

Ioan SZABO

Cercetări privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipează vehiculele electrice

Teză de doctorat



UTPRESS

Cluj-Napoca, 2023

ISBN 978-606-737-652-4

Ioan SZABO

**CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA SOLICITĂRILOR
STRUCTURALE ASUPRA SURSELOR ENERGETICE CE
ECHIPEAZĂ VEHICULELE ELECTRICE**

TEZĂ DE DOCTORAT



UTPRESS

Cluj - Napoca, 2023

ISBN 978-606-737-652-4



Editura UTPRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Director: ing. Dan Colțea

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof.dr.ing. Nicolae Burnete
Conducător științific: Prof.dr.ing. Florin Mariașiu
Referenți:
Prof.dr.ing. Cristian Andreescu
Prof.dr.ing. Ilie Dumitru
Prof.dr.ing. Bogdan Varga

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2023 Editura UTPRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii UTPRESS.

ISBN 978-606-737-652-4

Bun de tipar: 17.06.2023

PREFAȚĂ

În prezent, datorită creșterii emisiilor poluante rezultate în urma utilizării vehiculelor echipate cu surse de propulsie convențională, se propun planuri și strategii sustenabile pentru o mobilitate electrică durabilă. Vehiculele electrice sunt cel mai cunoscut mijloc de transport care se integrează cel mai bine în contextul reducerii emisiilor poluante în marile aglomerări urbane și nu numai. Cu toate acestea, principalele obstacole în calea utilizării pe scară largă a vehiculelor electrice este autonomia limitată și siguranța pasagerilor în caz de accident rutier.

În contextul reducerii pagubelor și a măririi siguranței ocupanților din vehiculele electrice în urma accidentelor rutiere, în carte este prezentat un studiu comprehensiv al interacțiunilor complexe dintre elementele structurale ale vehiculelor electrice și sursele de energie utilizate, precum și implicațiile acestora asupra performanțelor vehiculului și a eficienței energetice. Evaluarea și optimizarea elementelor structurale s-a realizat utilizând tehnici și metode actuale de calcul completate de validarea experimentală a rezultatelor, cuantificând astfel impactul solicitărilor structurale asupra surselor energetice.

Cercetările expuse în această carte s-au extins pe durata stadiului doctoral din cadrul școlii doctorale de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, domeniul Inginerie Mecanică, fiind structurate pe 7 capitole, 223 de figuri, 14 tabele, 149 referințe bibliografice și cuprinde rezultatele cercetărilor doctorale.

Informațiile expuse în această carte reprezintă o resursă actuală valoroasă pentru cercetătorii care activează în domeniul cercetării și dezvoltării de vehicule electrice, fiind totodată adresată studenților de la specializările tehnice inginerești care doresc să studieze și să-și îmbunătățească cunoștințele tehnice prin utilizarea metodelor de optimizare a structurilor mecanice, propuse să crească siguranța bateriilor cu care sunt echipate vehiculele electrice.

CUPRINS

Abrevieri și notații..... 11

1. INTRODUCERE15

1.1. Argumentarea temei tezei de doctorat..... 17

1.2. Obiectivele tezei de doctorat..... 17

1.3. Metode și metodologia de cercetare 19

2. STADIUL ACTUAL PRIVIND INFLUENȚA SOLICITĂRILOR STRUCTURALE ASUPRA SURSELOR

ENERGETICE CE ECHIPEAZĂ VEHICULELE ELECTRICE23

2.1. Generalități și evoluția vehiculelor electrice.....23

2.2. Tipuri de vehicule electrice.....26

2.3. Tipuri de celule electrochimice33

2.4. Tipuri de electrozi și electroliți38

2.5. Contextul actual privind analiza surselor energetice utilizate în
construcția vehiculelor electrice din punct de vedere al solicitărilor
structurale.....40

2.5.1. Solicitări mecanice.....44

2.5.2. Efectele vibrațiilor și șocurilor asupra surselor energetice
litium-ion...55

2.5.3. Solicitări electrice.....55

2.5.4. Solicitări termice56

2.5. Concluzii56

3. ACTIVITĂȚI DE CERCETARE EXPERIMENTALĂ PRIVIND SOLICITĂRILE STRUCTURALE ALE SURSELOR ENERGETICE CE ECHIPEAZĂ VEHICULELE ELECTRICE....59

3.1. Metodologia de cercetare experimentală.....59

3.2. Stabilirea procesului de cercetare.....59

3.3. Realizarea standului experimental60

3.4. Stabilirea tipului de celulă electrochimică.....65

3.5. Stabilirea parametrilor de testare.....67

3.6. Încercări experimentale și achiziții de date67

3.6.1. Încercări pe celule tip cilindrice 1865068

3.6.1.1. Încovoierea în trei puncte a celulei cilindrice.....	68
3.6.1.2. Încovoiere simplă cu ajutorul dispozitivului T pe celula cilindrică	70
3.6.1.3. Deformare celulei cilindrice cu vârf semirotond cu raza de 6 mm.....	71
3.6.1.4. Străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	73
3.6.2. Încercări pe celule tip cilindrice 21700.....	74
3.6.2.1. Încovoierea în trei puncte a celulei cilindrice.....	74
3.6.2.2. Încovoiere simplă cu ajutorul dispozitivului T pe celula cilindrică	76
3.6.2.3. Deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotond cu raza de 6 mm.....	77
3.6.2.4. Străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	78
3.6.3. Încercări efectuate pe celule de tip prismatic	80
3.6.3.1. Încovoierea în trei puncte a celulei prismatice	80
3.6.3.2. Încovoierea laterală pe celula prismatică.....	81
3.6.3.3. Deformare cu vârf semirotond pe celula prismatică.....	83
3.6.3.4. Străpungerea cu vârf ascuțit pe celula prismatică	84
3.6.4. Încercări efectuate pe celule de tip pungă.....	86
3.6.4.1. Încovoiere în trei puncte a celulei de tip pungă.....	86
3.6.4.2. Încovoierea simplă pe celula de tip pungă.....	87
3.6.4.3. Încercări efectuate cu vârf semirotond pe celula de tip pungă.....	89
3.6.4.4. Străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit	90
3.7. Interpretarea rezultatelor	92
3.7.1. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de încovoiere în trei puncte	92
3.7.2. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de încovoiere simplă într-un punct.....	94
3.7.3. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de deformare cu vârf semirotond.....	96
3.7.4. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de străpungere cu vârf ascuțit.....	98

4. MODELAREA ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A SOLICITĂRILOR STRUCTURALE ALE SURSELOR ENERGETICE UTILIZATE ÎN CONSTRUCȚIA VEHICULELOR ELECTRICE 101

4.1. Scopul modelării și simulării numerice a solicitărilor structurale la sursele energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice	101
4.2. Metodologie	101
4.2.1. Modelarea celulelor.....	102
4.2.2. Condițiile inițiale ale procesului de simulare.....	105
4.2.3. Realizare simulări și obținerea datelor	106
4.3. Simulări efectuate la nivel de celulă.....	106
4.3.1. Simularea solicitărilor structurale pe celule tip cilindrice 18650.....	106
4.3.1.1. Simularea încovoierii în trei puncte a celulei cilindrice..	106
4.3.1.2. Simularea încovoierii simple pe celula cilindrică cu ajutorul dispozitivului T.....	108
4.3.1.3. Simularea deformării celulei cilindrice cu vârf semirotund cu raza de 6 mm	109
4.3.1.4. Simularea străpungerii celulei cilindrice cu vârf ascuțit .	110
4.3.2. Simularea solicitărilor efectuate pe celule cilindrice tip 21700.....	112
4.3.2.1. Încovoierea în trei puncte a celulei cilindrice de tipul 21700	112
4.3.2.2. Încovoierea laterală pe celula cilindrică de tipul 21700..	113
4.3.2.3. Deformare cu vârf semirotund pe celula cilindrică de tipul 21700	114
4.3.2.4. Străpungerea celulei cilindrice de tipul 21700 cu vârf ascuțit.....	115
4.3.3. Simularea solicitărilor efectuate pe celule de tip prismatic.....	117
4.3.3.1. Încovoierea în trei puncte a celulei prismatice	117
4.3.3.2. Încovoierea laterală pe celula prismatică.....	118
4.3.3.3. Deformare cu vârf semirotund pe celula prismatică.....	119
4.3.3.4. Străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit.....	121
4.3.4. Încercări efectuate pe celulele de tip pungă	122
4.3.4.1. Încovoiere în trei puncte a celulei de tip pungă.....	122
4.3.4.2. Încovoierea simplă pe celula de tip pungă	123
4.3.4.3. Încercări efectuate cu vârf semirotund pe celula de tip pungă.....	124

4.3.4.4. Străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit	125
4.1. Concluzii	126

5. ANALIZA REZULTATELOR OBȚINUTE DIN CERCETĂRILE EXPERIMENTALE ȘI SIMULAREA

SURSELOR ENERGETICE.....	129
5.1. Rezultate obținute pentru celula cilindrică 18650	129
5.1.1. Încovoierea în trei puncte	129
5.1.2. Încovoiere simplă	130
5.1.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund	130
5.1.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit	131
5.2. Rezultate obținute pentru celula cilindrică 21700	132
5.2.1. Încovoiere în trei puncte	132
5.2.2. Încovoiere simplă	133
5.2.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund	134
5.2.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit	134
5.3. Rezultate obținute pentru celula prismatică	135
5.3.1. Încovoiere în trei puncte	135
5.3.2. Încovoiere simplă	136
5.3.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund	136
5.3.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit	137
5.4. Rezultate obținute pentru celula de tip pungă	138
5.4.1. Încovoiere în trei puncte	138
5.4.2. Încovoiere simplă	138
5.4.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund	139
5.4.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit	140
5.5. Concluzii generale	140

6. MODELAREA, OPTIMIZAREA ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A SOLICITĂRILOR STRUCTURALE PE GRUPUL DE BATERII CE ECHIPEAZĂ VEHICULELE ELECTRICE ...

6.1. Optimizarea topografică a carcasei modulului.....	143
6.1. Simulări efectuate pe grupul de baterii la 10 m/s	146
6.1.1. Simulare realizată pe modul cu carcasă simplă	149
6.1.2. Simularea modulului cu carcasă optimizată.....	150
6.2. Simulări efectuate pe modul la 20 m/s	151
6.2.1. Simulare realizată pe modul cu carcasă simplă	151
6.2.2. Simulare realizată pe modul cu carcasă optimizată	152

6.3.	Simulări efectuate pe modul la 29 m/s	153
6.3.1.	Simulare realizată pe modulul cu carcasă simplă.....	153
6.3.2.	Simulare realizată pe modul cu carcasă optimizată	154
6.4.	Rezultate ale analizei comparative pentru cazurile de încărcare simulate.....	155

7. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI

PERSPECTIVE.....	157	
7.1.	Concluzii generale	157
7.2.	Contribuții	164
7.3.	Direcții de cercetare.....	166

8. BIBLIOGRAFIE.....	169
Lista figurilor	185
Lista tabelor.....	197

Abrevieri și notații

δ	Deplasarea
ε^e	Deformarea elastică
ε_{ij}	Sarcina care definește solicitarea la forfecare
ε^p	Deformația plastică
λ	Factorul de scară
σ	Tensiunea lui Cauchy
σ_{ij}	Sarcina care definește tensiunea normală
\emptyset	Diametru
Ω	Rezistența internă
Σ	Sumă
i	Direcție pe o anumită axă
j	Indice fictivă
3D	Tridimensional
Al	Aluminiu
AWD	Tracțiune integrală
BMS	Sistem de management pentru baterii
C	Matricea de rigiditate elastică
CAD	Proiectare asistată de calculator
CHEV	Vehicul electric hibrid complex
Co	Cobalt
CO ₂	Dioxid de carbon
DOD	Nivelul de descărcare
E	Etapă de lucru

EC	Eficiență columbică
EF	Element finit
E_{ij}	Modul de elasticitate
EREV	Vehicul electric hibrid cu autonomie extinsă
EV/VE	Vehicul electric
Fe	Fier
G_{ij}	Modul de forfecare
HC	Hidrocarburi
HEV	Vehicul electric hibrid
HUB	Propulsor integrat în roți
ICE	Motor cu ardere internă
ISC	Scurt circuit intern
K	Coeficient de elasticitate
Li/Li ⁺	Ion litiu
Li ₁₅ Si ₄	Litiu-Siciliu
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Titanat de Litiu
LiCoO ₂ (LCO)	Oxid de Litiu-Cobalt
LiFePO ₄ (LFP)	Litiu fier fosfat
Li-ion	Litiu-ion
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	Oxid de Litiu și Mangan
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Litiu Nichel Cobalt Oxid de Aluminiu
LiNiMnCoO ₂ (NMC)	Oxid de Litiu, Nichel, Mangan și Cobalt
LiNiO ₂	Oxid de Litiu și Nichel
M	Metal de tranziție
MEF	Metoda elementului finit
Mg	Magneziu
Mn	Mangan
NO _x	Oxizi de azot

OG	Obiectiv general
OS	Obiectiv specific
PE	Polietilenă
PHEV	Vehicul hibrid cu încărcare externă
PM	Particule în suspensie
PSI	Prevenirea și Stingerea Incendiilor
SOC	Starea de încărcare a unei baterii
SSM	Securitatea și Sănătatea în Muncă
SW	SolidWorks
Ti	Titan
UE	Uniunea Europeană
VCC	Vehicul cu celulă sau pilă de combustie
VH	Vehicul hibrid
X	Specie anionică

1. Introducere

Atenția asupra potențialului vehiculelor electrice de a fi o soluție pertinentă la reducerea masivă a gazelor cu efect de seră cauzate de transport este din ce în ce mai evidentă din partea industriei auto prin numeroase vehicule electrice deja prezente pe piață. Pentru că, la această oră, domeniul transportului folosește cu precădere mijloace de transport dotate cu motoare cu ardere internă, poluarea cauzată de acestea face din domeniul transporturilor unul dintre cei mai mari contribuitori la emisiile cu efect de seră și emisiile toxice care afectează populația. Utilizarea motoarelor cu ardere internă alimentate cu combustibili fosili (motorină sau benzină) duce la emisii toxice formate din dioxid de carbon (CO₂), monoxid de carbon (CO), oxizi de azot (NO_x), hidrocarburi (HC), particule în suspensie (PM), compuși organici volatili (COV) etc. [1, 2, 3] cu influențe directe și negative asupra mediului înconjurător și a sănătății umane [4, 5]. US Energy Administration Information a prezentat o serie de date legate de totalul de energie consumată la nivel mondial și a corelat acest consum cu cantitatea de CO₂ emisă de fiecare sector (domeniu) economic în parte [6, 7].

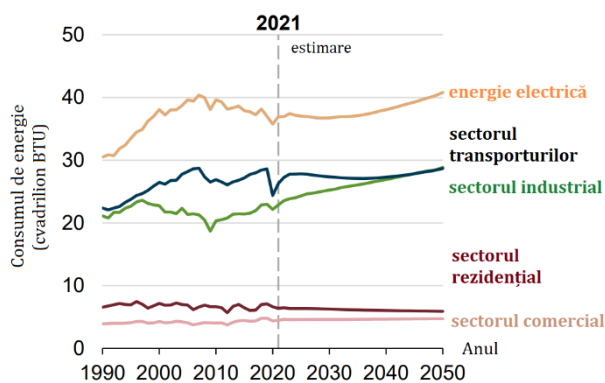


Fig. 1.1 Consumul energetic pe plan mondial (adaptare după [6])

În Fig. 1.1 și Fig. 1.2 se poate observa că sectorul transportului este responsabil de 27% din consumul energetic total, volum căruia îi corespunde o valoare de 33.7% cotă parte a emisiilor de CO₂.

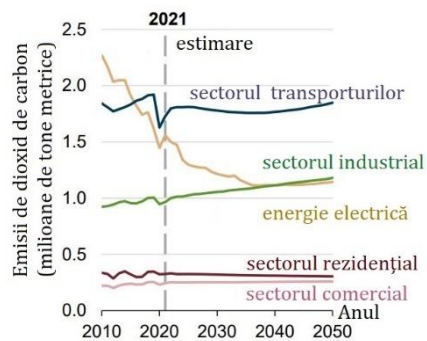


Fig. 1.2 Emisia de CO₂ pe plan mondial în funcție de domeniile de utilizare (adaptare după [6])

Din aceste motive primare, dezvoltarea și utilizarea vehiculelor electrice pot să contribuie direct și imediat la reducerea poluării cu gaze cu efect de seră, precum și la reducerea poluării în marile aglomerări urbane. Un aspect deloc de neglijat este și cel legat de costurile de operare/exploatare a autovehiculelor dotate cu motoare termice convenționale și a autovehiculele dotate cu grup motopropulsor electric. Se estimează că exploatarea unui vehicul electric costă de aproximativ 6 ori mai puțin decât cea a unui vehicul dotat cu motor cu ardere internă, deoarece diferența de costuri se datorează în primul rând randamentului mic al motoarelor cu ardere internă (aprox. 30-35%) comparativ cu randamentul motoarelor electrice (aprox. 90-92%). Randamentul redus al motoarelor termice este cauzat de eficiența mică de transformare a energiei chimice a combustibililor fosili în căldură (prin ardere) [3].

De asemenea, construcția vehiculelor dotate cu motoare termice presupune existența mai multor echipamente și dispozitive mecanice, care, de asemenea, din cauza fenomenelor de frecare reduc eficiența globală (randamentul) a unui motor termic. Fluxul de pierderi mecanice și termice cumulate duc la scăderea randamentului motorului termic cu până la de 3 ori față de un vehicul electric [8]. Comparativ, un vehicul electric consumă până la 75% din energie pentru deplasare (mișcare), energia necesară înmagazinată în bateriile de acumulatori fiind de aprox. 6-10 km/kWh [9]. Totuși pe lângă avantajele primare prezentate există două mari bariere de intrare masivă în piața auto a vehiculelor electrice:

- costurile ridicate a sursei energetice (bateriei);
- capacitatea redusă de înmagazinare a energiei electrice.

Se estimează de fapt că 45,3% din costul de achiziție al unui vehicul electric este reprezentat de costurile asociate cu sursa energetică, iar cele

două bariere de piață prezentate anterior sunt într-un anumit fel dependente [8, 9]. O capacitate energetică a bateriei ridicată implică costuri mai ridicate, dar în același timp cresc caracteristicile de greutate cu efect imediat în reducerea autonomiei vehiculelor electrice (a distanței posibile de a fi parcursă). Din aceste motive, la ora actuală există două tendințe în creșterea eficienței energetice a vehiculelor electrice prin:

- reducerea pierderilor mecanice prin reducerea numărului de componente din grupul propulsor electric;
- dezvoltarea unor sisteme de management al fluxurilor energetice la nivelul întregului vehicul.

1.1. Argumentarea temei tezei de doctorat

Pe baza acestor considerente de bază, se poate afirma că cercetările în domeniul autovehiculelor electrice sunt importante, având în vedere creșterea actuală și viitoare a numărului autovehiculelor electrice în circulație, cu efectul imediat că acestea vor produce inevitabil un număr de accidente rutiere. Ținând cont de costurile majore pe care o sursă de energie (bateria) le are din totalul costurilor de construcție ale unui autovehicul, precum și de riscul de aprindere a celulelor electrochimice cauzat de evenimentele rutiere (accidente) și necesitatea contemporană și viitoare de utilizare a acestora conform conceptului de economie circulară, alegerea temei tezei de doctorat este oarecum firească, fiind o temă de cercetare care urmărește îmbunătățirea surselor energetice ale autovehiculelor electrice încă din faza de proiectare, pentru a corespunde cerințelor legate de utilizarea și exploatarea acestora în condiții de maximă siguranță și fiabilitate.

1.2. Obiectivele tezei de doctorat

Atingerea dezideratului tezei de doctorat a fost realizată prin stabilirea unor obiective care trebuie îndeplinite, prin intermediul planului, a etapelor și a activităților specifice de lucru, cu un conținut de cercetare multi și interdisciplinară, necesare cercetării temei tezei de doctorat aleasă.

Obiectivul general (OG) al tezei de doctorat este îmbunătățirea siguranței vehiculelor electrice prin analiza și optimizarea construcției surselor energetice din perspectiva solicitărilor mecanice structurale.

Atingerea obiectivului general s-a realizat în mod consecvent prin atingerea unor obiective specifice (OS) stabilite pentru fiecare etapă de lucru, prin planul de cercetare al studiilor doctorale. Activitățile asociate pentru atingerea obiectivelor specifice fiecărei etape de lucru în scopul îndeplinirii obiectivului general al tezei de doctorat sunt prezentate în Tabelul 1.1.

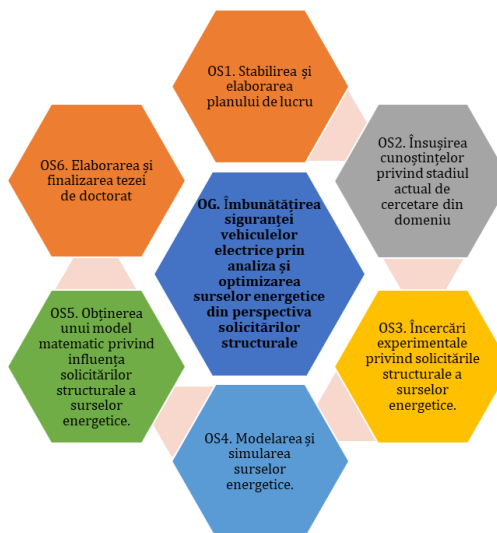


Fig. 1.3 Obiectivul general al tezei de doctorat corelat cu obiectivele secundare specifice

Tabelul 1.1 Activitățile de cercetare asociate obiectivelor specifice ale tezei de doctorat

Obiectiv specific		Activități asociate
OS1	Stabilirea și elaborarea planului de lucru	-Identificarea obiectivului general și a obiectivelor specifice -Identificarea activităților conforme obiectivelor specifice -Stabilirea planului de lucru asociat
OS2	Înșușirea cunoștințelor privind stadiul actual de cercetare din domeniu	-Obținerea și sintetizarea informației necesare în vederea studiului temei de cercetare -Studiul bibliografic -Sintetizarea informațiilor
OS3	Încercări experimentale privind solicitările structurale ale surselor energetice	- Crearea standului experimental - Adaptarea standului experimental - Calibrarea standului experimental - Realizarea încercărilor experimentale - Extragerea, conversia și analiza rezultatelor

OS4	Modelarea și simularea surselor energetice	- Modelarea fizică surselor energetice - Stabilirea condițiilor inițiale ale procesului de simulare - Realizarea simulărilor - Obținerea datelor
OS5	Obținerea unui model privind influența solicitărilor structurale a surselor energetice	-Analiza și interpretarea datelor obținute din simulare -Analiza și interpretarea datelor obținute din încercările experimentale -Modelarea fizică a celulelor și a solicitărilor structurale ale acestora
OS6	Elaborarea și finalizarea tezei de doctorat	-Pregătirea și finalizarea tezei de doctorat

1.3. Metode și metodologia de cercetare

În cadrul tezei de doctorat cu titlul „*Cercetări privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipază vehiculele electrice*” s-a propus și utilizat o activitate generală de cercetare bazată pe activități experimentale și activități de modelare și simulare numerică a solicitărilor structurale mecanice ale surselor energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice.

Pentru o divizare echitabilă a sarcinilor necesare atingerii obiectivelor specifice fiecărei activități de cercetare s-a realizat o structurare a lor, corespunzătoare pașilor necesari pentru a rezolva tema de cercetare propusă, astfel:

- stabilirea planului de cercetare a temei;
- studiul bibliografic al stadiului actual al cercetărilor din domeniu;
- realizarea standului experimental;
- testarea mecanică;
- achiziția și analiza datelor obținute;
- crearea modelelor numerice;
- stabilirea condițiilor inițiale ale procesului de simulare;
- realizarea simulărilor;
- analiza și interpretarea rezultatelor;
- concluzii.

Metodologia aleasă pentru realizarea activităților de cercetare din cadrul tezei de doctorat s-a bazat pe bunele practici și experiențele altor

cercetători din domeniu. Metodologia de cercetare este prezentată, sub forma unei scheme logice simplificate, în Fig. 1.4.

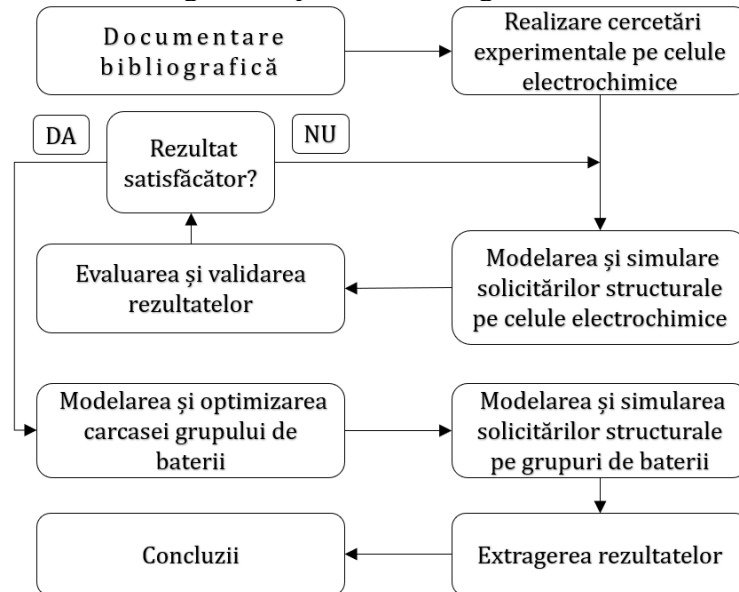


Fig. 1.4 Algoritm de desfășurare a activităților de cercetare

Etapele de lucru asociate planului de lucru general au fost în număr de 5, cu o durată de lucru stabilită la un interval de 6 luni pentru fiecare. Activitățile din etapele de lucru au fost concepute astfel încât să permită finalizarea tezei de doctorat la nivelul exigențelor cerute, atingând obiectivul general de a realiza îmbunătățirea siguranței vehiculelor electrice prin analiza și optimizarea construcției surselor energetice din perspectiva solicitărilor structurale mecanice. Prezentarea detaliată a etapelor de lucru parcurse în realizarea tezei de doctorat împreună cu diagrama Gantt asociată este realizată în cele ce urmează.

Tabelul 1.2 Etapele asociate planului de lucru

Etapa de lucru 1: Întocmirea proiectului de cercetare științifică	
Durata: Luna 1 - Luna 6	
Obiective specifice	Stabilirea și elaborarea planului de lucru
Descrierea activităților	1.1. Identificarea obiectivelor specifice 1.2. Identificarea activităților conforme obiectivelor specifice 1.3. Stabilirea planului de lucru asociat
Rezultate: Proiect de cercetare științifică	

Etapa de lucru 2: Studiul bibliografic privind tema tezei de doctorat	
Durata: Luna 7 – Luna 12	
Obiective specifice	Însușirea cunoștințelor privind stadiul actual de cercetare din domeniu
Descrierea activităților	2.1. Studiul bibliografic 2.2. Sintetizarea informațiilor
Rezultate: Raport 1 de cercetare privind stadiul actual al cercetărilor în domeniu	
Etapa de lucru 3: Activități de cercetare experimentală privind solicitările structurale ale surselor energetice ce echipează vehiculele electrice	
Durata: Luna 13 - Luna 18	
Obiective specifice	Încercări experimentale privind solicitările structurale ale surselor energetice.
Descrierea activităților	3.1. Crearea, adaptarea, calibrarea standului experimental 3.2. Încercări experimentale 3.3. Extragerea rezultatelor
Rezultate: Raportul 2 de cercetare privind încercările experimentale, publicarea unui articol științific/participare la conferință	
Etapa de lucru 4: Modelarea și simularea a solicitărilor structurale a surselor energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice	
Durata: Luna 19 – Luna 24	
Obiective specifice	Modelarea și simularea surselor energetice
Descrierea activităților	4.1. Modelare 4.2. Condiții inițiale ale procesului de simulare 4.3. Realizarea simulărilor 4.4. Obținerea datelor
Rezultate: Raportul 3 de cercetare privind rezultatele obținute din simularea numerică, publicarea unui articol științific/participare la conferință	
Etapa de lucru 5: Analiza și interpretarea datelor obținute	
Durata: Luna 25 – Luna 30	
Obiective specifice	Obținerea unui model privind influența solicitărilor structurale ale surselor energetice
Descrierea activităților	5.1. Analiza și interpretarea datelor obținute din simulare

	5.2. Analiza și interpretarea datelor obținute din încercările experimentale 5.3. Modelarea fizica a celulelor și a solicitărilor structurale ale acestora
Rezultate: Raportul 4 de cercetare privind analiza datelor obținute din testarea mecanică și simulare, publicarea unui articol științific/participarea la o conferință	
Etapa de lucru 6: Pregătirea și susținerea tezei de doctorat	
Durata: Luna 31 - Luna 36	
Obiective specifice	Elaborarea și finalizarea tezei de doctorat
Descrierea activităților	6.1. Pregătirea tezei de doctorat 6.2. Susținerea tezei
Rezultate : Teza de doctorat	

Tabelul 1.3 Diagrama Gantt a activităților asociate planului de lucru a tezei de doctorat

Etape de lucru	Perioada	Octombrie 2018 - Martie 2019						Martie 2019 - Septembrie 2019					
		OCT	NOI	DEC	IAN	FEB	MAR	APR	MAI	IUN	IUL	AUG	SEPT
E1	A 1.1												
	A 1.2												
	A 1.3												
E2	A 2.1												
	A 2.2												
Etape de lucru	Perioada	Octombrie 2019 - Martie 2020						Martie 2020 - Septembrie 2021					
		OCT	NOI	DEC	IAN	FEB	MAR	APR	MAI	IUN	IUL	AUG	SEPT
E3	A 3.1												
	A 3.2												
	A 3.3												
E4	A 4.1												
	A 4.2												
	A 4.3												
	A 4.4												
Etape de lucru	Perioada	Septembrie 2021 - Martie 2022						Martie 2022 - Septembrie 2022					
		OCT	NOI	DEC	IAN	FEB	MAR	APR	MAI	IUN	IUL	AUG	SEPT
E5	A 5.1												
	A 5.2												
	A 5.3												
E6	A 6.1												
	A 6.2												

2. Stadiul actual privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipează vehiculele electrice

2.1. Generalități și evoluția vehiculelor electrice

Istoria autovehiculelor electrice (ca parte componentă și integrantă a istoriei dezvoltării industriei auto) poate fi, în general, împărțită în trei părți: primii ani (1820-1929), inclusiv epoca de aur a dominației pe piață din 1895 până în 1905, anii de mijloc (1930-1989) și anii actuali (1990 - prezent) (Fig. 2.1).

În Europa, primele vehicule electrice au fost construite și utilizate începând cu anul 1828, iar inovațiile realizate în acest domeniu sunt atribuite mai multor inventatori, ceea ce arată interesul acordat acestui tip de sistem de propulsie [10, 11, 12]:

- 1828 - Ányos Jedlik
- 1834 - Thomas Davenport
- 1835 - Sibrandus Stratingh
- 1837 - 1841 - Robert Davidson
- 1881 - Gaston Planet
- 1888 - Andreas Flocken
- 1890 - 1891 - William Morricone
- 1898 - Dr. Ferdinand Porsche
- 1908 - Henry Ford

Din punct de vedere al funcționalității unui vehicul dezvoltat în anii 1900, un vehicul electric prezenta multe avantaje față de cel echipat cu motor cu ardere internă, deoarece variantele construite au fost silențioase, fără vibrații, ușor de pornit și controlat, și fără emisii de gaze poluante. Ca și dezavantaje majore, putem aminti fiabilitatea redusă a bateriilor (pe baza de Acid-Plumb) și, din această cauză, o greutate proprie mare. Nici costurile de utilizare nu erau mici în comparație cu autovehiculele cu motor termic, tehnologia de construcție a bateriilor fiind relativ nouă, iar autonomia lor fiind de aproximativ 28 de km. Începând cu mijlocul secolului XX, mașinile electrice au început să fie favorizate de legile stringente legate de emisiile de gaze poluante, iar astfel conceptul de utilizare a tracțiunii electrice la vehicule a prezentat interes și a fost într-o continuă dezvoltare până în prezent [13]. În acest moment, majoritatea statelor încurajează cercetările în domeniul

vehiculelor electrice, iar beneficiarii/utilizatorii unui astfel de autovehicul se bucură de o serie de stimulente fiscale și taxe zero [14].

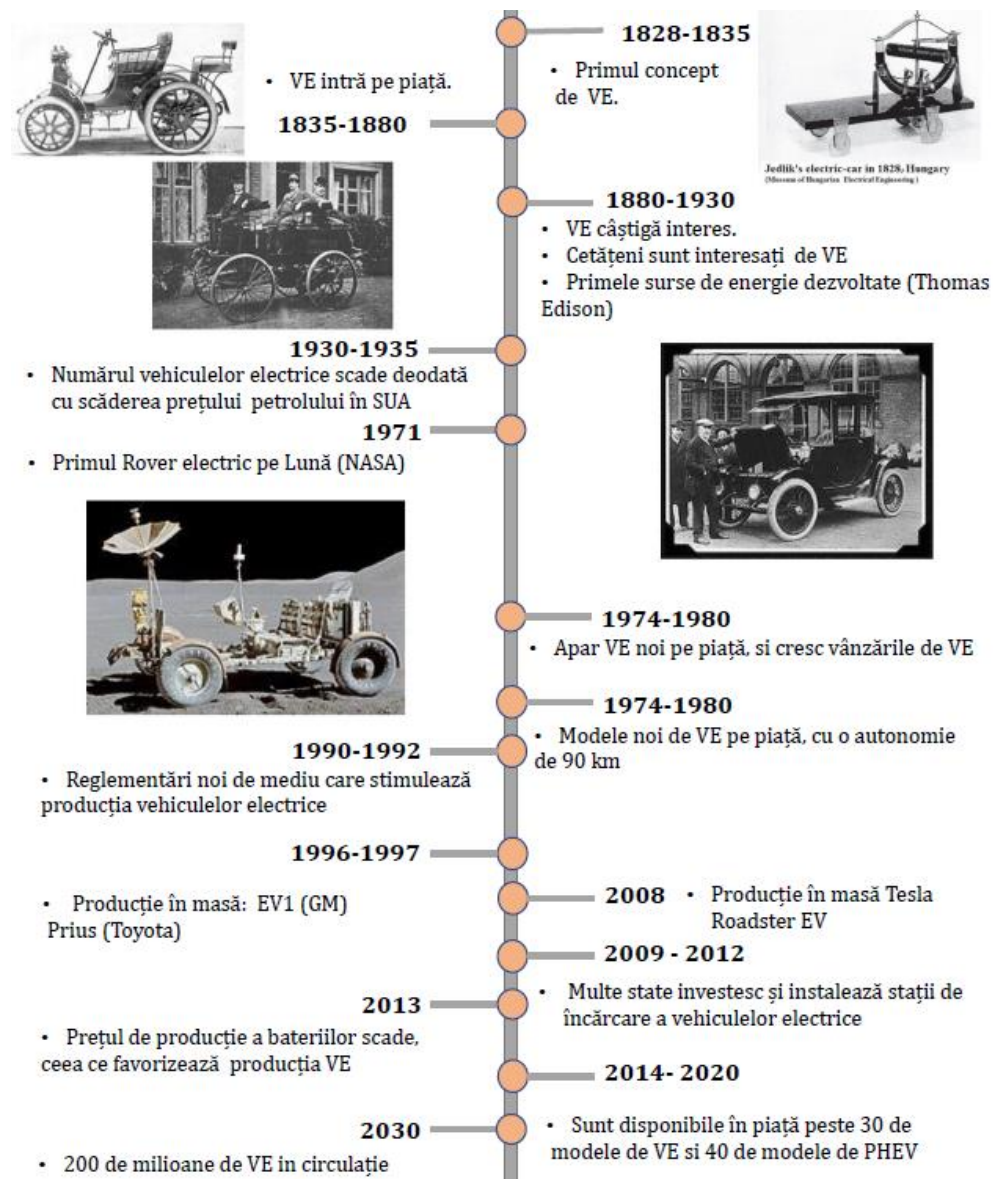


Fig. 2.1 Istoria, respectiv evoluția vehiculelor electrice [6, 12, 15, 16, 17, 18]

Idea de a folosi motoarele electrice pentru a propulsa un vehicul a apărut după invenția motorului electric în sine. Începând cu anii 1897, până în 1900, numărul vehiculelor electrice reprezenta 28 % din totalul vehiculelor, acestea fiind preferate în detrimentul motoarelor cu ardere

internă. A doua șansă a apărut sub forma conceptului EV 1 de la General Motors, lansat în 1996, și a devenit rapid foarte popular. Alți producători frunțași de mașini, printre care Ford, Toyota și Honda, au obținut propriile lor vehicule electrice. De la Toyota, un model reușit a fost Priusul, primul vehicul electric hibrid comercial, lansat în Japonia în 1997, cu un număr de 18.000 de unități vândute în primul an de producție. În prezent, piața este dominată de Renault Zoe, Nissan Leaf, Chevrolet Volt și Tesla.

Pentru 2050, Uniunea Europeană a stabilit ca obiectiv reducerea cu 80-95%, raportat la nivelul din anii 1990, a emisiilor de gaze cu efect de seră din toate domeniile economice [19, 20]. În timp ce alte sectoare au redus emisiile în ultimii ani, transportul este singurul sector care a înregistrat o creștere la nivel european din 1990 și până în prezent. Cu toate că autovehiculele moderne ce au motoare cu ardere internă dispun de sisteme noi de reducere a emisiilor poluante, graficul prezentat în Fig. 2.2 reflectă în mare măsură impactul transportului asupra emisiilor de gaze poluante prin creșterea numărului de autovehicule în circulație, numărul tot mai mare de kilometri parcurși datorită creșterii mobilității călătorilor, trecerea spre autovehicule mai mari a consumatorilor (confort ridicat) și diferențele rezultate între valorile de certificare și de testare reală a emisiilor.

Din Fig. 2.2 se înțelege faptul că sectorul transporturilor este responsabil pentru o bună parte din cantitatea totală de emisii, iar datele [21] statistice arată că numărul autovehiculelor în circulație la nivel global este în continuă creștere, depășind 1,2 miliarde de unități în prezent; estimările realizate arată aproximativ 2 miliarde de autovehicule în anul 2040 [13].

În contextul actual, autovehiculele electrice au o dinamică ridicată de intrare/penetrare pe piața auto, observându-se o dezvoltare ascendentă. Conform estimărilor Agenției Internaționale pentru Energie, până în 2030 vor exista 125 de milioane de vehicule electrice în întreaga lume [16]. Utilizarea vehiculelor electrice va contribui semnificativ la scăderea emisiilor de gaze cu efect de seră din sectorul transporturilor și mai ales la reducerea/eliminarea poluării din marile orașe [7].

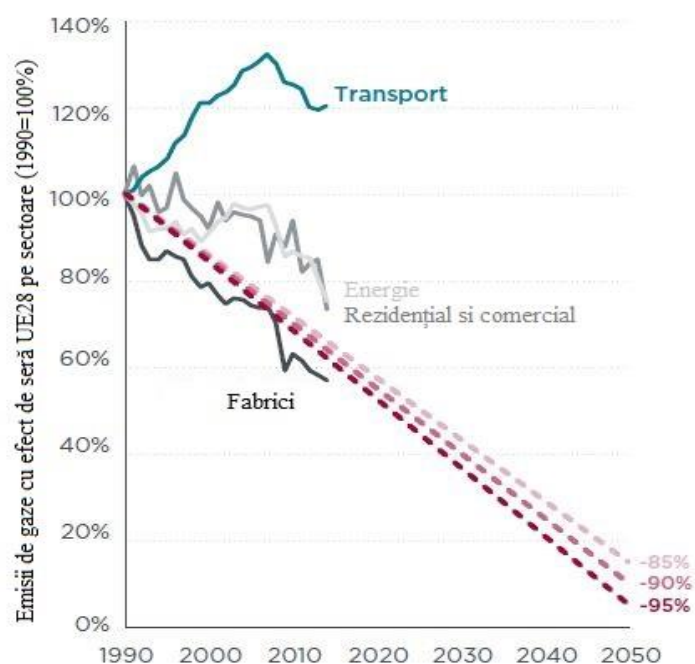


Fig. 2.2 Evoluția emisiilor de gaze cu efect de seră (CO₂) din UE pe sectoare, inclusiv un interval propus pentru reducerea nivelului emisiilor cu 80-95% până în 2050 (adaptare după [20])

2.2. Tipuri de vehicule electrice

La modul general constructiv, vehiculele electrice sunt mijloace de transport rutier care dispun de un ansamblu propulsor format din motor electric și baterii sau motor electric și motor termic pentru cele hibride. Un vehicul electric propulsat de un motor electric are emisii zero când motorul de tracțiune este alimentat exclusiv de la grupul de baterii din construcția acestuia. În funcție de tipul propulsor, vehiculele se clasifică după cum este prezentat în Fig. 2.3.

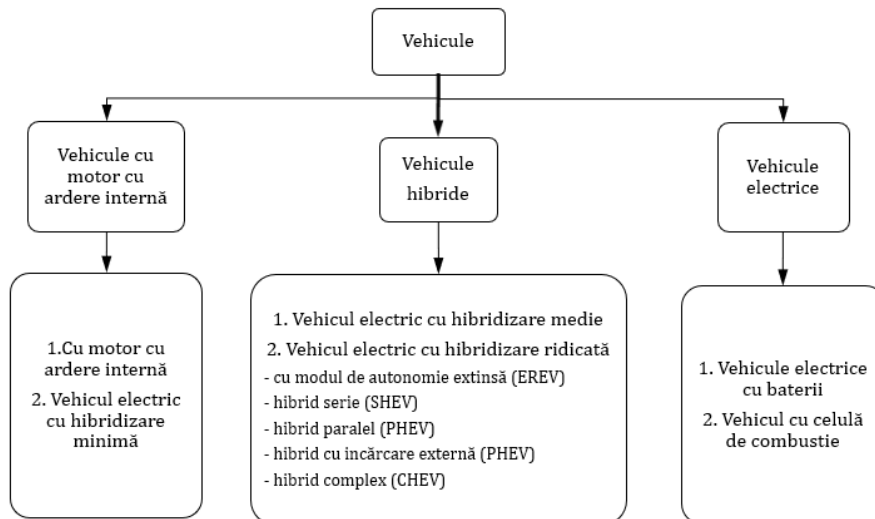


Fig. 2.3 Tipologia vehiculelor în funcție de tipul grupului propulsor [22]

Vehicule electrice cu baterii de acumulatori. Un vehicul electric ce are un grup de baterii ca singură sursă de energie pentru propulsie trebuie să se bazeze exclusiv pe energia stocată în baterii. Prin urmare, autonomia vehiculelor electrice depinde direct de capacitatea de stocare a energiei electrice în grupul de baterii. La o singură încărcare autonomia medie de deplasare este de 100 km – 250 km, iar modelele mai noi pot parcurge până la 500 de km [23]. Totuși trebuie precizat faptul că, autonomia unui vehicul electric depinde și de stilul de conducere, configurațiile vehiculului (Fig. 2.4), condițiile rutiere, de climă și de tipul și vârsta bateriei [24].

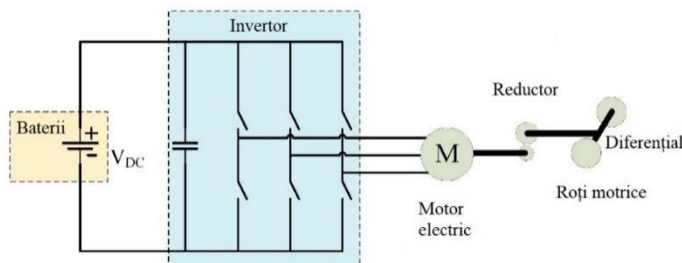


Fig. 2.4 Configurația unui vehicul electric (adaptare după [24])

Transmisia cu propulsorul poziționat central este cea mai comună configurație în rândul vehiculelor electrice (Fig. 2.5 a). Unele EV existente, cum ar fi Nissan Leaf sau Tesla Model S, au adoptat această configurație, chiar dacă acest tip de transmisie are o greutate ridicată

(fiind influențată autonomia). Din aceste motive, multiple cercetări s-au axat pe adoptarea altor configurații constructive ale transmisiei, de exemplu, cea a amplasării motoarelor electrice direct în roțile vehiculului, soluție care permite controlul independent și precis al fiecărei roți motrice (Fig. 2.5 b) [25, 26, 27]. Această soluție prezintă ca avantaje costul și greutatea redusă, dezavantajul fiind limitarea dimensiunilor de gabarit (și implicit a puterii) a motorului electric integrat în roți. Totuși, s-a constatat că pentru condiții de utilizare la viteză redusă și cuplu mare, acesta soluție nu funcționează eficient; pentru a rezolva această problemă, s-a introdus un ansamblu reductor între motor și roata motrică (Fig. 2.5 c). Aplicația practică constă în realizarea unui ansamblu compact format din motor și reductor, cu un raport de transmisie constantă. La configurația aceasta, suspensia este mai rigidă pe față din cauza greutății ansamblului motor-reductor, ceea ce duce la o manevrabilitate mai greoaie a vehiculului. În cazul grupului propulsor cu două sisteme independente (Fig. 2.5 d), motorul și reductorul constituie un ansamblu compact; între reductor și roata motrică s-a prevăzut și existența unui arbore planetar. Montarea ansamblului motor-reductor pe șasiu a dus la îmbunătățirea remarcabilă a manevrabilității vehiculelor [25].

