea și economia circulară (prin utilizarea materialelor reciclabile, creșterea utilizării combustibililor alternativi, utilizarea energiei regenerabile în procesul de fabricare);
- tehnologii de fabricare inteligente;
- îmbunătățirea nivelului de securitate al autovehiculelor.

În acest context, materialele și structurile utilizate în realizarea componentelor sunt deosebit de importante în îmbunătățirea caracteristicilor tehnice și economice ale autovehiculelor moderne. Importanța studierii materialelor și structurilor utilizate în construcția de autovehicule, rezidă în influența directă pe care o au asupra mai multor factori critici:

- siguranța pasagerilor și a pietonilor: materialele avansate și structurile optimizate contribuie la crearea unor zone de deformare controlată care absorb eficient energia în caz de impact, reducând riscul de rănire;
- eficiența consumului de combustibil: utilizarea materialelor ușoare, precum aliajele de aluminiu, compozitele sau structuri celulare, acestea ajută la reducerea masei totale a vehiculului;

- durabilitate și rezistență: materialele moderne asigură o rezistență sporită la coroziune, oboseală mecanică și condiții extreme de exploatare, prelungind durata de viață a autovehiculului;
- adaptabilitate la noile tehnologii: dezvoltarea autovehiculelor electrice și autonome impune cerințe noi în ceea ce privește structura de rezistență (caroserie autoportantă sau șasiu) și integrarea componentelor tehnologice avansate.

Tendința de „lightweighting” în industria auto reprezintă o strategie de proiectare orientată spre reducerea masei vehiculului prin optimizarea structurală și utilizarea materialelor avansate. Deși această tendință de diminuare a masei este prezentă în industria constructoare de automobile, atunci când analizăm evoluția masei medii a unui automobil de-a lungul anilor se observă o creștere constantă în ultimele decenii, atât la nivel global, cât și în Europa. Datele statistice europene confirmă această tendință, între 2001 și 2023, masa medie a vehiculelor noi a crescut de la aproximativ 1328 kg la 1540 kg, ceea ce reprezintă o majorare de circa 21%, echivalentă cu aproximativ 100 kg doar în ultimul deceniu [1]. Unul din motivele pentru care constatăm această creștere este datorat popularității vehiculelor de tip SUV (*Sport Utility Vehicle*), care în anul 2023 reprezentau 48% dintre mașinile noi înmatriculate în Europa, având o masă superioară cu aproximativ 300 kg comparativ cu sedanurile echivalente. Pe lângă popularitatea vehiculelor de tip SUV un alt factor major care a contribuit la creșterea masei autovehiculelor în ultimele decenii îl constituie integrarea progresivă a sistemelor complexe de securitate și confort, precum airbaguri suplimentare, structuri ranforsate pentru protecția pasagerilor și a sistemelor avansate de asistență la conducere. Un ultim factor determinant al creșterii masei autovehiculelor în ultimele decenii îl constituie tranziția către electromobilitate. Datele statistice arată că, în anul 2023, masa medie a unui BEV înregistrat în Europa a fost de 1880 kg, iar cea a unui PHEV de 1958 kg, valori semnificativ superioare automobilelor convenționale echivalente [2].

Toate aceste aspecte evidențiază un paradox structural al industriei auto contemporane. Pe de o parte, reglementările internaționale privind schimbările climatice, precum Acordul de la Paris și obiectivele asumate de Uniunea Europeană, impun diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră și a poluanților atmosferici, obiectiv care ar putea fi susținut prin reducerea masei autovehiculelor și prin adoptarea unor concepte de proiectare mai eficiente din punct de vedere energetic. Pe de altă parte, tendințele de consum, orientate către vehicule mai mari și mai robuste, în special SUV-uri, precum și reglementările stricte de securitate, care solicită integrarea unor sisteme suplimentare, împreună cu masa considerabilă introdusă de electromobilitate, conduc la autovehicule din ce în ce mai grele. Depășirea acestui paradox presupune identificarea unor soluții inovatoare care să reducă masa fără a compromite siguranța structurală sau performanțele dinamice. În acest context, materialele inteligente și structurile avansate, precum metamaterialele mecanice și în special materialele auxetice, reprezintă o direcție promițătoare, întrucât particularitățile lor geometrice conferă proprietăți mecanice superioare materialelor convenționale. Acestea permit nu doar reducerea masei și îmbunătățirea securității pasive, ci și contribuția la sustenabilitatea ciclului de viață al vehiculului, oferind astfel o soluție fezabilă pentru reconcilierea obiectivelor contradictorii cu care se confruntă industria auto modernă. Studiarea și înțelegerea profundă a acestor materiale și structuri, este fundamentală nu doar pentru optimizarea vehiculelor existente, ci și pentru anticiparea nevoilor

viitoare ale industriei auto, contribuind la realizarea unor autovehicule mai sigure, mai eficiente și mai prietenoase cu mediul.

Lucrarea face referire la materiale auxetice, denumite și metamateriale mecanice sau anticauciuc [3] sau materiale dilataționale [4]. Aceste materiale sunt caracterizate de faptul că proprietățile lor mecanice sunt definite prin realizarea unei configurații geometrice specifice. Structurile auxetice atrag un interes semnificativ în literatura științifică, principalele direcții de cercetare sunt: optimizarea proprietăților mecanice pentru aplicații în domenii ca ingineria de automobile, aeronautică; studii comparative privind proprietățile mecanice în funcție de tipul structurii; materiale și tehnologii de fabricare avansată; performanța la impact; modelarea numerică și simulare a comportamentului structural.

Tema abordată se află la intersecția dintre cerințele urgente ale industriei auto, tendințe în cercetarea materialelor avansate și evoluția normelor privitoare la siguranța rutieră. Relevanța sa este consolidată de potențialul real de aplicare în practică, dar și de contribuția pe care o pot aduce la integrarea unor noi soluții în proiectarea structurilor destinate absorbției de energie.

Deși studiile anterioare au demonstrat performanțele superioare ale structurilor auxetice în comparație cu materialele tradiționale, rămân deschise mai multe întrebări:

- Sunt structurile auxetice o soluție pentru îmbunătățirea securității pasive a automobilului?
- În ce fel influențează procedeul de fabricare performanțele structurii?
- Care sunt parametrii geometrici care influențează comportamentul unui tip de metamaterial mecanic?
- Care sunt cele mai eficiente geometrii pentru minimizarea valorii coeficientului lui Poisson?
- Cum se comportă o astfel de structură la diferite solicitări?
- Este posibilă prezicerea răspunsului structurii pentru a ghida procesul de proiectare?

Capitolul I. INTRODUCERE

Obiectivele lucrării

Având în vedere exigențele actuale în ceea ce privește securitatea pasivă a automobilelor, presum și nevoia implementării unor soluții structurale inovatoare, cercetarea își propune următoarele obiective:

Obiectivul general al tezei constă în dezvoltarea și validarea unor modele analitice, numerice și experimentale pentru analiză și optimizarea materialelor și structurilor inteligente (în special metamateriale mecanice auxetice de tip re-entrant și anti-tetra-chiral), în vederea îmbunătățirii performanțelor de utilizare ale automobilelor;

Obiective specifice:

Ob₁: Identificarea și analiza cerințelor de siguranța circulației;

Ob₂: Analiza critică a materialelor convenționale și determinarea performanțelor de utilizare ale structurilor;

Ob₃: Investigarea metamaterialelor mecanice avându-se în vedere forma geometrică, materialele de bază, proprietățile și clasificarea acestora;

Ob₄: Analiza metodelor de fabricare și a performanțelor mecanice;

Ob₅: Proiectarea și realizarea de piese semifabricat și piese prototip;

Ob₆: Evaluarea tipului de structură re-entrant;

Ob₇: Dezvoltarea și validarea de modele analitice și numerice pentru analiza structurii re-entrant;

Ob₈: Elaborarea unui proces de dimensionare a structurilor prin metode de tip *machine learning*;

Ob₉: Evaluarea tipului de structură anti-tetra-chiral;

Ob₁₀: Elaborarea unui model teoretic pentru analiza deformării structurii de tip anti-tetra-chiral;

Ob₁₁: Corelarea caracteristicilor geometrice cu performanțele mecanice;

Ob₁₂: Elaborarea de aplicații software utilizate pentru cercetarea teoretică și experimentală.

Metodologie de cercetare cuprinde următoarele etape:

1. Analiza critică a stadiului actual al cunoașterii- se va realiza o documentare riguroasă asupra stadiului actual al cercetării în domeniu, incluzând cerințele actuale în ceea ce privește securitatea pasivă a automobilelor; categoriile, caracteristicile și aplicațiile metamaterialelor mecanice. Sunt indentificați de asemenea, parametrii de performanță ai structurilor celulare.

2. Fabricarea structurilor- se vor utiliza softuri dedicate proiectării (Catia, Ansys). Piesele vor fi fabricate utilizând diferite tehnologii de fabricare aditivă.

3. Analiza influenței metodei de fabricare asupra performanțelor mecanice- presupune utilizarea metodelor de caracterizare microstructurală și determinarea pe cale experimentală a performanțelor mecanice. Prelucrările datelor obținute vor fi realizate cu ajutorul MATLAB.

