

UNIVERSITATEA din PITEȘTI
FACULTATEA de MECANICĂ și TEHNOLOGIE
Școala doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Constantin – Paul PREDOIU

TEZĂ DE DOCTORAT

rezumat

Conducător științific
Prof. univ. dr. habil. ing. **Dinel POPA**

Pitești

– 2021 –

UNIVERSITATEA din PITEȘTI
FACULTATEA de MECANICĂ și TEHNOLOGIE

Școala doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Constantin – Paul PREDOIU

TEZĂ DE DOCTORAT

rezumat

Conducător științific
Prof. univ. dr. habil. ing. **Dinel POPA**

Mentori

Prof. univ. dr. habil. ing. **Ștefan TABACU**
Prof. univ. dr. ing. **Viorel NICOLAE**
Prof. univ. dr. ing. **Ion TABACU**

Pitești

– 2021 –



UNIVERSITATEA din PITEȘTI
FACULTATEA de MECANICĂ și TEHNOLOGIE
Școala doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Constantin – Paul PREDOIU

TEZĂ DE DOCTORAT

*Studii și cercetări privind îmbunătățirea
performanțelor structurilor cu pereți
subțiri și utilizarea acestora ca dispozitive
de siguranță pentru automobile*

PREFAȚĂ

Competiția acerbă la care sunt supuși fabricanții de autovehicule și în mod particular constructorii de autoturisme, care intră într-un mediu concurențial extrem de dinamic în ceea ce privește cererea pieței și cadrul legislativ, impune ca pe o necesitate imperativă reducerea timpului de trecere de la idee la produs și o creștere a flexibilității activităților de dezvoltare și producție a noilor tipuri de autovehicule. În acest sens s-a impus reducerea sensibilă a cercetărilor experimentale de laborator în favoarea ingineriei conceptuale și studiului validării virtuale.

În prezent se află în dezvoltare un portofoliu divers de tehnologii, unele de o importanță critică. Prioritățile tehnice se adresează fiecărui sistem al autovehiculului: interior, exterior, caroserie, transmisie, motor, tehnologii care pavează calea spre proiectarea unor autovehicule care vor folosi intensiv masele plastice și materialele compozite.

O altă direcție majoră actuală, care preocupă specialiști, este de a îmbunătății pe cât posibil actualul concept al siguranței rutiere, dar și de a dezvolta și integra noi sisteme și echipamente performante care să ducă la îmbunătățirea indicilor care caracterizează siguranța rutieră.

În contextul amintit, prin prezenta teză de doctorat s-a urmărit identificarea unor materiale caracterizate de greutate specifică redusă și cu proprietăți mecanice ridicate, precum materialele cu structură tubulară sau cele cu structuri celulare, care integrate în construcția automobilelor reprezintă o soluție viabilă pentru dezideratul major al construcțiilor de automobile și anume al reducerii masei proprii a automobilului, cu consecințe directe asupra costurilor de origine și de utilizare ale autovehiculelor și al sporirii performanțelor dinamice și de consum energetic.

Prezenta lucrare, realizată în perioada stagiului de doctorat efectuat în cadrul școlii doctorale „Ingineria autovehiculelor” este rezultatul studiilor teoretice și al cercetărilor experimentale efectuate la Centrul de Cercetare “Ingineria Automobilului” și laboratorul “Caroserii și Analiză Structurală” din Universitatea din Pitești, reprezintă rodul mai multor ani de activități, de documentare, cercetare și elaborare desfășurate sub competența îndrumare a domnului prof. univ. dr. habil. ing. Dinel POPA, coordonatorul tezei de doctorat și mentorilor. O recunoaștere deosebită este acordată domnului prof. univ. dr. habil. ing. Ștefan TABACU, personalitate științifică în domeniul abordat, cu rezultate confirmate în țară și străinătate, căruia țin să-i mulțumesc pentru sfaturile pertinente primite din partea dumnealui, precum și pentru răbdarea și înțelegerea de care a dat dovadă de-a lungul întregii perioade de concepere și realizare a tezei de doctorat, asigurându-l de respectul și prețuirea mea.

Mulțumesc membrilor din școala doctorală ingineria autovehiculelor și îi asigur de întreaga mea considerație pe cei care de-a lungul studiilor mi-au fost mentori.

În același timp, mulțumesc tuturor celor, care într-o formă sau alta, m-au ajutat, m-au susținut permanent și mi-au creat condițiile necesare pentru elaborarea tezei de doctorat și nu în ultimul rând doresc să mulțumesc familiei pentru înțelegerea acordată.

CUPRINS

Introducere	7
CAPITOLUL 1 – Cerințele de securitate ale autovehiculului	10
1.1. Siguranța circulației.....	10
1.2. Siguranța activă.....	10
1.3. Siguranța pasivă	10
1.4. Concluzii	11
CAPITOLUL 2 – Comprimarea axială a tuburilor cu pereți subțiri.....	13
2.1. Studii realizate privind tuburile de secțiune circulară cu pereți subțiri	13
2.2. Studii realizate privind tuburile de secțiune pătrată cu pereți subțiri	15
2.3. Studii realizate privind structurile multi-celulare cu pereți subțiri.....	16
2.4. Studii realizate privind alte forme ale structurilor cu pereți subțiri.....	17
2.5. Studii privind tipurile de materiale ale structurilor	18
2.6. Parametrii de performanță a structurilor consumatoare de energie.....	19
2.7. Concluzii	21
CAPITOLUL 3 – Studii practice și analiza rezultatelor pentru structurile cu secțiune circulară	23
3.1. Analiza clasificării modurilor de cedare în cazul tuburilor cu secțiune circulară	23
3.1.1. Procedura experimentală	23
3.1.2. Rezultate și discuții	25
3.2. Analiza rezultatelor teoretice și experimentale ale tuburilor cu secțiune transversală circulară cu sectoare de diferite diametre	28
3.2.1. Procedura experimentală	29
3.2.2. Rezultate și discuții	30
3.3. Concluzii	32
CAPITOLUL 4 – Studii practice și analiza rezultatelor pentru structurile auxetice	33
4.1. Model teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale	33
4.1.1. Procedura experimentală	33
4.1.2. Simularea numerică.....	35
4.1.3. Modelul teoretic	36
4.2. Analiza teoretică, rezultate experimentale a structurii 3D tetra-anti-chirale și a structurilor de secțiune circulară sub sarcină axială	41
4.3. Concluzii	43
4. Concluzii.....	45
5.1. Concluzii finale	46

5.2. Contribuții personale	47
5.3. Perspective de cercetare.....	48
Bibliografie.....	49

Introducere

Abordarea unui subiect precum *Studii și cercetări privind îmbunătățirea performanțelor structurilor cu pereți subțiri și utilizarea acestora ca dispozitive de siguranță pentru automobile* necesită în primă fază, însușirea informațiilor publicate până în prezent dar și continuarea cercetărilor în domeniu aducând un aport prin studiile ce vor fi realizate.

Înscrișă în actualitatea teoriei și practicii în domeniul ingineriei de autovehicule, lucrarea elaborată, care este orientată în direcția identificării de materiale inovative caracterizate de greutate specifică redusă și proprietăți mecanice ridicate care pot fi integrate ansamblului constructiv al automobilului, realizează prin conținutul său:

- ✓ sistematizarea principalelor cercetări legate de studiul criteriilor de securitate ale autovehiculelor;
- ✓ studiul bibliografic în domeniul structurilor metalice și al structurilor celulare;
- ✓ elaborarea metodologiei de cercetare și a mijloacelor tehnice necesare cercetării experimentale legate de investigarea comportamentului structural și identificarea proprietăților mecanice ale materialelor analizate;
- ✓ analiza rezultatelor experimentale și validarea modelului de simulare numerică destinat evaluării unor procese de optimizare.

Un deziderat major al fabricării automobilelor este reprezentat de diminuarea maselor, iar o soluție în acest sens, este de a promova materiale inovative, care sunt caracterizate de greutate specifică mică și rezistență mecanică sporită.

Metamaterialul este un material artificial care este proiectat pentru a obține proprietăți specifice unui material [2]. Ca o consecință a geometriei lor interne și a diferitelor relații spațiale, aceste materiale denotă un comportament unic și intuitiv [3]. Câmpurile materialelor electromagnetice și optica sunt locul unde a fost introdus pentru prima dată conceptul de metamateriale [4]. Deși metamaterialul este creat artificial, de om, acesta se poate regăsi și în natură și putem oferi câteva exemple intuitive precum aripa de fluture *morpho* [5], sau fibra de mătase [6]. Microstructura lor distinctivă are ca rezultat caracteristicile impermeabile sau rezistența la tracțiune. Principalul scop al metamaterialului este de a schimba proprietățile mecanice ale materialului. Materialele care sunt supuse comprimării axiale se vor contracta transversal, iar cele care sunt supuse unor tensiuni se extind transversal sunt denumite *auxetice*.

Termenul auxetic derivă din cuvântul grecesc auxetikos care înseamnă *ceea ce tinde să crească*. Structurile auxetice sunt caracterizate printr-un coeficient Poisson negativ [2] și sunt cunoscute și sub denumirea anti-cauciuc sau structuri dilatative [7]. Diferit de materialele tradiționale, structurile auxetice vor fi alungite de-a lungul direcțiilor perpendiculare pe direcția de întindere. Pe scară largă structurile auxetice cu coeficient Poisson negativ au fost fabricate mai întâi sub formă de faguri de cauciuc siliconic 2D sau aluminiu care s-au deformat [7].

Cercetările sunt făcute în direcția identificării structurilor tubulare și a proprietății materialelor cu structură celulară, care se pretează a fi incluse în sistemul de siguranță pasivă a automobilului la impact.

Siguranța, performanța, confortul, luxul și eleganța sunt atributele care domină prezentul automobilelor. În acest sens are loc o continuă dezvoltare a cunoașterii în domeniul științei și tehnologiei automobilelor unde există o permanentă tendință de noi preocupări (cercetări, lucrări, studii) menite să dezvolte materiale cu greutate specifică mică și proprietăți mecanice ridicate.

Prin urmare un rol important în acest sens este și comunicarea cunoașterii prin publicații. Comunicarea cunoașterii într-un domeniu dat al științei și tehnologiei este o componentă a dezvoltării domeniului respectiv.

În prezent, structurile cu pereți subțiri sunt luate în considerare pentru a înlocui progresiv componentele metalice grele, datorită avantajelor lor, cum ar fi raportul dintre rezistența ridicată și greutatea mică. Belingardi în lucrarea sa [8] scoate în evidență proiectarea unei structuri de sacrificiu pentru un automobil de curse. Această structură a fost dotată cu un declanșator care constă într-o reducere progresivă a grosimii peretelui pentru a reduce secțiunea de rezistență locală. Structurile de sacrificiu sunt definite ca fiind tuburi cu profil închis, noțiunea de tub fiind generic folosită. Tehnologia modernă a evoluat, iar acum structurile au profile complexe adaptate cerințelor variate. Pentru dezvoltarea unei structuri sau a unui produs nou trebuie avut în vedere următoarele aspecte: cercetare și marketing, analiza costurilor, dezvoltarea produsului, stabilirea tehnologiei și modalității de lucru, fabricarea și comercializarea produsului iar în ultimă fază lansarea produsului.

Literatura de specialitate prezintă o gamă largă de modele în acest sens, dar ca referință comună se utilizează structura de tub cu secțiune circulară. Pe baza literaturii disponibile, au fost identificate trei moduri principale de cedare (simetric, asimetric și mixt). Studiile legate de structurile cu pereți subțiri cu secțiune circulară sub sarcină axială au un puternic istoric în lucrarea lui Guillow (et al.) și a lui Andrews (et al.). Abordarea unui astfel de subiect, necesită însușirea informațiilor publicate și completarea acestora cu informații suplimentare pentru un alt tip de material, rezultatele obținute fiind corelate cu limitele din studiile existente. Cercetarea este orientată către structuri a căror înălțime este corelată cu structuri utilizate în industria automobilelor.

Motivația cercetării

Prezenta teză de doctorat cu titlul *Studii și cercetări privind îmbunătățirea performanțelor structurilor cu pereți subțiri și utilizarea acestora ca dispozitive de siguranță pentru automobile* a fost creionată plecând de la ideea identificării proprietății materialelor din categoria structurilor tubulare și materialelor cu structură celulară care, integrate în structura portantă a autovehiculelor, sunt capabile, în cazul unui impact frontal sau lateral, să asigure prin cantitatea mare de energie consumată, menținerea parametrilor biomecanici ai corpului omenesc în limitele impuse de cadrul legislativ din domeniu. Plecând de la această idee și cercetând informațiile din literatura de specialitate se constată că subiectul este de mare interes, iar metodele de a face o structură mai eficientă sunt multiple.

Lucrarea de doctorat este structurată în patru capitole la care se adaugă un capitol cu concluzii: *Capitolul I* prezintă stadiul actual de dezvoltare al sistemelor de siguranță activă și pasivă ale automobilelor, precum și modul în care fiecare dintre acestea conduc la optimizarea concepției automobilului, în ceea ce privește siguranța pasivă.

Capitolul II cuprinde stadiul actual al cercetărilor și studiilor experimentale realizate până în prezent privind comprimarea axială a structurilor cu pereți subțiri. Au fost cercetate structurile cu secțiune circulară, pătrată, structuri multi-celulare sau cu diferite forme. În același timp au fost studiate și materialele din care structurile au fost realizate dar și materialele care au fost introduse în interiorul acestora în vederea obținerii unor performanțe ridicate în urma testării. Capitolul II se încheie prin prezentarea parametrilor de performanță a structurilor cu pereți subțiri.

Capitolul III descrie studiile practice și analiza rezultatelor pentru structurile cu secțiune circulară. În prima parte a capitolului este prezentată analiza clasificării modurilor de cedare în cazul tuburilor cu secțiune circulară, urmată de analiza rezultatelor teoretice și experimentale ale tuburilor cu secțiune transversală circulară cu sectoare de diferite diametre.

Capitolul IV prezintă studii practice și analiza rezultatelor pentru structurile auxetice. În prima parte se prezintă modelul teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale, iar în final este prezentată analiza teoretică, rezultatele experimentale a structurii 3D tetra-anti-chirale și a structurilor de secțiune circulară sub sarcină axială.

Teza de doctorat se încheie prin prezentarea *Capitolului V* ce descrie concluziile generale și contribuțiile originale, urmate de câteva direcții viitoare de cercetare orientative, iar la final se regăsesc referințele bibliografice și anexele.

Obiectivul principal

Principalul obiectiv al tezei de doctorat este reprezentat de identificarea unor structuri tubulare sau materiale cu structură celulară care se pretează a fi incluse în sistemul de siguranță pasivă ale automobilului la impact.

Al doilea obiectiv al tezei, de importanță deosebită, este reprezentat de acumularea informațiilor, astfel încât studiile atât teoretice cât și studiile experimentale publicate până în prezent să fie înțelese pentru a identifica o metodă inovativă în cazul unei structuri de secțiune circulară, în vederea consumării unei mari cantități de energie în cazul unei coliziuni. Tuburile de secțiune circulară, pot fi utilizate ca dispozitive pentru creșterea performanțelor structurilor cu pereți subțiri și a siguranței pasagerilor. În același timp se va ține cont și de faptul că în prezent tendința actuală este de a minimiza costurile autovehiculelor, ceea ce înseamnă utilizarea materialelor cu proprietăți specifice. Numărul mare de autovehicule nu înseamnă doar o poluare totală în ceea ce privește noxele acestora, ci și materialele din care este realizat automobilul.

În industria de automobile se impune un grad minim de risc pentru pasagerii autovehiculului cât și pentru ceilalți participanți la trafic. Prin urmare, în sfera circulației întâlnim omul, autovehiculul, calea de rulare, componența și volumul fluxurilor de trafic și viteza de rulare. Principalele sisteme de siguranță activă pot fi reprezentate prin îmbunătățirea sistemelor de direcție, de frânare, de semnalizare și nu în ultimul rând de iluminare. Pentru siguranța activă putem enumera și parametrii dinamici care influențează în mod direct siguranța circulației prin evitarea producerii accidentelor, precum spațiul și timpul minim de demarare, capacitatea maximă de accelerare în timpul efectuării depășirilor, capacitatea de a frâna pe un spațiu cât mai mic, capacitatea de a controla viteza de deplasare.

În cazul producerii unui accident, atât pasagerii cât și conducătorul auto sunt aruncați înainte datorită inerției. Cele mai frecvente sunt rănilor din zona capului, a gâtului și din zona pieptului. Pentru a atenua și a proteja pasagerii, autovehiculele au fost dotate cu airbag-uri și dispozitive de întindere (pretensionare) a centurii de siguranță.

CAPITOLUL 1 – Cerințele de securitate ale autovehiculului

1.1. Siguranța circulației

Securitatea rutieră are ca scopuri principale sesizarea, identificarea, modelarea și cunoașterea factorilor care contribuie la evitarea producerii accidentelor de circulație rutieră sau, atunci când accidentul totuși s-a produs, de diminuare a consecințelor acestuia.

Siguranța circulației este definită ca posibilitatea de deplasare rapidă și sigură cu autovehiculul, fără pierderea stabilității de mers pe traiectoria comandată de conducător și fără coliziuni care să provoace rănirea ocupanților și/sau a celorlalți participanți la trafic sau stânenirea circulației normale a celorlalte vehicule rutiere, în toate condițiile previzibile de trafic. De asemenea, în cazul producerii unui accident de circulație, se impune un grad minim de risc pentru pasagerii autovehiculului, precum și pentru ceilalți participanți la trafic. Definită astfel, sfera circulației include următorii factori: omul, autovehiculul, calea rutieră, componenta și volumul fluxurilor de trafic, precum și viteza de deplasare.

Corespunzător acestor grupuri de măsuri, se deosebesc două tipuri de siguranță a circulației:

- ✓ Siguranța pasivă;
- ✓ Siguranța activă.

Prin urmare măsurile de siguranță pasivă au ca scop optimizarea caracteristicilor autovehiculului în scopul eliminării sau micșorării consecințelor accidentelor de circulație, chiar în timpul producerii acestora.

1.2. Siguranța activă

Siguranța activă este reprezentată de sistemele inteligente integrate în structura autovehiculelor cu scopul de a monitoriza starea autovehiculului și care ajută conducătorul autovehiculului să evite sau să minimizeze efectul unei coliziuni oferindu-i acestuia mai mult control în cazul unei situații critice.

1.3. Siguranța pasivă

Siguranța pasivă ajută atât șoferii cât și pasagerii autovehiculelor să rămână în viață în cazul unui accident. Cele mai importante aspecte în cazul unei coliziuni dintre un autovehicul și un pieton, biciclist sau motociclist îl reprezintă:

- Forma autovehiculului;
- Comportamentul la deformare a caroseriei.

Pentru pasagerii aflați în interiorul autovehiculului, se urmărește minimizarea forțelor și accelerațiilor care acționează asupra lor în cazul unui accident.

O altă lucrare contribuie prin diferite abordări în scopul optimizării structurilor de sacrificiu montate pe autovehicule, cu proprietatea de a absorbi energia [9], iar în figura 1.2 identificăm componentele care consumă o mare cantitate de energie în urma unui impact.

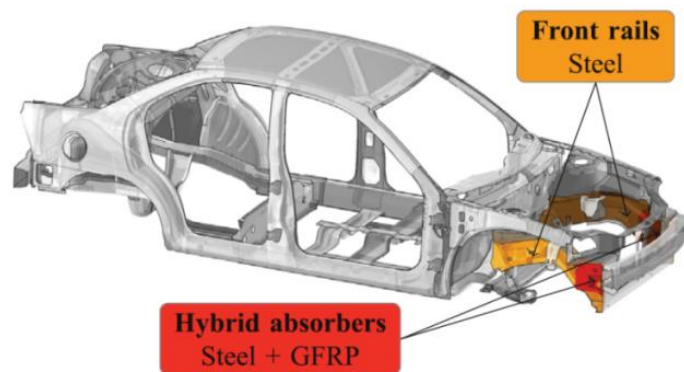


Figura 1.2. Amplasarea componentelor absorbante de energie într-o structură auto [9]

Pentru o absorbție cât mai mare a energiei cinetice, structurile de sacrificiu trebuie să se deformeze simetric / asimetric evitând astfel flambajul. Comprimarea axială a structurii reprezintă absorbția energiei cinetice care este consumată prin deformarea plastică a structurii de sacrificiu. Structurile de sacrificiu sunt considerate ca fiind cele mai importante elemente în cazul unui impact datorită preluării și atenuării șocurilor.

1.4. Concluzii

Securitatea rutieră urmărește sesizarea, cunoașterea și modelarea factorilor care concură la evitarea producerii accidentelor de circulație rutieră sau, în extremis, la diminuarea consecințelor acestor accidente.

Siguranța circulației privită prin elementele de securitate ale autovehiculului se realizează prin două mari grupe de măsuri:

- *măsuri de securitate activă*, care urmăresc îmbunătățirea calităților autovehiculelor referitoare la evitarea producerii accidentelor;
- *măsuri de securitate pasivă*, care au în vedere diminuarea consecințelor accidentelor de circulație.

În general securitatea activă se obține prin realizarea cu fiabilitate maximă a sistemelor de direcție, de frânare, de rulare, de semnalizare și iluminare. Timpul minim de demarare, capacitatea maximă de accelerare în timpul efectuării depășirilor precum și capacitatea de a frâna pe un spațiu cât mai mic sunt parametrii dinamici care influențează, în mod deosebit, siguranța circulației rutiere prin evitarea producerii accidentelor.