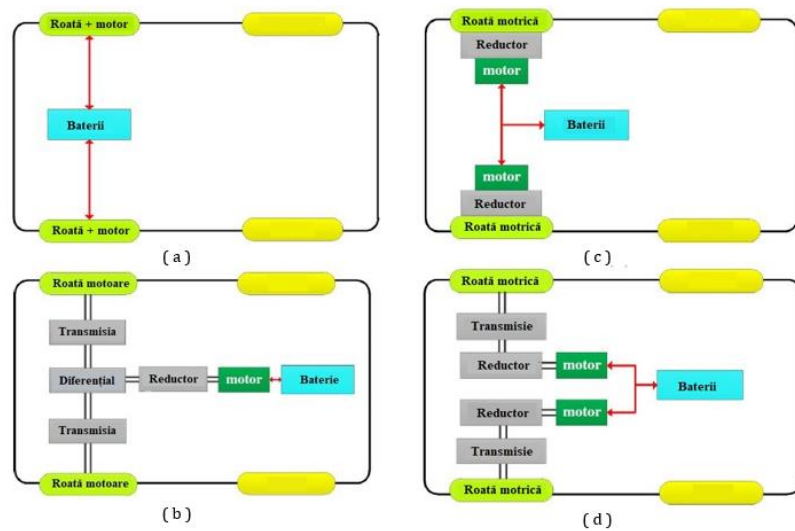


Fig. 2.5 Tipologii de propulsie a EV: (a) - propulsor montat central; (b) - propulsor integrat în roți (HUB); (c) - reductor și motor integrat în roți; (d) - două sisteme propulsoare independente (adaptare după [25])

Vehicule hibride. Aceste vehicule folosesc atât motorul cu ardere internă, cât și un motor electric pentru a propulsa vehiculul. Funcționarea concomitentă a motoarelor este posibilă datorită automatizării sistemelor de comandă și control ale vehiculului. Un vehicul hibrid utilizează propulsia hibridă pentru regim de exploatare econom, cu un mare avantaj la deplasări cu viteză redusă, când consumul de combustibil se reduce deoarece motorul termic rămâne oprit la mers în gol sau în staționare/ blocaje de trafic. Totodată, prin reducerea consumului de combustibil se reduc și emisiile de gaze poluante.

La viteze ridicate sau la cuplu mare cerut de condițiile funcționale, intră în funcțiune și motorul termic, iar cele două motoare pot funcționa împreună pentru îmbunătățirea performanțelor. De asemenea, hibridele pot recupera energia prin intermediul frânării regenerative. În cazul fluxului de energie într-un VH (vehicul hibrid) clasic (Fig. 2.6), după pornirea autovehiculului, motorul electric este acționat de către motorul termic în regim de generator, încărcând grupul de baterii din dotare. La pornire și în deplasare ambele motoare transmit putere către transmisia vehiculului. La frânare, motorul electric este din nou generator electric, iar bateriile se încarcă prin frânare regenerativă. În deplasare, motorul termic încarcă bateriile din dotare prin acționarea motorului electric în regim de generator (Fig. 2.7), o parte din energia mecanică fiind transmisă la roțile motrice a vehiculului [24].

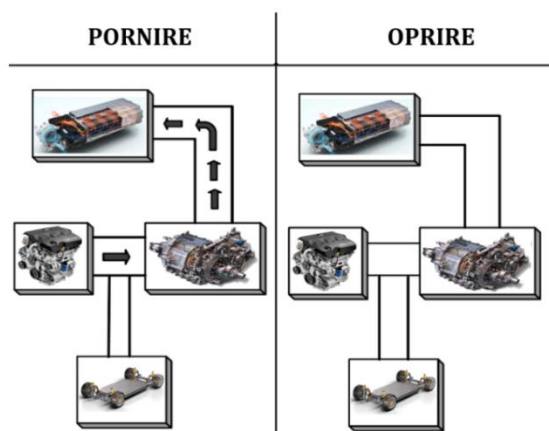


Fig. 2.6 Direcția fluxului de putere în timpul pornirii și la oprire (adaptare după [24])

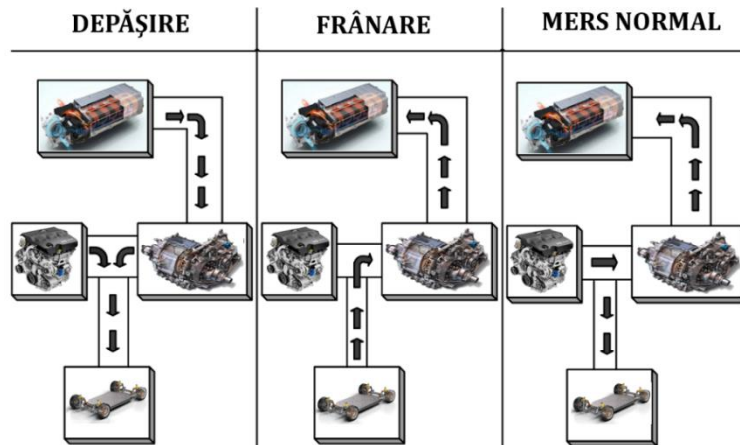


Fig. 2.7 Direcția fluxului de putere în timpul depășirii, frânării și mersului normal (adaptare după [24])

Vehicule hibride cu încărcare externă (PHEV). Conceptul de încărcare externă a hibridelor este un fapt ce a rezultat în mod natural din funcționarea vehiculelor hibridelor. Un PHEV dispune de un motor termic, respectiv de unul electric, diferența dintre un vehicul hibrid și unul hibrid cu încărcare externă fiind faptul că ultimul folosește, în general, pentru deplasare, motorul electric. Pentru a avea o autonomie ridicată, producătorii au echipat vehiculele cu baterii cu o capacitate mai mare de depozitare a energiei electrice decât a celor hibride. Motorul termic poate fi (este) folosit atât pentru încărcarea bateriilor, cât și pentru a trimite energie mecanică la transmisia vehiculului. De asemenea, încărcarea bateriilor se poate realiza și din surse externe de energie (stații de încărcare), acestea având și capacitatea de încărcare a bateriilor în regim de frânare regenerativă. Un vehicul PHEV consumă mai puțin combustibil decât cele hibride, lucru din care rezultă o cantitate mai mică de emisii de gaze poluante [24]. Conform statisticilor efectuate pe o perioadă de 10 ani, respectiv din 2010 până în 2020, în Europa, numărul acestora în circulație a crescut anual de la 0,2 până la peste 7 milioane de unități [28].

Vehicul cu celulă de combustie. Vehiculele cu celule de combustibil au ca și componentă principală celule de combustibil care, prin reacții chimice, produc energie electrică. Combustibilul pentru aceste vehicule este hidrogenul, care este încărcat la presiune mare în rezervorul special din dotarea autovehiculului. De asemenea, și oxigenul are un rol important în procesul de funcționare și generare a energiei electrice, aceasta fiind obținut direct din aerul aspirat din mediul înconjurător.

Energia electrică rezultată din procesul de transformare chimică acționează motorul electric, iar acesta acționează, prin transmisie, roțile motoare. Dacă energia produsă este mai multă decât energia consumată, aceasta este stocată în bateria de acumulatori din dotarea autovehiculului. Configurația constructiv-funcțională a unui VCC este prezentată în Fig. 2.7.

În cazul VCC-urilor (vehicul cu celulă sau pilă de combustie) doar apa rezultă ca și produs secundar al procesului de generare a energiei electrice, care este evacuată pe eșapament în mediul înconjurător, lucru care subliniază avantajul major al acestor tipuri de vehicule (lipsa emisiilor gazelor poluante). Din această cauză cercetătorii doresc continuarea dezvoltării lor [29, 30], dar un obstacol major în calea adoptării acestei tehnologii îl reprezintă lipsa stațiilor de alimentare cu hidrogen, îngrijorările privind siguranța în cazul scurgerii de hidrogen și dezvoltarea celulelor de combustie, care momentan este costisitoare.

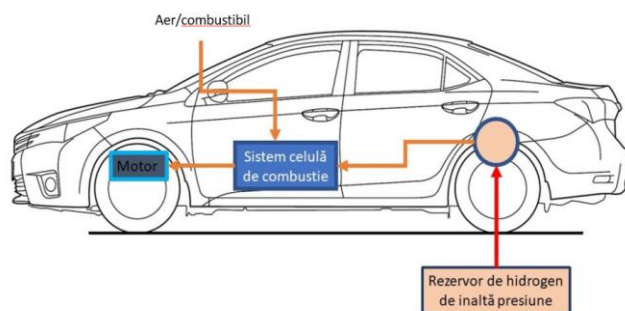


Fig. 2.8 Construcția unui automobil pe bază de celulă de combustie cu hidrogen (adaptare după [24])

Un vehicul electric, spre deosebire de un vehicul cu motor cu ardere internă, are configurația mecanică mai simplă, lucru ce se datorează lipsei unor componente mecanice complexe necesare în construcția unui vehicul convențional. În cazul construcției unui vehicul electric, motorul electric este conectat direct cu transmisia, și alimentat cu energia electrică stocată în baterii. Aceste componente sau ansamble sunt simple din punct de vedere constructiv și, teoretic, pot fi montate în configurații și poziții diferite în funcție de alegerea fiecărui producător. Față de sistemul complex al unui vehicul dotat cu motor cu ardere internă, vehiculele electrice pot fi considerate un sistem simplu care este alcătuit din trei subsisteme majore, și anume: bateria, sistemul de propulsie și sistemele auxiliare.

Bateria include grupurile de baterii ce deserveșc stocarea energiei electrice și sistemul de management (termic și electric) al acestora. Cuprinde informații generice referitoare la ultimele modele de autovehicule electrice apărute pe piață, privind producătorul, marca, tipul transmisiei, capacitatea bateriei, autonomia și performanța obținută la viteză maximă.

Tabelul 2.1 Caracteristici tehnice și performanțe ale vehiculelor electrice [31]

Model vehicul electric	Baterie (kWh)	Autonomie (km)	0-100 km/h (sec)	Viteza max. (km/h)
2021 Audi e-tron	95	357	5.5	200
2021 Audi e-tron Sportback	95	351	5.5	200
2021 BMW i3	42.2	246	7.2	150
2021 BMW i3s	42.2	246	6.8	161
2022 Chevrolet Bolt EV	65	417	6.5*	-
2022 Chevrolet Bolt EUV	65	397	7.0*	-
2021 Ford Mustang Mach-E Select SR RWD	75.7	370	5.8	-
2021 Ford Mustang Mach-E Select SR AWD	75.7	339	5.2	-
2021 Ford Mustang Mach-E Route 1 ER RWD	98.8	491	6.1	-
2021 Ford Mustang Mach-E Premium ER RWD	98.8	483	6.1	-
2021 Ford Mustang Mach-E Premium ER AWD	98.8	434	4.8	-
2021 Ford Mustang Mach-E GT ER AWD	98.8	434	3.8	-
2021 Ford Mustang Mach-E GT Perf. ER AWD	98.8	418	3.5	-
2021 Hyundai IONIQ Electric	38.3	274	10	164
2021 Hyundai Kona Electric	64	415	7.9	167
2022 Jaguar I-PACE EV400	90	377	4.5	200
2021 Kia Niro EV (e-Niro)	64	385	7.5	167
2022 MINI Cooper SE	32.6	183	6.9	150
2021 Nissan LEAF S (40 kWh)	40	240	7.4*	145
2021 Nissan LEAF e+ S (62 kWh)	62	364	6.5*	-
2021 Nissan LEAF e+ SV/SL (62 kWh)	62	346	6.5*	-

2021 Polestar 2	78	375	4.5	-
2021 Porsche Taycan (79 kWh)	79.2	322	5.1	230
2021 Porsche Taycan (93 kWh)	93.4	362	5.1	230
2021 Porsche Taycan 4S (79 kWh)	79.2	320	3.8	249
2021 Porsche Taycan 4S (93 kWh)	93.4	365	3.8	249
2021 Porsche Taycan Turbo (93 kWh)	93.4	341	3	259
2021 Porsche Taycan Turbo S (93 kWh)	93.4	323	2.6	259
2021 Porsche Taycan 4 Cross Turismo	93.4	-	4.8	220
2021 Porsche Taycan 4S Cross Turismo	93.4	-	3.9	240
2021 Porsche Taycan Turbo Cross Turismo	93.4	-	3.1	250
2021 Porsche Taycan Turbo S Cross Turismo	93.4	-	2.7	250
2021 Tesla Model 3 Standard Range Plus	60*	423	5.3	225
2021 Tesla Model 3 Long Range AWD	80*	568	4.2	233
2021 Tesla Model 3 Perf. LR AWD 20"	80*	507	3.1	261
2021 Tesla Model S Long Range (AWD) 19"	100*	652	3.1	249
2021 Tesla Model S Plaid 19"	100*	628	1.99*	322
2021 Tesla Model X Long Range (AWD) 20"	100*	579	3.8	249
2021 Tesla Model X Plaid 20"	100*	547	2.5	262
2021 Tesla Model Y Long Range AWD 19"	80*	525	4.8	217
2021 Tesla Model Y Perf. LR AWD 21"	80*	488	3.5	249
2022 Volvo C40 Recharge	78	338	4.7	180
2021 Volvo XC40 Recharge	78	335	4.7	180
2021 Volkswagen ID.4 Pro	82	418	-	-
2021 Volkswagen ID.4 Pro S	82	402	-	-
2021 Volkswagen ID.4 AWD Pro	82	401	5.7	-
2021 Volkswagen ID.4 AWD Pro S	82	386	-	-

*estimare neoficială

2.3. Tipuri de celule electrochimice

Bateriile existente în construcția vehiculelor electrice care asigură energia electrică necesară motorului electric de tracțiune, mai sunt denumite *sui-generis* ca și baterii.

În construcția primelor modele de vehicule electrice s-au folosit baterii pe bază de acid-plumb, dezvoltate în 1859 de către Gaston Plante [11]. În 1899, Waldemar Junger a introdus bateria nichel-cadmiu care a dispus o mai bună (mare) capacitate de stocare a energiei electrice, dar

având ca și dezavantaj pierderea tensiunii pe măsură ce bateria îmbătrânește [32]. Cercetarea în domeniu a continuat până la începutul și a doua jumătate a secolului XX, iar în anul 1985 au fost create primele baterii Litiu-ion. Cercetările în această direcție au continuat încă 6 ani înainte de finalizarea și comercializarea bateriilor bazate pe tehnologia respectivă. Fiabilitatea ridicată, coroborată cu capacitatea relativ ridicată de stocare a energiei electrice a făcut ca tehnologia litiu-ion să fie predominantă ca și soluție de stocare a energiei electrice la vehicule electrice.

La modul constructiv, o celulă electrochimică litiu-ion are o structură multistrat, fiind compusă dintr-un catod, un anod și două straturi de separator. Catodul este executat dintr-o folie de aluminiu acoperită pe ambele părți cu un material activ, iar anodul este realizat dintr-o folie de cupru acoperită cu grafit (sau siciliu). Componentele celulei sunt amplasate în electroliți și învelite cu o carcasă de protecție (oțel și/sau plastic). Compoziția chimică și materialele folosite pot să difere ușor de la un producător la altul, dar structura unei celule rămâne identică cu cea prezentată în Fig. 2.9.

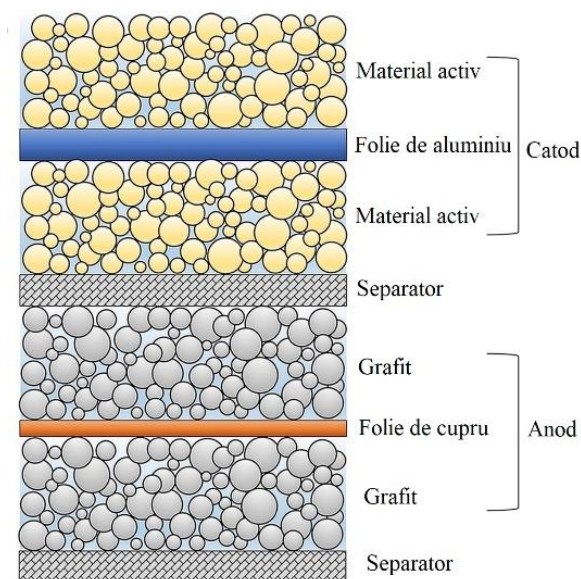


Fig. 2.9 Secțiunea unui strat la o celulă litiu-ion (adaptare după [33])

Prin urmare, există multe materiale ce se pot folosi la electrozi pozitivi, negativi, electrolit și separator, iar posibilele limitări tehnologice ale aplicațiilor diferitelor materiale din construcția unei celule Li-Ion sunt determinate de tipul bateriei și de domeniul de

exploatare.

Electrolitul utilizat trebuie să asigure un flux mare de transport al atomilor de litiu în utilizare. Sursele energetice trebuie să funcționeze la temperaturi optime de lucru, să fie compatibile și funcționale într-un interval cât mai larg de temperaturi, de exemplu de la $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ până la $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [32]. De asemenea, separatorul trebuie să asigure cel mai bun transfer de ioni de litiu în aceleași condiții de exploatare și să asigure izolare termică în timpul suprasolicitării sau supraîncălzirii, pentru a preveni distrugerea surselor energetice. Trebuie să fie o compatibilitate adecvată a materialelor electrozilor pozitiv și negativ, din care să rezulte un produs care să fie eficient energetic și, de ce nu, și din perspectivă financiară (costuri de producție). Materialele regăsite în construcția unei celule Li-Ion sunt prezentate în Tabelul 2.2.

Tabelul 2.2 Materiale și caracteristici mecanice generale ale componentelor unei celule Li-Ion [33]

Componentă	Material	Comportarea mecanică
Colectorii de curent	Anod – cupru Catod - aluminiu	Anizotrope, rezistent la tracțiune, ductil, dependent de solicitarea de încărcare
Acoperirea electrozilor	Pulberi de grafit	Dependent de presiunea aplicată
Separatorul	Material polimeric poros	Ortotropic, vâscozitate elasto-plastică, dependent de temperatură
Carcasă	Tablă subțire de oțel sau aluminiu	Anizotrope, rezistent la tracțiune, ductil

Capacitatea celulei energetice este definită și influențată și de capacitatea specifică a materialelor din care sunt realizați electrozii celulei. De exemplu, folosind capacitățile electrochimice pentru a construi perechi conceptuale de electrozi din material LiFePO_4 (170 Ah kg^{-1}) asociat cu $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (175 Ah kg^{-1}), și presupunând un raport idealizat al materialelor la electrozii pozitivi și negativi într-un mod proporțional cu capacitatea lor energetică, raportul idealizat LiFePO_4 :

$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12} = 170 \text{ Ah kg}^{-1} : 175 \text{ Ah kg}^{-1} = 0,97$, înseamnă că o sursă de energie optimizată cu o capacitate de 170 Ah ar conține 1kg de LiFePO_4 și 0,97 kg de $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ [32].

Celulele litiu-ion au o eficiență columbică (EC) mare ce permite încărcări și descărcări ultrarapide. Parametrul EC descrie eficiența încărcării prin care electronii sunt transferați în celule și reprezintă sarcina totală introdusă în baterie pe durata unui ciclu complet. Această eficiență a surselor energetice se îmbunătățește odată cu creșterea numărului ciclurilor funcționale (încărcare/descărcare). Pentru a dovedi acest lucru, producători importanți (Panasonic, E-one, Sony, LG, Samsung) au testat celulele de tip 18650. Unele celule au început cu EC de 99,1 % și au crescut la 99,5 % după efectuarea a 15 cicluri, iar alte celule au început cu 99,5% și au ajuns la 99,9% după 30 de cicluri. S-a observat că coerența nivelurilor eficienței obținute prin încercările efectuate este ridicată datorită faptului că celulele litiu-ion sunt stabile funcțional. Trebuie menționat faptul că la ora actuală există diferite tehnologii de realizare a celulelor electrochimice de tip Li-Ion, iar cele mai utilizate și fezabile în ceea ce privește folosirea acestora în construcția vehiculelor electrice sunt prezentate în cele ce urmează [32].

Celula electrochimică de tipul Lithium Cobalt Oxide - LiCoO_2 (LCO). A fost dezvoltată de compania Sony în 1991 și a fost preferată ca sursă de alimentare (de energie) a aparatelor electronice mici (laptopuri, camere, tablete etc.) datorită capacității de înmagazinare a energiei, ciclului lung de viață și a fabricării relativ ușoare [34]. Sunt reactive, prin urmare, stabilitatea termică este redusă și este necesară exploatarea lor în siguranță printr-o monitorizare permanentă. Disponibilitatea limitată a cobaltului se reflectă în costurile ridicate de fabricație a celulelor, dar cu toate acestea, autovehicule electrice precum Tesla Roadster și Smart ForTwo au implementat această tehnologie pentru sursa energetică [32].

Celula electrochimică de tipul Lithium Nickel Oxide - LiNiO_2 . A fost recunoscut ca un material promițător pentru sursele de energie de înaltă tensiune (aproximativ 4V vs. Li/Li^+ potențialul electrodului) deoarece este un material ce poate fi obținut cu costuri reduse și care are, teoretic, o capacitate ridicată de stocare energetică de 250 Ah kg^{-1} [32]. Deoarece LiNiO_2 stoichiometric necesită o mare atenție la fabricare, fiind un material mai puțin practic pentru electrod, combinații ale acestui material cu alte elemente ca și Co [35], Fe, Mn [36], Al [37], Ti [38] Mg au fost dezvoltate [39], fiind obținute celulele tip NMC 811 (nichel 0,8, mangan 0,1, cobalt 0,1) [32].

Celula electrochimică de tipul Lithium Manganese Oxide - LiMn_2O_4 (LMO). Bateriile de litiu cu oxid de mangan (LMO) au fost introduse pentru prima oară la începutul anilor 1980 [40], dar comercializarea lor masivă pe piață a mai durat încă 15 ani [41]. Forma constructivă specifică a electrozilor (spinel tridimensional cubic) îmbunătățește fluxul de ioni pe electrod, ceea ce conduce la o rezistență internă scăzută, respectiv la o stocare mai sigură a energiei electrice. Scăderea rezistenței interne a celulelor permite încărcarea și descărcarea rapidă fără solicitări termice importante. Sursele de energie cu Li-Mn pot fi descărcate la un curent de 20-30 A cu o creștere moderată a temperaturii într-un grup de baterii tip 18650. Chimia celulei dispune de o stabilitate termică mai bună decât cea a celulelor cu oxid de cobalt cu litium, dar capacitatea de stocare este mai scăzută cu 33% și, de asemenea, are o durată de viață mai mică [42]. Celulele LMO (sau denumite și NMC) sunt utilizate de mulți producători de vehicule electrice, printre care Nissan Leaf, Chevy Volt și BMW i3 [34, 32].

Celula electrochimică de tipul Lithium Iron Phosphate - LiFePO_4 (LFP). În 1996 cercetătorii de la Universitatea Texas din Austin au descoperit că materialele fosfatice ar putea fi utilizate în electrozii pozitivi ai celulelor litium-ion [32]. LiFePO_4 (LFP) oferă performanțe electrochimice bune cu rezistență internă scăzută, deoarece compușii fosfatici ajută la stabilizarea electrodului împotriva supraîncărcării și are rezistență la fluctuațiile de temperatură [34]. Aceste celule suportă și se pot exploata la temperaturi între $-30\text{ }^\circ\text{C}$ și $+60\text{ }^\circ\text{C}$, avantajul în utilizarea ca și sursă de energie la vehicule electrice fiind acela că sunt rezistente la solicitări termice.

Celula electrochimică de tipul Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide - LiNiMnCoO_2 (NMC). Avantajul tehnologiei constă în combinarea nichelului și manganului în materialul electrozilor. Nichelul este cunoscut pentru energia specifică ridicată, iar manganul formează o structură chimică cu o rezistență internă scăzută. Amestecarea acestor doi compuși chimici (nichel și mangan) variază în funcție de producător. La ora actuală se folosesc electrozi bogați în nichel pentru a crește densitatea energetică deoarece se reduc costurile de producție a celulelor. Dezvoltatorii și companiile au trecut de la celule de tip NMC111 (cu o capacitate de descărcare: 154 Ah kg^{-1} la 0,1 C) la celule de tip NMC442 și NMC622, iar mai nou la cele de tip NMC811 (capacitatea de descărcare: $> 185\text{ Ah kg}^{-1}$ la 0,1 C). Codificarea acestor celule se referă la părțile componente ale metalelor prezente în structură: NMC111 înseamnă nichel, mangan și cobalt în părți egale [43, 32].

În prezent, acest tip de baterii au o cerere mare în piața auto, având în vedere energia specifică ridicată și caracteristicile termice excelente. Așa cum a fost menționat, bateriile cu oxid de cobalt cu litiu nichel mangan au fost și sunt utilizate de mulți producători de vehicule electrice, incluzând Nissan Leaf, Chevy Volt și BMW i3 [34].

Celula electrochimică de tipul Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide - LiNiCoAlO₂ (NCA). Oxidul de nichel cobalt și aluminiu este un produs care s-a folosit în diferite aplicații speciale încă din anul 1999. Prezintă similitudini funcționale cu celulele de tip NMC, oferind energie și putere specifice, precum și o durată de viață lungă [34]. Celula de tip NCA nu este la fel de sigură în funcționare ca celelalte tipuri de celule prezentate anterior și, ca atare, necesită aplicarea unor măsuri speciale de monitorizare a siguranței pentru a fi utilizate în construcția vehiculelor electrice. De asemenea, au un cost de fabricație mai ridicat, producătorul de vehicule Tesla fiind cunoscut drept singurul producător de vehicule electrice care utilizează chimia NCA. Tesla susține că bateriile produse de ei au mai puțin cobalt decât celulele tip NMC811 [44, 45].

2.4. Tipuri de electrozi și electroliți

În construcția actuală a bateriilor există două tipuri principale de electrozi negativi, ce includ titanatul de litiu și electrozii pe bază de cărbune. Noile tipuri de electrozi în curs de dezvoltare includ litiu-metal și litiu-aliaje de metal, punând accentul pe tipul de litiu-siliciu și electrozi de conversie [46].

Electrozii pe bază de cărbune. Cărbunele, sau grafitul sintetic, rămâne în continuare materialul preferat pentru electrodul negativ datorită capacității specifice relativ ridicate ($\sim 370 \text{ Ah kg}^{-1}$), tensiunii medii scăzute (150 mV fata de Li/Li⁺), tensiunii totale ridicate la nivel de celulă și a eficienței energetice ridicate [47]. Deoarece este o resursă răspândită, exploatarea sa se realizează cu costuri reduse. Este netoxic, fiind considerat din aceste puncte de vedere materialul potrivit pentru electrozi, fiind folosit, prin urmare, pe scară largă. Totuși, în anumite condiții, specifice cărbunele poate reacționa cu oxigenul din atmosferă, iar în cazul supraîncălzirii celulei, electrodul poate lua foc.

Titanat de litiu (Li₄Ti₅O₁₂). Bateriile cu electrozi negativi cu titanat de litiu sunt cunoscute încă din anii '80. Litiu-titanatul (LTO) înlocuiește electrodul negativ din grafit al unei celule litiu-ion tipice. Electrocul pozitiv poate fi din oxid de litiu mangan de tip NMC [37]. Aceste baterii sunt utilizate exclusiv de producătorii japonezi, respectiv

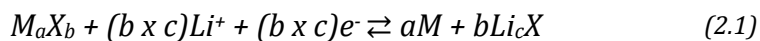
i-Miev de la Mitsubishi și Fit EV de la Honda [48]. Datorită siguranței ridicate în exploatare, merită menționat și faptul că bateriile de titanat de litiu sunt utilizate în dispozitivele medicale mobile [49].

Litiu metal. Cu o capacitate de stocare a energiei electrice foarte mare (3860 Ah kg⁻¹) și cel mai mic potențial electrochimic negativ, este normal să se ia în considerare electrozii de litiu metal pentru electrodul negativ într-o baterie litiu-ion, deoarece masa electrodului negativ reprezintă p treime în raport cu masa totală a celulei. Așadar, prin folosirea unor materiale mai ușoare la electrozi se poate optimiza masa totală a celulelor. Cu toate acestea, cercetările din domeniu continuă și se caută crearea unor electrozi de litiu metal siguri cu rezultate aplicabile în îmbunătățirea performanței de stocare a energiei în cazul vehiculelor electrice [50, 32, 51].

Electrozi pe bază de aliaj. Fabricarea electrodului negativ din metale care, electrochimic, sunt aliaje cu litiu la temperatura camerei, prezintă oportunități pentru a dezvolta baterii litiu-ion cu o capacitate specifică mai mare decât cea oferită de electrozii de grafit convenționali. Din acest motiv, sunt studiate o serie de metale și elemente metaloide, cum ar fi aluminiul, staniul și siciliul, care reacționează cu litiu pentru a forma aliaje prin procese electrochimice care sunt parțial reversibile [52]. Dezavantajul major este acela că solicitarea mecanică generată în timpul proceselor de aliere duce la fisurarea și distrugerea electrodului metalic și la pierderea semnificativă a capacității de stocare a energiei în decursul câtorva cicluri [32].

Electrozi pe bază de siliciu. Aliajul litiu-siliciu are o compoziție complet litiată Li₁₅Si₄, cu o capacitate energetică teoretică specifică de 4200 Ah kg⁻¹ [53]. Problema principală cu această chimie a electrozilor este schimbarea volumetrică semnificativă a materialului electrodului. Tranziția dintre Si și Li₁₅Si₄ provoacă o schimbare volumetrică de 280 %, generând astfel o tensiune internă ridicată în structura materialelor active [54]. Tensiunea rezultată duce la fisurarea și la o eventuală dezintegrare a materialului Si, ceea ce provoacă o decădere semnificativă a capacității energetice reversibile [55]. Dezavantajele suplimentare ale Si sunt un coeficient de difuzie Li⁺ scăzut și o rezistivitate electrică internă ridicată [56, 32].

Electrozi de conversie. Spre deosebire de simpla intercalare a ionilor Li⁺ din structura unui material de bază, într-un electrod de conversie are loc o reacție chimică. Aceasta este, în general, de forma:



unde M definește un metal de tranziție și X are o specie anionică [32].

Electroliti. Așa cum s-a menționat, electrolitul este o parte esențială a celulei energetice, oferind conductivitatea ionică și permițând astfel ionilor Li^+ să se deplaseze între cei doi electrozi fără a fi un conductor electric. Există două clase majore de electroliti: lichizi (apă și organici) și solizi (polimer și ceramic) [57, 32].

2.5. Contextul actual privind analiza surselor energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice din punct de vedere al solicitărilor structurale

Sursele de energie (bateriile) utilizate în construcția modulelor surselor energetice pentru vehiculele electrice pot avea diferite forme geometrice (Fig. 2.10). Această posibilitate de proiectare în diferite forme extinde semnificativ utilizarea celulelor în scara largă de aplicații a industriei auto (și nu numai).

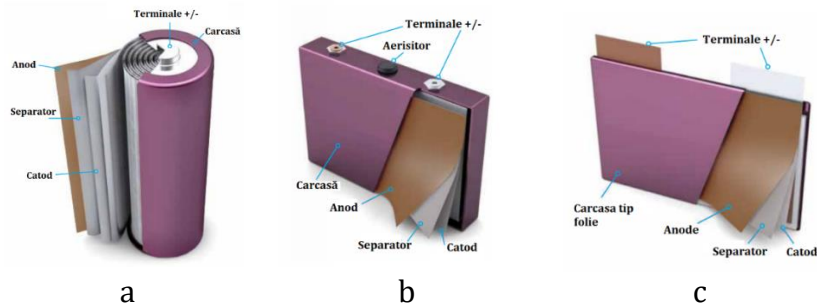


Fig. 2.10 Modele de celule litiu-ion
a – cilindrică (18650/21700); b -prismatică; c-pungă (adaptare după [58])

Piața globală a vehiculelor electrice este într-o creștere continuă, dar problemele precum autonomia, durata de viață a surselor de energie, stabilitatea tensiunii, stabilitatea termică și, în special, siguranța acestora este un subiect de interes pentru mass-media [59]. Bateriile asigură energia de funcționare a vehiculului, iar caracteristicile acestora influențează în mod direct performanța și siguranța unui autovehicul. În tot procesul de stocare și descărcare a energiei electrice, sursele litiu-ion pot fi periculoase în situații de exploatare improprie, deoarece, prin acumularea de temperatură excesivă și prin lipsa disipării acestuia într-un timp bine determinat, apare suprasolicitarea termică, care poate duce la aprinderi de material, cu efecte grave asupra siguranței utilizatorilor

de vehicule electrice. În Tabelul 2.3 sunt prezentate o serie de incidente de securitate create din cauza defecțiunilor surselor energetice din construcția vehiculelor electrice.

Tabelul 2.3 Incidente în exploatarea vehiculelor electrice dotate cu baterii Li-Ion [60]

Nr.	Data	Locația	Incident	Cauza
1	09.2015	Hangzhou, China	Acumulatorul unui autobuz electric a luat foc	A ieșit din garanție după 7 ani de întreținere continuă.
2	01.2016	Gjerstad, Norway	Un Tesla model S s-a aprins în timp ce era la încărcat la o stație rapidă	Scurtcircuit la baterii în timpul încărcării
3	04.2016	Shenzhen, China	Un autobuz electric a luat foc	Scurtcircuit din cauza unor conductori electrici deteriorați
4	06.2016	Beijing, China	Automobil electric a luat foc în parcare	Posibil să fi fost supraîncălzire din cauza unui contact imperfect
5	07.2016	Nanjing, China	După o ploaie, una dintre modulele de baterii a luat foc la un autobuz electric	Scurtcircuitare după ce apa s-a infiltrat în module
6	07.2016	Rome, Italy	O mașină electrică a poliției s-a aprins în stradă	Posibilă supraîncălzire a sursei energetice
7	06.2021	Dej, România	Un autobuz electric s-a aprins în timpul exploatării	Posibilă supraîncălzire a sursei energetice
8	09.2021	Dumbrăvița România	Incendiu la un e-Golf la baterie.	Folosire a autovehiculului în regim de taxi, s-a suprasolicitat bateria

Cu o dezvoltare relativ rapidă a bateriilor de tip Li-Ion, vehiculele electrice s-au întors pe piața globală în secolul 21, reprezentând și un simbol al transportului ecologic. Comparativ cu vehiculele echipate cu

motor cu ardere internă care s-au dezvoltat continuu până în prezent, vehiculele electrice (VE) sunt și ele într-o continuă dezvoltare. În ceea ce privește siguranța la incendii, cercetătorii și dezvoltatorii caută permanent soluții de prevenire a aprinderii celulelor energetice în caz de accident [61].

În caz de incendiu, nu doar celulele electrochimice reprezintă o sursă de foc. Cercetătorii atrag atenția utilizatorilor și producătorilor asupra caracteristicilor de siguranță ale materialelor, asupra chimiei bateriilor și asupra dinamicii focului în caz de incendiu. În momentul de față, riscul general de incendiu și pericolele acestuia în cadrul vehiculelor electrice sunt puțin înțelese și trebuie studiate în viitor. Testele de incendiu la scară largă pentru celule energetice Li-Ion sunt costisitoare și rareori publicate. În ciuda problemelor nerezolvate cu privire la siguranța de incendiu, densitatea energetică a celulelor de Li-Ion continuă să crească și să se dezvolte permanent [62]. În Fig. 2.11 sunt prezentate incidente din diferite surse mass media.

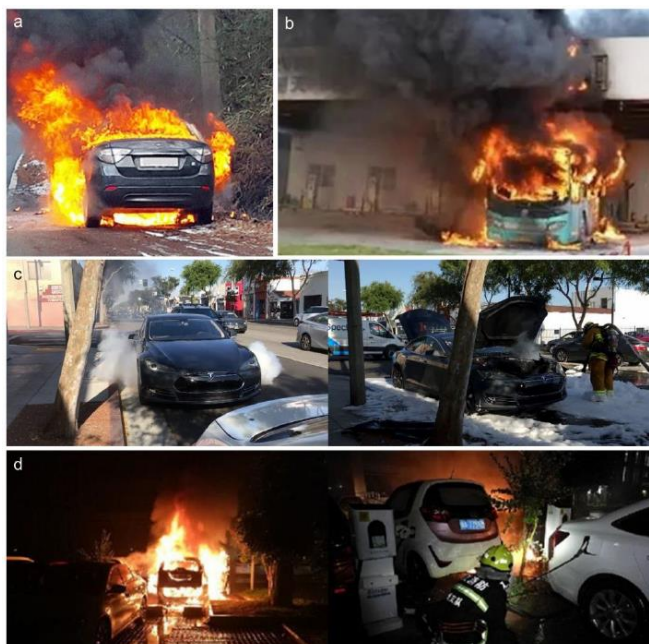


Fig. 2.11 Incendii în caz de accident la vehicule electrice [63]

a-Modelul „SM3.Z.E” de la Renault-Samsung a fost surprins în trafic în timp ce lua foc în data de 15 ianuarie 2016 în Coreea [64]; b-Autobus electric pe baterii a luat foc într-o stație de încărcare pe 26 aprilie 2015, Shenzhen China; bus-ul nu era conectat la stația de încărcare [65]; c- La un Tesla Model S, pe 15 iunie 2018, în California SUA, focul a fost stins prin pomparea a peste 1000 de litri de apă cu spumă [66]; d-Incident la un vehicul electric în parcare, pe 20 mai 2018, Hangzhou, China [67].

De asemenea, pe sursele de energie se efectuează o serie de teste de siguranță cu scopul de a fi certificate pentru utilizarea în aplicații în conformitate cu reglementările și standardele naționale și internaționale. Deși industria acumulatorilor electrici continuă să se dezvolte, nu există un consens sau un regulament predefinit și o metodologie bazată pe performanță cu privire la proiectarea acestor sistemelor [68]. Cu toate acestea, standardele disponibile oferă și asigură siguranța la un nivel înalt în fiecare industrie în parte.

În cazul industriei VE, o serie de standarde naționale (SUA [69], [70], [71]; Korea [72]; India [73]; China [74]) și internaționale (SAE [75], [76]; ISO [77], [78], [79]; IEC [80], [81], respectiv Europa [82]) sunt în vigoare, concentrându-se pe testarea surselor energetice la nivel de sistem, modul și celulă [83]. Standarde se mai regăsesc și în alte sectoare și industrii, precum electronice [84], fabricație și aplicații industriale [85], industria aeronautică [86], respectiv în aplicații staționare [87], [88]. Aceste standarde sunt reglementate prin UN/ECE-R100.02 [89] sau GRT-EVS [90] în cazul VE.

Standardele de siguranță pasivă la vehiculele electrice sunt aceleași ca și la vehiculele cu motor cu ardere internă, prin urmare, acestea trebuie să treacă testele de impact definite de către organele competente din domeniu. Suita de teste este costisitoare atât pentru fabricanți, cât și pentru dezvoltatorii care realizează testele [91].

Cu toate acestea, chiar dacă dezvoltatorii de teste garantează siguranța vehiculelor, există posibilitatea ca, în caz de accident, pasagerii să fie electrocuțați sau să sufere arsuri din cauza scurgerii electrolitului.

Astfel, îmbunătățirea siguranței surselor energetice utilizate la vehiculele electrice necesită o atenție majoră și constantă din partea producătorilor [92, 93]. Totodată, la ora actuală, este analizată și optimizată integrarea surselor energetice în cadrul vehiculelor electrice. Rezolvarea problemelor ce pot avea ca rezultat diferite incidente de siguranță reprezintă o prioritate stringentă [93, 60, 94, 95, 96, 59]. Solicitățile suportate de către sursele de energie (Fig. 2.12) la vehicule electrice sunt multiple din punct de vedere al fenomenelor fizice.

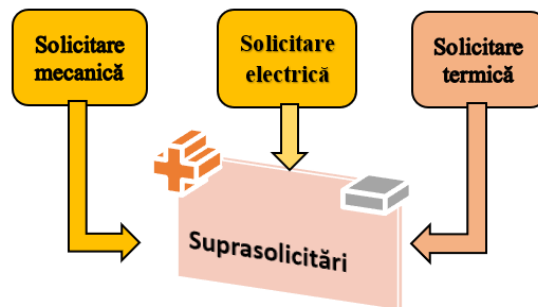


Fig. 2.12 Solicităriile apărute la bateriile litiu-ion în timpul accidentelor

În lucrările lor, Pius et al. au analizat în detaliu reacțiile la incidentele de siguranță apărute la sursele energetice în urma suprasolicitărilor și, plecând de la acestea, au propus următoarea clasificare în ceea ce privește solicitările exterioare asupra surselor energetice [60], [97]:

Solicitări mecanice:

- penetrație/pătrundere;
- cădere liberă;
- șoc mecanic;
- vibrații;
- imersiune.

Solicitări electrice

- supraîncărcare;
- supradescărcare;
- descărcare forțată;
- rata-C ridicată.

Solicitări termice

- încălzire;
- supraîncălzire.

2.5.1. Solicitări mecanice

În timpul exploatării unui vehicul electric, bateria poate suferi deformări în urma unui impact extern (ca urmare a unui accident rutier), ceea ce ulterior conduce la deteriorarea mecanică a carcasei și a componentelor acesteia. Pentru îmbunătățirea siguranței și

performanței surselor energetice litiu-ion, mai multe organizații internaționale și comitete au promulgat standarde și specificații de testare pentru surse energetice. Prin aceste teste se evaluează limitele de siguranță a surselor energetice, cum ar fi supraîncărcare, se efectuează teste mecanice de deformare și străpungere și se analizează comportamentul lor la scurtcircuit și la temperatură ridicată [59, 98].

Testul de „zdrobire”. Xu et al. [99] au dezvoltat și analizat un model prin metoda elementului finit cu ajutorul ABAQUS. Modelul reprezentativ era compus din capacul superior, carcasă, manșonul de plastic și miezul celulei. Miezul celulei a fost configurat conform modelului matematic adaptat pentru regimul dinamic de solicitări Johnson-Cook dat de ecuația (2.2).

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) + (1 + C\ln\varepsilon^p) \quad (2.2)$$

unde σ este tensiunea și ε^p a fost deformarea plastică.

Validarea modelului s-a realizat cu ajutorul unor teste experimentale de deformare prin diverse metode de comprimare și încovoiere în trei puncte a celulei de tip 18650, set de teste realizate și prezentate de către alți cercetători [100] (Fig. 2.13). Rezultatele simulărilor, pentru o viteză de impact cuprinsă între 0,1-30 m/a, au scos în evidență faptul că, odată cu creșterea vitezei de impact, poziția geometrică a apariției defectelor se modifică. Particularitățile dimensiunilor geometrice ale celulei 18650 a influențat direct comportarea mecanică la solicitarea de încovoiere, în schimb nu a avut un efect semnificativ la solicitarea de comprimare de-a lungul axei longitudinale.

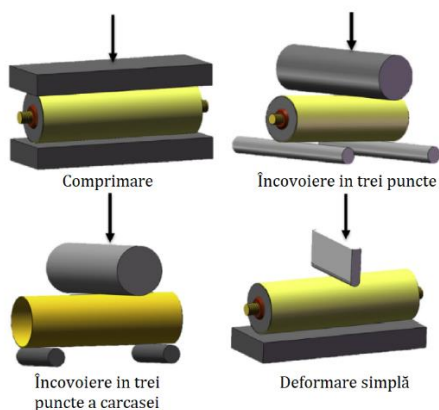


Fig. 2.13 Deformări cvasi-stactice efectuate pe celula de tipul 18650 (HP 602030) (adaptare după [99])

În cazul solicitărilor de deformare a celulelor la acțiunea unei bile de oțel cu diferite diametre, o serie de cercetări asupra fenomenului au fost efectuate de Wang et al. [101]. Testele de comprimare laterală au fost efectuate până la apariția scurtcircuitului celulei, luând în considerare și studierea mecanismului de (supra)solicitare termică a celulei. Miezul celulei s-a deformat sub acțiunea forței aplicate (Fig. 2.14) și structura stratificată a celulei s-a fisurat pe mai multe nivele. Electrozii pozitivi și negativi s-au rupt și, prin alunecare s-a străpuns și separatorul, fapt care a dus la apariția scurtcircuitului.

Concluziile studiului arată că a avut loc o descărcare rapidă a tensiunii, cauzată de suprafațe mare de contact comun a electrodului pozitiv cu cel negativ, acesta fiind principalul motiv în urma căreia celula a generat căldură. În urma creșterii temperaturii începând din momentul scurtcircuitului, s-a declanșat și suprasolicitarea termică a celulei.

Zhu et al. [102] au studiat comportamentul la solicitări mecanice al unei celule prismatice, iar modelarea pentru miezul omogen a fost definită cu ajutorul unui model de fagure, alegând tipul de material 126 în softul Ls-Dyna.

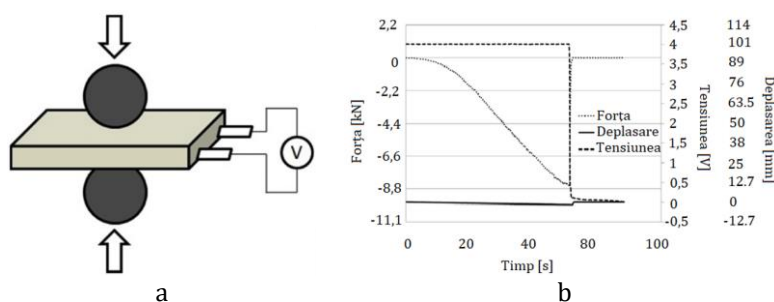


Fig. 2.14. Solicitarea de deformare mecanică a celulelor la acțiunea unei bile de oțel (adaptare după [69])

Modelul s-a dezvoltat pentru materiale celulare cu comportament anizotrop. În urma rezultatelor obținute, s-a demonstrat că folosirea unui model anizotrop este necesară pentru a prezice cu succes răspunsul structurii celulei la solicitările mecanice. Când deformarea este sub o valoare definită, forța normală și cea de frecare în toate direcțiile sunt presupuse a fi complet decuplate, iar comportamentul materialului elastoplastic neliniar poate fi definit separat pentru fiecare forță (similar cu comportamentul mecanic anizotrop al miezului celulei atunci când este supus solicitării din mai multe direcții).

Pentru fiecare componentă în parte s-au definit deformările totale

prin ecuația (2.3) lui Cauchy:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}), i, j = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

Legile de deformare s-au considerat a fi conform ecuațiilor următoare :

$$E_{ii} = E_{ii}^U + \alpha(E - E_{ii}^U), i = 1, 2, 3 \quad (2.4)$$

$$G_{ij} = G_{ij}^U + \alpha(G - G_{ij}^U), i \neq j, i, j = 1, 2, 3 \quad (2.5)$$

unde $\alpha = \max \left[\min \left((1 - V)/(1 - V_f), 1 \right), 0 \right]$, respectiv E_{ii} și G_{ij} sunt modulul de elasticitate și modulul de forfecare pentru starea liberă, necompactă. În stare compactă, modulele de elasticitate și forfecare s-au notat cu E și G . Parametrii E_{ii}^U și G_{ij}^U definesc cele două caracteristici în stare inițială. S-au încorporat în model 6 curbe de sarcină $\sigma_{ij}(\varepsilon_{ij})$ pentru a defini tensiunea normală și solicitarea la forfecare în timpul deformării pe o anumită axă. Pentru starea necompactă, la începutul deformării celulei, valorile tensiunilor s-au definit prin:

$$\left| \sigma_{ij}^{n+1^{trial}} \right| > \lambda \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}), i, j = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

și,

$$\sigma_{ij}^{n+1^{trial}} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}) \frac{\lambda \sigma_{ij}^{n+1^{trial}}}{\left| \sigma_{ij}^{n+1^{trial}} \right|}, i, j = 1, 2, 3 \quad (2.7)$$

unde λ reprezintă factorul de scară care definește efectul ratei de deformare (pentru cazurile cvasi-stactice $\lambda=1$). Când $V = V_f$ (caz corespunzător stării complet compactate), comportamentul materialului este elastic izotrop-perfect plastic și nu este influențat de duritatea materialului.

