



Domeniul Inginerie Mecanică

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Evaluarea integrității structurale a bateriilor vehiculelor electrice

Student-doctorand:
Adrian Daniel MUREȘANU

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Mircea Cristian DUDESCU

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Prenume Nume** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Prenume Nume** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Prenume Nume** - Universitatea
.....;

- Prof. Dr. Ing. **Prenume Nume** - Universitatea
.....;

- Conf. Dr. Ing. **Prenume Nume** - Universitatea
.....

- Cluj-Napoca -
2025

CUPRINS

ABREVIERI	9
INTRODUCERE	11
STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	15
1. Stadiul actual al cercetărilor în evaluarea structurală a bateriilor Li-Ion	17
1.1. Problemele de siguranță în cazul abuzului mecanic al bateriilor Li-Ion	17
1.1.1. Mecanisme și factorii declanșatori ai aprinderii celulelor Li-Ion în vehiculele electrice	17
1.1.2. Tipuri de abuz mecanic	18
1.2. Elemente constructive ale celulei li-ion	19
1.2.1. Carcasa bateriei: funcții și materiale	20
1.2.2. Separatorul	21
1.2.3. Structura și materialele anodului în bateriile Li-Ion	22
1.3. Analiza comportamentului mecanic al celulelor și impactul asupra jelly roll-ului	23
1.3.1. Fenomenul de densificare al jelly roll-ului în timpul compresiei mecanice	24
1.3.2. Anizotropia celulei la deformare	24
1.3.4. Degradare structurală și deteriorarea mecanică a jelly roll-ului	25
1.4. Clasificarea bateriilor	25
1.4.1. Clasificare pe baza de formă	26
1.4.2. Clasificare în funcție de scala de utilizare	27
1.5. Reglementări internaționale privind siguranța bateriilor în vehicule electrice	29
1.5.1. Teste și cerințe de siguranță aplicabile celulelor individuale Li-Ion	30
1.5.2. Evaluarea siguranței la nivel de pachet: reglementări și protocoale de testare	31
1.5.3. Reglementări și teste de omologare aplicabile vehiculelor electrice	33
2. Stadiul actual al cercetărilor numerice în a structurii bateriilor Li-Ion	34
2.1. Modelare numerică a comportamentului mecanic al celulei Li-Ion	34
2.1.1. Modelare numerică a cedării materialelor și predicția scurtcircuitului intern în celulele Li-Ion	34
2.1.2. Metode numerice în influența densificării și a ratei de deformare asupra comportamentului celulei Li-Ion	35
2.1.3. Resurse computaționale și metode numerice utilizate în modelarea celulelor Li-Ion	36
2.1.4. Abordări numerice în analiza structurală și funcțională a celulelor de baterii	36
2.2. Modelare numerică a comportamentului mecanic a pachetelor de celule Li-Ion	40
2.2.1. Arhitectura internă a pachetului și răspunsul la solicitări externe	41
2.2.2. Configurații de împachetare a celulelor	42
2.3. Modelare numerică a comportamentului mecanic a vehiculelor electrice de celule Li-Ion	47

2.3.1. Zone deformabile și elemente de crash-management în vehicule electrice 47

2.3.2. Optimizarea poziționării pachetului de baterii pentru performanță și siguranță 61

CONTRIBUȚIA PERSONALĂ 65

3. Ipoteza de lucru și obiective 67

4. Metodologie generală 68

5. Modelarea numerică a bateriilor. Calibrarea unor modele de material 69

5.1. Introducere 69

5.2. Ipoteze de lucru și obiective 74

5.3. Material și metodă 75

5.4. Rezultate 106

5.5. Testarea la impact 107

5.6. Concluzii 116

6. Analiza integrității mecanice a bateriilor în diverse situații de solicitare. 120

6.1. Introducere 120

6.2. Ipoteza de lucru/obiective 122

6.3. Material și metodă 123

6.4. Rezultate 132

6.5. Discuții 144

6.6. Concluzii 148

7. Analiza la impact a bateriilor și a pachetelor de baterii din componenta unui vehicul electric. 150

7.1. Introducere 150

7.2. Ipoteze de lucru și obiective 152

7.3. Material și metodă 165

7.4. Rezultate 169

7.6. Concluzii 174

8. Concluzii și contribuții personale 176

REFERINȚE 183

LISTA FIGURILOR 201

LISTA TABELELOR 206

LISTĂ DE PUBLICAȚII 209

Introducere și obiectivul lucrării:

Bateriile Li-ion utilizate în vehiculele electrice reprezintă un element esențial atât din punct de vedere energetic, cât și al siguranței generale al acestuia. În contextul accidentelor rutiere sau în timpul manipulării, acestea pot suferi avarii fizice semnificative, care pot conduce la declanșarea unor scurtcircuite interne, cu riscul asociat de incendii spontane sau explozii prin declanșarea fenomenului de thermal runaway. Prin urmare, siguranța structurală a pachetelor de baterii devine un obiectiv critic de cercetare pentru industria vehiculelor electrice. În această lucrare, se urmărește evaluarea bateriilor Li-ion la impact, prin combinarea simulărilor numerice avansate în software-ul LS-DYNA cu teste experimentale realizate în condiții controlate de laborator. Cercetarea integrează mai multe etape fundamentale: caracterizarea materialelor componente ale bateriei, modelarea

geometrică CAD a modului de baterie, definirea scenariilor de impact relevante și rularea simulărilor numerice axate pe deformare, absorbție de energie și integritate structurală. Aceste rezultate sunt apoi validate prin experimente fizice, iar datele obținute sunt analizate comparativ pentru a confirma corelarea între simulări și măsurători reale. Studiul este realizat pe trei niveluri distincte: celulă individuală, pachet de celule și vehicul complet. Lucrarea are ca rezultat realizarea a unor modele FEM detaliate – utile pentru analiza componentelor celulei în timpul deformării – și omogenizate, eficiente numeric potrivite pentru simulări la scară mare. Sunt propuse soluții de optimizare structurală a pachetelor de baterii și a bateriilor mari de vehicule electrice, în vederea creșterii nivelului de protecție oferit în timpul coliziunilor. De asemenea sunt propuse metodologii de definire a unui caz de solicitare dinamic cu parametri obținuți în urma simulării unui întreg autovehicul electric.

Contribuții generale:

Lucrarea este structurată pe patru capitole principale ale contribuției persoanele, fiecare abordând o etapă esențială în analiza comportamentului mecanic al bateriilor Li-ion.