Securitatea pasivă a autovehiculelor, care urmărește diminuarea efectelor accidentelor, chiar în timpul producerii acestora, este exprimată prin concepția unor structuri de securitate a autovehiculelor, a unor sisteme de reținere optime pentru ocupanții autovehiculelor, măsuri de protecție pentru bicicliștii și pietonii loviți, precum și măsuri de siguranță pentru perioada de după accident.

În scopul protecției interioare pentru pasager, la autovehicule au fost aduse o serie de îmbunătățiri atât caroseriei cât și altor sisteme de protejare a ocupanților. Astfel, celula pasagerilor (habitaclul) trebuie construită rigid, astfel încât să asigure spațiu de supraviețuire în cazul unor coliziuni. În schimb structurile care înconjoară habitaclul se construiesc astfel încât să poată prelua o cantitate de lucru mecanic de deformare cât mai mare.

Urmărind tendințele actuale, conform cărora optimizarea răspunsului structural al componentelor autovehiculelor se realizează avându-se în vedere parametrii biomecanici ai corpului

omenesc, dezvoltarea unor programe de studiu specializate, permise de evoluția și îmbunătățirea continuă a performanțelor de calcul numeric, asigură:

- determinarea unor caracteristici fizice și constructive necesare proiectului atunci când sunt impuse rezultatele finale;
- evaluarea ansamblului folosindu-se rezultatele experimentale pentru o serie de elemente de caroseriei;
- să se decidă asupra anumitor soluții constructive bazat pe evaluarea globală a ansamblului.

CAPITOLUL 2 – Comprimarea axială a tuburilor cu pereți subțiri

2.1. Studii realizate privind tuburile de secțiune circulară cu pereți subțiri

Ideea de bază în abordarea prezentei teze de doctorat cu titlul *Studii și cercetări privind îmbunătățirea performanțelor structurilor cu pereți subțiri și utilizarea acestora ca dispozitive de siguranță pentru automobile* o reprezintă în principal, cercetările realizate în cadrul Universității din Pitești [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. În fapt, subiectul tezei are la bază cercetări începând cu anul 1959, când a fost publicată prima lucrare a lui Alexander, în care au fost realizate studii privind proiectarea reactoarelor nucleare cu rezervoare verticale de combustibil [18] în care se face referire la structurile tubulare supuse la solicitări mecanice axiale. Studiul, care viza diminuarea efectelor produse de o eventuală cădere a unor corpuri grele în rezervoarele verticale de combustibil, care conțineau tije de control ale reactoarelor, urmărea identificarea de dispozitive de absorbție a energiei rezultată din căderea accidentală a unor greutăți. Dispozitivele de absorbție studiate sunt de forma unui tub cu pereți subțiri, care au capacitatea de a se deforma longitudinal atunci când sunt supuse unui impact axial. Se poate considera că a fost primul model de calcul care a fost dezvoltat pentru tuburi de secțiune circulară dezvoltând articulații plastice.

În figura 2.1 este descris mecanismul de deformare a unei structuri de secțiune circulară.

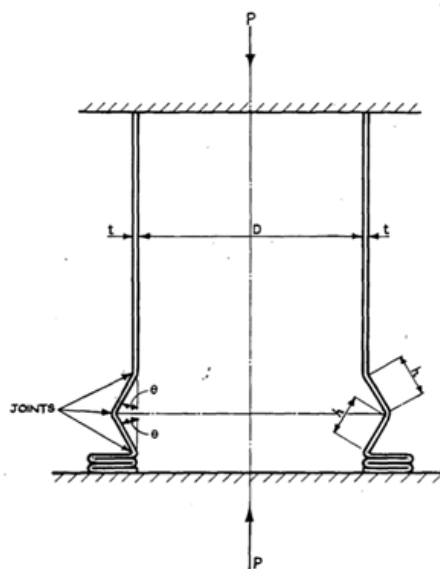


Figura 2.1 Mecanismul de deformare [18]

Deformarea tubului de secțiune circulară presupune două etape, prima reprezentând îndoirea la îmbinările circulare, iar a doua fiind reprezentată de întinderea materialului între îmbinări. Există două moduri reale de deformare ale structurilor și anume deformări simetrice (concertina) sau asimetrice (diamond) [18].

Deformările prin comprimare axială a tuburilor cu secțiune circulară sub încărcare cvasi-statică sunt structurate în:

- deformări simetrice secvențiale;
- deformări asimetrice secvențiale;
- euler;
- simetrice și asimetrice;

- simultan simetrice;
- simultan asimetrice;
- înclinarea axei tubului.

Curba generică caracteristică unui material (figura 2.3), reprezintă dependența dintre mărimile σ, ε și este caracteristică fiecărui material oferind informații privind proprietățile acestuia. Punctul O corespunde situației inițiale, unde tensiunea ($\sigma = 0$) și deformația ($\varepsilon = 0$) lipsesc. În prima parte a curbei, atât tensiunea cât și deformația cresc simultan, însă observăm o creștere mai accentuată a tensiunii. Punctul A corespunde limitei de proporționalitate a materialului. Punctul B reprezintă zona în care materialul se comportă perfect elastic și are capacitatea de a reveni la forma inițială, fiind denumită limită de elasticitate. Începând cu punctul C observăm o creștere a deformației fără ca forța să înregistreze creșteri semnificative. Această zonă definește intrarea în zona deformării plastice a materialului purtând denumirea de zonă de curgere. Urmează o zonă de creștere fără proporționalitate între tensiune și deformație, în care se va determina punctul D ca fiind limita de rupere sau rezistența la rupere. În continuare se vor prezenta zonele de deformare:

- zona liniară (deformare elastică) pentru deformațiile mici;
- zona de curgere (tensiune constantă – deformare plastică);
- zona de ecrusare (deformare plastică).

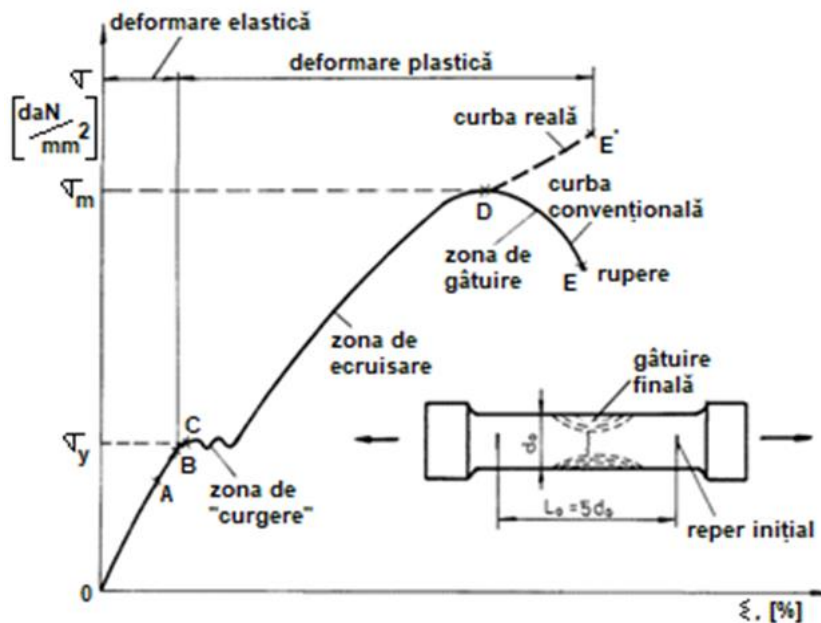


Figura 2.3 Curba generică caracteristică unui material

Comparând două moduri de comprimare, prima fiind laterală asupra unui tub, iar a doua fiind axială, se observă modul de flambaj axial care are o capacitate de absorbție de aproximativ 10 ori mai mare față de comprimarea laterală. Absorbția de energie este obținută din flambajul progresiv.

Revenind la figura 2.1 care simbolizează un model generic de comprimare pentru tuburi de secțiune circulară sau pătrată, putem afirma că energia de realizare a unui pliu este consumată de două mecanisme după cum urmează:

$$E_{fold} = E_b + E_m \quad (2.2)$$

E_{fold} – energia totală;

E_b – energia de încovoiere consumată de-a lungul articulațiilor plastice ($\sigma = \sigma_0$);

E_m – energia deformării membranei care ține cont de evoluția formei structurii inițiale (prin comprimare sau întindere) la forma finală.

Comportamentul tuburilor metalice cu pereți subțiri a fost cercetat mulți ani datorită faptului că sunt frecvent utilizate ca absorbante de energie în cazul unui impact. În figura 2.7 este prezentată curba forță – deplasare pentru o structură de secțiune circulară supusă unei sarcini cvasi-statice aplicată axial.

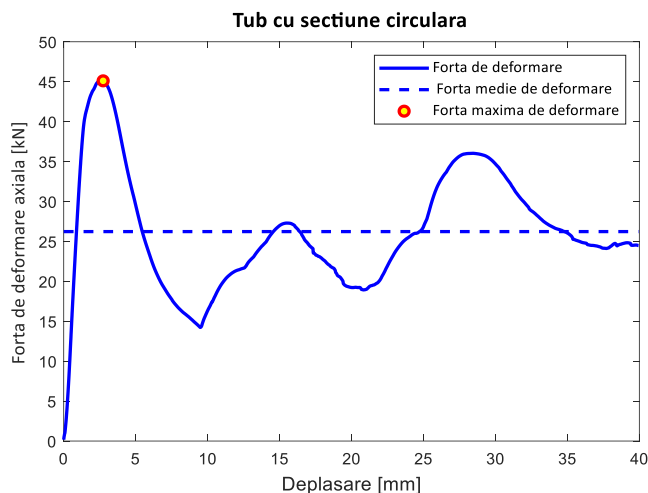


Figura 2.7 Curba tipică forță-deplasare pentru un tub metallic cu pereți subțiri supus unei sarcini axiale deformat progresiv

A fost cercetat și modul de proiectare al unor structuri simple realizate din materiale diferite. Prima structură a fost realizată dintr-un material care în domeniul plastic se comportă precum un oțel moale, în timp ce materialul pentru a doua structură se întărește când este deformat plastic și corespunde multor aliaje de aluminiu. Formula lui Perry – Robertson este capabilă să ofere o bună aproximare a sarcinilor aplicate, în cazul structurilor lungi și subțiri la apariția flambajului [33]. În situația actuală se studiază în principal structurile realizate din aliaje de aluminiu care scot în evidență două aspecte importante. Primul aspect prezintă curbe pentru structuri imperfecte realizate din aliaje de aluminiu, în timp ce pentru al doilea aspect nu se cunosc niciodată detalii despre forma curbei de tensiune – deformare [33]. Debutul secolului XX, este reprezentat de o lucrare a lui Alghamdi [21] care descrie ideile cercetate până la acel moment. Studiul contribuie la o bună înțelegere a modurilor de disipare a energiei și a modurilor de cedare a structurilor în timpul impactului.

În literatura de specialitate, se realizează și o clasificare a secțiunilor de tub care s-au studiat până în prezent, specificând modificările geometrice, sarcinile aplicate asupra tuburilor și condițiile de umplere [39].

2.2. Studii realizate privind tuburile de secțiune pătrată cu pereți subțiri

În construcția actuală a autovehiculelor, în tendința de a asigura un nivel ridicat de protecție, autovehiculele sunt dotate cu diverse sisteme auxiliare instalate la bord. Pentru ca aceste sisteme să fie implementate în construcția de ansamblu a autovehiculului, inginerii structuriști au căutat diverse alternative pentru a reduce greutatea autovehiculului dar în același timp de a păstra sau îmbunătăți elementele de rigidizare și structurale la eventuale deformații. Ori, în această tendință atenția oamenilor de știință este îndreptată către structurile cu pereți subțiri mai ales când se discută despre rezistență la impact în cazul unui accident. Aceste structuri scot în evidență capacitatea mare de

absorbție a energiei la un eventual impact pentru o masă redusă, fiind o soluție bună când masa structurii este critică.

În literatura de specialitate sunt identificate câteva caracteristici ale procesului de deformare a structurilor cu pereți subțiri. Metoda cinematică generalizată pentru problemele deformațiilor mari în identificarea unei soluții cinematice, cu cel puțin trei grade de libertate în jurul unui mecanism de pliere cu un grad de libertate. Datorită faptului că un tub dreptunghiular are patru pereți care se vor deforma, disiparea energiei va fi calculată pentru un singur perete, urmând să se înmulțească cu cei patru pereți ai structurii.

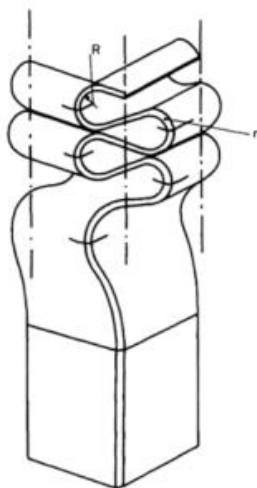


Figura 2.13 Vederea unei structuri pătrate parțial comprimate [23]

2.3. Studii realizate privind structurile multi-celulare cu pereți subțiri

Structurile multi-celulare cu pereți subțiri sunt soluții eficiente pentru absorbția de energie în industria constructoare de autovehicule. O soluție foarte bună este reprezentată de raportul dintre capacitatea de absorbție și masa unei structuri, atunci când masa totală a ansamblului este critică. În timpul cedării structurii, energia este consumată prin îndoirea structurii sau prin modificarea formei peretelui.

Au fost realizate studii privind deformarea prin comprimare axială și pe structuri multi-celulare cu două sau trei celule umplute cu spumă. Efectele de interacțiune dintre spumă și peretele structurii contribuie la rezistența deformării structurii cu un procent de 140 – 180% din rezistența directă a spumei pentru celulele duble sau triple. Deformarea prin comprimare axială a spumei de aluminiu a fost studiată numeric și analitic pentru o celulă, pentru celule duble și celule triple. Atenția a fost îndreptată din ce în ce mai mult către structurile solide celulare precum spuma de aluminiu și structurile de tip fagure utilizate în rigidizarea structurilor cu pereți subțiri.

Deformarea prin comprimare axială a structurilor pătrate multi-celulare a fost studiată în anul 2006 pe baza teoriei Super Folding Element care a generat o soluție pentru forța medie de deformare a secțiunilor multi-celulare. Secțiunile multi-celulare (figura 2.15) au fost împărțite în trei zone și anume profilul colț, profilul cruce și profilul în formă de T (figura 2.16). Dintre cele trei profile cel mai eficient este profilul cruce pentru celulele energetice. Se observă de asemenea ca eficiența absorbției de energie a unei celule poate fi crescută cu 50% pentru o structură cu secțiunea împărțită într-un fagure de 3x3 celule. Modurile de cedare sunt diferite, prin urmare un tub se poate deforma simetric, asimetric, mixt sau prin flambajul global. Modul de deformare depinde de lungimea tubului, diametrul

acestui sau grosimea pereților. Pentru tuburile pătrate întâlnim deformare simetrică, asimetrică, extinsă (în afara profilului) sau flambajul global în cazul deformării prin comprimare axială.

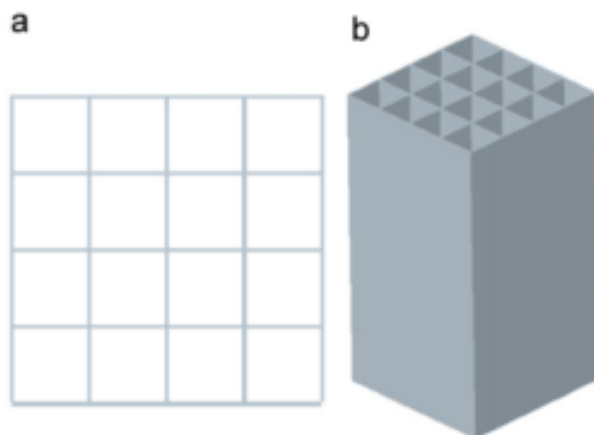


Figura 2.15 Structură pătrată multi-celulară. a) vedere de sus; b) vedere generală [27]

Datorită faptului că nu a existat nici o cercetare relevantă pe acest subiect, sunt studiate experimental și analizate tuburile cu secțiune circulară multi-celulare comprimate axial cvasi-static. Structurile analizate sunt simple, cu celule duble, triple și cu 4 celule. În același timp se testează elementele în formă de T și în formă de cruce. Se constată că stabilitatea și rezistența la deformare a elementelor în formă de cruce este satisfăcătoare deși deformarea este transversală în timpul sarcinii. Așa cum a fost demonstrat și pentru formele poligonale, octogonale, hexagonale, structurile circulare cu secțiune multi-celulară sunt mult mai eficiente în absorbția de energie față de structurile cu o singură celulă. Absorbția de energie specifică este mai mare cu aproximativ 30%.

Pe baza studiilor realizate, a fost dezvoltată o formulă pentru forța medie de deformare, formulă derivată dintre o combinație a modelului de pliere pentru deformări simetrice a tuburilor circulare și modelul simplificat a metodei Super Folding Element.

2.4. Studii realizate privind alte forme ale structurilor cu pereți subțiri

S-au efectuat teste de comprimare axială și pe structuri sub forma trunchiurilor de con din aliaje de aluminiu având grosimi diferite (0,7 – 1,62mm), unghiurile trunchiului de con încadrându-se între (16° – 29°). Structurile s-au deformat atât simetric cât și asimetric. Simularea numerică tridimensională a fost realizată pentru toate probele testate sub încărcare cvasi-statică folosind ANSYS. S-au prezentat de asemenea diferite moduri de cedare a pereților, formarea lobilor pentru deformarea asimetrică, și a fost analizat pentru prima dată materialul și geometria structurii [52].

Se constată că numărul de celule din structura unui tub de secțiune triunghiulară și unghiul la care se aplică forța față de axa verticală a structurii, au un efect important asupra absorbției de energie specifică (SEA) și asupra forței medii de deformare. Se prezintă de asemenea o procedură pentru caracterizarea procesului de deformare a unei structuri celulare obișnuite în condiții de încărcare cvasi-statică. Studiul își propune optimizarea comportamentului la impact a structurilor celulare obișnuite, în condiții de încărcare statică și dinamică. Este de asemenea prezentată o metodologie pentru analiza structurilor celulare diferite fabricate din material de tipul ABSplus. Probele s-au realizat prin procedeul de prototipare rapidă și au fost testate cvasi-static.

Au fost analizate mai multe structuri celulare spre exemplu: structura de tip fagure care a fost inspirată din natură și a fost studiată pe larg în literatura de specialitate, o altă structură având o tipologie modificată, fiind formată la bază de un fagure cu raze între celulele adiacente. În acest caz

structura poate prezenta proprietăți auxetice. O altă structură având o geometrie în formă de spirală cu o asimetrie vizibilă. Mărimea formelor geometrice care formează fagurele, influențează rezultatele pentru fiecare structură celulară. Pentru fiecare tip de structură, cele mai mici valori ale forței au fost obținute pentru forme cât mai mici. Conform cu rezultatele acestui studiu a fost demonstrat faptul că structura fagurelui (figura 2.27) are cele mai bune proprietăți de absorbție a energiei [55].

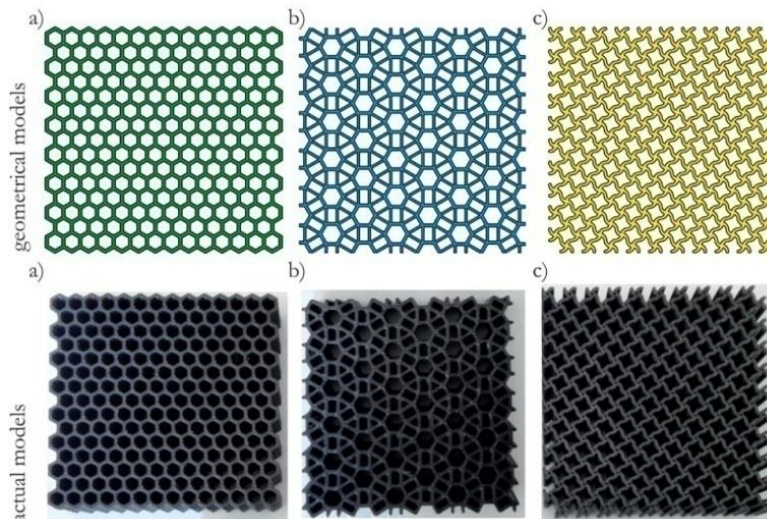


Figura 2.27 Exemple de structuri celulare [55]

În literatura de specialitate este demonstrat că secțiunile transversale închise pot fi definite ca fiind o serie de forme care definesc fie unghiul ascuțit, fie unghiul obtuz sau o combinație a celor două unghiuri. O figură sugestivă este prezentată mai jos, definirea structurii fiind dată de numărul de pliuri (pe cercul circumscris), valorile razei cercului interior și valoarea razei cercului interior [10].