4. Studiul structurilor specifice: re-entrant și anti-tetra-chiral.

Analiză teoretică fundamentează elaborarea modelelor analitice capabile să descrie relațiile dintre geometria structurală și parametrii de răspuns.

Pe de altă parte, cercetarea experimentală, piesele vor fi supuse unor încercări mecanice de comprimare-întindere. În cadrul acestei etape se vor utiliza: mașină universală de încercat programabilă, mijloace pentru măsurarea deplasărilor și accelerațiilor, mijloace pentru înregistrare fotografică, sistem de achiziție de date (DAQ).

De asemenea se vor elabora modele numerice în softuri specializate MATLAB, LS Dyna. Vor fi construite modele cu elemente finite (FEM), care vor reproduce comportamentul mecanic al structurilor. Aceste modele: vor fi generate pe baza geometriei reale, validate cu datele experimentale, verificate prin analize de convergență și simulări parametrizate.

Totodată, se vor implementa algoritmi de tipul *machine learning* pentru predicția comportamentului mecanic în funcție de caracteristicile geometrice ale structurii.

Rezumatul capitolului I

Primul capitolul fundamentează cercetarea, subliniind importanța siguranței rutiere în contextul creșterii accelerate a parcului auto global și a densității traficului urban. Securitatea pasivă reprezintă un obiectiv strategic atât din perspectiva protecției vieții umane, cât și a reducerii costurilor sociale și economice asociate accidentelor rutiere. Plecând de la definiția securității pasive obținem condițiile ce trebuie respectate pentru asigurarea sa. Astfel, în urma unui accident, o caroserie cu o structură portantă rigidă, prin deformare, va fi capabilă să absoarbă o mare parte din energia de impact și va menține habitacul în forma sa inițială; așadar, o primă condiție va fi nedeformabilitatea zonei habitaculului în cazul unei coliziuni sau răsturnări pe capotă. De asemenea, se urmărește reducerea consecințelor fizice ale coliziunilor asupra pasagerilor. Optimizarea soluțiilor constructive implică analiza complexă a interacțiunii dintre parametrii biomecanici ai corpului uman și caracteristicile de deformare ale structurilor vehiculului.

Atât reglementările legislative internaționale (stabilite de către grupurile tehnice ECE-ONU sau grupurile tehnice ale Comisiei Economice Europene) [5], cât și standardele de evaluare mediatică- normele Euro NCAP (*European New Car Assessment Programme*) [6] impun constructorilor de autovehicule cerințe tot mai drastice în ceea ce privește securitatea. Presiunile legislative și tehnologice converg către necesitatea unor soluții structurale inovatoare.

Evaluarea capacității de protecție a unei structuri presupune modele matematice și metode experimentale riguroase, în special încercări mecanice, care pun în evidență modul în care componentele, structurile, materialele răspund la solicitări. Structurile destinate zonelor de absorbție a energiei de impact sunt selectate ținând seama de mai mulți factori funcționali: proprietățile fizice ale materialului – densitatea materialului contribuie la masa proprie a

autovehiculului; geometria absorbanților – adaptabilitatea geometrică și posibilitatea de integrare în designul structural; mecanismul de deformare; comportamentul caracteristic la comprimare [7,8]. În urma studiului referitor la condițiile de securitate, putem spune că limita materialelor native este depășită și apare nevoia introducerii unor noi tipuri de materiale, care prin organizarea geometrică a materialului să satisfacă cerințele, având aceleași proprietăți mecanice, dar cu densitate relativă mai mică.

O direcție actuală în industria auto constă în cercetarea în domeniul concepției de structuri eficiente din punct de vedere al comportamentului la impact (*crashworthiness*). Tradițional, designul acestor structuri s-a bazat pe profile tubulare cu pereți subțiri [9], realizate din materiale metalice sau compozite, proiectate să se deformeze progresiv în cazul unei coliziuni. Cu toate acestea, în ultimele decenii, cercetările s-au orientat din ce în ce mai mult către utilizarea metamaterialelor mecanice. Termenul **metamaterial** conține prefixul „meta” care provine din greacă (μετά) și cuvântul latin „materia”, se traduce literal prin „dincolo de materie sau dincolo de material” – poate fi definit ca orice material care este proiectat să posedă proprietăți dorite care nu se manifestă în mod natural. Această definiție este suficient de largă și este utilizată pentru mai multe clase de materiale: metamaterialele electromagnetice; metamateriale acustice; metamateriale mecanice.

Diferențierea între cele două noțiuni introduse, material și metamaterial, se realizează în principal prin utilizarea coeficientului lui Poisson. Prin definiție, coeficientul lui Poisson, este o măsură a raportului dintre deformarea pe direcție transversală și deformarea pe direcție longitudinală, și convențional, pentru o valoare pozitivă se utilizează semnul „-” în fața acestui raport:

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (1.1)$$

Evans [10] introduce termenul de auxetic care provine din limba greacă *auxetikos* (αὐχητικός) și se poate traduce ca: *ce tinde să crească* și are la bază substantivul *auxesis* (αὐχῆσις) care se traduce ca: *creștere*. Termenul auxetic prezintă răspunsul structurii la întindere și anume creșterea pe direcție transversală. În articol, cei doi prezintă o structură celulară la care au observat acest comportament, acesta fiind prezentată în Figura 1.1.

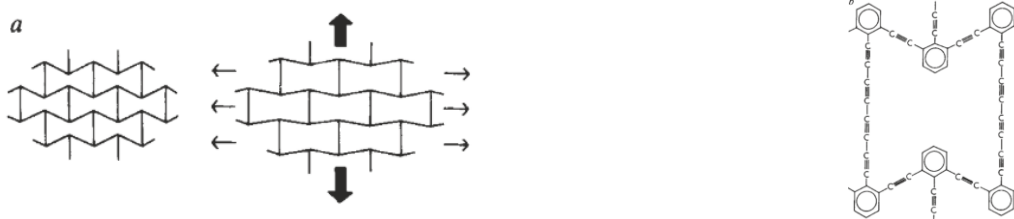


Figura 1.1 a) structură de tip fagure *re-entrant* b) structura la nivel molecular [10]

În articolele de specialitate sunt prezentate diverse structuri geometrice ce evidențiază valoarea negativă a coeficientului lui Poisson, am identificat următoarele categorii:

1. structuri de tip re-entrant: a) re-entrant bidimensionale; b) re-entrant tridimensionale; c) re-entrant cu rigidizare verticală și nervuri; d) re-entrant îmbunătățite.

2. structuri chirale: a) chiral hexagonal; b) tetrachiral; c) trichiral.
3. structurile antichirale: a) anti-tri-chiral; b) anti-tetra-chiral.
4. structuri celulare ierarhice „hierarchical honeycomb”.
5. structuri rotative (semi-) rigide: a) pătrate rotative; b) triunghiuri rotative; c) romburi, dreptunghiuri și paralelamente rotative.
6. structuri de tip double-arrowhead (săgeată dublă): a) clasice; b) cu variație de unghi.
7. structuri stea (four-star shape sau four-star node shape).
8. structuri perforate.
9. structuri de tipul origami și kirigami.
10. structuri inspirate de natură: a) structuri inspirate din microarhitectura osoasă; b) structuri inspirate din construcția plantelor; c) structura inspirată din buretele de sticlă (*Euplectella Aspergillum*).
11. structuri inspirate din cultură, arhitectură: a) modele inspirate din arhitectura islamică; b) modele inspirate din simboluri religioase.

Structurile de tip fagure (*honeycomb*) se referă, de obicei, la o rețea regulată de celule hexagonale prismatice.

Structurile prezentate mai sus reprezintă, în acest moment, cele mai frecvent analizate și utilizate tipuri de metamateriale mecanice, datorită performanțelor lor mecanice (cu precădere coeficientul lui Poisson) și versatilității geometrice. Literatura de specialitate indică, însă, o dezvoltare continuă a acestui domeniu, prin apariția unor noi combinații și variante hibride ale acestor structuri, menite să răspundă cerințelor tot mai complexe de performanță mecanică, adaptabilitate și fabricare.

De asemenea au fost selectați din literatura de specialitate indicatorii de performanță pentru estimarea capacității de absorbție a energiei a unei structuri în timpul impactului: forța de vârf (P_{max}), energia absorbită (EA), absorbția specifică de energie (SEA) capacitatea de încărcare (NLC) [11], forța medie de deformare [12], forța de platou, lungimea platoului [13]. Curba forță-deplasare poate fi utilizată pentru a calcula indicatorii de performanță. În Figura 1.2 este prezentată o curbă forță-deplasare relativă, unde se pot identifica zonele de deformare: zona elastică, de proporționalitate; zona de tranziție; zona de platou, unde forța este constantă; zona de densificare.