Tensiunea lui Cauchy σ și deformarea elastică ε^e tensorul urmărește relația lui Voigt: $[\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12}]$ și $[\varepsilon_{11}^e, \varepsilon_{22}^e, \varepsilon_{33}^e, 2\varepsilon_{23}^e, 2\varepsilon_{13}^e, 2\varepsilon_{12}^e]$, iar relația de legătură dintre tensiunea lui Cauchy și tensiunea elastică dată este:

$$\sigma = C\varepsilon^e \quad (2.8)$$

unde C este matricea de rigiditate elastică.

Parametrii solicitării ce au ca și efect deplasări s-au trecut ca:

$$S_{ij}^{trial} = S_{ij}^n + 2GD\Delta\varepsilon_{ij}^{dev} = 1,2,3 \quad (2.9)$$

unde creșterea deformării este definită ca:

$$\Delta\varepsilon_{ij}^{dev} = \Delta\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{kk}\delta_{ij}, i, j, = 1,2,3 \quad (2.10)$$

Solicitarea efectivă a procesului s-a definit ca:

$$S_{eff}^{trial} = \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{3}{2} S_{ij}^{trial} S_{ij}^{trial} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

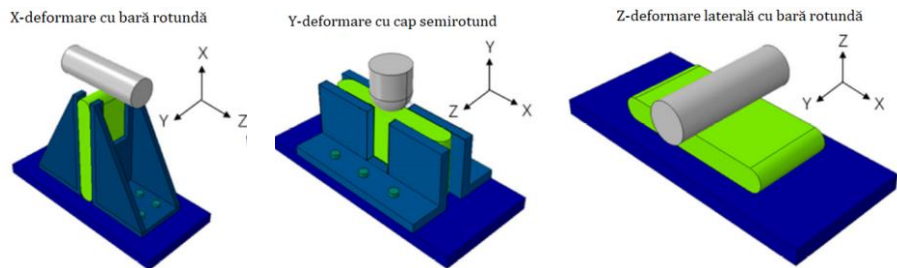
Presiunea s-a notat ca:

$$p^{n+1} = p^n - \Delta\varepsilon_{kk}^{n+1/2} \quad (2.12)$$

unde K este coeficientul de elasticitate, tensiunea calculându-se prin:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = s_{ij}^{n+1} - p^{n+1}\delta_{ij}, i, j = 1,2,3 \quad (2.13)$$

Modelul prezentat anterior s-a implementat în software-ul Abaqus, iar pentru validarea modelului omogen [102] s-a folosit o celulă prismatică utilizată și la vehiculele electrice, cu dimensiunea de 215x90x15 mm. Trei tipuri de teste cvasi-stactice s-au realizat pe cele trei axe principale ale celulei. Pe axa longitudinală (X), și grosimea (Z) celula s-a deformat cu o bară cilindrică cu un diametru de 50 mm. Pe lățime, pe axa (Y), obiectul de indentare utilizat a fost un cap semirotund cu un diametru de 25 mm. Pentru a asigura o deformare controlată, s-au prevăzut constrângeri fizice de deplasare pe axele X și Y (Fig. 2.15).



a b c

Fig. 2.15 Configurația experimentală de solicitare a celulei prismatice pe cele trei axe (adaptare după [102]).

Cercetătorii au observat câteva fenomene particulare (specifice celulei prismatice) în timpul efectuării testelor experimentale. Pe direcția Z s-a creat o fisură în mijloc și miezul s-a despărțit în două părți distincte. De asemenea, în zona de contact dintre celulă și indentator s-au creat fisuri adânci, cu deformările mari ale materialelor în zona de forfecare. Modelul matematic al solicitărilor mecanice și modelul numeric de element finit implementat au fost validate prin încercările experimentale de comprimare laterală și axială.

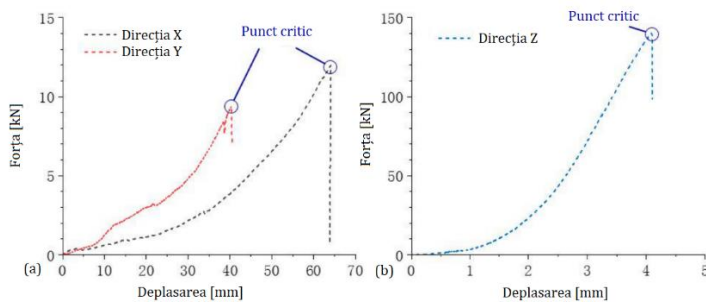


Fig. 2.16 Rezultatele experimentului, curba forță-deplasare (adaptare după [102])

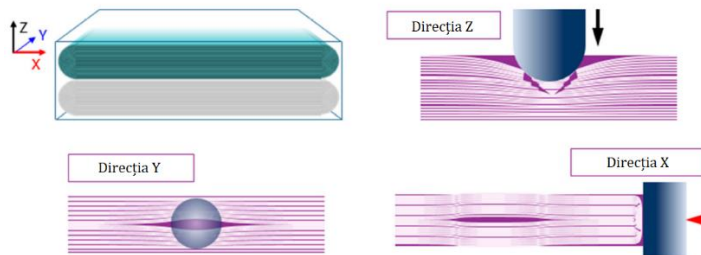


Fig. 2.17 Modul de deformare al celulei în timpul experimentului (adaptare după [102])

În cadrul unui studiu extins, Zhu et al. [33] s-au concentrat pe compararea rezultatelor obținute prin deformarea (pentru condiția particulară a SOC = 0%, Fig. 2.18) celulelor litiu-ion tip pungă.

Configurația standului experimental a permis efectuarea de încercări detaliate pe colectorul de catod. De asemenea, au dezvoltat în ABAQUS modelul 3D cu element finit pentru a confirma și a analiza reacția și mecanismul de defectare al celulelor. Au luat în considerare structura stratificată a miezului celulei, respectiv anizotropia componentelor.

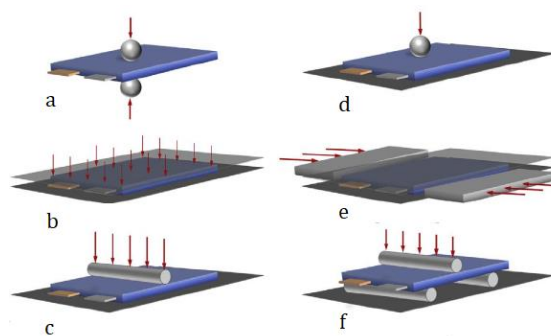


Fig. 2.18 Tipuri de deformări mecanice la o celulă electrochimică de tip pungă: a- deformare cu doua bile, b- comprimare plană, c- încovoiere simplă, d- deformare cu o bilă, e- deformare laterală, f- încovoiere în trei puncte (adaptare după [33])

Deformările aplicate celulei de tip pungă în procesul de simulare au fost: străpungere/indentare, deformare cu vârf semirotund, comprimare axială, comprimare laterală, încovoiere simplă și încovoiere în trei puncte. Variația curbelor încărcare-deplasare, obținută la simulare a fost în concordanță cu cele obținute prin testele experimentale inițiale. S-a concluzionat faptul că, începând de la deformarea primară a carcasei și până la apariția scurtcircuitului, există 4 etape de deformare. Rezultatele au fost validate prin vizualizarea optică a fiecărei etape cu metode de tomografie computerizată a modelului deformat prin experiment real. Prin desfacerea celulelor s-a concluzionat multitudinea deformărilor și a fisurilor în separator (ceea ce a condus la scurtcircuitul celulei).

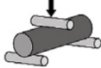
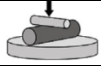

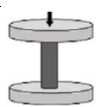
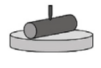
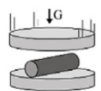
Consecințele la solicitările mecanice pot fi provocate de o deformare în zona carcasei celulelor sau de o penetrare intensă, precum și de o coliziune frontală sau laterală la viteză mare [103]. Totodată, la deformarea excesivă a carcasei celulei se poate ajunge în situații periculoase, respectiv apariția scurtcircuitului celulelor care se încălzesc suficient de mult încât să ajungă la o temperatură de autoaprindere.

De asemenea, apare posibilitatea ca separatorul de la anod și catod să nu mai izoleze ceea ce duce la scurtcircuit, electrolitul scurgându-se din celulă și provocând un incendiu. Așa cum s-a amintit și

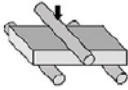

anterior, aceste deformări mecanice necesită mai multe scale/nivele de cercetare, de la nivelul materialului, la ordine de celulă, până la nivelul modului energetic (constituit din mai multe grupuri de baterii conectate în serie și/sau paralel).

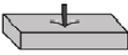
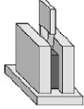
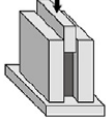
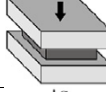

Comportamentul materialelor surselor energetice în asemenea situații a fost studiat de către mai mulți cercetători. Liu [104] și Lai et al. [92] au studiat proprietățile mecanice la tracțiune a electrozilor și separatorului, pentru a afla răspunsul la solicitări structurale mecanice ale celulelor în diferite condiții de încărcare [105]. Au sumarizat în studiile lor și metodele utilizate de alți cercetători, și, de asemenea, au propus o clasificare a tipurilor de încercări (Tabelul 2.4 a,b,c).

Tabelul 2.4 a- Experimente mecanice principale pe celule electrochimice cilindrice (adaptare după [104])


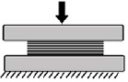
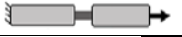

Celula cilindrică	
Experiment	Schemă încercare
Încovoiere [99, 100]	
Încovoiere simplă [106, 107]	
Comprimare laterală [99, 100]	
Comprimare axială [96]	
Străpungere [108, 109]	
Deformare prin căderea liberă [110]	

b- Experimente mecanice principale pe celule electrochimice prismatice (adaptare după [104])

Celula prismatică	
Experiment	Schemă încercare
Încovoiere [101, 111]	
Cap semirotund [111]	

Străpungere [33, 102, 112]	
Străpungere laterală [92]	
Comprimare pe grosime	
Comprimare laterală	
Deformare prin căderea liberă	
Străpungere prin cădere liberă	

c- Experimente mecanice principale realizate pe părțile componente celulelor (adaptare după [104])

Părțile componente ale celulelor	
Experiment	Schemă încercare
Întindere pe: electrod [92], separator [107], carcasă [99]	
Comprimare pe electrod și separator [113]	
Bară de tensiune Hopkinson [114]	
Deformare pe mai multe axe simultan [115]	

În concluzie, în studiu cercetătorii au tratat amănunțit influența solicitărilor mecanice asupra celulelor și au scos în evidență existența a patru faze mari în cadrul procesului de solicitare structurală mecanică a unei celule. În prima fază are loc deformare mecanică, după care, în faza doi are loc scurtcircuitul. După momentul începerii scurtcircuitului, temperatura celulei crește, care duce la suprasolicitarea termică (faza trei). Ultima fază s-a caracterizat prin autoaprinderea celulei. Au scos în evidență importanța tratării fazelor definite în mod individual și în detaliu pentru a îmbunătății răspunsul celulelor litiu-ion în cazul solicitărilor mecanice [92].

De asemenea, Gao et al. [94] au studiat efectele temperaturii asupra solicitărilor mecanice, iar Zhang et al. [107] și-au concentrat cercetările pe caracterizarea plasticității și fracturilor apărute la bateriile cilindrice de litiu-ion în urma deformărilor mecanice.

Testele mecanice s-au efectuat pe componentele unei celule, module sau grupuri de celule în condiții diferite de încărcare energetică. Experimentele au inclus compresia celulei între două plăci plate [116], indentarea și deformarea [33, 95, 96, 117, 118] (folosind perforatoare semisferice, cilindrice, conice și o tijă rigidă), tensiuni uniaxiale și biaxiale și îndoirea în trei puncte [119]. S-a subliniat faptul că, în condițiile unui accident de mașină, fenomenul se întâmplă într-o fracțiune de secundă, în timp ce ciclurile de încărcare și descărcare sau evenimentele termice ulterioare apar în intervale de timp de ordinul minutelor, respectiv al orelor. Având în vedere testarea mecanică, se dorește, prin experimente, determinarea cât mai exactă a comportamentului la deformări definite de către cercetătorii din domeniu [96].

Sahraei [95] și Xia et al. [120], în studiile și experimentele efectuate, au utilizat celule electrochimice de tip pungă de diferite dimensiuni geometrice de gabarit (respectiv pe o celulă mică, medie și mare). Lungimea acestor celule a fost între 59-227 mm, cu o capacitate energetică cuprinsă între 0,74 ... 19,5 Ah (cu SOC=10%). De asemenea, electrochimia celor trei celule a fost LiCoO_2 , LiMnNiCoO_2 și LiFePO_4 . Metoda experimentală s-a bazat pe cercetările începute de Sahraei [111] et al., studiul fiind continuat pentru a afla răspunsul celulelor în cazul comprimării între două indentatoare cu suprafață plană (Fig. 2.19). Rata de deplasare a indentatoarelor s-a stabilit la 1 mm pe minut, în condiții de deformare cvasi-statică. Experimentele s-au realizat până în momentul în care forța a atins pragul maxim sau până când în celulă a apărut scurtcircuitul intern.



*Fig. 2.19 Indentatoare utilizate în cadrul testului experimental
De la stânga la dreapta fiind vârful 90° conic, vârful semirotond de 12.7 mm, 28.575 mm,
44.45 mm și vârful cilindric cu diametru de 25.31 mm cu capul plat [95]*

Configurația standului experimental a fost prevăzută astfel încât să permită măsurarea (înregistrarea) următorilor parametri:

- forța, respectiv deplasarea în timp;
- tensiunea celulei, măsurată cu un voltmetru simplu;
- temperatura de pe carcasa celulei, măsurată cu ajutorul unui senzor de temperatură;
- înregistrare optică a experimentului (o poză pe secundă).

pentru fiecare celulă în parte s-a utilizat și un model cu element finit LS Dyna tip 971 pentru a compara și valida rezultatele de la măsurătorile experimentale. Modelul numeric cu element finit a fost un element solid, după care discretizarea s-a făcut pe 15,000 de unități la celula mică, 33,810 unități la celula medie și 254,240 de unități la celula mare

Cercetările efectuate au scos în evidență importanța coeficientului de frecare. Acest coeficient s-a modificat în funcție de tipul perforatorului, lucru ce se poate observa și pe curba forță – deplasare. De asemenea, curba arată, în cazul simulării celor trei celule, forța și deplasarea. Fig. 2.20 b urmărește îndeaproape curba rezultată la testul experimental. Scăderea bruscă a forței semnalează debutul scurtcircuitului.

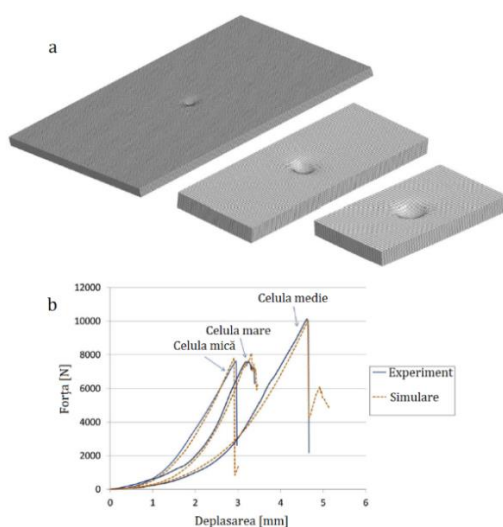


Fig. 2.20 a - Modele cu element finit aplicat la celulele de tip pungă, b - Curba forță-deplasare, test experimental vs simulare (adaptare după [95])

În concluzie, în cazul modelului de EF, au fost simulate deformările în condiții și parametri de intrare asemănători cu testul experimental. Prin simulare s-au aflat valorile maxime de forță și de deformare. Curbele forță-deplasare rezultate din simulări urmăresc îndeaproape curbele înregistrate la testul experimental.

În ceea ce privește modelele cu element finit, au fost dezvoltate mai multe teste pentru a investiga răspunsul celulei la diverse moduri de încărcare. Se utilizează în general două abordări, respectiv modele de celule omogene și modele detaliate ale celulei. Astfel, modelele EF necesită validare experimentală pentru ca studiul să fie fezabil. Se intenționează să se obțină date concrete care vor fi folosite în modelare, care, ulterior, duce la îmbunătățirea și optimizarea celulelor [96].

2.5.2. Efectele vibrațiilor și șocurilor asupra surselor energetice litiu-ion

Celulele electrochimice sunt folosite în mare parte pe aplicații mobile, unde vibrațiile mecanice și șocurile au o amplitudine relativ mare. Brand M. și colaboratorii au semnalat și evidențiat în cercetările efectuate modul în care vibrațiile și șocurile afectează celulele litiu-ion [121]. Dovezile teoretice și practice arată că performanța electrică și proprietățile mecanice ale surselor energetice folosite în construcția vehiculelor electrice sunt afectate de vibrațiile rezultate în timpul funcționării vehiculului. Cu toate acestea, există doar câteva studii legate de efectele vibrațiilor asupra performanțelor bateriilor vehiculelor electrice [122].

2.5.3. Solicitări electrice

Scurtcircuitul surselor energetice utilizate la vehiculele electrice se poate declanșa după un impact sau o coliziune, deoarece se creează contact permanent între conductorii de faze diferite, rezultând scurtcircuitarea instalației, imersiunea contactelor celulelor cauzată de întreținerea necorespunzătoare sau nerespectarea condițiilor de exploatare recomandate de către producător, încărcarea excesivă a celulelor cu energie electrică, respectiv descărcarea totală (conform cercetărilor, aceasta se consideră solicitare electrică) [123].

2.5.4. Solicitări termice

Referitor la solicitarea termică se pot aminti cercetările efectuate de Y. Zheng et al. [124], care arată că supraîncălzirea locală a celulelor apare cel mai des din lipsa contactului perfect a punților de legătură între celule. De asemenea, performanța vehiculelor electrice depinde și de managementul termic al bateriilor [125, 126]. Un aspect important îl constituie cunoașterea mecanismului de degradare a surselor energetice la temperaturi ridicate și la descărcare rapidă. La celulele litiu-ion, căldura se poate genera în interfața solidă a electroliților (SEI) [127], descompunerea electrolitului, a anodului [128, 129] și în reacția catodului cu liantul [127]. Temperatura internă a celulelor în timpul supraîncărcării a atins 199°C, cu 93°C mai mult decât pe suprafața carcasei [130].

2.5. Concluzii

În acest capitol s-a tratat stadiul actual privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipază vehiculele electrice. În prima parte s-a făcut o analiză a necesității reducerii poluării, respectiv a dezvoltării și utilizării vehiculelor electrice, care contribuie direct la reducerea poluării în special în orașele mari (aglomerări urbane).

În a doua parte a capitolului au fost parcurse diverse abordări referitoare la tipul constructiv al celulelor electrochimice, solicitările mecanice care pot apărea la celulele energetice, tipul materialelor folosite în construcția acestora, modelarea cu metoda elementului finit, respectiv validarea modelelor celulelor Li-Ion.

Pentru a cunoaște influența solicitărilor structurale pe celulele litiu-ion, cercetătorii din domeniu au realizat diverse studii asupra acestora și asupra componentelor lor. S-au utilizat diferite capuri de deformare (cu vârf sau semirotunde) cu care s-au solicitat mecanic cele trei tipuri de celule (cilindrică, prismatică și celula de tip pungă). S-au efectuat teste de comprimare axială, comprimare laterală, încovoiere simplă și încovoiere pe cele trei tipuri de celulă.

În cadrul testelor efectuate s-au determinat patru faze principale, respectiv, prima fază, care constă în deformarea sub acțiunea forței, după care apare scurtcircuitul (a doua fază). Din momentul începerii scurtcircuitului, temperatura crește și apare fuga termică (faza trei) care duce la autoaprinderea celulei în ultima fază.

De asemenea, în unele cazuri, pentru a caracteriza comportamentul miezului celulei la simulare, s-au folosit diverse tipuri de spumă din biblioteca de materiale a programelor de simulare. Rezultatele unui model anizotrop sunt mai precise când vine vorba de determinarea poziției și a direcției crăpăturilor la deformarea celulei, pe când modelele de spumă izotropă au un răspuns mai exact la analiza globală a celulelor.

Prin utilizarea modelării prin metoda elementelor finite se pot determina și optimiza încă din faza de proiectare diverși parametri, care ulterior contribuie la îmbunătățirea siguranței celulelor energetice fără realizarea altor experimente și teste. Sursele de energie pot fi analizate la nivel microscopic, la nivel de celulă sau la nivel de grup de celule. Spre exemplu, la nivelul grupului de celule, optimizarea carcusei unei celule poate reduce semnificativ deteriorarea celulei. Dezvoltarea modelelor EF pentru simularea diferitelor solicitări sau scenarii de încărcare se poate face, în general, utilizând două abordări, și anume: modele omogene din punct de vedere al structurii și modele detaliate ale celulei electrochimice.

3. Activități de cercetare experimentală privind solicitările structurale ale surselor energetice ce echipază vehiculele electrice.

3.1. Metodologia de cercetare experimentală

Pentru realizarea activităților de cercetare experimentală privind solicitările structurale ale surselor energetice ce echipază vehiculele electrice s-a stabilit următoarea metodologie de cercetare, care are scopul de a atinge obiectivele specifice acestei etape de elaborare a tezei de doctorat.

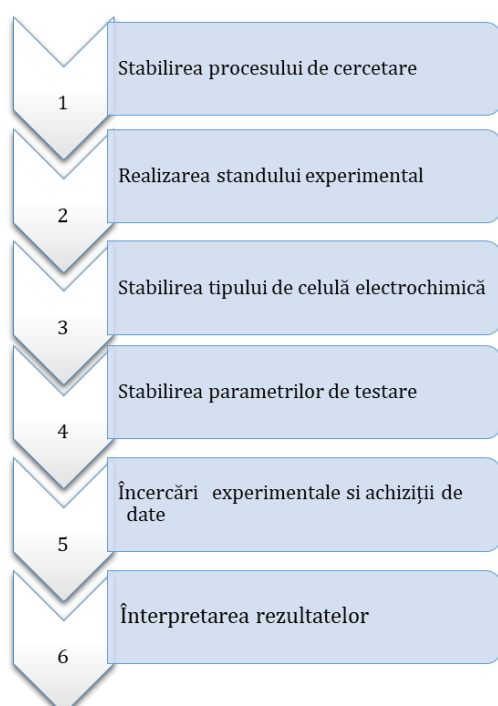


Fig. 3.1 Schema de principiu a metodologiei de cercetare experimentală

3.2. Stabilirea procesului de cercetare

Pentru determinarea solicitărilor structurale ale celulelor electrice ce echipază vehiculele electrice este necesară realizarea unui stand experimental, iar obținerea rezultatelor cerute în urma măsurărilor efectuate implică necesitatea implementării unor

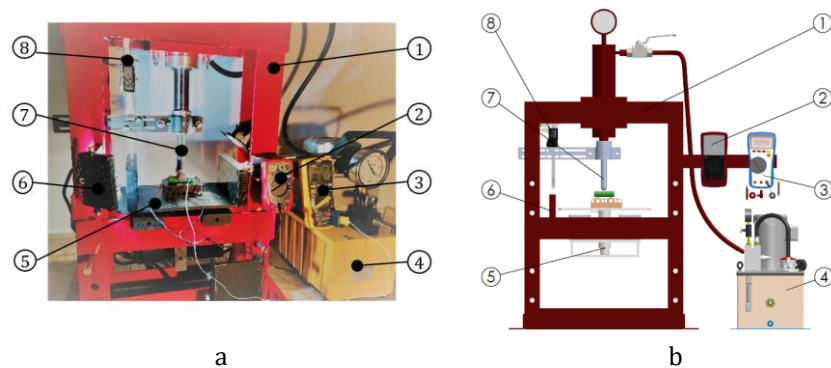
echipamente de control, măsurare și supraveghere a fenomenelor pentru a immortaliza și măsura procesele și rezultatele simulării experimentale.

Pe baza rezultatelor obținute în urma procesului de cercetări experimentale stabilit, s-a realizat analiza specifică a acestora, în scopul identificării comportamentului celulelor electrochimice la solicitări mecanice structurale, legi care au scopul de a fi introduse în modelele numerice utilizate ulterior.

3.3. Realizarea standului experimental

Standul experimental a fost proiectat pentru atingerea obiectivelor legate de cercetările experimentale necesare și este configurat dintr-o presă hidraulică de 10 tone (Fig. 3.2), un mini grup hidraulic echipat cu motor electric și instalația hidraulică aferentă. Grupul hidraulic este dotat cu o valvă simplă manuală de reglarea a debitului de ulei între 0,52 – 2,5 l/min, la o presiune de lucru ce variază între 50-600 bar.

La realizarea structurii principale a presei s-a folosit un oțel de tipul S275JR, ce oferă o rigiditate suficientă a structurii, rigiditate care se reflectă în procentul de erori minime ce au apărut în timpul măsurătorilor. Toate echipamentele auxiliare mecano-sudate pentru încercări s-au proiectat integral, cu ajutorul unui program de proiectare CAD. Totodată, realizarea lor s-a efectuat conform desenelor de execuție elaborate în acord cu necesitățile și utilitățile din cadrul activităților de cercetare experimentală.



*Fig. 3.2 Stand experimental
a- model fizic; b- model cad; 1-presa; 2-termometru; 3-voltmetru; 4-grup hidraulic; 5-
suport traductor de forță; 6-reflector; 7-dispozitiv de indentare; 8-șubler electronic
(adaptat după [117, 118])*

De asemenea, s-a folosit încă un multimetru digital similar, model UNI-T UT33D, pentru monitorizarea variației tensiunii în celulele testate, având o scară de măsurare a tensiunii cuprinsă între 0-500 V.

Senzorul de forță din Fig. 3.3 s-a folosit pentru monitorizarea forței dezvoltate de presă pentru deformarea celulelor energetice. Senzorul a fost echipat cu un convertor de semnal (Fig. 3.4) care, printr-un port USB, comunică cu interfața desktop dedicată VS3, unde sunt afișate în timp real și prezentate grafic, cu axare automată, rezultatele experimentale. Acestea se pot salva sub formă de fișiere digitale cu extensia .CSV și .BMP, pentru o analiză ulterioară amănunțită (Fig. 3.5).



Fig. 3.3 Traductorul de forță



Fig. 3.4 Convertorul de semnal

Tipul și specificațiile traductorului de forță tip K-1613/N410:

- domeniu de măsurare: 0-20 kn
- precizie: $\pm 0.5\%$ fs
- sensibilitate: 1 mV/v
- coeficient termic al sensibilității: $\pm 0.2\%$ $f_{nom}/10$ k
- deriva punctului de nul: $\pm 0.2\%$ $f_{nom}/10$ k
- temperatura de referință: +23 °C
- gama de temperatură nominală: -10 ... +70°C
- temperatura de lucru: -30 ... +80°C
- temperatura de stocare: -50 ... +95°C
- repetabilitate: 0,2 s%

- carcasă: oțel inox, clasa de protecție ip 65

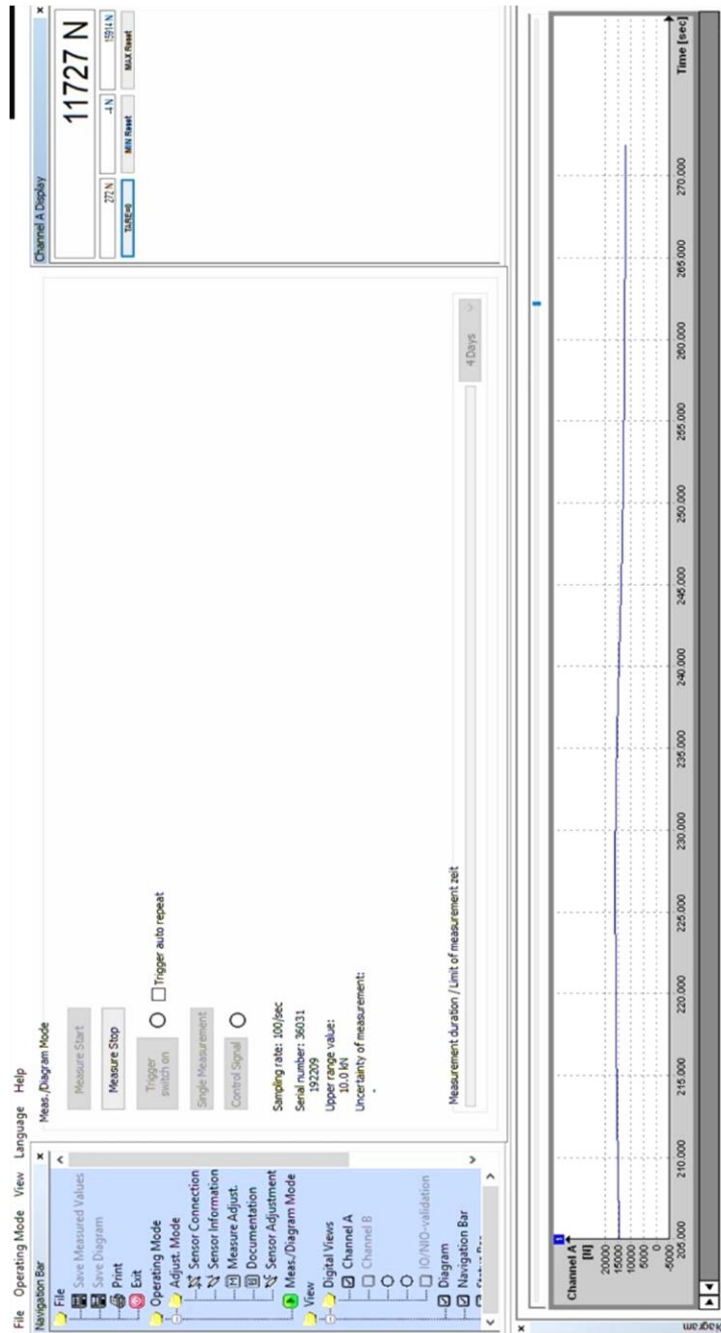


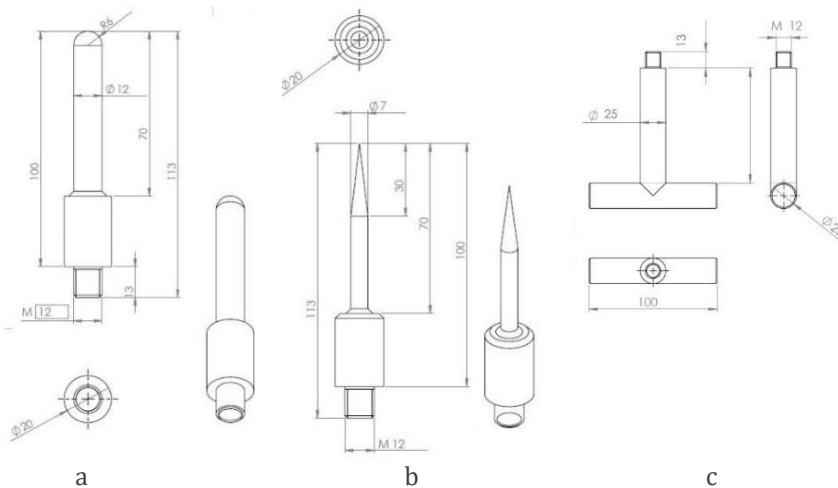
Fig. 3.5 Exemplu cu interfața programului de înregistrare și interpretare a semnalului primit de la traductorul de forță

În cadrul construcției standului experimental au fost proiectate și construite o serie de scule indentatoare (conform cu exemplele cercetărilor din domeniu prezentate în cadrul capitolelor anterioare). Aceste scule au fost proiectate cu scopul de a fi amovibile și sunt montate pe capul cilindrului prin intermediul unui filet de prindere de M 12, așa cum se poate observa și în Fig. 3.6. S-au folosit 3 tipuri de scule în efectuarea încercărilor, care sunt prezentate în Fig. 3.6, vederile a, b și c. Dimensiunile geometrice detaliate ale sculelor indentatoare utilizate în experimente sunt prezentate în Fig. 3.7.



a b c

Fig. 3.6 Tipurile de scule indentatoare folosite la încercări
a - dorn semirotund; b - dorn cu vârf ascuțit; c - dorn tip T



a b c

Fig. 3.7 Dimensiunea sculelor indentatoare folosite in încercări
a - dorn semirotund; b - dorn cu vârf ascuțit; c - dorn tip T

Pentru integrarea traductorului de forță din Fig. 1.4 în cadrul standului experimental a fost necesară realizarea unui suport adaptor cu ajutorul căruia toate forțele aplicate senzorului au fost coliniare cu axa centrală a traductorului. Fișa de instrucțiuni a confirmat aplicarea forțelor doar în direcția paralelă cu axa traductorului.

Detaliile constructive sunt prezentate în Fig. 3.8, unde se poate observa ansamblul în care s-a montat traductorul, pe placa superioară fiind zona pe care s-au realizat testele.

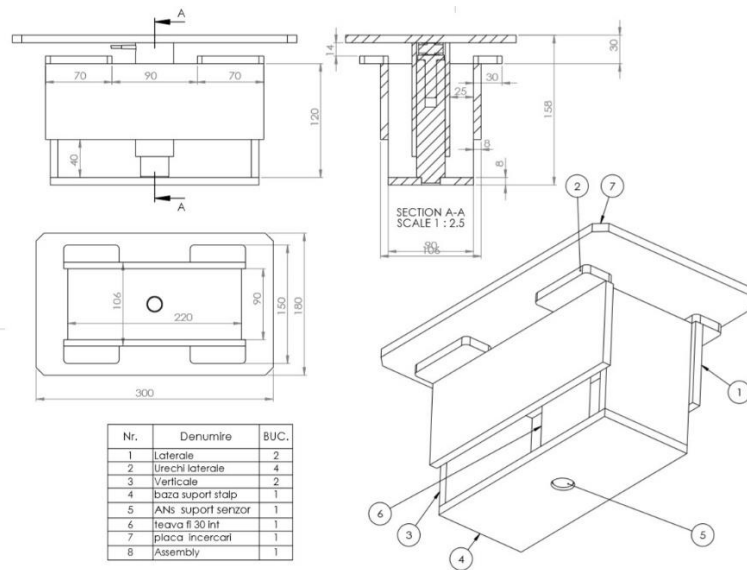


Fig. 3.8 Ansamblu placă de încercări

La efectuarea experimentului de tip încovoiere în trei puncte a fost necesară proiectarea și realizarea unui subansamblu ajutător cu role care să permită efectuarea testelor pe celule, conform Fig. 3.9.

Cu ajutorul șublerului s-a măsurat deplasarea realizată de cilindrul pistonului, iar centralizarea datelor s-a făcut prin interpretarea datelor de pe înregistrările video.



Fig. 3.9 Dispozitiv cu role

3.4. Stabilirea tipului de celulă electrochimică

Știind că obiectivul principal al lucrării este îmbunătățirea siguranței vehiculelor electrice prin analiza și optimizarea construcției surselor energetice din perspectiva solicitărilor structurale mecanice ale acestora, experimentul s-a realizat pe trei tipuri de celule energetice ce se folosesc în mod uzual în construcția vehiculelor electrice. Tabelul 3.1 cuprinde proprietățile celulelor energetice (Fig. 3.10).

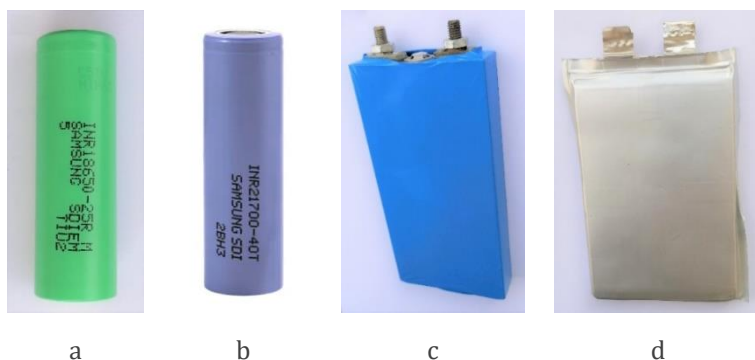


Fig. 3.10 Tipuri de celule folosite în timpul experimentului
a - cilindrică 18650; b - cilindrică 21700; c - prismatică; d - tip pungă

Tabelul 3.1 a- Parametrii tehnico-funcționali ai celulelor energetice considerate în experimente

	Cilindric 18650	Cilindric 21700
Model	INR18650-25R	INR21700-40T
Tip	Li-Ion	Li-Ion
Capacitate	2.5 Ah	4 Ah
Tensiunea nominală	3.6 V	3.6 V
Tensiunea minimă	2.75 V	2.5 V
Rata de descărcare	0.2 C	0.2 C
Rata maximă de descărcare	2C 20 A	2C 35 A
Rezistența internă inițială	$\leq 18\text{m}\Omega$	$\leq 12\text{m}\Omega$
Dimensiunea	$\varnothing 18 \times 65\text{mm}$	$\varnothing 21 \times 70\text{mm}$
Masa	45 g	67 g

Temperatura optimă recomandată în funcționare	Încărcare : 0 - 50°C Descărcare : -20 - 75°C	Încărcare : 0 - 45°C Descărcare : -20 - 60°C
Tensiunea minimă la descărcare	2.5V	2.5V
Ciclul de viață	250 clicuri, Capacitatea ≥ 1,500 mAh la 60% DOD	250 clicuri, Capacitatea ≥ 2,500 mAh la 60% DOD
Temperatura optimă recomandată în caz de depozitare	1.5 ani -30~25°C (50±5% SOC, 25°C) 3 luni -30~45°C (50±5% SOC, 25°C) 1 luna -30~60°C (50±5% SOC, 25°C)	1.5 ani -30~25°C (50±5% SOC, 25°C) 3 luni -30~45°C (50±5% SOC, 25°C) 1 luna -30~60°C (50±5% SOC, 25°C)

b- Parametrii tehnico-funcționali ai celulelor energetice considerate în experimente

	Prismatic	Tip pungă
Model	GTK 3.2v	H-3210
Tip	LiFePO ₄	LiFePO ₄
Capacitate	11 Ah	10 Ah
Tensiunea nominală	3.2 V	3.2 V
Tensiunea minimă	2.5 V	2.3 V
Rata de descărcare	3C	3C
Rata maximă de descărcare	5C 50A	5C 50A
Rezistența internă inițială	≤ 3 Ω	≤ 3 Ω
Dimensiunea	18x75x145 mm	11x82x138 mm
Masa	360 g	240 g
Temperatura optimă recomandată în funcționare	Încărcare : 0 - 45°C Descărcare : -20 - 60°C	Încărcare : 0 - 45°C Descărcare : -20 - 60°C
Tensiunea minimă la descărcare	2.5 V	2.30 V

Ciclul de viață	2000 cicluri, la 80% DOD	2000 cicluri, la 80% DOD
Temperatura optimă recomandată în caz de depozitare	20 - 45 °C	20 - 45 °C

3.5. Stabilirea parametrilor de testare

Pentru a putea ajunge la o concluzie concretă și concludentă, este necesară stabilirea parametrilor de testare și a solicitărilor efectuate. Pe baza acestor considerente primare, precum și pe baza bunelor practici ale cercetărilor efectuate la nivel mondial, au fost aleși următorii parametri de testare:

- deplasarea;
- tensiunea electrică;
- temperatura;
- forța aplicată

, pentru următoarele solicitări structurale mecanice:

- încovoiere în trei puncte;
- încovoiere simplă;
- deformarea (indentarea) celulei cu un dispozitiv cu cap semirotund;
- străpungere celulă cu vârf ascuțit.

3.6. Încercări experimentale și achiziții de date

Încercările experimentale s-au efectuat într-un spațiu închis cu temperatura medie ambiantă de 20°C, utilizând standul experimental anterior prezentat și ținându-se cont de normele SSM și PSI. Pentru fiecare caz de solicitare considerat pentru fiecare celulă electrochimică au fost efectuate un număr de 50 de încercări experimentale. Rezultatele obținute au fost analizate și au fost aplicate teste statistice de validare a acestora (de înlăturare a valorilor eronate – testul Fischer). Valorile conforme din cele 50 de încercări experimentale au fost mediate, fiind valorile prezentate în cadrul capitolelor ce urmează. De asemenea, trebuie menționat faptul că încercările experimentale au fost efectuate

pentru o valoare SOC de 80% pentru fiecare tip de celulă electrochimică considerată.

3.6.1. Încercări pe celule tip cilindrice 18650

3.6.1.1. Încovoierea în trei puncte a celulei cilindrice

În cazul experimentului încovoierii în trei puncte s-a folosit dispozitivul cu două role și dispozitivul de deformare de tip T de 25mm. Bornele de la multimetru s-au atașat pe cele două capete ale celulei energetice. Lângă carcasa celulei, sub protecție, s-a așezat sonda de măsurare a temperaturii pentru monitorizarea acesteia. În Fig. 3.11 este reprezentată configurația sistemului de testare la încovoiere în trei puncte a celulei cilindrice. Printr-o mișcare liniară a pistonului, acționat de pompa hidraulică și cu un avans de 5mm/minut, dispozitivul T încovoie celula nedeformată. Sub acțiunea forțelor, straturile interioare ale celulei se deplasează din poziția inițială; pentru a monitoriza deplasarea, s-a montat șublerul electronic (ale cărui valori au fost înregistrate video) pentru a măsura deplasarea concomitent cu timpul de testare, de unde a rezultat graficul din Fig. 3.13, variația deformării în raport cu timpul. Măsurarea forței din Fig. 3.12 s-a realizat cu ajutorul traductorului, iar convertorul a transmis semnalul obținut către softul aferent.



Fig. 3.11 Experiment încovoiere în trei puncte a celulei cilindrice

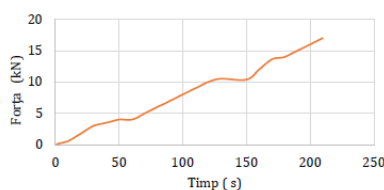


Fig. 3.12 Variație încărcare celulă cilindrică la încovoierea în trei puncte

Pentru a ușura centralizarea datelor, întregul proces a fost înregistrat cu ajutorul unei camere video, în felul acesta citindu-se

concomitent toate rezultatele. Fig. 3.12 reprezintă variația forței în cazul încovoierii în trei puncte, care s-a efectuat pe un interval de timp de aproximativ de 220 de secunde.

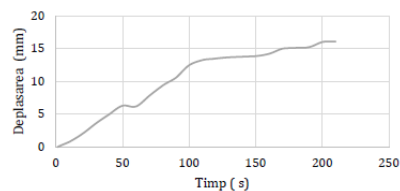


Fig. 3.13 Variația deformării la încovoiere în trei puncte

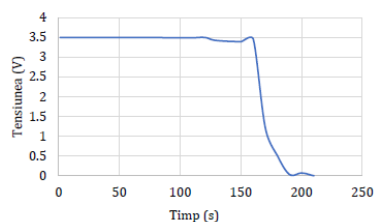


Fig. 3.14 Variația tensiunii la încovoiere în trei puncte - celulă cilindrică

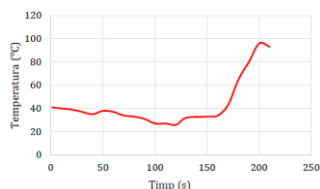


Fig. 3.15 Variația temperaturii la încovoiere în trei puncte - celulă cilindrică

Tensiunea electrică a celulei s-a menținut la o valoare de 3,5 V pentru 10 kN forță, iar după creșterea forței de deformare s-a observat scăderea de tensiune ca urmare a scurtcircuitului celulei. Punctul de apariție al scurtcircuitului este reliefat și de variația temperaturii celulei, care are o creștere abruptă de la valoarea de 37°C (moment 160 sec) la valoarea de 96°C (moment 220 sec), o creștere de aproximativ 1,6 ori.

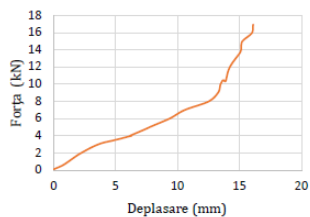


Fig. 3.16 Curba forță-deplasare la încovoierea în trei puncte a celulei 18650

3.6.1.2. Încovoiere simplă cu ajutorul dispozitivului T pe celula cilindrică

La experimentul de încovoiere cu dispozitivul T, celula cilindrică s-a așezat pe o suprafață plană (Fig. 3.17). Bornele de la multimetru au fost atașate la bornele celulei, iar pe partea laterală a celulei s-a atașat sonda de temperatură pentru monitorizarea acestui parametru în timpul experimentului.

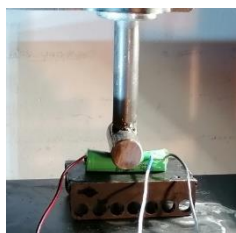


Fig. 3.17 Experiment de încovoiere simplă pe celula cilindrică

În Fig. 3.21 se observă modificarea bruscă a temperaturii celulei (de la 32°C la 100°C) în momentul scurtcircuitului. Din Fig. 3.18 se poate observa valoarea forței de aproximativ 20 kN aplicate pe celulă. Această forță crește odată cu deplasarea (Fig. 3.19).

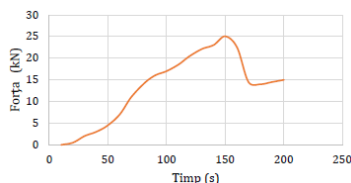


Fig. 3.18 Variația forței la încovoierea simplă a celulei cilindrice

După secționarea totală a celulei, doar temperatura din Fig. 3.20 se menține pe un trend ascendent până la o valoare maximă de 100°C.