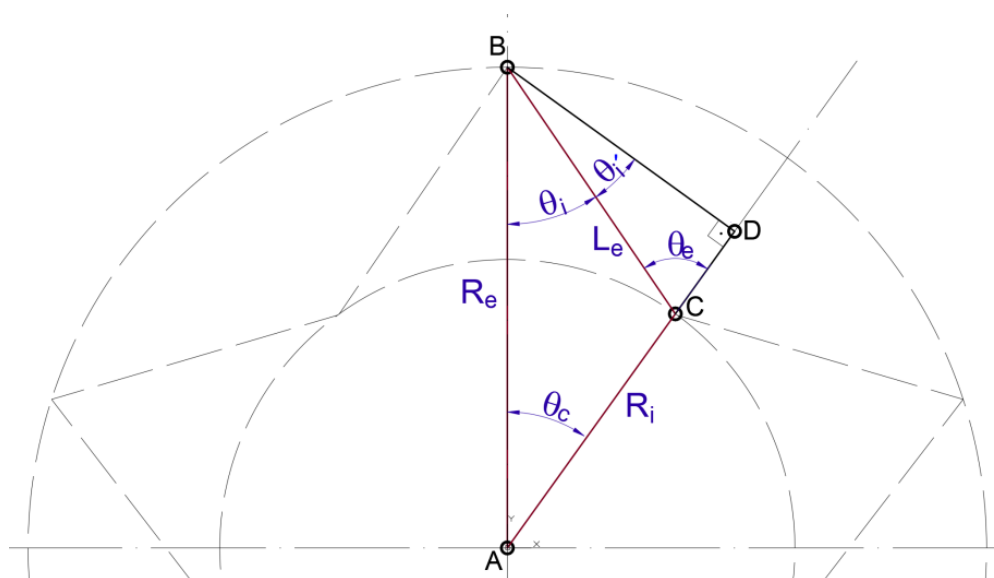


Figura 2.29 Caracteristicile geometrice ale modelului [10]

2.5. Studii privind tipurile de materiale ale structurilor

În industria constructoare de autovehicule, tendința este de a se utiliza materiale cu o greutate scăzută, dar în același timp să ofere proprietăți superioare față de materialele convenționale, care se

pot încadra în standardele cerute, dar care au o greutate considerabilă, rezultând astfel o diminuare a greutății autovehiculului, ceea ce va rezulta un consum de combustibil redus și în același timp o scădere a cantității de CO₂ la nivel global în cazul autovehiculelor cu motoare termice. Prin urmare structurile cu pereți subțiri se află în centrul atenției inginerilor structuriști.

O modalitate simplă pentru a obține o structură, indiferent de forma acesteia, se poate realiza prin prototiparea rapidă. De cele mai multe ori aceste structuri care sunt obținute prin prototiparea rapidă sunt umplute cu diverse materiale, spuma de aluminiu fiind frecvent utilizată în astfel de cercetări. În general, spuma descrie o fază gazoasă dispersată într-o fază lichidă care are o vâscozitate suficient de mare pentru a putea reține bulele gazoase [42].

2.6. Parametrii de performanță a structurilor consumatoare de energie

Pe baza studiilor realizate privind rezultatele experimentale, teoretice și numerice, pe diverse tuburi sub încărcare axială, în ultimii ani, au fost propuși un set de indicatori de performanță (KPI – key performance indicator), pentru a evalua și a compara performanța absorbției de energie.

Așa cum se poate observa în figura 2.35, sunt prezentate curba energie – deplasare, randamentul deformării – curba deplasării și curba forță – deplasare pentru un tub de metal cu pereți subțiri supus unei sarcini axiale, care conține trei etape:

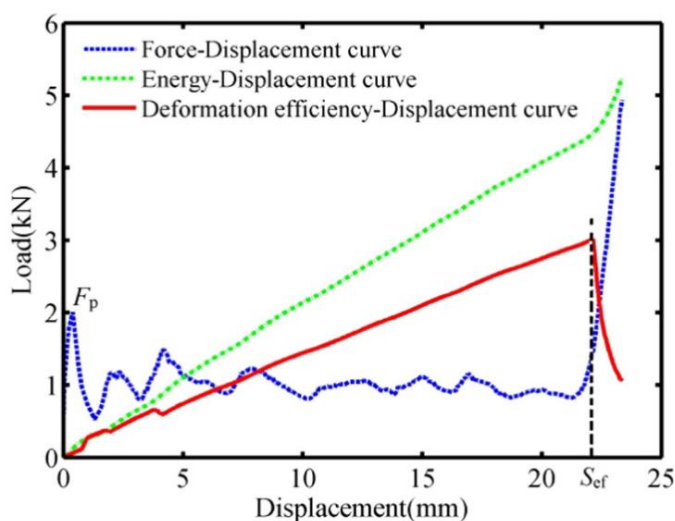


Figura 2.35 Forță – deplasare, energie – deplasare, eficiența deformării – curba deplasării a tubului încărcat axial [71]

- faza flambajului inițial cu o sarcină inițială de vârf F_{max} ;
- faza constantă având o sarcină cu caracteristică fluctuantă în ritm cu flambajul și pliarea progresivă;
- faza deformării (densificării).

Principalii indicatori ai parametrilor de performanță a structurilor consumatoare de energie sunt:

➤ ESR – Effective stroke ratio (raportul cursei efective):

$$ESR = \frac{S_{ef}}{L} \quad (2.91)$$

S_{ef} – cursa efectivă;

L – lungimea totală.

Este un indicator adimensional care caracterizează rata de utilizare efectivă a materialului utilizat în absorbția de energie.

- NLC – Non-dimensional load-carrying capacity (capacitatea de încărcare):

$$NLC = \frac{F_m}{M_0} \quad (2.92)$$

F_m – forța medie de deformare;

M_0 – momentul de încovoiere complet pe unitatea de lungime.

- SEA – Specific energy absorption capacity (capacitatea de absorbție a energiei specifice):

$$SEA = \frac{F_m}{\rho \cdot A} \cdot \frac{S_{ef}}{L} \quad (2.93)$$

$\rho \cdot A \cdot L = G$ – masa totală a tubului.

- EEA – Effectiveness of energy absorption (eficiența energiei de absorbție):

$$EEA = \frac{F_m}{A \cdot Y} \cdot \frac{S_{ef}}{L} \quad (2.94)$$

Y – limita de proporționalitate.

- SLC – Stableness of load-carrying capacity (stabilitatea capacității de încărcare):

$$SLC = \frac{F_m}{F_{max}} \quad (2.95)$$

F_{max} – sarcina maximă inițială (initial peak load);

Indicatorii KPI se pot aplica și în evaluarea altor tipuri de structuri și materiale [72].

Eficiența forței de deformare (CFE – crushing force efficiency) este:

$$CFE = \frac{F_m}{F_{max}} \quad (2.96)$$

Unde:

F_m – este calculată ca $\frac{\int_0^\delta P d\delta}{\delta}$;

P – sarcina (încărcarea);

δ – deformarea.

Discutând de parametrii de performanță, putem afirma că structurile multi-celulare au o absorbție a energiei specifice mai mare în comparație cu structurile simple [73]. Pentru a preveni accidentarea pasagerilor sau rănirea acestora în cazul unei coliziuni (accident), energia cinetică rezultată trebuie să se disipe. Această disipare de energie se poate realiza prin absorbția ei de către structuri care în urma unui impact se deformează. Structurile de forma unor tuburi de secțiune triunghiulară, pătrată, hexagonală și octogonală cu pereți subțiri fabricate din aluminiu au fost supuse unor sarcini cvasi-stactice [73], sarcina aplicându-se într-o perioadă mare de timp, structura deformându-se lent.

Structurile auxetice bazate pe origami kiragami și structurile de secțiune circular sunt de asemenea studiate în principal în aplicațiile multifuncționale cum ar fi absorbția de energie în cazul unui impact, progresul deformației [95], [96], [97], [98].

Clasificarea metamaterialelor mecanice auxetice artificial este prezentată mai jos:

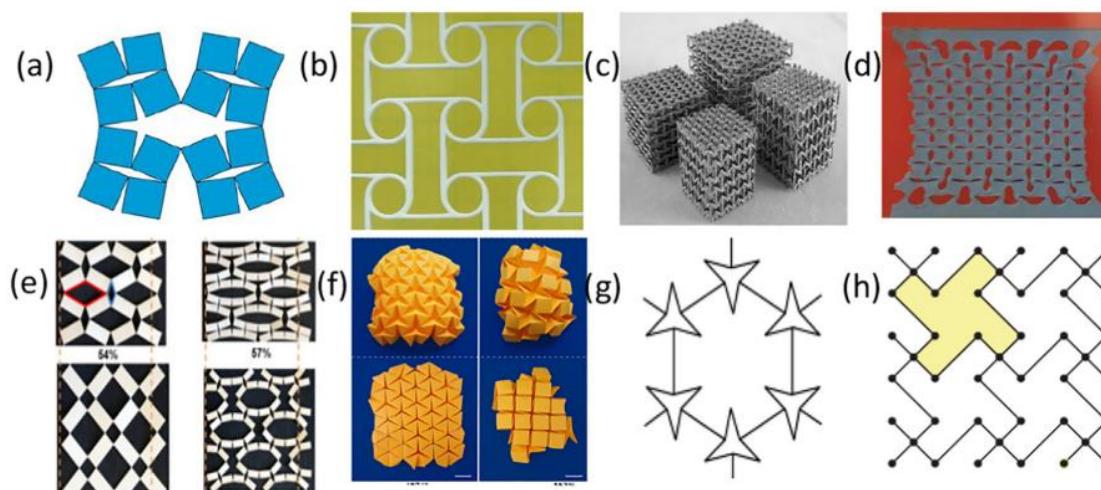


Figura 2.36 Clasificarea auxeticilor [7]. a) Rotația nodului rigid [99] ; b) anti-tetrachiral [100]; c) structura re-entrant [101]; d) Instabilitate elastică [86]; e) tăierea fractală kirigami [102]; f) origami [103]; g) forma stea [104]; h) modelul lipsă nervură [104]

Au fost studiate și structurile auxetice, anti-tetrachirale proiectate ca tuburi supuse deformării axiale [105]. Cercetări au fost realizate și pentru structurile anti-trichirale 2D triunghiulare supuse unei forțe axiale [106]

2.7. Concluzii

Legat de obiectivele tezei și în contextul preocupărilor din ultimele două decenii, când industria automobilelor în ansamblu a pus un accent mai mare pe cercetarea și dezvoltarea în materie de siguranță atenția este îndreptată spre identificarea unor materiale cu proprietăți ridicate de absorbție a energiei impactului și care pot fi înglobate în construcția de ansamblu a automobilului, după direcțiile probabile de impact și anume impact frontal și impact lateral.

În contextul amintit, s-a urmărit identificarea unor materiale caracterizate de greutate specifică redusă și cu proprietăți mecanice ridicate, care integrate în construcția automobilelor reprezintă o soluție viabilă pentru absorbția energiei mecanice a impactului, cu consecințe minime asupra automobilului și ocupanților din automobil.

O primă categorie de astfel de materiale investigate sunt cele din categoria tuburilor cu pereți subțiri, caracterizate de capacitatea de a se deforma longitudinal când sunt supuse unui impact axial. Din primul model abordat prin studiul bibliografic prezentat, pentru tuburi cu secțiune circulară, dezvoltând articulații plastice, se constată că deformarea tubului cu secțiune circulară presupune două etape, prima presupunând îndoirea la îmbinările circulare și a doua întinderea materialului între îmbinări. Din compararea modurilor de comprimare, se constată că modul de flambaj axial progresiv are o capacitate de absorbție de aproximativ 10 ori mai mare față de comprimarea laterală.

Analiza tuburilor cu pereți subțiri prin metoda elementelor finite, evidențiază faptul că învelișul structurii supus unui impact axial este sensibil atât la viteză cât și la masă, în sensurile că la viteze mari și mici, energiile sunt absorbite de învelișul structurii.

Capacitatea structurilor tubulare de a absorbi energia, de a reacționa la impact și de a reduce riscul de accidente este dependentă de formă geometrică a tubului cu pereți subțiri și de modul în care acesta este supus acțiunii dinamice a sarcinii.

Pentru structurile pătrate cu pereți subțiri din oțel ductil, studiul bibliografic arată că deformările plastice care depășesc valorile corespunzătoare flambajului sunt limitate la zone relativ mici, caz în

care energia totală disipată reprezintă o treime în zonele deformațiilor exterioare și două treimi din deformările interioare. În cazul introducerii unor modele pe suprafața tuburilor pătrate studiile experimentale au constatat că față de tuburile convenționale, energia absorbită în cazul tuburilor cu modele a crescut, în funcție de tipul modelului până la 53...93%.

Pentru structurile multi-celulare cu pereți subțiri, caracterizate de masă relativ redusă și capacitate mare de absorbție a energiei, cercetările bibliografice au evidențiat că în cazul structurilor cu două sau cu trei celule umplute cu spumă, prin efectele de interacțiune dintre spumă și pereții structurii, eficiența absorbției energiei crește cu până la 140...180%. Îmbunătățirea capacității forței de deformare a structurilor se poate realiza prin introducerea unei geometrii care creează o interacțiune între pereții interiori și cei exteriori, sens în care din cercetări a rezultat că pentru structura cu muchii (MR), în raport cu structura cu pereți dubli (DW), cu aceeași grosime a peretelui, forța medie de deformare este în primul profil (MR), cu aproximativ 240% mai mare decât în cel de-al doilea profil (DW).

Simularea numerică tridimensională pentru tuburi cu pereți subțiri de forme diferite, a evidențiat diferențe relativ reduse pentru energia absorbită pentru deformare, în limita a circa 8%, valorile minime fiind pentru tuburile cu profil triunghiular, crescătoare prin creșterea numărului de laturi.

Pentru structurile celulare, din studiile efectuate pentru diverse forme de bază comparativ cu structura în formă de spirală, se constată că structura fagure care este inspirată din natură, are cele mai bune proprietăți de absorbție a energiei.

CAPITOLUL 3 – Studii practice și analiza rezultatelor pentru structurile cu secțiune circulară

3.1. Analiza clasificării modurilor de cedare în cazul tuburilor cu secțiune circulară

Conform concepțiilor științifice moderne, pentru caracterizarea unui material este necesară luarea în considerare a unui ansamblu de proprietăți comune, reprezentative precum și a criteriilor structurale. Cunoașterea exactă a proprietății materialelor metalice: fizice, chimice, magnetice, mecanice și de prelucrabilitate este necesară inginerilor proiectanți în procesul de alegere a materialului optim pentru o anumită aplicație practică știut fiind faptul că dimensionarea rațională a elementelor ce alcătuiesc construcțiile ingineresti duce la economii de material și de energie pe tot parcursul duratei de existență a unui produs, prin urmare, la eficiență și competitivitate.

Pornind de la Alexander [18], oamenii de știință au continuat cercetările privind structurile cu pereți subțiri supuse sarcinilor axiale. În conformitate cu literatura de specialitate unde sunt prezentați parametrii geometrici, precum raportul $\frac{D}{t}$ și $\frac{L}{D}$ unde D (diametru), t (grosimea peretelui structurii), L (lungimea), identificăm trei tipuri principale ale modului de cedare:

- Modul simetric (axi-symmetric / concertina) – pliurile sunt similare;
- Modul asimetric (non-symmetric / diamond) – pliurile au un număr diferit de lobi circumferențiali;
- Modul mixt (concertina + diamond) – o combinație a celor două moduri prezentate mai sus

Bazele subiectului, privind structurile cu pereți subțiri, au fost puse în anul 1959 de către Alexander [18], care a dezvoltat modelul de cedare a tuburilor cu secțiune circulară cu pereți subțiri. Alexander a derivat primul set de ecuații pentru a prezice parametrii de deformare. Acești parametri au fost cercetați de Abramowicz și Jones [20], Wierzbicki și Abramowicz [28], Hayduk și Wierzbicki [61], care au studiat structurile dreptunghiulare cu pereți subțiri.

3.1.1. Procedura experimentală

În lucrarea sa Alexander [18] a propus un model simplu de deformare prin comprimare axială, bazat pe experimentele realizate pe tuburi metalice.

Materialul structurilor cu pereți subțiri cu secțiune circulară pe care se vor efectua testele este aluminiu dar nu se cunoaște tipul de aluminiu. Se va utiliza pentru testarea experimentală tuburi cu diferite lungimi și diferite grosimi ale pereților. Înălțimea tuburilor este 60mm, 80mm și 100mm, iar grosimea peretelui structurii este 0,9mm, 1,2mm respectiv 1,5mm (figura 3.2).

Tabel 3.1. Detaliile testării tuburilor cu secțiune circulară sub sarcină axială [109]

Nr. Crt.	Lungime L [mm]	Diametrul exterior D [mm]	Grosimea peretelui t [mm]	$\frac{D}{t}$	$\frac{L}{D}$	F_{max} [kN]	R_m [MPa]
1.	60	27.8	0.9	30.8	2.1	26.14	344
2.	60	28.4	1.2	23.6	2.1	44.91	438
3.	60	29	1.5	19.3	2.0	45.11	348
4.	80	35.8	0.9	39.7	2.2	19.55	198
5.	80	36.5	1.2	30.4	2.1	30.56	230
6.	80	37	1.5	24.6	2.1	42.74	255
7.	100	27.8	0.9	30.8	3.5	25.82	339
8.	100	28.4	1.2	23.6	3.5	34.80	339

9.	100	29	1.5	19.3	3.4	47.45	366
10.	60	40	1.23	32.5	1.5	-	-
11.	80	39	0.9	43.3	2.0	-	-
12.	40	27.8	0.9	30.8	1.4	26.81	268

Fiecare tub a fost marcat cu o linie orizontală care reprezintă 60% din înălțimea tubului, semnificând zona până unde echipamentul de testare poate deforma structura în cazul unei deformări simetrice. În cazul în care structura începe să se deformeze asimetric, atunci echipamentul de testare este oprit înainte să ajungă la limita impusă. În același timp probele sunt marcate și cu un număr reprezentând numărul de ordine.



Figura 3.2 Probe cu diferite înălțimi [109]

Tuburile pentru testele experimentale au fost fabricate dintr-o țeavă din aliaj de aluminiu, care a fost ulterior prelucrată prin debitare și strunjire. Testarea a fost realizată în condiții cvasi-statice sub sarcină axială. În urma prelucrării structurilor prin debitare și strunjire, din restul de țeavă rămas s-au realizat și mărci tensiometrice în vederea identificării tipului de aliaj de aluminiu. Informațiile referitoare la tipul și proprietățile aliajului de aluminiu au fost obținute prin testarea la tracțiune și prin analiza XRF a mărcilor tensiometrice.

Testele s-au realizat pe o mașină de testare universală (figura 3.3), controlată electronic de un micro-computer care este capabilă să dezvolte o viteză de deplasare de 500 mm/min în timp ce datele sunt înregistrate la 1000 Hz [110]. Echipamentul de testare împreună cu o cameră digitală Nikon dotată cu lentile speciale sunt conectate la o unitate de calcul în vederea prelucrării informațiilor. Toate informațiile sunt prelucrate cu ajutorul Matlab.



Figura 3.3 Echipament de testare universal [109]

3.1.2. Rezultate și discuții

În vederea obținerii unor rezultate cât mai corecte pentru experimente au fost alese trei seturi de date cu lungimi bine definite și un set de date cu lungimi diferite și grosimi ale peretelui diferite după cum urmează:

- Primul set de date cu tuburi de lungime $60mm$ cu o grosime a peretelui de $0,9mm$, $1,2mm$ respectiv $1,5mm$;
- Al doilea set de date cu tuburi de lungime $80mm$ cu o grosime a peretelui de $0,9mm$, $1,2mm$ respectiv $1,5mm$;
- Al treilea set de date cu tuburi de lungime $100mm$ cu o grosime a peretelui de $0,9mm$, $1,2mm$ respectiv $1,5mm$;
- Al patrulea set de date cu tuburi de lungimi diferite și grosimi ale peretelui diferite.

Pentru început se vor prezenta datele experimentale pentru tubul cu secțiune circulară $L = 60mm$, $D = 27,8mm$ cu o grosime a peretelui de $0,9mm$. Graficul din figura 3.4 arată că forța maximă de deformare $F_{max} = 26,14 kN$ (PCF – peak crushing force), iar cu o linie discontinuă este marcată forța medie de deformare MCF (mean crushing force) care este $12,59 kN$. Din datele experimentale se poate observa că tubul sub sarcină axială generează o serie de pliuri (lobi circumferențiali) în cazul deformării asimetrice așa cum a fost prezentat în figura 2.8.

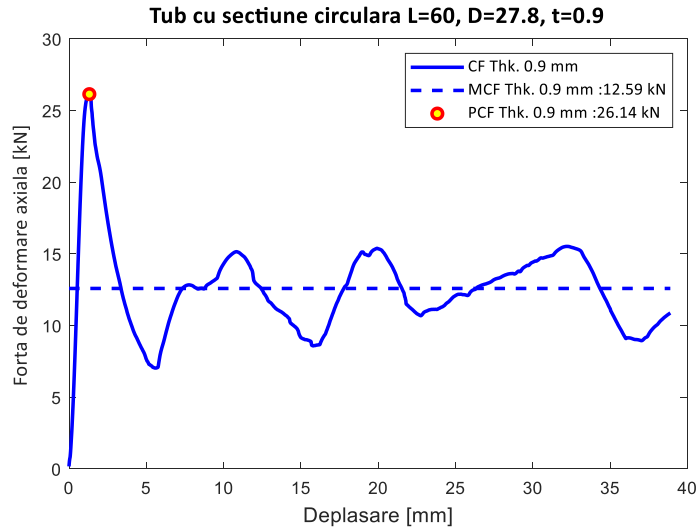


Figura 3.4 Curba forță-deplasare pentru o structură mică $L = 60\text{mm}$; $t = 0,9\text{mm}$ [109]

Figura 3.4 a fost obținută cu ajutorul aplicației 3.1 în care observăm că inițial se încarcă fișierele .dat generate de echipamentul de testare, după care se inițiază procedura de căutare a valorii maxime. În urma acestor etape se creează un vector nou în care se copiază valorile pentru identificarea forței medii de deformare.