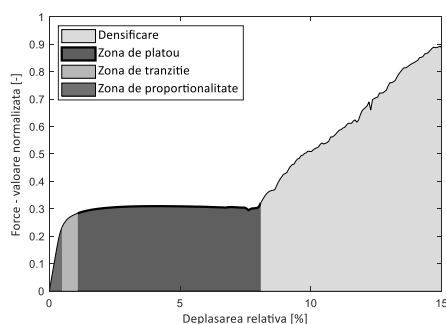


Figura 1.2 Curba $F - \epsilon$ specifică metamaterialelor mecanice

Pentru automobile, o structură eficientă din punct de vedere al securității, trebuie să îndeplinească simultan mai multe criterii: absorbție a energiei specifică ridicată (EA, SEA), forță de vârf redusă, etapa platoului să fie cât mai mare, eficiența absorbției de energie să fie cât mai aproape de 1, precum și un comportament stabil. În plus se urmărește menținerea unei mase reduse și a unei geometrii care să ofere atât rezistență, cât și deformabilitate controlată. În acest context, metamaterialele mecanice reprezintă un candidat promițător pentru integrarea în structurile automobilului modern.

Spre deosebire de materialele convenționale, ale căror performanțe sunt limitate de caracteristicile intrinseci ale substanței, metamaterialele permit obținerea unor comportamente neobișnuite. Proprietățile care derivă chiar din definiția auxeticității, poartă numele de proprietăți primare. Proprietățile primare sunt: coeficient Poisson negativ; comportament sinclastic; permeabilitate variabilă. Pe de altă parte, există și alte proprietăți asupra cărora mecanismul de deformare al structurilor auxetice exercită o influență pozitivă, fapt demonstrat atât teoretic, cât și experimental. Aceste proprietăți se pot întâlni și în structuri convenționale, însă se așteaptă să fie îmbunătățite prin utilizarea acestor tipuri de structuri. Acestea sunt denumite proprietăți secundare [14]. Proprietăți secundare sunt: capacitatea de absorbție a energiei; rezistența la forfecare, rezistența la adâncire; rezistență la rupere; densitate.

Datorită proprietăților lor, aceste tipuri de structuri pot fi utilizate într-o gamă variată de aplicații. În continuare sunt prezentate domeniile de utilizare ale metamaterialelor mecanice.

Tabelul 1.1 Domenii de utilizare pentru metamaterialele mecanice

Domeniu	Aplicație specifică	Tip de structură	Sursă bibliografică
Autovehicule	Elemente structurale deformabile în timpul impactului (bare, „crashbox”, grile, panouri sandwich, ș.a.)	Re-entrant, re-entrant îmbunătățit, chiral, anti-chiral.	[15]
	Elemente antivibrație pentru suspensii și transmisii	Chiral, anti-chiral, vârf de săgeată.	[16]
	Prototip de anvelopă	Re-entrant 3D, honeycomb	[17,18]
	Elemente aerodinamice (profil aerodinamic chiral pe bază de fibră de carbon)	Chiral	[19]
Industria Aerospațială	Panouri ușoare și rigide pentru fuselaj și aripi	Re-entrant 3D	[17]
	Elemente deformabile la impact	Re-entrant, vârf de săgeată dublă	[20]
Medicină	Stenturi vasculare flexibile	Tetrachiral, anti-tetra-chiral	[20,21]
	Implanturi, proteze	Chiral, anti-chiral, anti-tetra-chiral	[20,21]
	Plăci craniene și dispozitive ortopedice	Re-entrant, chiral	[22]
Echipament sportiv	Căști și protecții sportive	Re-entrant, origami, chiral.	[23,24]

	Încălțăminte cu amortizare ridicată	Re-entrant, origami, kirigami, chiral, anti-chiral.	[20,25]
Industrie textilă	Țesături cu elasticitate direcțională	Structuri rotative	[20]
Construcții	Amortizoare seismice	Re-entrant 3D, structuri perforate	[26]
	Panouri arhitecturale	Structuri perforate	[27]
Industrie militară	Armuri balistice și panouri anti-explozii	Re-entrant cu pereți curbați, structuri perforate	[28]
	Protecții împotriva undelor de șoc	Anti-chiral	[29]
Dispozitive electronice	Senzori și actuatori	Re-entrant, kirigami, origami	[17]
	Carcase pentru senzori, ecrane	Structuri rotative, structuri ierarhice	[20]

Capitolul II. CARACTERIZAREA MATERIALELOR UTILIZATE PENTRU CONSTRUCȚIA STRUCTURILOR DE SIGURANȚĂ

În capitolul anterior au fost prezentate materiale convenționale, dar și materiale noi, care prin geometria macrostructurală dețin proprietăți îmbunătățite. În continuare s-a pus problema fabricării acestora, existând o interdependență puternică între material și procesul de fabricație.

Metodele convenționale de fabricare, precum turnarea, extrudarea, injecția, presarea, sinterizarea sau prelucrările prin așchiere, sunt utilizate pe scară largă în industrie datorită costurilor reduse pentru producția de serie, toleranțelor bune și productivității ridicate. Cu toate acestea, în cazul metamaterialelor mecanice, aceste metode prezintă limitări semnificative:

- necesitatea unor matrițe complexe și costisitoare pentru realizarea geometriilor dorite, cu flexibilitate scăzută la modificarea designului;
- dificultatea obținerii suprafețelor interne complete și a pereților subțiri necesari la structurile re-entrant, chiral, anti-chiral;
- limitări în fabricarea structurilor ierhizate, unde dimensiunea celulelor poate varia în piesa finită;
- limitări la forme relativ simple sau la geometrii complexe realizate prin asamblări multiple;
- porozitatea controlată sau variațiile gradate de densitate sunt aproape imposibil de realizat într-o singură etapă;
- imposibilitatea de a integra zone cu comportamente mecanice diferite în aceeași piesă;
- timpul și costul de prototipare mare deoarece implică producerea de scule și echipamente specifice, ceea ce duce la un cost și durată de fabricare crescute;
- limitări în ceea ce privește economisirea materialului de bază, procesele substructive generează cantități mari de deșeuri.

Aceste limitări au condus la adoptarea pe scară largă a metodelor de fabricare aditivă [30], care pot reproduce fidel geometrii complexe fără costuri suplimentare asociate fabricării convenționale.

În acest capitol au fost prezentate și caracterizate epruvete obținute prin tehnologii de fabricare aditivă.

Primul studiu a constatat în caracterizarea a trei seturi de câte patru epruvete specifice, obținute prin topire selectivă cu laser (SLM). Fiecare set de epruvete a fost imprimat orientând piesa diferit (planul XY, ZXX, ZXZ). Materialul ales este oțelul austenitic 1.4404/SS316, fiind disponibil și sub formă de pulbere, un material utilizat în industrie în zona critică, folosindu-se inclusiv în domeniul nuclear. Pentru a demonstra potențialul și limitele tehnologiilor aditive, rezultatele au fost comparate cu cele obținute pe epruvete fabricate prin metode convenționale, semifabricat laminat debitat cu laser, oferind astfel o perspectivă clară asupra avantajelor și diferențelor celor două metode.

Pentru a realiza o caracterizare corespunzătoare cu obiectivele studiului este necesară alegerea corectă a metodelor și mijloacelor experimentale utilizate. Astfel, pentru validarea

modelelor numerice din cadrul lucrării, modelul experimental de caracterizare mecanică este bazat pe încercarea la tracțiune, utilizându-se suplimentar și metoda corelării imaginilor digitale DIC (Digital Image Correlation). Pentru analiza influenței direcției de imprimare asupra performanțelor mecanice, s-au utilizat metode de caracterizare microstructurală.

Analiza morfo-structurală a fost realizată în cadrul *Centrului Regional de Cercetare-Dezvoltare pentru materiale, procese și produse inovatoare destinate industriei de Automobile (CRC&D-Auto)*, Laboratorul Materiale Avansate, sub îndrumarea echipei de cercetători din cadrul laboratorului. Prima analiza, și anume microscopia electronică de baleiaj-SEM, a fost realizată utilizând un microscop electronic de înaltă rezoluție. Rezultatele au arătat ca tehnologia SLM induce anizotropie în funcție de direcția de imprimare, pe direcția XY s-au observat mai puține particule nefunzionate comparativ cu celelalte direcții. Particulele nefunzionate au dimensiunea apropiată de cea a pulberii. S-au observat de asemenea urmele traseului laserului corespunzătoare depunerii succesive. Textura strat cu strat și orientarea microstructurii sunt mai atenuate pe direcțiile ZXX și ZXZ.

