



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ
„GHEORGHE ASACHI” DIN
IAȘI**



REZUMAT

STUDII ASUPRA UNOR MATERIALE MODERNE PENTRU STOCAREA HIDROGENULUI CU APLICAȚII ÎN TRANSPORTURI

**Doctorand:
ANDREI RĂȚOI**

**Conducător de doctorat :
Prof.Univ.Dr.Ing. CORNELIU MUNTEANU**

IAȘI, 2025

STUDII ASUPRA UNOR MATERIALE MODERNE PENTRU STOCAREA HIDROGENULUI CU APLICAȚII ÎN TRANSPORTURI

ANDREI RĂȚOI
Domeniul Ingineria Materialelor

Președinte comisie doctorat:	Prenume Nume
Conducător de doctorat:	Prof.univ.dr.ing. Munteanu Corneliu
Referenți oficiali:	Prenume Nume Prenume Nume Prenume Nume

Comisia de îndrumare/Comisia de îndrumare și integritate academică:	Prof.univ.dr.ing. Munteanu Corneliu Prof.univ.dr.ing. Rakoși Edward Conf.dr.ing. Ciofu Ciprian Ș.l.dr.ing. Ursescu Gabriel
--	---

Cuprins

CUPRINS	1
CAPITOLUL 1: INTRODUCERE.....	3
1.1. IMPORTANȚA SUBIECTULUI CERCETĂRII	3
1.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII.....	4
CAPITOLUL 2: TEHNOLOGII DE STOCARE A HIDROGENULUI.....	6
CAPITOLUL 3: MATERIALE AVANSATE PENTRU STOCĂRILE DE HIDROGEN.....	14
CAPITOLUL 4: METODE ȘI INSTALAȚII.....	17
4.1. METODOLOGIA DE CERCETARE	17
4.2. INSTALAȚII.....	18
CAPITOLUL 5: REZULTATE ȘI DISCUȚII	19
5.1. SISTEM DE STOCARE DE HIDROGEN CU TUB SINGULAR.....	19
5.1.1. IMPACTUL GEOMETRIEI TUBULUI CAPILAR ASUPRA STĂRII DE TENSIUNE.....	19
5.1.2. CAPACITATEA GRAVIMETRICĂ ȘI VOLUMETRICĂ TEORETICĂ PENTRU UN SINGUR TUB CAPILAR.....	23
5.1.3. ANALIZA TUBULUI CAPILAR DIN STICLĂ LA MICROSCOPUL OPTIC ȘI ELECTRONIC.....	26
5.1.4. ANALIZA FEĂ A DEFECTELOR.....	28
5.1.5. ANALIZA STRUCTURII ALTOR POTENȚIALE MATERIALE LA MICROSCOP	30
5.1.6. TESTE DE REZISTENȚĂ LA TRACȚIUNE A MATERIALELOR .	32
5.1.7. PREDICȚIA PRESIUNII DE SPARGERE	34
5.1.8. CAPACITATEA GRAVIMETRICĂ ȘI VOLUMETRICĂ A PROTOTIPURILOR REALE	35
5.2. SISTEM DE STOCARE DE HIDROGEN CU ARANJAMENTE DE TUBURI CAPILARE	35
5.2.1. IMPACTUL GEOMETRIEI ARANJAMENTULUI ASUPRA TENSIUNII.....	36
5.2.2. ANALIZA ARANJAMENTELOR DE TUBURI LA MICROSCOP .	38

5.2.3. PROIECTAREA SISTEMULUI DE STOCARE DE HIDROGEN	39
5.3. APLICAȚII	40
CAPITOLUL 6: CONCLUZII.....	43
6.1. CONCLUZII FINALE	43
6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE.....	43
1.1. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	44
BIBLIOGRAFIE	46
ANEXA 1 – LISTA PUBLICAȚIILOR ORIGINALE ALE	
AUTORULUI.....	49

Capitolul 1: Introducere

1.1. IMPORTANȚA SUBIECTULUI CERCETĂRII

Societatea actuală, dominată de consum și creșterea continuă a Produsului Intern Brut (PIB), determină o cerere tot mai mare de energie, satisfăcută majoritar din combustibili fosili, cu impact negativ asupra mediului, prin emisii semnificative de gaze cu efect de seră [1]. Se estimează că în 2025 combustibilii fosili vor reprezenta 83% din consumul global de energie, iar în 2050 circa 66% [1]. Totodată, rezervele actuale ar ajunge pentru aproximativ 139 ani (cărbune), 56 ani (petrol) și 49 ani (gaze naturale) [2]. În încercarea de a limita creșterea temperaturii globale sub 2°C, Acordul de la Paris (2015) a stabilit obiective ambițioase [3], dar rapoartele recente arată că aceste ținte riscă să fie depășite [4].

Distribuția emisiilor globale de CO₂ evidențiază sectoarele principale: producția de electricitate și căldură (38%), transportul (21%), industria (25%), clădirile rezidențiale/comerciale (9%) și agricultura (7%) [5]. Dintre acestea, transportul este un domeniu-cheie pentru reducerea emisiilor. Deși în 2025 vehiculele pe benzină/diesel domină piața, se prevede o creștere semnificativă a vehiculelor electrice (BEV) și cu hidrogen (FCEV), ajungând ca acestea să dețină majoritatea pieței până în 2050 [6]. Uniunea Europeană a stabilit deja ținte stricte de reducere a emisiilor pentru autoturisme: 49,5 g CO₂/km până în 2030 și 0 g CO₂/km din 2035 [7].

Hidrogenul, ca sursă energetică curată și versatilă, poate contribui semnificativ la decarbonizarea transporturilor, având o densitate energetică gravimetrică ridicată (120 MJ/kg) [8]. Totuși, provocările majore rămân legate de densitatea volumetrică scăzută (8 MJ/L) și de permeabilitatea crescută a moleculelor de H₂ [9]. Astfel, este necesară dezvoltarea unor materiale inovatoare care să

asigure atât o capacitate ridicată de stocare, cât și siguranță la presiuni mari.

Departamentul de Energie al SUA (DOE) a stabilit ținte tehnice clare pentru 2025: 1,8 kWh/kg (capacitate gravimetrică), 1,3 kWh/L (capacitate volumetrică) și costuri reduse la 9 USD/kWh, cu obiectiv final de 2,2 kWh/kg, 1,7 kWh/L și 8 USD/kWh [10]. Aceste obiective reflectă direcția clară de dezvoltare tehnologică necesară pentru adoptarea pe scară largă a hidrogenului în transporturi.

Întrebarea principală pe care această teză o adresează este:

Ce materiale moderne pot fi utilizate pentru a îmbunătăți capacitatea și siguranța stocării hidrogenului comprimat în aplicațiile din domeniul transporturilor?

Prin abordarea acestei problematici, teza contribuie la identificarea de soluții pentru tranziția către sisteme energetice sustenabile, aliniate cu obiectivele globale de reducere a emisiilor poluante.

1.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII

Obiectivul principal al prezentei cercetări este investigarea și identificarea materialelor moderne și a soluțiilor constructive optimizate pentru sistemele de stocare a hidrogenului, care să îmbunătățească atât capacitatea de stocare, cât și siguranța în aplicațiile de transport la bordul vehiculelor. Acest obiectiv general este susținut prin următoarele **obiective specifice**:

Obiectivul 1 – Oferirea unei evaluări cuprinzătoare a tehnologiilor existente de stocare a hidrogenului, identificând limitările acestora în termeni de capacitate gravimetrică și volumetrică.

Obiectivul 2 – Selectarea unei tehnologii de stocare care prezintă oportunitatea de a fi îmbunătățită în cadrul cercetării actuale.

Obiectivul 3 – Oferirea unei evaluări cuprinzătoare a materialelor existente în ceea ce privește rezistența și densitatea acestora.

Obiectivul 4 – Selectarea unei serii de materiale inovative care prezintă un potențial ridicat de a crește capacitatea de stocare a hidrogenului.

Obiectivul 5 – Dezvoltarea unui model matematic pentru a evalua rezistența teoretică de stocare a rezervorului de hidrogen sub presiune.

Obiectivul 6 – Dezvoltarea unui model matematic pentru a evalua capacitățile gravimetrică și volumetrică ale soluției de stocare a hidrogenului alese.

Obiectivul 7 – Atingerea minim a țintei DOE 2025 pentru capacitățile de stocare cu materialele identificate.

Obiectivul 8 – Identificarea și analiza defectelor potențiale ale materialelor prin microscopie optică și electronică.

Obiectivul 9 – Evaluarea impactului defectelor asupra rezistenței dispozitivului de stocare de hidrogen.

Obiectivul 10 – Realizarea testelor de tracțiune ale materialelor selectate pentru a evalua diferențele între rezistența teoretică și cea reală.

Obiectivul 11 – Publicarea a minim 2 lucrări Q1 indexate în Web of Science pentru a disemina rezultatele.

Obiectivul 12 – Identificarea provocărilor nerezolvate în domeniul stocării hidrogenului și propunerea unor domenii cheie pentru cercetări suplimentare pentru a accelera comercializarea tehnologiilor de stocare a hidrogenului la bordul mijloacelor de transport.

Capitolul 2: Tehnologii de stocare a hidrogenului

Acest capitol oferă o analiză detaliată și cuprinzătoare a tehnologiilor de ultimă generație utilizate pentru stocarea hidrogenului, concentrându-se asupra principiilor de funcționare, avantajelor, limitărilor și progreselor recente asociate fiecărei metode. Obiectivul principal al acestui capitol este de a evalua toate metodele existente de stocare a hidrogenului — inclusiv stocarea în formă gazoasă la presiuni înalte, stocarea criogenică a hidrogenului lichid și sistemele de stocare în stare solidă — prin prisma capacităților gravimetrice și volumetrice, a siguranței și a fezabilității practice.

Prin identificarea limitărilor specifice acestor tehnologii, capitolul de față oferă baza necesară înțelegerii domeniilor unde sunt imperative îmbunătățiri semnificative, fundamentând, astfel, direcțiile de cercetare abordate ulterior în cadrul acestei teze. Aceste analize vor evidenția oportunitățile de inovație și optimizare, care vor fi detaliate în etapele următoare, cu accent pe creșterea eficienței stocării hidrogenului prin utilizarea unor materiale avansate și a unor soluții constructive inovatoare.

Pentru a demara această analiză, se impune definirea unui cadru conceptual clar destinat înțelegerii principalelor tehnologii actuale de stocare a hidrogenului. Această introducere va facilita o evaluare comparativă riguroasă a avantajelor și limitărilor asociate fiecărei metode. Astfel, Figura 2.1 prezintă o clasificare generală a tehnologiilor de stocare a hidrogenului, oferind o structură logică și coerentă.

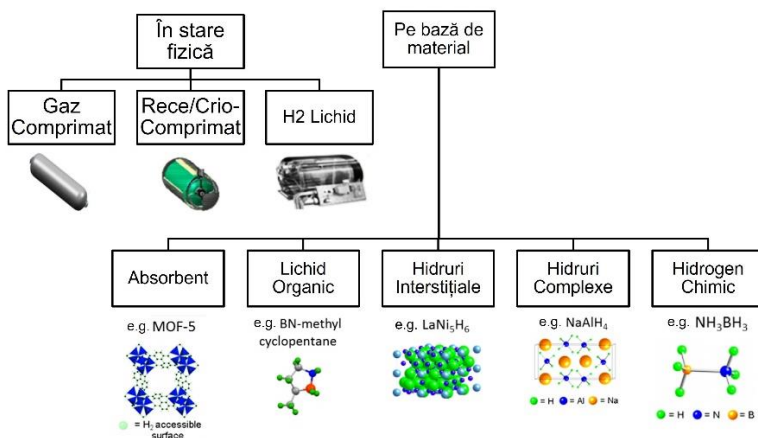


Figura 2.1. Tehnologiile principale de stocare a hidrogenului [11]

Principalele moduri de stocare a hidrogenului se împart în următoarele categorii:

1. Sisteme de stocare cu hidrogen comprimat

Stocarea hidrogenului sub formă de gaz comprimat reprezintă una dintre cele mai utilizate și viabile metode comerciale de stocare a hidrogenului, fiind aplicată în special în domeniul transportului și al sistemelor portabile de energie. Această tehnologie presupune comprimarea hidrogenului la presiuni ridicate, cuprinse între 350 și 700 bar [12], pentru a maximiza densitatea de stocare într-un volum limitat. Relația dintre presiunea de stocare, temperatură și densitatea hidrogenului este esențială pentru a determina eficiența și fezabilitatea practică a sistemului de stocare.