Figura 3.5 Primul specimen (înainte și după comprimare) supus unei sarcini axiale [109]

Aceste pliuri apar doar în modul de cedare asimetric. Se poate observa că dacă raportul $\frac{D}{t}$ este mare, atunci numărul de pliuri este în creștere. Dacă raportul $\frac{D}{t}$ este mai mare de 200, atunci numărul pliurilor poate varia de la $3 \div 5$ dar în anumite cazuri pliurile nu sunt formate complet.

Dimensiunile tubului (L -lungime și t -grosimea peretelui structurii) au fost selectate în vederea obținerii unui mod de cedare simetric, asimetric sau mixt luând în considerare criteriile definite de către Andrew [108] și Guillo [31].

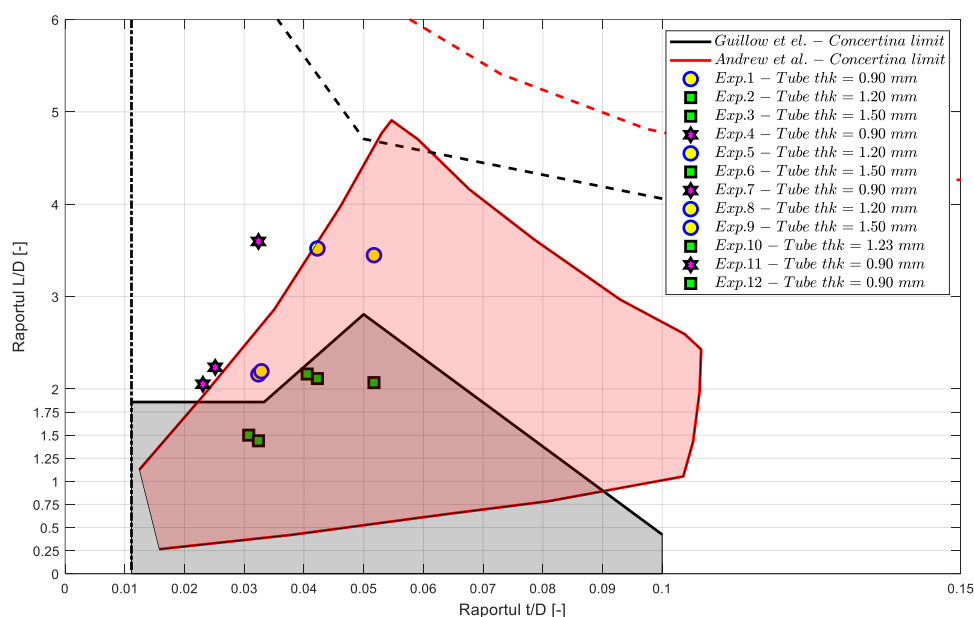


Figura 3.12 Diagrama modului de cedare și soluțiile experimentelor [109]

Diagrama 3.12 a fost prezentată într-o lucrare intitulată *Analysis of the collapse mode classification in case of circular tubes*, contribuție personală, ce va fi prezentată în lista de lucrări. Pornind de la limitele deformării simetrice a structurilor stabilite de Guillow și colaboratorii [31] săi și limitele identificate de Andrew și colaboratorii [108] săi pentru un set finit de materiale, a fost actualizată diagrama 3.12 cu valori noi a unor tipuri de aliaj de aluminiu. Structurile care s-au încadrat în limitele stabilite de Guillow [31] au fost marcate pe diagramă cu un pătrat de culoare verde, iar structurile care s-au încadrat în limitele impuse de Andrew [108] au fost marcate pe diagramă cu un cerc de culoare galbenă. Structurile marcate cu stelute apar în afara zonelor cercetate, ceea ce înseamnă că plaja de valori a limitelor deformării simetrice poate fi mărită în funcție de tipul de material. În figura 3.13 sunt prezentate două din cele trei structuri marcate cu stelute pe diagrama 3.12.

În urma testării experimentale, structurile s-au deformat simetric, asimetric și mixt. Deformările asimetrice apar datorită faptului că structurile au fost obținute prin debitare și strunjire, iar în urma prelucrărilor pot apărea defecte de fabricație, defecte de material, etc. În figura 3.8 identificăm o deformare mixtă în cazul probei numărul 5 datorită faptului că inițial structura începe să se deformeze simetric, iar după formarea primelor 2 pliuri, întâlnirea unui defect în structura probei face ca deformarea să se realizeze în continuare asimetric.

După aceste teste, a fost identificat tipul de aluminiu pe baza informațiilor prezentate în tabelul de mai sus, prin urmare a fost efectuat și un test XRF pentru identificarea tipului de material prin metoda inversă. Se poate spune că între testul mecanic (mărci tensiometrice) și testul chimic (XRF) se pot identifica rezultate asemănătoare. Pentru a analiza o altă structură ar trebui să cunoaștem comportamentul structurii de bază. Fluorescența cu raze X este o tehnică nedistructivă folosită pentru a determina compoziția elementară a materialelor.

Folosind programul Spectro X-LabPro, a fost posibilă identificarea corectă a tipului de aluminiu utilizat, datorită faptului că suma concentrației materialului a fost de 99,33%, respectiv 99,36%. (Anexa 1).



Figura 3.14 Testarea experimentală [109]

Aliajul de aluminiu a fost de două tipuri:

EN AW-6003 (EN AW-AlMg1Si0.8);

EN AW-6015 (EN AW-AlMg1Si0.3Cu).

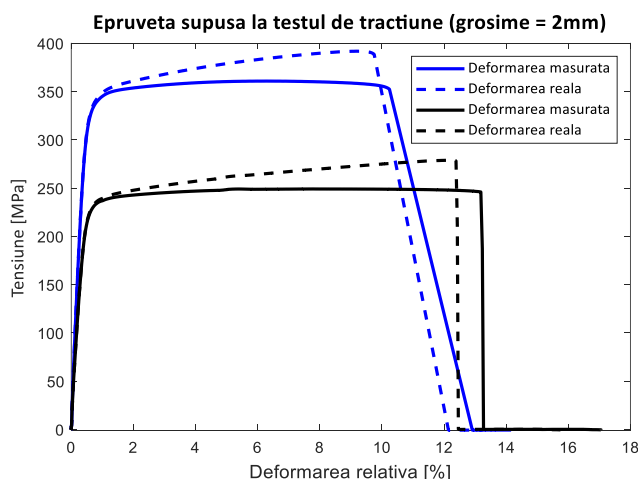


Figura 3.15 Epruvete supuse testului de tracțiune (grosime 2mm)

3.2. Analiza rezultatelor teoretice și experimentale ale tuburilor cu secțiune transversală circulară cu sectoare de diferite diametre

Așa cum a fost prezentat, tendința în industria automobilelor este de a minimiza costurile componentelor și asamblărilor. Această tendință reprezintă principala activitate pentru a utiliza noi materiale și a dezvolta noi metode și tehnologii pentru fabricarea pieselor. Gândirea intuitivă este reprezentată de alegerea unui material ușor, dar în același timp să fie rezistent și proprietățile acestuia să ofere unei piese o protecție ridicată în cazul unei coliziuni. Forma unei structuri are un rol critic în cazul unei coliziuni, datorită faptului că energia este consumată prin deformarea controlată a structurilor de sacrificiu. Comportamentul structurilor cu pereți subțiri a fost studiat pentru prima dată de Alexander [18] și în aceeași lucrare au fost derivate primul set de ecuații pentru a prezice parametrii de deformare, reprezentând acum o bază pentru studiile prezente și viitoare [116], [69], [28], [32], [31]. Factorii care afectează deformarea axială sunt D (diametru), L (lungime) și t (grosime) și rapoartele D/t și L/D . Acești parametri au fost investigați de Abramowicz și Jones [20], Hayduk și

Wierzbicki [61]. Super Folding Element a fost investigat de Chen și Wierzbicki [42], Wierzbicki și Abramowicz [30].

În momentul de față, diversitatea este foarte mare și începe de la structurile cu pereți subțiri cu diferite forme geometrice (tub cu secțiune circulară, structuri triunghiulare, hexagonale sau dreptunghiulare, structuri multi-celulare, structuri de tip fagure sau alte forme), structuri umplute (aluminiu combinate cu diverse tipuri de aliaje, inox, oțel, lemn, materiale polimerice, fibră de sticlă din spumă poliuretanică și altele) până la structura hibridă cu pereți subțiri.

În continuare se va analiza modul de deformare simetric și asimetric pentru o serie de structuri cu secțiuni transversale circulare cu sectoare de tub care au diametre variabile (grosimi ale pereților variabile) și de asemenea înălțimea sectoarelor variază. Structurile au fost realizate dintr-o țevă prelucrată și în același timp va fi analizată și forța medie de deformare teoretică și experimentală fiind aplicate asupra acestora perturbații pentru a observa comportamentul structurilor.

3.2.1. Procedura experimentală

Studiul abordează rezultatele unei serii de patru configurații a tuburilor de secțiune circulară cu sectoare de diferite diametre și diferite înălțimi ale sectoarelor, având în vedere comportamentul sub sarcină axială.

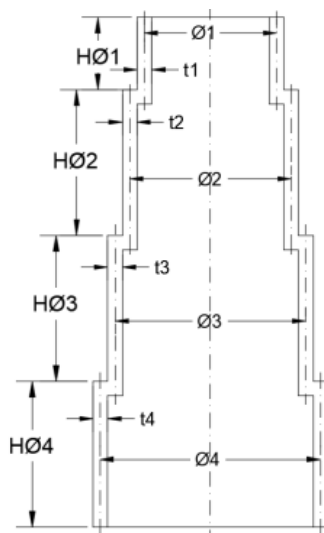


Figura 3.17 Probă cu descrierea dimensiunilor [117]

Tabelul de mai jos descrie dimensiunile inițiale ale probelor ($L = 120\text{mm}$; $\phi_{\max} = 35\text{mm}$).

Tabel 3.3. Dimensiunile probelor [117]

Probe	$H_{\phi_1} / t_1 / \phi_1$ [mm]	$H_{\phi_2} / t_2 / \phi_2$ [mm]	$H_{\phi_3} / t_3 / \phi_3$ [mm]	$H_{\phi_4} / t_4 / \phi_4$ [mm]
Tub 1	8 / 1 / 32.6	10 / 1.2 / 32.8	12 / 1.4 / 33	90 / 1.7 / 33.3
Tub 2	13 / 0.9 / 32.5	13.5 / 1.1 / 32.7	13.5 / 1.2 / 32.8	80 / 1.7 / 33.3
Tub 3	16 / 1.2 / 32.8	18 / 1.4 / 33	24 / 1.5 / 33.1	62 / 1.7 / 33.3
Tub 4	27 / 0.8 / 32.4	23 / 1.0 / 32.6	30 / 1.2 / 32.8	40 / 1.7 / 33.3

Materialul utilizat pentru structurile cu pereți subțiri prezentate în tabelul de mai sus cu diametre variabile și înălțimi diferite ale sectoarelor este aliajul de aluminiu de tipul AA6063. Proprietățile mecanice ale materialului sunt: Modulul lui Young $E = 68.3\text{ GPa}$, limita de

proportionalitate inițială $\sigma_y = 71 \text{ MPa}$, limita de proportionalitate finală $\sigma_u = 130.7 \text{ MPa}$, coeficientul Poisson $\nu = 0.3$ [10]. Probele au fost fabricate dintr-o țevă prin extrudare. Acestea au fost testate sub sarcină cvasi-statică utilizând un echipament de testare universal fiind cuplat cu o cameră de rezoluție înaltă pentru achiziția datelor și realizarea imaginilor. Seturile de date generate din experiment au fost analizate cu ajutorul programului Matlab și cu ajutorul LS-Dyna.

Figura 3.18 prezintă probele înaintea testării.

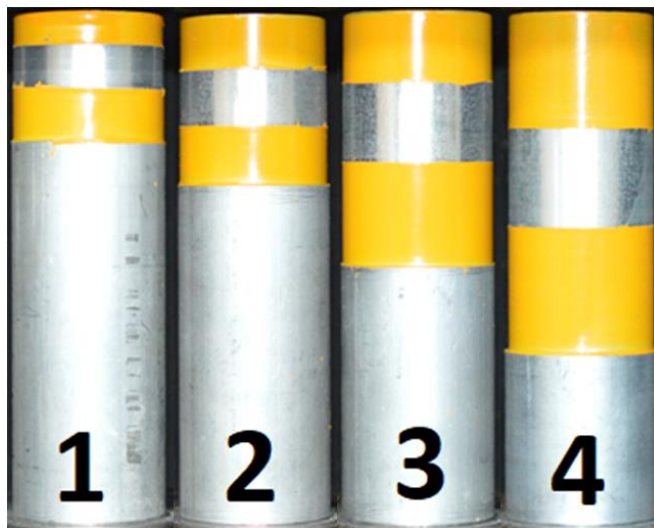


Figura 3.18 Probele inițiale [117]

3.2.2. Rezultate și discuții

După efectuarea testelor pe o mașină de testare universală, curbele rezultate din analiza experimentală sunt analizate mai jos. Cu ajutorul programului Matlab au fost procesate seturile de date, iar simulările au fost realizate cu ajutorul LS-Dyna. Analiza începe cu tubul de secțiune transversală circulară cu înălțime variabilă a sectoarelor, începând de la bază către vârful structurii astfel: 90 mm, 12 mm, 10 mm, și 8 mm. Grosimea acestor sectoare începând de la baza către vârful structurii sunt următoarele: 1.7 mm, 1.4 mm, 1.2 mm, și 1.00 mm. Diametrul mediu al sectoarelor începe de la bază și are valorile 33.3 mm, 33mm, 32.8mm, și 32.6mm. În figura 3.19 se poate observa că tubul sub acțiunea unei forțe axiale, generează o serie de vârfuri. Procesul de deformare a fost efectuat pe o înălțime de 40mm din înălțimea totală a probei (120mm).

Pentru următoarele grafice:

- Linia neagră reprezintă rezultatul testului experimental al forței medii de deformare;
- Linia roșie reprezintă rezultatul simulării forței medii de deformare fără perturbații;
- Linia roșie punctată reprezintă rezultatul simulării forței medii de deformare cu perturbații;
- Linia roșie subțire reprezintă curba medie pentru rezultatele simulării fără perturbații;
- Linia neagră subțire reprezintă curba medie pentru rezultatele experimentale;
- Liniile orizontale de culoare albastră reprezintă forță medie de deformare teoretică;
- Liniile verticale punctate reprezintă sectoarele structurii de secțiune circulară;

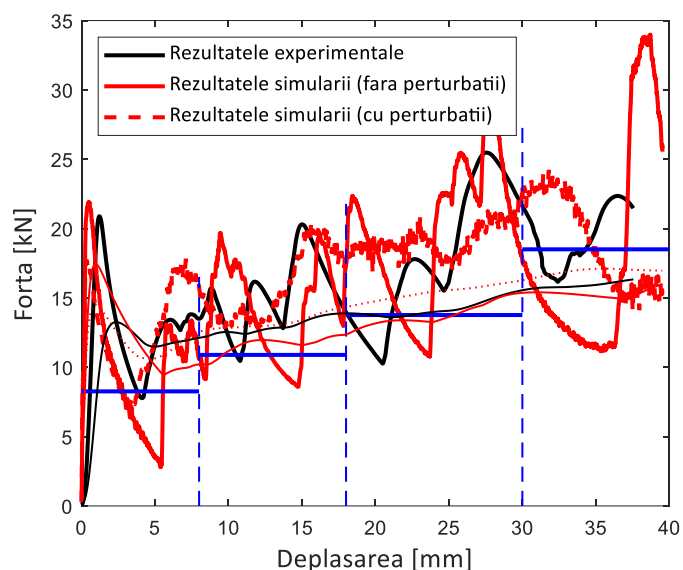


Figura 3.19 Curba forță – deplasare pentru structura nr. 1 [117]

Un perete rigid (*RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION) a fost definit și utilizat pentru a comprima structurile axial. Pentru a identifica și a ține cont de imperfecțiunile datorate procesului de fabricație, coordonatele nodului au fost ajustate prin comanda (*PERTURBATION_NODE).



Figura 3.20 Fazele deformării unei structuri – simulare cu deformare [117]

Perturbarea coordonatelor nodale reprezintă gama de acuratețe dimensională după ce probele au fost fabricate. Cuvântul *PERTURBATION oferă posibilitatea să poată fi definită abaterea de la structura proiectată cu imperfecțiunile datorate flambajului. Aceste perturbații pot fi vizualizate în LS-PrePost sub formă de grafice definite de utilizator.

Cardul utilizat (*PERTURBATION_NODE) include tipul perturbației (TYPE) care este un câmp spectral, node-set ID (NSID) care are valoarea 101, factorul scalar (SCL) care are valoarea 0.2, CMP (coordonatele x și y), ICOORD (sistemul de coordonate utilizat în sistem cartezian global), CID (sistem de coordonate ID). Utilizând un câmp spectral și o funcție de corelație (CFTYPE) a fost definit Gaussianul în următoarea formă:

$$B(t) = e^{-(at)^2} \quad (3.9)$$

Unde:

t – Argumentul funcției (distanța de corelație aplicată pentru gradele de libertate ale nodurilor care este permis să fie perturbat);

a – Parametru care dă lățimea funcției de corelație (amplitudinea perturbației).

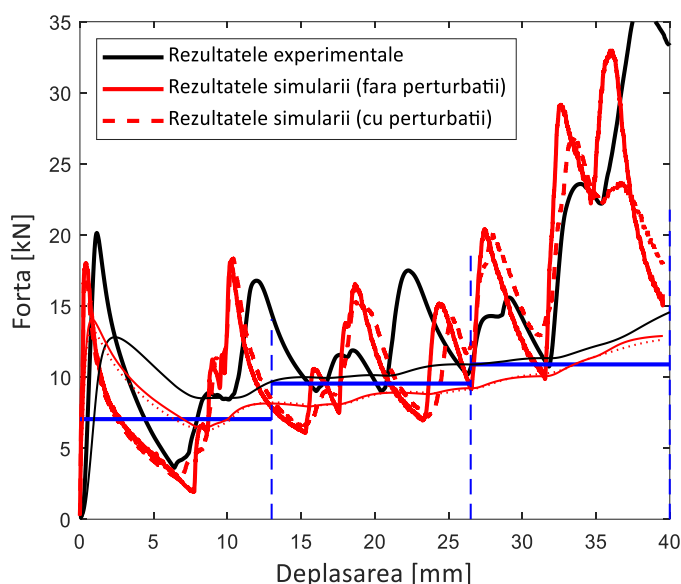


Figura 3.21 Curba forță – deplasare pentru structura nr. 2 [117]

3.3. Concluzii

În acest capitol sunt prezentate studiile practice și sunt analizate structurile cu secțiune circulară. În funcție de parametrii geometrici și proprietățile materialului, există o varietate de moduri de deformare. Structurile au fost fabricate prin debitare și strunjire, dintr-o țevă din aliaj de aluminiu. Tuburile cu o grosime a peretelui de 0,9mm, 1,2mm respectiv 1,5mm și o lungime de 60mm, 80mm respectiv 100mm au fost supuse unei sarcini axiale cvasi-stactice. În cazul unei decelerații accentuate, pentru a iniția deformarea unei structuri trebuie să apară o forță maximă. Pentru a elimina acest maxim se utilizează un declanșator de deformății, datorită faptului că structura sau ocupanții din autovehicul nu sunt protejați la momentul impactului.

Declanșatorul de deformății scade forța maximă și crește valoarea forței medii de deformare. Structura începe să se deformeze când dintr-un motiv există o pierdere de echilibru precum tensiunea limită, materialul este mai subțire într-o anumită zonă, defect de fabricație, incluziune de material, etc. În urma testelor experimentale, comparativ cu informațiile din literatura de specialitate, a fost completată diagrama modurilor de deformății cu valori noi a unor tipuri de aliaj de aluminiu. Pentru a identifica tipul aliajului de aluminiu din care structurile au fost fabricate, din restul de țevă s-au fabricat și epruvete care au fost supuse unui test mecanic (probă de tracțiune) și unui test chimic (analiza XRF). Completarea diagramei modurilor de cedare, este utilă pentru selectarea structurilor de bază atunci când sunt proiectate structuri avansate.

Cercetările au continuat în direcția structurilor cu secțiune circulară cu sectoare de diferite înălțimi și grosime variabilă. Înălțimea sectorului și grosimea peretelui influențează cedarea structurii. Prin urmare forța maximă care este necesară pentru a crea pliul la intersecția sectoarelor, se apropie de forța medie de deformare și are un caracter progresiv. Compararea rezultatelor pentru simularea fără perturbare și cu perturbare, arată că forța maximă a fost atinsă în ambele cazuri dar cu o mică întârziere. Forțele sunt asemănătoare chiar dacă pe modelul geometric a fost aplicată o perturbare.