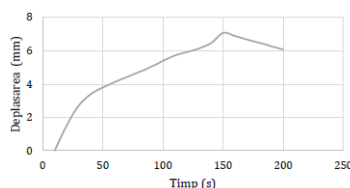


Fig. 3.19 Variația deformării la încovoierea simplă a celulei cilindrice

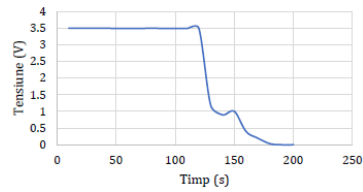


Fig. 3.20 Variația tensiunii la încovoierea simplă a celulei cilindrice

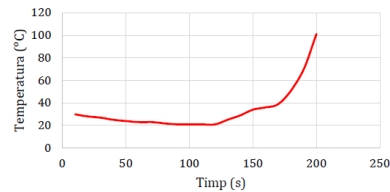


Fig. 3.21 Variația temperaturii la încovoierea simplă a celulei cilindrice

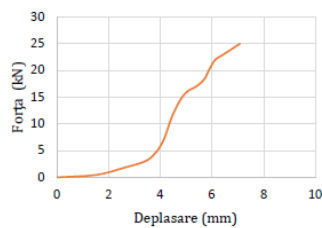


Fig. 3.22 Curba forță-deplasare la încovoierea simplă a celulei 18650

3.6.1.3. Deformare celulei cilindrice cu vârf semirotund cu raza de 6 mm

În cadrul experimentului cu vârf semirotund s-a folosit dispozitivul cu două role între care s-a plasat celula cilindrică la care au fost atașate cablurile de la multimetru și sonda. Suportul a avut rolul de a menține celula cilindrică într-o poziție optimă pentru testare. Vârful de testare, cu o rază de 6 mm, a deformat cu ușurință celula, fapt ce se poate observa și din durata de 150 de secunde a experimentului. Fig. 3.23 arată modul de dispunere al celulei.



Fig. 3.23 Deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund

Valoarea maximă atinsă de curba de variație a forței, prezentată în Fig. 3.24, a fost de 14 kN.

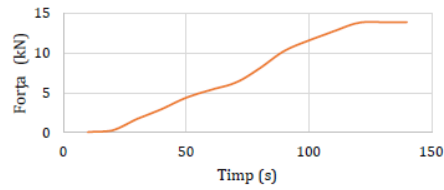


Fig. 3.24 Variația forței la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund

În momentul scurtcircuitului, rezultat în urma deformării (Fig. 3.25), tensiunea începe să scadă de la valoarea de 3,5V (secunda 60) până la 0V (secunda 70).

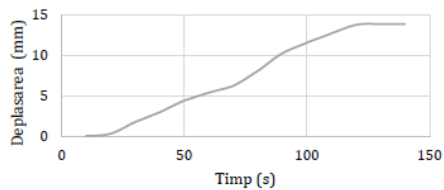


Fig. 3.25 Variația deplasării la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund

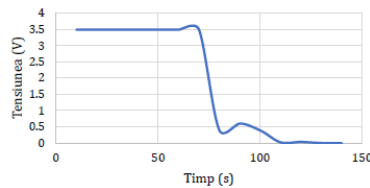


Fig. 3.26 Variația tensiunii la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund

Punctul de apariție al scurtcircuitului este reliefat și de variația temperaturii celulei, care are o creștere rapidă de la valoarea de 18°C la 98°C.

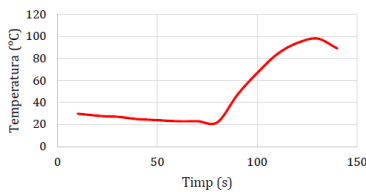


Fig. 3.27 Variația temperaturii la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund

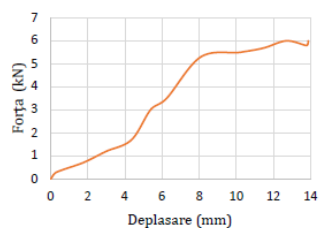


Fig. 3.28 Variația forță-deplasare la deformarea celulei 18650 cu vârf semirotund

3.6.1.4. Străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

Străpungerea cu vârf ascuțit a celulei constituie experimentul cu cea mai scurtă durată, raportat la cele realizate anterior. În Fig. 3.29 se observă dispozitivele folosite în cadrul experimentului. Pe suportul de dispozitive, prin asamblare demontabilă cu filet, s-a montat vârful pentru străpungere. Dispozitivul cu role asigură imobilitatea celulei în timpul străpungerii.

Dimensiunea geometrică a vârfului se găsește în Fig. 3.7– b. Vârful are unghiul ascuțit, așadar celula a fost străpunsă cu ușurință, rezultând o durată a experimentului de 100 de secunde.



Fig. 3.29 Străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

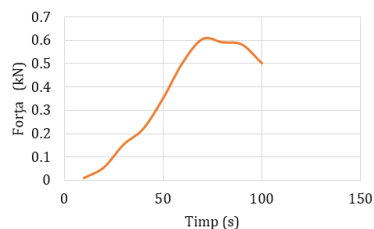


Fig. 3.30 Variația forței la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

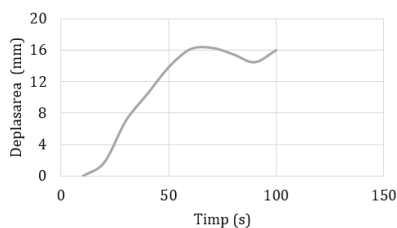


Fig. 3.31 Variația deplasării la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

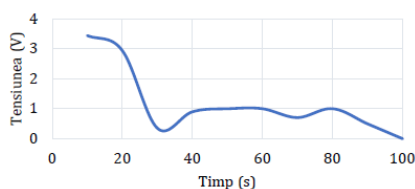


Fig. 3.32 Variația tensiunii la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

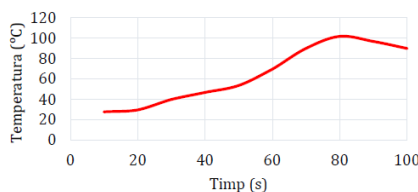


Fig. 3.33 Variația temperaturii la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

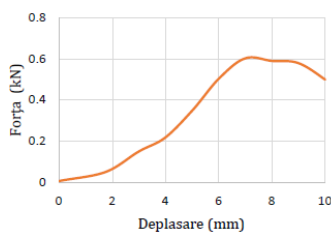


Fig. 3.34 Curba forță-deplasare la străpungerea celulei 18650 cu vârf ascuțit

3.6.2. Încercări pe celule tip cilindrice 21700

3.6.2.1. Încovoierea în trei puncte a celulei cilindrice

La experimentul realizat pe celula cilindrică de tipul 21700, pentru încovoierea în trei puncte s-a folosit standul experimental echipat cu indentatorul de deformare în T (Fig. 3.35). Parametrii care au fost măsurați în cadrul experimentului sunt prezentați în Fig. 3.36, Fig. 3.37 și Fig. 3.38.

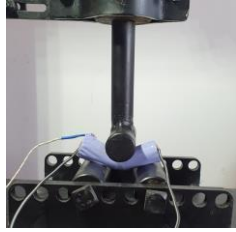
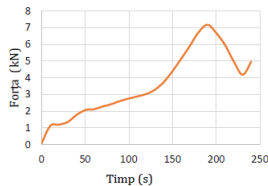
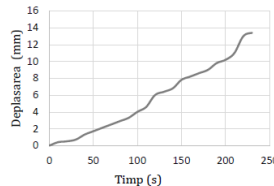


Fig. 3.35 Dispunerea celulei 21700 la încovoierea în trei puncte

În urma centralizării valorilor măsurate, se observă că după 140 de secunde apare scurtcircuitul, tensiunea scade, iar temperatura începe să crească din cauza solicitărilor mecanice, după care apare și suprasolicitarea termică. Forța de deformare atinge valoarea maximă de 7kN (secunda 185), după care începe să scadă din cauza faptului că în mijlocul bateriei a apărut rupțura.

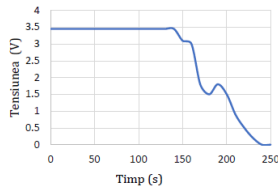


a

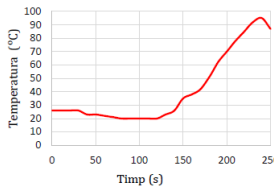


b

Fig. 3.36 a - Variația forței pentru celula 21700 la încovoierea în trei puncte; b - Variația deplasării la încovoierea în trei puncte a celulei 21700



a



b

Fig. 3.37 a - Variația tensiunii la încovoiere în trei puncte la celula 21700; b - Variația temperaturii la încovoierea în trei puncte

Variația forței în funcție de deplasare s-a calculat pentru a verifica și valida rezultatele obținute raportat la cele determinate după efectuarea simulărilor pe baterii.

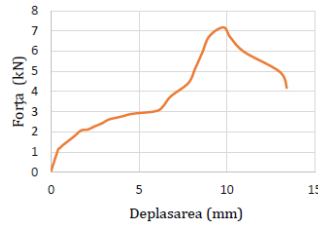


Fig. 3.38 Curba forță-deplasare la încovoierea în trei puncte a celulei 21700

3.6.2.2. Încovoiere simplă cu ajutorul dispozitivului T pe celula cilindrică

În cazul studiului experimental de încovoiere simplă a celulei prismatice efectuate pe bateria cilindrică 21700 (Fig. 3.39), bornele de la multimetru s-au atașat la aceasta, iar sonda de temperatură s-a plasat pe carcasa bateriei. Cu ajutorul sondei s-a monitorizat temperatura în timpul experimentului.

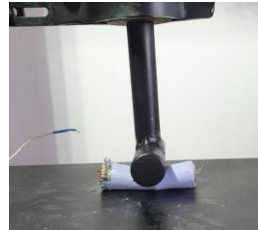


Fig. 3.39 Dispunerea celulei 21700 la încovoierea simplă

Variațiile parametrilor măsurați sunt prezentate în Fig. 3.40, Fig. 3.41 și Fig. 3.42. Punctul de apariție al scurtcircuitului (secunda 90) este reliefat și de variația temperaturii bateriei, care are o creștere imediată, de la valoarea de 20°C la valoarea maximă de 110°C, o creștere de aproximativ 5 ori.

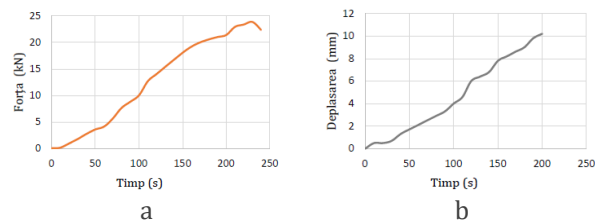


Fig. 3.40 a - Variația forței la încovoierea celulei 21700 într-un punct; b - Variația deformării la încovoierea celulei într-un punct

Valoarea forței în momentul debutului scurtcircuitului este de 10 kN, iar deplasarea de 3,5 mm.

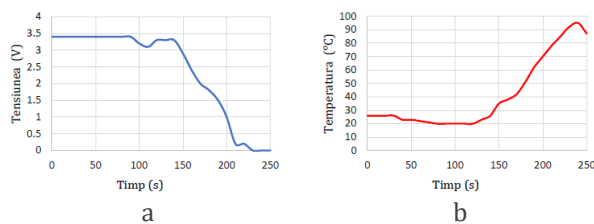


Fig. 3.41 a - Variația tensiunii la încovoierea celulei 21700 într-un punct; b - Variația temperaturii la încovoierea celulei într-un punct

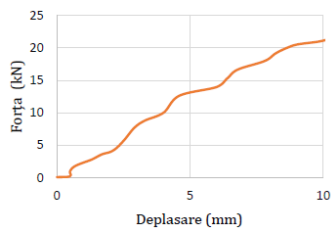


Fig. 3.42 Curba forță-deplasare la încovoierea celulei 21700 într-un punct

3.6.2.3. Deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund cu raza de 6 mm

Deformarea celulei electrochimice cilindrice 21700 cu vârful semirotund s-a efectuat conform Fig. 3.43, de unde se observă că celula s-a așezat între rolele de sprijin pentru a-și menține poziția pe durata experimentului.

Așa cum reiese și din Fig. 3.44 a, forța de deformare atinge o valoare maximă de 10 kN, după care scade, variația deplasării fiind în creștere. Fenomenul aceste se explică prin faptul că, după deformare, straturile sunt perforate în totalitate.



Fig. 3.43 Deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund

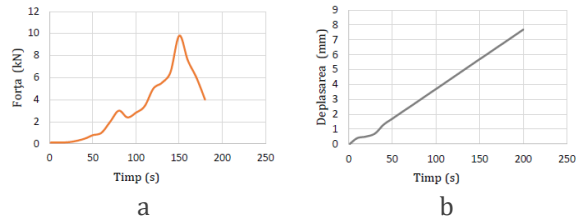


Fig. 3.44 a - Variația forței la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund; b - Variația deplasării la deformarea celulei cu vârf semirotund

După 80 de secunde, conform graficului prezentat în Fig. 3.45 a, apare scurtcircuitul intern și, implicit, și suprasolicitarea termică. Acesta este confirmat și de variația temperaturii ilustrate în Fig. 3.45 b, care are o creștere abruptă de la valoarea de 20°C la 70°C.

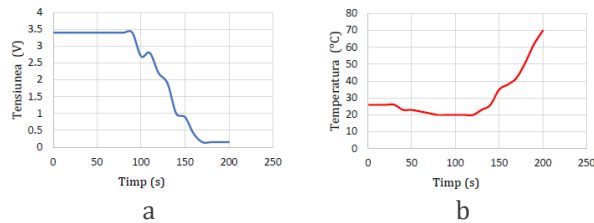


Fig. 3.45 a - Variația tensiunii la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund; b - Variația temperaturii la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund

Variația forței în funcție de deplasare se regăsește în Fig. 3.46, iar validarea rezultatelor obținute prin simulare se va face cu ajutorul acestei curbe.

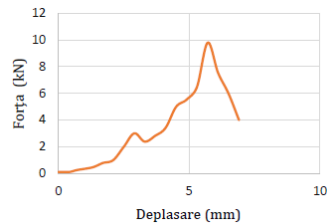


Fig. 3.46 Variația forță-deplasare la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund

3.6.2.4. Străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit

Străpungerea cu vârf ascuțit a bateriei cilindrice 21700 constituie experimentul cu cea mai scurtă durată în raport cu celelalte experimente realizate. În Fig. 3.47 sunt prezentate dispozitivele utilizate în cadrul experimentului.

Vârful ascuțit este montat în suportul de pe cilindru, iar acesta este acționat hidraulic.

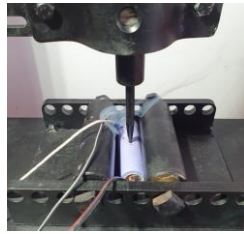


Fig. 3.47 Străpungerea celulei cilindrice 21700 cu vârful ascuțit

Rezultatele privind variația forței și a deplasării sunt prezentate în Fig. 3.48, unde se observă că forța maximă este de 0,21 kN, iar deplasarea de 7 mm.

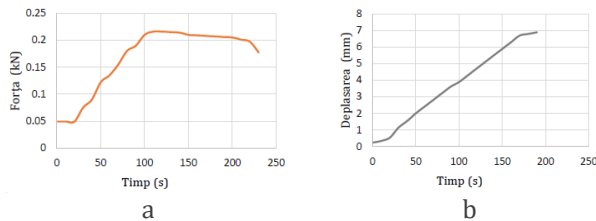


Fig. 3.48 a - Variația forței la străpungerea celulei cilindrice 21700 cu vârful ascuțit; b - Variația deplasării la străpungerea celulei cilindrice cu vârful ascuțit

Datorită forței aplicate pe vârful, acesta a străpuns celula, după aproximativ de 30 secunde apărând scurtcircuitul. Tensiunea (Fig. 3.49) scade de la 3,5 V la 0,2 V în 30 de secunde. Concomitent cu deplasarea, după apariția scurtcircuitului, crește și temperatura conform graficii prezentate în Fig. 3.49 b.

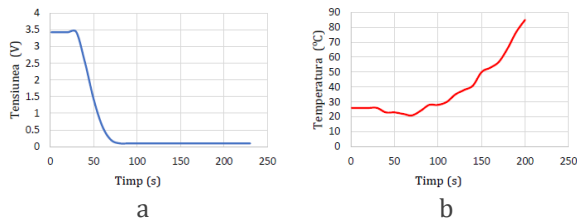


Fig. 3.49 a - Variația tensiunii la străpungerea celulei cilindrice 21700 cu vârful ascuțit; b - Variația temperaturii la străpungerea celulei cilindrice cu vârful ascuțit

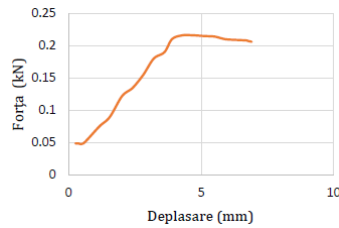


Fig. 3.50 Curba forță-deplasare la străpungerea celulei 21700 cu vârf ascuțit

3.6.3. Încercări efectuate pe celule de tip prismatic

3.6.3.1. Încovoierea în trei puncte a celulei prismatice

Varianta de montaj în cadrul standului experimental pentru încovoierea în trei puncte a celulei prismatice se găsește în Fig. 3.51. S-a folosit dispozitivul cu role peste care s-a amplasat celula, iar indentatorul T s-a montat de suportul de scule de pe capul cilindrului.

Din cauza faptului că celulele au un gabarit mai mare și sunt mai robuste în comparație cu celulele cilindrice, experimentul s-a desfășurat pe durata a 200 de secunde.



Fig. 3.51 Deformarea celulei prismatice cu dispozitivul T [117]

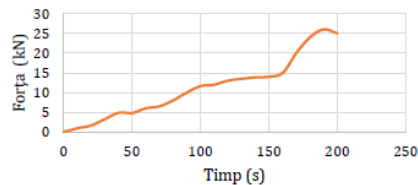


Fig. 3.52 Variația forței celulei prismatice în cazul deformării în trei puncte

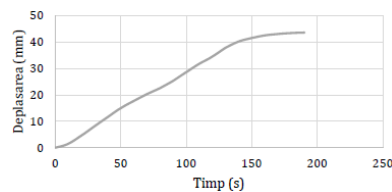


Fig. 3.53 Variația deformării celulei prismatice în cazul deformării în trei puncte

Pe bornele celulei s-au legat conductorii de la multimetru pentru a monitoriza temperatura, ilustrată în Fig. 3.55, și tensiunea (Fig. 3.54). La o tensiune nominală de 3,2V, în momentul atingerii forței de aproximativ 15 kN (secunda 146), are loc scurtcircuitul, iar tensiunea scade până la valoarea de 0V.

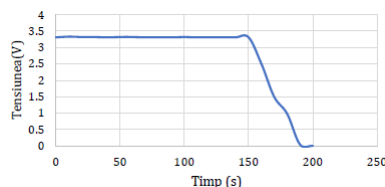


Fig. 3.54 Variatia tensiunii pentru celula prismatica în cazul deformării în trei puncte

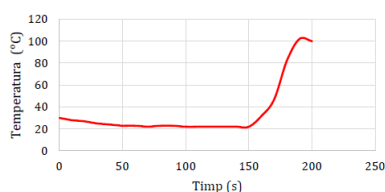


Fig. 3.55 Variatia temperaturii pentru celula prismatica în cazul deformării în trei puncte

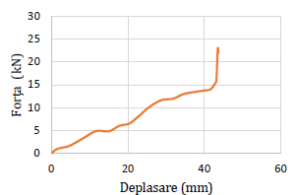


Fig. 3.57 Variatia deplasării pentru celula prismatica în cazul deformării în trei puncte

3.6.3.2. Încovoierea laterală pe celula prismatica

Pentru a realiza experimentul de încovoiere laterală pe celula prismatica a fost necesară montarea dispozitivului T în suportul de pe capul pistonului cilindrului hidraulic, asigurându-se deformarea laterală a celulei sprijinite pe suprafața plană a standului.

Conexiunea pentru monitorizarea tensiunii a fost realizată cu ajutorul bornelor aferente celulei, iar sonda a fost atașată pe carcasa de aluminiu a acesteia. Metoda de montaj se poate observa în Fig. 3.56.



Fig. 3.56 Încovoierea simplă la celulele prismatice [117]

Datorită rezistenței structurii celulei, forța exercitată de presă a fost mai mare în raport cu celelalte celule. Conform graficului prezentat în Fig. 3.57, forța maximă atinsă a fost de 30 kN (secunda 460).

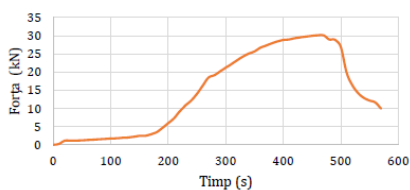


Fig. 3.57 Variația forței pe celula prismatică în cazul deformării simple

În urma acestui experiment care s-a efectuat pe partea laterală a celulei prismatice, care are o lățime de 75 mm, rezultă graficul din Fig. 3.58, unde se poate observa o deformare de peste 50 de mm. Variația tensiunii se găsește în Fig. 3.59, iar cea a temperaturii în Fig. 3.60. Totodată, lățimea celulei a influențat și durata experimentului care s-a desfășurat pe o perioadă de aproximativ 600 de secunde.

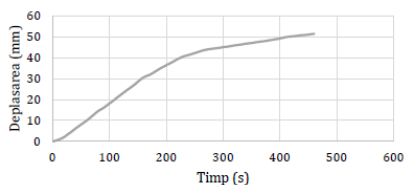


Fig. 3.58 Variația deformării pe celula prismatică în cazul încovoierii simple

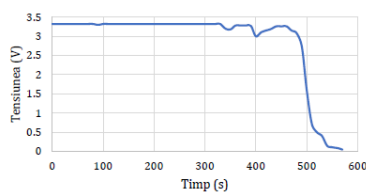


Fig. 3.59 Variația tensiunii pe celula prismatică în cazul încovoierii simple

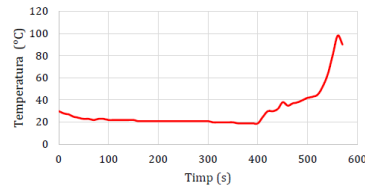


Fig. 3.60 Variația temperaturii pe celula prismatică în cazul încovoierii simple

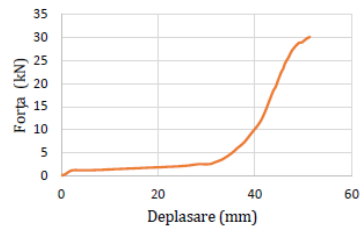


Fig. 3.61 Curba forță-deplasare la încovoierea într-un punct a celulei prismatice

3.6.3.3. Deformare cu vârf semirotund pe celula prismatică

În cazul acesta, deformarea celulei prismatice s-a efectuat cu ajutorul unui vârf semirotund cu o rază de 6 mm. Celula s-a așezat pe o placă plană pe batiul presei, conform Fig. 3.62. Pe bornele existente s-au prins conductorii de la multimetru, iar sonda s-a lipit pe carcasa de aluminiu pentru a monitoriza temperatura (Fig. 3.66)

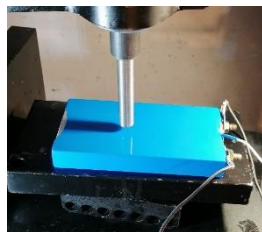


Fig. 3.62 Deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund [117]

Scurtcircuitul s-a produs la o deformare de 6 mm, temperatura începând să crească din cauza încălzirii celulei.

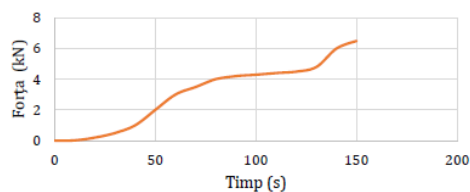


Fig. 3.63 Variația forței pe celula prismatică în cazul deformării cu vârf semirotund

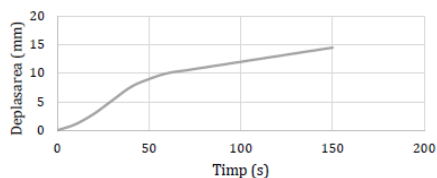


Fig. 3.64 Variația deformării pe celula prismatică în cazul penetrării cu vârf semirotund

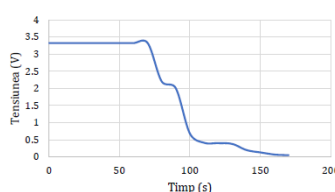


Fig. 3.65 Variația tensiunii pe celula prismatică în cazul penetrării cu vârf semirotund

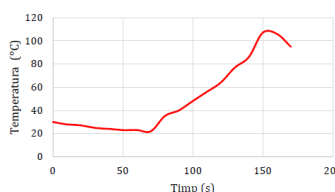


Fig. 3.66 Variația temperaturii pe celula prismatică în cazul penetrării cu vârf semirotund

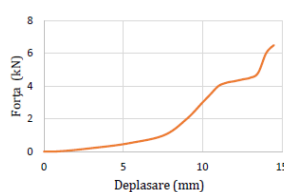


Fig. 3.67 Curba forță-deplasare la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund

3.6.3.4. Străpungerea cu vârf ascuțit pe celula prismatică

La experimentul efectuat pe celula prismatică s-a utilizat aceeași configurație cu placa plană pe batiu, respectiv vârful ascuțit prins în

suportul de dispozitive. Din Fig. 3.68 se poate observa că, prin acționarea pistonului, vârful hidraulic penetrează celula, la un moment dat producându-se scurtcircuitul celulei [117].

Pentru monitorizarea tensiunii s-au prins pe bornele celulei conductorii de la multimetru.

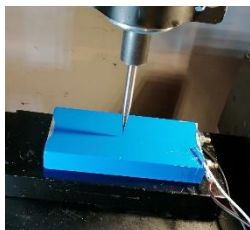


Fig. 3.68 Străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit [117]

După străpungerea carcusei celulei are loc scurtcircuitul. Graficul privind variația tensiunii (Fig. 3.71) arată faptul că, de la secunda 40, tensiunea scade până aproape de valoarea de 0V, iar temperatura crește până la valoarea de 120 °C (Fig. 3.72). Variația forței se găsește în Fig. 3.69, iar cea a deformării în Fig. 3.70.

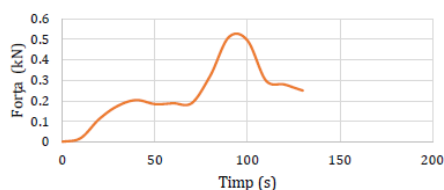


Fig. 3.69 Variația forței pe celula prismatică în cazul străpunerii cu vârf ascuțit

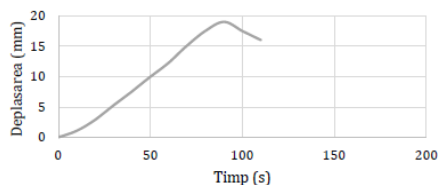


Fig. 3.70 Variația deformării pe celula prismatică în cazul străpunerii cu vârf ascuțit

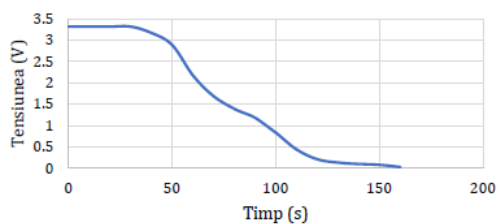


Fig. 3.71 Variația tensiunii pe celula prismatică în cazul străpunerii cu vârf ascuțit

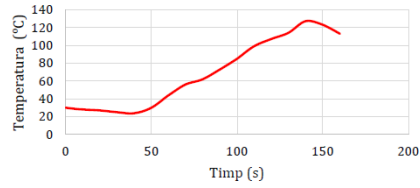


Fig. 3.72 Variația temperaturii pe celula prismatică în cazul străpungerii cu vârf ascuțit

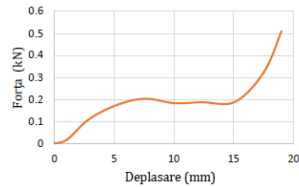


Fig. 3.74 Variația deplasării pe celula prismatică în cazul străpungerii cu vârf ascuțit

3.6.4. Încercări efectuate pe celule de tip pungă

3.6.4.1. Încovoiere în trei puncte a celulei de tip pungă

Solicitările s-au efectuat în condiții similare cu cele de pe celulele anterioare. Pentru a efectua experimentul de încovoiere în 3 puncte pe celula de tip pungă, aceasta s-a așezat pe suportul cu 3 role (Fig. 3.73). Dispozitivul de deformare s-a montat pe suportul din vârful pistonului.

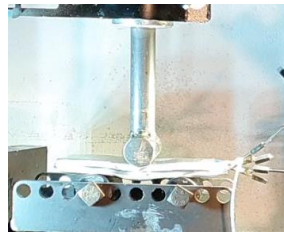


Fig. 3.73 Deformarea celulei tip pungă cu dispozitivul T [118]

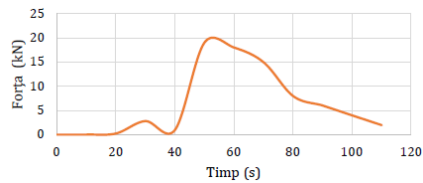


Fig. 3.74 Variația forței pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte

De asemenea, pe bornele celulei s-au atașat conductorii multimetrului cu ajutorul unor cleme de tip crocodil pentru monitorizarea tensiunii, graficul din Fig. 3.76 arătând variația acesteia. Sonda de temperatură s-a poziționat pe partea laterală a celulei pentru a

monitoriza temperatura în timpul experimentului. Variația acesteia este prezentată în Fig. 3.77, atingându-se valoarea de 100°C la secunda 80.

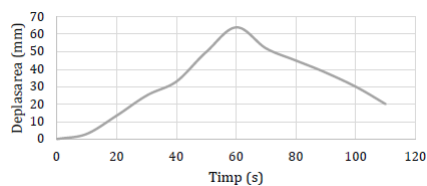


Fig. 3.75 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte

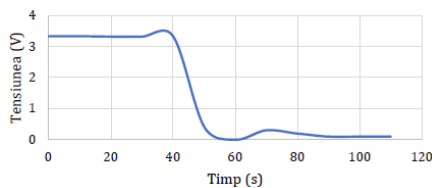


Fig. 3.76 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte

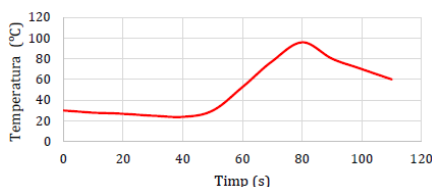


Fig. 3.77 Variația temperaturii pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte

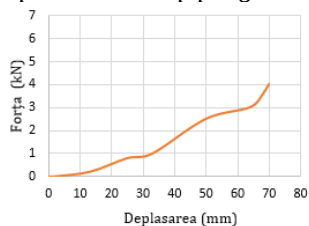


Fig. 3.78 Curba forță-deplasare la încovoierea în trei puncte a celulei prismatice

3.6.4.2. Încovoierea simplă pe celula de tip pungă

Realizarea solicitării de încovoiere simplă pe celula de tip pungă s-a efectuat pe o contra piesă plană așezată pe batiul preseii (Fig. 3.79). În suportul existent de pe pistonul cilindrului s-a montat dispozitivul de încercare cu care s-a realizat experimentul.

Pentru măsurarea tensiunii (Fig. 3.82), multimetrul a fost atașat la bornele celulei, iar sonda pentru măsurarea variației temperaturii (Fig. 3.83) s-a atașat pe celulă cu ajutorul unei benzi adezive. Experimentul a avut loc pe durata a 120 de secunde, iar forța maximă atinsă în timpul

solicitării a fost 30 kN.



Fig. 3.79 Încovoierea simplă pe celula de tip pungă [118]

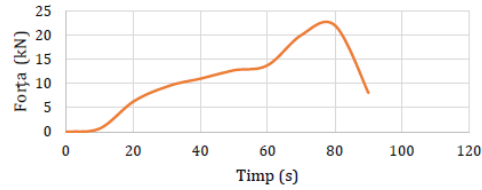


Fig. 3.80 Variația forței pe celula tip pungă în cazul deformării simple

După 70 de secunde, la o forță de 20 kN, a apărut scurtcircuitul în cazul celulei supuse solicitării de încovoiere. Temperatura maximă a fost de 100°C după declanșarea scurtcircuitului.

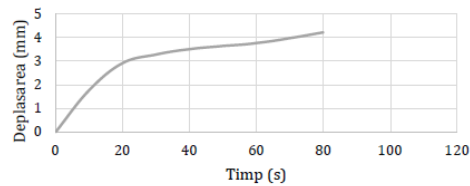


Fig. 3.81 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul deformării simple

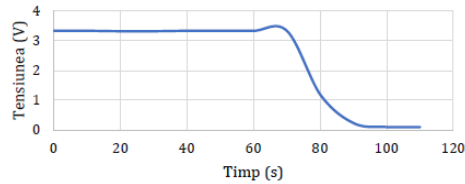


Fig. 3.82 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul deformării simple

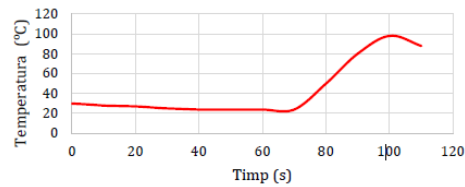


Fig. 3.83 Variația temperaturii pe celula tip de pungă în cazul deformării simple

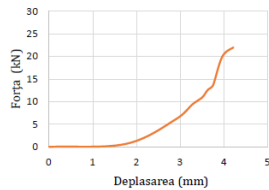


Fig. 3.84 Curba forță-deplasare la încovoierea într-un punct al celulei de tip pungă

3.6.4.3. Încercări efectuate cu vârf semirotund pe celula de tip pungă

Pentru încercările efectuate cu vârf semirotund (Fig. 3.85), celula s-a așezat pe suprafața plană a batiului preseii. Pentru măsurarea variației tensiunii (Fig. 3.88), bornele de la multimetru s-au conectat la bornele celulei energetice. În Fig. 3.89 este reprezentată variația temperaturii măsurate pe suprafața celulei în timpul experimentului. Temperatura maximă atinsă în cadrul experimentului este de aproximativ de 105 °C.



Fig. 3.85 Deformarea celulei de tip pungă cu vârf semirotund [118]

Forța exercitată pe celulă în momentul declanșării scurtcircuitului este de 6 kN. Variația forței este dată de curba reprezentată în Fig. 3.86, unde forța maximă exercitată pe celulă a fost de 7 kN.

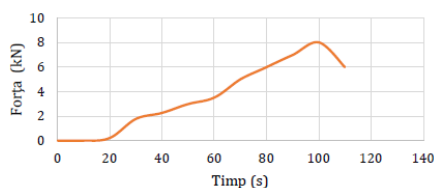


Fig. 3.86 Variația forței pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund

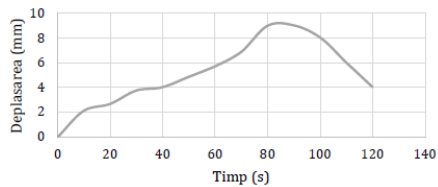


Fig. 3.87 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund

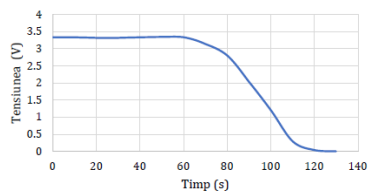


Fig. 3.88 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund

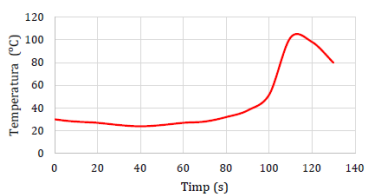


Fig. 3.89 Variația temperaturii pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund



Fig. 3.90 Curba forță-deplasare pentru celula de tip pungă la deformarea cu vârf semirotund

3.6.4.4. Străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit

Poziționarea celulei energetice în cazul străpungerii cu vârf ascuțit s-a efectuat pe o suprafață plană conform Fig. 3.91. Vârful penetrant este montat pe suportul de dispozitiv, multimetrul conectându-se la bornele celulei energetice de tip pungă.

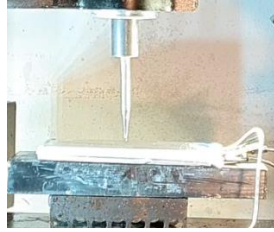


Fig. 3.91 Străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit [118]

Variația forței este reprezentată în Fig. 3.92, unde, la secunda 20, se găsește valoarea forței de străpungere de 0.2 kN corespunzătoare declanșării scurtcircuitului. Conform Fig. 3.94, se observă că la secunda 20 începe să scadă tensiunea din cauza declanșării scurtcircuitului. După străpungere, temperatura crește până la 100°C în timp de 100 de secunde, așa cum arată Fig. 3.95.

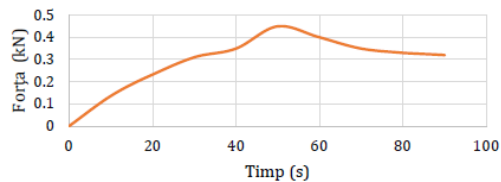


Fig. 3.92 Variația forței pe celulă de tip pungă în cazul străpunerii cu vârf ascuțit

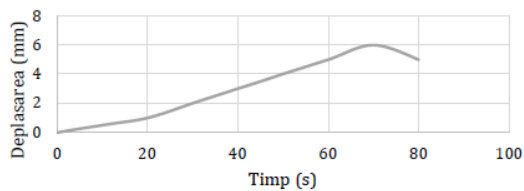


Fig. 3.93 Variația deplasării pe celulă de tip pungă în cazul străpunerii cu vârf ascuțit

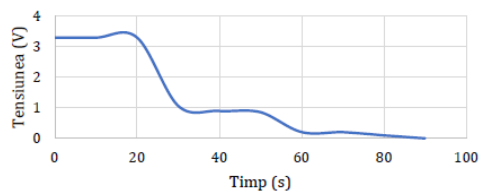


Fig. 3.94 Variația tensiunii pe celulă de tip pungă în cazul străpunerii cu vârf ascuțit

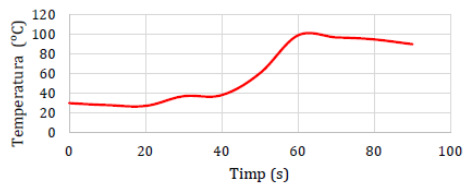


Fig. 3.95 Variația temperaturii pe celula de tip pungă în cazul străpungerii cu vârf ascuțit

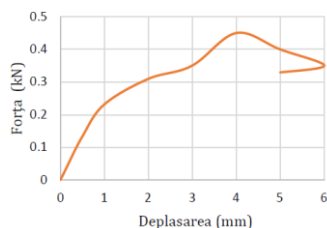


Fig. 3.96 Curba forță-deplasare la străpungerea celulei de tip pungă

3.7. Interpretarea rezultatelor

Datele și rezultatele prezentate anterior în teza de doctorat s-au analizat și interpretat în funcție de solicitările efectuate pe celulele energetice. Parametrii de testare au rămas constanți în toate cele 4 cazuri de solicitări, iar în cele ce urmează, se va prezenta interpretarea comparativă a rezultatelor obținute experimental pentru toate tipurile de celule electrochimice supuse încercărilor.

3.7.1. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de încovoiere în trei puncte

În Fig. 3.97 este prezentată celula cilindrică deformată în urma solicitării de încovoiere în trei puncte. Se poate observa rupțura în partea inferioară, urmele rozelor de suport, precum și urma dispozitivului T în partea de mijlocul, în zona superioară.



Fig. 3.97 Celula cilindrică deformată prin încovoierea în trei puncte

Celula prismatică din Fig. 3.98, fiind mai maleabilă, s-a deformat, însă fără o ruptură vizibilă. După declanșarea scurtcircuitului temperatura celulei a crescut, iar în cazul experimentului de față nu s-a topit folia de protecție de pe carcasa celulei.



Fig. 3.98 Celula prismatică deformată prin încovoierea în trei puncte

Aceeași configurație de experiment s-a efectuat și pe celula de tip pungă din Fig. 3.99. Forța maximă exercitată a secționat celula, fiind urmată de o autoaprindere rezultată din contactul componentei chimice cu oxigenul.



*Fig. 3.99 Celula de tip pungă deformată prin încovoierea în trei puncte
a – vederea din față; b - vederea laterală*

Din Fig. 3.100 reies valorile maxime măsurate în timpul experimentului de încovoiere în trei puncte.

Forța maximă aplicată pe celula prismatică a avut o valoare de peste 20 kN. În momentul declanșării scurtcircuitului pentru cele 3 tipuri de celule, timpul și forța au avut valorile cele mai mari în cazul celei prismatice.

Deplasarea măsurată pe celule până în timpul declanșării scurtcircuitului s-a realizat cu ajutorul șublerului montat pe stand. Aceste valori sunt prezentate în Fig. 3.100, celula prismatică fiind cea care s-a deformat cel mai mult până la momentul intrării în scurtcircuit.

Totodată, în urma monitorizării temperaturii, se pot observa valorile măsurate în timpul declanșării scurtcircuitului, precum și temperatura maximă pe care a atins-o celula.

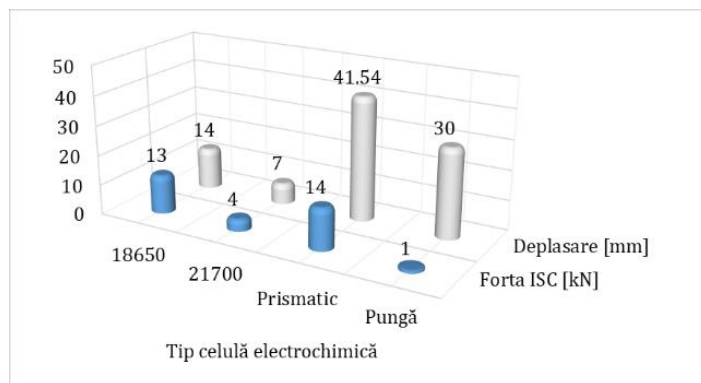


Fig. 3.100 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor prin încovoierea în trei puncte la cele 4 tipuri de celule
1 - cilindric 18650; 2 - cilindric 21700; 3 - prismatic; 4 - pungă;

3.7.2. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de încovoiere simplă într-un punct

Celula din Fig. 3.101 s-a deformat în urma solicitării de încovoiere simplă, iar sub acțiunea forței maxime s-a rupt. După secționare, celula nu s-a aprins, dar a emis un fum toxic. Acest experiment s-a realizat păstrând distanța de siguranță, iar zona a fost bine ventilată pentru evacuarea gazelor generate de celulă.



b

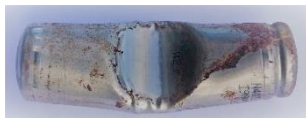


Fig. 3.101 Celula cilindrică deformată prin încovoierea simplă

În cazul celulei prismatice din Fig. 3.102, s-a efectuat încovoierea simplă pe partea laterală mică a celulei, obținându-se după deformare o lățime de 75 de mm. Pe părțile deformate ale carcasei au apărut câteva fisuri superficiale, fără să se observe vreo ruptură semnificativă. Folia protectoare a celulei s-a topit parțial deoarece la sfârșitul experimentului temperatura celulei a atins aproape 100 °C.



Fig. 3.102 Celula prismatică deformată prin încovoierea simplă

Sub acțiunea forței cilindrului hidraulic al standului experimental, s-a produs secționarea celulei de tip pungă (Fig. 3.103). La declanșarea scurtcircuitului, aceasta s-a aprins. Neavând o structură metalică în construcție, celula s-a deformat foarte ușor, toate forțele aplicate fiind mai mici în cazul acesteia decât cele ale celulelor cilindrice sau prismatice.



Fig. 3.103 Celula de tip pungă deformată prin încovoierea simplă

Prin compararea celor 3 celule la experimentul de încovoiere simplă se observă următoarele, conform Fig. 3.104:

- la celula prismatică avem forța maximă exercitată;
- valoarea maximă a forței în momentul declanșării scurtcircuitului se regăsește la celula prismatică (peste 20 kN) ;
- celula prismatică s-a deformat cel mai mult, atingând o valoare de 75 mm;

- celula de tip pungă a atins cea mai mare temperatura la declanșarea scurtcircuitului;
- temperatura maximă a avut valori identice la toate cele 3 tipuri de celule.

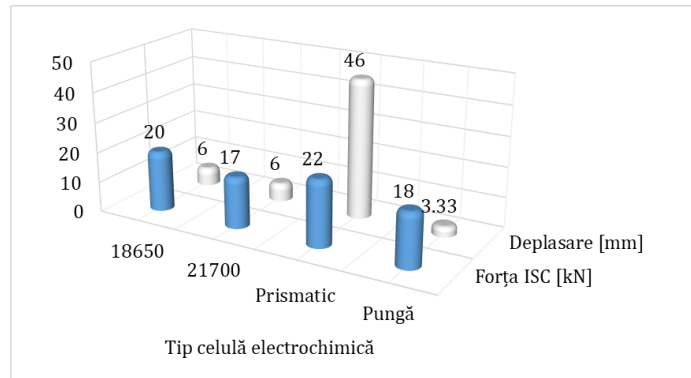


Fig. 3.104 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor de încovoiere simplă la cele 4 tipuri de celule
1 – cilindric 18650; 2 – cilindric 21700; 3 – prismatic; 4 - pungă

3.7.3. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de deformare cu vârf semirotund

Pentru experimentul cu vârful semirotund pe celula cilindrică, deformațiile se pot observa în Fig. 3.105 a și b, unde, în prima imagine, se vede forma impregnată de vârf în partea negativă a celulei. În a doua imagine se observă cum s-a desprins zona de mijloc din carcasa presată.

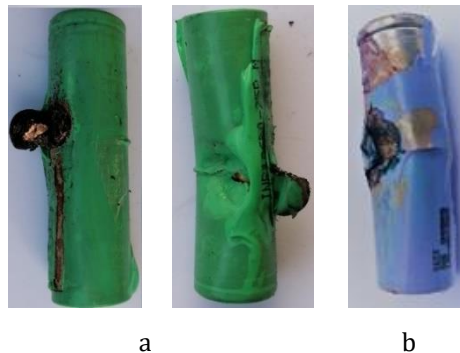


Fig. 3.105 Celula cilindrică deformată prin deformare cu vârf semirotund
a – vedere cu zona de intrare a vârfului semirotund; b – vedere cu zona deformată din celulă

Topirea foliei de protecție a celulei din Fig. 3.106 a rezultat în urma supraîncălzirii provocate de scurtcircuit. Deformarea cu vârful ascuțit s-a făcut în partea de mijloc, în urma acestui proces putându-se observa o ușoară deformare concavă dacă celula este analizată din lateral.