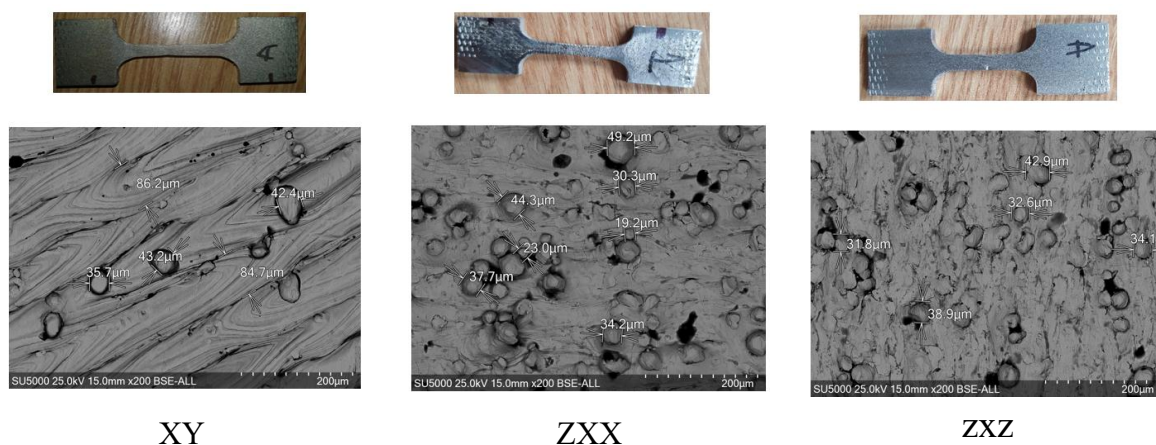


Figura 2.1 Rezultate analiza morfo-structurală SEM

Microscopul Electronic cu Scanare Hitachi permite și determinarea analitică calitativă și cantitativă prin spectrometrie cu fluorescență de radiații X cu dispersie după energie (EDS). Rezultatele analizei EDS pentru epruvetele metalice au aratat că, în ceea ce privește elementele *Cr, Ni, Mo, Mn*, compoziția este foarte apropiată de compoziția pulberii indicată de furnizor, ceea ce confirmă faptul că aliajul nu și-a pierdut elementele de aliere esențiale în timpul procesului de fabricare. Elementele *Si* și *O* au valori mai crescute în ZXX și ZXZ, ceea ce sugerează prezența incluziunilor oxidice. Diferențele dintre direcțiile de imprimare sunt mai degrabă legate de neomogenități locale, nu de o schimbare a compoziției globale.

În continuare epruvetele au fost încercate la tracțiune pe mașina universală de încercat programabilă, iar pentru determinarea deformațiilor s-au utilizat mijloace pentru înregistrarea fotografică. Pentru procesarea imaginilor a fost utilizat softul Zeiss Inspect Correlate. Procesarea datelor experimentale și generarea curbelor forță-deplasare și tensiune-deformație, atât în formă convențională, cât și reală, a fost realizată prin prelucrarea datelor utilizând softul MATLAB.

Rezultatele evidențiază diferențe semnificative pentru epruvetele realizate prin metode aditive, SLM, și cele obținute din semifabricat laminat debitat cu laser. În general, epruvetele SLM prezintă o rezistență la tracțiune comparabilă sau superioară în anumite orientări (în

special XY), însă au o ductilitate mai redusă. Direcția de imprimare are o influență majoră asupra performanțelor mecanice, confirmând caracterul anizotrop. Planul de fabricare XY oferă cea mai bună performanță, în timp ce planul ZZ prezintă un comportament fragil și rezistență mai redusă. Prin urmare, SLM poate fi considerată o tehnologie promițătoare pentru obținerea unor piese cu rezistență ridicată și geometrii complexe. De asemenea rezultatele subliniază necesitatea optimizării parametrilor de proces pentru reducerea anizotropiei.

În vederea continuării cercetărilor experimentale, sunt prezentate mai multe tipuri de epruvete de tipul structurilor auxetice, ce vor fi utilizate în capitolele viitoare pentru analize detaliate. Piesele au fost realizate utilizând tehnologii de fabricare aditivă, însă utilizând materiale de bază polimerice, și anume ABS (Acrilonitril-Butadien-Stiren).

Această alegere se justifică datorită diferenței semnificative de cost între imprimarea cu materiale plastice și metal, tehnologia SLM implicând costuri ridicate asociate atât pulberii, cât și fabricării propriu-zise. Pe de altă parte, imprimarea cu materiale plastice este o soluție economică și flexibilă, permițând realizarea de prototipuri rapide și testarea unei multitudini de configurații geometrice.

Rezultatele obținute pe aceste tipuri de epruvete vor fundamenta și valida demersurile ulterioare privind extinderea cercetărilor către materiale metalice.

Au fost fabricate mai multe serii de epruvete utilizând materiale polimerice lichide-rășini fotopolimerizabile (ABS). Acestea au fost realizate utilizând imprimanta Anycubic Photon Mono M5s care utilizează tehnologia MSLA (Masked Stereolithography Apparatus), o formă de fabricare prin fotopolimerizare. Un ecran LCD monocrom maschează selectiv lumina UV provenită de la sursa de iluminare, aceasta fotopolimerizează rășina lichidă strat cu strat, conform modelului CAD. Rășina folosită este ABS-like Resin, o rășină care imită proprietățile mecanice ale polimerului ABS.

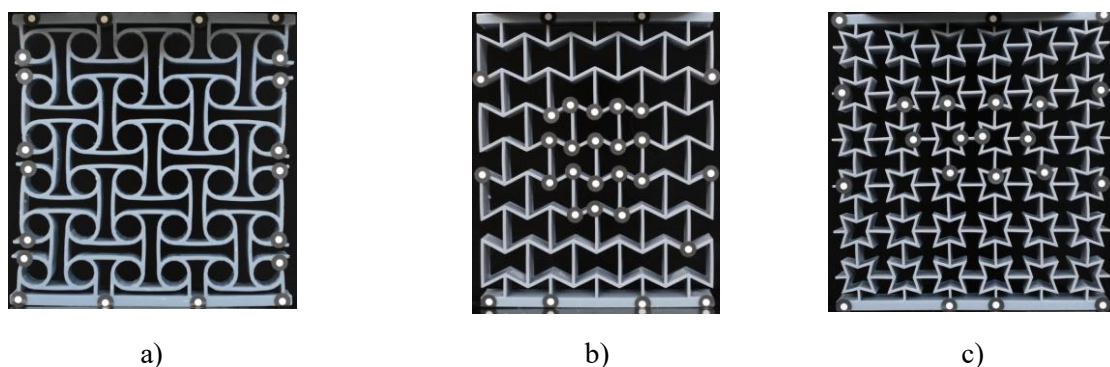


Figura 2.2 Epruvete obținute prin MSLA a) anti-tetra-chiral; b) re-entrant; c) stea.

Utilizând imprimanta MarkerBot Replicator 2X s-au realizat seturi de epruvete plane și cu configurația anti-tetra-chiral. Imprimanta permite imprimarea cu filament topit (FFF/FDM) cu două materiale simultan și are rezultate foarte bune pentru materialul ABS. Epruvetele au fost supuse la întindere cu o viteză de deplasare setată la $2\text{mm}/\text{min}$, folosind o mașină de testare universală electromecanică computerizată.

În continuare a fost detaliat modelul de material utilizat pentru simularea numerică. Modelul de material standard utilizat pentru simularea numerică a fost definit ca un model de material

fragmentat reconstruit prin teste experimentale și simulare numerică, utilizând LS-Dyna. Prin combinarea modelului de plasticitate incrementală cu modelul de deteriorare progresivă, este posibilă reproducerea realistă a comportamentului materialului ABS la solicitări cvasi-stactice, inclusiv inițierea și propagarea ruperii. Acest cadru numeric permite corelarea strânsă între rezultatele experimentale și simulările efectuate, asigurând validitatea metodologiei utilizate pentru analizele ulterioare.

În ceea ce privește metodele de fabricare aditivă pentru materiale plastice (ABS), se remarcă diferențe semnificative între piesele fabricate prin imprimare cu rășină comparativ cu cele obținute prin extrudarea filamentului. Astfel, cele din prima categorie prezintă o calitate superioară a suprafeței și o precizie dimensională mai ridicată. În ceea ce privește post-procesarea, imprimarea cu rășină necesită mai multe operații (spălare, uscare, tratare), în timp ce piesele obținute cu FFF/FDM necesită doar îndepărtarea suportului. Din perspectiva costurilor ce țin de materia primă utilizată pentru FFF/FDM, acestea sunt de aproximativ două ori mai reduse decât în cazurile în care se utilizează rășina. În ceea ce privește volumul maxim de imprimare, echipamentele utilizate oferă dimensiuni comparabile: MarkerBot-246 X 152 X 155mm, Anycubic-218 X 123 X 200mm, ceea ce conduce la un volum similar al pieselor realizabile. Totodată, alegerea materialelor polimerice pentru fabricarea structurilor auxetice oferă o soluție economică și flexibilă pentru testarea acestor tipuri de structuri.

Capitolul III. STRUCTURI AUXETICE DE TIP RE-ENTRANT

Capitolul III a fost dedicat analizei aprofundate a structurilor celulare de tip fagure (*honeycomb*), structuri definite geometric de un poligon cu șase laturi aranjate în mod convenabil [31]. Acest tip de structură prezintă o particularitate și anume că valoarea coeficientului Poisson poate fi atât pozitivă cât și negativă. Pentru a pune în evidență valorile negative a fost utilizată configurația re-entrant [32]. Au fost investigate relațiile dintre parametrii geometrici și comportamentul mecanic, în special variația coeficientului lui Poisson.