Primul capitol, dedicat **stadiului actual al cercetărilor**, oferă o privire de ansamblu asupra progreselor realizate în domeniul evaluării structurale a bateriilor, evidențiind principalele riscuri asociate cu solicitările mecanice și impactul acestora asupra siguranței sistemelor de stocare a energiei.

La nivel de celulă, modelele FEM detaliate permit predicția deformărilor critice și a scurtcircuitelor interne. Modelarea numerică a bateriilor Li-Ion a devenit o unealtă indispensabilă pentru cercetători și ingineri, permițând investigarea în detaliu a comportamentului mecanic al bateriilor în condiții de impact. Modelele numerice dezvoltate trebuie să fie capabile să surprindă dependența de rata de deformare, iar utilizarea eficientă a resurselor de calcul este o provocare majoră.

În ceea ce privește nivelul de pachet, studiile s-au concentrat pe analiza structurii și a solicitărilor globale care apar între celule, evidențiind importanța modului de împachetare (layout-ul celulelor) în absorbția energiei și distribuția sarcinilor. Simulările la acest nivel oferă o imagine mai realistă asupra interacțiunii mecanice dintre celule în scenarii de compresie sau impact.

La nivelul vehiculului electric, cercetările numerice urmăresc integrarea pachetului de baterii în structura generală a caroseriei. Astfel, se investighează structuri de absorbție a energiei de impact, precum și așezarea eficientă a pachetului în arhitectura vehiculului, pentru a reduce riscul de deteriorare mecanică a celulelor și pentru a menține integritatea structurală a vehiculului în accidente. Aceste simulări contribuie la dezvoltarea unor soluții constructive robuste și la optimizarea topologică a spațiului destinat bateriei.

În cel de-al doilea capitol, intitulat **Modelarea numerică a bateriilor. Calibrarea unor modele de material**, sunt prezentate metodele și strategiile utilizate pentru construirea și validarea unor modele numerice capabile să reproducă cu acuratețe comportamentul mecanic al celulelor Li-ion supuse solicitărilor de impact. Cercetările desfășurate în această etapă au condus la dezvoltarea unor modele FEM de celule, de la cele detaliate – utile în analiza deformărilor componentelor interne și a potențialului de scurtcircuit intern – până la modele omogenizate, optimizate pentru eficiență computațională în simulări la nivel de pachet sau vehicul. Calibrarea acestor modele s-a realizat pe baza unor date experimentale, obținute din testări aplicate atât pe componente individuale ale celulei (carcasă, colectori de curent,

separator), cât și pe celula sau Jelly Roll complet, asigurând astfel o concordanță cât mai fidelă între comportamentul simulat și cel real. Contribuțiile acestui studiu se pot rezuma la următoarele:

- Modelarea și calibrarea unor materiale de calcul numeric cu metoda elementului finit pe baza testelor experimentale. atât a componentelor individuale a unei celule cât și a celulei întregi pentru o abordare de material omogenizat.



Figura 1. Încercarea de tracțiune a materialelor bateriei ca epruvete individuale sau așezate tip sandviș.



Figura 2. Test de compresie uni axială a bateriei efectuat pe o mașină de testare universală.

- Validarea acestor materiale cu ajutorul unor cazuri de solicitare experimentală folosind tehnici avansate de măsurare, spre exemplu scanarea 3D.

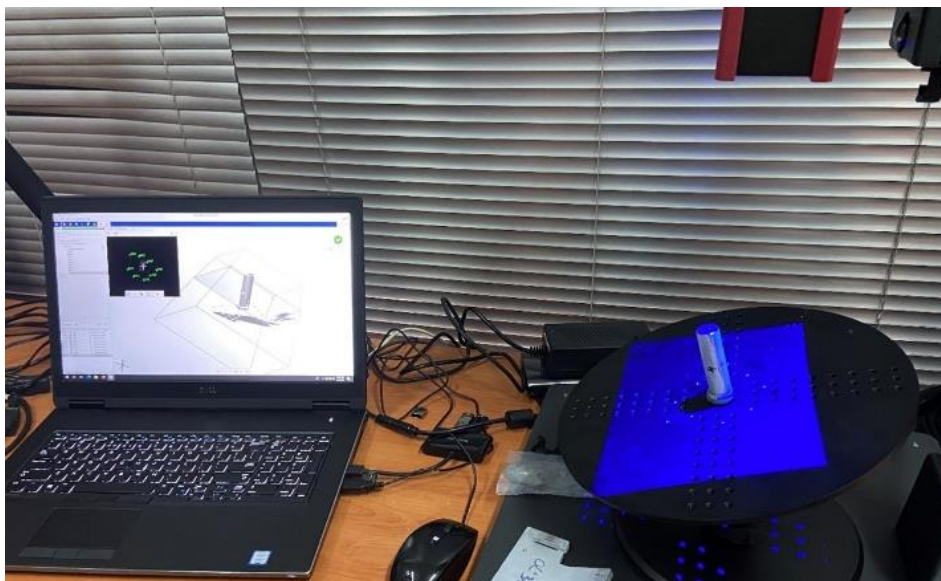


Figura 3. *Procedura optică de scanare 3D a bateriei afectate.*

- Ca rezultat al definirii materialelor, trei tipuri de modelare numerică a celulelor au fost create: detaliat, parțial omogenizat și total omogenizat.

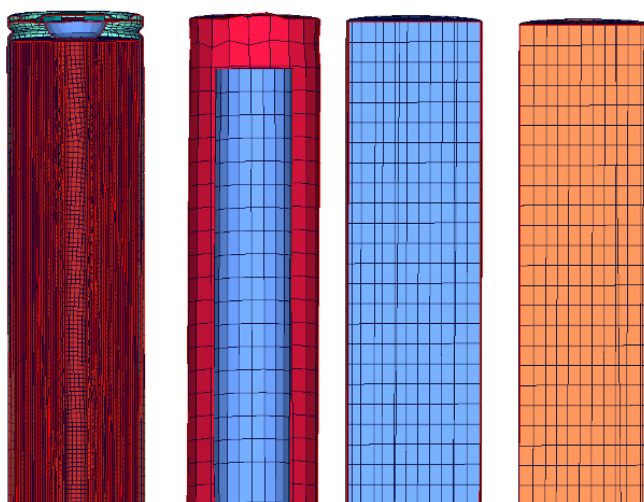


Figura 4. *De la stânga la dreapta, model în detaliu spre model complet omogenizat.*