CAPITOLUL 4 – Studii practice și analiza rezultatelor pentru structurile auxetice

4.1. Model teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale

Titlul denotă studiul și cercetarea structurilor auxetice și anti-tetra-chirale care au fost proiectate ca tuburi fiind supuse deformărilor axiale cvasi-statice și dinamice. Testele experimentale s-au realizat pe tuburi fabricate prin tăierea cu laser dintr-o țevă, în timp ce simulările numerice au fost efectuate folosind un model numeric parametrizat. Forța de deformare prezintă o zonă platou care se extinde până la faza de intensificare, definită ca fiind interacțiunea dintre ligamentele care unesc nodurile. Pe baza caracteristicilor de deformare ale celulei specifice, au fost stabilite modele teoretice de calcul pentru estimarea zonei de platou. Conform modelului lui Bernoulli, calculul forței bazat pe mecanismul de deformare a fost dezvoltat pe baza teoriei și proiectării articulațiilor plastice. În același timp, lungimea sau distanța de deformare când forța este constantă, poate fi estimată în vederea completării unui set de parametrii pentru activitatea de proiectare. Soluția analitică a fost validată în raport cu rezultatele obținute din simularea numerică pentru diferite configurații. Observăm o bună corelație între rezultatele numerice și cele experimentale ceea ce demonstrează corectitudinea modelului pentru estimarea zonei de platou. Celulele sunt așezate unele peste altele formând astfel o structură suprapusă. Forța de deformare trece prin etape succesive în funcție de fiecare celulă, însă există și posibilitatea să reconstruiască răspunsul pentru structura suprapusă din răspunsul fiecărei celule, utilizând rezultatele soluției analitice pentru forța și lungimea fiecărei etape a platoului. Setul de ecuații poate fi utilizat pentru a defini această structură, atunci când sarcina de încărcare este unul din parametrii de proiectare.

Materialele sunt caracterizate folosind constantele elastice pentru studiul de solicitare la întindere care se realizează longitudinal (modulul lui Young, E), încovoierea care se realizează transversal (modul de încovoiere, G), comprimarea (K). Ultimul parametru este adimensional și scoate în evidență performanța materialului când acesta este deformat [118] acesta fiind denumit coeficientul Poisson, comparând contracțiile laterale cu solicitările longitudinale pentru un material supus unei solicitări pe direcție longitudinală. În mod tradițional pentru un material comun, coeficientul Poisson este pozitiv și variază de la 0.25 la 0.33 [96], [95]. Evoluția structurilor în natură [119] a dus la dezvoltarea materialelor cu proprietăți care nu pot fi realizate cu materiale convenționale [120], [121]. Zhang și colab. [119] oferă o analiză amănunțită și o clasificare a structurilor care sunt inspirate din natură, dar și aplicații pentru inovații ingineresti. Surjadi și colab. [120] indică o clasificare a modurilor de deformare, în timp ce Ha și Lu [121] arată beneficiile structurilor inspirate din natură ca fiind ușoare având capacitate mare de absorbție a energiei. Topologiile acestor structuri au fost cercetate, apărând noi specii denumite meta-materiale mecanice. [96] [75]. Performanțele meta-materialelor se regăsesc mai degrabă în geometria și configurația celulelor, iar performanța materialului folosit reprezintă un rol scăzut în vederea fabricării structurii [122], [123], [92].

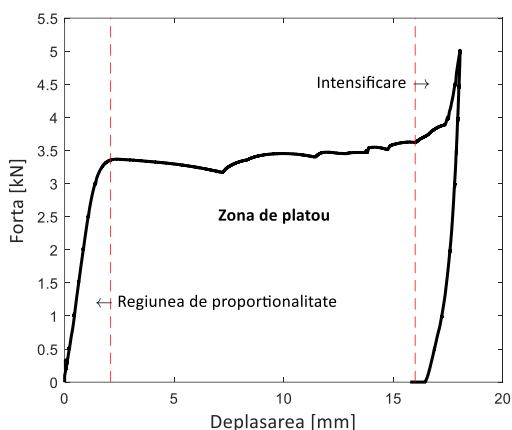
4.1.1. Procedura experimentală

Probele pentru testele experimentale au fost fabricate dintr-o țevă care a fost ulterior prelucrată prin tăierea cu laser (mașina cu laser TRUMPF). Diametrul exterior al piesei prelucrate a fost 40 mm, în timp ce grosimea tubului a fost 2.0 mm. Modelul structurii auxetice este de tipul tetra-anti-chiral [30]. Raza interioară a nodului este 4.2 mm, în timp ce grosimea ligamentului este de 3.1 mm. Lungimea ligamentului este 41.9 mm și este dată de dimensiunile piesei de prelucrat. Proba

a fost supusă comprimării, utilizând o mașină de testare universală cu control computerizat. Utilizarea controlului computerizat în timpul procesului de testare permite utilizatorului să dezvolte proceduri de testare personalizate.

În figura următoare (Figura 4.2) se va prezenta atât curba forță-deplasare cât și probele utilizate în testarea experimentală. Se pot identifica trei zone:

- Prima zonă corespunde sarcinii;
- A doua zonă este definită de zona platoului pentru forța de deformare;
- A treia zonă este definită de intensificarea structurii [160], [161].



a)



b)

Figura 4.2 a) Rezultate experimentale. Graficul forță-deplasare: prima zonă este proporțională cu sarcina, a doua zonă definește zona platoului (forța de deformare), iar a treia zonă este definită de intensificarea structurii; b) Probele utilizate pentru în testarea experimentală. Înălțimea probei nedeformate ($L_0 = 140 \text{ mm}$), în timp ce înălțimea probei deformată ($L_f = 131,8 \text{ mm}$), ceea ce oferă o valoare pentru deformarea verticală de ($\varepsilon_V = 0,1$). Circumferința probei nedeformate ($S_0 = 125,66 \text{ mm}$) în timp ce circumferința probei deformată ($S_f = 112,72 \text{ mm}$) astfel obținându-se o deformare a circumferinței ($\varepsilon_H = 0,103$) [105]

Utilizând dimensiunile probelor, coeficientul Poisson este definit ca fiind:

$$\nu_{HV} = -\frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_V} = -\frac{0,103}{0,1} = -1 \quad (4.1)$$

Pentru controlul vizual în procesul de deformare, a fost adăugat un set de semne pe structură. Se utilizează o cameră digitală care înregistrează procesul de deformare cu o rată de 25 cadre/secunda. Rata cadrelor este suficientă, datorită faptului că procesul a fost cvasi-static. În figura 4.3 se prezintă procesul complet pentru analiza imaginii. A fost utilizată o cameră Nikon, echipată cu lentile speciale, pentru colectarea imaginilor pe parcursul aplicării forței.

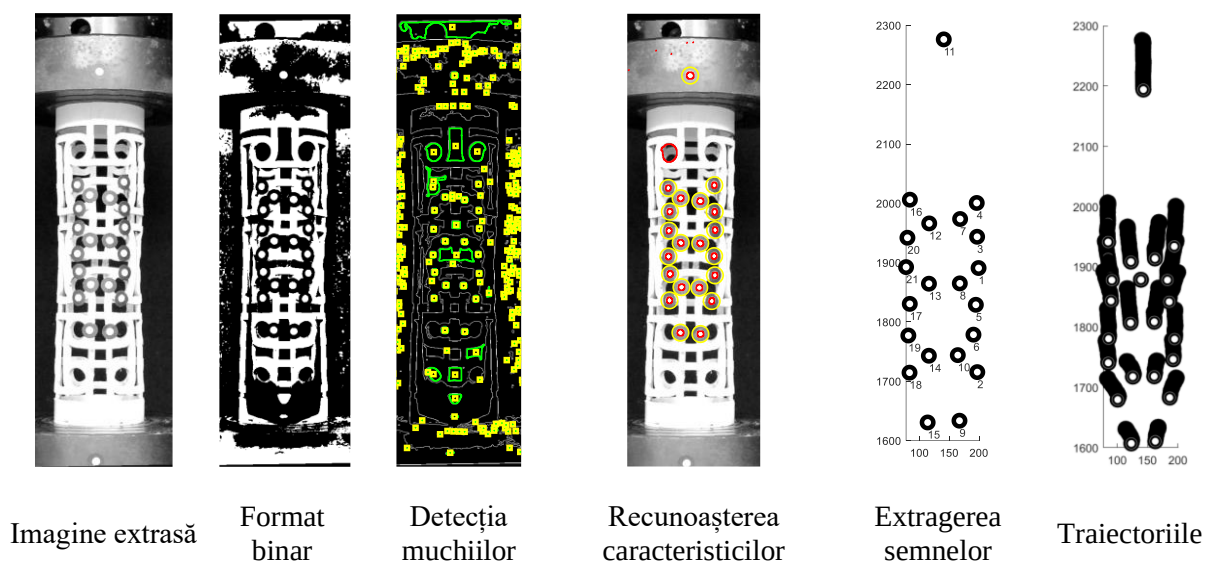


Figura 4.3 Metodologia de procesare a imaginii digitale. Imaginea a fost extrasă pentru a păstra doar informațiile semnificative. Funcțiile de îmbunătățire a imaginii în Matlab au fost realizate pentru a îmbunătăți calitatea acesteia într-un format binar. În această etapă a fost aplicată procedura de detecție a muchiiilor pentru a extrage contururile din imagine. Contururile au fost analizate ca seturi de date, iar recunoașterea caracteristicilor a fost efectuată pentru a identifica formele care seamănă cu niște cercuri [105]

4.1.2. Simularea numerică

Modelul numeric a fost dezvoltat în conformitate cu nomenclatura LS-Dyna [162], [163]. Modelul numeric a fost definit utilizând doar elemente finite hexaedrice [153], [164], [165], [166]. În acest scop, a fost dezvoltată un program Matlab pentru a obține un model numeric capabil de parametrizare. Modelul de bază, este prezentat în figura 4.5.

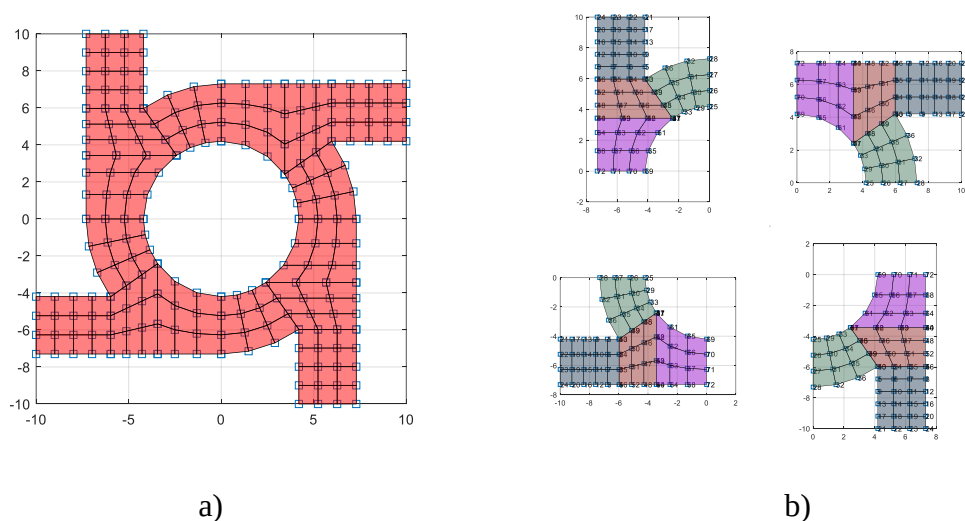


Figura 4.5 Modelul numeric al nodului inițial. a) Secțiunea și zonele exterioare; b) Identificarea zonelor cu diferite culori pentru a permite definirea unui model numeric care conține doar opt noduri ale elementului [105]

Modelul de bază a fost repetat de-a lungul axei verticale și orizontale, conform cu numărul de celule definite și a fost obținut un model 2.5D. Odată ce nodurile comune au fost îmbinate și orientarea elementelor a fost verificată, modelul 2.5D a fost convertit într-un model 3D.

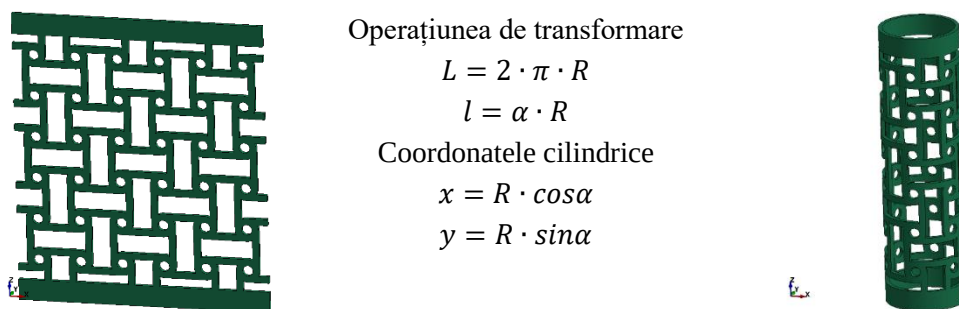


Figura 4.6 Trecerea de la modelul 2.5D la 3D. Coordonatele au fost actualizate știind că lungimea de-a lungul axei orizontale (L) a modelului 2.5D este circumferința ($2 \cdot \pi \cdot R$) a modelului 3D. Unghiul (α) este obținut din lungimea curentă (l) măsurată de-a lungul axei orizontale de la stânga la dreapta. Ulterior coordonatele fiecărui nod 3D sunt determinate de un set de coordonate cilindrice. Coordonata de-a lungul axei verticale este păstrată din modelul 2.5D [105]

Materialul modelului atribuit structurilor deformabile este *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY [76]. Este implementat contactul general *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE [167]. Structura este deformată de un perete rigid care este mobil și este definit ca fiind *RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION. Suportul inferior este definit de un perete rigid simplu *RIGIDWALL_PLANAR și este adăugată o constrângere suplimentară la primul rând de noduri din partea inferioară *CONSTRAINED_GLOBAL.

4.1.3. Modelul teoretic

Modelul teoretic pentru estimarea forței de deformare capabilă să producă zona platoului, a fost elaborat cu privire la următoarele ipoteze:

- Nodurile care leagă ligamentele rămân nedeformate sub sarcină compresivă [83], [76], [168], [169];
- Procesul de deformare al ligamentului urmează modelul Bernoulli sub sarcină de încovoiere [150], [170], [171], [91];
- Forțele exercitate asupra ligamentului care acționează în direcția radială sunt neglijate [140], [170], [158].

Prima ipoteză a fost formulată pentru a ușura procesul de calcul al forme deformată a ligamentului. A doua ipoteză este utilizată datorită implementării modelului matematic pentru grinda lui Bernoulli. A treia ipoteză a fost formulată pentru investigarea rezultatelor modelului numeric și se dorește să se ajungă la un model matematic simplificat. Pentru modelul numeric utilizat în simulări, se poate observa că tensiunea (σ_1) și compresibilitatea (σ_3) sunt mai mari ca ordin de mărime față de tensiunea (σ_2) care acționează pe direcția transversală a grinzii (direcție radială când ne raportăm la structura).

Lungimea ligamentului pe direcția circumferențială a fost notată cu L_H , în timp ce lungimea pe direcție verticală (direcția sarcinii) a fost notată cu L_V . Notațiile sunt prezentate mai jos. Lungimile ligamentelor L_H și L_V pot fi diferite sau egale, în funcție de parametrii de proiectare selectați pentru un coeficient Poisson dat. În lucrarea de față sunt cercetate structurile cu lungimi ale ligamentelor egale. În timpul procesului de deformare, forțele care acționează asupra nodurilor produc un moment de încovoiere care se aplică ulterior ligamentelor. Dacă luăm ca referință centrul nodului, ligamentele sunt îndoite către exterior, apropiindu-se de decalajul inițial (δ) dintre celule. Prin urmare, decalajul

inițial dintre celule poate fi considerat că o referință pentru deplasarea maximă a ligamentului (la mijloc) sub sarcină de încovoiere, iar când ligamentele sunt în contact, decalajul curent (δ^*) devine nul.

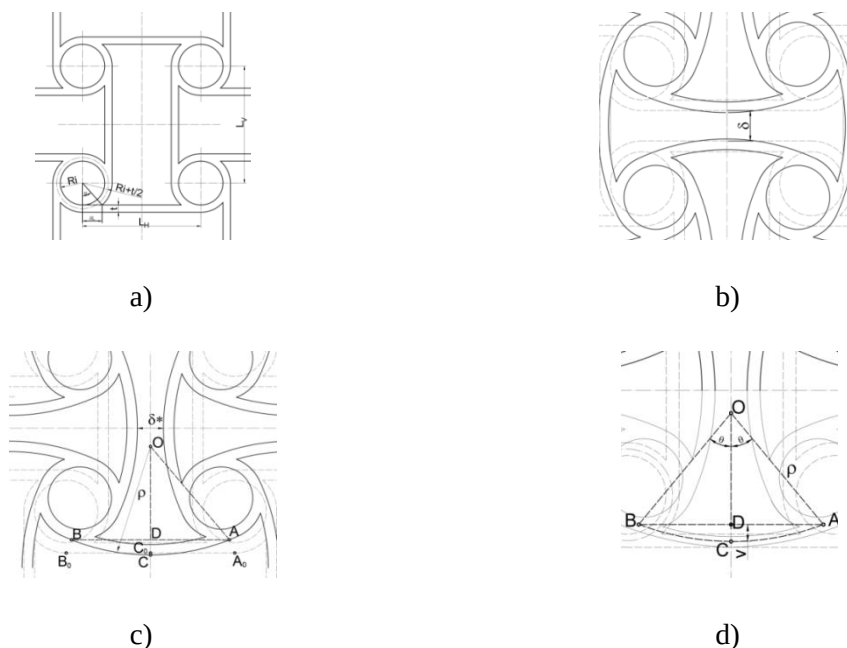


Figura 4.10 Caracteristici geometrice: a) dimensiunea geometrică a celulei unitare; b) definiția decalajului inițial; c) formularea modelului geometric; d) devierea ligamentului [105]

4.1.4. Rezultate și discuții

Modelul teoretic prezentat mai sus a fost implementat într-o aplicație Matlab (Anexa 2), iar rezultatele sunt discutate în această secțiune. În același timp, modelele numerice au fost construite pentru a surprinde caracteristicile geometrice. Rezultatele din simulările numerice au fost comparate cu rezultatele modelului teoretic pentru o discuție privind fezabilitatea acestuia.

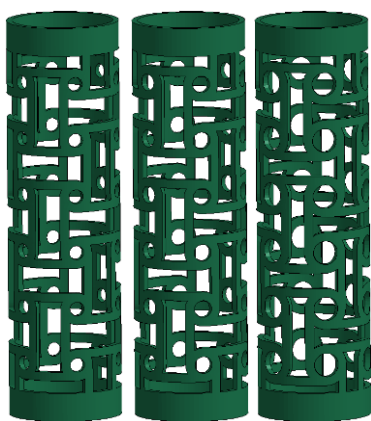
1. Influența razei nodului și a grosimii ligamentului

Parametrii care influențează coeficientul Poisson sunt reprezentați de raza și grosimea ligamentului.

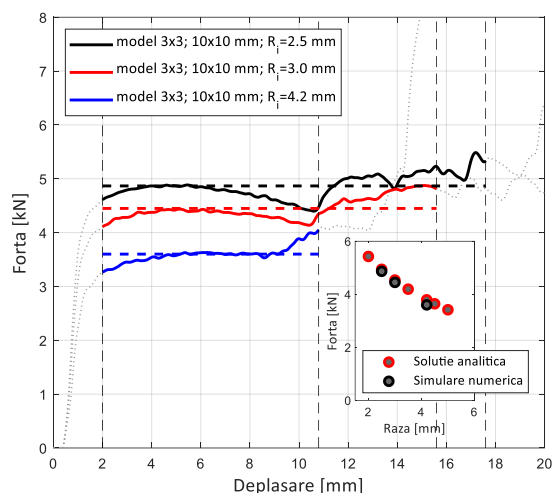
Pentru început, raza interioară este definită ca fiind (R_i) având valorile cuprinse în intervalul [2.5 mm; 3.0 mm; 4.2 mm]. Lungimile ligamentelor sunt egale cu $L_H = L_V = 21$ mm. Grosimea ligamentelor este de 3.1 mm, în timp ce lățimea acestora este de 2.0 mm. Pornind de la aceste date de intrare, coeficientul Poisson are valori cuprinse în intervalul [0.911; 0.928; 0.953]. Deși diferențele dintre valorile coeficientului Poisson nu sunt afectate într-o mare măsură de rază, diferența se reflectă în rezultatele pentru zona platoului.

Ulterior, influența grosimii ligamentului (al doilea parametru care afectează coeficientul Poisson) a fost analizată cu valorile corespunzătoare definite de setul de date [2.0 mm; 3.1 mm; 4.0 mm]. Raza interioară a fost notată cu (R_i) și a fost definită ca fiind 3.0 mm.

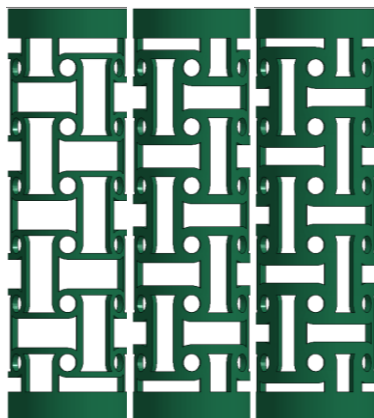
Folosind aceste date de intrare, valoarea coeficientului Poisson, are valori cuprinse în intervalul [0.960; 0.928; 0.903]. De asemenea, în acest caz, diferența dintre raportul maxim și minim al coeficientului Poisson nu este semnificativă fiind de doar 6.31 %.