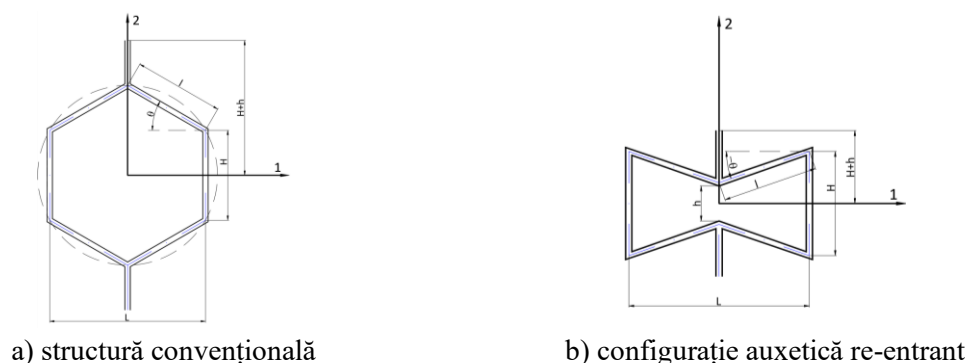


Figura 3.1 Structură de tip honeycomb

Limitele de variație ale coeficientului lui Poisson au fost investigate cu ajutorul unui model geometric parametrizat. Rezolvarea acestui model a fost realizată prin intermediul unei aplicații de calcul scrisă în MATLAB care utilizează modelul de calcul cu elemente finite. Modelul a fost supus unei analize de convergență, care a permis identificarea configurației optime a rețelei de elemente finite stabilindu-se că sunt necesare minimum șase elemente per ligament pentru acuratețea simulărilor.

Calculul coeficientului lui Poisson a fost implementat pe trei niveluri distincte: la nivelul celulei unitare (ν_u), la nivelul muchiilor structurii pentru determinare deplasărilor medii (ν_a) și pentru întreaga configurație pentru deplasarea maximă (ν_e).

Pentru verificarea rezultatelor au fost identificate o serie de modele teoretice utilizate în literatura de specialitate [33,34]. Rezultatele obținute din simulări numerice au fost comparate cu soluții analitice, diferențele constatate fiind sub 1,4%, ceea ce confirmă validitatea modelului numeric.

Pentru validarea experimentală, au fost fabricate epruvete din ABS, cu arhitectură re-entrant, supuse unui ciclu controlat de încărcare-descărcare (forță maximă 1,0 kN, viteză 5,0 mm/min). Deplasările locale au fost monitorizate prin analiză de imagini digitale (DIC), utilizând un algoritm implementat în MATLAB. Valoarea coeficientului lui Poisson obținută experimental (-0,710) s-a corelat foarte bine cu rezultatul obținut numeric (-0,700), indicând acuratețea modelului în descrierea comportamentului mecanic al structurii, atât la nivel global, cât și local (celulă unitară).

În plus, a fost evaluată influența numărului de celule suprapuse pe verticală asupra valorii coeficientului lui Poisson măsurat la nivelul muchiilor. Această analiză a condus la formularea

unei relații empirice care corelează valoarea locală (pentru celula unitară) cu cea globală, demonstrând că răspunsul mecanic poate fi adaptat prin ajustarea arhitecturii structurii.

Studiul a continuat cu o analiză parametrică detaliată, luând în considerare variabilitatea dimensiunilor celulei unitare L, H, h și t_L, t_H . Rezultatele au confirmat rolul determinant al ligamentelor în definirea comportamentului auxetic, evidențiind potențialul de optimizare a configurației pentru aplicații ingineresti specifice precum protecția la impact.

De asemenea, a fost abordată aplicarea algoritmilor de învățare automată (Machine Learning) pentru studiul parametrilor structurali. S-a utilizat un model numeric pentru a genera date luând în considerare variația mai multor parametri. Analiza a fost făcută utilizând datele de intrare obținute utilizând modelul numeric, pentru antrenarea rețelelor neuronale MATLAB pentru analiza regresiei. Tipul selectat a fost rețeaua neuronală cu optimizare Bayesiană, numărul de parametri variind de la doi la cinci:

- prima analiză a fost efectuată folosind un număr minim de parametri: lungimea ligamentului orizontal L și lungimea ligamentului vertical H – rezultatele raportate arată o abatere mare a răspunsului prezis față de răspunsul real, ceea ce arată că au fost utilizate date insuficiente pentru analiză;
- a II-a analiză: un al treilea parametru a fost adăugat la setul de date de intrare ca unghi calculat θ – rezultatele oferite sunt precise pentru seturile de date de intrare;
- a III-a analiză: rezultatele sunt de asemenea exacte, deoarece datele de intrare (L, H, h) pentru acest set de date sunt similare în construcție cu setul augmentat anterior (L, H, θ) ;
- a IV-a analiză: set de date de intrare construit utilizând modelul numeric și toți parametrii dimensionali (L, H, h, t_L, t_H) – rezultate: modelul poate estima cu exactitate comportamentul structurii.

Conform rezultatelor obținute, doi parametri nu sunt suficienți pentru analiza structurii, însă adăugarea unui al treilea parametru permite definirea unor modele de precizie, cu coeficienți de determinare mai mari de 0,998, iar utilizarea unui set complet de parametri este, de asemenea, fezabilă, coeficientul de determinare în acest caz fiind mai mare de 0,99.

Analizele de sensibilitate au arătat că dimensiunea ligamentului vertical (H) și spațiul interior (h) sunt cei mai influenți factori în comportamentul structural, determinând tranziția de la o configurație cu coeficient Poisson pozitiv la una negativă (re-entrant). S-a constatat, de asemenea, că în cazul în care grosimea ligamentelor este constantă, sunt suficienți trei parametri pentru un model predictiv robust, în timp ce în cazul grosimilor inegale sunt necesari toți cei cinci parametri pentru o acuratețe ridicată.

Rezultatele demonstrează că integrarea metodelor numerice cu tehnicile de *machine learning* poate optimiza proiectarea structurilor auxetice, reducând semnificativ efortul computațional.

Capitolul IV. STRUCTURI AUXETICE DE TIP ANTI-TETRA-CHIRAL

În continuarea lucrării, în Capitolul 4, a fost studiată structura auxetică de tipul anti-tetra-chiral [35]. În Figura 4.1 este prezentată celula unitară a structurii anti-tetra-chiral și sunt definite dimensiunile acesteia.

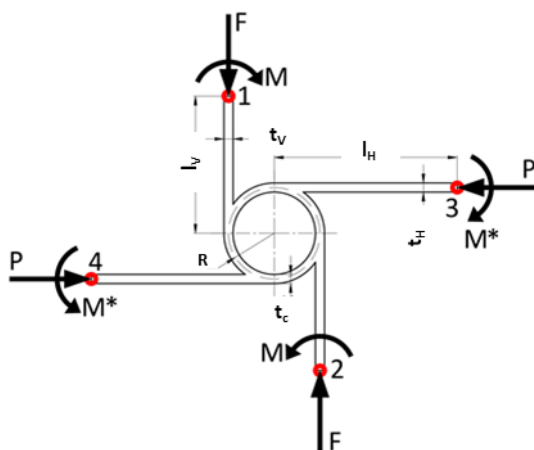


Figura 4.1. Diagrama de momente și forțe pentru celula unitară de tipul anti-tetra-chiral [36]

Au fost determinați analitic indicatorii de performanță ai structurii: coeficientul lui Poisson, forța de platou [37], lungimea etapei de platou și parametrii ce evaluează flambajul: forța critică de flambaj [38], numărul maxim de celule ce pot fi suprapuse pentru a evita flambajul și raportul dintre grosimea ligamentelor și lățimea structurii [39].

Procesul de deformare a structurilor anti-tetra-chirale este generat de rotația nodurilor, care conduce la îndoirea ligamentelor în condiții de încărcare în afara planului (tensiune/compresiune) [40–42]. Pentru a completa analiza performanței structurale pentru această configurație, au fost introduși doi noi indicatori analitici de performanță: deplasarea nodurilor circulare și deformația ligamentelor. Ecuațiile pentru cei doi parametri au fost determinate utilizând ipotezele prezentate mai jos.

În urma cercetărilor anterioare, s-au formulat următoarele ipoteze ce au condus la determinările analitice pentru indicatorii de performanță:

- forma nodurilor care leagă ligamentele nu se modifică sub acțiunea forțelor aplicate [43–46], ipoteză formulată pentru a simplifica procesul de calcul al formei deformate a ligamentului;
- modelul lui Bernoulli al grinzii solicitate la încovoire, fiind aplicat pentru studiul procesului de deformare al ligamentelor [47–50];
- forțele și momentele interne sunt determinate de rotația nodurilor rigide – furnizează datele de intrare pentru mecanica deformării;
- forțele interne orientate perpendicular pe direcția solicitării externe, se anulează;
- se neglijează deformațiile de forfecare ale ligamentelor;

- forța de reacțiune este determinată de dimensiunile celulei unitare și de numărul de celule dispuse pe direcție orizontală;
- domeniul de deformare exprimat prin lungimea etapei de platou depinde de numărul de unități construite pe direcția verticală [37];
- forța critică de flambaj este dedusă din soluția clasică (formula lui Euler) [26] aplicată pentru o grindă asupra căruia se aplică o forță centrată în raport cu axele de simetrie [51].

Studiul a continuat cu determinări experimentale. Două configurații structurale distincte au fost proiectate și fabricate prin tehnologia FFF/FDM, fiind ulterior supuse testelor de comprimare utilizând mașina de încercat la tracțiune. Dimensiunile au fost alese în urma unei analize parametrice. S-a arătat faptul că valoarea coeficientului lui Poisson este influențată de dimensiunea diametrului celulei, existând o relație direct proporțională. Pentru analiza comportamentului ligamentelor și nodurilor, s-au dezvoltat instrumente MATLAB capabile să extragă automat date privind deplasările și rotațiile nodurilor/ligamentelor structurii, pe baza imaginilor captate în timpul testării. Forțele de platou obținute pentru cele două configurații au fost comparate și interpretate în contextul comportamentului global al structurii, configurația B fiind mai eficientă din punct de vedere a lungimii platoului și a stabilității acestei etape.