Capitolul ***Analiza integrității mecanice a bateriilor în diverse situații de solicitare*** explorează comportamentul structural al pachetelor de baterii supuse unor scenarii variate de solicitare mecanică. În urma documentării din literatură, a fost propusă o soluție constructivă inovatoare de îmbunătățire a integrității structurale – introducerea unor distanțiere între celulele individuale. Rezultatele obținute au evidențiat versatilitatea soluției

propușe, în special prin: testarea mai multor moduri de aranjare a celulelor în pachet, analiza comportamentului structural al acestuia în diferite scenarii de încărcare, static și dinamic, precum și evaluarea diferitelor materiale candidate pentru distanțiere. Validarea modelului numeric s-a realizat prin corelarea cu date experimentale obținute în laborator, ceea ce a confirmat acuratețea modelului omogenizat din capitolul anterior. Un aspect important al soluției propuse este faptul că îmbunătățirea rezistenței structurale nu implică sacrificarea capacității energetice a bateriei, ceea ce o face ideală pentru implementare în aplicații reale din industria auto. Contribuțiile acestui studiu au avut ca rezultate:

- Găsirea unei soluții de optimizare a siguranței pasive a unui pachet de baterii Li-ion, prin îmbunătățirea forței necesare deformării. Acest lucru a avut ca idee centrală adăugarea unor distanțiere între baterii, din materiale diferite: aluminiu și PLA printat. Fără a scădea volumul de baterii dintr-un pachet, forța necesară a fost mărită de până la patru ori în unele cazuri, iar intruziunea scăzută considerabil în cazurile de impact dinamic.

- Validarea conceptului atât prin simulări cu metoda elementului finit cât și experimental. Alinierea bună a simulărilor cu experimentele a întărit validitatea calibrărilor de material omogenizat, în cazul celulei individuale. Simularea a permis studierea mai multor cazurilor diferite de încărcare: compresie cu o placă sau cilindru, configurări de așezare diferite sau utilizarea de materiale diferite, pentru a demonstra robustețea soluției propuse.

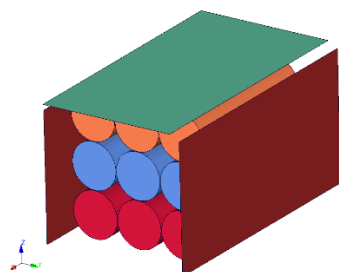


(a)

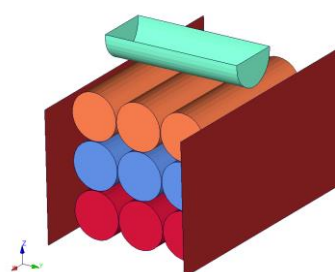


(b)

Figura 5. Experiment de comprimare a pachetului de celule: (a) fără distanțiere; (b) distanțiere printate.



(a)



(b)

Figura 6. Impactoare utilizate pentru compresie: (a) placă de compresie; (b) cilindru de compresie.

- Compararea rezultatelor experimentale cu datele obținute din simulări a evidențiat o corelație puternică între curbele forță-deplasare. În cazul pachetului fără distanțiere, alinierea a fost aproape perfectă, în timp ce pentru configurația cu distanțiere, deformarea experimentală a fost mai redusă decât cea simulată la o sarcină de 20 kN, ceea ce indică faptul că simularea subestimează rigiditatea reală cu aproximativ 20%.

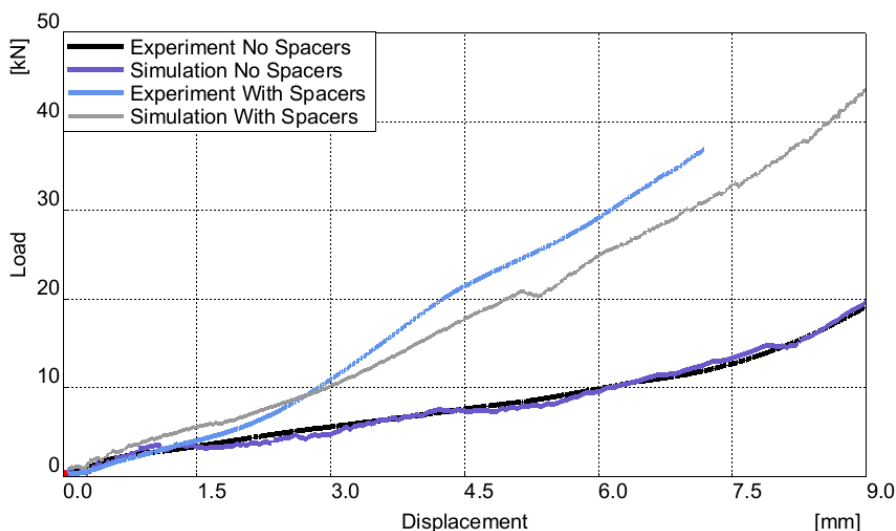
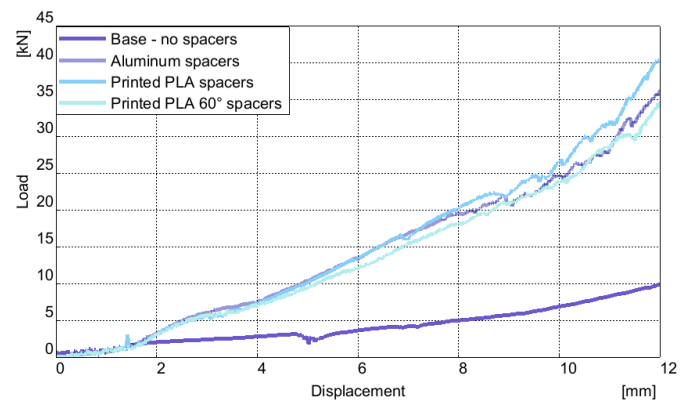


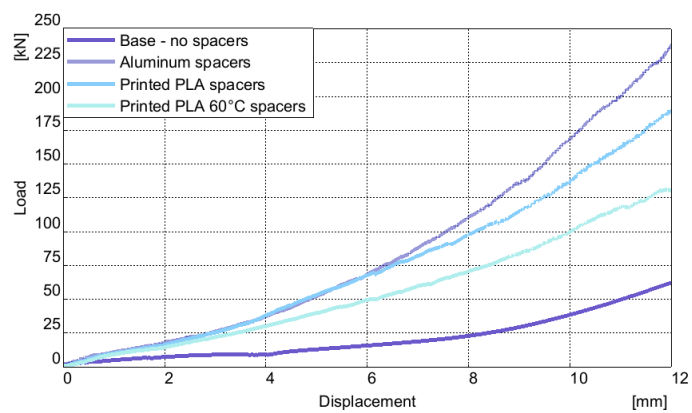
Figura 7. Curbele de validare forță de compresie-deplasare.