1.1. Rezervoare de înaltă presiune

Un rezervor de hidrogen de înaltă presiune este un recipient care stochează hidrogen la presiuni între 350 și 700 bar, fiind esențial pentru aplicații precum vehiculele cu celule de combustibil. Aceste rezervoare sunt construite din metale și materiale compozite,

precum fibra de carbon, pentru a asigura un echilibru între greutate și rezistență. Forma lor este de obicei cilindrică sau sferică, optimizând raportul volum-suprafață și includ straturi de armare pentru a rezista la impacturi și solicitări mecanice. Există patru tipuri principale de rezervoare identificate în literatură [13].

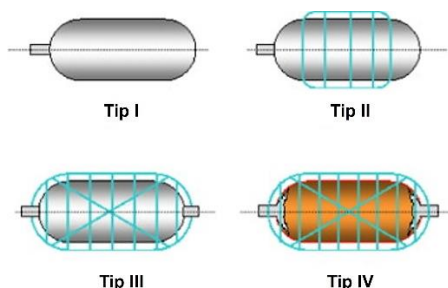


Figura 2.2. Rezervoare comune pentru stocarea hidrogenului [14]

1.2. Microsfere de sticlă

Stocarea hidrogenului în microsferă de sticlă reprezintă o abordare inovativă care oferă o soluție unică la provocările stocării hidrogenului. Această metodă utilizează sfere mici de sticlă goale ca recipiente pentru gazul de hidrogen, ilustrate în Figura 2.3, valorificând capacitatea acestora de a rezista la presiuni interne mari, oferind în același timp opțiuni de stocare ușoare și compacte.

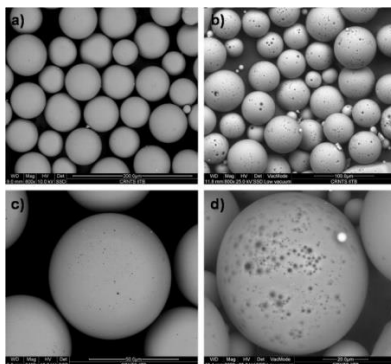


Figura 2.3. Imagine SEM cu stocare în microsferă de sticlă [15]

1.3. Tuburii capilarii din sticlă

Sistemele de aranjamente capilare, introduse de C. En [16], [17], reprezintă o alternativă interesantă la rezervoarele convenționale de tip I-IV. Acestea oferă avantaje semnificative față de soluțiile tradiționale de stocare la presiune înaltă, în principal datorită capacității lor de a maximiza utilizarea volumului disponibil pentru stocarea hidrogenului. Așa cum este ilustrat schematic în Figura 2.4, aranjamentele capilare constau în numeroase tuburi de mic diametru aranjate într-o configurație geometrică atent concepută, optimizând performanțele gravimetrice și volumetrice. Acest design inovativ permite aranjamentelor capilare să îmbunătățească eficiența stocării prin creșterea efectivă a spațiului disponibil pentru hidrogen, depășind capacitățile tehnologiilor standard de rezervoare.

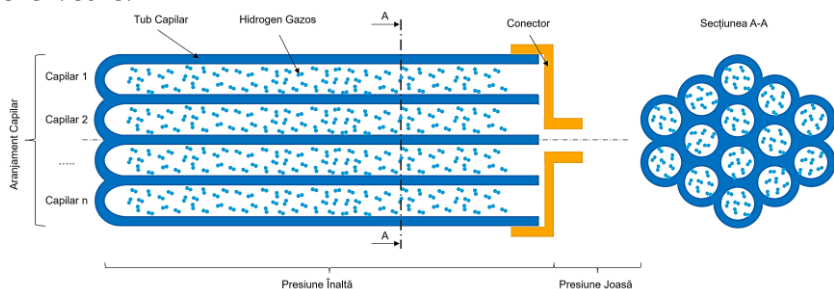


Figura 2.4. Reprezentare conceptuală a unui aranjament din tuburi capilarii [18]

Sistemele de aranjamente capilare oferă avantaje semnificative de siguranță. În caz de defectare structurală, doar hidrogenul din capilarele afectate este eliberat, localizând impactul breșei, spre deosebire de rezervoarele tradiționale, unde o rupere poate duce la eliberarea întregului stoc de hidrogen, generând riscuri mari de siguranță. Arhitectura compartimentată a aranjamentelor capilare reduce eficient aceste pericole, făcându-le o alternativă mai sigură pentru stocarea hidrogenului la presiune înaltă.

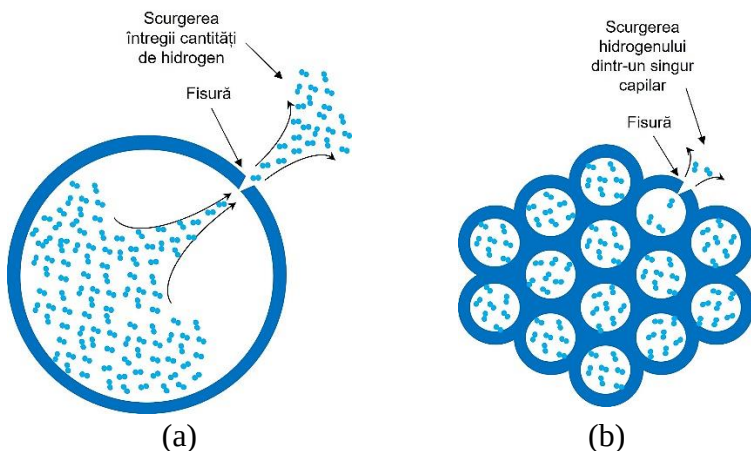


Figura 2.5. Reprezentare grafică a comportamentului rezervorului la apariția unei fisuri [18]

- (a) Rezervor de stocare a hidrogenului convențional în secțiune
- (b) Rezervor de stocare a hidrogenului cu aranjament capilar în secțiune

2. Sistem de stocare cu hidrogen criogenic

Stocarea hidrogenului criocomprimat reprezintă o abordare hibridă care combină principiile stocării criogenice și cele ale stocării la presiune înaltă pentru a obține performanțe superioare în sistemele de stocare a hidrogenului. Această tehnologie implică stocarea hidrogenului la temperaturi criogenice, de obicei în jur de 20 K, și aplicarea simultană a unor presiuni moderate până la înalte, între 200 și 700 bar. Prin integrarea celor două metode, sistemele de stocare criocomprimate urmăresc maximizarea densității hidrogenului, îmbunătățind atât capacitățile gravimetrice, cât și volumetrice de stocare.

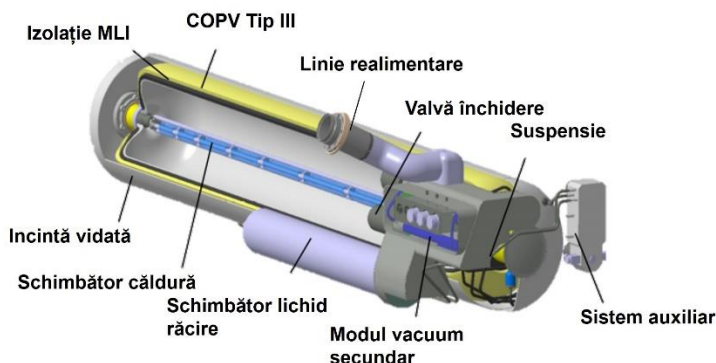


Figura 2.6. Sistem de stocare criogenic propus de BMW [19]

3. Sistem de stocare de hidrogen lichid

Stocarea hidrogenului lichid este una dintre cele mai stabilite și cercetate metode de stocare a hidrogenului, utilizată în special în aplicațiile care necesită o densitate energetică mare. Această tehnologie presupune lichefierea criogenică a gazului de hidrogen la temperaturi extrem de scăzute, în jur de 20 K, moment în care hidrogenul trece din faza gazoasă în faza lichidă. Prin răcirea hidrogenului în acest stadiu, densitatea sa volumetrică crește semnificativ, permițând stocarea unei cantități mai mari într-un volum restrâns, esențial pentru aplicații precum explorarea spațială, aviația și sistemele de transport de mare energie.

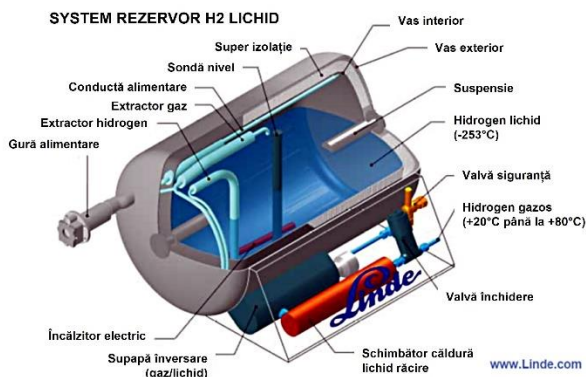


Figura 2.7. Sistem stocare hidrogen lichid [20]

4. Sisteme de stocare de hidrogen pe baza de material

Sistemele de stocare a hidrogenului pe bază de materiale utilizează diferite tipuri de materiale pentru a stoca hidrogenul la presiuni și temperaturi mai scăzute, comparativ cu metodele convenționale. Aceste sisteme includ materiale solide precum metale sau aliaje, care absorb și eliberează hidrogenul prin procese chimice sau fizice. Printre avantajele lor se numără densitatea mare de stocare și siguranța sporită, dar se confruntă cu provocări legate de costuri, eficiență și performanță la temperaturi și presiuni ridicate. Aceste tehnologii promit soluții inovative pentru stocarea hidrogenului într-un mod mai compact și eficient.

Pentru a susține evaluarea sistematică a sistemelor existente de stocare a hidrogenului, a fost realizat un rezumat, ilustrat în Figura 2.8. Acesta consolidează datele esențiale obținute din literatura de specialitate și fișele tehnice [12] - [20], incluzând soluții tehnice, capacități gravimetrice și volumetrice. Analiza a implicat gruparea soluțiilor identificate în categorii pe baza stării fizice a hidrogenului utilizat: gaz, lichid sau pe bază de materiale. Aceste grupuri sunt reprezentate vizual într-un grafic, cu capacitatea gravimetrică și volumetrică pe axe, iar formele eliptice au fost folosite pentru a grupa valorile provenite din diverse surse. Această analiză grafică servește drept instrument de bază pentru compararea tehnologiilor de stocare și pentru ghidarea selecției celor mai bune soluții pentru aplicațiile de stocare portabilă a hidrogenului. De asemenea, Figura 2.8 prezintă obiectivele stabilite de DOE pentru capacitățile de stocare [10].