Simultan, structurile au fost investigate numeric prin simulări cu elemente finite (LS-Dyna), folosind modele 3D de tip hexaedral. Modelele numerice au fost validate prin comparație cu rezultatele experimentale și cu soluțiile analitice, demonstrând o corelare bună. În plus, a fost elaborat un model numeric specializat pentru estimarea deformațiilor în ligamente, demonstrând o bună acuratețe și evidențind necesitatea integrării efectului de contact dintre noduri în modelele predictive.

Un model analitic îmbunătățit a fost dezvoltat pentru a estima deformația în ligamente până la rupere, fiind utilizat modelul GISSMO pentru a evalua comportamentul în regim de deteriorare. Rezultatele au arătat că cea de-a doua configurație propusă, oferă performanțe structurale superioare, atât în termeni de stabilitate, cât și de capacitate de deformare.

Rezultatele obținute permit estimarea capacității structurii de a dezvolta integral etapa de platou sau, dimpotrivă, de a ceda prematur, contribuind astfel la fundamentarea unor soluții eficiente pentru aplicații inginerești avansate.

Studiul evidențiază avantajele unei abordări integrate – analitică, numerică și experimentală – în proiectarea și validarea structurilor auxetice. S-a demonstrat că modelele analitice pot constitui instrumente rapide și eficiente pentru evaluarea preliminară, iar simulările numerice oferă suport pentru analiza detaliată și optimizarea designului geometric. Validarea experimentală a confirmat precizia predicțiilor teoretice, consolidând astfel viabilitatea structurală a configurației anti-tetra-chiral.

Capitolul V. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE VIITOARE

5.1 Concluzii generale

Obiectivul general al lucrării: *Materiale și structuri inteligente utilizate pentru creșterea performanțelor securității pasive a automobilelor*, a constat în dezvoltarea și validarea unor modele analitice, numerice și experimentale pentru analiza și optimizarea materialelor și structurilor inteligente (în special metamateriale mecanice auxetice de tip re-entrant și anti-tetra-chiral), în vederea îmbunătățirii performanțelor de utilizare ale automobilelor.

Având în vedere exigențele tot mai ridicate privind comportamentul în regim de impact și protejarea ocupanților în caz de coliziune, lucrarea s-a concentrat pe abordarea integrată a unor soluții structurale capabile să consume eficient energia prin deformare controlată fără penalizarea performanțelor dinamice ale vehiculului. În acest context, metamaterialele mecanice, materialele auxetice, au fost analizate ca alternativă promițătoare pentru componentele cu rol în siguranță, datorită caracteristicilor lor unice, cum ar fi coeficientul Poisson negativ și capacitatea de deformare stabilă. Aceste tipuri de structuri auxetice pot fi integrate fie în componentele destinate sistemelor de securitate pasivă ale automobilului, unde deformarea controlată contribuie la protejarea habitaculului și la activarea eficientă a sistemelor de protecție, fie pot fi încorporate în componente specifice, precum structuri-suport pentru bateriile de tracțiune în cazul vehiculelor electrice. De asemenea, acestea se pretează pentru utilizare în infrastructura rutieră, ca elemente deformabile în barierele de protecție care absorb energia în caz de coliziune.

Capitolul I, *Introducere*, a avut rolul de a contura fundamentele teoretice și contextul actual în care se înscrie cercetarea. A fost analizată evoluția cerințelor privind securitatea pasivă a autovehiculelor, subliniindu-se creșterea continuă a severității criteriilor de acceptare. S-a demonstrat că îndeplinirea cerințelor actuale de securitate presupune implementarea unor soluții structurale capabile să disipeze energia de impact prin deformare controlată. Acest aspect devine critic în contextul protejării habitaculului în timpul unei coliziuni și de altfel, permite altor sisteme de securitate să se declanșeze.

În continuare, a fost analizată influența materialelor utilizate asupra performanțelor de siguranță. S-a argumentat necesitatea integrării structurilor celulare și a metamaterialelor mecanice, capabile să răspundă cerințelor biomecanice fără a compromite masa proprie a autovehiculului. A fost introdus conceptul de material auxetic și semnificația coeficientului lui Poisson negativ în comportamentul mecanic. Au fost identificate în literatură numeroase geometrii structurale (re-entrant, chiral, structuri ierarhizate, origami, perforate, rotative, etc.) și au fost discutate proprietățile lor (absorbție de energie, rezistență la forfecare, densitate relativă etc.).

Prin analiza curbelor forță-deplasare și a indicatorilor de performanță (SEA, NLC, EEA, SLC) s-au stabilit criteriile pentru selecția și proiectarea unor structuri eficiente din punct de vedere al securității pasive.

Concluzionând, **Capitolul I** reprezintă o bază solidă teoretică și contextuală pentru direcționarea cercetării către investigarea structurilor auxetice, ca soluție viabilă pentru îmbunătățirea securității pasive a autovehiculelor.

În **Capitolul II**, *Caracterizarea materialelor utilizate pentru construcția structurilor de siguranță*, a fost investigată și analizată în mod critic capacitatea diferitelor metode de fabricare aditivă de a produce structuri cu performanțe mecanice corespunzătoare cerințelor impuse. Au fost realizate piese prin metode de fabricare aditive (SLM, MSLA, FFF/FDM), dar și convenționale, din semifabricat laminat debitat cu laser (s-a analizat influența metodei de fabricare asupra performanțelor mecanice ale piesei). Epruvetele metalice obținute prin SLM au fost caracterizate morfostructural și microstructural prin microscopie electronică de baleiaj (SEM) și spectroscopie (EDS). S-au evidențiat diferențe importante între probe, în funcție de orientarea piesei în timpul imprimării, confirmând influența procesului asupra microstructurii și compoziției locale. Cea mai favorabilă orientare a piesei în procesul de imprimare 3D fiind XY. S-a evidențiat totodată caracterul anizotrop al pieselor imprimate 3D, subliniind necesitatea unei selecții riguroase a direcției de construcție și a parametrilor tehnologici.

Pe lângă caracterizarea metalelor (SS316) procesate prin SLM, capitolul a inclus testarea și validarea unor epruvete realizate din ABS prin tehnologiile MSLA și FFF/FDM, având rol de prototipuri pentru studiul structurilor auxetice. Au fost definite și implementate modele numerice avansate în LS-Dyna, utilizând cartele de plasticitate și deteriorare progresivă (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, GISSMO), fiind generate curbe de triaxialitate și hărți de instabilitate, instrumente utilizate în etapele de simulare din capitolele următoare. Astfel, s-a demonstrat că tehnologiile aditive (MSLA, FFF/FDM) oferă un potențial ridicat pentru reproducerea fidelă a geometriei complexe a structurilor auxetice.

Capitolul III, *Structuri auxetice de tip re-entrant*, a constatat în investigarea comportamentului mecanic al structurii auxetice de tip re-entrant. S-a analizat influența parametrilor geometrici asupra coeficientului lui Poisson și asupra capacității de deformare. Cercetarea a conținut modelarea analitică, numerică și experimentală. În prima parte a studiului a fost dezvoltat un model numeric parametrizat definit în funcție de modelul geometric al structurii. Procedura de calcul a coeficientului Poisson a fost implementată pe trei niveluri (la nivelul celulei, pe muchiile structurii și la nivelul întregii structuri).

Modelul numeric a fost validat prin teste experimentale utilizând epruvete cu configurație re-entrant. Rezultatele obținute au confirmat capacitatea modelului de a reproduce comportamentul real al structurii, atât în ceea ce privește deformarea globală, cât și la nivel de celulă unitară. A fost verificată influența numărului de celule suprapuse asupra valorii coeficientului lui Poisson. A fost determinată o soluție empirică care face legătura între valoarea coeficientului pentru celula unitară și cea de pe muchii, dependente de numărul de celule dispuse pe direcție verticală.

A urmat o analiză parametrică detaliată a influenței dimensiunilor ligamentelor (L, H, h, t_L, t_H) asupra răspunsului mecanic. S-a constatat că variația spațiului interior (h) influențează semnificativ tranziția de la comportament pozitiv la negativ al coeficientului Poisson (*de la 1,1 la -0,66*), în timp ce alți parametri, precum t_H și L , determină rigidizarea

structurii și afectează amplitudinea deformărilor. Rezultatele au fost sintetizate în relații empirice și au fundamentat importanța configurării geometriei în funcție de aplicația vizată.

În final, au fost implementate metode de învățare automată (*machine learning*) pentru a evalua capacitatea modelelor de regresie de a prezice comportamentul structural pe baza unor seturi parametrice extinse. Au fost generate peste 1000 de cazuri de simulare, utilizate pentru antrenarea rețelelor neuronale. Modelele cu 3–5 parametri au obținut coeficienți de determinare (R^2) peste 0.99, confirmând aplicabilitatea **AI** în proiectarea optimizată a structurilor auxetice. Analiza valorilor Shapley a permis identificarea parametrilor cu cea mai mare influență asupra comportamentului auxetic, evidențiind importanța ligamentului vertical și a spațiului interior. Integrarea metodelor machine learning consolidează procesul de proiectare, deschizând direcții promițătoare pentru aplicabilitatea practică a acestor structuri.