- Au fost investigate trei tipuri de materiale: aluminiu, PLA printat 3D și PLA printat și condiționat la 60 °C. S-a observat că eficiența distanțierelor crește odată cu rigiditatea materialului, cele din aluminiu distribuind cel mai eficient forțele. Totodată, a fost evaluat și impactul asupra masei pachetului, distanțierele din aluminiu adăugând 26% masă suplimentară, comparativ cu doar 8% în cazul celor din PLA.

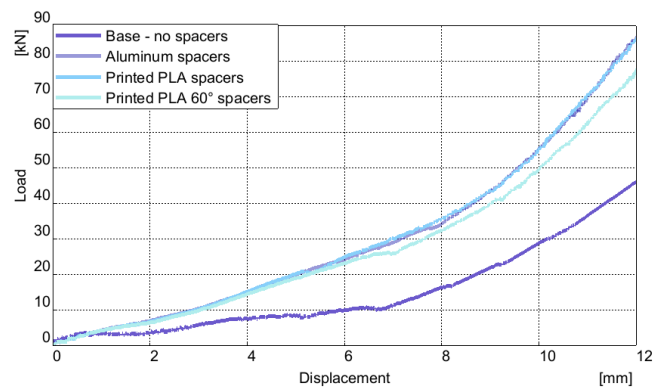
- În testele de compresiune statică cu placă, configurația V1 a înregistrat creșteri ale rigidității de 400% cu distanțiere din aluminiu și 360% cu PLA, însă rigiditatea cu PLA a scăzut cu 12,5% atunci când a fost condiționat la 60 °C. Configurația V2 a arătat îmbunătățiri de 363,3% (aluminiu) și 308,3% (PLA), cu o reducere de 29,7% pentru PLA la temperatură ridicată. Configurația V3 a înregistrat creșteri de 193% (aluminiu) și 192% (PLA), dar o scădere de doar 11% a rigidității PLA la 60 °C. Rezultate similare au fost observate în testele de compresiune cu cilindru: V1 a înregistrat o creștere de 571% a rigidității cu aluminiu, V2 cu 425%, iar V3 cu 219%. În cazul PLA-ului la 60 °C, scăderile au fost de 21% pentru V1, 33% pentru V2 și 9% pentru V3.



(a)

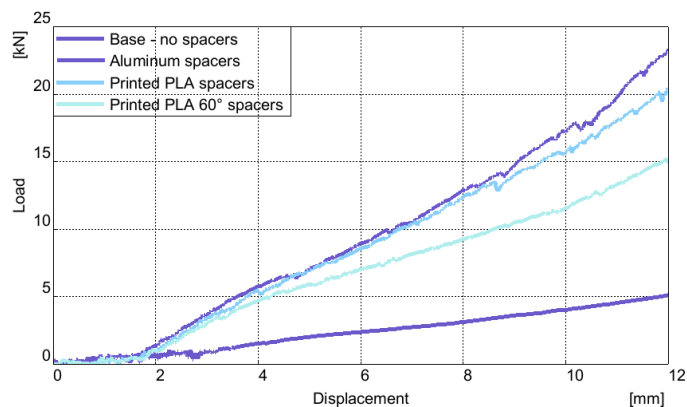


(b)

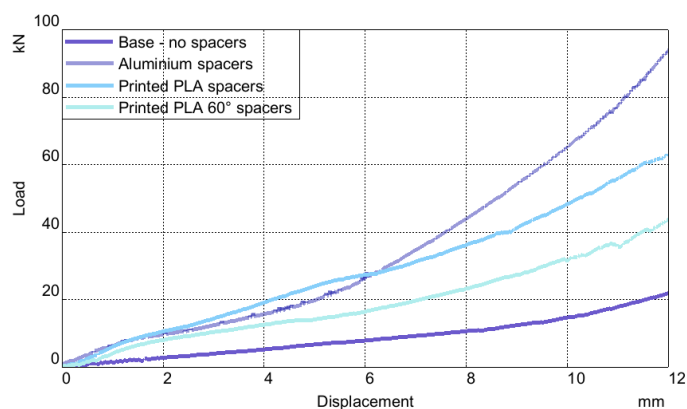


(c)

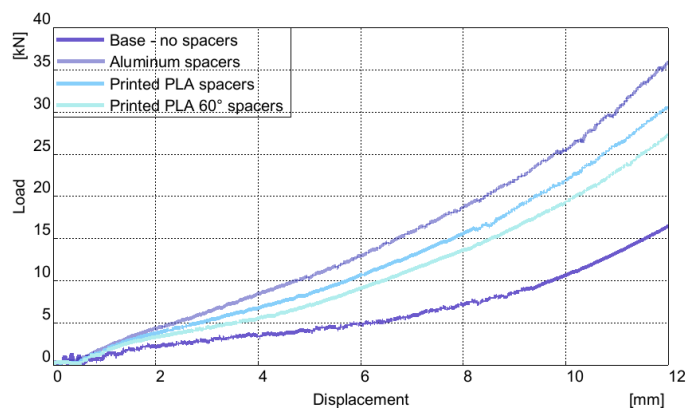
Figura 8. Curba forță-deplasare a plăcii de compresie pentru diferite configurații de celule: (a) V1; (b) V2; (c) V3.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Curba forță-deplasare a cilindrului de compresie pentru diferite configurații de celule: (a) V1; (b) V2; (c) V3.

- Testele dinamice de impact au evidențiat reduceri semnificative ale intruziunii în pachetul de celule. Configurația V1 a prezentat o scădere de 42% a intruziunii atât cu distanțiere din aluminiu, cât și din PLA, cu o ușoară creștere la 60 °C. Configurațiile V2 și V3 au arătat de asemenea performanțe îmbunătățite, cu reduceri ale intruziunii de 22%, respectiv 15% cu PLA.