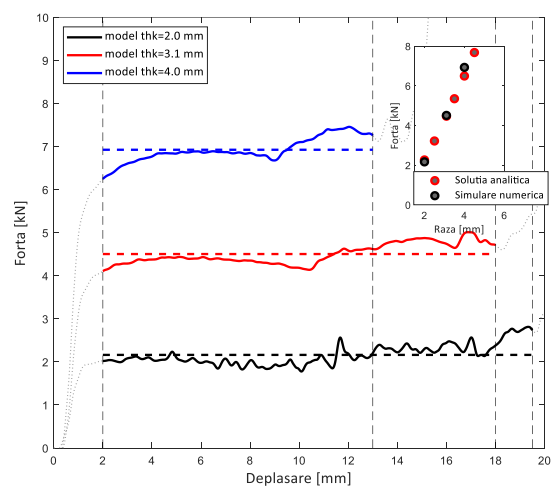
a)



b)



c)



d)

Figura 4.12 a) set de modele numerice cu rază interioară $R_i = 2.5; 3.0; 4.2\text{ mm}$; b) prezentarea forței de deformare în zona platoului; c) set de modele numerice cu grosimea ligamentelor de $t = 2.0; 3.1; 4.0\text{ mm}$; d) forța medie de deformare în zona platoului [105]

Influența numărului de celule

Structurile cercetate au fost asemănătoare cu cele folosite în testarea experimentală. De asemenea în cazul structurilor 3D, a fost introdus numărul de celule în direcția orizontală (n_H) sau de-a lungul circumferinței. Rezultatele obținute arată că numărul de celule nu influențează comportamentul structurii auxetice. Prin urmare, putem calcula lungimea platoului folosit pentru a evalua forța medie de deformare. Pe de altă parte, conform cu definiția teoretică a comportamentului auxetic, coeficientul Poisson nu ar trebui să fie afectat de numărul de celule de-a lungul direcției verticale.

2. Influența lungimii ligamentelor

Dacă lungimile ligamentelor sunt egale, nu influențează comportamentul auxetic al structurii. Cu toate acestea, această analiză a fost efectuată pentru a verifica modelul teoretic propus pentru

structurile derivate din tuburi cu o rază mare. Raza interioară a nodului este de 3.0 mm , iar grosimea este de 3.1 mm . Setul de date definește lungimile ligamentelor pe circumferință și de-a lungul axei verticale [15.0 mm ; 16.0 mm ; 20.0 mm ; 25.0 mm ; 30.0 mm]. În figura 4.14 sunt prezentate modelele numerice, graficul forță-deplasare și forța medie de deformare.

Creșterea lungimii ligamentelor (în acest caz $> 20\text{ mm}$) duce la diferențe semnificative între valorile teoretice estimate și cele calculate. Acest lucru oferă o limitare a modelului actual, datorită faptului că a fost dezvoltat ținând cont de un model geometric plan. Dacă acesta se definește pentru fiecare celulă, distanța de la plan la tub este definită de setul de date [1.91 mm ; 2.04 mm ; 2.55 mm ; 3.19 mm ; 3.83 mm]. Cu toate acestea, creșterea lungimii ligamentului duce la o scădere a forței. Structura proiectată este mai puțin eficientă, deci se poate afirma că ar trebui să fie întotdeauna o limitare a lungimii maxime a ligamentului.

3. Structurile suprapuse

Zonele platoului permit proiectarea structurilor care pot fi programate să dezvolte o forță de deformare pentru un profil cerut. Structurile suprapuse se bazează pe cazuri discutate anterior. Secțiunea privind influența razei nodului și grosimea ligamentului, a fost dedicată cercetării valorii forței medii înregistrată în timpul fazei de platou. Odată ce faza platoului este completă, există o creștere accentuată a forței cauzată de intensificarea structurii. Analiza arată că forța ar putea crește semnificativ odată cu grosimea, în timp ce schimbarea razei permite o tranziție lentă.

Analizând rezultatele obținute observăm că odată ce etapa platoului este completă și începe faza de intensificare, nu există valori suprapuse ale forței de deformare capabile să declanșeze următoarea etapă.

Prin urmare, a fost cercetată o soluție diferită pentru suprapunerea secțiunilor. În acest caz, grosimea ligamentului nu a fost modificată, dar raza interioară a nodului a variat de la 2.5 la 4.0 mm .

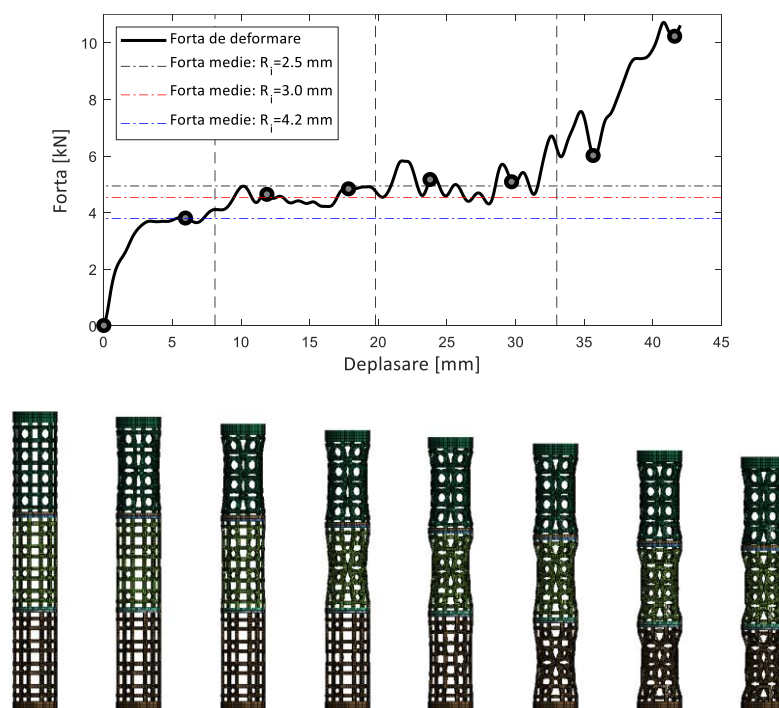


Figura 4.16 a) Deplasarea forței are ca rezultat o structură suprapusă cu noduri definite de $R_i = 2.5; 3.0; 4.2\text{ mm}$ și grosime de 3.1 mm ; b) o serie de imagini capturate pentru a afișa procesul de deformare al structurii [105]

Odată ce zona platoului este completă și începe faza de intensificare, o secțiune suprapusă a forței de deformare poate declanșa următoarea etapă. Etapa de deformare definită de soluția analitică corespunde cu soluția numerică, arătând că structurile cu modelele de deformare progresivă pot fi dezvoltate cu succes. Rezultatele prezentate în secțiunea influenței razei nodului și grosimii ligamentului arată că, forța medie de deformare a etapei platoului este 20% din valoarea atribuită etapei ulterioare, și se obține un proces de deformare progresiv și stabil al structurii.

Pentru a propune o soluție potențială, pragul de 20% poate fi determinat de momentul de încovoiere complet plastic utilizând tensiunea de curgere (σ_0) în loc de limita de proporționalitate (σ_y):

$$M_p = \sigma_0 \cdot \frac{t^2 \cdot w}{4} \quad (4.25)$$

Folosind proprietățile materialului, tensiunea de curgere a materialului poate fi derivată ca:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot \sigma_u}{1+n}} = \sqrt{\frac{320 \cdot 530}{1+0.12}} = 390 \text{ [MPa]} \quad (4.26)$$

unde σ_u reprezintă tensiunea maximă, iar n reprezintă puterea ($\epsilon_u = 0.16$)

Pe baza acestei observații, poate fi derivat un algoritm pentru definirea profilului forței de deformare folosind datele disponibile din structuri independente.

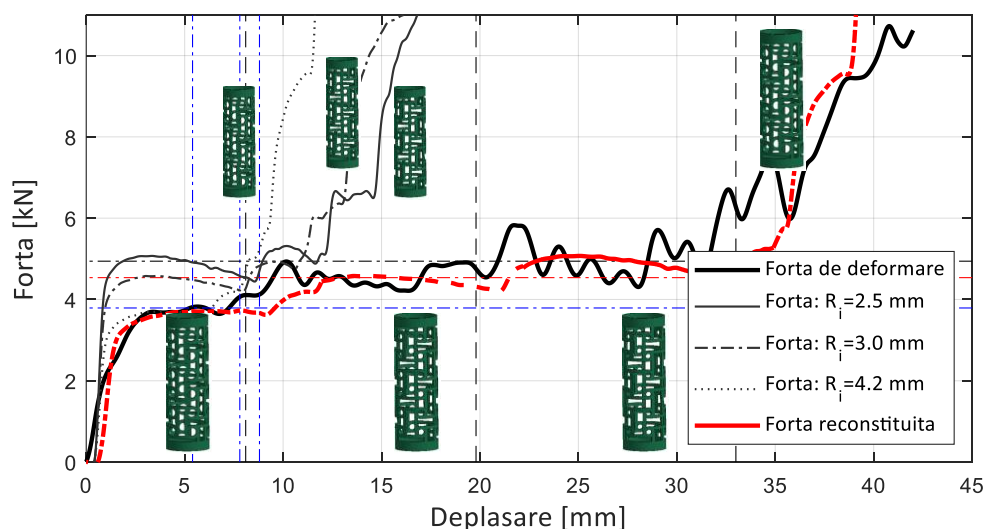


Figura 4.17 Curba forță-deplasare (negru) pentru structura suprapusă vs. curba forță-deplasare (roșu) obținută din răspunsurile individuale ale structurilor auxetice de sine stătătoare.

Reconstrucția curbei forță-deplasare folosește date individuale afișate în stânga figurii. Liniile verticale punctate în culoarea negru, reprezintă lungimea fazelor, utilizând ecuația 4.25, în timp ce liniile punctate de culoare albastru reprezintă lungimea zonelor individuale utilizând ecuația 4.24. Pentru recompunerea curbei forță-deplasare, a fost aplicat un factor $(1 + 1/2)$ la datele deplasării pentru structuri individuale pentru a explica deformarea ligamentelor din vecinătatea inelelor circulare așa cum a fost observat în simulare [105]

Algoritmul se bazează pe identificarea punctelor de intersecție ale curbelor (forță), începând de la structura cu cel mai mic răspuns. Punctul este folosit ca punct de deplasare între curbele individuale. Deplasarea totală este definită ca suma dintre deplasarea înregistrată pentru punctul de deplasare și deplasarea curentă. Rezultatele arată că există un bun acord între cele două seturi de date

prin urmare metoda de definire a răspunsurilor pentru structuri suprapuse din datele individuale poate fi aplicată cu succes.

4.2. Analiza teoretică, rezultate experimentale a structurii 3D tetra-anti-chirală și a structurilor de secțiune circulară sub sarcină axială

Se prezintă o analiză a structurii 3D tetra-anti-chirală și o structură cu secțiune circulară supuse unei sarcini axiale. Modelele cu elemente finite au fost dezvoltate și rezolvate în LS-Dyna. Se prezintă o comparație generală a rezultatelor dintre o structură tetra-anti-chirală și o structură de secțiune circulară. Studiul se bazează pe analiza structurilor individuale și în același timp pe analiza structurilor hibride utilizate în industria de automobile. Se cunoaște faptul că structurile cu pereți subțiri sunt utilizate pentru absorbția de energie.

4.2.1. Procedura experimentală

Studiul a fost axat pe investigarea unei serii de patru configurații de structuri, având în vedere comportamentul acestora sub sarcină axială. Configurațiile analizate sunt:

- Structura de secțiune circulară;
- Structura auxetică;
- Structura auxetică având la interior un tub de secțiune circulară;
- Structură auxetică având la exterior un tub de secțiune circulară.

Materialul utilizat în cazul tuburilor de secțiune circulară a fost aliaj de aluminiu de tipul AA6063, iar în cazul structurii auxetice a fost utilizat un oțel moale standard S320.

4.2.2. Rezultate și discuții

Curbele rezultate din analiza numerică, care au fost obținute cu LS-Dyna și Matlab, sunt analizate pornind de la structura de secțiune circulară cu un declanșator pentru deformații și fără declanșator. În altă ordine de idei, în cazul unei decelerații, dacă se va utiliza un inițiator pentru deformații, vom obține o eficiență a structurii mult mai mare față de o structură fără declanșator datorită faptului că forța maximă de deformare este apropiată ca valoare față de forța medie de deformare. Declanșatorul are o formă conică, cu grosime variabilă având la bază o grosime de 0,8mm și la vârf 0,2mm.

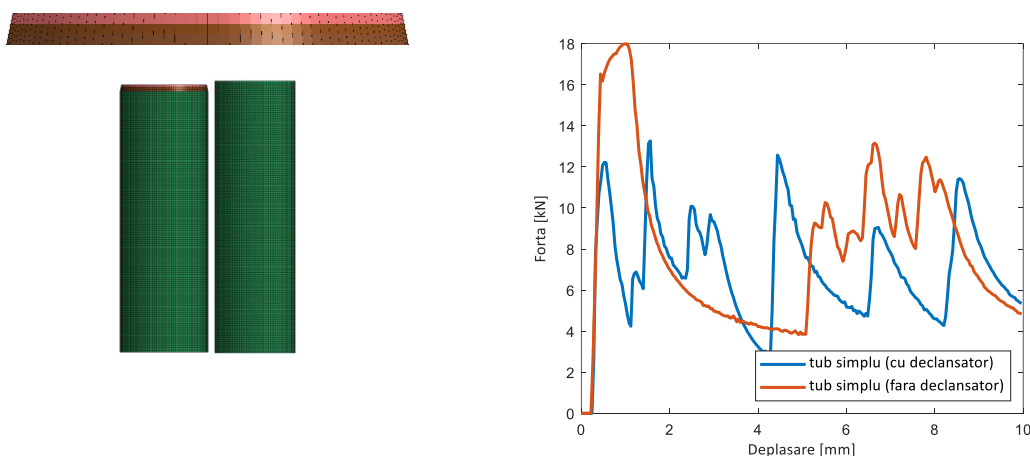


Figura 4.20 Curba forță – deplasare pentru tub simplu și tub cu declanșator [74]

Următorul grafic scoate în evidență faptul că flambajul global a fost evitat. Flambajul global provine de la o neconformitate a structurii care poate să apară în urma prelucrării structurii, din cauza defectelor întâlnite în material sau a defectelor provenite de la pregătirea probei [10].

Forța obținută în cazul cumulării efectelor celor două structuri și forța obținută în cazul structurii auxetice la interior și a tubului la exterior este prezentată mai jos. De menționat este faptul că între structuri nu există interacțiune, datorită faptului că sub sarcină axială structura auxetică se va deforma către interior, iar tubul se va deforma către exterior. Forța are un caracter progresiv. Forța de deformare pentru structurile hibride are aceeași valoare ca în cazul efectelor cumulate.

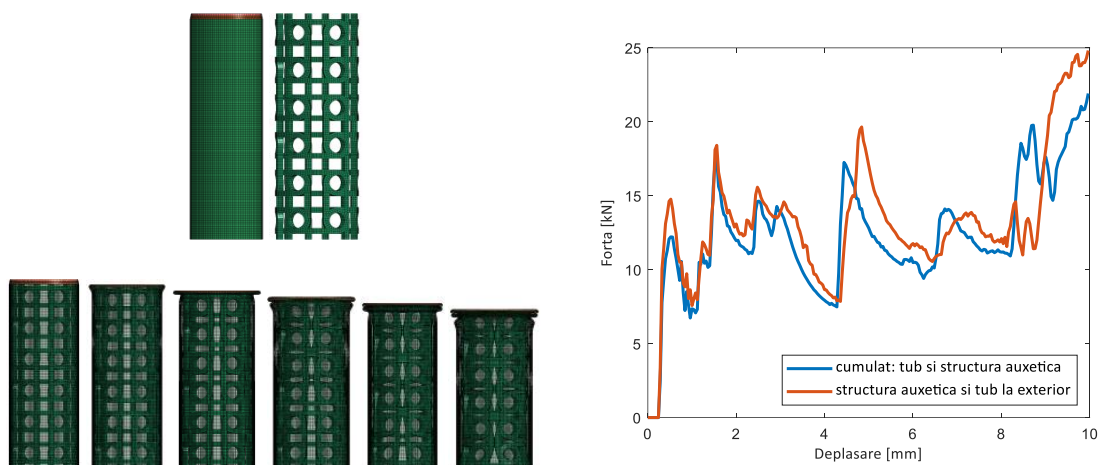


Figura 4.22 Efectul cumulat: tub și structură auxetică și structură auxetică și tub la exterior [74]

În continuare se va prezenta situația în care structura auxetică se află în interiorul unui tub și al doilea caz când structura auxetică se află în exteriorul unui tub. Curba albastră reprezintă structura hibridă formată din structura auxetică la exterior și tub la interior. În acest caz, dacă elementele sunt cumulate și comparate între ele, se va obține o forță suplimentară datorită efectului de interacțiune a celor două structuri.

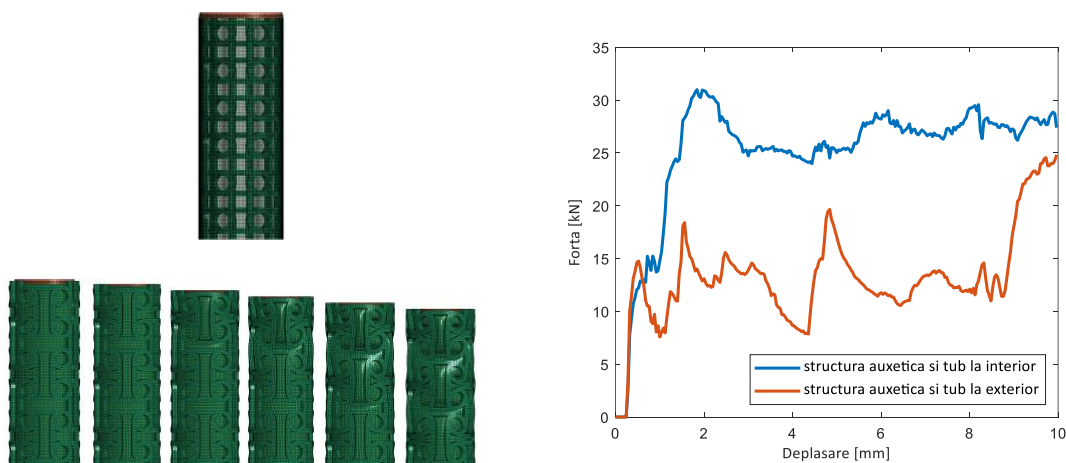


Figura 4.23 Structură auxetică și tub la interior vs. Structură auxetică și tub la exterior [74]

Structura auxetică se deformează la mijlocul înălțimii. În cazul unei structuri auxetice cu tub la interior, se poate observa că structurile interacționează între ele. Astfel modul de cedare este afectat. Pliurile tubului se deformează spre exterior în timp ce structura auxetică se deformează spre interior.



Figura 4.24 Structură auxetică cu tub la interior vs. Structură auxetică [74]

Zona hașurată este o forță suplimentară care reprezintă interacțiunea dintre cele două structuri. Pe baza graficului, putem spune că există o creștere a performanței destul de semnificativă.

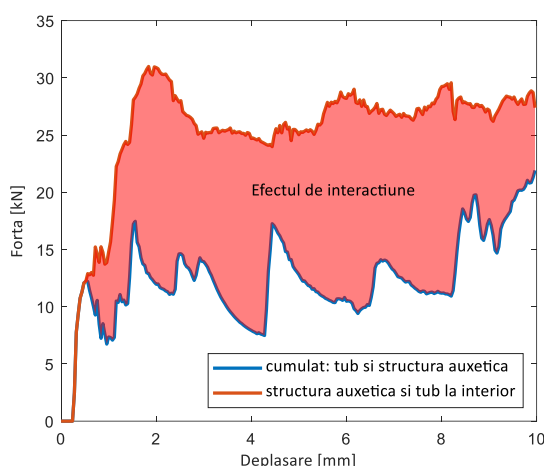


Figura 4.26 Efectul de interacțiune – Cumulat: tub și structura auxetică vs. Structură auxetică și tub la interior [74]

4.3. Concluzii

Pentru a explica coeficientul Poisson negativ, au fost propuse și analizate în diverse modele structurile auxetice. Datorită structurii celulare și modului de deformare a elementelor, structura auxetică, se utilizează pe scară largă în diferite domenii datorită rigidității reduse, dar cu absorbție mare de energie. Conform celor prezentate mai sus, un prim pas în cercetarea științifică efectuat asupra structurilor tetra-anti-chirale, este reprezentat de corelarea metodelor de studiu analitic, experimental și virtual prin modelare numerică. Este studiat un model teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale. Modelul este versatil în sensul că este dezvoltat pentru a se putea adapta la diverși parametri utili pentru procesele de validare și investigație, iar parametrii care influențează coeficientul Poisson au fost utilizați pentru a defini configurațiile specifice modelului numeric. Rezultatele din simulările numerice au fost comparate cu rezultatele din modelul teoretic pentru o discuție privind fezabilitatea acestuia. A fost studiată influența razei nodului și a grosimii ligamentului, influența numărului de celule, influența lungimii ligamentelor, cât și structurile suprapuse.

În ultima parte au fost studiate structurile hibride care reprezintă o combinație de două materiale care pot oferi proprietăți superioare pe care un singur material nu le poate oferi. Un alt avantaj al materialelor hibride este că acestea pot fi combinate la scări diferite, fără a afecta proprietățile de bază ale materialelor. Testele experimentale s-au efectuat pe o serie de configurații

plecând de la structura simplă cu și fără declanșator. Rezultatul structurii simple a fost comparat cu rezultatul unei structuri auxetice simple. În continuare a fost efectuată comparația dintre un tub și structura auxetică la interior și analizată comparativ cu un tub și structura auxetică la exterior. În urma datelor experimentale s-a constatat că tubul se deformează la exterior, iar structura auxetică la interior, prin urmare în cazul unei structuri auxetice cu tub la interior, se poate concluziona că structurile interacționează între ele. Efectul de interacțiune dintre un tub și o structură auxetică versus structură auxetică și tub la interior a fost reprezentat în figura 4.26, iar energia absorbită dintre o structură cu tub interior și o structură cu tub exterior este cu 88,59% mai mare conform figurii 4.27.