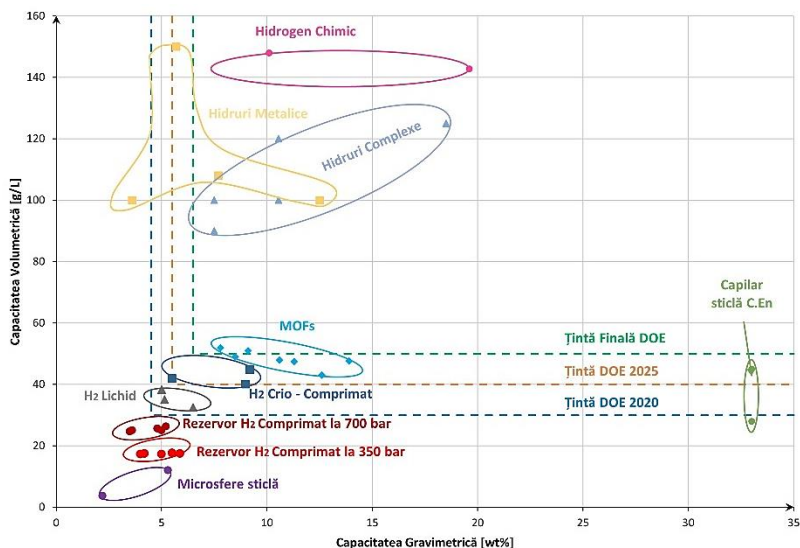


Figura 2.8. Capacitatea de stocare gravimetrică și volumetrică a diferitelor tipuri de stocări existente [21]

Sistemele de capilare din sticlă dezvoltate de C.En. au ieșit în evidență ca cele mai promițătoare tehnologii de stocare a hidrogenului, cu capacități gravimetrice de peste 30 wt% și capacități volumetrice de aproximativ 30 g/L, mult mai mari decât cele ale rezervorilor de gaz comprimat. Acestea permit stocarea hidrogenului cu o greutate mult mai mică, fiind ideale pentru aplicații de transport avansate, precum vehiculele cu celule de combustibil. Lucrarea se va concentra pe optimizarea și rafinarea acestor sisteme, pentru a le transforma într-o soluție revoluționară de stocare a hidrogenului.

Capitolul 3: Materiale avansate pentru stocările de hidrogen

Sistemele de stocare a hidrogenului sub formă de gaz comprimat se confruntă cu provocarea volumelor mari de rezervoare necesare. Pentru a depăși această limitare, este esențială creșterea presiunii de compresie, ceea ce impune utilizarea materialelor cu rezistență excepțională pentru a face față condițiilor de presiune mare. În același timp, pentru a asigura greutatea redusă a soluției de stocare—un criteriu esențial pentru aplicațiile practice—materialul ales trebuie să aibă o densitate scăzută. Astfel, optimizarea sistemelor de stocare a hidrogenului depinde de identificarea și dezvoltarea materialelor noi care oferă un echilibru optim între rezistență mare și densitate scăzută. Aceste materiale sunt esențiale pentru a răspunde provocărilor de compactitate, durabilitate și siguranță.

Pentru a evalua corect materialul cel mai potrivit pentru aplicațiile de stocare a hidrogenului, este necesară o analiză detaliată a diferitelor tipuri de materiale, având în vedere proprietățile fundamentale, cum ar fi densitatea și rezistența la tracțiune. Analiza a inclus clasele principale de materiale: oțeluri, ceramice, sticlă, polimeri și aliaje. Prima fază a evaluării a constat în identificarea și clasificarea grupurilor de materiale, urmată de colectarea unui set amplu de date tehnice din literatura de specialitate și fișele tehnice ale materialelor. Datele au inclus parametri vitali, precum tipul materialului, densitatea și rezistența la tracțiune, esențiali pentru evaluarea performanței în medii de stocare a hidrogenului la presiune mare. Materialele au fost reprezentate grafic în funcție de densitate și rezistența la tracțiune, facilitând comparația și organizarea acestora în grupuri vizualizate cu forme eliptice. Aceste elipse au scopul de a îmbunătăți vizualizarea, nefiind limite rigide.

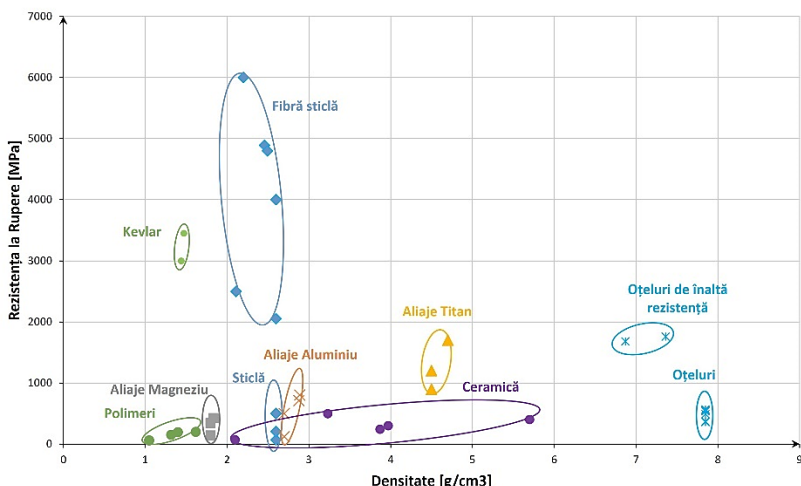


Figura 3.1. Variația densității și a rezistenței la rupere pentru diferite clase de materiale [21]

Analiza arată că polimerii și fibra de sticlă sunt materiale promițătoare pentru stocarea hidrogenului în tuburi capilarii, oferind un echilibru optim între rezistența la tracțiune și densitatea scăzută. Acestea asigură integritatea structurală necesară în medii de presiune mare, fără a contribui semnificativ la greutatea sistemului de stocare. Faza următoare va identifica tipurile specifice de polimeri și sticlă cele mai potrivite pentru aplicațiile avansate de stocare a hidrogenului.

Analiza sugerează că cele mai promițătoare tipuri de sticlă pentru stocarea hidrogenului sunt fibrele de sticlă de silice pură (quart) și S-glass, datorită rezistenței la tracțiune și densității scăzute. De asemenea, fibrele de polimeri de înaltă rezistență, precum Zylon, Kevlar și UHMWPE, sunt opțiuni excelente pentru rezistența la tracțiune. Polimeri precum Nylon, PEEK, PBI și PEI, care combină rezistența și densitatea mai mică, sunt mai potriviți pentru aplicații de stocare a hidrogenului, unde greutatea și integritatea mecanică sunt esențiale. Se recomandă cercetarea suplimentară a acestora pentru aplicații în sistemele de stocare cu aranjamente capilare.

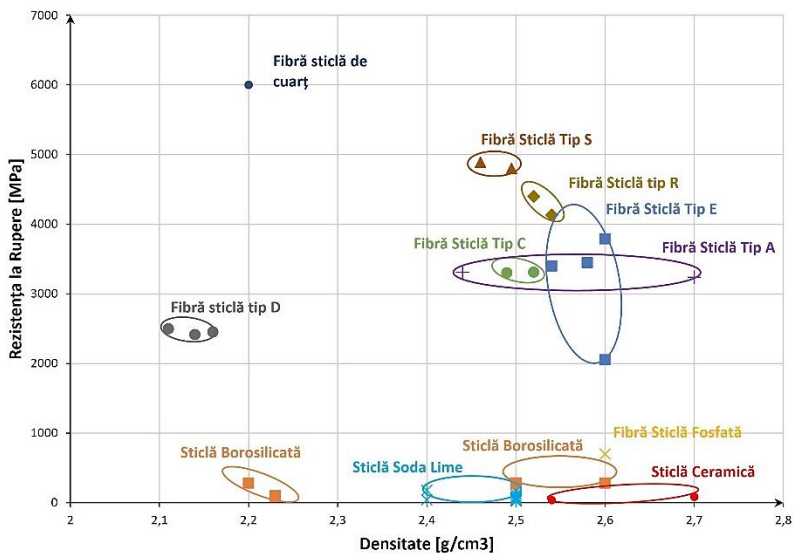


Figura 3.2. Variația densității și a rezistenței la rupere pentru diferite tipuri de sticlă [21]

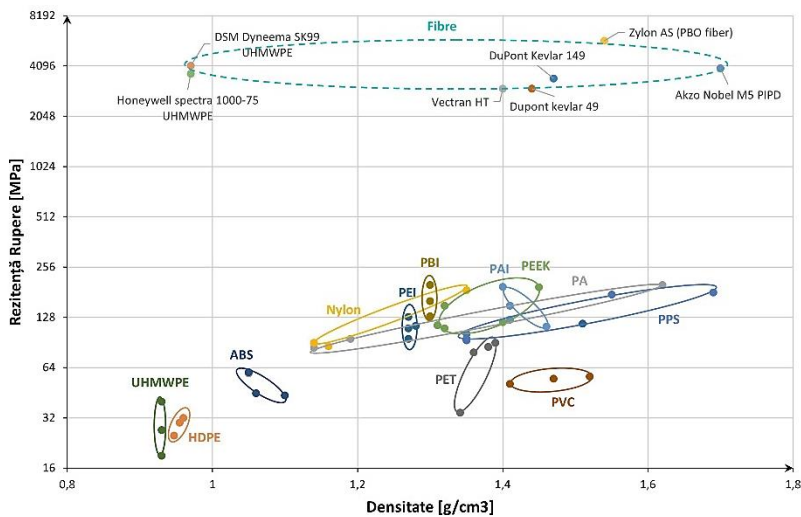


Figura 3.3. Variația densității și a rezistenței la rupere pentru diferite tipuri de sticlă [18]

Capitolul 4: Metode și instalații

Acest capitol prezintă metodologia de cercetare utilizată pentru a analiza materialele pentru stocarea hidrogenului la presiune mare. Abordarea combină analiza comparativă, modelarea teoretică și computațională și metodele experimentale, fiecare fiind aleasă pentru a răspunde provocărilor specifice evaluării performanței materialelor și adecvării lor pentru stocarea hidrogenului.

4.1. METODOLOGIA DE CERCETARE

Această secțiune descrie metodele mixte (cantitative și calitative) utilizate în studiul de față pentru a analiza și evalua materiale și tehnologii destinate îmbunătățirii capacității de stocare a hidrogenului la presiune mare, detaliind abordările folosite pentru analiza comparativă, modelarea computațională și validarea experimentală.

4.1.1. Analiza Comparativă

Metoda de analiză comparativă utilizată în acest studiu a implicat o revizuire sistematică a literaturii și a companiilor producătoare, având ca scop evaluarea performanței și potențialului diferitelor tehnologii și materiale de stocare a hidrogenului. Această abordare combină metode cantitative și calitative pentru a oferi o înțelegere completă a capacităților materialelor și adecvării lor pentru aplicațiile de stocare a hidrogenului la presiune mare.

4.1.2. Calcul analitic și computațional

Această secțiune detaliază tehnicile de modelare matematică și simulare utilizate pentru a prezice, folosind o metodă de analiză cantitativă, comportamentul mecanic și capacitățile de stocare a hidrogenului folosind structuri capilarii obținute din diferite materiale, cu un accent deosebit pe analiza stresului, estimarea

capacității gravimetrice și volumetrice și aplicarea analizei cu elemente finite (FEA) pentru evaluarea stresului în tuburile capilare.

4.1.3. Încercări experimentale

Investigația experimentală integrează tehnici atât cantitative, cât și calitative pentru a analiza în mod cuprinzător caracteristicile structurale, mecanice și morfologice ale materialelor destinate stocării hidrogenului la presiune înaltă. Metodologiile utilizate sunt selectate în funcție de capacitatea lor de a evalua integritatea materialului, distribuția defectelor și performanța mecanică în condiții de operare.

4.2. INSTALAȚII

Investigațiile experimentale sunt realizate utilizând instalații de ultimă generație pentru caracterizarea materialelor destinate aplicațiilor de stocare a hidrogenului la presiune înaltă. Aceste instalații sunt selectate în funcție de precizia, fiabilitatea și capacitatea lor de a simula condițiile de operare din lumea reală. Infrastructura integrează echipamente avansate de microscopie, spectroscopie și testare mecanică, asigurând o evaluare cuprinzătoare a proprietăților structurale și mecanice ale materialelor investigate.

Principalele instalații utilizate au fost:

- Mașină de debitat probe
- Mașină de acoperire cu aur
- Microscop optic
- Microscop electronic
- Mașină de încercare la tracțiune

Capitolul 5: Rezultate și discuții

Acest capitol prezintă o analiză cuprinzătoare a rezultatelor obținute din investigațiile teoretice, computaționale și experimentale privind fezabilitatea stocării hidrogenului pe bază de tuburi capilare. Studiul evaluează sistematic performanțele mecanice, structurale și de stocare ale tuburilor capilare individuale și ale aranjamentelor de capilare, oferind informații despre potențialul lor ca soluții de stocare a hidrogenului la presiune înaltă. Discuția este împărțită în două secțiuni principale: prima se concentrează pe stocarea hidrogenului în tuburi capilare individuale, evaluând influența geometriei tubului capilar asupra distribuției tensiunii mecanice, capacității de stocare și proprietăților microstructurale, iar a doua analizează stocarea hidrogenului în aranjamente de tuburi capilare, evaluând performanța colectivă a mai multor capilare, integritatea lor mecanică și eficiența generală de stocare.