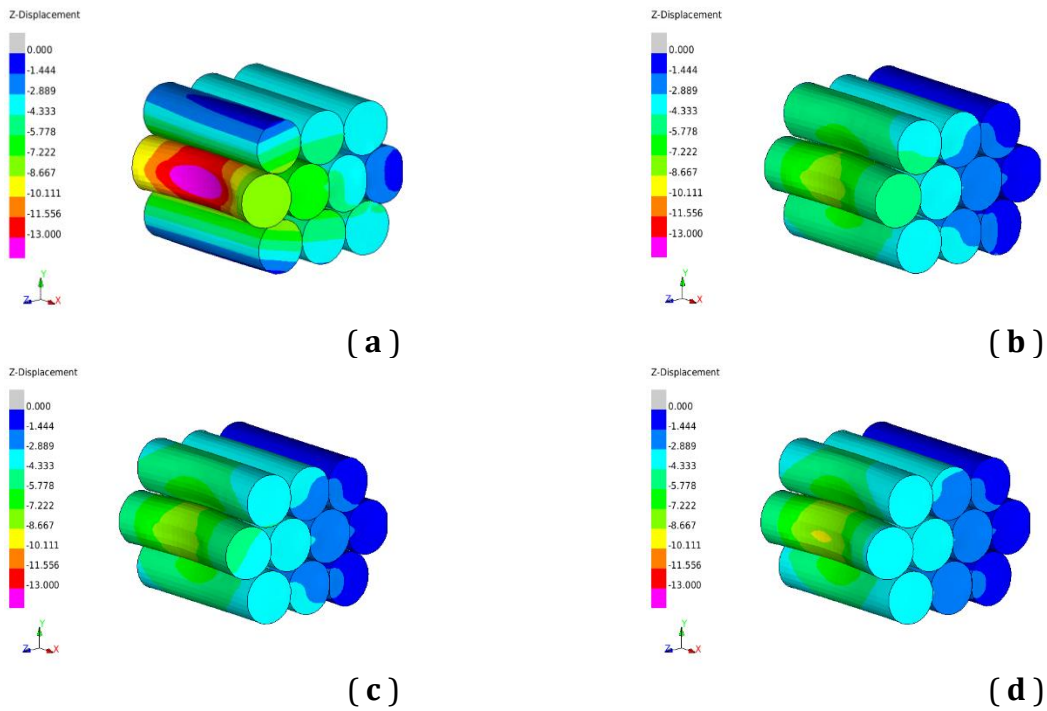


Figura 10. Intruziune de încărcare dinamică în configurația celulei V1: (a) fără distanțiere; (b) aluminiu; (c) PLA printat; (d) PLA printat la 60 °C.

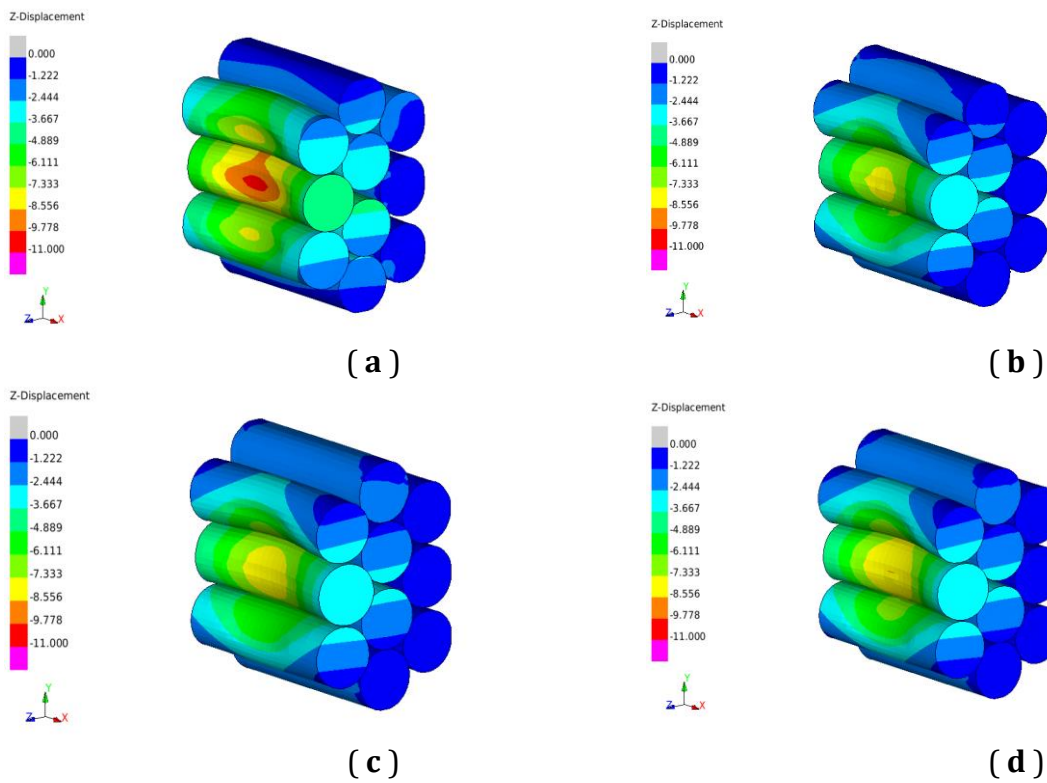


Figura 10. Intruziune de încărcare dinamică în configurația celulei V2: (a) fără distanțiere; (b) aluminiu; (c) PLA printat; (d) PLA printat la 60 °C.