Fig. 3.106 Celula prismatică deformată cu vârf semirotund

În Fig. 3.107 a și b se regăsește starea celulei de tip pungă după ce a fost deformată cu vârf semirotund. În urma străpungerii, celula s-a aprins, un fum toxic a fost refulat, iar compoziția chimică s-a scurs treptat din celulă.

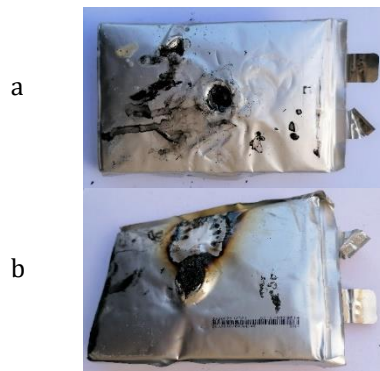


Fig. 3.107 Celula de tip pungă deformată prin străpungere cu vârf semirotund

Fig. 3.108 cuprinde o compararea a celor 3 celule în funcție de parametrii stabiliți, respectiv:

- în cazul acestui experiment, vârful semirotund a străpuns ușor celulele, forța maximă atingându-se în cazul celulei prismatice;

- forța maximă măsurată în momentul declanșării scurtcircuitului a fost la celula prismatică, de aproximativ 5 kN;
- deformarea nu a fost mare la nici o celulă, în acest caz deformarea reprezentând pătrunderea vârfului în celulă
- temperatura la scurtcircuit a fost mai mare în cazul celulei de tip pungă;
- temperatura maximă a fost atinsă la celula prismatică, cu valori de peste 100 °C, dar trebuie menționat că și în cazul celorlalte tipuri de celule, valorile s-au apropiat de 100 °C.

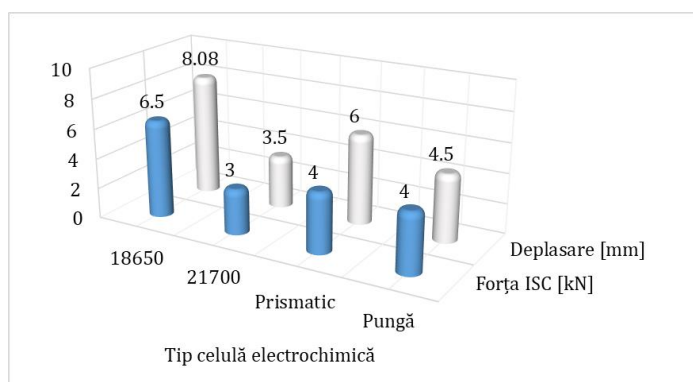


Fig. 3.108 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor de deformare cu vârf semirotond la cele 4 tipuri de celule
1 – cilindric 18650; 2 – cilindric 21700; 3 - prismatic 4 - pungă

3.7.4. Interpretarea rezultatelor în cazul experimentelor de străpungere cu vârf ascuțit

Luând în calcul geometria vârfului ascuțit, în cazul acestui experiment, suprafața de străpungere este mică, așadar și forța de străpungere are valori scăzute. În Fig. 3.109 este prezentată celula străpunsă de vârful ascuțit, valoarea forței fiind de 0.4 kN. La declanșarea scurtcircuitului, temperatura celulei s-a apropiat de 100 °C, însă protecția de pe carcasa acesteia nu s-a topit.



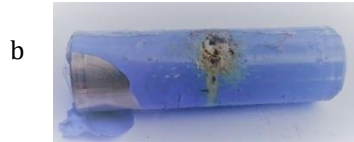


Fig. 3.109 Celula cilindrică deformată prin străpungere cu vârf ascuțit

Străpungerea celulei prismatice cu vârful ascuțit s-a făcut pe laterala mare, iar, așa cum se observă din Fig. 3.110 b, celula a dezvoltat o formă concavă. După ce carcasa celulei a fost perforată, compoziția chimică a fost emisă prin fum și lichid. Aceasta s-a încălzit, iar temperatura a atins o valoare de peste 120 °C. În urma încălzirii excesive, folia protectoare a celulei s-a topit integral fără să se aprindă.



Fig. 3.110 Celula prismatică deformată prin străpungere cu vârf ascuțit

Durata experimentului la străpungerea celulei cu vârf ascuțit a fost de 80 de secunde (Fig. 3.111). După străpungere, celula s-a umflat, iar, în urma contactului cu oxigenul, compoziția sa chimică s-a aprins. Temperatura maximă a atins 100 °C.



Fig. 3.111 Celula de tip pungă deformată prin străpungere cu vârf ascuțit

Valorile maxime rezultate în cadrul acestui experiment se regăsesc în Fig. 3.112, de unde se observă că:

- forța maximă înregistrată este foarte mică;

- forța la declanșarea scurtcircuitului are o valoare mică, respectiv de 0.1 kN;
- valorile deformărilor din timpul experimentului sunt mici; la celula prismatică, din cauza grosimii, deplasarea a fost de 6 mm;
- temperatura în faza declanșării scurtcircuitului în celule a fost de aproximativ 20 °C;
- temperatura maximă măsurată a fost de 125 °C la celula prismatică.

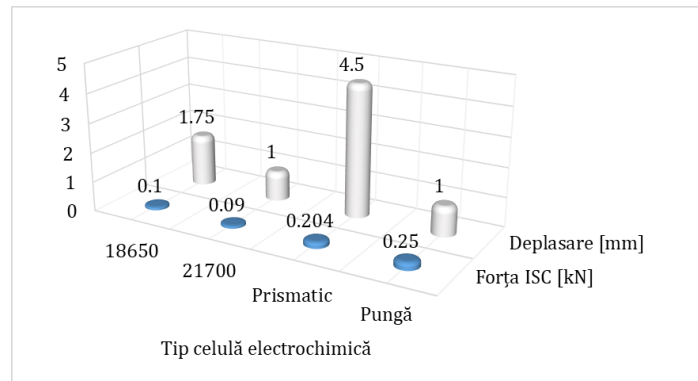


Fig. 3.112 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor de străpungere cu vârf ascuțit la cele 4 tipuri de celule 1 – cilindric 18650; 2 – cilindric 21700; 3 – prismatic; 4 - pungă

4. Modelarea și simularea numerică a solicitărilor structurale ale surselor energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice

4.1. Scopul modelării și simulării numerice a solicitărilor structurale la sursele energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice

În acest capitol se realizează modelarea și simularea surselor energetice cu care sunt echipate vehiculele electrice, surse care să corespundă cerințelor legate de corecta exploatare în condiții de maximă siguranță și fiabilitate [131].

În cazul acestor simulări de încovoiere simplă, în trei puncte, deformare cu cap hemisferic, respectiv străpungere cu vârf ascuțit, se urmărește deformația (nivelul de deteriorare a celulelor) asemănătoare unui accident sau sub acțiunea unei forțe exterioare. În cazurile de simulare, celulele nu se află sub un circuit electric închis, ele fiind în stare liberă. Pentru validarea modelelor de celule electrochimice, s-a urmărit în toate cazurile ca valorile de intrare utilizate la simulări să fie cât mai similare cu datele de intrare de la studiile experimentale, pentru a se putea crea în acest fel un model valid utilizat în simularea comportării unei baterii ce echipază un vehicul electric în caz de impact.

4.2. Metodologie

Pentru a evidenția trasabilitatea simulării în acest capitol, metodologia de cercetare generală este prezentată în Fig. 4.1, în care studiul bibliografic din prima fază reprezintă studierea a câtorva zeci de articole științifice. După însușirea cunoștințelor cu privire la simularea încercărilor pe celule, s-au prezentat câteva incidente reale în care ori sistemul de propulsie ori acumulatorii au fost afectați în urma accidentelor. De asemenea, metodologia mai include și realizarea modelului pentru simulare, simularea efectivă, extragerea rezultatelor obținute, respectiv partea de concluzii și discuții.

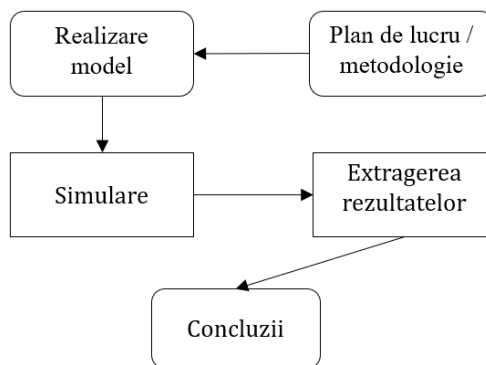


Fig. 4.1 Schemă de desfășurare a activităților de simulare

4.2.1. Modelarea celulelor

Realizarea geometriei celulelor folosite pentru simulare s-a făcut într-un software de proiectare asistată pe calculator, SolidWorks. Dimensiunile geometrice folosite pentru realizarea modelelor corespund cu dimensiunile celulelor de la încercările experimentale. Pentru o acuratețe mai mare a modelării, din fiecare model a fost demontată câte o celulă, determinarea dimensiunilor elementelor realizându-se prin măsurarea fizică cu micrometrul și șublerul. Caracteristicile de comportare mecanică a celulelor s-a considerat a fi aceea determinată prin cercetările experimentale efectuate în capitolele anterioare.

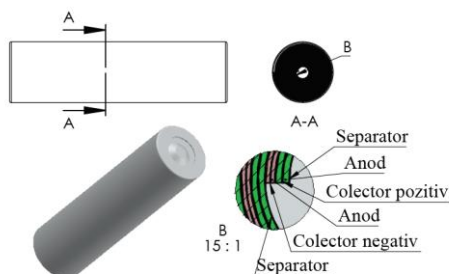


Fig. 4.2 Straturile din interiorul celulelor de tipul 18650 și 21700

Sursele de energie Li-Ion de tipul 18650 și 21700 sunt realizate constructiv pe straturi așa cum este reprezentat în Fig. 4.2. Cele două tipuri sunt asemănătoare în ceea ce privește grosimea și ordinea straturilor, diferențele fiind evidențiate în Tabelul 4.1 a și b. Valorile au fost extrase din fișele tehnice ale produselor.

Tabelul 4.1 a - Parametrii ai celulelor energetice cilindrice

Parametru	Cilindric 18650	Cilindric 21700
Model	INR18650-25R	INR21700-40T
Tip	Li-Ion	Li-Ion
Capacitate	2.5 Ah	4 Ah
Tensiunea nominală	3.6 V	3.6 V
Tensiune minimă	2.75 V	2.5 V
Tensiunea minimă la descărcare	2.5V	2.5 V
Rata de descărcare	0.2 C	0.2 C
Rata maximă de descărcare	2C 20 A	2C 35 A
Rezistența internă inițială	$\leq 18\text{m}\Omega$	$\leq 12\text{m}\Omega$
Dimensiune	Înălțime : $64.85 \pm 0.15\text{mm}$ Diametru: $18.33 \pm 0.07\text{mm}$	21.1x70.40 mm
Masa	45 g	66.8 g

Tabelul 4.1. b - Parametrii ai celulelor energetice cilindrice

Parametru	Tip pungă	Prismatic
Model	H-3210	GTK 3.2v
Tip	LiFePO ₄	LiFePO ₄
Capacitate	10 Ah	11 Ah
Tensiunea nominală	3.2 V	3.2 V
Tensiune minimă	2.3 V	2.5 V
Tensiunea minimă la descărcare	2.30 V	2.5 V
Rata de descărcare	3C	3C
Rata maximă de descărcare	5C 50A	5C 50A
Rezistența internă inițială	$\leq 3 \Omega$	$\leq 3 \Omega$
Dimensiune	11x82x138 mm	18x75x145 mm
Masa	240 g	360 g

Tabelul 4.2 Specificațiile celulelor 18650 și 21700 și a componentelor lor interne

	Material	Densitate	Modulul de elasticitate	Coefficientul Poisson	Grosimea unui singur strat
Denumire	-	(kg/m^3)	(GPa)	-	(μm)
U.M.					
Catod	LiFePO ₄	4000	100	0.35	90
Anod	Grafit	2300	110	0.23	130
Colector pozitiv	Aluminiu	2700	180	0.35	20
Colector negativ	Cupru	7980	210	0.34	10
Separator	PE	1500	20	0.3	10
Carcasă	Oțel	7850	210	0.3	560

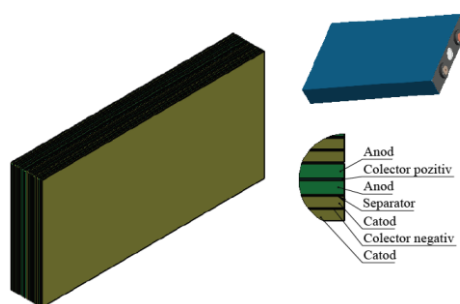


Fig. 4.3 Structura straturilor la celula prismatică și la cea de tip pungă

Tabelul 4.3 Specificațiile celulelor prismatice de tip pungă și a componentelor interne

	Material	Densitate	Modulul de elasticitate	Coefficientul Poisson	Grosimea unui singur strat
Denumire	-	(kg/m^3)	(GPa)	-	(μm)
U.M.					
Catod	LiFePO ₄	4000	100	0.35	150
Anod	Grafit	2300	110	0.23	120
Colector pozitiv	Aluminiu	2700	180	0.35	20
Colector negativ	Cupru	7980	210	0.34	10

Separator	PE	1500	20	0.3	15
Carcasă	Oțel	7850	210	0.3	700

4.2.2. Condițiile inițiale ale procesului de simulare

Utilizarea proceselor de analiză prin metoda elementului finit în zilele noastre este de nelipsit, mai ales în aria producătorilor de autovehicule. Pentru a valida cercetările experimentale ale solicitărilor structurale pe celulele Litiu-ion de la vehiculele electrice, cea mai recomandată metodă de validare este cea a efectuării unei analize cvasi-stactice care să corespundă cu procedurile experimentale. În mai multe articole științifice și cercetări au fost efectuate astfel de cercetări cvasi-stactice pe celulele din sursele de energie care echipează vehiculele electrice [132] [133] [134] [135]. Schema procesului de analiză și simulare a solicitărilor structurale asupra unei celule energetice este prezentată în Fig. 4.4. Prima etapă a procesului de simulare realizat în această cercetare este dată de realizarea modelului CAD al celulelor cilindrice 18650, 21700, prismatice și de tip pungă în softul de proiectare asistată SolidWorks, unde s-a realizat ansamblul de componente al celulei, după dimensiunile măsurate fizic în prealabil.

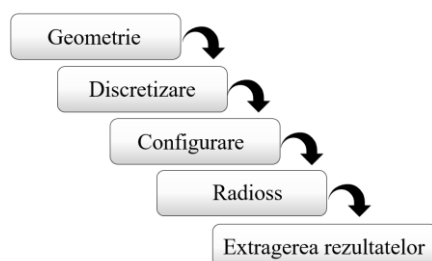


Fig. 4.4 Schema procesului de analiză și simulare a solicitărilor structurale asupra unei celule energetice [136]

A doua etapă prezintă partea de preprocesare realizată în softul Altair HyperMesh sub mediul solverului Radioss. Geometria celulei este importată în HyperMesh și este pregătită pentru a fi discretizată în elemente finite. Pentru discretizarea elementelor celulei se va aplica un criteriu de calitate optim ales, pentru fiecare component al celulei. După generarea elementelor finite, acestora li se atribuie proprietățile structurale și materialul din care sunt realizate. Ultimul pas al acestei

etape îl constituie definirea cazului de încărcare, în care se creează reazemele, forțele, contactul dintre componente și se definesc vitezele corpurilor de impact.

Procesarea prezintă cea de-a treia etapă a procesului de simulare și în acest caz este realizată în solverul Radioss. În funcție de complexitatea modelului de calcul al celulei, durata de simulare se poate extinde pe o perioadă mai mare de timp.

Ultima etapă a procesului de simulare este reprezentată de postprocesarea datelor obținute. Rezultatele obținute în urma procesului de simulare sunt interpretate prin intermediul modulelor HyperView și HyperGraph din softul HyperWorks. În modulul HyperView se poate observa vizual simularea procesului de impact, valorile deplasărilor, variația distribuției tensiunilor echivalente din structura celulei, etc. În HyperView se poate stabili bilanțul energetic dintre energia cinetică și energia internă în momentul impactului, de asemenea se pot realiza și alte grafice cu privire la procesul de simulare.

4.2.3. Realizare simulări și obținerea datelor

La configurarea modelelor în interfața dedicată s-au introdus datele și proprietățile materialelor componentelor celulelor electrochimice luate în considerare (Tabelul 4.1 și Tabelul 4.3). Forța s-a configurat pe axa de deformare a impactorului astfel încât aceasta să acționeze sau să penetreze celula simulată, iar rezultatele obținute prin modelarea și simularea celulelor de tipul 18650, 21700, prismatice și de tip pungă sunt prezentate în subcapitolele de mai jos.

4.3. Simulări efectuate la nivel de celulă

4.3.1. Simularea solicitărilor structurale pe celule tip cilindrice 18650.

4.3.1.1. Simularea încovoierii în trei puncte a celulei cilindrice

Modelul a fost creat în SolidWorks și cuprinde (Fig. 4.5) celula electrochimică, respectiv cele două role rigide și rola impactoare. După creare, modelul a fost importat în HyperMesh unde s-a configurat conform datelor de intrare utilizate în simulare.

Modelul de baterie s-a discretizat în 246,196 de elemente, iar rolele și impactorul s-au discretizat în elemente de tip shell de 4 mm. De asemenea, modulul bateriei include următoarele componente (Fig.

4.2):

- separator;
- anod;
- catod;
- colector negativ;
- colector pozitiv;
- carcasă.

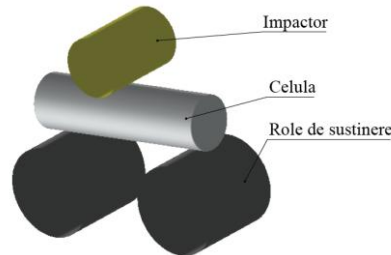


Fig. 4.5 Model pentru încovoiere în trei puncte la celula 18650

Ca interfață de contact s-a utilizat TYPE7 care asigură contactul permanent între suprafețele modelului. Proprietățile materialelor utilizate sunt centralizate în Tabelul 4.2, tipul de material atribuit componentelor fiind M2_PLAS_JOHNS_ZERIL. Acest tip de material este elastic-plastic izotrop și redă tensiunile interne în funcție de deformare, rezistența și temperatură. Componentele modelului au proprietățile predefinite și sunt de tipul P1_SHELL.

Prin distribuția tensiunilor von Mises (Fig. 4.6), valoarea maximă pe model apare în locul unde impactorul a deformat bateria. Valoarea maxima a tensiunii von Mises este $6.245E-1$ GPa.

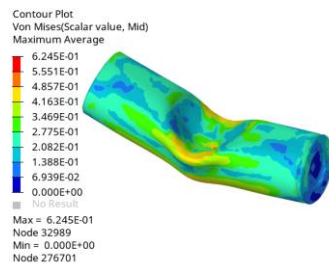


Fig. 4.6 Tensiunea Von Mises la încovoierea în trei puncte la celula 18650

Ținând cont de rezultatele obținute prin simulare (Fig. 4.7), curba forță-deplasare este validă, compararea în detaliu făcându-se în Capitolul 5.

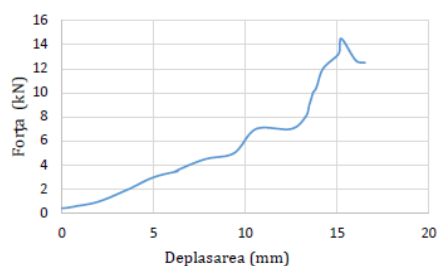


Fig. 4.7 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea în trei puncte a celulei 18650

4.3.1.2. Simularea încovoierii simple pe celula cilindrică cu ajutorul dispozitivului T

Analiza prin metoda elementului finit reprezintă o metoda actuală și modernă prin care s-a validat și încovoierea simplă (Fig. 4.8) la celula 18650. Celula electrochimică cu suport rigid și impactor s-a modelat în SW după care s-a importat în HyperMesh pentru etapele de preprocesare, iar ulterior în HyperView pentru postprocesare. Pentru analiză s-a folosit solverul Radioss.

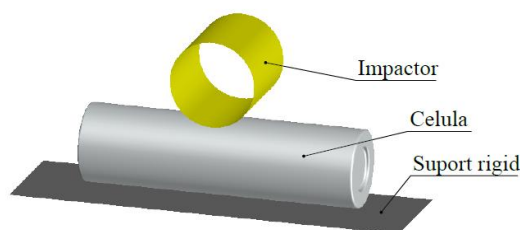


Fig. 4.8 Model CAD pentru simularea încovoierii simple la celula 18650

Discretizarea modelului s-a realizat în mai multe etape. În prima fază s-a discretizat celula care cuprinde anodul, catodul și separatorul, după care, în a doua parte, au fost discretizate suportul rigid și impactorul cu elemente de 6 mm. După rularea modelului în solverul Radioss, rezultatele analizei s-au importat în software-ul de vizualizare HyperView. Interfața permite vizualizarea deformațiilor apărute în urma analizei, precum și a altor rezultate, cum ar fi, în acest caz, forța și deformarea (Fig. 4.10).

Fig. 4.9 prezintă tensiunile von Mises, iar valoarea maximă de $7.229E-1$ GPa se află în zona unde impactorul a deformat celula

electrochimică, respectiv pe partea inferioară de contact a suprafeței plane rigide.

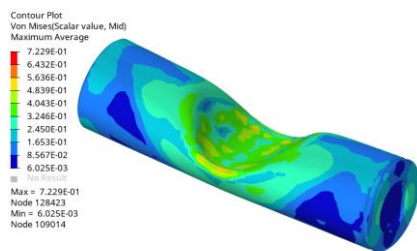


Fig. 4.9 Tensiunea Von Mises la încovoierea simplă a celulei 18650

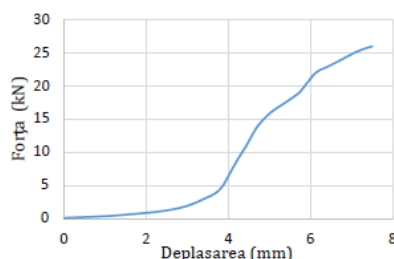


Fig. 4.10 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea simplă a celulei 18650

4.3.1.3. Simularea deformării celulei cilindrice cu vârf semirotund cu raza de 6 mm

Simularea deformării cu cap semirotund cu $R=6$ mm s-a realizat după ce modelul CAD a fost construit, fiind apoi importat în software-ul de simulare. Pentru acest caz, modelul pentru simulare include 3 componente: impactorul (vârful semirotund), celula electrochimică și suportul rigid (Fig. 4.11).

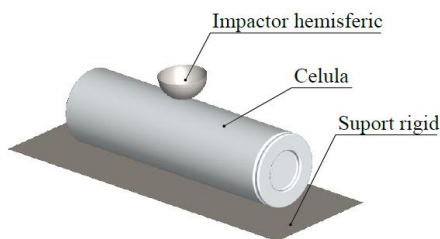


Fig. 4.11 Model CAD pentru simularea deformării cu vârf semirotund a celulei 18650

După configurarea modelului și introducerea datelor de intrare, s-a utilizat solverul Radioss pentru analiză. Rezultatele obținute s-au vizualizat în HyperView și sunt prezentate în Fig. 4.12 și Fig. 4.13.

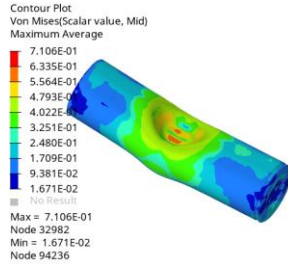


Fig. 4.12 Tensiunea Von Mises la deformarea cu vârf semirotund a celulei 18650

Forța maximă de deformare a fost de 6.3 kN la o deformare de 14 mm (Fig. 4.13), impactorul semirotund deformând celula electrochimică. La o deformare atât de accentuată, componentele interioare ale celulei s-au deteriorat.

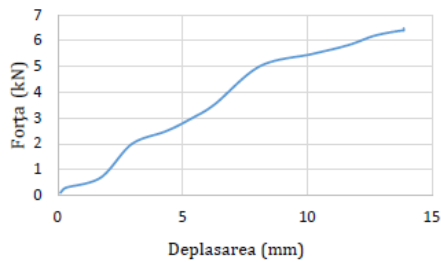


Fig. 4.13 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea cu vârf semirotund a celulei 18650

4.3.1.4. Simularea străpungerii celulei cilindrice cu vârf ascuțit

Simularea străpungerii cu vârf ascuțit a celulei s-a realizat cu ajutorul software-ului de analiză, folosind metoda elementului finit în vederea determinării forței în raport cu deformarea celulei electrochimice. Modelul are următoarele părți componente (Fig. 4.14):

- impactorul cu vârf ascuțit;
- celula electrochimică;
- suportul rigid.

Prin analiza modelului configurat, au fost vizualizate rezultatele cu scopul de a extrage informațiile dorite în acest caz.

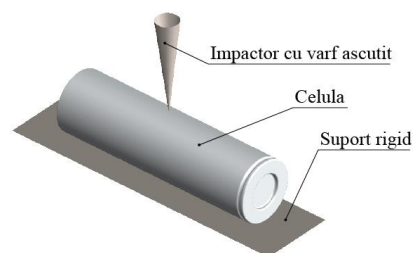


Fig. 4.14 Model CAD al simulării celulei 18650 la străpungerea cu vârf ascuțit

Comportamentul celulei se bazează pe criteriul von Mises (Fig. 4.15), cu valoarea maximă de $6.33E-1$ GPa în punctul de pătrundere al vârfului în celula electrochimică.

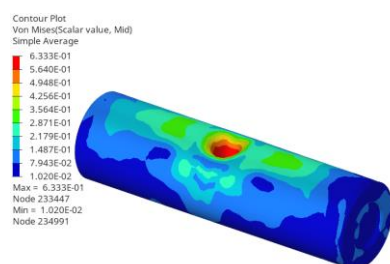


Fig. 4.15 Tensiunea Von Mises la străpungerea celulei 18650 cu vârf ascuțit

Așa cum se observă și din curba forță-deplasare din Fig. 4.16, încărcarea este liniară, iar deformarea maximă ajunge până la 10 mm, cu forța maximă de 0.8 kN. Încărcările s-au determinat pentru fiecare caz de simulare în parte, în cazul străpungerii cu vârf ascuțit forța de deformare fiind mai mică deoarece vârful ascuțit penetrează mai ușor straturile componente ale celulei electrochimice.

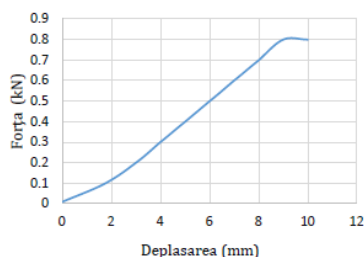


Fig. 4.16 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei 18650 cu vârf ascuțit

4.3.2. Simularea solicitărilor efectuate pe celule cilindrice tip 21700

4.3.2.1. Încovoierea în trei puncte a celulei cilindrice de tipul 21700

Asemănător cazului de simulare a încovoierii în trei puncte a celulei cilindrice de tipul 18650 este și cel al simulării celulei 21700. Diferența constă în faptul că celula electrochimică are alte dimensiuni geometrice.

Modelul CAD (Fig. 4.17) a fost conceput în SolidWorks. Configurarea și discretizarea modelului s-au realizat în modulul HyperMesh, iar procesarea în solverul Radioss.

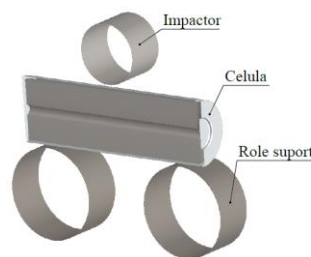


Fig. 4.17 Model CAD pentru simularea încovoierii în trei puncte a celulei 21700

Postprocesarea datelor obținute s-a făcut în HyperView, de unde s-au extras și vizualizat rezultatele dorite. Valoarea maximă din distribuția tensiunilor von Mises (Fig. 4.18) este $6,652E-1$ GPa, valoare ce apare în locul unde impactorul în T a deformat maxim celula electrochimică. Deformația maximă din curba forță-deplasare (Fig. 4.19) este de 9 mm.

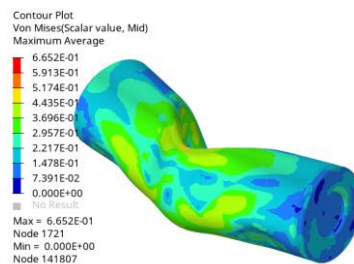


Fig. 4.18 Tensiunea Von Mises în celula 21700 la încovoierea în trei puncte

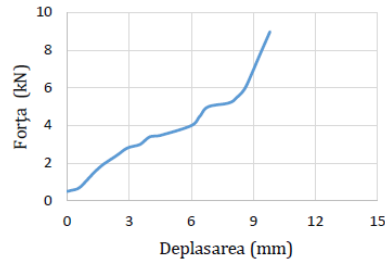


Fig. 4.19 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea în trei puncte a celulei 21700

4.3.2.2. Încovoierea laterală pe celula cilindrică de tipul 21700

Pentru o mai bună înțelegere a modelului 3D, componentele sale se regăsesc în Fig. 4.20, care cuprinde impactorul cilindric, celula electrochimică și suportul rigid. Modelul este discretizat în 285,450 de elemente finite, unde impactorul și suportul rigid dispun de elemente de tip shell cu dimensiunea de 4 mm. După configurarea și procesarea modelului în solverul Radioss, postprocesarea s-a realizat în HyperView, deoarece acest software de afișare permite vizualizarea și extragerea rezultatelor.

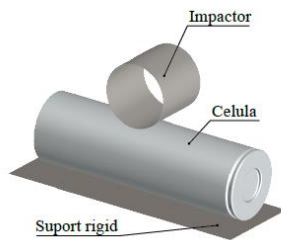


Fig. 4.20 Model CAD pentru simularea încovoierii simple a celulei 21700

Tensiunile von Mises (Fig. 4.21) arată valoarea maximă de 5.847E-1 GPa, în locul unde a avut loc impactul, iar deformarea maximă se poate observa în Fig. 4.22, aceasta fiind de aproximativ de 7 mm la o forță de 24 kN.

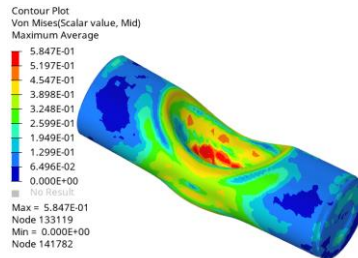


Fig. 4.21 Tensiunea Von Mises în celula 21700 la încovoierea simplă

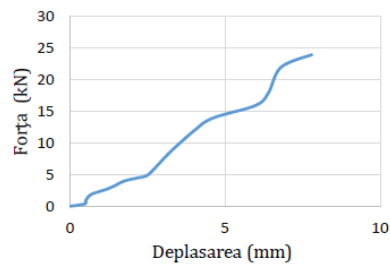


Fig. 4.22 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea simplă a celulei 21700

4.3.2.3. Deformare cu vârf semirotund pe celula cilindrică de tipul 21700

În comparație cu prima simulare pe celula electrochimică de tipul 21700, în cazul deformării cu vârf semirotund diferă doar impactorul, care este semirotund, cu o rază de 6 mm, celula și suportul rigid fiind identice (Fig. 4.23).

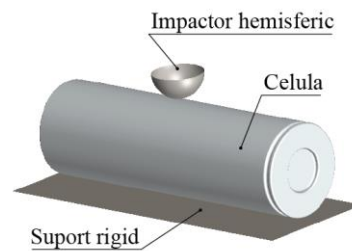


Fig. 4.23 Model CAD pentru simularea deformării cu vârf semirotund a celulei 21700

După conceperea modelului, acesta s-a importat în interfața de simulare, unde i s-au atribuit proprietățile și i s-au discretizat

componentele. Modelul discretizat rezultat conține 283,450 de elemente de tip shell.

Așadar, prin analiza elasto-plastică s-a urmărit comportamentul modelului la neliniarități fizice, dar și modificarea geometriei structurii, deplasării, cât și a eforturilor apărute.

După ce s-a configurat modelul, acesta a fost exportat în solver, iar după analiză, a avut loc extragerea rezultatelor.

Conform Fig. 4.24 , tensiunea von Mises atinge valoare maximă de 6.728E-1 GPa în punctul în care vârful semirotund acționează și deformează celula electrochimică.

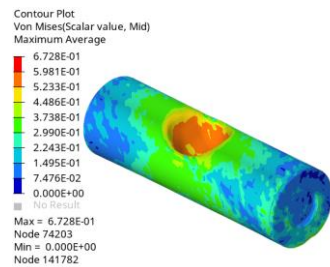


Fig. 4.24 Tensiunea Von Mises la celula 21700 în cazul deformării cu vârf semirotund

Curba de răspuns forță-deplasare rezultată în urma simulărilor de deformare a celulei 21700 cu vârf semirotund este prezentată în Fig. 4.25. Valoarea maximă a forței simulate este de aproximativ 9 kN la o deplasare de 5 mm, după care forța începe să scadă.

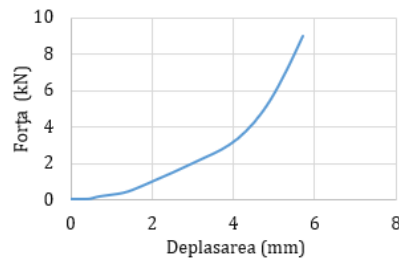


Fig. 4.25 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund

4.3.2.4. Străpungerea celulei cilindrice de tipul 21700 cu vârf ascuțit

Modelul din acest caz este prezentat în Fig. 4.26 și este format din

următoarele elemente componente:

- impactorul cu vârf ascuțit;
- celula electrochimică 21700;
- suportul rigid.

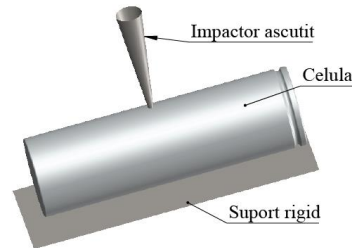


Fig. 4.26 Model CAD utilizat la străpungerea celulei 21700 cu vârf ascuțit

În urma extragerii rezultatelor, se poate menționa valoarea tensiunilor von Mises (Fig. 4.27), care atinge un maxim de 1.025 GPa în locul deformării celulei.

Curba forță-deplasare (Fig. 4.28) redă în totalitate forța liniar crescătoare, precum și deplasarea, care este de 7 mm la o forță maximă de 0,2 kN.

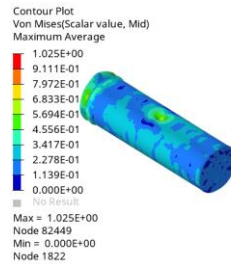


Fig. 4.27 Tensiunea Von Mises în celula 21700 la străpungerea cu vârf ascuțit

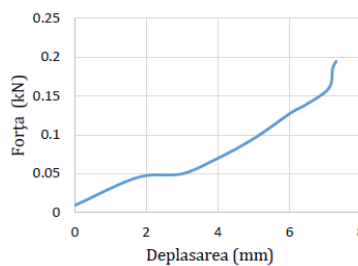


Fig. 4.28 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei 21700 cu vârf ascuțit

4.3.3. Simularea solicitărilor efectuate pe celule de tip prismatic

4.3.3.1. Încovoierea în trei puncte a celulei prismatice

La proiectarea 3D a modelului pentru simularea încovoierii în trei puncte a celulei prismatice s-a avut în vedere ca modelul să aibă aceleași dimensiuni geometrice ca și modelul fizic. Celula electrochimică prismatică are straturile de anod, catod și separator suprapuse, așadar, după ce modelul a fost importat în interfața de configurare, pentru fiecare componentă în parte s-au atribuit proprietățile și materialele specifice. Modelul din Fig. 4.29 utilizat la simularea încovoierii în trei puncte a celulei prismatice are următoarele componente:

- impactor cilindric de $\varnothing 25$ mm;
- celulă electrochimică prismatică;
- role de susținere.

Celula electrochimică are o formă geometrică prismatică, ceea ce constituie un avantaj în discretizarea elementelor. De asemenea, timpul de simulare este și el redus deoarece modelul discretizat are un număr de 10008 de elemente finite.

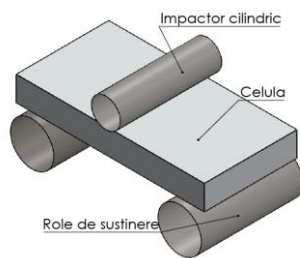


Fig. 4.29 Model CAD utilizat la simularea încovoierii în trei puncte a celulei prismatice

Modelul rezultat în urma configurării a fost rulat în solverul Radioss, iar rezultatele obținute au fost vizualizate și extrase din HyperView și HyperGraph. Valoarea maximă a tensiunii von Mises (Fig. 4.30) este de $7.332E-1$ GPa în zona unde impactorul a deformat celula electrochimică. Curba forță-deplasare este liniar crescătoare în cazul încovoierii în trei puncte a celulei prismatice, așa cum arată și Fig. 4.31. Valoarea maximă a forței este de 15 kN la o deformare de peste 40 mm.

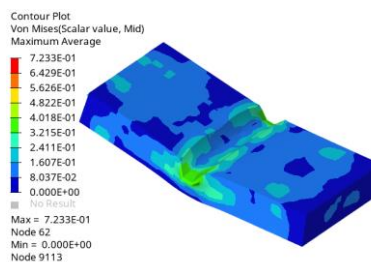


Fig. 4.30 Tensiunea Von Mises la încovoierea în trei puncte a celulei prismatice

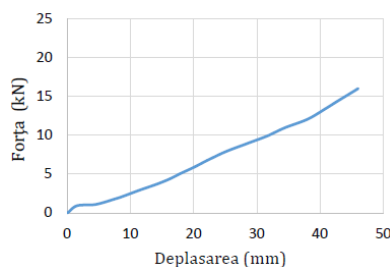


Fig. 4.31 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea în trei puncte a celulei prismatice

4.3.3.2. Încovoierea laterală pe celula prismatică

Pentru simularea încovoierei laterale a celulei electrochimice prismatice s-a creat modelul CAD în programul de modelare geometrică SolidWorks. Fig. 4.32 cuprinde componentele modelate 3D, impactorul cilindric de $\varnothing 25$ mm, celula electrochimică prismatică și suportul rigid. Bateria s-a așezat cu laterala mică pe suportul rigid deoarece, în acest caz, deplasarea care poate fi măsurată este mai mare decât în cazul în care celula electrochimică este așezată pe suport cu laterala mare.

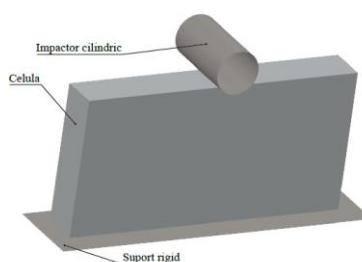


Fig. 4.32 Model CAD pentru simularea încovoierei simple pe celula prismatică

În mediul HyperMesh s-a configurat modelul pentru analiza elementului finit. După definirea materialelor și proprietăților pentru fiecare componentă în parte, s-a exportat modelul în solverul Radioss.

Vizualizarea rezultatelor a fost posibilă după rularea în soft-ul de analiză, care a fost de aproximativ o oră. Tensiunea von Mises apare în Fig. 4.33. Valoarea maximă de 3.514E-1 GPa apare în locul unde impactorul a deformat bateria prismatică, dar și pe laterale, unde apar tensiuni de încovoierie sau de alungire. Deplasarea în cazul încovoierii simple (Fig. 4.34) a celulei prismatice este de 40 de mm la o forță de 10 kN.

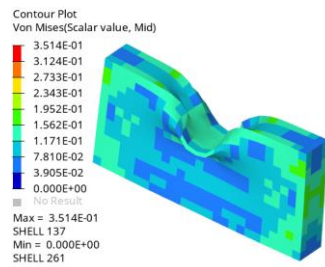


Fig. 4.33 Tensiunea Von Mises la încovoierea simplă a celulei prismatice

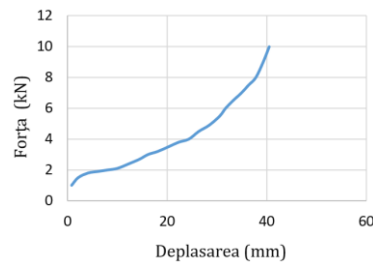


Fig. 4.34 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea simplă a celulei prismatice

4.3.3.3. Deformare cu vârf semirotund pe celula prismatică

Modelul pentru simularea deformării bateriei prismatice cu vârf semirotund este reprezentat în Fig. 4.35, care cuprinde următoarele părți componente:

- impactorul cu vârf semirotund;
- bateria prismatică;
- suportul rigid.

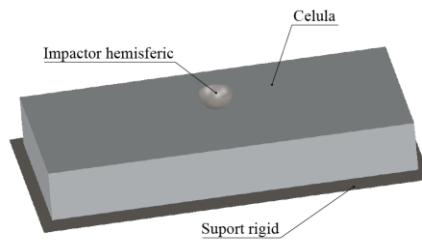


Fig. 4.35 Model CAD utilizat la simularea deformării celulei prismatice cu vârf semirotund

Construirea ansamblului s-a realizat într-un program de modelare geometrică tridimensională (3D) destinat automatizării proiectării mecanice. După importarea modelului în interfața de configurare HyperMesh, s-au atribuit materialele și proprietățile specifice fiecărui component în parte, iar mai departe s-a exportat modelul către solverul Radioss. Rezultatele analizei s-au vizualizat în HyperView și HyperMesh. Tensiunea von Mises (Fig. 4.36) are valoare maximă de $1.744E-1$ GPa în punctul în care impactorul lovește celula electrochimică, iar forța maximă atinsă este de 6 kN la o deformare de aproximativ 13 mm (Fig. 4.37).

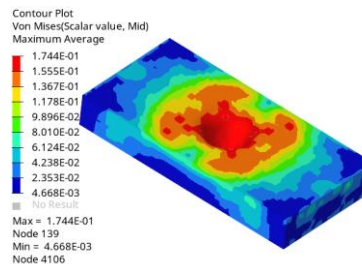


Fig. 4.36 Tensiunea Von Mises la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund

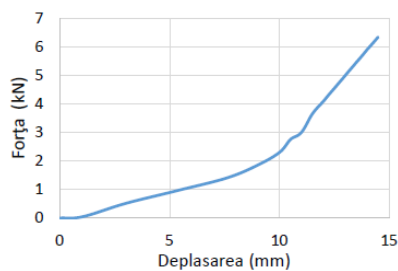


Fig. 4.37 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund

4.3.3.4. Străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit

La această simulare, datorită geometriei impactorului, forța de deformare maximă este de 0.5 kN, iar părțile componente ale modelului sunt prezentate în Fig. 4.38, care cuprinde următoarele:

- impactorul cu vârf ascuțit;
- celula electrochimică;
- suportul rigid.

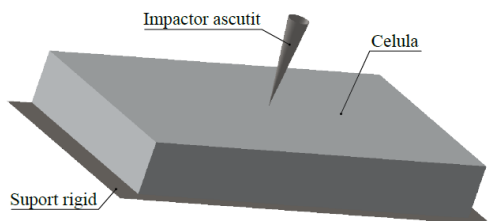


Fig. 4.38 Model CAD utilizat pentru simularea străpungerii celulei prismatice

Discretizarea componentelor s-a realizat în mediul HyperMesh, modelul având un număr de 7,580 de elemente. După configurarea în această interfață, modelul a fost exportat către solverul Radioss. Rularea în solver a fost urmată de vizualizarea și interpretarea rezultatelor în HyperView. Prima caracteristică specifică a acestui model este tensiunea von Mises (Fig. 4.39), care are o valoare maximă de 1.642E-1 GPa în locul în care impactorul cu vârf ascuțit a deformat celula electrochimică prismatică. Curba forță-deplasare are un trend ascendent (Fig. 4.40) la străpungerea bateriei prismatice, forța atingând valoarea maximă de 0.5kN la o deplasare de aproximativ 13 mm.

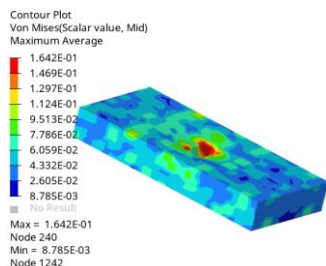


Fig. 4.39 Tensiunea Von Mises la străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit

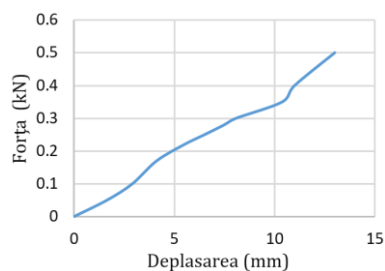


Fig. 4.40 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit

4.3.4. Încercări efectuate pe celulele de tip pungă

4.3.4.1. Încovoiere în trei puncte a celulei de tip pungă

Componentele modelului 3D realizat și utilizat pentru simularea încovoierii în trei puncte a bateriei de tip pungă sunt prezentate în Fig. 4.41. Modelul se compune dintr-un impactor cilindric în formă de T cu diametrul de \varnothing 25mm, bateria de tip pungă și rolele de susținere cu un grad de libertate ridicat în ceea ce privește rotația în jurul axei lor.

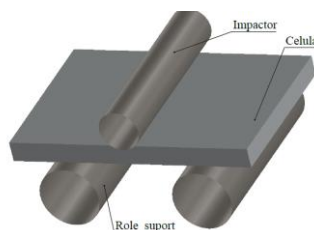


Fig. 4.41 Model CAD utilizat pentru simularea încovoierii în trei puncte a celulei de tip pungă

Discretizarea modelului s-a făcut în interfața HyperMesh, unde s-a realizat și configurarea modelului, respectiv definirea materialelor pentru fiecare componentă în parte. De asemenea, tot în acest mediu s-au aplicat și încărcările, vitezele și sensul impactorului. Modelul are un număr de 48,062 de elemente de tip shell, iar următorul pas din cadrul simulării a constat în transferul modelului către solverul Radioss. Rezultatele obținute au fost analizate și interpretate în interfața de vizualizare. Distribuția tensiunilor von Mises (Fig. 4.42) apare pe lateralele mici ale bateriei, acestea având o valoare maximă de 2.058E-1 GPa, iar rezultatul obținut în urma simulării este prezentat în Fig. 4.43, unde forța maximă atinge valoarea de 2 kN la o deplasare de 30 de mm.