5.1. SISTEM DE STOCARE DE HIDROGEN CU TUB SINGULAR

5.1.1. Impactul geometriei tubului capilar asupra stării de tensiune

Performanța mecanică a unui tub capilar în condiții de stocare a hidrogenului la presiune înaltă este influențată semnificativ de geometria secțiunii transversale. Varietățile de formă afectează distribuția tensiunilor interne, integritatea structurală și rezistența la defecte mecanice. Această secțiune prezintă un studiu de analiză a elementelor finite (FEA) pentru evaluarea distribuției tensiunii în tuburi capilare cu diferite profile transversale, pentru a determina profilul optim ce îmbunătățește performanța mecanică și eficiența stocării.

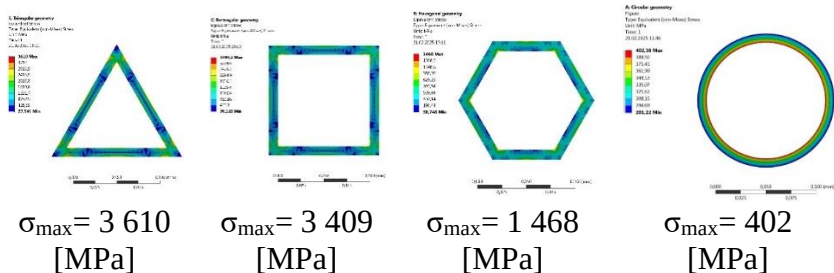


Figura 5.1. Tensiunea Von Mises pentru diferite geometrii supuse la 70 MPa presiune internă

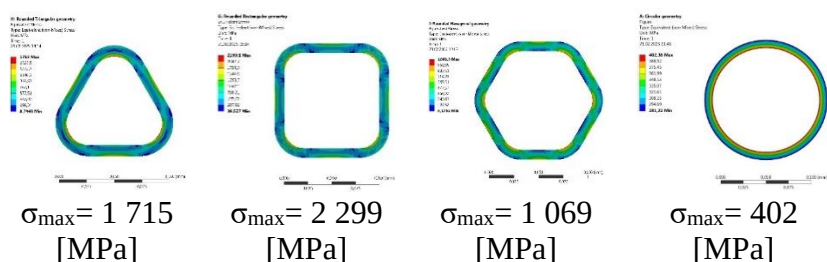


Figura 5.2. Tensiunea Von Mises pentru diferite geometrii cu muchii rotunjite supuse la 70 MPa presiune internă

Analiza arată că secțiunea transversală circulară prezintă cea mai mică distribuție a tensiunii dintre geometriile analizate. În schimb, geometria necirculară, din cauza colțurilor ascuțite, generează zone de concentrație localizată a tensiunii, cu valori de trei până la nouă ori mai mari decât cele din configurația circulară. Modificările cu colțuri rotunjite pentru geometriile triunghiulare, dreptunghiulare și hexagonale reduc semnificativ concentrarea tensiunii, dar secțiunea circulară continuă să prezinte cele mai scăzute niveluri de tensiune, demonstrând o performanță mecanică superioară. Astfel, secțiunea circulară va fi adoptată pentru investigațiile ulterioare.

În continuare, impactul asupra stării de tensiuni este evaluat pentru două scenarii:

1. Variația diametrului interior cu grosime de perete constantă
2. Variația grosimii de perete cu fiametrul interior constant

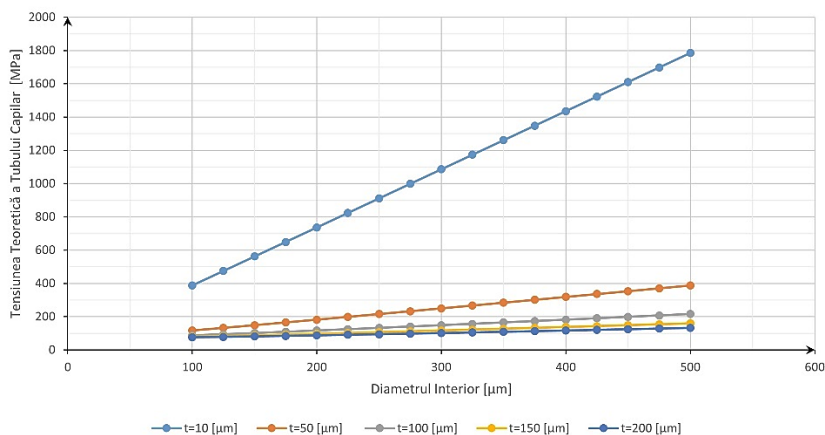


Figura 5.3. Influența creșterii diametrului interior asupra tensiunii din perete, menținând grosimea peretelui constantă, la o presiune internă de 700 bar

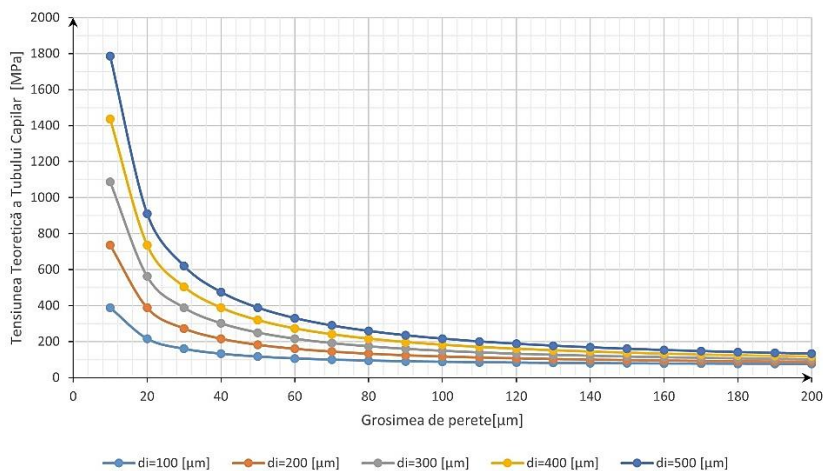


Figura 5.4. Influența creșterii grosimii peretelui asupra tensiunii din perete, menținând diametrul interior constant, la o presiune internă de 700 bar.

În plus, impactul raportului dintre diametrul exterior și interior asupra tensiunii peretelui tubului a fost evaluat.

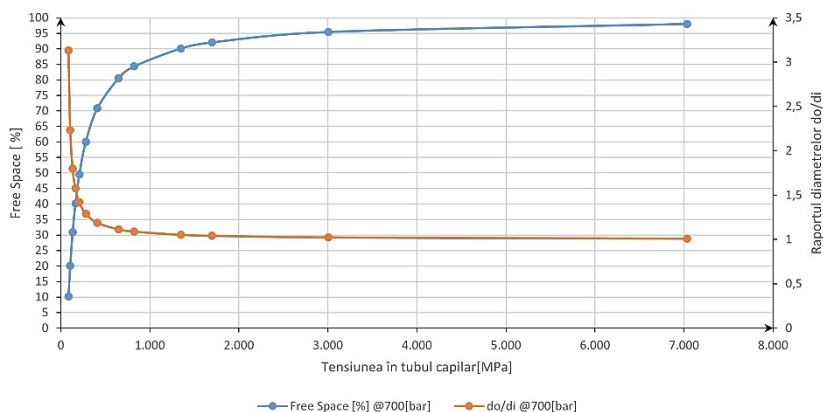


Figura 5.5. Influența raportului diametrelor asupra tensiunii tubului capilar

Figura 5.5 demonstrează că un spațiu liber disponibil hidrogenului (Free Space) mai mare corespunde unei tensiuni mai mari pe peretele intern. Cu toate acestea, s-a stabilit și că obținerea unor capacități de stocare mai mari necesită utilizarea unor spații libere mai mari. Pornind de la această observație și rezistențele la rupere ale materialelor alese pentru studiu, spațiul liber (Free Space) maxim realizabil pentru fiecare material selectat a fost calculat, iar rezultatele sunt rezumate în Tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. Spațiul liber maxim permis pentru materialele selectate

Material	Free Space Admisibil [%]
Oțel	
XMP 21	84
Sticlă	
Fibră din sticlă de cuarț	95
Fibră sticlă S-2 (aluminosilicăată)	94
Fibră sticlă AR (soda-lime)	92
Fibră sticlă D (borosilicăată)	89
Polimeri	
Kevlar 149	92

Zylon AS (PBO fibre)	95
DSM Dyneema SK99 (UHMWPE fibre)	93
Vectran HT (LCP fibre)	91

5.1.2. Capacitatea gravimetrică și volumetrică teoretică pentru un singur tub capilar

Pentru calculul capacităților de stocare se pornește de la datele de material:

Tabelul 5.2. Prezentare generală a materialelor și proprietăților luate în considerare pentru calcule

Material	Densitate [g/cm ³]	UTS [MPa]	$\sigma_{\text{Admisibil}}^*$ [MPa]
Oțel			
XMP 21	6.87	1683	842
Sticlă			
Fibră din sticlă de cuarț	2.20	6000	3000
Fibră sticlă S-2 (aluminosilicăată)	2.46	4890	2445
Fibră sticlă AR (soda-lime)	2.70	3240	1620
Fibră sticlă D (borosilicăată)	2.11	2500	1250
Polimeri			
Kevlar 149	1.47	3450	1725
Zylon AS (PBO fibre)	1.54	5800	2900
DSM Dyneema SK99 (UHMWPE fibre)	0.97	4100	2050
Vectran HT (LCP fibre)	1.40	3000	1500

* Stresul admisibil a fost calculat împărțind Rezistența la Tracțiune (UTS) a materialului la un Factor de Siguranță de 2.

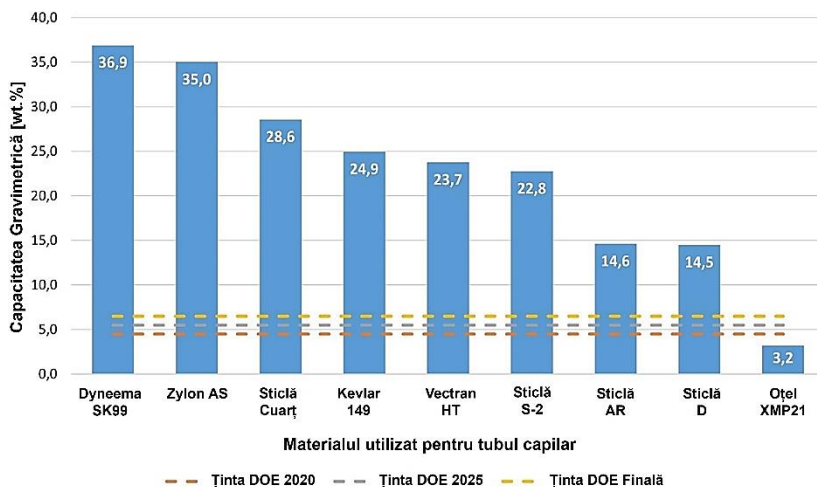


Figura 5.6. Capacitatea de stocare gravimetrică obținută pentru materialele selectate

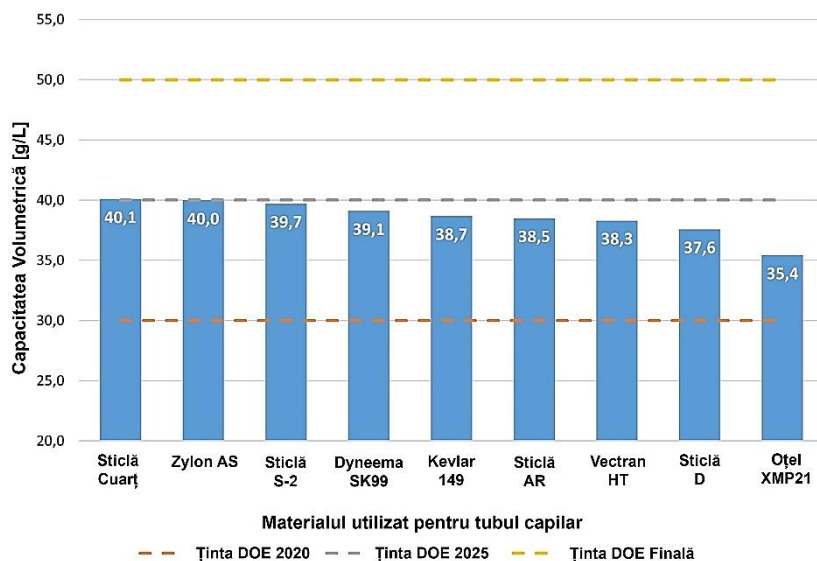


Figura 5.7. Capacitatea de stocare volumetrică obținută pentru materialele selectate

Pentru a compara eficient capacitățile de stocare obținute cu cele ale altor tehnologii existente de stocare a hidrogenului, primele trei rezultate din Figurile 5.6 și 5.7 au fost incluse în prezentarea generală din Figura 2.8, așa cum este ilustrat în Figura 5.8.