Capitolul IV, *Structuri auxetice de tip anti-tetra-chiral*, a fost dedicat analizei comportamentului mecanic al unei structuri auxetice de tip anti-tetra-chiral. Au fost introduși și analizați o serie de indicatori de performanță, și anume: coeficientul lui Poisson, forța și lungimea etapei de platou, capacitatea de deformare stabilă și forța critică de flambaj. Acești factori permit o evaluare riguroasă a eficienței structurii în regim de comprimare. S-a realizat determinarea analitică a deformațiilor ligamentelor în timpul procesului de comprimare pentru a asigura dezvoltarea întregii zone de platou.

Au fost definite și fabricate utilizând metoda de imprimare cu filament topit, două configurații de structură anti-tetra-chiral. S-au efectuat teste experimentale, piesele fiind suspuse la solicitarea de comprimare. A fost analizat comportamentul nodurilor și al ligamentelor pe baza imaginilor prelucrate digital utilizând MATLAB.

Structurile proiectate au fost analizate numeric folosind LS-Dyna. Rezultatele simulării au fost comparate cu soluțiile analitice și cu testările experimentale. Similitudinile dintre cele trei seturi de date au confirmat fidelitatea modelului și au oferit încredere în capacitatea sa predictivă. În continuare a fost dezvoltat un model numeric capabil să estimeze deformațiile dezvoltate în ligamente. Studiul a continuat cu analiza deformațiilor până la rupere, utilizându-se un model de degradare a materialului (de tip GISSMO). Rezultatele au demonstrat faptul că cea de-a doua configurație este mai eficientă și din punct de vedere al deformațiilor, dar și în ceea ce privește platoul.

Concluzionând, în acest capitol s-a validat experimental și numeric structura auxetică de tip anti-tetra-chiral ca soluție structurală viabilă, cu potențial de integrare în sistemele de siguranță. Utilizarea unei abordări integrate, teoretică, numerică și experimentală, a permis fundamentarea completă a comportamentului său și optimizarea designului geometric în vederea utilizării practice.

5.2 Contribuții personale

Cercetările realizate pe parcursul elaborării lucrării de doctorat, prezentate sintetic mai sus, au presupus o serie de contribuții personale:

- fundamentarea teoretică a relației dintre cerințele biomecanice și caracteristicile structurale ale materialelor celulare;
- realizarea unui studiu amplu asupra stadiului actual al cunoașterii privind metamariile mecanice, clasificarea și domeniile de utilizare ale acestora;
- definirea unui set de parametri de performanță pentru evaluarea structurilor celulare în contextul aplicațiilor pentru automobil, prin corelarea proprietăților mecanice cu cerințele de absorbție a energiei;
- proiectarea și fabricarea de epruvete prototip, utilizând tehnologii aditive (FFF/FDM, MSLA), utilizate pentru cercetările experimentale;
- caracterizarea microstructurală și mecanică a epruvetelor obținute prin SLM, inclusiv realizarea testelor experimentale, completate cu analiza DIC și prelucrarea datelor utilizând softul MATLAB;
- dezvoltarea și validarea unui model numeric parametrizat pentru structura auxetică de tip re-entrant;
- integrarea metodelor de învățare automată (Machine Learning) pentru modelarea și predicția comportamentului mecanic al structurilor auxetice;
- dezvoltarea de modele numerice avansate pentru simularea comportamentului structurilor auxetice, utilizând metoda elementului finit (LS Dyna) și corelarea rezultatelor cu date experimentale;
- elaborarea modelelor analitice care permit estimarea comportamentului la comprimare și flambaj al structurilor anti-tetra-chirale, validate numeric și experimental;
- elaborarea unei metode analitice ce permite determinarea limitelor utilizare pentru structurile de tip anti-tetra-chiral;
- dezvoltarea de aplicații software personalizate, în MATLAB, pentru: generarea de geometrii parametrizate, analiză numerică a comportamentului structural, procesare și interpretare a datelor experimentale (inclusiv DIC);
- participarea activă la publicarea de articole științifice, rezultate din activitatea de cercetare.

5.3 Perspective viitoare de cercetare

Pe baza concluziilor obținute și a direcțiilor de cercetare, am identificat următoarele perspective:

1. Extinderea cercetărilor către alte tipologii de structuri;
2. Investigarea structurilor 3D;
3. Caracterizarea structurilor metalice cu geometrii complexe obținute prin metode aditive;
4. Aplicarea simulărilor dinamice la impact (ex. crash test virtual), folosind modele validate numeric, pentru a evalua comportamentul real în condiții apropiate celor reglementate;
5. Caracterizarea comportamentului structurilor auxetice în regim de solicitări dinamice și la impact, prin metode experimentale ce presupun teste la viteze ridicate;
6. Proiectarea de structuri auxetice cu performanță direcțională, care răspund diferit în funcție de direcția solicitării – caracteristică valoroasă pentru protecția la impact lateral sau oblic;

7. Utilizarea tehnicilor avansate de optimizare multi-obiectiv pentru găsirea celor mai bune configurații geometrice în funcție de anumiți indicatorii (ex. masa structurii);
8. Metode experimentale pentru identificarea defectelor în structuri realizate prin metode aditive;
9. Extinderea studiului asupra influenței metodelor de fabricare asupra defectelor structurale locale, prin tomografie computerizată și corelații cu proprietățile mecanice.

5.4 Listă de lucrări publicate

1. Ștefan-Lucian Tabacu, **Ana Gabriela Badea**, Ionela-Alina Aparaschivei, *Complex Analysis of an Auxetic Structure under Compressive Loads*, WOS: 000978260000001, Editură: MDPI, Data publicării: 2023-04-01, Jurnal: Sustainability (I.F. 3.3, Q2). **Autor corespondent**
2. *Analysis of Auxetic Honeycombs*, Ștefan-Lucian Tabacu, **Ana Gabriela Badea**, Alina-Ionela Aparaschivei, Daniel Constantin Anghel, WOS: 001501222900001, Editură: MDPI, Data publicării: 2025-01-20, Jurnal: Mathematics (I.F. 2.2, Q1). **Autor corespondent**
3. Mihai Marin Stirosu, **Ana Gabriela Badea**, Ionela-Alina Aparaschivei, Ștefan-Lucian Tabacu, *Development of a coupled process-design numerical model for an automotive assembly*, Nume conferință: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Data publicării: 2024-01-01, Nr. pagini: 012038.
4. Ionela-Alina Aparaschivei, **Ana Gabriela Badea**, Ștefan-Lucian Tabacu, *Comparative analysis of the manufacturing processes for 316L material*, Nume conferință: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Data publicării: 2024-01-01, Nr. pagini: 012037.
5. Victor Iorga-Siman, Adrian-Constantin Clenci, Rodica Niculescu, **Ana Gabriela Badea**, *CFD STUDY ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE AUREL PERSU's CAR*, WOS: 000890785000004, Editură: SOC AUTOMOTIVE ENGINEERS ROMANIA, Data publicării: 2022-09-15, Jurnal: Ingineria Automobilului (I.F. 0.2 Q4).

Lucrări ce urmează a fi susținute și publicate:

1. **Ana BADEA**, Ștefan TABACU, Ionela APARASCHIVEI, Cătălin DUCU, *Microstructural and mechanical characterization of 316 stainless steel specimens fabricated using SLM*, la Conferința AMMA 2025 (The 35th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering) AUTOMOTIVE MOBILITY, MANAGEMENT AND AUTOMATION, 23-25 October 2025, Cluj-Napoca, Romania.
2. Ionela Alina APARASCHIVEI, **Ana Gabriela BADEA**, Mihai Marin STIROSU, Ștefan Lucian TABACU, *Optimal manufacturing process and parameters using AM*, la Conferința AMMA 2025 (The 35th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering) AUTOMOTIVE MOBILITY, MANAGEMENT AND AUTOMATION, 23-25 October 2025, Cluj-Napoca, Romania.

Proiecte de cercetare

Membru în cadrul proiectului de cercetare ”Cercetări privind proprietățile mecanice ale pieselor metalice obținute prin metode de fabricare aditivă comparativ cu metodele convenționale”, câștigat în cadrul Competiției Interne de Proiecte de Cercetare Științifică CIPCS 2022, domeniul competițional: Științe Inginerești.