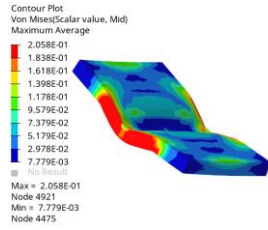


Fig. 4.42 Tensiunea Von Mises la încovoierea în trei puncte a celulei de tip pungă

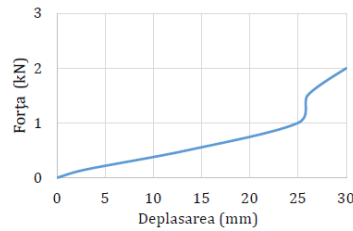


Fig. 4.43 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea în trei puncte a celulei de tip pungă

4.3.4.2. Încovoierea simplă pe celula de tip pungă

Simularea la încovoiere simplă apare ca rezultat al acțiunii forței exterioare care produce un efort secțional de tip moment încovoiător, celula electrochimică modificându-și forma geometrică. Fig. 4.44 arată părțile componente ale modelului utilizat în simulare, acesta cuprinzând impactorul cilindric, celula electrochimică de tip pungă, respectiv suportul rigid.

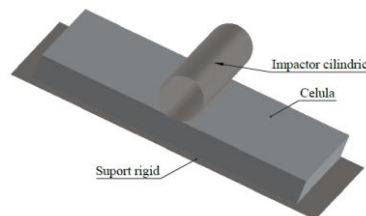


Fig. 4.44 Model CAD utilizat la simularea încovoierii simple pe celula de tip pungă

Modelarea componentelor s-a realizat în SolidWorks, iar preprocesarea, în HyperMesh. Procesarea s-a făcut cu ajutorul solverului Radioss, iar postprocesarea, în mediul HyperView și HyperGraph. Tensiunile von Mises (Fig. 4.45) apar în valori maxime de $1.899E-1$ GPa în zona unde a acționat impactorul cilindric. Forța maximă (Fig. 4.46) de 20kN apare la o deformare de 4 mm.

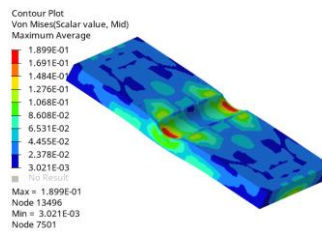


Fig. 4.45 Tensiunea Von Mises la încovoierea simplă a celulei de tip pungă

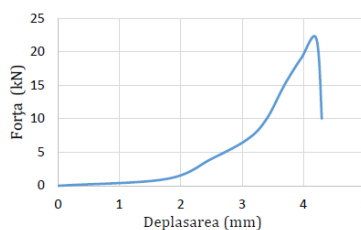


Fig. 4.46 Curba forță-deplasare rezultată în urma încovoierii simple a celulei de tip pungă

4.3.4.3. Încercări efectuate cu vârf semirotund pe celula de tip pungă

Asemănător cazului de simulare a deformării cu vârf semirotund a celulei prismatice este și cazul deformării cu vârf semirotund a bateriei de tip pungă. Diferența constă în faptul că dimensiunile geometrice diferă, iar celula electrochimică tip pungă nu are o carcasă de metal.

Modelul CAD prezentat în Fig. 4.47 este construit în SolidWorks și are în componență impactorul cu vârf semirotund, bateria de tip pungă și suprafața rigidă.

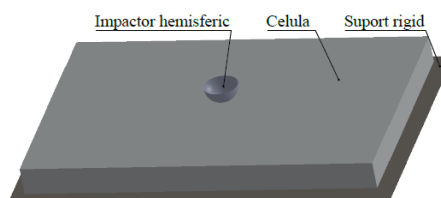


Fig. 4.47 Model CAD utilizat la simularea deformării cu vârf semirotund a celulei de tip pungă

Ca și în cazurile anterioare, preprocesarea modelului s-a realizat în mediul de configurare HyperMesh, după care modelul s-a trimis către solverul Radioss. După efectuarea analizei, vizualizarea rezultatelor s-a

făcut în HyperView, unde tensiunea von Mises (Fig. 4.48) are valori maxime de $1.750E-1$ GPa în locul în care vârful semirotund a deformat celula. Graficul din Fig. 4.49 arată o deplasare maximă de 5 mm la o valoarea a forței de penetrare de 6 kN.

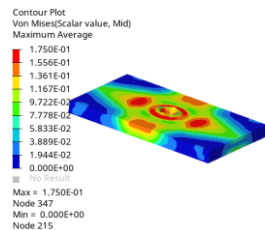


Fig. 4.48 Tensiunea Von Mises la celula de tip pungă în urma deformării cu vârf semirotund

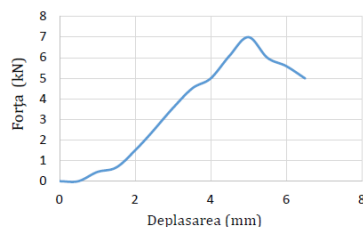


Fig. 4.49 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea celulei de tip pungă cu vârf semirotund

4.3.4.4. Străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit

Reperetele componente ale modelului 3D creat pentru simularea străpungerii cu vârf ascuțit a bateriei de tip pungă se regăsesc în Fig. 4.50, care cuprinde impactorul cu vârf ascuțit, celula electrochimică de tip pungă și suprafața rigidă. Modelul a fost discretizat într-un număr de 76,512 de elemente de tip shell și procesat ulterior în solverul Radioss, după care rezultatele sunt vizualizate în HyperView. În cadrul postprocesării, s-au extras rezultatele corespunzătoare distribuției tensiunii von Mises (Fig. 4.51), care are valoarea maximă de $7.702E-1$ GPa. Graficul curbei rezultate în urma simulării la străpungerea bateriei de tip pungă cu vârf ascuțit se regăsește în Fig. 4.52.

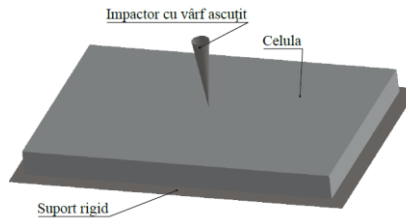


Fig. 4.50 Model CAD utilizat la simularea străpungerii celulei de tip pungă cu vârf ascuțit

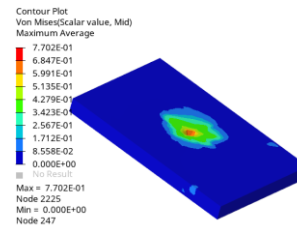


Fig. 4.51 Tensiunea Von Mises la străpungerea celulei cu vârf ascuțit

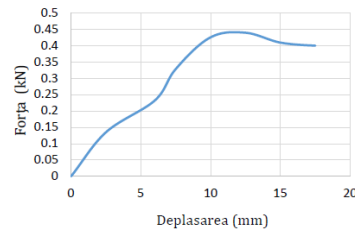


Fig. 4.52 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit

4.1. Concluzii

Concluziile privind modelarea și simularea solicitărilor structurale asupra bateriilor utilizate la autovehiculele electrice vor fi prezentate în cele ce urmează.

Pe baza activităților de cercetare desfășurate se poate considera că se pot utiliza mai multe tipuri de materiale cu proprietăți și legi diferite, în acest caz, tipul de material M2_PLAS_JOHNS_ZERIL LAW 2 fiind unul izotrop elasto-plastic. Așadar, răspunsul la modelare și simulare este precis în ceea ce privește tensiunile și deformările mecanice.

Analiza cu elemente finite oferă posibilitatea de a optimiza parametrii de proiectare și simularea solicitărilor mecanice asupra bateriilor fără a fi nevoie de realizarea încercărilor experimentale.

Nivelul de detaliere în simulare depinde de utilizator, mediul de analiză numerică prin MEF oferind posibilitatea folosirii materialelor omogene. În cazul în care se dorește un model identic cu cel fizic, materialele se pot defini până în cele mai mici detalii.

De asemenea, se poate realiza asocierea cu rezultatele de la partea experimentală, fiind posibilă prezicerea momentului în care are loc inițierea scurtcircuitului intern, iar pe baza informațiilor obținute în urma simulărilor și, luând în calcul și partea experimentală, proiectarea carcasei exterioare se poate optimiza.

5. Analiza rezultatelor obținute din cercetările experimentale și simularea surselor energetice

În acest capitol s-a realizat analiza comparativă a rezultatelor obținute prin încercările experimentale și cele obținute prin simularea numerică a tipurilor de celule electrochimice luate în considerare în prezenta teză de doctorat. Prin urmare, această analiză/interpretare are rolul de a evidenția principalele diferențe dintre rezultatele obținute experimental și cele determinate prin simulare pentru a valida pe mai departe rezultatele legate de optimizarea prin metode de analiză numerică (simulare) a carcasi bateriei de acumulatori din componența unui vehicul electric. Parametrii utilizați la compararea rezultatelor sunt forța și deplasarea, deoarece acești parametri au fost considerați de importanța majoră în realizarea acestor cercetări și studii, interpretarea lor fiind realizată după o analiză amănunțită a rezultatelor obținute (și prezentate anterior sub forma graficelor de variație).

5.1. Rezultate obținute pentru celula cilindrică 18650

5.1.1. Încovoierea în trei puncte

În graficul prezentat în Fig. 5.1 s-au suprapus rezultatele obținute la încercările experimentale și cele date de simularea la încovoierea în trei puncte a celulei 18650.

Analizând rezultatele se observă faptul că creșterea este aproape liniară, curba de experiment urmărește curba rezultată în urma simulării și nu apar diferențe mai mari de 5%.

Așa cum se observă și pe grafic, la forța maximă și la deplasarea de 16 mm, apare o diferență de 36% între cele două curbe. Modelul construit pentru simulare s-a validat până în punctul în care avem o deplasare de 15 mm la o forță de deformare de 14 kN, respectiv o diferență de 1%.

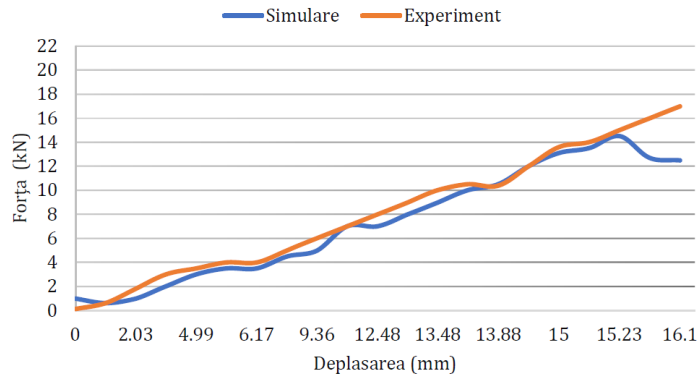


Fig. 5.1 Comparație rezultate obținute la încovoierea în trei puncte a bateriei 18650

5.1.2. Încovoiere simplă

Diferențele în cazul variației încovoierii simple la bateria 18650 (Fig. 5.2) sunt de aproximativ 1%, astfel avem o suprapunere aproape în totalitate a celor două curbe pentru cea mai mare parte a variației, dar se observă că la finalul experimentelor apare totuși o diferență majoră de 13%, modelul utilizat fiind validat atât timp cât deplasarea este mai mică de 7,08 mm.

Pentru a se putea continua cercetările și la deformații mai mari de 7,08 mm, modelul de simulare trebuie reconstruit.

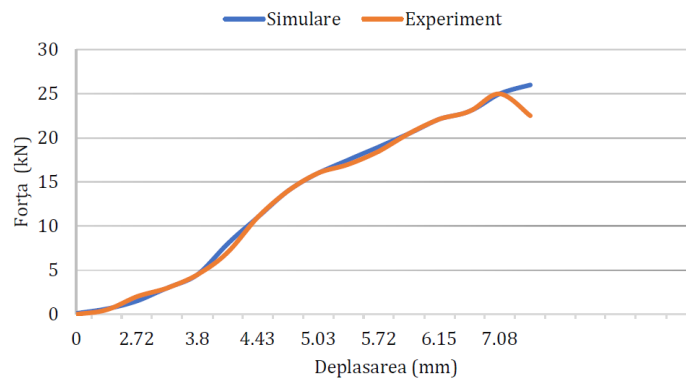


Fig. 5.2 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei 18650

5.1.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund

Analog cazului de încovoiere simplă, s-au extras și s-au suprapus rezultatele obținute la cele două studii asupra celulei 18650 la deformarea cu vârf semirotund. Pe cele două curbe din grafic (Fig. 5.3)

se observă o diferență de 20 % în punctul în care deplasarea este de 4 mm. Această diferențiere a celor două curbe se poate explica prin discrepanțe între condițiile de intrare la modelul de simulare. Totuși, diferența pe valorile medii se păstrează sub 5%.

Prin analiza variației graficelor se poate observa faptul că, din punctul în care deformarea atinge 12 mm, apare o diferență de 7% între rezultatele celor două studii.

S-a considerat că, în cazul acestui studiu, modelul este validat până în punctul în care avem o deplasare de 13 mm la o forță de deformare de 6kN, și de asemenea, s-a considerat că erorile care apar în modelele de simulare se păstrează în toate cazurile studiate.

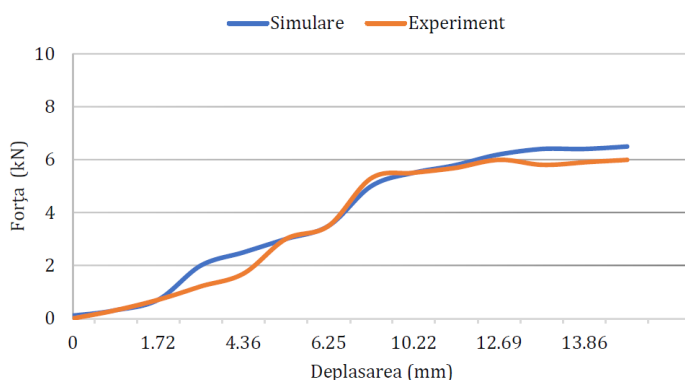


Fig. 5.3 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârful semirotond a bateriei 18650

5.1.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit

Rezultatele obținute în cazul străpungerii celulei 18650 cu vârf ascuțit sunt prezentate în Fig. 5.4. În urma studierii curbelor se poate menționa faptul că avem o diferențiere de sub 5 % până în punctul în care deplasarea atinge 7,5 mm. Diferențierea este evidențiată la deplasările mai mari de 7,5 mm, așadar, validarea rezultatelor simulării pentru străpungerea cu vârf ascuțit se susține până în punctul în care deplasarea este de 7,5 mm. După cum reiese din grafic, trendul descrescător al curbelor și diferențierea de 30% se datorează parametrilor de intrare ai modelului simulat, care necesită o studiere mai aprofundată.

Pe baza acestor informații se poate concluziona faptul că modelul este validat până într-un anumit punct; pentru simularea deplasărilor mai mari, un model mult mai complex, cuplat electrochimic-termic-mecanic trebuie dezvoltat și aplicat în analiza numerică.

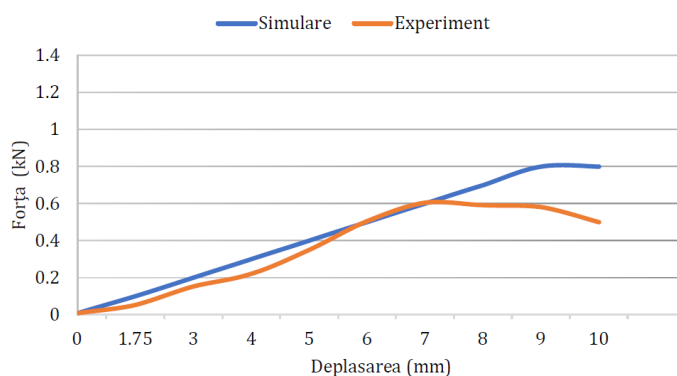


Fig. 5.4 Comparație rezultate obținute la deformarea bateriei 18650 cu vârful ascuțit

5.2. Rezultate obținute pentru celula cilindrică 21700

5.2.1. Încovoiere în trei puncte

Rezultatele obținute în urma simulării și a studiului experimental pentru încovoierea în trei puncte a celulei electrochimice de tipul 21700 sunt prezentate în Fig. 5.5, iar diferențele care apar între rezultate obținute experimental și cele obținute prin simulare, pot fi justificate astfel:

- începând din punctul 0, unde deplasarea este 0, și până în punctul unde deplasarea este de 4 mm, modelul este valid, diferențierea curbelor fiind de sub 5%;
- la o deplasare de 6 mm eroarea apărută este de 30%, de unde rezultă faptul că modelul nu mai este valid la deplasări mari;
- chiar dacă la o deplasare de 9 mm eroarea este de 4%, spre sfârșitul curbei, aceasta crește la 27%, așadar modelul rămâne valid doar până la deplasări de 4mm;
- pentru a avea o suprapunere de rezultate și la deformații mari, se recomandă dezvoltarea modelului cuplat electrochimic-termic-mecanic, care urmărește mai detaliat comportarea modelului fizic al bateriei.

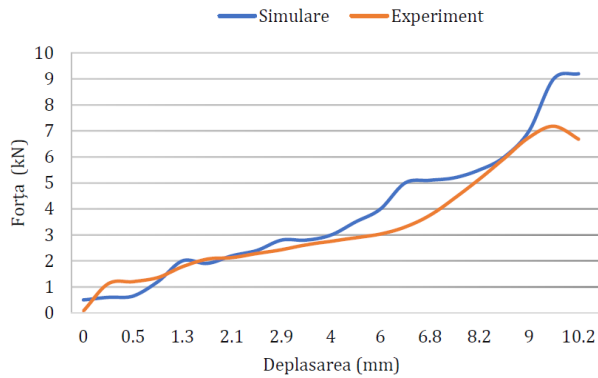


Fig. 5.5 Comparație rezultate obținute la încovoierea bateriei 21700 în trei puncte

5.2.2. Încovoiere simplă

Scopul principal al modelării celulelor electrochimice este acela de a simula și valida testele experimentale în ceea ce privește solicitările structurale mecanice ale acestora. În cazul încovoierii simple, rezultatele obținute experimental și cele obținute prin simulare s-au extras în Fig. 5.6. Analizând graficul din figură, se observă un comportament asemănător cazurilor deja prezentate, și se poate afirma că în acest caz al încovoierii simple, se observă o porțiune din curbă care se suprapune în mai multe puncte, până la o deformare de 3,5 mm la o forță de 7 kN eroarea nefiind mai mare de 5%. La deplasări mai mari, eroarea crește până la 25% și astfel de poate afirma că în cazul încovoierii simple a celulei electrochimice cilindrice, modelul este validat până în punctul în care deplasarea este de 3,5 mm.

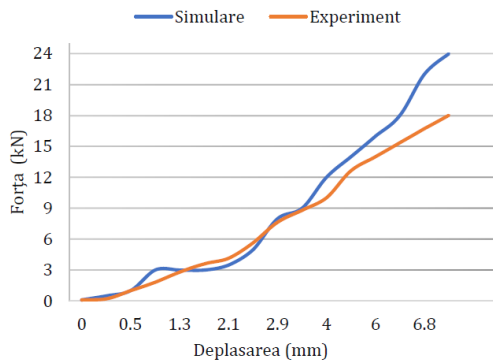


Fig. 5.6 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei 21700

5.2.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund

În cazul comparației rezultatelor obținute experimental și a celor obținute prin simulare, diferențierea celor două curbe la deformarea celulei electrochimice 21700 cu vârf semirotund se poate observa în Fig. 5.7. și conform variației comparative prezentate în grafic, modelul experimental este validat până în punctul în care deplasarea este de 5,5 mm.

Apare o necorelare pentru valoarea deplasării de 2,9 mm, diferențierea dintre cele două curbe este de 22% pentru un tronson de 1,5 mm de deplasare, necorelare care (cu toate că au fost reluate experimentele) nu s-a putut justifica doar prin prisma solicitărilor structurale mecanice implicând în opinia autorului o zonă de cercetare prin utilizarea unor modele mai complexe sau studiul micrometric al comportării elementelor componente ale celulei electrochimice. După această corecție, curbele de pe grafic sunt aproape suprapuse, cu mențiunea că spre finalul experimentelor mai apare o intersectare a curbelor, cu o eroare (diferență) mai mică de 5%.

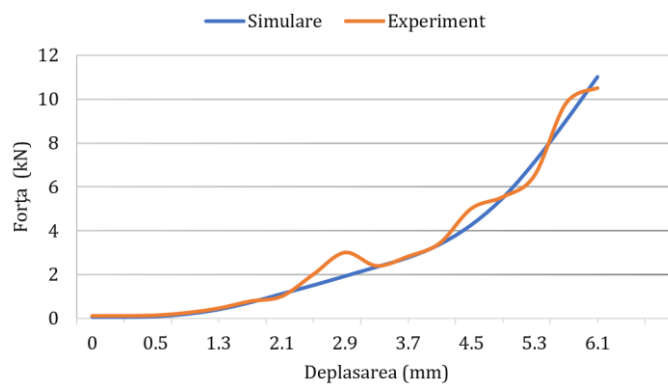


Fig. 5.7 Comparație rezultate obținute la deformarea bateriei 21700 cu vârf semirotund

5.2.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit

Ca și în celelalte cazuri, la străpungerea cu vârf ascuțit (Fig. 5.8) a celulei electrochimice 21700 se poate observa că există o asemănare experiment-simulare. În primă fază, atât timp cât deplasarea este de 0,2 mm, apare o diferențiere între curbele obținute, dar se poate considera că rezultatele experimentale sunt validate până la o deplasare de 9 mm.

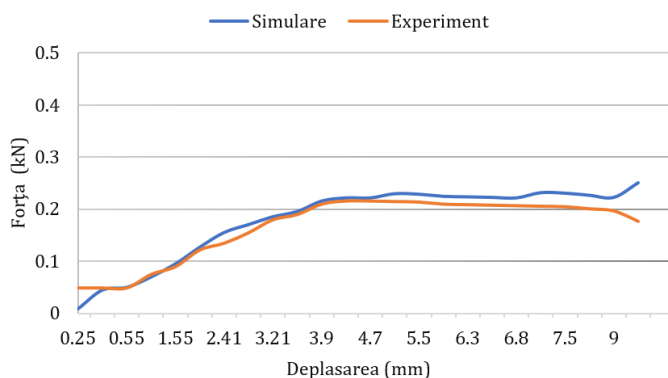


Fig. 5.8 Comparație rezultate obținute la deformarea bateriei 21700 cu vârf ascuțit

5.3. Rezultate obținute pentru celula prismatică

5.3.1. Încovoiere în trei puncte

Analiza și interpretarea rezultatelor obținute prin cercetări experimentale și a celor obținute prin simulare s-au efectuat pe baza curbelor care se regăsesc în Fig. 5.9. La încovoierea în trei puncte a celulei prismatice, pe baza curbelor ascendente, se poate menționa faptul că variația datelor obținute la simulare urmărește curba obținută la încercarea experimentală. Diferența maximă dintre cele două curbe este de 10% la o deformare de 4 mm și la o forță de 10 kN, și astfel se poate afirma că modelul este validat până în punctul în care deplasarea este de 6 mm, deoarece la o deplasare de 4 mm curba se redresează în limita de eroare de $\leq 5\%$.

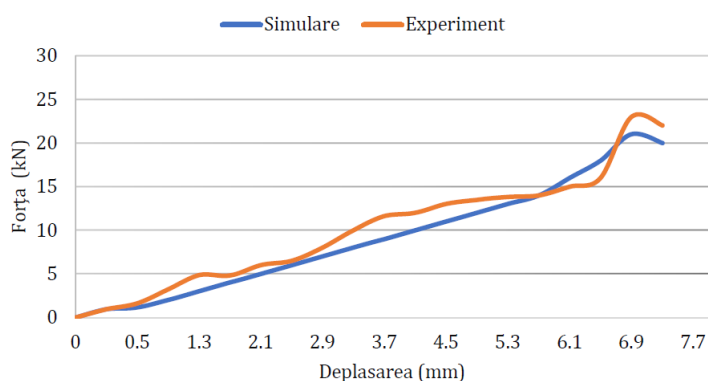


Fig. 5.9 Comparație rezultate obținute la încovoierea în trei puncte a bateriei prismatice

5.3.2. Încovoiere simplă

În ceea ce privește încovoierea simplă a celulei prismatice, deplasările mari înregistrate sunt cauzate de cazul particular de încercare și anume, de amplasarea celulei pe latura mică (grosime) pe suprafața rigidă (dimensiunile geometrice ale bateriei sunt 18x75x145 mm). După cum reiese din graficul prezentat (Fig. 5.10), curbele aproape se suprapun, diferența maximă înregistrată fiind de sub 4%. Validarea modelului poate fi considerată atât timp cât deplasarea este mai mică de 50 de mm. La deplasări mai mari, modelul trebuie îmbunătățit prin introducerea unui model combinat electrochimic-termic-mecanic.

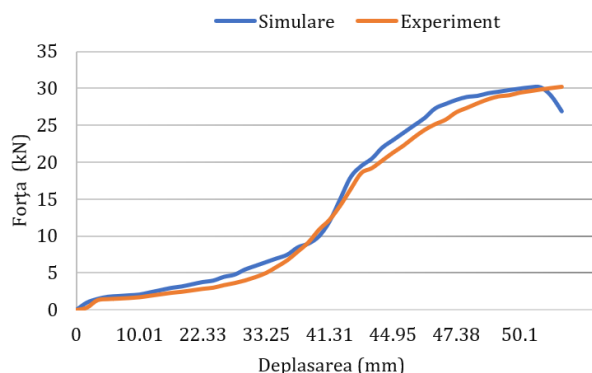


Fig. 5.10 Comparatie rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei prismatice

5.3.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund

Rezultatele obținute prin simulare și studiul experimental la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund sunt reprezentate în Fig. 5.11. La validarea modelului s-a urmărit ca valorile de intrare stabilite și utilizate în simulare să fie similare cu condițiile inițiale de la încercările experimentale, modelul pentru simulare creându-se în aceste condiții. Diferențele apar între rezultatele obținute experimental și cele obținute prin simulare după ce deplasarea depășește 12 mm, și pe baza celor obținute se consideră că modelul este valid până în punctul în care deplasarea este de 12 mm, eroarea fiind de sub 4%.

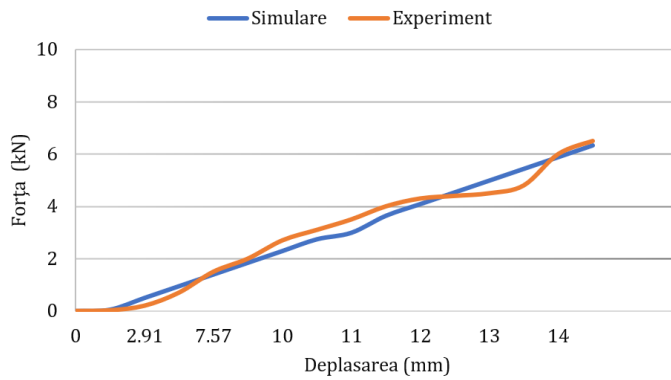


Fig. 5.11 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf semirotond a bateriei prismatice

5.3.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit

Prin analiza și interpretarea graficelor prezentate în Fig. 5.12 s-a comparat diferențierea dintre cele două curbe în cazul străpungerii cu vârf ascuțit a celulei prismatice și conform graficului, modelul experimental este validat până în punctul în care deplasarea este de 10 mm. La deplasări mai mari de 10 mm, diferențierea dintre curbe este $\geq 20\%$, așadar trebuie dezvoltat modelul de analiză cu element finit și integrat un model cuplat electrochimic-termic-mecanic.

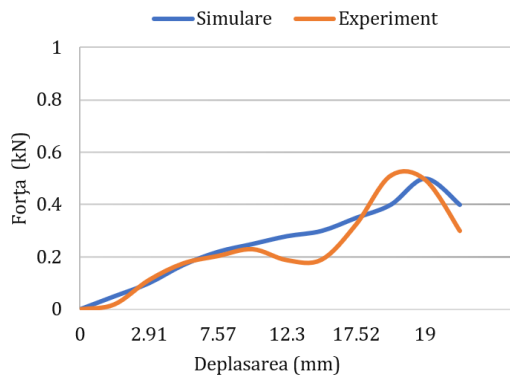


Fig. 5.12 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf ascuțit a baterie prismatice

5.4. Rezultate obținute pentru celula de tip pungă

5.4.1. Încovoiere în trei puncte

În continuare se prezintă comparația dintre rezultatele obținute prin experiment și simulare la încovoierea în trei puncte (Fig. 5.13) a celulei electrochimice de tip pungă. Se observă că până în punctul în care deplasarea este de 50 de mm, cele două curbe sunt suprapuse, iar modelul este validat până în acel punct.

Diferențele care apar între rezultatele obținute experimental și cele obținute prin simulare pot fi justificate prin faptul că la deplasări mai mari de 50 de mm, modelul trebuie studiat mai în detaliu și trebuie introdusă o variantă cuplată electrochimic-termic-mecanic. La sfârșitul încercărilor eroarea/diferența măsurată este de 25% ceea ce confirmă faptul prezentat anterior și mai ales necesitatea de abordare micrometrică a comportării mecanice a componentelor celulei electrochimice de tip pungă.

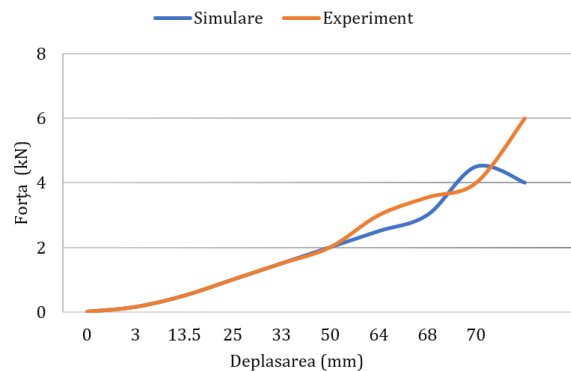


Fig. 5.13 Comparație rezultate obținute la încovoierea în trei puncte a bateriei de tip pungă

5.4.2. Încovoiere simplă

În cazul încovoierii simple a celulei electrochimice de tip pungă, rezultatele aferente simulărilor sunt prezentate în Fig. 5.14. și analog cazurilor anterioare, modelul dezvoltat este validat până în punctul în care deplasare este de 3,6 mm. Se observă suprapunerea curbelor între valorile deplasărilor de la 0 mm până în punctul în care deplasarea este 3,6 mm (diferențierea dintre valorile celor două curbe este de sub 1%). La deplasări mai mari peste această valoare, în cazul încovoierii simple, diferența este de peste 5%, iar modelul trebuie dezvoltat.

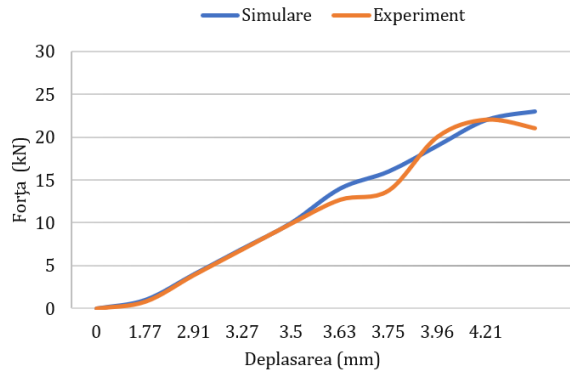


Fig. 5.14 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei de tip pungă

5.4.3. Deformarea celulei cu vârf semirotund

Rezultatele obținute în cazul deformării celulei electrochimice de tip pungă cu vârf semirotund sunt prezentate în Fig. 5.15. Cele două curbe reprezintă rezultatele obținute prin experiment și cele obținute prin simulare, iar prin analiza acestora se poate observa faptul că există o suprapunere a acestora până în punctul în care deplasarea este de 4 mm. Pe tronsonul cuprins între 4 și 6,8 mm de deformare, diferența dintre valori este de sub 5%. Pentru a se putea valida modelul, s-a urmărit ca introducerea condițiilor inițiale utilizate la simulări să fie cât mai apropiate de valorile de intrare folosite în cazul simularilor. Pe baza acestor observații, se poate spune că modelul este validat până în punctul în care deplasarea atinge 6.8 mm.

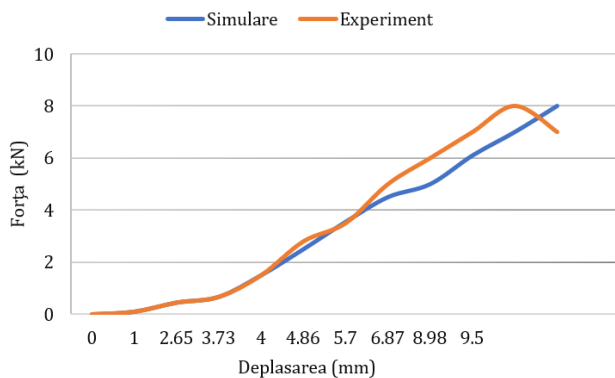


Fig. 5.15 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf semirotund a bateriei de tip pungă

5.4.4. Străpungerea celulei cu vârf ascuțit

Rezultatele obținute în cadrul străpungerii cu vârf ascuțit a celulei electrochimice de tip pungă se regăsesc în Fig. 5.16. Analog cazurilor prezentate anterior, s-au suprapus curbele obținute prin încercări experimentale și cele obținute prin simulare. Se observă o suprapunere a acestora până în punctul în care deplasarea atinge 5 mm, diferența dintre valorile înregistrate fiind mai mică de 5%. La deplasări mai mari rezultă o eroare de peste 5%, așadar modelul este validat până în punctul în care avem o deplasare de 5 mm. Și în acest caz se recomandă dezvoltarea modelului cuplat electrochimic-termic-mecanic.

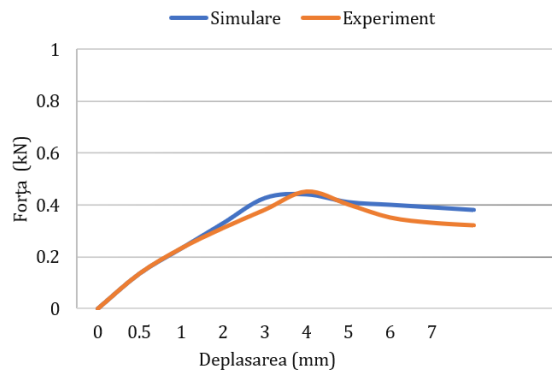


Fig. 5.16 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf ascuțit a bateriei de tip pungă

5.5. Concluzii generale

În acest capitol s-a realizat analiza comparativă dintre rezultatele obținute în urma activităților de cercetare experimentală și activitățile de cercetare numerică (modelare și simulare) în scopul de a identifica limitele de aplicare ale modelelor de analiză numerică a celulelor electrochimice luate în considerare în prezenta teză de doctorat. Scopul analizei comparative este acela de a aplica modelele validate la o scară mai largă și anume analiza influenței construcției carcasei bateriilor de acumulatori ce echipează vehiculele electrice în caz de accident (impact).

S-a identificat faptul că celulele cilindrice oferă prin modelele adoptate acuratețe în ceea ce prezintă comportarea la solicitările mecanice ce pot să apară în cazul unui accident. Prin coroborarea rezultatelor obținute se menționează că important a fost stabilirea

amplitudinii deformației celulei cu momentul în care apare scurtcircuitul sau suprasolicitarea termică, pentru identificarea numărului de celule electrochimice valide ca și funcționare (după accident), în scopul refolosirii acestora conform principiului contemporan de economie circulară.

Cele mai bune rezultate (din punct de vedere comparativ experimental vs. simulare) și pentru care s-a obținut validarea modelului numeric utilizat, s-au obținut pentru celulele electrochimice cilindrice de tip 18650, lucru ce a fost luat în considerare pe mai departe în studiul temei de doctorat propus.

Totuși trebuie amintit faptul că la modul general s-a observat că modelul utilizat și bazat doar pe proprietățile izotropice ale materialelor componentelor ce compun celula electrochimică trebuie pe mai departe studiat, cercetat și dezvoltat pentru a oferi acuratețea cerută pentru întregul domeniu de manifestare a diferitelor solicitări mecanice structurale ce pot să apară.

6. Modelarea, optimizarea și simularea numerică a solicitărilor structurale pe grupul de baterii ce echipază vehiculele electrice

6.1. Optimizarea topografică a carcasei modulului

Acest capitol, care prezintă modelarea și simularea deformărilor mecanice pe un grup de baterii, urmărește metodologia prezentată în Fig. 6.1 și evidențiază realizarea, optimizarea și simularea grupului de baterii la o anumită viteză de impact prestabilită. Scopul studiului comparativ efectuat în capitolul anterior este acela de a scoate în evidență necesitatea optimizării carcaselor în care se montează celulele electrochimice, pentru un efect cât mai redus asupra celulelor electrochimice în caz de accident (impact). Carcasele bateriilor de acumulatori ce echipază vehiculele electrice trebuie să aibă o anumită rigiditate mecanică necesară în procesul de fabricare, în procesul de manipulare și în timpul exploatării propriu-zise. De aceea, la ora actuală, se constată că rigiditatea carcasei bateriei se realizează prin crearea unor nervuri pe suprafața/suprafețele carcasei, nervuri a căror forme și amplasare diferă de la un producător la altul. Teza de doctorat își propune a urma o direcție bine stabilită din punct de vedere ingineresc și stabilirea modalităților de creștere a rigidității mecanice a carcasei de bateriei pe baza unor procese bine stabilite și uzitate în inginerie (ca și în cazul de față, prin utilizarea optimizării topografice).

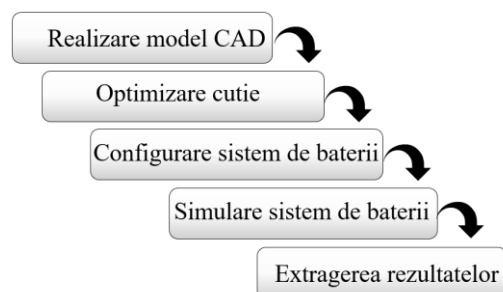


Fig. 6.1 Schema de desfășurare a activităților de simulare

Mai multe variante de carcase au fost generate și vizualizate în modele CAD în SW, iar analiza efectuată s-a bazat pe un concept de carcasă de baterie (Fig. 6.2) care a fost dezvoltat, aprofundat și optimizat; fiind un model geometric simplu, cu suprafețe plane bine delimitate. Carcasa bateriei are următoarele dimensiuni geometrice: lungimea de

500 mm, lățimea de 240 mm și o înălțime de 73 mm. Materialul ales și definit pentru modelul carcasi este aluminiul deoarece greutatea specifică este mai mică, reducându-se astfel greutatea totală a grupului de baterii.

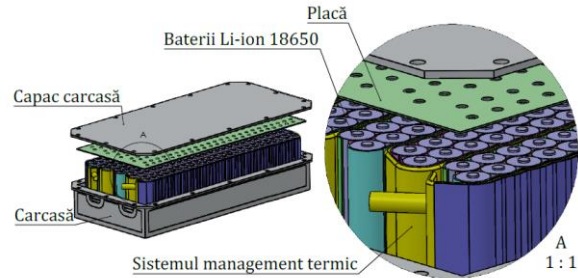


Fig. 6.2 Părțile componente ale unui modul de baterii

Prima activitate a constat în aplicarea metodei de optimizare topografice, metodă des utilizată în domeniul ingineriei mecanice. Optimizarea topografică [137] se aplică pe suprafețe plane sau deja deformate ale unui model pentru a ajunge la o formă geometrică cu ranforsări pe suprafețe. Acest tip de optimizare se aplică în special modelelor discretizate în elemente finite de tip shell. De asemenea, optimizarea trebuie interpretată astfel încât, prin acest proces, un produs să se poată dezvolta la parametrii constructivi-funcționali superiori. Optimizarea se poate implementa la componentele unui ansamblu sau ale unui subansamblu, acolo unde există potențial de îmbunătățire (Fig. 6.3).

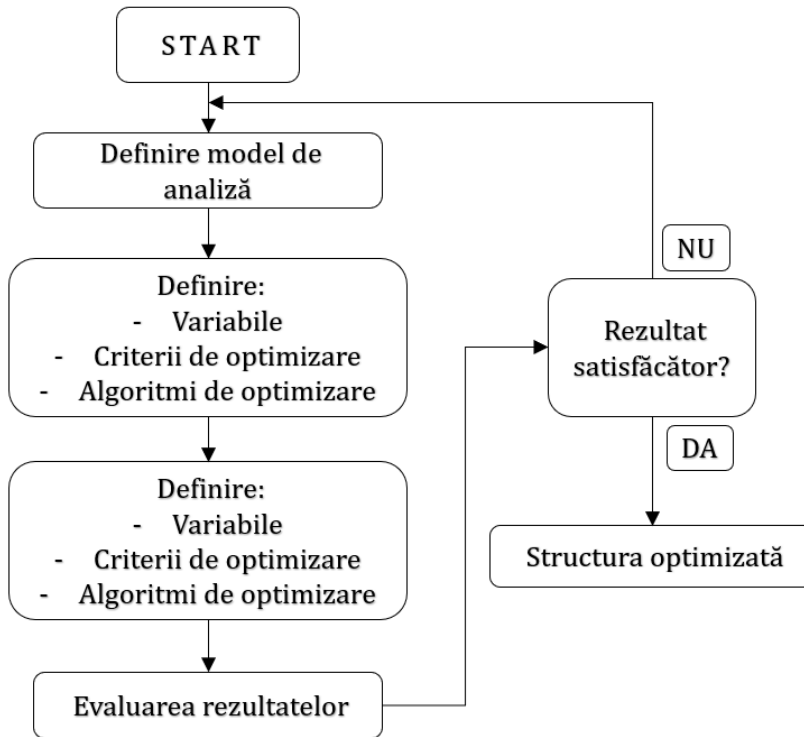


Fig. 6.3 Schema de desfășurare a procesului de optimizare

În acest proces de optimizare a unui model de bază trebuie să se parcurgă anumite nivele de configurare în algoritmul de optimizare:

- dezvoltarea și importarea modelului;
- definirea variabilelor pentru optimizarea topografică;
- definirea răspunsurilor de optimizare;
- postprocesarea în HyperView.

Pentru studiul de față, procedeul optimizării constructive a carcasei modulului începe cu realizarea unui model CAD simplu, având o dimensiune geometrică predefinită (Fig. 6.4 a). După realizarea modelului CAD, acesta este importat în softul HyperMesh pentru discretizarea în elemente finite. Modelul s-a discretizat în 12,893 de elemente combinate (pătrate și triunghiulare) de 4 mm (Fig. 6.4 b). Zona de optimizare pentru studiul realizat în acest capitol este suprafața inferioară (baza cutiei). După discretizarea modelului, deosebit de importantă este alegerea și atribuirea materialului, iar în cadrul acestui studiu materialul care s-a atribuit acestui component este aluminiul, cu caracteristicile mecanice din MAT 1, densitatea de 2.7 g/cm³, coeficientul

Poisson de 0,33 și modulul lui Young de 70 GPa.

Un al doilea pas important și necesar în procesul de optimizare topografică este definirea intervalului de frecvență a supra-solicitărilor care intervin în timpul funcționării vehiculului electric. Prin urmare, forma optimizată propusă de autor este rezultatul optimizării topografice la o frecvență de 22-30 Hz, frecvență general considerată care se transmite către șasiul autovehiculului datorită interacțiunii roată-drum (bateria și implicit carcasa bateriei fiind solidară cu șasiul) [138].

În urma rulării procesului de optimizare pe cutia de bază, după un anumit număr de iterații care sunt centralizate de către programul de optimizare, algoritmul a furnizat un model optimizat conform datelor de intrare (Fig. 6.4 b). Mai departe, modelul optimizat a fost finisat prin reducerea zonelor optimizate date de algoritm, la construcții de forme geometrice simple (și ușor de fabricat).

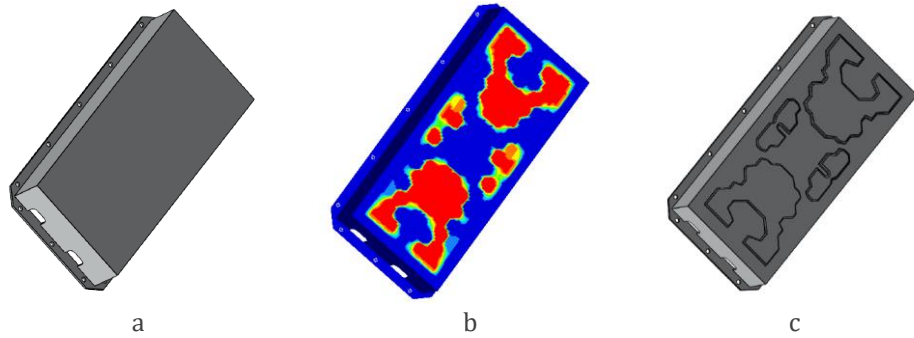


Fig. 6.4 Modelul de carcasă pentru baterie utilizat în simulări
a) neoptimizat; b) optimizat; c) model CAD forma finală

6.1. Simulări efectuate pe grupul de baterii la 10 m/s

Pentru a continua și aprofunda analiza comparativă între modelul de carcasă de baza și cel optimizat, s-a modelat un grup de baterii care include 12 module, fiecare modul având 480 de celule electrochimice tip 18650, rezultând un număr total de 5760 celule (Fig. 6.5). De asemenea, trebuie precizat că la aceste simulări nu s-a ținut cont de influențele termice care pot să apară în realitate (variații de temperatură a mediului extern și variații datorite proceselor electrochimice din exploatare), fiind considerată o temperatură constantă de 25°C.