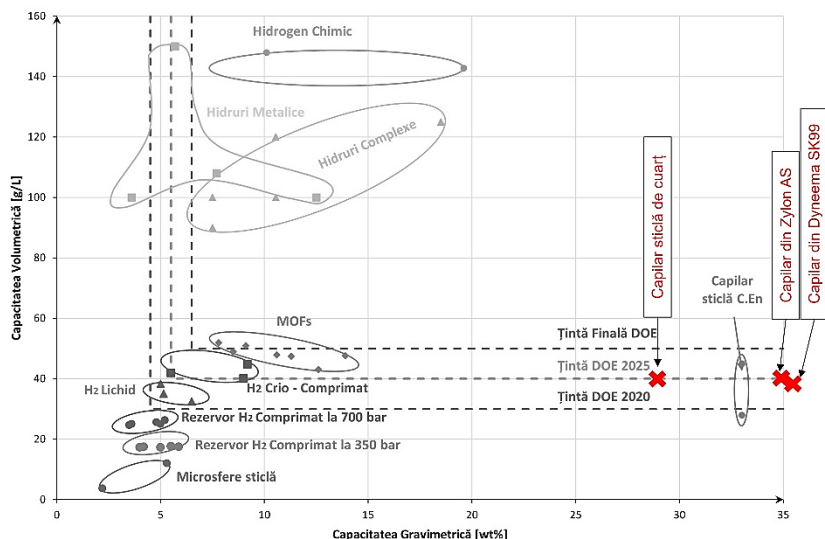
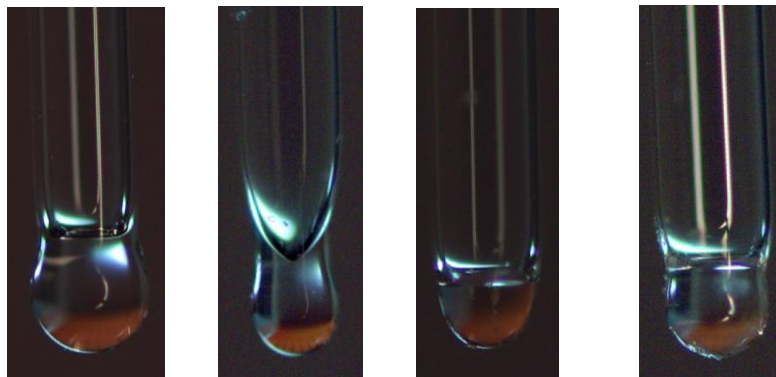


Figura 5.8. Primele 3 capacități teoretice gravimetrice și volumetrice realizabile pentru un singur tub capilar comparate cu alte tehnologii de stocare a hidrogenului

Din analiza figurilor 5.6 și 5.7, se observă că, din punct de vedere al capacității de stocare gravimetrice, toate materialele examinate, cu excepția oțelului, depășesc semnificativ chiar și ultimul obiectiv stabilit de Departamentul pentru Energie al SUA (DOE). În ceea ce privește capacitatea volumetrică, toate materialele depășesc obiectivul stabilit pentru anul 2020, însă doar tuburile realizate din sticlă de quartz și din Zylon AS ating obiectivul propus pentru 2025.

5.1.3. Analiza tubului capilar din sticlă la microscopul optic și electronic



a) Tub capilar
din sticlă
Borosilică

b) Tub
capilar din
sticlă de
Quartz

c) Tub
capilar din
sticlă Soda-
lime

d) Tub capilar
din sticlă
Aluminosilică

Figura 5.9. Microscopie optică a închiderii tuburilor capilarii la o mărire de 50X

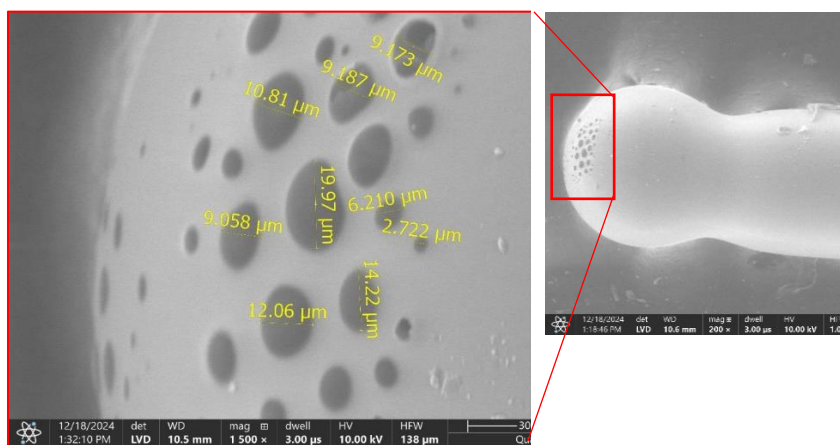


Figura 5.10. Imagine SEM a porilor de suprafață pe tubul capilar la o mărire de 1500X

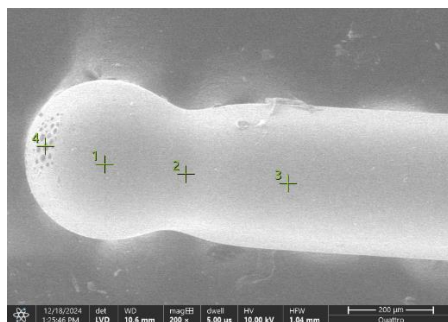


Figura 5.11. Puncte de probă pentru analiza EDS a eşantionului de tub capilar Aluminosilicat

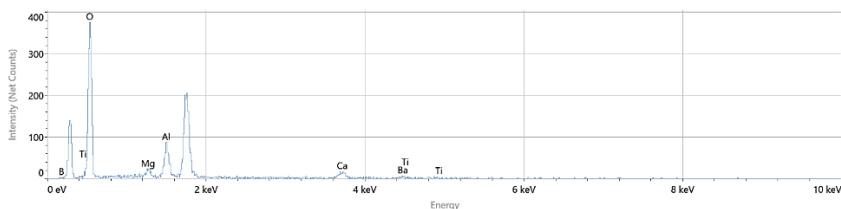


Figura 5.12. Spectru EDS al probei de sticlă aluminosilică

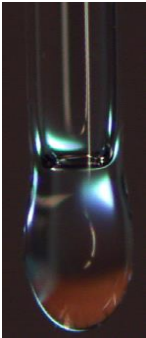
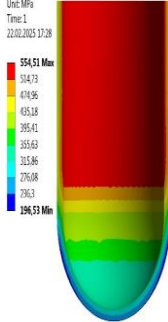
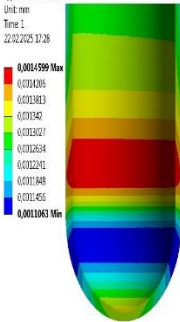
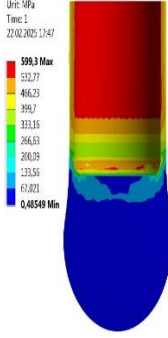
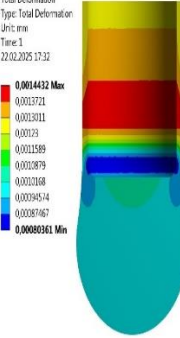
Tabelul 5.3. Procentul de masă al elementelor chimice măsurate în proba de sticlă aluminosilică

Masa %				
Element	Punct 1	Punct 2	Punct 3	Punct 4
B	0.0	0.0	0.0	0.0
O	35.9	33.3	46.2	40.5
Mg	1.4	1.5	1.7	1.2
Al	7.2	6.7	7.6	6.6
Ca	4.5	6.3	7.3	5.1
Ti	1.9	0.0	0.1	1.4
Ta	49.1	47.2	0.0	45.2
Ba	0.0	5.0	8.5	0.0
Si	0.0	0.0	28.6	0.0

5.1.4. Analiza FEA a defectelor

Simulările FEA se concentrează pe identificarea zonelor de concentrație a stresului, în special la joncțiunea dintre corpul cilindric și capătul închis. Aceste regiuni sunt critice pentru rezistența tubului capilar, deoarece concentrațiile localizate de stres pot afecta semnificativ performanța materialului, ducând la eșec sub condiții de presiune înaltă. Comparând distribuția stresului în geometriile ideale și cele modificate de defecte, ne propunem să cuantificăm influența acestor abateri asupra rezistenței și stabilității tubului.

Tabelul 5.4. Comparația stresului și deformării între capătul închis ideal al capilarului și probele reale

#	Proba reală	3D Model	Tensiune	Deformații
1			J: Ideal capillary closed end Equivalent Stress Type: Equivalent (von Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 22.02.2025 17:28 	J: Ideal capillary closed end Total Deformation Type: Total Deformation Unit: mm Time: 1 22.02.2025 17:28 
			K: Borosilicate glass capillary end shape Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 22.02.2025 17:47 	K: Borosilicate glass capillary end shape Total Deformation Type: Total Deformation Unit: mm Time: 1 22.02.2025 17:32 

3



L: Quartz glass capillary end shape

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

22.02.2025 17:34

550,8 Max

480,63

428,46

367,28

306,11

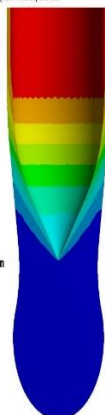
244,94

183,77

122,6

61,424

0,25155 Min



L: Quartz glass capillary end shape

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

22.02.2025 17:34

0,0013194 Max

0,0012318

0,0011441

0,0010564

0,0009687

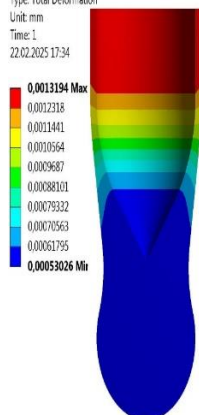
0,00088101

0,00079332

0,00070563

0,00061795

0,00053026 Min



4



N: Soda lime glass capillary end shape

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

22.02.2025 17:40

559,17 Max

499,22

435,27

373,32

311,37

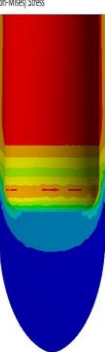
249,42

187,47

125,52

63,57

1,62 Min



N: Soda lime glass capillary end shape

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

22.02.2025 17:41

0,0013892 Max

0,0013119

0,0012346

0,0011573

0,00108

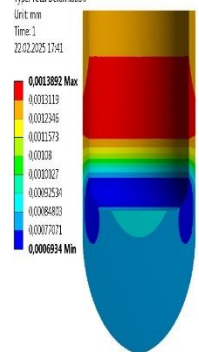
0,00093027

0,00082539

0,00088803

0,00077071

0,0006934 Min



Constatările indică faptul că geometria capătului închis analizat nu afectează negativ distribuția stresului sau comportamentul de deformare. Efectul principal al acestor variații este asupra capacității totale de stocare, deoarece prezența unui capăt închis complet umplut crește masa tubului capilar în raport cu cazul de referință. Totuși, atunci când se ia în considerare lungimea totală a tubului capilar, această contribuție suplimentară la masă rămâne neglijabilă.