4. Concluzii

Teza de doctorat *Studii și cercetări privind îmbunătățirea performanțelor structurilor cu pereți subțiri și utilizarea acestora ca dispozitive de siguranță pentru automobile* a avut ca obiectiv identificarea pașilor ce trebuie parcurși și a procedurii de investigare la definirea unei proceduri destinată dezvoltării și validării unor modele numerice avansate pentru fabricarea de elemente sau ansambluri constructive ale autovehiculelor și a tehnologiilor aferente.

Pornind de la faptul că securitatea ocupanților din autovehicul este un domeniu de interes cu o semnificație socială deosebită și care este în atenția specialiștilor și cercetătorilor din întreaga lume, aplicațiile numerice ale tezei se referă la studiul deformării structurilor cu pereți subțiri și a investigării nivelului de securitate oferit participanților la trafic.

Pentru atingerea obiectivelor propuse ale acestei cercetări a fost realizat un studiu complex al problematicii legate de subiectul abordat printr-o serie de cercetări teoretice, experimentale și prin simulare numerică structurate astfel:

1. Cercetări teoretice

- Cercetarea nivelului actual al dezvoltării sistemelor de siguranță pasivă ale automobilelor, precum și a metodelor de investigare a caracteristicilor legate de siguranța pasivă, conform cu reglementările legale aflate în vigoare;
- Unul dintre mijloacele de eficientizare și de întărire a securității și siguranței rutiere, poate cel mai eficient și mai accesibil, este realizarea unui management integrat în domeniul siguranței rutiere și al prevenirii incidentelor de trafic, în care să fie implicate în mod direct toate instituțiile care au atribuții și responsabilități în domeniul siguranței rutiere;
- Descrierea măsurilor de securitate activă prin care se urmărește evitarea producerii accidentelor, și descrierea măsurilor de securitate pasivă prin care se urmărește reducerea consecințelor accidentelor de circulație;
- Descrierea factorilor care influențează siguranța circulației rutiere privind evitarea producerii accidentelor;
- Cercetarea nivelului actual al tehnicilor de simulare numerică utilizate pentru studiul structurilor cu pereți subțiri;
- Elaborarea unor seturi de programe de calcul pentru definirea modelelor numerice ținând cont de specificațiile structurilor (grosimi ale pereților, diametrul structurilor, lungimile inițiale);

2. Cercetări prin simulare

- Realizarea unui model numeric pentru o structură de secțiune circulară;
- Realizarea unui model numeric pentru o structură auxetică de secțiune circulară;
- Validarea modelului numeric;

3. Cercetări experimentale

- Efectuarea încercărilor, compararea rezultatelor și validarea modelului în urma simulărilor;
- Utilizarea echipamentelor de testare în vederea încercărilor fizice pentru determinarea forței maxime de deformare și forței medii de deformare;
- Interpretarea rezultatelor generate de echipamentul de testare în urma aplicării unei forțe axial cvasi-stactice asupra structurilor testate;

5.1. Concluzii finale

Lucrarea *Studii și cercetări privind îmbunătățirea performanțelor structurilor cu pereți subțiri și utilizarea acestora ca dispozitive de siguranță pentru automobile* debutează cu un capitol introductiv în care sunt prezentate aspecte legate de cerințele pe care trebuie să le îndeplinească structurile actuale utilizate pentru construcția autovehiculelor.

Cercetarea nivelului actual al dezvoltării sistemelor de siguranță pasivă ale automobilelor a debutat cu evidențierea rolului major pe care îl au cercetătorii din domeniul automobilelor în asigurarea unui grad înalt de siguranță a circulației rutiere. S-a definit noțiunea de siguranță a circulației și s-au identificat cele două grupuri de măsuri care se iau în vederea creșterii gradului de siguranță rutieră: grupul măsurilor de securitate activă, care include toate măsurile de optimizare a caracteristicilor autovehiculului, adoptate în scopul evitării accidentelor de circulație și grupul măsurilor de securitate pasivă, care include toate măsurile de optimizare a caracteristicilor autovehiculului adoptate în scopul eliminării sau diminuării consecințelor accidentelor de circulație.

S-au trecut în revistă principale sisteme inteligente ale autovehiculului care concură la asigurarea unui grad înalt de siguranță activă și studiind tendințele de dezvoltare în domeniu, s-au identificat principalele direcții de dezvoltare în următorii ani a acestor sisteme. S-a concluzionat că sistemele inteligente de siguranță activă tind să preia tot mai multe sarcini ale conducătorului în procesul de conducere a autovehiculului, deoarece cauzele principale de producere a accidentelor au ca precursori greșeli ale conducătorului. S-au identificat principalele măsuri de asigurare a siguranței pasive: conceperea unor structuri de securitate ale autovehiculului, capabile să preia o mare parte din energia disipată în timpul unui impact; conceperea unor sisteme de reținere optimizate care să protejeze ocupanții în timpul accidentului; măsuri de protecție pentru participanții la accident din afara autovehiculului; măsuri de siguranță post-accident.

În cadrul celui de-al doilea capitol sunt furnizate informații legate de cerințele pe care structurile trebuie să le îndeplinească. Atenția este îndreptată către materiale cu proprietăți ridicate de absorbție a energiei impactului care ulterior pot fi înglobate în structura automobilului pentru a minimiza daunele în urma unui accident frontal sau lateral. Structurile cele mai utilizate fac parte din categoria tuburilor cu pereți subțiri, care sub acțiunea unei forțe axial cvasi-statice au capacitatea de a se deforma longitudinal. Sunt prezentate cele două etape de deformare a tubului de secțiune circulară, prima presupunând îndoirea la îmbinările circulare, iar cea de-a doua întinderea materialului între îmbinări. Se constată că învelișul structurii supus unui impact axial este sensibil atât la viteză cât și la masă, în sensurile că la viteze mici, energia este absorbită de învelișul structurii. Din cercetările bibliografice, s-au descris și alte tipuri de structuri precum structurile pătrate, triunghiulare, multicelulare, etc. umplute cu diverse materiale metalice sau nemetalice.

În capitolul intitulat *Studii practice și analiza rezultatelor pentru structurile cu secțiune circulară* s-au analizat o serie de structuri fabricate prin debitare și strunjire dintr-o țevă din aliaj de aluminiu. S-au efectuat seturi de structuri cu lungime și grosime diferită a peretelui și au fost supuse unei sarcini axial cvasi-statice pe un echipament de testare universal. S-au identificat și s-au prezentat modurile de deformare a structurilor și pornind de la limitele deformării simetrice a structurilor stabilite în literatura de specialitate, a fost completată diagrama modului de cedare cu noi informații. Pentru identificarea tipului aliajului de aluminiu s-au fabricat și epruvete pentru a le testa mecanic (tracțiune) și chimic (analiza XRF).

După analiza structurilor de secțiune circulară cu grosimea peretelui constant, a fost abordat subiectul structurilor cu secțiune circulară cu sectoare de diferite diametre având grosimi ale pereților variabile. S-au obținut rezultatul testului experimental al forței medii de deformare și rezultatul simulării forței medii de deformare. În cazul simulării a fost adăugată și o perturbare pentru a ne

apropia cât mai mult de realitate pentru că, după cum se cunoaște, simularea unei structuri este un caz ideal, în realitate intervenind diferiți factori precum incluziuni de material în structura tubului, subțierea materialului în anumite zone datorită prelucrărilor mecanice, etc. Forța medie de deformare a fost reprezentată teoretic, în urma testelor experimentale și în urma simulărilor cu și fără perturbații.

Ultimul capitol prezintă structurile auxetice și face referire la utilitatea acestora pe scară largă în diferite domenii datorită rigidității reduse, având în schimb capacitatea mare de absorbție a energiei. O soluție analitică pentru estimarea forței medii de deformare în zona platoului a fost derivată pe baza mecanismului de articulații plastice. Mai mult, rezultatele experimentale și numerice au permis identificarea lungimii etapei de platou; astfel, a fost derivată o soluție pentru a prezice această dimensiune. Un model analitic simplu a fost în centrul atenției; astfel, au fost formulate o serie de ipoteze. Aceste ipoteze au fost validate prin analiza datelor experimentale și numerice.

Modelul numeric prezentat este versatil și a fost dezvoltat pentru a adapta diverși parametri pentru procesele de validare și investigare. Parametrii care influențează coeficientul Poisson au fost utilizați pentru a defini configurația specifică a modelului numeric, iar rezultatele au fost comparate cu rezultatele teoretice. Dacă ligamentele se află într-un raport rezonabil în comparație cu raza nodului, modelul analitic poate oferi rezultate bune. Analiza parametrilor arată limitările modelului analitic față de lungimile ligamentelor. Cu toate acestea, se consideră că nu este eficient să proiectăm structuri cu ligamente lungi, deoarece comportamentul auxetic nu este influențat de măsurători, ci de raportul dintre diferite dimensiuni. Aceste rezultate pot fi utilizate pentru a dezvolta structura urmând un profil predefinit. Forțele de deformare ar trebui să fie în intervalul de 20% pentru a permite o deformare și o tranziție progresivă. Soluția analitică propusă este simplă și poate fi aplicată la configurarea parametrilor de proiectare, și a parametrilor de intrare necesari pentru o analiză aprofundată a structurilor.

În partea finală este prezentată combinația dintre două structuri din materiale diferite care oferă proprietăți superioare pe care nici un material singur nu le poate oferi. Aceste structuri hibride pot fi combinate la diferite scări fără a afecta proprietățile de bază ale materialelor. Testele experimentale s-au realizat plecând de la o structură simplă cu și fără declanșator de pliuri pentru a scădea forța maximă de deformare. În urma datelor experimentale și a observațiilor în timpul testării s-a constatat că tubul se deformează spre exterior, iar structura auxetică tinde să se deformeze la interior. Prin urmare experimentele au continuat utilizând configurația tub în interiorul structurii auxetice și tub în exteriorul structurii auxetice. În cazul unei structuri auxetice cu tub la interior se poate concluziona că structurile interacționează între ele, iar efectul de interacțiune este cu 88.59% mai mare față de structurile auxetice care sunt în interiorul tubului.

5.2. Contribuții personale

În cadrul cercetărilor teoretice și experimentale desfășurate pe parcursul conceperii și realizării lucrării de doctorat și prezentate sintetic mai sus au fost aduse și o serie de contribuții personale ale autorului, dintre care se amintesc:

- Studiul stadiului actual al siguranței circulației rutiere și identificarea posibilităților de optimizare a acesteia prin măsuri active și pasive;
- Studiul literaturii de specialitate și identificarea criteriilor de performanță ale structurilor cu pereți subțiri;
- Studiul literaturii de specialitate pentru identificarea unor metode de optimizare a modelelor numerice;
- Elaborarea și validarea unui model numeric cu elemente finite al structurilor cu pereți subțiri;

- Aplicarea unor metode de perturbare asupra unor structuri ideale pentru a ne apropia cât mai mult de condițiile reale;
- Simularea numerică cu programul de calcul LS-Dyna;
- Efectuarea testelor experimentale, compararea rezultatelor cu cele obținute în urma simulărilor;

5.3. Perspective de cercetare

Prin realizarea acestei lucrări de doctorat, autorul a încercat să-și aducă contribuția la identificarea unor noi metode și mijloace pentru elaborarea modelelor numerice. Autorul își propune continuarea acestor cercetări, stabilind următoarele direcții care sunt considerate a fi de perspectivă:

- Studiul și procesul de fabricație a unei structuri auxetice de secțiune circulară cu sectoare de diferite diametre cu grosimi ale ligamentelor variabile;
- Evaluarea și identificarea caracteristicilor structurilor umplute cu materiale compozite;
- Dezvoltarea unor algoritmi de calcul pentru realizarea optimizărilor structurale;
- Dezvoltarea unor aplicații pentru identificarea tipului de deformare a structurilor cu diferite secțiuni.

Bibliografie

- [1] I. Dumitru, D. Covaciu, and A. Rosca, *The 30th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering*. 2020.
- [2] P. U. Kelkar, H. S. Kim, K. H. Cho, J. Y. Kwak, C. Y. Kang, and H. C. Song, "Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 11, pp. 1–26, 2020.
- [3] R. M. Walser, A. P. Valanju, and P. M. Valanju, "Comment on 'extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures,'" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, no. 11, pp. 119701–1, 2001.
- [4] H. Chen, C. T. Chan, and P. Sheng, "Transformation optics and metamaterials," *Nat. Mater.*, vol. 9, no. 5, pp. 387–396, 2010.
- [5] G. S. Smith, "Structural color of Morpho butterflies," *Am. J. Phys.*, vol. 77, no. 11, pp. 1010–1019, 2009.
- [6] S. H. Choi, Z. Ku, S. R. Kim, K. H. Choi, A. M. Urbas, and Y. L. Kim, "Silk is a natural metamaterial for self-cooling: An oxymoron?," *2018 Conf. Lasers Electro-Optics, CLEO 2018 - Proc.*, vol. 1, no. c, pp. 2–3, 2018.
- [7] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, and F. Berto, "Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review," *Mater. Des.*, vol. 180, no. June, p. 107950, 2019.
- [8] G. Belingardi, S. Boria, and J. Obradovic, *Energy Absorbing Sacrificial Structures Made of Composite Materials for Vehicle Crash Design*. Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures, 2013.
- [9] M. Costas, J. Díaz, L. Romera, and S. Hernández, "A multi-objective surrogate-based optimization of the crashworthiness of a hybrid impact absorber," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 88, pp. 46–54, 2014.
- [10] S. Tabacu and C. Ducu, "An analytical solution for the estimate of the mean crushing force of structures with polygonal and star-shaped cross-sections subjected to axial load," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 161–162, no. 105010, 2019.
- [11] S. Tabacu, A. Hadar, D. Marinescu, D. Marin, G. Dinu, and D. S. Ionescu, "Structural performances of thermoplastic manufactured parts," *Mater. Plast.*, vol. 45, no. 1, pp. 113–118, 2008.
- [12] S. Tabacu and C. Ducu, "Experimental testing and numerical analysis of FDM multi-cell inserts and hybrid structures," *Thin-Walled Struct.*, vol. 129, pp. 197–212, 2018.
- [13] S. Tabacu, S. Parlac, C. Tomus, and V. Baba, "Computational modelling of vehicle interior components for impact applications: Moulding residual stress," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 17, no. 6, pp. 591–605, 2012.
- [14] S. Tabacu, "Axial crushing of circular structures with rectangular multi-cell insert," *Thin-Walled Struct.*, vol. 95, pp. 297–309, 2015.
- [15] S. Tabacu, "Analysis of circular tubes with rectangular multi-cell insert under oblique impact loads," *Thin-Walled Struct.*, vol. 106, pp. 129–147, 2016.
- [16] S. Tabacu, A. Hadăr, D. Marinescu, M. Iănescu, and V. Balasoiu, "Numerical procedures for the improvement of the structural response of thermoplastic manufactured parts," *Mater. Plast.*, vol. 46, no. 2, pp. 192–197, 2009.
- [17] S. Tabacu, I. Tabacu, and A. Hadar, "Computational modelling of vehicle interior components for impact applications: Thickness analysis," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 16, no. 4, pp. 421–

438, 2011.

- [18] J. M. Alexander, "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, vol. 13, no. 1, pp. 10–15, 1960.
- [19] W. Abramowicz and N. Jones, "Dynamic axial crushing of circular tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 263–281, Jan. 1984.
- [20] W. Abramowicz; N. Jones, "Dynamic axial crushing of circular tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 2, pp. 263–281, 1984.
- [21] A. A. A. Alghamdi, "Collapsible impact energy absorbers: An overview," *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, pp. 181–213, 2001.
- [22] N. K. Gupta and Venkatesh, "A study of the influence of diameter and wall thickness of cylindrical tubes on their axial collapse," *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, pp. 290–300, 2006.
- [23] W. Abramowicz, "The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns," *Int. J. Impact Eng.*, pp. 309–317, 1983.
- [24] T. Wierzbicki, "Crushing analysis of metal honeycombs," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 157–174, 1983.
- [25] X. Zhang and G. Cheng, "A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns," *Int. J. Impact Eng.*, 2007.
- [26] M. R.-R. Ali Najafi, "Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes," *British Medical Journal*. 2010.
- [27] X. Zhang, G. Cheng, and H. Zhang, "Theoretical prediction and numerical simulation of multi-cell square thin-walled structures," *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, pp. 1185–1191, 2006.
- [28] T. Wierzbicki, S. U. Bhat, W. Abramowicz, and D. Brodtkin, "Alexander revisited-A two folding elements model of progressive crushing of tubes," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 29, no. 24, pp. 3269–3288, 1992.
- [29] W. Abramowicz; N. Jones, "Dynamic axial crushing of square tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 179–208, 1984.
- [30] W. Abramowicz; T. Wierzbicki, "On the crushing mechanics of thin-walled structures," *J. Appl. Mech.*, vol. 50, no. 10, p. 727, 1983.
- [31] S. R. Guillow, G. Lu, and R. H. Grzebieta, "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, no. 9, pp. 2103–2123, Sep. 2001.
- [32] S. R. Reid, "Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 35, no. 12, pp. 1035–1052, 1993.
- [33] C. R. Calladine, "Inelastic buckling of columns. The effect of imperfections," *Int. J. Mech. Sci.*, pp. 593–604, 1972.
- [34] D. Karagiozova and N. Jones, "Dynamic elastic-plastic buckling of circular cylindrical shells under axial impact," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 37, pp. 2005–2034, 2000.
- [35] A. Tsouknidas, M. Pantazopoulos, I. Katsoulis, D. Fasnakis, S. Maropoulos, and N. Michailidis, "Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling," *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 41–44, 2016.
- [36] X. W. Zhang, Q. D. Tian, and T. X. Yu, "Axial crushing of circular tubes with buckling initiators," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, pp. 788–797, 2009.
- [37] D. Karagiozova and N. Jones, "On the mechanics of the global bending collapse of circular tubes under dynamic axial load-Dynamic buckling transition," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 35, pp. 397–424, 2008.
- [38] D. Karagiozova, M. Alves, and N. Jones, "Inertia effects in axisymmetrically deformed cylindrical shells under axial impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 24, pp. 1083–1115, 2000.

- [39] A. Baroutaji, M. Sajjia, and A. G. Olabi, "On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments," *Thin-Walled Struct.*, vol. 118, pp. 137–163, 2017.
- [40] B. P. Dipaolo and J. G. Tom, "A study on an axial crush configuration response of thin-wall, steel box components: The quasi-static experiments," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, pp. 7752–7775, 2006.
- [41] W. Abramowicz; N. Jones, "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 243–270, 1986.
- [42] W. Chen and T. Wierzbicki, "Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption," *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, pp. 287–306, 2001.
- [43] X. Zhang, G. Cheng, Z. You, and H. Zhang, "Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns," *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, pp. 737–746, 2007.
- [44] C. Qi, S. Yang, and F. Dong, "Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading," vol. 59, pp. 103–119, 2012.
- [45] O. Fyllingen, E. C. Langmoen, M. Langseth, and O. S. Hopperstad, "Transition from progressive buckling to global bending of square aluminium tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 48, pp. 24–32, 2012.
- [46] J. Song, Y. Chen, and G. Lu, "Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 66, pp. 239–248, 2013.
- [47] A. Niknejad, M. M. Abedi, G. H. Liaghat, and M. Z. Nejad, "Absorbed energy by foam-filled quadrangle tubes during the crushing process by considering the interaction effects," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 376–391, 2015.
- [48] X. Zhang and H. Zhang, "Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression," *Thin-Walled Struct.*, vol. 68, pp. 156–163, 2013.
- [49] X. Zhang and H. Zhang, "Axial crushing of circular multi-cell columns," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 65, pp. 110–125, 2014.
- [50] A. Jusuf, T. Dirgantara, L. Gunawan, and I. S. Putra, "Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 78, pp. 34–50, 2015.
- [51] X. Zhang and H. Zhang, "Some problems on the axial crushing of multi-cells," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 103, pp. 30–39, 2015.
- [52] N. K. Gupta, N. M. Sheriff, and R. Velmurugan, "A study on buckling of thin conical frusta under axial loads," *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, pp. 986–996, 2006.
- [53] A. A. Nia and J. H. Hamedani, "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries," *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, pp. 946–954, 2010.
- [54] Z. Fan, G. Lu, and K. Liu, "Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes," *Eng. Struct.*, vol. 55, pp. 80–89, 2013.
- [55] M. Kucewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, A. Popławski, and P. Płatek, "Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures," *Mater. Des.*, vol. 142, pp. 177–189, 2018.
- [56] L. Chen *et al.*, "Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load," *Thin-Walled Struct.*, vol. 127, pp. 333–343, 2018.
- [57] Z. Fan, G. Lu, T. X. Yu, and K. Liu, "Axial crushing of triangular tubes," *Int. J. Appl. Mech.*, vol. 5, no. 1, 2013.
- [58] Y. Liu, "Collapse behaviour and simplified modeling of triangular cross-section columns," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 71–78, 2009.