Scopul urmărit prin aceste activități de cercetare prin analiză numerică este acela de a urmări comportarea și deformarea mecanică a

celulelor și a modulului de acumulator în caz de impact, cu evidențierea efectului asupra integrității celulelor electrochimice ce compun bateria de acumulatori. S-a ales de asemenea cel mai defavorabil caz în ceea ce privește posibilitatea de avarie prin accident, și anume impactul lateral cu caroseria unui vehicul electric. Dacă în cazul unui impact frontal construcția șasiului vehiculului oferă posibilitatea ca o mare parte din energia de impact să fie dispersată până în zona în care este amplasată bateria de acumulatori, în cazul impactului lateral bateria de acumulatori este protejată în principal la impact doar de lonjeroanele longitudinale, podeaua habitaculului și structurile ce formează caroseria (Fig. 6.6) [139, 140]. Deoarece, în cazul studiului numeric pentru economie de timp, modelul se reduce la analiză la doar la o parte de lonjeron și la grupul de baterii, s-a pornit de la ipoteza că doar 80% din totalul forței/energiei de impact se transmite către grupul de baterii [141].

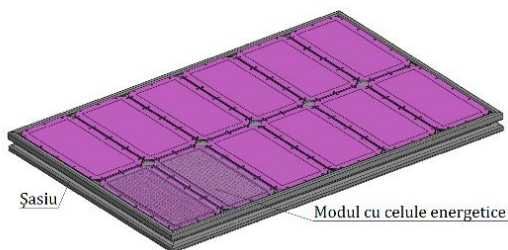


Fig. 6.5 Grup de baterii compus din 12 module

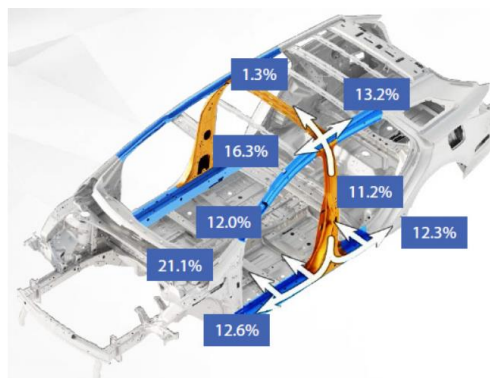


Fig. 6.6 Distribuția energiei pe structura autovehiculului la un impact lateral [142]

Din aceste motive prezentate anterior, în efectuarea simulărilor privind comportamentul unei baterii de acumulator ce echipează un vehicul electric, s-a ales cazul cel mai defavorabil ce poate să apară în cadrul unui accident rutier, și anume impactul lateral (Fig. 6.6)

Bazat pe modelul CAD de grup de acumulatori, s-au efectuat simulări în aceleași condiții pentru modelul de carcasă de bază și modelul de carcasă optimizat. În urma simulărilor efectuate s-au numărat celulele deformate pentru a evalua eficiența optimizării carcasei modulului de baterii. Pentru a continua și analiza grupul de acumulatori, s-au considerat următoarele scenarii de bază în analiza cu element finit:

- carcasa de bază;
- carcasa optimizată;
 - viteza inițială de impact
 - 10 m/s;
 - 20 m/s;
 - 29m/s.

Raportarea la eficacitatea soluției de optimizare topografică a părții superioare a carcasei bateriei s-a ales a fi reprezentată prin numărul de celule care suferă deformări maxime, dar care, conform cercetărilor prezentate în capitolele anterioare, rămân în stare de funcționare (valoarea determinată prin cercetările experimentale prezentate în capitolele anterioare este de 2.5 mm). Cercetările experimentale efectuate pe celulele electrochimice individuale au validat modelul numeric utilizat în simulări, și așadar, pe baza acestor informații s-a determinat valoarea maximă la care celula nu mai este utilizabilă și prezintă un pericol.

Pentru a reduce timpul de analiză al softului, s-au considerat două module care au fost rulate în programul de analiză. Modelul complet al grupului de baterii era aproape imposibil de rulat local, timpul de analiză fiind de peste 50 de ore. Varianta de bază s-a construit tridimensional într-un program de modelare, iar apoi s-a importat în programul de discretizare HyperMesh pentru a configura modelul pentru analiză, pașii parcurși fiind următorii:

- discretizarea modelului în HyperMesh;
- definirea materialelor și atribuirea lor;
- definirea proprietăților și atribuirea lor;
- definirea și stabilirea tipurilor de contact dintre componente;
- crearea cazului de încărcare;
- verificarea modelului;
- rularea simulării.

6.1.1. Simulare realizată pe modul cu carcasă simplă

Detaliile celor două module sunt prezentate în Fig. 6.7. În acest caz, în model este inclusă carcasa de bază neoptimizată. Discretizarea s-a făcut în 767,396 de elemente de tip shell. În urma analizei efectuate în Radioss, se poate observa o deformare a componentelor.

În acest caz lonjeronul este rigid, iar modulele s-au analizat la un impact de 10 m/s, așa cum se observă și în Fig. 6.7.

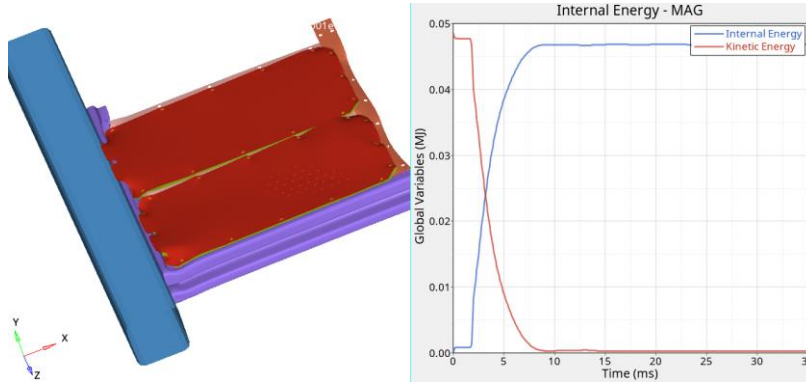


Fig. 6.7 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă simplă, 10 m/s

Distribuția tensiunilor von Mises s-a prezentat în Fig. 6.8, unde se observă că, prin deformarea structurii de rezistență, are loc și deformarea celulelor. În total s-au numărat 18 baterii cu o deformare de peste 2.5 mm din totalul de 480. Celulele care nu au fost deformate cel puțin 2.5 mm nu s-au luat în considerare deoarece, conform cercetărilor experimentale, la solicitarea structurală mecanică a celulei electrochimice de tipul 18650, scurtcircuitul debutează la o deplasare de 3.5 mm.

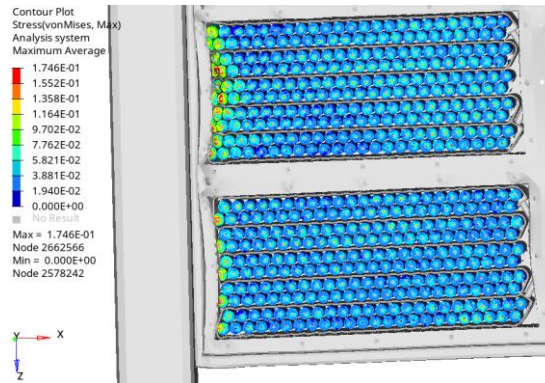


Fig. 6.8 Detalii tensiune von Mises, carcasa simplă, 10 m/s

6.1.2. Simularea modulului cu carcasă optimizată

Deformarea vizuală a celor două module se poate observa în Fig. 6.9. La aceasta simulare, în model este inclusă carcasa optimizată. Discretizarea s-a făcut în 869,620 de elemente tip shell. Lonjeronul este rigid, aşadar modelele s-au analizat la o viteză de 10 m/s.

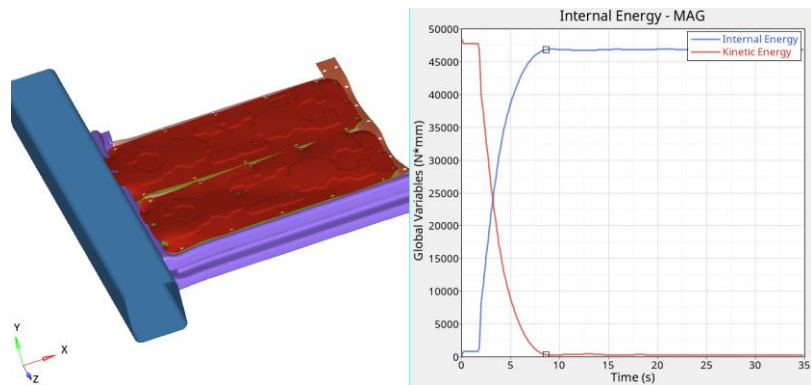


Fig. 6.9 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă optimizată, 10 m/s

Distribuția tensiunilor von Mises este prezentată în Fig. 6.10, unde se observă și deformațiile suferite de bateriile modulelor. În urma impactului, 16 baterii din totalul de 480 au avut o deplasare de peste 2.5 mm.

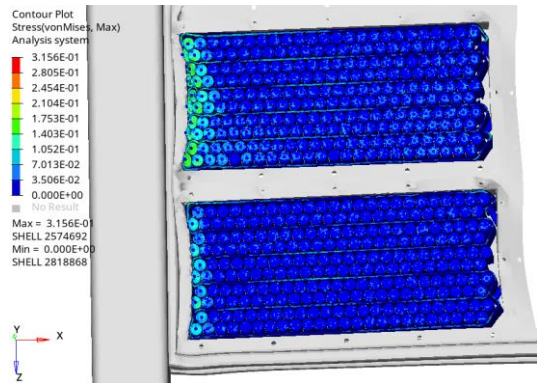


Fig. 6.10 Detaliu tensiune von Mises, carcasă optimizată, 10 m/s

6.2. Simulări efectuate pe modul la 20 m/s

6.2.1. Simulare realizată pe modul cu carcasă simplă

Principalul obiectiv al simulării prin metoda elementului finit a fost acela de a pune în evidență importanța optimizării carcaselor în care se montează bateriile. Aceste studii experimentale ar fi fost costisitoare, dar, prin simulare, cu ajutorul acestei interfețe, se poate ajunge la niște concluzii. Modelul tridimensional, după ce s-a importat în mediul HyperMesh, a fost discretizat în 767,396 de elemente tip shell. Din moment ce lonjeronul este o parte componentă rigidă (Fig. 6.11), viteza inițială de încărcare li s-a atribuit modulelor.

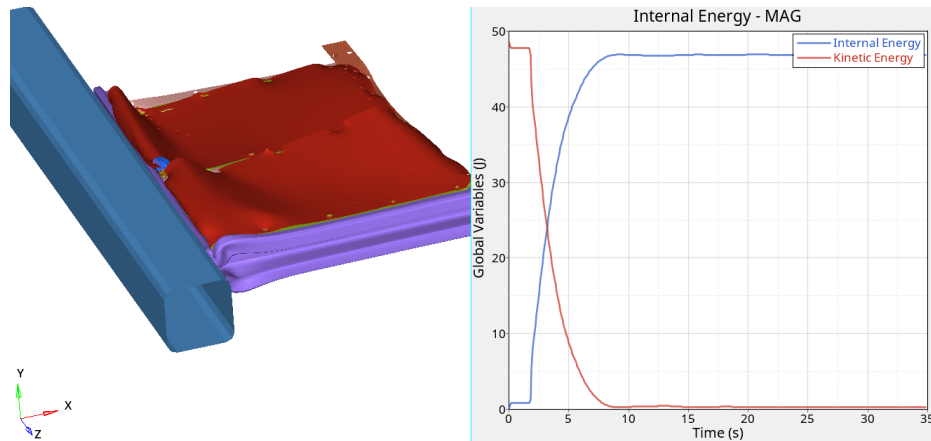


Fig. 6.11 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă simplă, 20 m/s

Detaliile celulelor în ceea ce privește deformările și tensiunea von Mises sunt prezentate în Fig. 6.12. Se observă ca deplasarea este

accentuată pe celulele electrochimice individuale aflate la capetele modulelor. Structura și carcasa modulului s-au deformat în urma impactului; la fel s-a întâmplat și în cazul bateriilor aflate la cele două capete, iar în mijloc nu există baterii deformate.

Din 480 de baterii supuse impactului, în acest caz de solicitare s-au deformat 122 de unități. Cu ajutorul softului s-a determinat, de asemenea, deplasarea pe fiecare baterie. Bateriile care au avut acest parametru mai mic de 2,5 mm nu au fost luate în calcul.

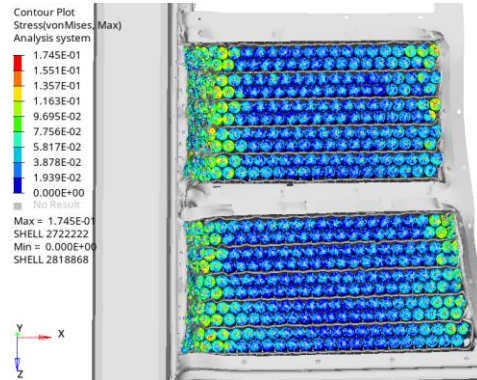


Fig. 6.12 Detaliu tensiune von Mises, carcasă simplă, 20 m/s

6.2.2. Simulare realizată pe modul cu carcasă optimizată

Rezultatul studiului realizat prin simularea impactului modulelor cu carcasă optimizată la 20 m/s este prezentat în Fig. 6.13. După importarea modelului tridimensional în mediul Altair, acesta s-a discretizat în 869,620 de elemente tip shell. Lonjeronul, și în acest caz este rigid, iar viteza inițială s-a atribuit celor două module supuse simulării.

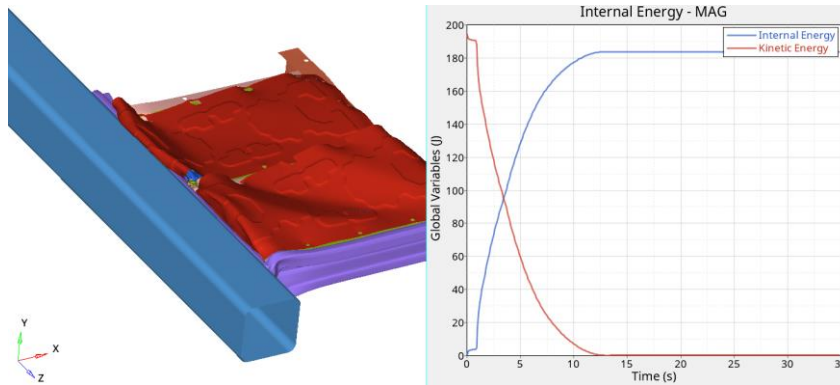


Fig. 6.13 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă optimizată, 20 m/s

Harta distribuției tensiunii von Mises este ilustrată în Fig. 6.14. După cum se observă și în imagine, zona cu celulele deformate este situată în capetele modulelor. Aceste tensiuni critice apar la bateriile care au deplasarea mai mare de 2.5 mm. Din cele 480 de celule, 112 au fost deformate. În concluzie, carcasa fiind optimizată, bateriile au fost mai bine protejate. În cazul carcasei de bază s-au deformat 122 de celule, iar în cazul acesta doar 112, diferența fiind de 10 celule.

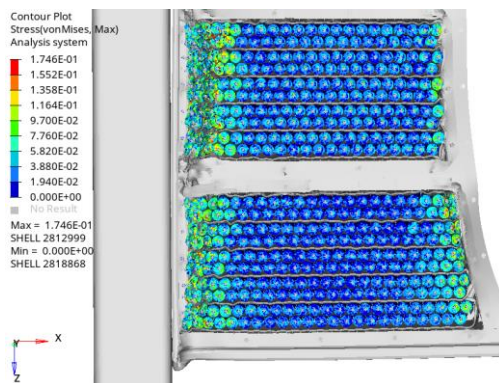


Fig. 6.14 Detaliu tensiune von Mises, carcasă optimizată, 20 m/s

6.3. Simulări efectuate pe modul la 29 m/s

6.3.1. Simulare realizată pe modulul cu carcasă simplă

În cazul analizei realizate pe modulul cu carcasă de bază, simulările s-au efectuat la o viteză inițială de 29 m/s (Fig. 6.15). După realizarea modelului tridimensional în programul de modelare SolidWorks, acesta a fost importat în mediul HyperMesh pentru configurare. Modelul s-a discretizat în 869520 de elemente de tip shell.

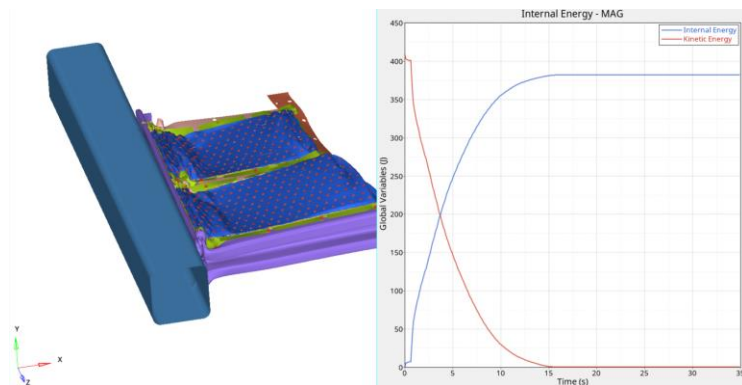


Fig. 6.15 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă simplă, 29 m/s

Fig. 6.16 prezintă modul de distribuție al tensiunilor von Mises locale pe fiecare baterie în parte. Se pot observa, de asemenea, zone de tensiuni critice la capătul modulelor, deplasările fiind maxime în această zonă. Se observă cum structura modulelor s-a distorsionat și, implicit, de la impact, s-au deformat și bateriile.

Din totalul de 480 de baterii cu care au fost echipate modulele, 265 de baterii s-au deformat, având deplasări mai mari de 2.5 mm.

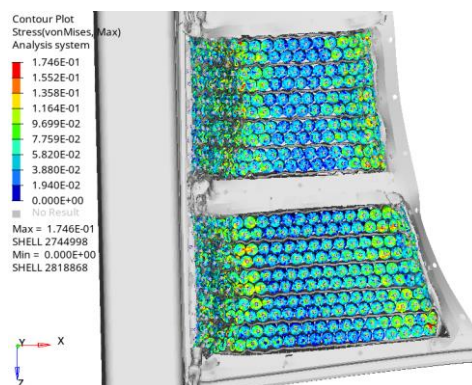


Fig. 6.16 Detaliu tensiune von Mises, carcasă simplă, 29 m/s

6.3.2. Simulare realizată pe modul cu carcasă optimizată

Deformarea produsă în urma simulărilor realizate pe modul la un impact de 29 m/s se poate observa în Fig. 6.17. Discretizarea s-a făcut în 869,620 de elemente de tip shell. Lonjeronul, și în acest caz, este rigid.

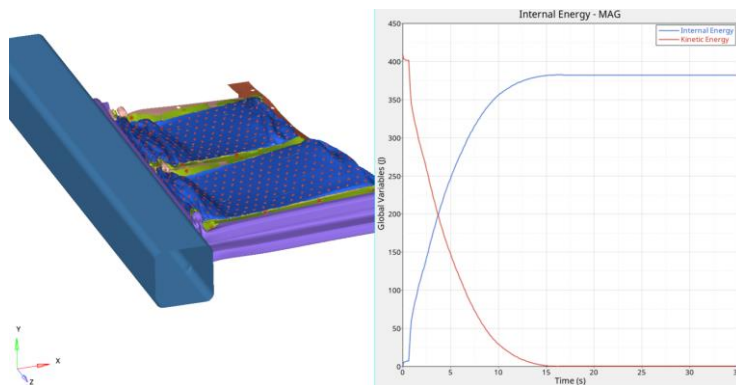


Fig. 6.17 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă optimizată, 29 m/s

Harta distribuției tensiunilor von Mises prezintă în culori accentuate zona de deformare maximă. Această zonă se află la capetele celor două module. Din cauza impactului, structura de rezistență s-a deformat, determinând implicit și distorsionarea celulelor. Din totalul de 480 de baterii s-au deformat 254. Comparând rezultatele obținute la simulările efectuate la această viteză inițială, în cazul carcasei optimizate s-au deformat cu 11 celule electrochimice mai puțin. La cele 254 de baterii deformată deplasarea a fost mai mare de 2.5 mm.

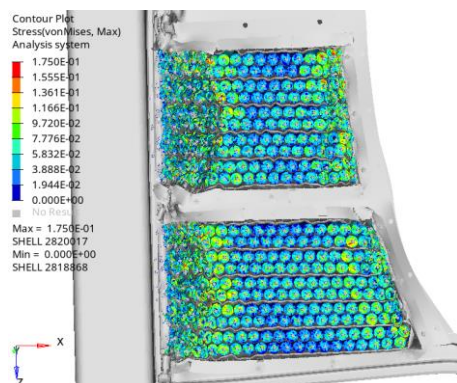


Fig. 6.18 Detaliu tensiune von Mises, carcasă optimizată, 29 m/s

6.4. Rezultate ale analizei comparative pentru cazurile de încărcare simulate

În urma simulărilor realizate în cele 3 cazuri cu viteze de impact diferite și cu modelul carcaselor diferit (standard vs. optimizată topografic), s-a obținut o serie de valori pentru numărul bateriilor

deformate care au fost centralizate în Tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 Rezultate centralizate pentru cele 6 cazuri de simulare

Viteza inițială [m/s]	Baterii deformate [buc]		Diferența [%]
	Carcasa de bază	Carcasa optimizată	
10	16	12	25%
20	122	112	8%
29	265	254	4%

Pe baza rezultatelor obținute se observă raportul de îmbunătățire din Tabelul 6.1, cuprins între 4 și 25 %, ceea ce ne arată că soluția optimizată constructiv topografic (și propusă în cadrul acestei teze de doctorat) prezintă o eficiență ridicată în protecția mecanică la solicitări datorate fenomenelor de impact (accident). Trebuie menționat faptul că se observă că prin optimizare topografică carcasa tinde să aibă eficiență mai mare în protecția celulelor ce compun bateria, cu cât viteza de impact este mai mică. Conform statisticilor privind accidentele rutiere la nivel de UE, cele mai multe au loc la viteze mici. Așadar, prin soluția constructiv propusă, se poate observa faptul că efectul maxim se obține la viteze mici, iar la viteze de impact mai mari de 90 km/h diferența scade sub 8%.

La cazurile de simulare cu carcasă optimizată, la cele trei viteze inițiale s-au deformat mai puține celule, ceea ce indică validitatea procesului propus de optimizare a carcaselor, proces care constituie un pas important când vine vorba de siguranța autovehiculelor în caz de accident, dar și în ceea ce privește aplicarea conceptului de economie circulară prin reutilizarea celulelor electrochimice în alte construcții de surse energetice, reducând (sau de ce nu eliminând) costurile economice și poluarea mediului înconjurător datorată proceselor industriale de fabricație.

7. Concluzii generale, contribuții și perspective

Pe baza rezultatelor obținute în urma activităților de cercetare experimentală și activităților de analiză numerică prezentate în capitolele anterioare ale tezei de doctorat, se poate afirma faptul că cercetările în domeniul autovehiculelor electrice sunt necesare, actuale și importante, având în vedere dinamica continuă de creștere a numărului de autovehicule electrice în circulație, cu efectul imediat că acestea vor produce inevitabil un număr de accidente rutiere. Ținând cont de costurile majore pe care o sursă de energie (bateria) le are din totalul costurilor de construcție ale unui autovehicul, precum și de riscul de aprindere a celulelor electrochimice cauzat de evenimentele rutiere (accidente), alegerea temei tezei de doctorat este oarecum firească, fiind o temă de cercetare care urmărește îmbunătățirea structurală surselor energetice ale autovehiculelor electrice încă din faza de proiectare, pentru a corespunde cerințelor legate de utilizarea și exploatarea acestora în condiții de maximă siguranță și fiabilitate.

Teza de doctorat abordează o problemă curentă și uzuală din domeniul cercetării construcției și dezvoltării surselor energetice ce echipează vehiculele electrice din punct de vedere al influenței solicitărilor structurale ale acestora. De asemenea, cercetarea se înscrie și se bazează pe linia colaborării universității noastre cu mediul economic privat local, în scopul abordării unor teme de cercetare concrete care rezolvă problema solicitărilor structurale la care sunt supuse celulele electrochimice.

7.1. Concluzii generale

Atingerea dezideratului tezei de doctorat a fost realizată prin stabilirea unor obiective care trebuie îndeplinite, prin intermediul planului, a etapelor și a activităților specifice de lucru, cu un conținut de cercetare mulți și interdisciplinară, necesare cercetării și finalizării cu succes a temei tezei de doctorat alese.

Obiectivul general al tezei de doctorat este îmbunătățirea siguranței vehiculelor electrice prin analiza și optimizarea construcției surselor energetice din perspectiva solicitărilor mecanice structurale. Atingerea obiectivului general s-a realizat în mod consecvent prin atingerea unor obiective specifice stabilite pentru fiecare etapă de lucru, prin planul de cercetare al studiilor doctorale.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal al tezei de doctorat, cercetările s-au desfășurat și s-au extins pe mai multe direcții și capitole.

1. Introducere
2. Stadiul actual privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipează vehiculele electrice
3. Activități de cercetare experimentală privind solicitările structurale ale surselor energetice ce echipează vehiculele electrice
4. Modelarea și simularea solicitărilor structurale ale surselor energetice utilizate în construcția vehiculelor electrice
5. Analiza rezultatelor obținute din cercetările experimentale și simularea surselor energetice
6. Modelarea, optimizarea și simularea solicitărilor structurale pe grupul de baterii ce echipează vehiculele electrice
7. Concluzii generale, contribuții și perspective

Capitolul I

În acest capitol s-a realizat o sinteză introductivă în ceea ce privește argumentarea temei tezei de doctorat, s-au prezentat obiectivele acesteia și s-au stabilit metodele și metodologia de cercetare.

Atenția asupra potențialului vehiculelor electrice de a fi o soluție pertinentă la reducerea masivă a gazelor cu efect de seră cauzate de transport este din ce în ce mai evidentă din partea industriei auto prin numeroase vehicule electrice deja prezente pe piață. Pentru că, la această oră, domeniul transportului folosește cu precădere mijloace de transport dotate cu motoare cu ardere internă, poluarea cauzată de acestea face din domeniul transporturilor unul dintre cei mai mari contribuitori la emisiile cu efect de seră și emisiile toxice care afectează populația. Din aceste motive primare, dezvoltarea și utilizarea vehiculelor electrice pot să contribuie direct și imediat la reducerea poluării cu gaze cu efect de seră, precum și la reducerea poluării în marile aglomerări urbane. Un aspect deloc de neglijat este și cel legat de costurile de operare/exploatare a autovehiculelor dotate cu motoare termice convenționale și a autovehiculelor dotate cu grup motopropulsor electric. Se estimează că exploatarea unui vehicul electric costă de aproximativ 6 ori mai puțin decât cea a unui vehicul dotat cu motor cu ardere internă, deoarece diferența de costuri se datorează în primul rând randamentului mic al motoarelor cu ardere internă (aprox. 30-35%) comparativ cu randamentul motoarelor electrice (aprox. 90-92%). Randamentul redus al motoarelor termice este cauzat de eficiența mică de transformare a energiei chimice a combustibililor fosili în căldură (prin

ardere).

Capitolul II

În acest capitol s-a consultat în detaliu literatura de specialitate, studiindu-se stadiul actual privind: tehnologiile eficiente energetic în construcția celulelor electrochimice, construcția și tipologia celulelor electrochimice precum și influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipază vehiculele electrice. De asemenea, s-au trecut în revistă și noțiuni legate de contextul actual privind solicitările mecanice și efectele vibrațiilor și șocurilor asupra bateriilor, precum și solicitările electrice și cele termice la care sunt supuse celulele electrochimice.

În a doua parte a capitolului au fost prezentate diverse abordări ale diverși cercetători referitoare la solicitările mecanice care pot apărea la celulele energetice, tipul materialelor folosite, modelarea cu metoda elementului finit, respectiv validarea celulelor Li-Ion.

Pentru a cunoaște influența solicitărilor structurale pe celulele litiu-ion, cercetătorii din domeniu au realizat diverse studii asupra acestora și asupra componente lor. Au utilizat diferite capuri de deformare (cu vârf sau semirotonde) cu care s-au deformat cele trei tipuri principale de celule electrochimice utilizate în construcția surselor de energie a vehiculelor electrice (cilindrică, prismatică și celula de tip pungă). S-au efectuat teste de comprimare axială, comprimare laterală, încovoiere simplă și încovoiere pe cele trei tipuri de celulă. În cadrul testelor efectuate s-au determinat patru faze principale, respectiv, prima fază, care constă în deformarea sub acțiunea forței, după care apare scurtcircuitul (a doua fază). Din momentul începerii scurtcircuitului, temperatura crește și apare fuga termică (faza trei) care duce la autoaprinderea celulei în ultima fază.

De asemenea, în unele cazuri, pentru a caracteriza comportamentul miezului celulei la simulare, s-au folosit diverse tipuri de spumă din biblioteca de materiale a programelor de simulare. Rezultatele unui model anizotrop sunt mai precise când vine vorba de determinarea poziției și a direcției crăpăturilor la deformarea celulei, pe când modelele de spumă izotropă au un răspuns mai exact la analiza globală a celulelor.

Prin utilizarea modelării prin metoda elementelor finite se pot determina și optimiza încă din faza de proiectare diverși parametri, care ulterior contribuie la îmbunătățirea siguranței celulelor energetice fără realizarea altor experimente și teste.

Sursele de energie pot fi analizate la nivel microscopic, la nivel de celulă sau la nivel de grup de celule. Spre exemplu, la nivelul grupului de celule, optimizarea carcasei unei celule poate reduce semnificativ

deteriorarea acestora. Dezvoltarea modelelor EF pentru simularea diferitelor solicitări sau scenarii de încărcare se poate face, în general, utilizând două abordări, și anume: modele omogene din punct de vedere al structurii și modele detaliate ale celulei electrochimice.

Capitolul III

În capitolul III s-au prezentat activitățile de cercetare experimentală privind solicitările structurale ale bateriilor. În cadrul activităților experimentale s-a dezvoltat un stand de încercări experimentale pentru a avea posibilitatea de a determina influența solicitărilor structurale ale celulelor electrochimice ce echipază vehiculele electrice. Obținerea și extragerea rezultatelor s-a realizat cu ajutorul unor echipamente implementate, acestea fiind echipamente de control, măsurare și supraveghere a fenomenelor, necesare pentru a immortaliza rezultatele experimentelor. Astfel, cu ajutorul echipamentelor menționate s-au efectuat studii experimentale pe patru tipuri de celule electrochimice:

- bateria 18650;
- bateria 21700;
- bateria prismatică;
- bateria tip pungă.

De asemenea, pe fiecare baterie în parte s-au efectuat 4 tipuri de încercări:

- încovoiere în trei puncte;
- încovoiere simplă;
- deformare cu vârf semirodund;
- străpungere cu vârf ascuțit;

În final, s-au determinat patru parametri pentru fiecare încercare în parte:

- variația forței cu care s-a acționat pe celulă în raport cu timpul, cu ajutorul unui traductor de forță;
- variația deplasării în raport cu timpul;
- variația tensiunii în raport cu timpul;
- variația temperaturii în raport cu timpul.

Pentru o interpretare mai ușoară, valorile tuturor parametrilor măsurați la experimentele realizate pe celulele electrochimice utilizate în construcția vehiculelor electrice sunt prezentate în Tabelul 7.1 și Tabelul 7.2. În cazurile studiate, conform valorilor prezentate în tabel,

discrepanța este mare între rezultate din cauza diferenței dintre dimensiunile geometrice ale celulelor supuse solicitărilor structurale și din cauza varietății impactoarelor folosite pentru deformarea acestora.

Tabelul 7.1 Rezultatele parametrilor monitorizați la experiment (forța de deformare)

Solicitare mecanică	Tip celulă	F max [kN]	F ISC [kN]
<i>Încovoiere în trei puncte</i>	18650	16	13
	21700	7	4
	Prismatic	26	14
	Pungă	2.8	1
<i>Încovoiere simplă</i>	18650	25	20
	21700	23	17
	Prismatic	30.16	22
	Pungă	21	18
<i>Deformare cu vârf semirotund</i>	18650	13	6.5
	21700	10	3
	Prismatic	6.5	4
	Pungă	7.7	4
<i>Deformare cu vârf ascuțit</i>	18650	0.6	0.1
	21700	0.22	0.09
	Prismatic	0.511	0.204
	Pungă	0.45	0.25

Cele mai mari forțe de deformare apar la deformarea în trei puncte a celulei prismatice din cauza caracteristicii particulare de rezistență mecanică constructivă a acesteia, iar în cazul încercărilor efectuate pe celula electrochimică de tip pungă, s-a observat că timpul experimentelor este cel mai scurt pe baza similarității privind particularitatea constructivă și a materialelor componente utilizate.

În fiecare caz studiat, odată cu debutarea scurtcircuitului, ca și un rezultat al solicitărilor mecanice, apare solicitarea termică, iar temperatura crește de la o valoare ambientală de 20-25°C, până la peste 100°C.

Tabelul 7.2 Rezultatele parametrilor monitorizați la experiment

<i>Solicitare mecanică</i>	<i>Tip celulă</i>	<i>Deplasare a în momentul ISC [mm]</i>	<i>Temperatura celulei în momentul ISC [°C]</i>	<i>Temperatura maximă măsurată [°C]</i>
<i>Încovoiere în trei puncte</i>	18650	14	43	96
	21700	7	22	97
	Prismatic	41.54	32	102
	Pungă	30	53	96
<i>Încovoiere simplă</i>	18650	6	25	101
	21700	6	20	100
	Prismatic	46	20	98
	Pungă	3.33	50	98
<i>Deformare cu vârf semirotond</i>	18650	6.5	23	98
	21700	3.5	20	75
	Prismatic	6	24	107
	Pungă	4.5	32	102
<i>Deformare cu vârf ascuțit</i>	18650	1.75	30	102
	21700	1	26	95
	Prismatic	4.5	30	127
	Pungă	1	37	99

Capitolul IV

Utilizând programul SolidWorks, s-au dezvoltat modelele fizice de celule electrochimice identice cu cele pe care s-a efectuat cercetarea experimentală. Așadar, fiecare model construit s-a importat în programul Altair unde s-a efectuat analiza prin metoda elementului finit asupra solicitărilor structurale: forței și deplasării.

Folosind această metodă, s-au validat modelele prin compararea rezultatelor obținute prin cercetările experimentale cu cele obținute prin simulare.

Se pot utiliza mai multe tipuri de materiale cu proprietăți și legi diferite, dar pe baza observațiilor experimentale s-a ales tipul de material M2_PLAS_JOHNS_ZERIL LAW 2, fiind unul izotrop elasto-plastic. Așadar, răspunsul la modelare și simulare este precis în ceea ce privește tensiunile și deformările mecanice.

Analiza cu elemente finite oferă posibilitatea de a optimiza parametrii de proiectare și simularea solicitărilor mecanice asupra bateriilor fără a fi nevoie de realizarea încercărilor experimentale. Nivelul de detaliere în simulare depinde de utilizator, mediul MEF oferind posibilitatea folosirii materialelor omogene. În cazul în care se dorește un model identic cu cel fizic, materialele se pot defini până în cele mai mici detalii.

De asemenea, se poate realiza asocierea cu rezultatele de la partea experimentală, fiind posibilă precizarea momentului în care are loc inițierea scurtcircuitului intern.

Informațiile obținute în urma simulărilor și, luând în calcul și partea experimentală, vor fi utilizate pe mai departe în procesul de proiectare și optimizare a carcasei exterioare a bateriei de acumulatori.

Capitolul V

În acest capitol s-au analizat comparativ rezultatele cercetării experimentale cu cele obținute prin simulare pentru a interpreta în detaliu efectele solicitărilor structurale la care au fost supuse celulele electrochimice luate în considerare în cadrul studiului.

Pentru fiecare model în parte s-au determinat erorile și punctele până unde acesta este validat în ceea ce privește solicitările structurale care acționează asupra celulelor electrochimice cu care sunt echipate vehiculele electrice. În urma analizei comparative dintre tipurile de celule luate în considerare și solicitările structurale la care acestea au fost supuse, se poate afirma că modelul propus și dezvoltat este parțial fezabil în analiza fenomenelor reale.

Cele mai bune rezultate obținute la modelele de celule simulate sunt la cele unde s-au simulat solicitările mecanice la străpungere. De asemenea, se observă o eroare generală care se repetă la toate modelele analizate prin compararea rezultatelor experiment-simulare, mai ales spre sfârșitul intervalului de încercare (aprox. 20%). Acest lucru necesită cercetări și studii viitoare pentru a se observa dacă (și magnitudinea) procesele electrochimice din interiorul bateriei au o influență directă și importantă.

Din punct de vedere al utilității și validării modelului numeric s-a constatat că în cazul particular al temei tezei de doctorat, modelul numeric oferă suficientă acuratețe în desfășurarea proceselor datorate solicitărilor structurale mecanice pe domeniul luat în considerare. Deoarece optimizarea structurii mecanice (rigiditatea) a carcasei are legătură directă cu identificarea posibilităților de protejare a celulelor

electrochimice (în scopul reutilizării acestora conform conceptelor economiei circulare), s-a considerat că viitoarele activități se vor desfășura pe analiza unei baterii de acumulatori tip 18650 (cu luarea în calcul a unei deformări maxime de 2,5 mm).

Capitolul VI

Rezultatelor obținute în urma simulărilor au condus la concluzia că, prin optimizarea carcasei modulelor, numărul bateriilor deformate poate fi redus. Optimizarea structurală a carcasei s-a bazat pe procesul de optimizare topografică, ceea ce a permis propunerea unei structuri rigide a carcasei. S-a luat în considerare cel mai defavorabil caz de accident rutier, impactul lateral (la diferite viteze de impact), iar grupurile/modulele de baterii s-au analizat prin metoda elementului finit pentru a afla rezultate sau informații din care cercetătorii sau producătorii pot înțelege fenomenele solicitărilor structurale.

Pe baza rezultatelor obținute, se observă raportul de îmbunătățire din Tabelul 6.1, cuprins între 4 și 25%, ceea ce ne arată că soluția optimizată constructiv propusă tinde să aibă eficiență mai mare la viteză mică, când un număr major de baterii sunt protejate de impact (și pot fi ulterior folosite în alte construcții/aplicații de surse energetice). Conform statisticilor privind accidentele rutiere la nivel de UE, cele mai multe au loc la viteze mici, fapt corelat direct cu soluția constructiv propusă, unde se poate observa faptul că efectul maxim de protecție (sau reducere a influenței solicitărilor mecanice de impact) se obține la viteze mici sub 50 km/h (la viteze mai mari de 90 km/h eficiența scade sub 8%).

La cazurile de simulare cu carcasă optimizată, la cele trei viteze inițiale s-au deformat mai puține celule, ceea ce indică validitatea procesului de optimizare a carcaselor propus în cadrul acestei teze de doctorat, proces care constituie un pas important când vine vorba de siguranța autovehiculelor electrice în caz de accident.

7.2. Contribuții

Contribuții originale

Elaborarea cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze de doctorat, intitulată „Cercetări privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipează vehiculele electrice” scoate în evidență mai multe contribuții originale.

Contribuțiile pe care autorul le consideră originale în redactarea tezei de doctorat sunt la modul general următoarele:

- cercetări privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice ce echipează vehiculele electrice;
- realizarea unei sinteze în urma consultării documentației de specialitate pentru a determina stadiul actual privind influența solicitărilor structurale asupra surselor energetice care echipează vehiculele electrice;
- optimizarea topografică a carcasei bateriei de acumulatori ce echipează un vehicul electric, prin luarea în considerare a frecvențelor (vibrațiilor) transmise către șasiul vehiculului (cu care bateria autovehiculului este solidară), datorate interacțiunii pneu-drum;
- adoptarea unei forme constructive a carcasei bateriei care crește rigiditatea globală a acesteia (prin identificarea și implementarea unor nervuri geometrice specifice), în condițiile posibilității efectuării construcției în urma unui proces tehnologic cât mai simplu;
- abordarea temei tezei de doctorat din punctul de vedere al necesităților contemporane ca orice produs/proces industrial să se regăsească în conceptul de economie circulară;
- proiectarea și dezvoltarea unui stand experimental necesar pentru încercări ciclice a solicitărilor structurale pe celulele electrochimice cu care sunt echipate vehiculele electrice. realizarea standului a inclus următoarele:
 - adaptarea unui grup hidraulic pentru a asigura forța și viteza constantă a impactoarelor atașate pe vârful cilindrului de forță;
 - proiectarea și realizarea unui sistem de măsurare a deformării/deplasării;
 - proiectarea și realizarea suportului traductor de forță;
 - proiectarea și realizarea vârfurilor de deformare (indentatoarelor);
- dezvoltarea metodologiei proprii de cercetare experimentală;
- dezvoltarea și realizarea sistemului de monitorizare a parametrilor mășurați;
- extragerea, analiza și interpretarea rezultatelor obținute în cadrul experimentelor realizate.

Contribuții practice

Contribuțiile practice din cadrul studiilor pentru realizarea tezei de doctorat sunt constituite de următoarele:

- realizarea standului experimental;
- realizarea suportului traductor pentru măsurarea forței de deformare;
- realizarea suportului pentru măsurarea deplasării/deformării celulelor electrochimice;
- adaptarea grupului hidraulic cu sistem de robinete și regulator de debit;
- stabilirea metodologiei și a condițiilor de încercare;
- realizarea încercărilor pe patru tipuri de celule electrochimice;
- calibrarea standului experimental;
- centralizarea rezultatelor în urma încercărilor efectuate;
- extragerea, conversia și analiza rezultatelor;
- analiza vizuală și comparativă a celulelor electrochimice deformate prin încercări;
- modelarea în interfața SolidWorks a standului experimental;
- modelarea bateriilor în programul SolidWorks;
- stabilirea condițiilor inițiale ale procesului de simulare;
- dezvoltarea analizei prin metoda elementului finit în mediul Altair;
- realizarea simulărilor;
- interpretarea rezultatelor obținute prin simulare.

7.3. Direcții de cercetare

Această teză de doctorat are ca obiectiv general îmbunătățirea siguranței vehiculelor electrice prin analiza și optimizarea surselor energetice din perspectiva solicitărilor structurale mecanice ce pot să apară în timpul exploatarei acestora. Cercetările experimentale și modelele de analiză dezvoltate oferă posibilitatea identificării soluțiilor și modalităților de optimizare a carcaselor unui modul de baterii, astfel încât, prin acestea să se reducă numărul de baterii deformate din modul în cazul unui impact (accident).

Modelul propus în cadrul acestei teze de doctorat și construit pe baza încercărilor experimentale obținute și-a dovedit eficiența doar pe

un domeniu bine determinat de acțiune al solicitărilor structurale – domeniu care a corespuns validării ipotezelor de cercetare luate în calcul pentru finalizarea temei de cercetare a tezei de doctorat.

Pe baza experienței acumulate în urma desfășurării și întreprinderii activităților de cercetare din teza de doctorat, autorul își propune să identifice în viitor modalitățile de îmbunătățire ale acestui model numeric al celulelor electrochimice utilizate în construcția vehiculelor electrice. Astfel, direcțiile principale de dezvoltarea a cercetărilor pe care autorul le propune (și pe care dorește să le abordeze pe viitor) constau în:

- Utilizarea altor restricții topografice de optimizare a construcției formei carcasei;
- Optimizarea topografică a tuturor suprafețelor carcasei;
- Dezvoltarea unui model numeric de celulă electrochimică care să țină cont și de mecanica structurii chimice a bateriei și a influențelor fenomenelor electrochimice și termice ce apar în exploatarea bateriei;
- Perfecționarea/automatizarea sistemului (a standului experimental) pentru efectuarea încercărilor experimentale prin:
 - Dezvoltarea standului experimental prin echiparea cu un șurub de forță astfel încât indentatoarele să fie controlate electronic, nu hidraulic;
 - Integrarea unui (unor) senzor(i) de temperatură, a multimetrului, a senzorului de forță și a șublerului electronic într-un software dezvoltat special pentru acest stand;
 - Realizarea unor suportți speciali care să asigure celula la încercările experimentale (să limiteze eventualele deplasări parazite ce pot să apară în timpul efectuării încercărilor);

8. Bibliografie

- [1] S. L. Winkler, J. E. Anderson, L. Garza, W. C. Ruona, R. Vogt and T. J. Wallington, "Vehicle criteria pollutant (PM, NO_x, CO, HCs) emissions: how low should we go?," *Climae and Atmospheric Science*, vol. 26, 2018.
- [2] A. A. Abdel-Rahman, "ON THE EMISSIONS FROM INTERNAL-COMBUSTION ENGINES: A REVIEW," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, vol. 22, pp. 489-513, 1998.
- [3] B. O. Varga , F. Mariasiu, C. D. Miclea, I. Szabo, A. A. Sirca and V. Nicolae, "Direct and Indirect Environmental Aspects of an Electric Bus Fleet Under Service," *Energies*, vol. 13, no. 2, p. 336, 2020.
- [4] A. Adeyanju Anthony, "Effects of Vehicular Emissions on Human Health," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 6, no. 6, 2018.
- [5] A. Sydbom, A. Blomberg, S. Parnia, N. Stenfors, T. Sandström and S.-E. Dahlén, "Health effects of diesel exhaust emissions," *European Respiratory Journal*, vol. 17, pp. 733-746, 2001.
- [6] *** ANNUAL ENERGY OUTLOOK 2022, ,,," 2022. [Interactiv]. Available: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2022_ChartLibrary_full.pdf. [Accesat 01 08 2022].
- [7] F. Mariasiu, A. Borzan, M. Motogna and I. Szabo, "PERFORMANCE ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLES AVAILABLE IN THE CURRENT AUTOMOTIVE MARKET," *THE ANNALS OF "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE IX. METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE*, vol. 42, pp. 25-30, 2019.
- [8] K. T. Chau and C. C. Chan, "Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, pp. 821-835, 2007.
- [9] R. Schmidt and M. Iyengar, "Information technology energy usage and our planet," *Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp. 1255-1275, 2008.