5.1.5. Analiza structurii altor potențiale materiale la microscop

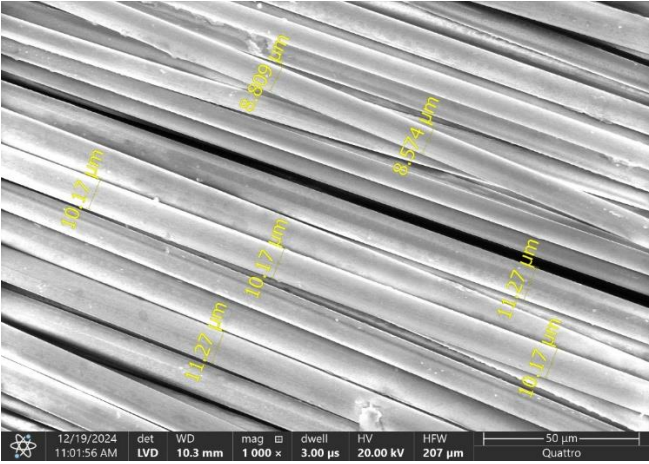


Figura 5.13. Imagine SEM cu un mănunchi de fibră de sticlă și măsurători la mărire de 1000X

Tabelul 5.5. Procentul de masă al elementelor chimice din fibra de sticlă

Masa %		
Element	Punct 1	Punct 2
B	1.7	1.2
C	10.3	11.2
O	45.8	47.8
Mg	1.2	1.4
Al	6.1	5.8
Si	20.5	18.9
Ca	13.6	13.5
Ti	0.4	0.2
Cu	0.4	0.0

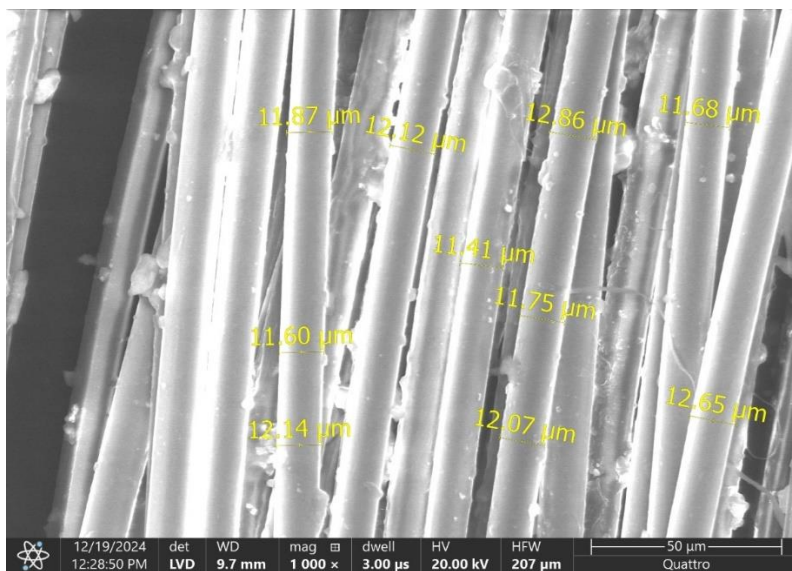


Figura 5.14. Imagine SEM cu un mănunchi de fibre Kevlar și măsurători la mărire de 1000X

Tablelul 5.6. Procentele de masă ale elementelor chimice din fibra de kevlar

Element	Masa %	
	Punct 1	Punct 2
B	2.6	2.4
C	53.1	53.2
N	17.0	16.7
O	26.0	26.7
Na	0.7	0.4
S	0.4	0.4
Ti	0.2	0.0
Al	0.0	0.2

5.1.6. Teste de rezistență la tracțiune a materialelor

În această secțiune, este prezentată evaluarea experimentală a rezistenței la tracțiune a materialelor selectate. Scopul acestei investigații este de a determina rezistența la tracțiune ultimativă (UTS) reală a probelor și de a o compara cu valorile teoretice din literatură sau fișele tehnice ale producătorilor. Testele de tracțiune au fost realizate pentru a evalua performanța mecanică a materialelor în condiții de stres uniaxial și pentru a identifica eventuale abateri de la comportamentul teoretic așteptat. Probe pentru aceste teste de tracțiune au fost utilizate tuburi capilare, fascicule de fibră de sticlă și fascicule de Kevlar.

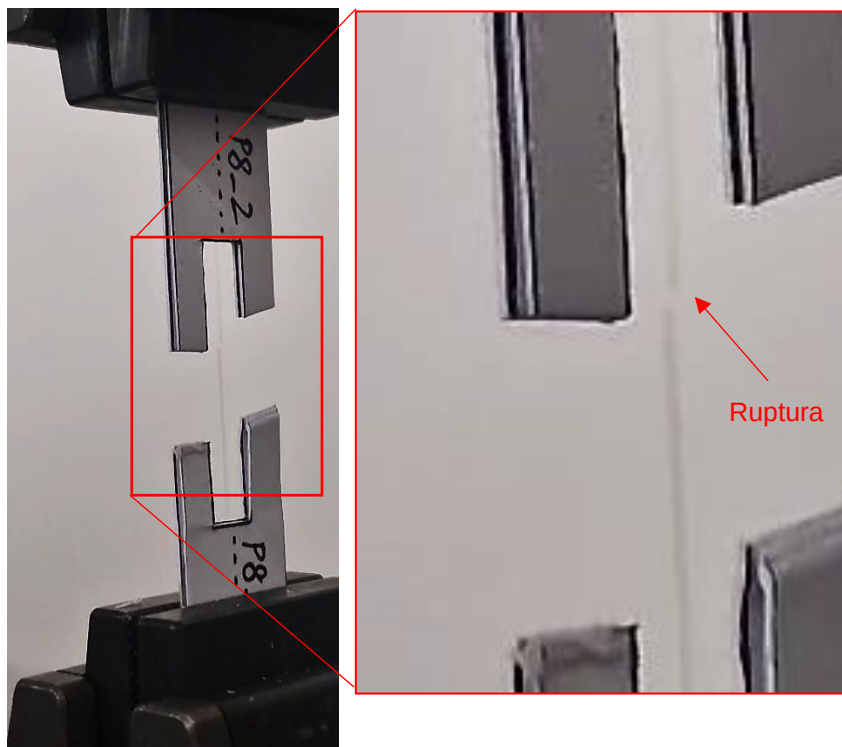


Figura 5.15. Ruperea probei la solicitarea la tracțiune

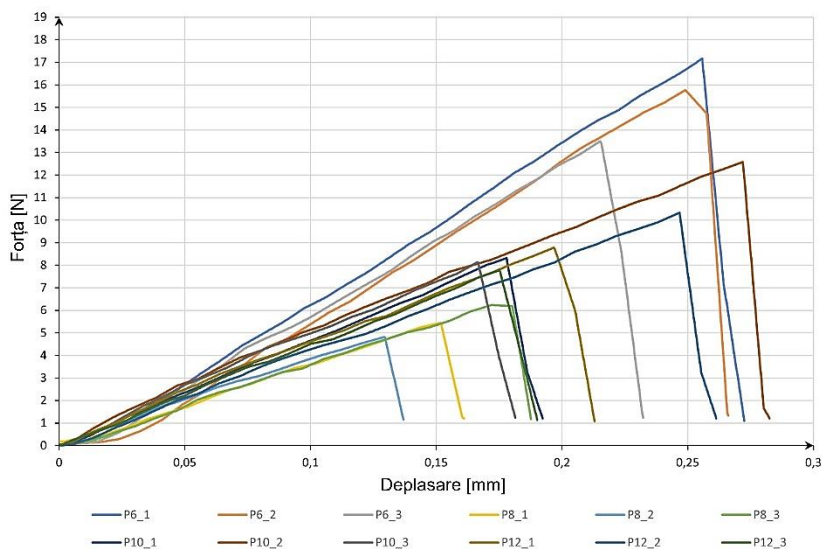


Figura 5.16. Caracteristica Forță – Deplasare a tuburilor capilare supuse la încercare prin tracțiune

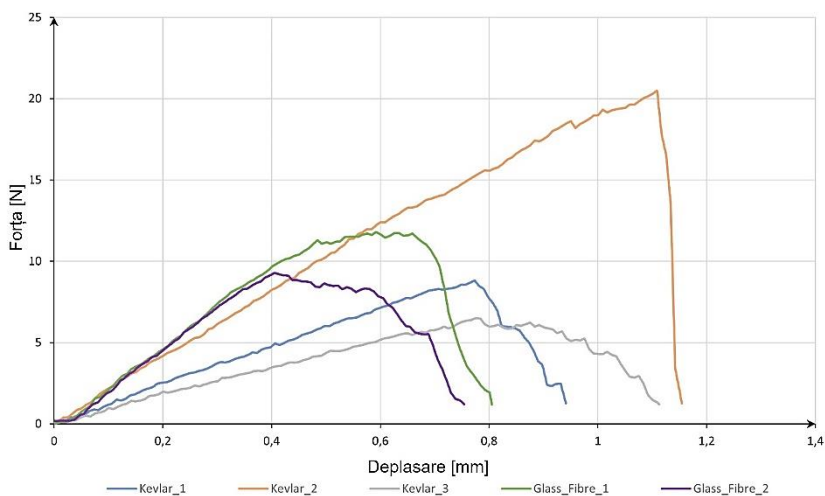


Figura 5.17. Caracteristica Forță – Deplasare a fibrelor de Kevlar și sticlă supuse la încercare prin tracțiune

5.1.7. Predicția presiunii de spargere

De obicei, tuburile capilare sunt supuse unei încărcări cu presiune internă pentru a determina punctul în care acestea cedează, stabilind astfel presiunea de rupere. Totuși, un astfel de setup de testare necesită un banc de testare complex și costisitor. O abordare alternativă, mai rentabilă, constă în predicția presiunii de rupere printr-un model matematic, utilizând ecuațiile definite în Capitolul 4 și datele de intrare derivate din testele mecanice anterioare ale materialelor. Valorile predicționate ale presiunii de rupere vor fi comparate ulterior cu cele raportate în literatură pentru a evalua acuratețea și fiabilitatea modelului.

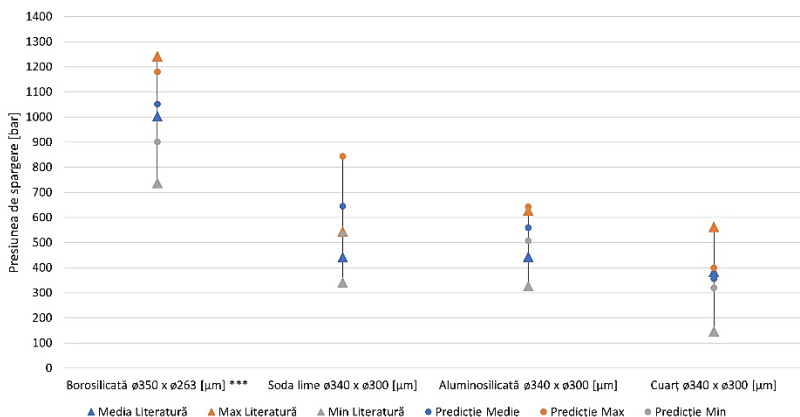


Figura 5.18. Comparatie între presiunea de spargere prezisă matematic și presiunea de spargere testată din literatură

Figura 5.18 compară valorile presiunii de spargere obținute din literatură și cele prezise de modelul matematic propus, arătând că valorile prezise pentru toate tipurile de sticlă se aliniază bine cu cele din literatură, cu excepția sticlei sodalime, care are valori ușor mai mari. De asemenea, se observă că sticla borosilicăță este cel mai potrivit tip de sticlă pentru stocarea hidrogenului la presiuni mari, având chiar și cele mai mici valori prezise ale presiunii de spargere care depășesc presiunea de lucru de 700 bar. Totuși, niciuna dintre probe nu a atins 1400 bar, ceea ce face imposibilă aplicarea unui factor de siguranță de 2 pentru prototipurile existente.