- [59] M. Ali, E. Ohioma, F. Kraft, and K. Alam, "Theoretical, numerical, and experimental study of dynamic axial crushing of thin walled pentagon and cross-shape tubes," *Thin-Walled Struct.*, 2015.
- [60] J. Song, Y. Zhou, and F. Guo, "A relationship between progressive collapse and initial buckling for tubular structures under axial loading," *Int. J. Mech. Sci.*, 2013.
- [61] R. J. Hayduk and T. Wierzbicki, "Extensional collapse modes of structural members," *Comput. Struct.*, vol. 18, no. 3, pp. 447–458, 1984.
- [62] **P. PREDOIU**, "The collapse modes classification of tubes with different shapes of the cross-section," *Univ. Pitesti. Sci. Bull. - Automot. Ser.*, vol. 31, no. 31, pp. 1–10, 2021.
- [63] S. Eksi and K. Genel, "Bending response of hybrid composite tubular beams," *Thin-Walled Struct.*, vol. 73, pp. 329–336, 2013.
- [64] G. Q. Jin, W. D. Li, C. F. Tsai, and L. Wang, "Adaptive tool-path generation of rapid prototyping for complex product models," *J. Manuf. Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 154–164, 2011.
- [65] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, D. Ahmad, A. Aidy, A. Khalina, and M. Jonoobi, "Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 10, pp. 4857–4865, 2011.
- [66] G. Li, Z. Zhang, G. Sun, F. Xu, and X. Huang, "Crushing analysis and multiobjective optimization for functionally graded foam-filled tubes under multiple load cases," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 89, pp. 439–452, 2014.
- [67] F. Djamaluddin, S. Abdullah, A. K. Ariffin, and Z. M. Nopiah, "Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions," *Thin-Walled Struct.*, vol. 87, pp. 1–11, 2015.
- [68] C. Reuter and T. Tröster, "Crashworthiness and numerical simulation of hybrid aluminium-CFRP tubes under axial impact," *Thin-Walled Struct.*, vol. 117, pp. 1–9, 2017.
- [69] S. S. Hsu and N. Jones, "Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 9, no. 2, pp. 195–217, 2004.
- [70] M. D. Goel, "Deformation, energy absorption and crushing behavior of single-, double- and multi-wall foam filled square and circular tubes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 90, pp. 1–11, 2015.
- [71] Y. Xiang, T. Yu, and L. Yang, "Comparative analysis of energy absorption capacity of polygonal tubes, multi-cell tubes and honeycombs by utilizing key performance indicators," *Mater. Des.*, 2016.
- [72] T. X. Yu, Y. Xiang, M. Wang, and L. Yang, "Key performance indicators of tubes used as energy absorbers," *Key Eng. Mater.*, vol. 626, pp. 155–161, 2015.
- [73] A. Alavi Nia and M. Parsapour, "Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections," *Thin-Walled Struct.*, vol. 74, pp. 155–165, 2014.
- [74] **C. P. Predoiu**, R. F. Negrea, S. Tabacu, and D. Popa, "Analysis of theoretical , experimental results of 3D tetra-anti- chiral structure and circular cross-section tube structure under compressive load," *Proc. 1st Int. Conf. Adv. Res. Eng. CARE 2020*, vol. 1, pp. 201–208, 2020.
- [75] X. Ren, R. Das, P. Tran, T. D. Ngo, and Y. M. Xie, "Auxetic metamaterials and structures: A review," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 2, pp. 1–38, 2018.
- [76] S. Tabacu, R. F. Negrea, and D. Negrea, "Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads," *Thin-Walled Struct.*, vol. 155, no. June, p. 106929, 2020.
- [77] A. G. Kolpakov, "Determination of the average characteristics of elastic frameworks," *J. Appl.*

- Math. Mech.*, vol. 49, no. 6, pp. 739–745, 1985.
- [78] R. Lakes, N. Variability, A. Physcscs, W. Meteorologica, and O. Symposium, “Foam Structures with a Negative Poisson’s Ratio,” *Science (80-.)*, vol. 235, no. 1987, pp. 1038–1041, 1987.
 - [79] K. E. Evans, M. A. Nkansah, I. J. Hutchinson, and S. C. Rogers, “Molecular network design,” *Nature*, vol. 353, no. 6340, p. 124, 1991.
 - [80] M. N. Publishers and R. May, “An isotropic three-dimensional structure with Poisson’s ratio = -1,” *J. Elast.*, vol. 15, no. 4, pp. 427–430, 1985.
 - [81] K. W. Wojciechowski, “Two-dimensional isotropic system with a negative poisson ratio,” *Phys. Lett. A*, vol. 137, no. 1–2, pp. 60–64, 1989.
 - [82] R. Lakes, “Cellular solid structures with unbounded thermal expansion,” *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 15, no. 6, pp. 475–477, 1996.
 - [83] D. Mousanezhad, B. Haghpahan, R. Ghosh, A. M. Hamouda, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, “Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach,” *Theor. Appl. Mech. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–96, 2016.
 - [84] J. N. Grima and K. E. Evans, “Auxetic behavior from rotating squares,” *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 19, no. 17, pp. 1563–1565, 2000.
 - [85] J. N. Grima, R. Gatt, and P. S. Farrugia, “On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures,” *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 245, no. 3, pp. 511–520, 2008.
 - [86] K. Bertoldi, P. M. Reis, S. Willshaw, and T. Mullin, “Negative poisson’s ratio behavior induced by an elastic instability,” *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 361–366, 2010.
 - [87] A. Alderson, K. L. Alderson, G. Chirima, N. Ravirala, and K. M. Zied, “The in-plane linear elastic constants and out-of-plane bending of 3-coordinated ligament and cylinder-ligament honeycombs,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 7, pp. 1034–1041, 2010.
 - [88] Y. Cho *et al.*, “Engineering the shape and structure of materials by fractal cut,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 111, no. 49, pp. 17390–17395, 2014.
 - [89] T. A. M. Hewage, K. L. Alderson, A. Alderson, and F. Scarpa, “Double-Negative Mechanical Metamaterials Displaying Simultaneous Negative Stiffness and Negative Poisson’s Ratio Properties,” *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 46, pp. 10323–10332, 2016.
 - [90] C. S. Ha, M. E. Plesha, and R. S. Lakes, “Chiral three-dimensional isotropic lattices with negative Poisson’s ratio,” *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 253, no. 7, pp. 1243–1251, 2016.
 - [91] W. Wu *et al.*, “Mechanical properties of hierarchical anti-tetrachiral metastructures,” *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 16, pp. 18–32, 2017.
 - [92] T. Frenzel, M. Kadic, and M. Wegener, “Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist,” *Science (80-.)*, vol. 358, no. 6366, pp. 1072–1074, 2017.
 - [93] W. Wu *et al.*, “Deformation mechanism of innovative 3D chiral metamaterials,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 3–12, 2018.
 - [94] X. Ning *et al.*, “Mechanically active materials in three-dimensional mesostructures,” *Sci. Adv.*, vol. 4, no. 9, 2018.
 - [95] Y. Prawoto, “Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson’s ratio,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 58, pp. 140–153, 2012.
 - [96] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, and L. Wu, “Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 94, pp. 114–173, 2018.
 - [97] C. Korner and Y. Liebold-Ribeiro, “A systematic approach to identify cellular auxetic materials,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 2, p. 25013, 2015.
 - [98] C. Huang and L. Chen, “Negative Poisson’s Ratio in Modern Functional Materials,” *Adv.*

Mater., vol. 28, no. 37, pp. 8079–8096, 2016.

- [99] A. Slann, W. White, F. Scarpa, K. Boba, and I. Farrow, “Cellular plates with auxetic rectangular perforations,” *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 252, no. 7, pp. 1533–1539, 2015.
- [100] L. Mizzi, K. M. Azzopardi, D. Attard, J. N. Grima, and R. Gatt, “Auxetic metamaterials exhibiting giant negative Poisson’s ratios,” *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.*, vol. 9, no. 7, pp. 425–430, 2015.
- [101] A. Rafsanjani and D. Pasini, “Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs,” *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 9, pp. 291–296, 2016.
- [102] K. Billon *et al.*, “Mechanics and band gaps in hierarchical auxetic rectangular perforated composite metamaterials,” *Compos. Struct.*, vol. 160, pp. 1042–1050, 2017.
- [103] L. Mizzi *et al.*, “Mechanical metamaterials with star-shaped pores exhibiting negative and zero Poisson’s ratio,” *Mater. Des.*, vol. 146, no. 2017, pp. 28–37, 2018.
- [104] K. K. Dudek *et al.*, “On the dynamics and control of mechanical properties of hierarchical rotating rigid unit auxetics,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. April, pp. 65–69, 2017.
- [105] S. Tabacu, **P. Predoiu**, and 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.*, vol. 199, no. March, p. 106405, 2021.
- [106] R. Hamzehei, S. Rezaei, J. Kadkhodapour, A. P. Anaraki, and A. Mahmoudi, “2D triangular anti-trichiral structures and auxetic stents with symmetric shrinkage behavior and high energy absorption,” *Mech. Mater.*, vol. 142, no. December 2019, p. 103291, 2020.
- [107] S. R. Guillow, G. Lu, and R. H. Grzebieta, “Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, pp. 2103–2123, 2001.
- [108] K. R. F. Andrews, G. L. England, and E. Ghani, “Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading,” *Int. J. Mech. Sci.*, 1983.
- [109] **C. P. Predoiu**, R. F. Negrea, S. Tabacu, and D. Popa, “Analysis of the collapse mode classification in case of circular tubes,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 997, no. 1, 2020.
- [110] **P. Predoiu**, R. F. Negrea, D. Popa, and S. Tabacu, “Analysis Methodology of Experimental Results in Case of a Cockpit Module Under Impact Load,” *30th SIAR Int. Congr. Automot. Transp. Eng.*, pp. 573–580, 2020.
- [111] A. C. Costica Atanasiu, Traian Canta, “Inercarea materialelor - Incercari distructive ale metalelor,” vol. 1, pp. 1–412, 1982.
- [112] N. Faur, “Mecanica Materialelor - notiuni fundamentale, statica, solicitari simple,” vol. 1, pp. 69–123, 2005.
- [113] ASTM E8, “ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1,” *Annu. B. ASTM Stand.* 4, no. C, pp. 1–27, 2010.
- [114] IDM Instrument, “Electronic Extensometer Specification.”
- [115] G. D. Calin Hilohi, Marin Untaru, Iosif Soare, “Metode si Mijloace de incercare a automobilului.pdf.” Ed. Tehnica, 1982.
- [116] W. Abramowicz and N. Jones, “Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically,” *Int. J. Impact Eng.*, 1997.
- [117] **C. P. Predoiu**, S. Tabacu, R. F. Negrea, and D. Popa, “Analysis of theoretical and experimental results of circular cross-section tubes with different diameter sectors,” *Inov. Manuf. Eng. Energy Int. Conf.*, 2021.
- [118] K. E. Evans and A. Alderson, “Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking!,” *Adv. Mater.*, vol. 12, no. 9, pp. 617–628, 2000.
- [119] Q. Zhang *et al.*, “Bioinspired engineering of honeycomb structure - Using nature to inspire

- human innovation,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 74, pp. 332–400, 2015.
- [120] J. U. Surjadi *et al.*, “Mechanical metamaterials and their engineering applications,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 21, no. 3, pp. 1–37, 2019.
 - [121] N. S. Ha and G. Lu, “A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 181, pp. 1–95, 2020.
 - [122] X. Yuan *et al.*, “Recent progress in the design and fabrication of multifunctional structures based on metamaterials,” *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 25, no. 1, p. 100883, 2021.
 - [123] H. M. A. Kolken and A. A. Zadpoor, “Auxetic mechanical metamaterials,” *RSC Adv.*, vol. 7, no. 9, pp. 5111–5129, 2017.
 - [124] J. Gao, H. Xue, L. Gao, and Z. Luo, “Topology optimization for auxetic metamaterials based on isogeometric analysis,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 352, pp. 211–236, 2019.
 - [125] P. Li *et al.*, “Customizable fabrication for auxetic graphene assembled macrofilms with high conductivity and flexibility,” *Carbon N. Y.*, vol. 162, pp. 545–551, 2020.
 - [126] J. N. Grima, L. Mizzi, K. M. Azzopardi, and R. Gatt, “Auxetic perforated mechanical metamaterials with randomly oriented cuts,” *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 385–389, 2016.
 - [127] W. Zhang, R. Neville, D. Zhang, F. Scarpa, L. Wang, and R. Lakes, “The two-dimensional elasticity of a chiral hinge lattice metamaterial,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 141–142, pp. 254–263, 2018.
 - [128] A. Alderson and K. E. Evans, “Modelling concurrent deformation mechanisms in auxetic microporous polymers,” *J. Mater. Sci.*, vol. 32, no. 11, pp. 2797–2809, 1997.
 - [129] C. W. Smith, J. N. Grima, and K. E. Evans, “Novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: Missing rib foam model,” *Acta Mater.*, vol. 48, no. 17, pp. 4349–4356, 2000.
 - [130] E. Harkati, N. Daoudi, A. Bezazi, A. Haddad, and F. Scarpa, “In-plane elasticity of a multi re-entrant auxetic honeycomb,” *Compos. Struct.*, vol. 180, pp. 130–139, 2017.
 - [131] S. Hou, T. Liu, Z. Zhang, X. Han, and Q. Li, “How does negative Poisson’s ratio of foam filler affect crashworthiness?,” *Mater. Des.*, vol. 82, pp. 247–259, 2015.
 - [132] N. Novak, M. Vesenjak, S. Tanaka, K. Hokamoto, and Z. Ren, “Compressive behaviour of chiral auxetic cellular structures at different strain rates,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 141, no. October 2019, p. 103566, 2020.
 - [133] H. Yu, W. Wu, J. Zhang, J. Chen, H. Liao, and D. Fang, “Drastic tailorable thermal expansion chiral planar and cylindrical shell structures explored with finite element simulation,” *Compos. Struct.*, vol. 210, pp. 327–338, 2019.
 - [134] T. C. Lim, “Metacomposite with auxetic and in situ sign reversible thermal expansivity upon temperature fluctuation,” *Compos. Commun.*, vol. 19, no. July 2019, pp. 30–36, 2020.
 - [135] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, S. Morganti, A. Prota, and A. Reali, “Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures,” *Compos. Struct.*, vol. 105, pp. 240–255, 2013.
 - [136] F. Sun, C. Lai, H. Fan, and D. Fang, “Crushing mechanism of hierarchical lattice structure,” *Mech. Mater.*, vol. 97, pp. 164–183, 2016.
 - [137] S. Kiernan and M. D. Gilchrist, “Towards a virtual functionally graded foam: Defining the large strain constitutive response of an isotropic closed cell polymeric cellular solid,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 48, no. 11, pp. 1373–1386, 2010.
 - [138] L. L. Hu, Z. R. Luo, Z. Y. Zhang, M. K. Lian, and L. S. Huang, “Mechanical property of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 163, no. November 2018, pp. 107–120, 2019.

- [139] M. Lei *et al.*, “3D Printing of auxetic metamaterials with digitally reprogrammable shape,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, pp. 22768–22776, 2019.
- [140] H. Ebrahimi, D. Mousanezhad, H. Nayeib-Hashemi, J. Norato, and A. Vaziri, “3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology,” *Mater. Des.*, vol. 145, pp. 226–231, May 2018.
- [141] C. M. González-Henríquez, M. A. Sarabia-Vallejos, and J. Rodríguez-Hernandez, “Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 94, pp. 57–116, 2019.
- [142] C. Hu, J. Dong, J. Luo, Q. H. Qin, and G. Sun, “3D printing of chiral carbon fiber reinforced polylactic acid composites with negative Poisson’s ratios,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 201, no. June, p. 108400, 2020.
- [143] Y. Jiang, B. Rudra, J. Shim, and Y. Li, “Limiting strain for auxeticity under large compressive Deformation: Chiral vs. re-entrant cellular solids,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 162, pp. 87–95, 2019.
- [144] H. Yang and L. Ma, “Design and characterization of axisymmetric auxetic metamaterials,” *Compos. Struct.*, vol. 249, no. May, p. 112560, 2020.
- [145] I. Ullah, M. Brandt, and S. Feih, “Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures,” *Mater. Des.*, vol. 92, pp. 937–948, 2016.
- [146] N. Novak, L. Krstulović-Opara, Z. Ren, and M. Vesenjak, “Compression and shear behaviour of graded chiral auxetic structures,” *Mech. Mater.*, vol. 148, p. 103524, 2020.
- [147] J. Liu, W. Chen, H. Hao, and Z. Wang, “In-plane crushing behaviors of hexagonal honeycombs with different Poisson’s ratio induced by topological diversity,” *Thin-Walled Struct.*, no. June, p. 107223, 2020.
- [148] D. Qi, Q. Lu, C. W. He, Y. Li, W. Wu, and D. Xiao, “Impact energy absorption of functionally graded chiral honeycomb structures,” *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 32, p. 100568, 2019.
- [149] C. Qi, F. Jiang, C. Yu, and S. Yang, “In-plane crushing response of tetra-chiral honeycombs,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 130, no. April, pp. 247–265, 2019.
- [150] Q. Wang, Z. Yang, Z. Lu, and X. Li, “Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression,” *Mater. Des.*, vol. 186, p. 108226, 2020.
- [151] Y. Guo *et al.*, “Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 98, p. 105662, 2020.
- [152] Q. Gao, W. H. Liao, and C. Huang, “Theoretical predictions of dynamic responses of cylindrical sandwich filled with auxetic structures under impact loading,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 107, p. 106270, 2020.
- [153] W. Lee *et al.*, “Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube,” *Compos. Struct.*, vol. 208, pp. 836–846, 2019.
- [154] X. Zhang and H. Zhang, “Optimal design of functionally graded foam material under impact loading,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 68, pp. 199–211, 2013.
- [155] B. Koohbor and A. Kidane, “Design optimization of continuously and discretely graded foam materials for efficient energy absorption,” *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 151–161, 2016.
- [156] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018.
- [157] H. Li, Z. Luo, L. Gao, and P. Walker, “Topology optimization for functionally graded cellular composites with metamaterials by level sets,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 328, pp. 340–364, 2018.

- [158] H. Yang, B. Wang, and L. Ma, "Designing hierarchical metamaterials by topology analysis with tailored Poisson's ratio and Young's modulus," *Compos. Struct.*, vol. 214, no. February, pp. 359–378, 2019.
- [159] L. Mizzi, D. Attard, R. Gatt, P. Farrugia, and J. N. Grima, "An analytical and finite element study on the mechanical properties of irregular hexachiral honeycombs," *Smart Mater Struct*, vol. 27, p. 105016, 2018.
- [160] S. Linforth, T. Ngo, P. Tran, D. Ruan, and R. Odish, "Investigation of the auxetic oval structure for energy absorption through quasi-static and dynamic experiments," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 147, p. 103741, 2021.
- [161] L. Wei, X. Zhao, Q. Yu, and G. Zhu, "A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength," *Thin-Walled Struct.*, vol. 149, no. December 2019, p. 106623, 2020.
- [162] B. A. Lewis, "Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147," *Fhwa-Hrt-04-095*, no. November, p. 68, 2004.
- [163] L. Dev, L. I. S. Oftware, and T. E. C. Orporation, *Theory Manual 08/30/17*, vol. 17. .
- [164] N. Novak, K. Hokamoto, M. Vesenjaj, and Z. Ren, "Mechanical behaviour of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods at high strain rates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 122, no. August, pp. 83–90, 2018.
- [165] J. Huang, Q. Zhang, F. Scarpa, Y. Liu, and J. Leng, "In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 72–82, 2017.
- [166] L. L. Hu, Z. R. Luo, and Q. Y. Yin, "Negative Poisson's ratio effect of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation," *Thin-Walled Struct.*, vol. 141, no. January, pp. 283–292, 2019.
- [167] S. Tabacu and C. Ducu, "Numerical investigations of 3D printed structures under compressive loads using damage and fracture criterion: Experiments, parameter identification, and validation," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 39, p. 100775, 2020.
- [168] D. Prall and R. S. Lakes, "Properties of chiral honeycombe with Poisson's ratio of -1," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 39, no. 3, pp. 305–314, 1997.
- [169] R. Zhong, M. Fu, Q. Yin, O. Xu, and L. Hu, "Special characteristics of tetrachiral honeycombs under large deformation," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 169, pp. 166–176, 2019.
- [170] Q. Gao, C. A. Tan, G. Hulbert, and L. Wang, "Geometrically nonlinear mechanical properties of auxetic double-V microstructures with negative Poisson's ratio," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 80, p. 103933, 2020.
- [171] S. Khakalo, V. Balobanov, and J. Niiranen, "Modelling size-dependent bending, buckling and vibrations of 2D triangular lattices by strain gradient elasticity models: Applications to sandwich beams and auxetics," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 127, pp. 33–52, 2018.
- [172] T. Wang, L. Wang, Z. Ma, and G. M. Hulbert, "Elastic analysis of auxetic cellular structure consisting of re-entrant hexagonal cells using a strain-based expansion homogenization method," *Mater. Des.*, vol. 160, pp. 284–293, 2018.
- [173] J. Simpson and Z. Kazanci, "Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices," *Thin-Walled Struct.*, vol. 150, no. February, p. 106676, 2020.
- [174] Y. J. Lee *et al.*, "Auxetic elastomers: Mechanically programmable meta-elastomers with an unusual Poisson's ratio overcome the gauge limit of a capacitive type strain sensor," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 31, p. 100516, 2019.
- [175] W. Wu, X. Song, J. Liang, R. Xia, G. Qian, and D. Fang, "Mechanical properties of anti-tetrachiral auxetic stents," *Compos. Struct.*, vol. 185, no. November 2017, pp. 381–392, 2018.