BIBLIOGRAFIE (Selectivă)

- [1]The International Council on Clean Transportation, EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS, 2024. <https://theicct.org/publication/european-vehicle-market-statistics-2024-25/> (accessed May 24, 2025).
- [2]European Environment Agency, New registration of electric vehicles in Europe, (2024). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles> (accessed May 24, 2025).
- [3]J. Gliick, A perverse creation of science: anti-rubber, *The New York Times* (1987).
- [4]G. Milton, Composite materials with Poisson's ratios close to -1, *J. Mech. Phys. Solids* 40 (1992) 1105–1137. [https://doi.org/doi:10.1016/0022-5096\(92\)90063-8](https://doi.org/doi:10.1016/0022-5096(92)90063-8).
- [5]UNECE, UN-Rgulations, (n.d.). <https://unece.org/un-regulations-addenda-1958-agreement> (accessed September 10, 2025).
- [6]EURONCAP-The European New Car Assessment Programme, (n.d.). <https://www.euroncap.com/en> (accessed June 4, 2025).
- [7]A. sadat Mirhakimi, D. Dubey, M.A. Elbestawi, Laser powder bed fusion of bio-inspired metamaterials for energy absorption applications: A review, *Journal of Materials Research and Technology* 31 (2024) 2126–2155. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.234>.
- [8]S. Chahardoli, A.A. Nia, M. Asadi, Parametric investigation of the mechanical behavior of expanding-folding absorbers and their implementation in sandwich panels core, *Thin-Walled Structures* 137 (2019) 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.003>.
- [9]A. Baroutaji, M. Sajjia, A.G. Olabi, On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, *Thin-Walled Structures* 118 (2017) 137–163. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>.
- [10] K.E. Evans, M.A. Nkansah, Molecular network design, *Nature* 353 (1991) 10065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/353124a0>.
- [11] T.X. Yu, Y. Xiang, M. Wang, L. Yang, Key Performance Indicators of Tubes Used as Energy Absorbers, 626 (2015) 155–161. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.626.155>.
- [12] Y. Xiang, T. Yu, L. Yang, Comparative analysis of energy absorption capacity of polygonal tubes, multi-cell tubes and honeycombs by utilizing key performance indicators, *Mater Des* 89 (2016) 689–696. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.004>.
- [13] M.S. Rad, H. Hatami, R. Alipouri, A.F. Nejad, F. Omidinasab, Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures, *302* (2019) 15–20.
- [14] M. Wallbanks, M.F. Khan, M. Bodaghi, A. Triantaphyllou, A. Serjouei, On the design workflow of auxetic metamaterials for structural applications, *Smart Mater Struct* 31 (2022). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac3f78>.

- [15] M. Hosseini, H. Mazaheri, Mechanical behavior of graded combined auxetic-honeycomb structures, *Int J Mech Sci* 276 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109223>.
- [16] Y. Wang, L. Wang, Z.D. Ma, T. Wang, A negative Poisson's ratio suspension jounce bumper, *Mater Des* 103 (2016) 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.041>.
- [17] X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie, Auxetic metamaterials and structures: A review, *Smart Mater Struct* 27 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>.
- [18] H. Hankin, J. Gagen, W. Peters, A. Crann, Y. Chen, S. Fares, P. Sareh, Airless tires: Structural concepts, mechanical design, and application prospects, *Mater Des* 253 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113933>.
- [19] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, F. Berto, Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review, *Mater Des* 180 (2019) 107950. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>.
- [20] F. Ebrahimi, *Mechanics of Auxetic Materials and Structures*, CRC Press, 2024. <https://doi.org/10.1201/9781003289296>.
- [21] W. Wu, X. Song, J. Liang, R. Xia, G. Qian, D. Fang, Mechanical properties of anti-tetrachiral auxetic stents, *Compos Struct* 185 (2018) 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.048>.
- [22] H. Ebrahimi, D. Mousanezhad, H. Nayeb-Hashemi, J. Norato, A. Vaziri, 3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology, *Mater Des* 145 (2018) 226–231. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.052>.
- [23] M. Sanami, N. Ravirala, K. Alderson, A. Alderson, Auxetic materials for sports applications, *Procedia Eng* 72 (2014) 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.079>.
- [24] M.H. Zamani, M. Heidari-Rarani, M. Mirkhalf, Design, optimization and additive manufacturing of an innovative bike helmet using auxetic metastructures, *Int J Solids Struct* 310 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113240>.
- [25] M. Balan P, J. Mertens A, M.V.A.R. Bahubalendruni, Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review, *Mater Today Commun* 34 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105285>.
- [26] Y. Zhang, X. Ren, X.Y. Zhang, T.T. Huang, L. Sun, Y.M. Xie, A novel buckling-restrained brace with auxetic perforated core: Experimental and numerical studies, *Eng Struct* 249 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113223>.
- [27] T.-C. Lim, *A Partially Auxetic Metamaterial Inspired by the Maltese Cross*, Cambridge University Press, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009246415>.
- [28] W. Ruiqing, Z. Xiaotian, L. Chengyang, W. Zhengkang, H. Xuegang, W. Wenlong, Numerical studies on ballistic limit and cellular dispersion of aluminium foam sandwich panel under hypervelocity impact, *Mater Today Commun* 33 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104330>.
- [29] Y. Xiang, T. Yu, L. Yang, Comparative analysis of energy absorption capacity of polygonal tubes, multi-cell tubes and honeycombs by utilizing key performance indicators, *Mater Des* 89 (2016) 689–696. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.004>.

- [30] D. Bourell, J. Pierre, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese, A. Clare, *CIRP Annals - Manufacturing Technology Materials for additive manufacturing*, *CIRP Ann Manuf Technol* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>.
- [31] L. Mizzi, D. Attard, R. Gatt, A.A. Pozniak, K.W. Wojciechowski, J.N. Grima, Influence of translational disorder on the mechanical properties of hexachiral honeycomb systems, *Compos B Eng* 80 (2015) 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.057>.
- [32] S. Tabacu, A.G. Badea, A.I. Aparaschivei, D.C. Anghel, Parametric Analysis of Auxetic Honeycombs, *Mathematics* 13 (2025). <https://doi.org/10.3390/math13101676>.
- [33] L.J. Gibson, M.F. Ashby, F.R.S., G.S. Schajer, C.I. Robertson, The mechanics of two dimensional cellular materials, *Proceedings of the Royal Society* 382 (1982). <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rspa.1982.0087>.
- [34] I.G. Masters, K.E. Evans, Models for the elastic deformation of honeycombs, *Compos Struct* 35 (1996) 403–422. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(96\)00054-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2).
- [35] S. Tabacu, A. Badea, A. Sandu, Complex Analysis of an Auxetic Structure under Compressive Loads, *Sustainability (Switzerland)* 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su15086805>.
- [36] S. Tabacu, R.F. Negrea, D. Negrea, Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads, *Thin-Walled Structures* 155 (2020) 106929. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106929>.
- [37] S. Tabacu, P. Predoiu, R. Negrea, A theoretical model for the estimate of plateau force for the crushing process of 3D auxetic anti-tetra chiral structures, *Int J Mech Sci* 199 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106405>.
- [38] S. Tabacu, N.D. Stanescu, A theoretical model for the estimate of the reaction force for 3D auxetic anti-tetra chiral tubular structures under tensile loads, *Thin-Walled Structures* 168 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108304>.
- [39] S. Tabacu, D. Stanescu, Axial Compression and Buckling Analysis of Columnar Structures with Tetra-Anti-Chiral Configuration, *J Appl Mech* 89 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4054795>.
- [40] H. Lu, X. Wang, T. Chen, In-plane dynamics crushing of a combined auxetic honeycomb with negative Poisson's ratio and enhanced energy absorption, *Thin-Walled Structures* 160 (2021) 107366. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107366>.
- [41] C. Qi, F. Jiang, C. Yu, S. Yang, In-plane crushing response of tetra-chiral honeycombs, *Int J Impact Eng* 130 (2019) 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.04.019>.
- [42] K. Li, Y. Zhang, Y. Hou, L. Su, G. Zeng, X. Xu, Mechanical properties of re-entrant anti-chiral auxetic metamaterial under the in-plane compression, *Thin-Walled Structures* 184 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110465>.
- [43] R. Zhong, M. Fu, Q. Yin, O. Xu, L. Hu, Special characteristics of tetrachiral honeycombs under large deformation, *Int J Solids Struct* 169 (2019) 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.04.020>.
- [44] D. Mousanezhad, B. Haghpanah, R. Ghosh, A.M. Hamouda, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach, *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 6 (2016) 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2016.02.004>.

- [45] D. Prall, R.S. Lakes, Properties of chiral honeycombe with Poisson's ratio of -1, *Int. J. Mech. Sci* 39 (1997).
- [46] N.D. Tabacu S, Negrea R, Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads, *Thin-Walled Structures* 155 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106929>.
- [47] Q. Gao, C.A. Tan, G. Hulbert, L. Wang, Geometrically nonlinear mechanical properties of auxetic double-V microstructures with negative Poisson's ratio, *European Journal of Mechanics, A/Solids* 80 (2020) 103933. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.103933>.
- [48] W. Wu, Y. Tao, Y. Xia, J. Chen, H. Lei, L. Sun, D. Fang, Mechanical properties of hierarchical anti-tetrachiral metastructures, *Extreme Mech Lett* 16 (2017) 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2017.08.004>.
- [49] Q. Wang, Z. Yang, Z. Lu, X. Li, Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression, *Mater Des* 186 (2020) 108226. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108226>.
- [50] I. Ivañez, S. Sanchez-Saez, Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core, *Compos Struct* 106 (2013) 716–723. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.025>.
- [51] D.N.S. Stefan Tabacu, Axial Compression and Buckling Analysis of Columnar Structures with Tetra-Anti-Chiral Configuration, *Journal of Applied Mechanics* 89 (2022).