5.1.8. Capacitatea gravimetrică și volumetrică a prototipurilor reale

Tablelul 5.7. Capacitatea gravimetrică și volumetrică pentru tuburile capilare reale la 700 bar

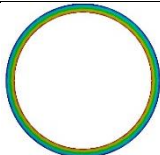
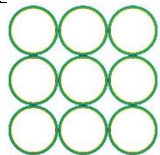
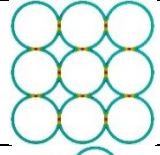
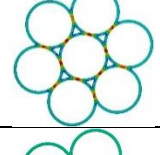
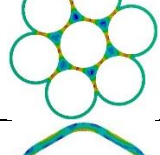
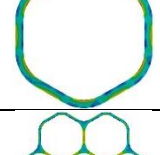
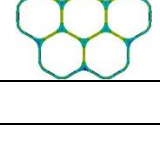
Material	Nr. Prob	Free Space [%]	Pres. Spargere [MPa]	Gravimetric Capacity [wt.%]	Volumetric Capacity [g/L]
Borosilicăță	P6_1	50,3	1180	1,87	21,13
	P6_2	49,5	1072	1,81	20,78
	P6_3	61,1	901	2,88	26,68
Soda lime	P10_2	71,2	843	4,15	29,90

5.2. SISTEM DE STOCARE DE HIDROGEN CU ARANJAMENTE DE TUBURI CAPILARE

Geometria tuburilor capilare joacă un rol esențial în distribuția stresului în cadrul sistemului de stocare. Atunci când sunt grupate în array-uri, interacțiunea dintre tuburi influențează semnificativ comportamentul mecanic global, mai ales în ceea ce privește stresul generat sub presiune. În această secțiune, se analizează impactul variațiilor de geometrie ale tuburilor capilare (precum forma și aranjamentul acestora) asupra distribuției stresului, un aspect esențial pentru înțelegerea integrității structurale a sistemului de stocare și optimizarea designului pentru a rezista presiunilor ridicate asociate cu stocarea hidrogenului.

5.2.1. Impactul geometriei aranjamentului asupra tensiunii

Tabelul 5.8. Impactul geometriei aranjamentului asupra stresului și capacității de stocare la o presiune internă de 700 bar

#	Geometry with Stress distribution	Max Stress [MPa]	Free Space [%]	Grav. Cap. [wt.%]	Vol. Cap. [g/L]
1		561	77,85	6,21	32,70
2		581	69,45	6,24	29,17
3		1032	74,23	6,89	31,18
4		1035	79,17	7,10	33,25
5		1078	79,17	6,69	33,25
6		1441	78,35	6,38	32,91
7		1593	81,85	7,77	34,38

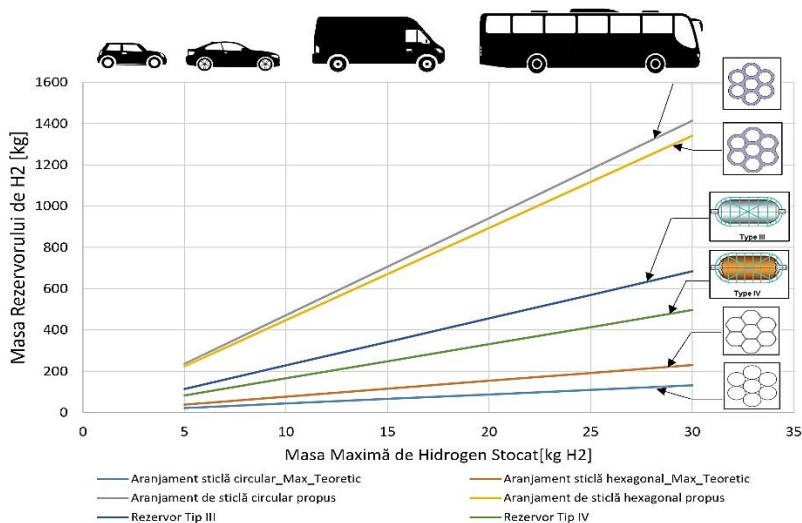


Figura 5.19. Compararea greutății rezervorului pentru diferite tipuri de tehnologii de stocare

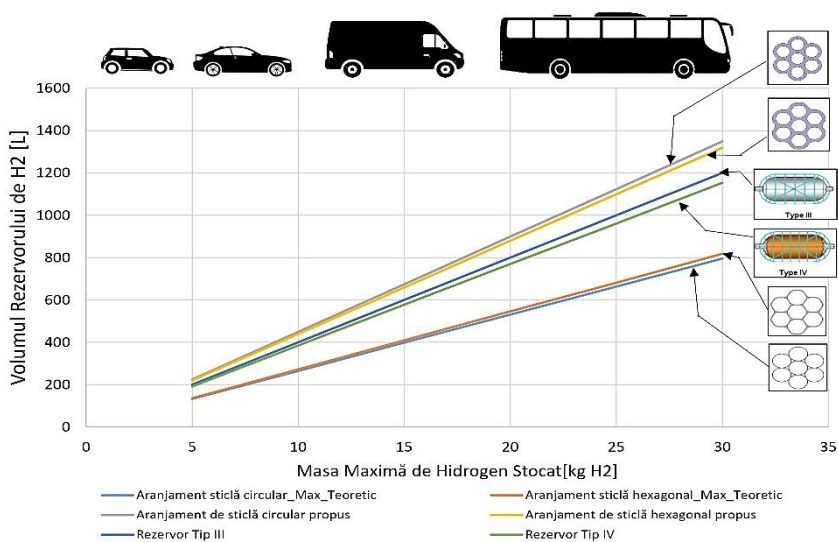


Figura 5.20. Compararea volumului rezervorului pentru diferite tipuri de tehnologii de stocare

5.2.2. Analiza aranjamentelor de tuburi la microscop



Figura Q5.21. Diferite tipuri de ranjamente de tuburi capilare

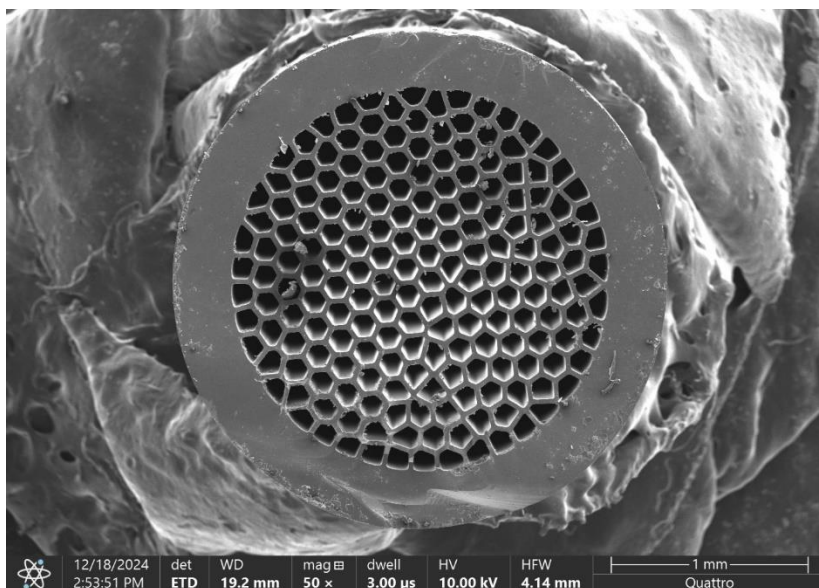


Figura 5.22. Imagine SEM a structurii fagure din interiorul unui înveliș cilindric, la o mărire de 50X

5.2.3. Proiectarea sistemului de stocare de hidrogen

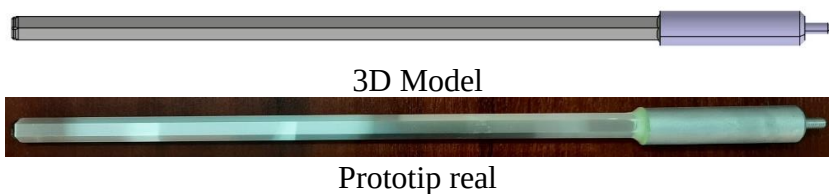


Figura 5.23. Comparatie între modelul 3D și prototipul real al barei de sticlă hexagonale cu conector de îmbinare

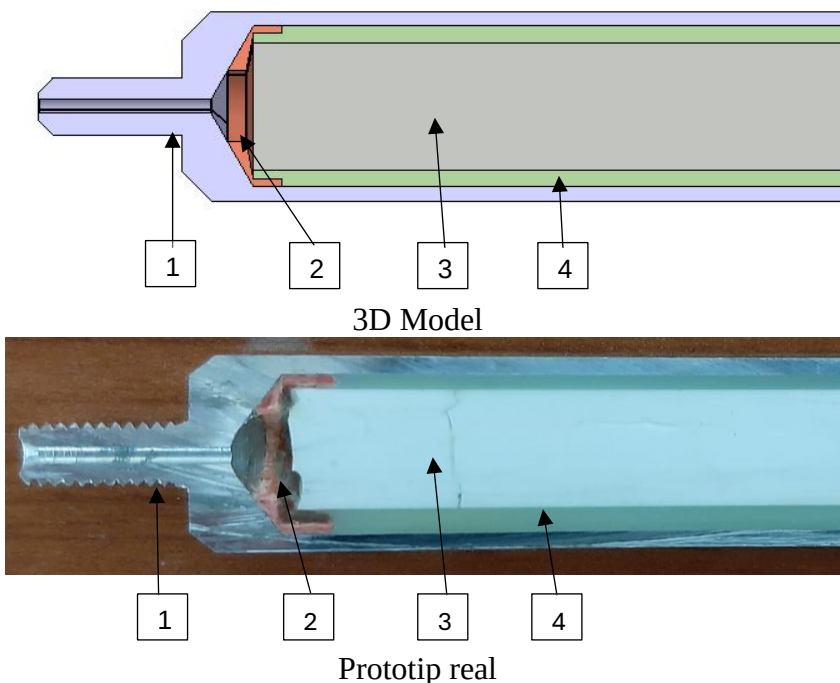
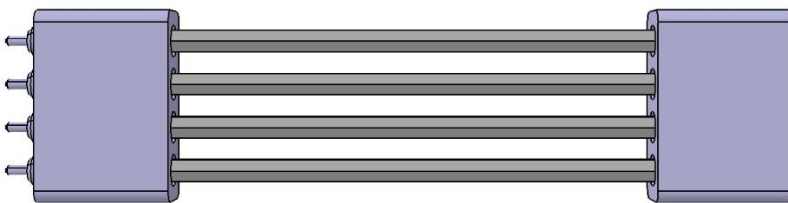
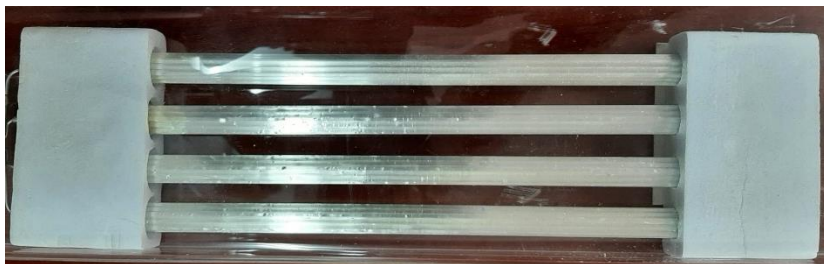


Figura 5.24. Secțiune prin modelul 3D și prototipul real al conectorului de îmbinare

1 – conector, 2 – distanțier, 3 – aranjament capilar, 4 – adeziv



3D Model



Prototip real

Figura 5.25. Comparație între modelul 3D și prototipul real al unui sistem de stocare a hidrogenului format din patru bare hexagonale integrate într-un spumă distanțier