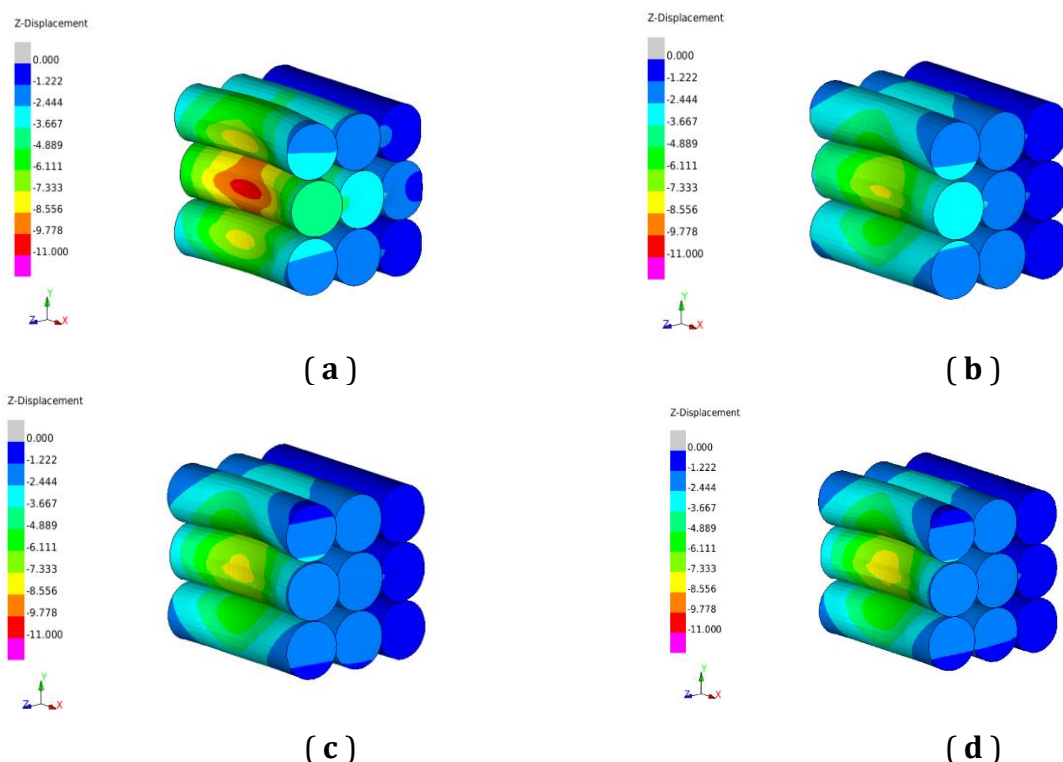
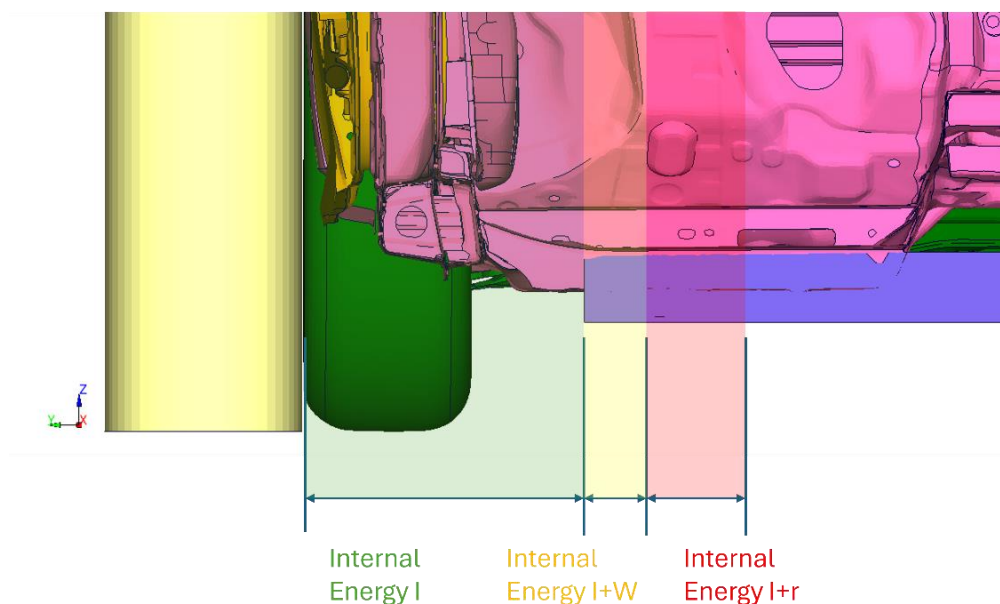


Figura 11. Intruziune de încărcare dinamică în configurația celulei V3: (**a**) fără distanțiere; (**b**) aluminiu; (**c**) PLA printat; (**d**) PLA printat la 60 °C.

Ultimul capitol al contribuției personale ***Analiza la impact a bateriilor si a pachetelor de baterii din componenta unui vehicul electric***, se abordează problema siguranței într-un context aplicat și realist. În această etapă, s-a dezvoltat o metodologie dedicată simulării unui scenariu de impact lateral, cât mai apropiat de condițiile reale întâlnite și de standardele internaționale de testare a siguranței vehiculelor. Procesul a început prin conversia și simplificarea unui model numeric de vehicul convențional într-unul adaptat arhitecturii unui vehicul electric. De asemenea a fost realizată modelarea unui volum reprezentativ pentru pachetul de baterii Li-ion, a cărei comportare structurală a fost validată prin simulări numerice. Pe această bază, s-a desfășurat un studiu de optimizare a structurii unei baterii de vehicul electric, în care au fost analizate diferite soluții constructive, scenariile de impact și poziționări a impactorului, în vederea maximizării protecției celulelor. Contribuțiile principale ale acestui studiu sunt:

- Definirea unei metodologii originale pentru optimizarea unui cadru de baterie a unui EV, optimizând în același timp și resursele de calcul. Metoda are potențial de aplicare pe platforme hibride — care deserveșc atât vehicule convenționale, cât și electrice — sau în situații în care proiectarea cadrului bateriei se face fără acces complet la datele modelului integral al vehiculului, ci doar pe baza parametrilor de impact disponibili.



I = Y direction intrusion.
 +W = plus the width of the battery profile.
 +r = plus the rest of whole crash intrusion.

Figura 12. *Diagrama energiilor vs. intruziuni.*

- Simulările au fost realizate utilizând un model simplificat de Toyota Camry în LS-DYNA, concentrându-se pe scenariul de impact lateral cu stâlp, la două viteze distincte și în două poziții ale stâlpului. Modelul a integrat un cadru fictiv al bateriei, cu masă virtuală, pentru a reproduce cu acuratețe centrul de masă al vehiculului și a oferi o vizualizare realistă a amplasării bateriei. Parametrii energetici extrași din aceste simulări au fost utilizați pentru definirea cazurilor de încărcare în vederea optimizării cadrului bateriei, evaluând performanțele acestuia la viteze de impact de 50 km/h și 87 km/h.

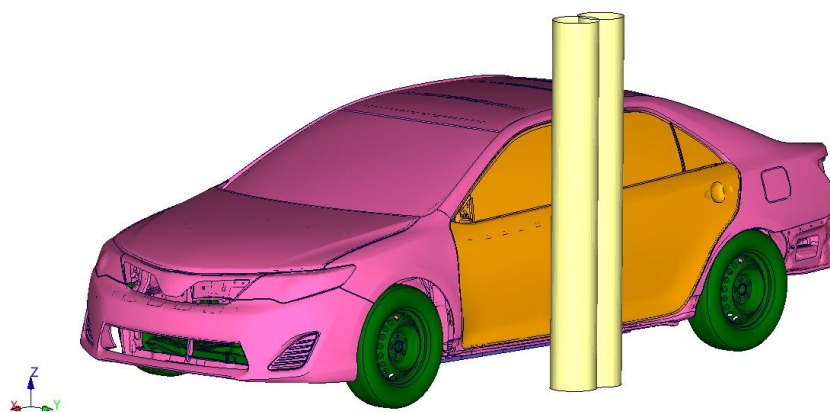


Figura 13. *Pozițiile barierelor de tip stâlp.*

- Lucrarea introduce, de asemenea, o metodă inovatoare pentru definirea proprietăților materialelor unui modul reprezentativ de celule. Aceasta a constat în simularea compresiunii unui pachet de nouă celule, precum și a unui volum solid echivalent, pentru a alinia curbele de forță-deplasare.