5.3. APLICAȚII

Aplicabilitatea potențială a sistemului propus de stocare a hidrogenului se extinde în mai multe sectoare, în special în transport și stocarea energiei. Prin atingerea unor capacități mari de stocare gravimetrică și volumetrică, menținând în același timp integritatea structurală, stocarea hidrogenului pe bază de tuburi capilare reprezintă o alternativă promițătoare la metodele convenționale. Mai jos sunt prezentate principalele domenii de aplicare:

1. Industria auto

2. Mobilitate urbană



Figura 5.26. Trotinetă cu hidrogen propusă de C.En [17]



Figura 5.27. Bicicletă cu hidrogen propusă de C.En [17]
1 – Port de alimentare cu H_2 ; 2 – Rezervor de hidrogen; 3 – Fuel cell

3.Sectorul aerospațial

4.Transport maritim și feroviar

5.Stocare staționară a energiei

6.Aplicații portabile și off-grid

Modelul matematic propus în această teză servește ca un instrument fundamental pentru proiectarea sistemelor de stocare a hidrogenului, adaptate cerințelor specifice fiecărei aplicații. Având în vedere că factorii de siguranță variază între sectoare – de exemplu, cerințele de siguranță sunt mai ridicate în aplicațiile aerospațiale și maritime comparativ cu mobilitatea urbană – modelul permite ajustări precise în proiectarea tuburilor capilare pentru a îndeplini aceste cerințe diverse. Prin integrarea factorilor de siguranță în calculele de solicitare mecanică, modelul asigură menținerea integrității structurale a sistemului de stocare în condiții de operare. În plus, modelul joacă un rol esențial în dimensionarea sistemului de stocare a hidrogenului, evaluând atât constrângerile de greutate, cât și cele de volum impuse de mediul de montare al fiecărei aplicații. De exemplu, în industria auto și mobilitatea urbană, reducerea greutății este esențială pentru eficiență și autonomie, în timp ce în aplicațiile de stocare staționară a energiei, capacitatea volumetrică poate avea o importanță mai mare. Capacitatea de a optimiza acești parametri prin analiza computațională sporește fezabilitatea și adaptabilitatea sistemelor de stocare a hidrogenului pe bază de capilare pentru o gamă largă de aplicații reale.

Capitolul 6: Concluzii

6.1. CONCLUZII FINALE

- Capilarele din sticlă reprezintă o soluție promițătoare pentru stocarea hidrogenului, având capacități gravimetrice experimentale de 2.1–2.2 wt.% și capacități volumetrice de 22.3–22.7 g/L, valori care pot crește teoretic la 18.6 wt.% și 37.68 g/L dacă s-ar utiliza sticlă fără defecte, depășind astfel țintele DOE și performanțele rezervoarelor tip I-IV.
- Rezistența mecanică admisibilă a capilarelor din sticlă testate experimental este de 378 MPa, mult sub rezistența teoretică a sticlei fără defecte (~6000 MPa), ceea ce indică o mare marjă de îmbunătățire prin eliminarea defectelor structurale.
- Pentru a atinge aceste valori teoretice și a crește capacitatea de stocare, este necesară optimizarea atât a materialului (sticlă de înaltă rezistență, precum cuarțul) cât și a procesului de fabricație, având în vedere că deviațiile geometrice afectează distribuția tensiunilor și pot reduce stabilitatea mecanică la presiuni de 700 bar.
- Polimerii analizați, în special Zylon AS (PBO), Kevlar și UHMWPE, au demonstrat proprietăți mecanice superioare, cu rezistențe la tracțiune ce pot depăși 5800 MPa (pentru Zylon AS), evidențiind potențialul acestora ca materiale complementare sau alternative pentru capilarele de stocare a hidrogenului.

6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

Această cercetare doctorală aduce contribuții originale semnificative în domeniul stocării hidrogenului:

1. **Revizuire tehnologică** – analiza metodelor existente și alegerea capilarelor ca soluție promițătoare.
2. **Selecția materialelor** – identificarea sticlei și polimerilor ca materiale optime pe baza rezistenței și densității.
3. **Modele teoretice** – utilizarea modelelor matematice pentru estimarea capacităților de stocare și rezistenței capilarelor.
4. **Optimizarea geometriei** – compararea și identificarea celor mai eficiente configurații capilare.
5. **Validare experimentală** – evaluarea materialelor prin microscopie și teste mecanice.
6. **Comparație cu standardele DOE** – evaluarea rezultatelor obținute în raport cu obiectivele de stocare definite.
7. **Proiectarea unui concept inovativ** – dezvoltarea și vizualizarea unor modele 3D optimizate.
8. **Publicații științifice** – diseminarea cercetărilor prin articole indexate.
9. **Provocări și direcții viitoare** – propunerea de soluții pentru îmbunătățirea fabricării capilarelor fără defecte.

1.1. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Pe baza rezultatelor cercetării, direcțiile viitoare pentru îmbunătățirea sistemelor de stocare a hidrogenului pe bază de capilare sunt:

1. Dezvoltarea materialelor avansate din sticlă – studii pentru compoziții de sticlă cu rezistență mai mare și defecte reduse.
2. Tehnici de fabricație fără defecte – îmbunătățirea proceselor de fabricație prin metode avansate pentru a minimiza imperfecțiunile structurale.
3. Validare experimentală în condiții reale – testarea prototipurilor la scară largă în condiții de operare reale de stocare și eliberare a hidrogenului.

4. Optimizarea arhitecturilor capilare – cercetări pentru a îmbunătăți geometria capilarelor, echilibrând rezistența mecanică și eficiența stocării.
5. Integrarea materialelor compozite – explorarea structurilor hibride, cu materiale de întărire, pentru a spori stabilitatea mecanică.
6. Investigarea permeabilității și retenției hidrogenului – studii pentru a optimiza interacțiunea dintre hidrogen și suprafața capilarelor.
7. Analiza costurilor și scalabilității – evaluarea costurilor și a proceselor de producție la scară industrială.
8. Evaluarea impactului de mediu și compararea cu tehnologii convenționale – analiza impactului asupra mediului și eficienței energetice în comparație cu tehnologiile tradiționale de stocare a hidrogenului.
9. Explorarea materialelor alternative cu rezistență înaltă – cercetarea altor materiale ușoare și rezistente, cum ar fi polimerii de înaltă rezistență.

Bibliografie

- [1] "Statista,"
<https://www.statista.com/statistics/222066/projected-global-energy-consumption-by-source/>. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [2] "Our World in Data,"
<https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [3] "United Nations Climate Change,"
https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf. [Accesat 31 August 2020].
- [4] "Berkley Earth," <https://berkeleyearth.org/press-release-2024-sets-another-all-time-temperature-record/>. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [5] "Distribution of carbon dioxide emissions worldwide in 2023 by sector," Statista,
<https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/>. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [6] "Bloomberg,"
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-23/the-hydrogen-powered-car-s-big-setback>. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [7] "Climate Action," https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [8] "Hydrogen Storage,"
<https://web.archive.org/web/20240329094758/https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. [Accessat 23 Ianuarie 2025].

- [9] B. P. Somerday and C. S. Marchi, "Hydrogen containment materials," in *Solid-State Hydrogen Storage*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2008, pp. 51-81.
- [10] "U.S. Department of Energy," <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles>. [Accesat 23 Ianuarie 2025].
- [11] M. A. Delgado, "Análisis del entorno externo para explorar el futuro del hidrógeno," *Ambiociencias*, no. 21, pp. 7-25, 2023.
- [12] T. Q. Hua, R. K. Ahluwalia, J. K. Peng, M. Kromer, S. Lasher, K. McKenney, K. Law and J. Sinha, "Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3037-3049, 2011.
- [13] Q. Cheng, R. Zhang, Z. Shi and J. Lin, "Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 7, no. 2, pp. 269-284, 2024.
- [14] G. Alzohbi, A. Almoaikel and L. Alshuhail, "An overview on the technologies used to store hydrogen," *Energy Reports*, vol. 9, no. 11, pp. 28-34, 2023.
- [15] S. Dalai, S. Vijayalakshmi, P. Shrivastava, S. P. Sivam and P. Sharma, "Preparation and characterization of hollow glass microspheres (HGMs) for hydrogen storage using urea as a blowing agent," *Microelectronic Engineering*, vol. 126, pp. 65-70, 2014.
- [16] K. Holtappels, M. Beckmann-Kluge, M. Gebauer and D. Eliezer, "Pressure Resistance of Glass Capillaries for Hydrogen Storage," *Materials Testing*, vol. 53, pp. 14-18, 2011.

- [17] "A New Technology for Hydrogen Storage," C.En, <https://www.cenh2.com/>. [Accessat 13 Octombrie 2024].
- [18] A. Ratoi, C. Munteanu and D. Eliezer, "The Potential of Polymers and Glass to Enhance Hydrogen Storage Capacity: A Mathematical Approach," *Materials*, vol. 17, no. 24, p. 6065, 2024.
- [19] T. Brunner, "BMW Hydrogen. Hydroen Storage Wrkshop," 15 February 2011. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/oem-perspective-cryogenic-h2-storage>. [Accessat 24 Ianuarie 2025].
- [20] R. Krishna, E. Titus, M. Slimian, O. Okhay, S. Rajendran, A. Rajkumar and M. G. Sousa, "Hydrogen Storage for Energy Application," in *Hydrogen Storage*, Intechopen, 2012.
- [21] A. Ratoi, C. Munteanu and D. Eliezer, "Maximizing Onboard HydrogenStorage Capacity by Exploring High-Strength Novel Materials Using a Mathematical Approach," *Materials*, vol. 17, no. 17, p. 4288, 2024.

Anexa 1 – Lista publicațiilor originale ale autorului

Articole indexate Web of Science cu Factor de Impact:

- Ratoi, A.; Munteanu, C.; Eliezer, D., „Maximizing Onboard Hydrogen Storage Capacity by Exploring High-Strength Novel Materials Using a Mathematical Approach”. *Materials* **2024**, *17*, 4288. <https://doi.org/10.3390/ma17174288>, **Impact Factor (2024) 3.1 – Q1**.
- Ratoi, A.; Munteanu, C.; Eliezer, D., „The Potential of Polymers and Glass to Enhance Hydrogen Storage Capacity: A Mathematical Approach”. *Materials* **2024**, *17*, 6065. <https://doi.org/10.3390/ma17246065>, **Impact Factor (2024) 3.1 – Q1**.

Articole indexate in Baze de Date Internaționale:

- Ratoi, A.; Munteanu C.; Istrate B.; Eliezer D. „Review of Properties, Composition and Defects of Different Glasses with Potential Use for Gas Hydrogen Storage Systems”. *European Journal of Materials Science and Engineering* **2021**, *6*, 3, 142-147. <https://doi.org/10.36868/ejmse.2021.06.03.142>.

Articole în Buletinul Institutului Politehnic din Iași:

- Ratoi A.; Eliezer D., Munteanu C. „A Combined Materials Science and Mechanical Approach to the Study of Hydrogen Embrittlement of Structural Materials”, *BIPI* **2021**, 67(71), 1-2.

Prezentări în cadrul Conferințelor:

- Ratoi A.; Munteanu C. „Vehicles of the Future. Hydrogen Propulsion”, *Young in a Pollution-Free City Conference*, Iasi, Romania, 2019.

- Ratoi A.; Eliezer D.; Munteanu C. „A Combined Materials Science and Mechanical Approach To The Study of Hydrogen Embrittlement of Structural Materials”, *TUIASI 4th International Conference of the Doctoral School*, Iasi, Romania, 2021.
- Ratoi A.; Munteanu C.; Istrate B.; Eliezer D. „Capillary Tube Gas Hydrogen Storage. Calculation and Optimization”, *BRAMAT 12th International Conference on Materials Science & Engineering*, Brasov, Romania, 2022.

Proiecte:

- Membru în proiectul „Hydrogen Storage. A Case Study on Hydrogen Storage & Applications” ca parteneriat între Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași și C.En – Stand for Clean Energy Company, 2019. Coordonator TUIASI: prof.univ.dr.ing. Munteanu Corneliu.