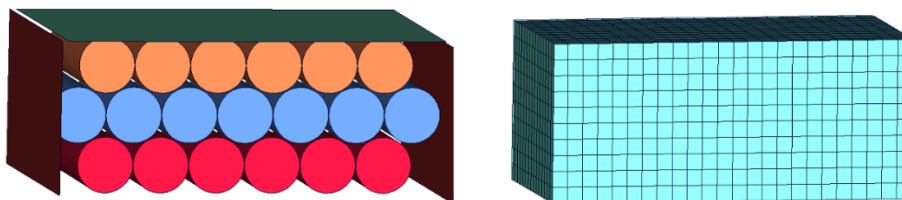


Figura 14. Simularea compresiiei celulelor cu dimensiunea dublată.

- Pentru procesul de optimizare a cadrului, au fost definite patru cazuri de încărcare, ce implicau impactul cu un stâlp la două viteze, 50 km/h și 87 km/h, și în două poziții: una nominală și alta deplasată cu +200 mm pe axa X. Aceste scenarii au fost utilizate pentru a evalua comportamentul diferitelor configurații structurale.

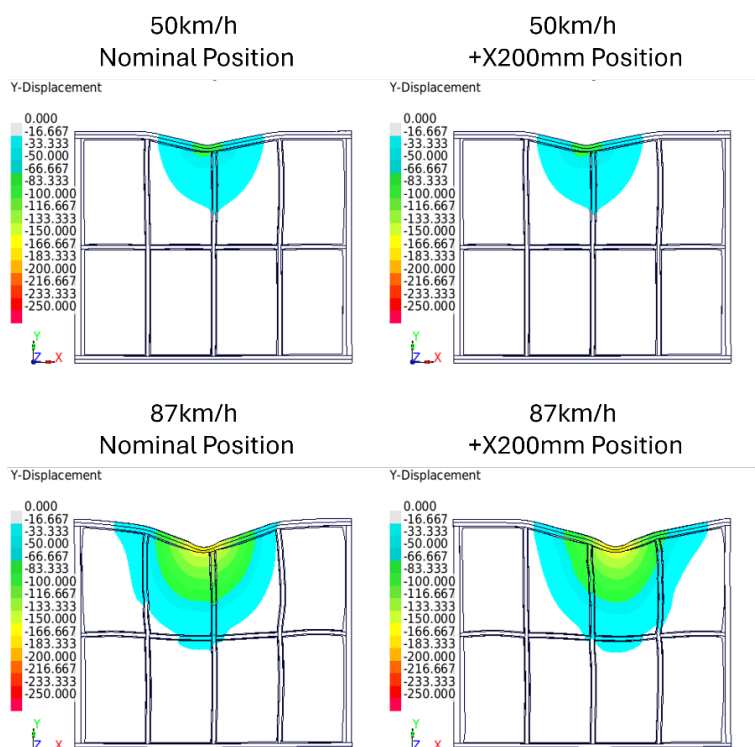


Figura 15. Valorile intruziunilor pentru configurația V1.

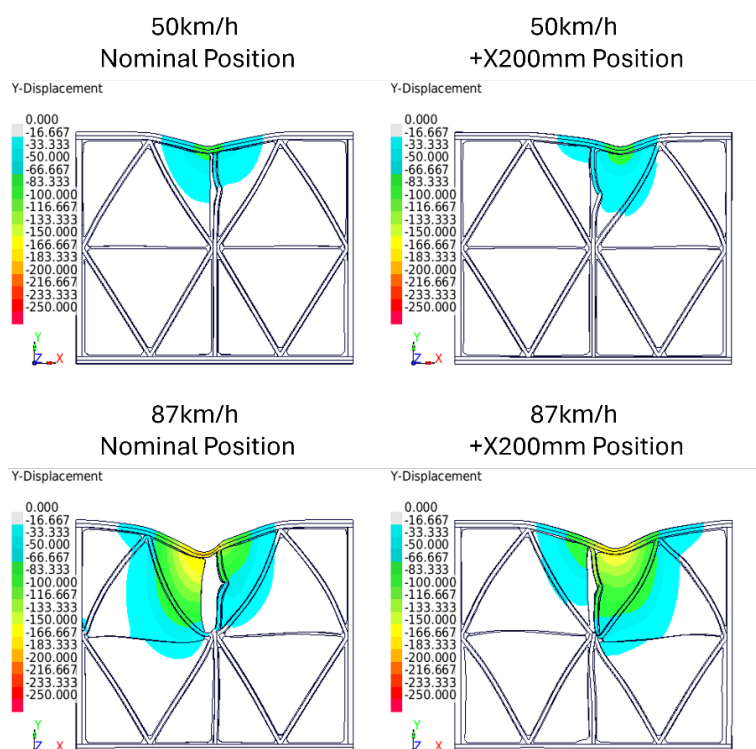


Figura 16. Valorile intruziunilor pentru configurația V2.

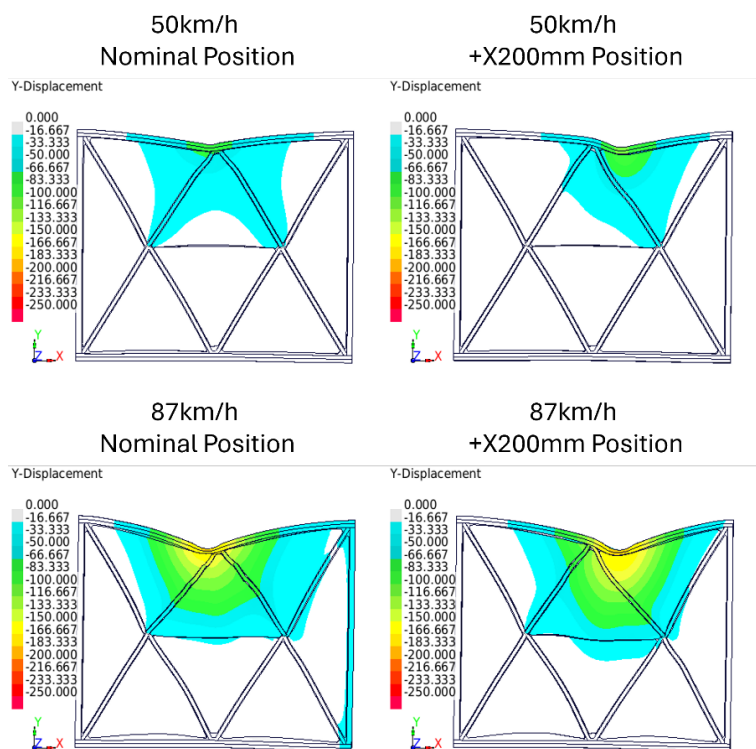


Figura 17. Valorile intruziunilor pentru configurația V3.

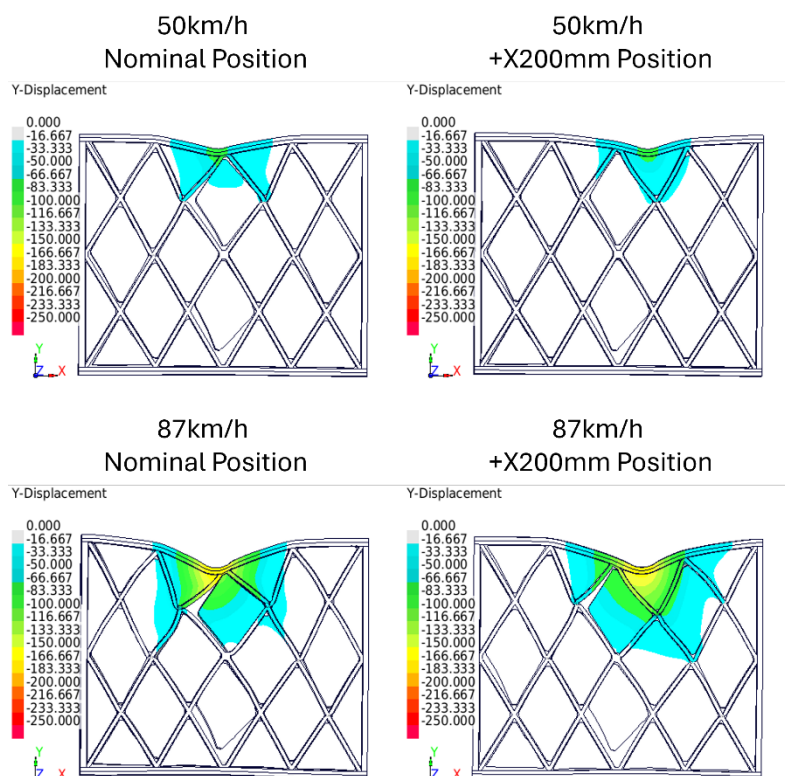


Figura 18. Valorile intruziunilor pentru configurația V4.

- Metodologia propusă aduce avantaje computaționale importante, permițând extragerea parametrilor esențiali de impact dintr-un model complet de vehicul și aplicarea acestora într-un scenariu de încărcare dinamică focalizat exclusiv pe baterie. Comparativ cu abordările tradiționale, această metodă elimină necesitatea unui model complet al vehiculului, fiind suficienți doar parametrii cheie ai impactului. Astfel, efortul computațional este semnificativ redus, iar optimizările iterative pot fi realizate direct pe modelul bateriei, facilitând o evaluare rapidă a diferitelor configurații.

Concluzii generale:

În concluzie, tema abordată în această lucrare a fost tratată într-un mod amplu și integrator, parcurgând toate etapele esențiale pentru evaluarea integrității ale bateriilor Li-ion în contextul vehiculelor electrice. De la analiza extinsă a literaturii de specialitate și până la realizarea unor modele numerice avansate, calibrate cu date experimentale, cercetarea s-a concentrat pe obținerea unui echilibru între acuratețea modelării și eficiența computațională, prin dezvoltarea unor modele de material numerice calitative. Contribuțiile aduse se aliniază unui domeniu de interes major în literatura actuală – siguranța bateriilor în condiții de impact sau abuz mecanic – și includ: dezvoltarea de modele FEM pentru celule individuale, cu variații de la descrieri detaliate până la forme omogenizate optimizate; propunerea unei soluții robuste de consolidare structurală a pachetelor prin utilizarea distanțierelor, fără afectarea capacității energetice; validarea modelărilor numerice prin experimente, care confirmă utilitatea și precizia modelelor utilizate; studiu pentru îmbunătățirea siguranței bateriilor în

autovehiculul electric; precum și elaborarea unei metodologii pentru aplicarea unei solicitări dinamice realiste în simulările de impact lateral. Toate aceste rezultate sunt susținute de lucrări publicate în reviste științifice cu factor de impact ridicat (Q1 și Q2), confirmând relevanța științifică și aplicativă a cercetării desfășurate.

Lucrări publicate și indexate WOS

1. Muresanu, Adrian Daniel, Dudescu, Mircea Cristian. "Numerical and experimental evaluation of a battery cell under impact load." *Batteries* 8, no. 5 (2022): 48. <https://doi.org/10.3390/batteries8050048>, WOS: [000803336900001](#) IF 4,6, Q2
2. Muresanu, Adrian Daniel, Dudescu, Mircea Cristian. "Modelling of a Cylindrical Battery Mechanical Behavior under Compression Load." *Batteries* 10, no. 10 (2024). <https://doi.org/10.3390/batteries10100353>, WOS: [001342849600001](#), IF 4,6, Q2
3. Muresanu, Adrian Daniel, Dudescu, Mircea Cristian. "FEM Study on Enhancing Crashworthiness of Cylindrical Li-Ion Battery Packs Using Spacers Between the Cells." *Applied Sciences* 15, no. 5 (2025): 2720, <https://doi.org/10.3390/app15052720>, WOS: [001442414800001](#), IF 2.5 Q1.
4. Muresanu Adrian Daniel, Dudescu Mircea Cristian, David Tica. "Study on the Crashworthiness of a Battery Frame Design for an Electric Vehicle Using FEM." *World Electric Vehicle Journal* 15, no. 11 (2024): 534. <https://doi.org/10.3390/wevj15110534>, WOS: [00136655750000](#), IF 2.6 Q2

Lucrări la conferințe

1. Adrian D. Muresanu, Vasilica Cimpoeș, Mircea C. Dudescu, "Numerical Investigation of Horseshoe Lattice Structures for Crashworthiness Improvement of a Battery Frame", The 3rd International Conference on Mechanical System Dynamics (ICMSD2025), September 23-27, 2025, Cluj-Napoca, Romania (acceptata pentru prezentare)

Citări ale lucrărilor publicate

Lucrările publicate au următoarele citări:

Publicația	Citări Google Academic	Citări Web of Science
1	11	9
2	1	1
3	1	-
4	1	1