- [10] H. Liu, Z. Wei and J. Zhao, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review," vol. 150, pp. 304-330, 2017.
- [11] M. Morimoto, "Which is the First Electric Vehicle?," *Electrical Enngineering in Japan*, vol. 192, no. 2, pp. 31-38, 2015.
- [12] M. REBECCA, „The History of the Electric Car,” 2014. [Interactiv]. Available: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>. [Accesat 15 08 2021].
- [13] R. Collin, Y. Miao, A. Yokochi, P. Enjeti and a. A. v. Jouanne, "Advanced Electric Vehicle Fast-Charging Technologies," *ENERGIES*, vol. 12, no. 10, p. 1839, 2019.
- [14] P. Z. Lévy, Y. Drossinos and C. Thiel, "The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership," *Energy Policy*, vol. 105, pp. 524-533, 2017.
- [15] *** Statista Mobility Market Outlook, 2019. [Interactiv]. Available: <https://www.statista.com/outlook/mobility>. [Accesat 05 05 2019].
- [16] *** Global electric passenger vehicle fleet size 2021-2025, 2022. [Interactiv]. Available: <https://www.statista.com/statistics/970958/worldwide-number-of-electric-vehicles/#:~:text=It%20is%20expected%20that%20there,12%20million%20units%20in%202021..> [Accesat 10 05 2022].
- [17] M. Guarnieri, "Looking Back to Electric Cars," *2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)*, pp. 1-6, 2012.
- [18] *** International Electric Motor Sports Association IEMSA, „ EV Racing History,” . [Interactiv]. [Accesat 27 05 2020].
- [19] S. Mohammed, . K. Alsafadi, I. Takács and E. Harsányi, "Contemporary changes of greenhouse gases emission from the agricultural sector in the EU-27," *Geology, Ecology, and Landscapes*, vol. 4, no. 4, pp. 282-287, 2020.
- [20] P. Mock, „2020-2030 CO2 standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union,” 2016. [Interactiv]. Available: <https://theicct.org/publication/2020-2030-co2->

standards-for-new-cars-and-light-commercial-vehicles-in-the-european-union/. [Accesat 10 12 2018].

- [21] Y. Chen, Y. Ma, P. Duan and H. Chen, "Estimation of State of Charge for Lithium-ion Battery Considering Effect of Aging and Temperature," *Proceedings of the 2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 8472-8477, 2018.
- [22] *** Battery Warmup Can Speed Tesla Charging, 2019. [Interactiv]. Available: <https://www.autonews.com/technology/battery-warmup-can-speed-tesla-charging>. [Accesat 5 11 2019].
- [23] A. A. Pesaran, V. Andreas și S. D. Burch, „Thermal Performance of EV and HEV Battery Modules and Packs,” 1997. [Interactiv]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/23527.pdf>. [Accesat 15 01 2019].
- [24] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah and E. Hossain, "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development," *Energies*, p. 1217, 2017.
- [25] Q. Nan, „Electric Vehicle Architectures,” 2016. [Interactiv]. Available: <https://docplayer.net/49164007-Electric-vehicle-architectures-nan-qin-oct.html>. [Accesat 15 01 2019].
- [26] B. Wang, M. Xu and L. Yang, "Study on the economic and environmental benefits of different EV powertrain topologies," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 916-926, 2014.
- [27] S. Rinderknecht and T. Meier, "Electric Power Train Configurations and Their Transmission Systems," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 1564-1568, 2010.
- [28] *** Global EV Outlook: Accelerating ambitions despite the pandemic, „” 2021. [Interactiv]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/global-ev-outlook-2021_3a394362-en. [Accesat 16 10 2021].
- [29] O. M. Forero Camacho and L. Mihet-Popa, "Fast Charging and Smart Charging Tests for Electric Vehicles Batteries Using Renewable Energy," *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 71, no. 1, p. 12, 2014.

- [30] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 247-275, 2002.
- [31] M. Kane, „Compare Electric Cars: EV Range, Specs, Pricing & More,” 2021. [Interactiv]. Available: <https://insideevs.com/reviews/344001/compare-evs/>. [Accesat 06 07 2021].
- [32] Y. Miao, P. Hynan, A. v. Jouanne and A. Yokochi, "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements," *Energies*, vol. 12, no. 6, p. 1074, 2019.
- [33] J. Zhu, T. Wierzbicki and W. Li, "A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 378, pp. 153-168, 2018.
- [34] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain., Y. Yusof and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," *SPECIAL SECTION ON ADVANCED ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES*, vol. 6, pp. 19362 - 19378, 2018.
- [35] C. Delmas, I. Saadoune and A. Rougier, "The cycling properties of the $\text{Li}_x\text{Ni}_y\text{CO}_y\text{O}_2$ electrode," *Journal of Power Sources*, vol. 44, no. 1-3, pp. 595-602, 1993.
- [36] E. Rossen, C. D. W. Jones and J. R. Dahn, "Structure and electrochemistry of $\text{Li}_x\text{MnyNi}_{1-y}\text{O}_2$," *Solid State Ionic*, vol. 57, pp. 311-318, 1992.
- [37] T. Ohzuku, A. Ueda and M. Kouguchi, "Synthesis and Characterization of $\text{LiAl}_{1/4}\text{Ni}_{3/4}\text{O}_2(\text{R}3\text{m})$ for Li-ion (Shuttlecock) Batteries," *The Electrochemical Society*, pp. 4033-4039, 1995.
- [38] V. Subramanian and G. Ting-Kuo Fey, "Preparation and Characterization of $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.2}\text{Ti}_{0.05}\text{M}_{0.05}\text{O}_2$ (M = Mg, Al and Zn) Systems as Cathode Materials for Lithium Batteries," *Solid State Ion*, vol. 148, no. 3-4, pp. 351-358, 2002.
- [39] C. Poullierie., L. Croguennec. and C. Delmas., "The $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-y}\text{MgyO}_2$ (y = 0.05, 0.10) System: Structural Modifications Observed upon Cycling," *Solid State Ion*, vol. 132, pp. 15-29, 2000.

- [40] M. Thackeray, W. David, P. Bruce and J. Goodenough, "LITHIUM INSERTION INTO MANGANESE SPINELS," *Inorganic Chemistry Laboratory*, vol. 18, pp. 461-472, 1983.
- [41] J. M. Tarascon, "The Li-Ion Battery: 25 Years of Exciting and Enriching Experiences," *The Electrochemical Society*, vol. 25, p. 79, 2016.
- [42] *** BU-205: Types of Lithium-ion, [Interactiv]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>. [Accesat 20 05 2021].
- [43] *** Christopher Arcus, „Exciting Developments In NMC 811 Lithium Battery Technology,” 2018. [Interactiv]. Available: <https://cleantechnica.com/2018/03/04/exciting-developments-nmc-811-lithium-battery-technology/>. [Accesat 05 03 2021].
- [44] *** Why Tesla’s grid batteries will use two different chemistries, 18 05 2015. [Interactiv]. Available: <https://fortune.com/2015/05/18/tesla-grid-batteries-chemistry/>. [Accesat 05 03 2021].
- [45] *** Tesla Panasonic Quietly Outmaneuver All Lithium Battery Manufacturers, 2018. [Interactiv]. Available: <https://insideevs.com/news/338268/tesla-panasonic-quietly-outmaneuver-all-lithium-battery-manufacturers/>. [Accesat 05 03 2021].
- [46] K. Kinoshita and K. Zaghib, "Negative Electrodes for Li-ion Batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 416-423, 2002.
- [47] C. Mao, M. Wood, L. David, S. J. An, . Y. Sheng, Z. Du, H. M. Meyer III, R. E. Ruther and D. L. Wood III, "Selecting the Best Graphite for Long-Life, High-Energy Li-Ion Batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 165, no. 9, pp. 1837-1845, 2018.
- [48] *** Toshiba’s SCiB battery for the Fit EV, Green Car Congress, 2011. [Interactiv]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2011/11/scib20111117.html>. [Accesat 25 7 2021].
- [49] *** All About Batteries, Part 12: Lithium Titanate (LTO), POWER MANAGEMENT DESIGNLINE, 2015. [Interactiv]. Available:

<https://www.eetimes.com/all-about-batteries-part-12-lithium-titanate-lto/>. [Accessed 25 07 2021].

- [50] W. Xu, J. Wang, F. Ding, X. Chen, E. Nasybulin, Y. Zhang and J.-G. Zhang, "Lithium metal anodes for rechargeable batteries," *Energy & Environmental Science*, vol. 7, no. 2, pp. 513-537, 2014.
- [51] R. Wang, W. Cui, F. Chu and F. Wu, "Lithium metal anodes: Present and future," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 48, pp. 145-159, 2020.
- [52] M. Wang, F. Zhang, C.-S. Lee and Y. Tang, "Low-Cost Metallic Anode Materials for High Performance Rechargeable Batteries," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 23, 2017.
- [53] D. S. M. Iaboni and M. N. Obrovac, "Li₁₅Si₄ Formation in Silicon Thin Film Negative Electrodes," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 163, no. 2, pp. 255-261, 2016.
- [54] M. T. McDowell, S. W. Lee, W. D. Nix and Y. Cui, "Understanding the Lithiation of Silicon and Other Alloying Anodes for Lithium-Ion Batteries," *Advanced Materials*, vol. 25, no. 36, p. 4966-4985, 2013.
- [55] M. Gu, Y. He, J. Zheng and C. Wang, "Nanoscale silicon as anode for Li-ion batteries: The fundamentals, promises, and challenges," *Nano Energy*, vol. 17, pp. 366-383, 2015.
- [56] N. Ding, J. Xu, G. Wegner, X. Fang, C. H. Chen and I. Lieberwirth, "Determination of the diffusion coefficient of lithium ions in nano-Si," *Solid State Ionics*, vol. 180, no. 2-3, pp. 222-225, 2009.
- [57] A. Manthiram, X. Yu and S. Wang, "Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes," *Nature Reviews Materials*, vol. 2, no. 4, p. 16103, 2017.
- [58] *** Our Guide to Batteries, 2015. [Interactiv]. Available: <https://energystorage-cdt.ac.uk/publications-and-reports/Johnson+Matthey+Battery+Guide.pdf>. [Accessed 23 07 2021].
- [59] J. Xu, J. Ma, X. Zhao, H. Chen, B. Xu and X. Wu, "Detection Technology for Battery Safety in Electric Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4636, 2020.

- [60] X. Feng, M. Ouyanga, X. Liua, L. Lua, Y. Xiaa and X. Hea, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246-267, 2018.
- [61] *** Energy.GOV, „Timeline: History of the Electric Car,” 2014. [Interactiv]. Available: <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>. [Accesat 24 03 2020].
- [62] E. C. Evarts , "Lithium batteries: To the limits of lithium," *Nature*, vol. 526, pp. 93-95, 2015.
- [63] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu and X. Huang, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," *Fire Technology*, vol. 56, pp. 1361-1410, 2020.
- [64] *** Renault-Samsung’s Electric Vehicle Catches Fire Due to Ignition from Bonnet, 2016. [Interactiv]. Available: <https://english.etnews.com/20160127200001>. [Accesat 10 12 2019].
- [65] *** CALCE Battery Research Group 2015., „” 2015. [Interactiv]. Available: <https://web.calce.umd.edu/batteries/safety.html>. [Accesat 30 03 2021].
- [66] *** National transportation safety board. Preliminary Report - Battery Fire in Electric-powered Passenger Car, National Transportation Safety Board, 2018. [Interactiv]. Available: <https://www.nts.gov/investigations/accidentreports/pages/hwy18fh014-preliminary.aspx>. [Accesat 30 03 2021].
- [67] *** Home of EV, „What should we do during the EV fire?,” 2018. [Interactiv]. Available: https://www.sohu.com/a/233521985_526255. [Accesat 30 03 2021].
- [68] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), „Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles,” 2017. [Interactiv]. Available: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/12848-lithiumionsafetyhybrids_101217-v3-tag.pdf. [Accesat 12 04 2021].
- [69] *** UL 2580. Batteries for use in electric vehicles, 2020. [Interactiv]. Available: https://standardscatalog.ul.com/ProductDetail.aspx?productId=UL2580_3_S_20200311. [Accesat 03 05 2020].

- [70] T. Unkelhaeuser and D. Smallwood, "United States advanced battery consortium electrochemical storage system abuse test procedure manual," 1999. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/9463>. [Accessed 08 04 2020].
- [71] D. H. Doughty și C. C. Crafts, „FreedomCAR :electrical energy storage system abuse test manual for electric and hybrid electric vehicle applications,,” 2006. [Interactiv]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/889934>. [Accesat 08 04 2020].
- [72] H. Jung și B. L. Kwang, „Status of Korean EVS Regulation,” 2012. [Interactiv]. Available: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2012/wp29grsp/EVS-1-11.pdf>. [Accesat 04 05 2020].
- [73] *** AUTOMOTIVE INDUSTRY STANDARD, „Battery operated vehicles – safety requirements of traction batteries,” 2009. [Interactiv]. Available: <https://emobility.araiindia.com/wp-content/uploads/2018/06/AIS-048.pdf>.
- [74] *** Regulations Spotlight, „New Chinese Standards on Electric Vehicles and Batteries Published,” 2020. [Interactiv]. Available: <https://www.interregs.com/articles/spotlight/new-chinese-standards-on-electric-vehicles-and-batteries-published-000219>. [Accesat 23 10 2020].
- [75] *** SAE Mobilus, „Electric and hybrid electric vehicle rechargeable energy storage system (RESS) safety and abuse testing,” 2021. [Interactiv]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2464_202108/. [Accesat 05 10 2021].
- [76] *** SAE J2929, „Safety standards for electric and hybrid vehicle propulsion battery,” 2013. [Interactiv]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2929_201302. [Accesat 06 10 2021].
- [77] *** ISO 12405-1, „Electrically propelled road vehicles – test specification for lithium-ion traction battery packs and systems Part 1: high-power applications,” 2018. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/standard/51414.html>. [Accesat 06 10 2021].
- [78] *** ISO 12405-2, "Electrically propelled road vehicles – test specification for lithium-ion traction battery packs and systems Part 2: high-energy applications," 2018. [Online]. Available:

<https://www.iso.org/standard/55854.html>. [Accessed 06 10 2021].

- [79] *** ISO 12405-3, „Electrically propelled road vehicles – test specification for lithium-ion traction battery packs and systems Part 3: Safety performance requirements,” 2019. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/standard/59224.html>. [Accesat 07 10 2021].
- [80] *** IEC 62660-2, "Rechargeable cells standards publication secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 2: reliability and abuse testing," 2018. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/27387>. [Accessed 2021].
- [81] *** IEC 62660-3, „Rechargeable cells standards publication secondary lithiumion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 3: safety requirements of cells and modules,” 2022. [Interactiv]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/324bb41a-42b8-42b8-9dd1-5ae554333fb7/sist-en-iec-62660-3-2022>. [Accesat 05 06 2022].
- [82] *** Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train, „” 2011. [Interactiv]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A42011X0302%2801%29>. [Accesat 10 10 2021].
- [83] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. V. d. Bossche and L. Boon-Brett, "A review of international abuse testing standards and regulations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1427-1452, 2018.
- [84] *** IEC 62133-2, „Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes -Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications. Part 2,” 2019. [Interactiv]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/601f7d90-e4d2-4a28-8093-338bf87c1606/en-62133-2-2017-a1-2021>. [Accesat 07 10 2021].
- [85] *** IEC 62619, „Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes -Safety requirements for large format

- secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications," 2017. [Interactiv]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/bc812267-3c62-4175-b93e-c91120c8abad/en-62619-2017>. [Accesat 07 10 2021].
- [86] *** RTCA DO -311, „Minimum operational performance standards for rechargeable lithium battery systems,” 2017. [Interactiv]. Available: <https://standards.globalspec.com/std/10270501/RTCA%20DO-311>. [Accesat 08 10 2021].
- [87] *** UL1973, „Second edition: Standard for batteries for use in light electric rail (LER) applications and stationary applications,” 2018. [Interactiv]. Available: <https://webstore.ansi.org/Standards/UL/ul1973ed2018>. [Accesat 09 10 2021].
- [88] *** VDE-AR-E 2510-50, „Stationary battery energy storage systems with lithium batteries - Safety requirements,” 2017. [Interactiv]. Available: 09.
- [89] *** Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train, „” 2011. [Interactiv]. Available: 09.
- [90] *** Global Technical Regulations (GTRs), „” 2018. [Online]. Available: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a20e.pdf>. [Accessed 10 10 2021].
- [91] L. Berzi, N. Baldanzini, D. Barbani, M. Delogu, R. Sala and M. Pierini, "Simulation of crash events for an electric four wheel vehicle," *Conference on Stress Analysis*, vol. 12, pp. 249-264, 2018.
- [92] W.-J. Lai, M. Y. Ali and J. Pan, "Mechanical behavior of representative volume elements of lithiumion battery modules under various loading conditions," *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 789-808, 2014.
- [93] S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq, M. Petit, V. Sauvart-Moynot and F. Huet, "Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review," *Journal of Power Sources*, vol. 306, pp. 178-192, 2016.
- [94] Z. Gao, X. Zhang, Y. Xiao, H. Gao, H. Wang and C. Piao, "Influence of Low-Temperature Charge on the Mechanical Integrity Behavior of

18650 Lithium-Ion Battery Cells Subject to Lateral Compression," *Energies*, vol. 12, p. 797, 2019.

- [95] E. Sahraei, J. Meier. and T. W. ., "Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells," *Journal of Power Sources*, vol. 247, pp. 503-516, 2014.
- [96] J. Zhu, X. Zhang, E. Sahraei and T. Wierzbicki, "Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression," *Journal of Power Sources*, vol. 336, pp. 332-340, 2016.
- [97] P. V. Chombo and Y. Laoonual, "A review of safety strategies of a Li-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 478, pp. 228649,, 2020.
- [98] V. Ruiz, A. Pfrang , A. Kriston, N. Omar, P. Van den Bossche and L. Boon-Brett, "A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1427-1452, 2018.
- [99] J. Xu, B. Liu, L. Wang and S. Shang, "Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing," *Engineering Failure Analysis*, vol. 53, pp. 97-110, 2015.
- [100] L. Greve and C. Fehrenbach, "Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells," *Journal of Power Sources*, vol. 214, pp. 377-385, 2012.
- [101] H. Wang, S. Simunovic, H. Maleki and J. N. Howard, "Internal configuration of prismatic lithium-ion cells at the onset of mechanically induced short circuit," *Journal of Power Sources*, vol. 306, pp. 424-430, 2016.
- [102] L. Zhu, Y. Xia, Y. Liu, Y. Ge, L. Wang and L. Zhang, "Extending a Homogenized Model for Characterizing Multidirectional Jellyroll Failure in Prismatic Lithium-Ion Batteries," *Energies*, vol. 14, p. 3444, 2021.
- [103] S. Zhang, Q. Zhou și Y. Xia, „Influence of mass distribution of battery and occupant on crash response of small lightweight electric vehicle.," 2015. [Interactiv]. Available:

<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0575/>. [Accessed 10 12 2021].

- [104] B. Liu, Y. Jia, C. Yuan, X. Gao, S. Yin and J. Xu, "Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 24, pp. 85-112, 2020.
- [105] H. Luo, Y. Xia and Q. Zhou, "Mechanical damage in a lithium-ion pouch cell under indentation loads," *Journal of Power Sources*, vol. 357, pp. 61-70, 2017.
- [106] E. Sahraei, J. Campbell and T. Wierzbicki, "Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions," *Journal of Power Sources*, vol. 220, pp. 360-372, 2012.
- [107] X. Zhang and T. Wierzbicki, "Characterization of plasticity and fracture of shell casing of lithium-ion cylindrical battery," *Journal of Power Sources*, vol. 280, pp. 47-56, 2015.
- [108] J. Lamb and C. J. Orendorff, "Evaluation of mechanical abuse techniques in lithium ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 247, pp. 189-196, 2014.
- [109] B. Liu, S. Yin and J. Xu, "Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 278-289, 2016.
- [110] J. Xu, B. Liu, X. Wang and D. Hu, "Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies," *Applied Energy*, vol. 172, pp. 180-189, 2016.
- [111] E. Sahraei, R. Hill and T. Wierzbicki, "Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity," *Journal of Power Sources*, vol. 201, pp. 307-321, 2012.
- [112] W. Zhao, G. Luo and C.-Y. Wang, "Modeling Nail Penetration Process in Large-Format Li-Ion Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 162, no. 1, pp. 207-217, 2015.
- [113] E. Sahraei, E. Bosco, B. Dixon and B. Lai, "Microscale failure mechanisms leading to internal short circuit in Li-ion batteries under complex loading scenarios," *Journal of Power Sources*, vol. 319, pp. 56-65, 2016.

- [114] L. Wang, S. Yin, Z. Yu, Y. Wang, . T. Yu, J. Zhao, Z. Xie, Y. Li and J. Xu, "Unlocking the significant role of shell material for lithium-ion battery safety," *Materials & Design*, vol. 160, pp. 601-610, 2018.
- [115] X. Zhang, Mechanical Behavior of Shell Casing and Separator of Lithium-ion Battery, Massachusetts Institute of Technology, 2017.
- [116] S. Yang, W. Wang, C. Lin, W. Shen and Y. Li, "Investigation of Internal Short Circuits of Lithium-Ion Batteries under Mechanical Abusive Conditions," *Energies*, vol. 12, no. 10, p. 1885, 2019.
- [117] I. Szabo, L. Kocsis and F. Mariasiu, "Research on the behaviour of a LiFePo4 prismatic cell subjected to mechanical stress," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 898, 2020.
- [118] I. Szabo, L. Kocsis and F. Mariasiu, "Research on the behaviour of a LiFePo4 pouch cell under mechanical stress," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 898, no. 012020, 2020.
- [119] W. Wenwei, L. Yiding, L. Cheng, S. Yuefeng and Y. Sheng, "State of charge-dependent failure prediction model for cylindrical lithiumion batteries under mechanical abuse," *Applied Energy*, vol. 251, p. 113365, 2019.
- [120] Y. Xia, T. Li, F. Ren, Y. Gao and H. Wang, "Failure analysis of pinchetorsion tests as a thermal runaway risk evaluation method of Li-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 265, pp. 356-362, 2014.
- [121] M. J. Brand, S. F. Schuster, T. Bach , E. Fleder, M. Stelz, S. Gläser, J. Müller, G. Sextl and A. Jossen, "Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 288, pp. 62-69, 2015.
- [122] L. Zhang, Z. Ning, H. Peng, Z. Mu and C. Sun, "Effects of Vibration on the Electrical Performance of Lithium-Ion Cells Based on Mathematical Statistics," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 8, p. 802, 2017.
- [123] X. Feng, M. Ouyanga, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246-267, 2018.
- [124] Y. Zheng, X. Han, L. Lu, J. Li and M. Ouyang, "Lithium ion battery pack power fade fault identification based on Shannon entropy in electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 223, pp. 136-146, 2013.

- [125] D. YangJung, B. HaengLee and S. WookKim, "Development of battery management system for nickel–metal hydride batteries in electric vehicle applications," *Journal of Power Sources*, vol. 15, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [126] J. Jaguemont, L. Boulon and Y. Dubé, "A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures," *Applied Energy*, vol. 164, pp. 99-114, 2016.
- [127] M. Shahjalal, T. Shams, M. E. Islam, W. Alam, M. Modak, S. B. Hossain, V. Ramadesigan, M. R. Ahmed, H. Ahmed and A. Iqbal, "A review of thermal management for Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues," *Journal of Energy Storage*, vol. 39, p. 102518, 2021.
- [128] S. Zhang, Z. Shen and Y. Lu, "Research Progress of Thermal Runaway and Safety for Lithium Metal Batteries," *Lithium Metal Anodes*, vol. 37, no. 1, pp. 1-18, 2021.
- [129] P. Peng and F. Jiang, "Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 103, pp. 1008-1016, 2016.
- [130] R. A. Leising, M. J. Palazzo, E. S. Takeuchi and K. J. Takeuchi, "A study of the overcharge reaction of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vols. 97-98, pp. 681-683, 2001.
- [131] *** Reutilizarea bateriilor vehiculelor electrice in transportul public local, 2020. [Interactiv]. Available: <https://www.infotrucker.ro/reutilizare-bateriilor-vehiculelor-electrice-in-transportul-public-local/>. [Accesat 15 02 2022].
- [132] A. Ratner, R. Beaumont and I. Masters, "Dynamic Mechanical Compression Impulse of Lithium-Ion Pouch Cells," *Energies MDPI*, vol. 13, no. 8, pp. 1-13, 2020.
- [133] J. Zhu, T. Wierzbicki and W. Li, "A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 378, pp. 153-168, 2018.
- [134] L. Wang, S. Yin and J. Xu, "A detailed computational model for cylindrical lithium-ion batteries under mechanical loading: From cell deformation to short-circuit onset," *Journal of Power Sources*, vol. 413, pp. 284-292, 2019.

- [135] M. Sheikh, S. Rehman and M. Elkady, "Numerical simulation model for short circuit prediction under compression and bending of 18650 cylindrical lithium-ion battery," *Energy Procedia*, vol. 151, pp. 187-193, 2018.
- [136] T. M. E. Nunes, "Multi-objective Design Optimization of a Frontal Crash Energy Absorption System for a Road-safe Vehicle," *Thesis to obtain the Master of Science Degree in Aerospace Engineering*, 2017.
- [137] *** Prakash Pagadala, „Topography Optimization,” [Interactiv]. Available: https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2015/11/Topography_opti.pdf. [Accesat 09 03 2022].
- [138] L. Morello, L. R. Rossini, G. Pia and A. Tonoli, *The Automotive Body*, vol. Volume I: Components Design, Mechanical Engineering Series, Springer, 2011.
- [139] Y. LÉOST și M. BOLJEN, „CRASH SIMULATIONS OF ELECTRIC CARS IN THE EVERSAFE PROJECT,” [Interactiv]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/41823135.pdf>. [Accesat 17 03 2022].
- [140] J. D. Ellway, "The development of an advanced european mobile deformable barrier face," [Online]. Available: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/19/05-0239-0.pdf>. [Accessed 17 03 2022].
- [141] L. Scurtu, I. Szabo, F. Mariasiu, D. Moldovanu, L. Mihali and A. Jurco, "Numerical analysis of the influence of mechanical stress on the battery pack's housing of an electric vehicle," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 568, pp. 1-6, 2019.
- [142] *** A look at the new LF Sonata body structure (BIW), „” [Interactiv]. Available: <https://m.blog.naver.com/mockory/207338747>. [Accesat 12 03 2022].
- [143] J. Reimers., E. Rossen., C. Jones. and J. Dahn., "Structure and electrochemistry of $\text{LiFe}_y\text{Ni}_{1-y}\text{O}_2$," *Solid State Ionics*, vol. 61, pp. 335-344, 1993.
- [144] Q.-Q. Ren., Z.-B. Wang., K. Ke., S.-W. Zhang. and B.-S. Yin., "NiCo₂O₄ nanosheets and nanocones as additive-free anodes for high-

- performance Li-ion batteries," *Ceramics International*, vol. 43, pp. 13710-13716, 2017.
- [145] Z. Rao. and S. Wang., "A review of power battery thermal energy management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4554-4571, 2011.
- [146] I. Avdeev and M. Gilaki, "Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithium-ion battery cells subject to lateral impact," *Journal of Power Sources*, vol. 271, pp. 382-391, 2014.
- [147] C. Zhao, B. Zhang, Y. Zheng, S. Huang, T. Yan and X. Liu , "Hybrid Battery Thermal Management System," *Energies*, vol. 13, p. 6257, 2020.
- [148] S.-H. Yu, X. Feng, N. Zhang, J. Seok and H. D. Abruña, "Understanding Conversion-Type Electrodes for Lithium Rechargeable Batteries," *Accounts of Chemical Research*, pp. 273-281, 2018.
- [149] L. Zhang, Q. Wei, D. Sun, N. Li, H. Ju, J. Feng, J. Zhu, L. Mai, E. J. Cairns and J. Guo, "Conversion reaction of vanadium sulfide electrode in the lithium-ion cell:," *Nano Energy*, vol. 51, pp. 391-399, 2018.

Lista figurilor

Fig. 1.1 Consumul energetic pe plan mondial (adaptare după [6])	15
Fig. 1.2 Emisia de CO ₂ pe plan mondial în funcție de domeniile de utilizare (adaptare după [6])	16
Fig. 1.3 Obiectivul general al tezei de doctorat corelat cu obiectivele secundare specifice	18
Fig. 1.4 Algoritm de desfășurare a activităților de cercetare	20
Fig. 2.1 Istoria, respectiv evoluția vehiculelor electrice [6, 12, 15, 16, 17, 18]	24
Fig. 2.2 Evoluția emisiilor de gaze cu efect de seră (CO ₂) din UE pe sectoare, inclusiv un interval propus pentru reducerea nivelului emisiilor cu 80-95% până în 2050 (adaptare după [20])	26
Fig. 2.3 Tipologia vehiculelor în funcție de tipul grupului propulsor [22]	27
Fig. 2.4 Configurația unui vehicul electric (adaptare după [24])	27
Fig. 2.5 Tipologii de propulsie a EV: (a) - propulsor montat central; (b) - propulsor integrat în roți (HUB); (c) - reductor și motor integrat în roți; (d) - două sisteme propulsoare independente (adaptare după [25]) ..	28
Fig. 2.6 Direcția fluxului de putere în timpul pornirii și la oprire (adaptare după [24])	29
Fig. 2.7 Direcția fluxului de putere în timpul depășirii, frânării și mersului normal (adaptare după [24])	30
Fig. 2.8 Construcția unui automobil pe bază de celulă de combustie cu hidrogen (adaptare după [24])	31
Fig. 2.9 Secțiunea unui strat la o celulă litiu-ion (adaptare după [33]) ..	34
Fig. 2.10 Modele de celule litiu-ion	40
Fig. 2.11 Incendii în caz de accident la vehicule electrice [63]	42
Fig. 2.12 Solicitățile apărute la bateriile litiu-ion în timpul accidentelor	44
Fig. 2.13 Deformări cvasi-statice efectuate pe celula de tipul 18605 (HP 602030) (adaptare după [99])	45
Fig. 2.14. Solicitarea de deformare mecanică a celulelor la acțiunea unei bile de oțel (adaptare după [69])	46

Fig. 2.15 Configurația experimentală de solicitare a celulei prismatice pe cele trei axe (adaptare după [102]).	49
Fig. 2.16 Rezultatele experimentului, curba forță-deplasare (adaptare după [102]).	49
Fig. 2.17 Modul de deformare al celulei în timpul experimentului (adaptare după [102]).	49
Fig. 2.18 Tipuri de deformări mecanice la o celulă electrochimică de tip pungă: a-deformare cu doua bile, b- comprimare plană, c- încovoiere simplă, d- deformare cu o bilă, e-deformare laterală, f- încovoiere in trei puncte (adaptare după [33])	50
Fig. 2.19 Indentatoare utilizate in cadrul testului experimental	53
Fig. 2.20 a - Modele cu element finit aplicat la celulele de tip pungă, b - Curba forță-deplasare, test experimental vs simulare (adaptare după [95]).	54
Fig. 3.1 Schema de principiu a metodologiei de cercetare experimentală	59
Fig. 3.2 Stand experimental	60
Fig. 3.3 Traductorul de forță	61
Fig. 3.4 Convertorul de semnal	61
Fig. 3.5 Exemplu cu interfața programului de înregistrare și interpretare a semnalului primit de la traductorul de forță	62
Fig. 3.6 Tipurile de scule indentatoare folosite la încercări	63
Fig. 3.7 Dimensiunea sculelor indentatoare folosite in încercări	63
Fig. 3.8 Ansamblu placă de încercări	64
Fig. 3.9 Dispozitiv cu role	64
Fig. 3.10 Tipuri de celule folosite în timpul experimentului	65
Fig. 3.11 Experiment încovoiere în trei puncte a celulei cilindrice	68
Fig. 3.12 Variație încărcare celulă cilindrică la încovoierea în trei puncte	68
Fig. 3.13 Variația deformării la încovoiere în trei puncte	69
Fig. 3.14 Variația tensiunii la încovoiere în trei puncte - celulă cilindrică	69
Fig. 3.15 Variația temperaturii la încovoiere în trei puncte - celulă cilindrică	69

Fig. 3.16 Curba forță-deplasare la încovoierea în trei puncte a celulei 18650	69
Fig. 3.17 Experiment de încovoiere simplă pe celula cilindrică.....	70
Fig. 3.18 Variația forței la încovoierea simplă a celulei cilindrice.....	70
Fig. 3.19 Variația deformării la încovoierea simplă a celulei cilindrice.	70
Fig. 3.20 Variația tensiunii la încovoierea simplă a celulei cilindrice.....	71
Fig. 3.21 Variația temperaturii la încovoierea simplă a celulei cilindrice	71
Fig. 3.22 Curba forță-deplasare la încovoierea simplă a celulei 18650 .	71
Fig. 3.23 Deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund	71
Fig. 3.24 Variația forței la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund	72
Fig. 3.25 Variația deplasării la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund	72
Fig. 3.26 Variația tensiunii la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund	72
Fig. 3.27 Variația temperaturii la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund	72
Fig. 3.28 Variația forță-deplasare la deformarea celulei 18650 cu vârf semirotund	73
Fig. 3.29 Străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit.....	73
Fig. 3.30 Variația forței la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	73
Fig. 3.31 Variația deplasării la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	74
Fig. 3.32 Variația tensiunii la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	74
Fig. 3.33 Variația temperaturii la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	74
Fig. 3.34 Curba forță-deplasare la străpungerea celulei 18650 cu vârf ascuțit	74
Fig. 3.35 Disponerea celulei 21700 la încovoierea în trei puncte	75

Fig. 3.36 a - Variația forței pentru celula 21700 la încovoierea în trei puncte; b - Variația deplasării la încovoierea în trei puncte a celulei 21700.....	75
Fig. 3.37 a - Variația tensiunii la încovoiere în trei puncte la celula 21700; b - Variația temperaturii la încovoierea în trei puncte	75
Fig. 3.38 Curba forță-deplasare la încovoierea în trei puncte a celulei 21700.....	76
Fig. 3.39 Dispunerea celulei 21700 la încovoierea simplă.....	76
Fig. 3.40 a - Variația forței la încovoierea celulei 21700 într-un punct; b - Variația deformării la încovoierea celulei într-un punct	76
Fig. 3.41 a - Variația tensiunii la încovoierea celulei 21700 într-un punct; b - Variația temperaturii la încovoierea celulei într-un punct.....	77
Fig. 3.42 Curba forță-deplasare la încovoierea celulei 21700 într-un punct	77
Fig. 3.43 Deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund	77
Fig. 3.44 a - Variația forței la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund; b - Variația deplasării la deformarea celulei cu vârf semirotund	78
Fig. 3.45 a - Variația tensiunii la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund; b - Variația temperaturii la deformarea celulei cilindrice cu vârf semirotund	78
Fig. 3.46 Variația forță-deplasare la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund	78
Fig. 3.47 Străpungerea celulei cilindrice 21700 cu vârf ascuțit.....	79
Fig. 3.48 a - Variația forței la străpungerea celulei cilindrice 21700 cu vârf ascuțit; b -Variația deplasării la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	79
Fig. 3.49 a - Variația tensiunii la străpungerea celulei cilindrice 21700 cu vârf ascuțit; b- Variația temperaturii la străpungerea celulei cilindrice cu vârf ascuțit	79
Fig. 3.50 Curba forță-deplasare la străpungerea celulei 21700 cu vârf ascuțit	80
Fig. 3.51 Deformarea celulei prismatice cu dispozitivul T [117].....	80

Fig. 3.52 Variația forței celulei prismatice în cazul deformării în trei puncte	80
Fig. 3.53 Variația deformării celulei prismatice în cazul deformării în trei puncte.....	80
Fig. 3.54 Variația tensiunii pentru celula prismatică în cazul deformării în trei puncte.....	81
Fig. 3.55 Variația temperaturii pentru celula prismatică în cazul deformării în trei puncte.....	81
Fig. 3.56 Încovoierea simplă la celulele prismatice [117]	82
Fig. 3.57 Variația forței pe celula prismatică în cazul deformării simple	82
Fig. 3.58 Variația deformării pe celula prismatică în cazul încovoierii simple	82
Fig. 3.59 Variația tensiunii pe celula prismatică în cazul încovoierii simple	82
Fig. 3.60 Variația temperaturii pe celula prismatică în cazul încovoierii simple	83
Fig. 3.61 Curba forță-deplasare la încovoierea într-un punct a celulei prismatice	83
Fig. 3.62 Deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund [117]	83
Fig. 3.63 Variația forței pe celula prismatică în cazul deformării cu vârf semirotund	84
Fig. 3.64 Variația deformării pe celula prismatică în cazul penetrării cu vârf semirotund	84
Fig. 3.65 Variația tensiunii pe celula prismatică în cazul penetrării cu vârf semirotund	84
Fig. 3.66 Variația temperaturii pe celula prismatică în cazul penetrării cu vârf semirotund	84
Fig. 3.67 Curba forță-deplasare la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund	84
Fig. 3.68 Străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit [117]	85
Fig. 3.69 Variația forței pe celula prismatică în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	85

Fig. 3.70 Variația deformării pe celula prismatică în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	85
Fig. 3.71 Variația tensiunii pe celula prismatică în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	85
Fig. 3.72 Variația temperaturii pe celula prismatică în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	86
Fig. 3.73 Deformarea celulei tip pungă cu dispozitivul T [118]	86
Fig. 3.74 Variația forței pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte.....	86
Fig. 3.75 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte.....	87
Fig. 3.76 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte.....	87
Fig. 3.77 Variația temperaturii pe celula de tip pungă în cazul deformării în trei puncte	87
Fig. 3.78 Curba forță-deplasare la încovoierea în trei puncte a celulei prismatice	87
Fig. 3.79 Încovoierea simplă pe celula de tip pungă [118].....	88
Fig. 3.80 Variația forței pe celula tip pungă în cazul deformării simple	88
Fig. 3.81 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul deformării simple	88
Fig. 3.82 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul deformării simple	88
Fig. 3.83 Variația temperaturii pe celula tip de pungă în cazul deformării simple	88
Fig. 3.84 Curba forță-deplasare la încovoierea într-un punct al celulei de tip pungă.....	89
Fig. 3.85 Deformarea celulei de tip pungă cu vârf semirotund [118]	89
Fig. 3.86 Variația fortei pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund	89
Fig. 3.87 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund	90
Fig. 3.88 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund	90

Fig. 3.89 Variația temperaturii pe celula de tip pungă în cazul deformării cu vârf semirotund	90
Fig. 3.90 Curba forță-deplasare pentru celula de tip pungă la deformarea cu vârf semirotund.....	90
Fig. 3.91 Străpungerea celulei de tip pungă cu vârf ascuțit [118].....	91
Fig. 3.92 Variația forței pe celulă de tip pungă în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	91
Fig. 3.93 Variația deplasării pe celula de tip pungă în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	91
Fig. 3.94 Variația tensiunii pe celula de tip pungă în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	91
Fig. 3.95 Variația temperaturii pe celula de tip pungă în cazul străpungerii cu vârf ascuțit	92
Fig. 3.96 Curba forță-deplasare la străpungerea celulei de tip pungă....	92
Fig. 3.97 Celula cilindrică deformată prin încovoierea în trei puncte ..	93
Fig. 3.98 Celula prismatică deformată prin încovoierea în trei puncte.	93
Fig. 3.99 Celula de tip pungă deformată prin încovoierea în trei puncte	93
Fig. 3.100 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor prin încovoierea în trei puncte la cele 4 tipuri de celule	94
Fig. 3.101 Celula cilindrică deformată prin încovoierea simplă	95
Fig. 3.102 Celula prismatică deformată prin încovoierea simplă.....	95
Fig. 3.103 Celula de tip pungă deformată prin încovoierea simplă	95
Fig. 3.104 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor de încovoiere simplă la cele 4 tipuri de celule	96
Fig. 3.105 Celula cilindrică deformată prin deformare cu vârf semirotund	96
Fig. 3.106 Celula prismatică deformată cu vârf semirotund	97
Fig. 3.107 Celula de tip pungă deformată prin străpungere cu vârf semirotund	97
Fig. 3.108 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor de deformare cu vârf semirotund la cele 4 tipuri de celule	98

Fig. 3.109 Celula cilindrică deformată prin străpungere cu vârf ascuțit	99
Fig. 3.110 Celula prismatică deformată prin străpungere cu vârf ascuțit	99
Fig. 3.111 Celula de tip pungă deformată prin străpungere cu vârf ascuțit	99
Fig. 3.112 Compararea valorilor maxime rezultate în urma experimentelor de străpungere cu vârf ascuțit la cele 4 tipuri de celule	100
Fig. 4.1 Schemă de desfășurare a activităților de simulare.....	102
Fig. 4.2 Straturile din interiorul celulelor de tipul 18650 și 21700	102
Fig. 4.3 Structura straturilor la celula prismatică și la cea de tip pungă	104
Fig. 4.4 Schema procesului de analiză și simulare a solicitărilor structurale asupra unei celule energetice [136]	105
Fig. 4.5 Model pentru încovoiere în trei puncte la celula 18650	107
Fig. 4.6 Tensiunea Von Mises la încovoierea în trei puncte la celula 18650.....	107
Fig. 4.7 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea în trei puncte a celulei 18650	108
Fig. 4.8 Model CAD pentru simularea încovoierii simple la celula 18650	108
Fig. 4.9 Tensiunea Von Mises la încovoierea simplă a celulei 18650 ..	109
Fig. 4.10 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea simplă a celulei 18650	109
Fig. 4.11 Model CAD pentru simularea deformării cu vârf semirotund a celulei 18650	109
Fig. 4.12 Tensiunea Von Mises la deformarea cu vârf semirotund a celulei 18650	110
Fig. 4.13 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea cu vârf semirotund a celulei 18650	110
Fig. 4.14 Model CAD al simulării celulei 18650 la străpungerea cu vârf ascuțit	111
Fig. 4.15 Tensiunea Von Mises la străpungerea celulei 18650 cu vârf ascuțit	111

Fig. 4.16 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei 18650 cu vârf ascuțit	111
Fig. 4.17 Model CAD pentru simularea încovoierii în trei puncte a celulei 21700.....	112
Fig. 4.18 Tensiunea Von Mises în celula 21700 la încovoierea în trei puncte.....	112
Fig. 4.19 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea în trei puncte a celulei 21700.....	113
Fig. 4.20 Model CAD pentru simularea încovoierii simple a celulei 21700.....	113
Fig. 4.21 Tensiunea Von Mises în celula 21700 la încovoierea simplă	114
Fig. 4.22 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea simplă a celulei 21700.....	114
Fig. 4.23 Model CAD pentru simularea deformării cu vârf semirotund a celulei 21700.....	114
Fig. 4.24 Tensiunea Von Mises la celula 21700 în cazul deformării cu vârf semirotund.....	115
Fig. 4.25 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea celulei 21700 cu vârf semirotund	115
Fig. 4.26 Model CAD utilizat la străpungerea celulei 21700 cu vârf ascuțit	116
Fig. 4.27 Tensiunea Von Mises în celula 21700 la străpungerea cu vârf ascuțit	116
Fig. 4.28 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei 21700 cu vârf ascuțit	116
Fig. 4.29 Model CAD utilizat la simularea încovoierii în trei puncte a celulei prismatice.....	117
Fig. 4.30 Tensiunea Von Mises la încovoierea în trei puncte a celulei prismatice	118
Fig. 4.31 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea	118
Fig. 4.32 Model CAD pentru simularea încovoierii simple pe celula prismatică	118
Fig. 4.33 Tensiunea Von Mises la încovoierea simplă a celulei prismatice	119

Fig. 4.34 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea simplă a celulei prismatice	119
Fig. 4.35 Model CAD utilizat la simularea deformării celulei prismatice cu vârf semirotund	120
Fig. 4.36 Tensiunea Von Mises la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund	120
Fig. 4.37 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea celulei prismatice cu vârf semirotund.....	120
Fig. 4.38 Model CAD utilizat pentru simularea străpungerii celulei prismatice	121
Fig. 4.39 Tensiunea Von Mises la străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit	121
Fig. 4.40 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei prismatice cu vârf ascuțit.....	122
Fig. 4.41 Model CAD utilizat pentru simularea încovoierii	122
Fig. 4.42 Tensiunea Von Mises la încovoierea în trei puncte a celulei de tip pungă.....	123
Fig. 4.43 Curba forță-deplasare rezultată la încovoierea în trei puncte a celulei de tip pungă	123
Fig. 4.44 Model CAD utilizat la simularea încovoierii simple pe celula de tip pungă.....	123
Fig. 4.45 Tensiunea Von Mises la încovoierea simplă a celulei de tip pungă	124
Fig. 4.46 Curba forță-deplasare rezultată în urma încovoierii	124
Fig. 4.47 Model CAD utilizat la simularea deformării cu vârf semirotund a celulei de tip pungă.....	124
Fig. 4.48 Tensiunea Von Mises la celula de tip pungă în urma	125
Fig. 4.49 Curba forță-deplasare rezultată la deformarea celulei de tip pungă cu vârf semirotund.....	125
Fig. 4.50 Model CAD utilizat la simularea străpungerii celulei de tip pungă cu vârf ascuțit.....	126
Fig. 4.51 Tensiunea Von Mises la străpungerea celulei cu vârf ascuțit.....	126
Fig. 4.52 Curba forță-deplasare rezultată la străpungerea celulei.....	126

Fig. 5.1 Comparație rezultate obținute la încovoierea în trei puncte a bateriei 18650	130
Fig. 5.2 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei 18650.....	130
Fig. 5.3 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârful semirotond a bateriei 18650	131
Fig. 5.4 Comparație rezultate obținute la deformarea bateriei 18650	132
Fig. 5.5 Comparație rezultate obținute la încovoierea bateriei 21700 în trei puncte.....	133
Fig. 5.6 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei 21700	133
Fig. 5.7 Comparație rezultate obținute la deformarea bateriei 21700 cu vârf semirotond	134
Fig. 5.8 Comparație rezultate obținute la deformarea bateriei 21700 cu vârf ascuțit	135
Fig. 5.9 Comparație rezultate obținute la încovoierea în trei puncte a bateriei prismatice.....	135
Fig. 5.10 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei prismatice	136
Fig. 5.11 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf semirotond a bateriei prismatice	137
Fig. 5.12 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf ascuțit a baterie prismatice.....	137
Fig. 5.13 Comparație rezultate obținute la încovoierea în trei puncte a bateriei de tip pungă.....	138
Fig. 5.14 Comparație rezultate obținute la încovoierea simplă a bateriei de tip pungă.....	139
Fig. 5.15 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf semirotond a bateriei de tip pungă.....	139
Fig. 5.16 Comparație rezultate obținute la deformarea cu vârf ascuțit a bateriei de tip pungă.....	140
Fig. 6.1 Schema de desfășurare a activităților de simulare.....	143
Fig. 6.2 Părțile componente ale unui modul de baterii.....	144
Fig. 6.3 Schema de desfășurare a procesului de optimizare.....	145

Fig. 6.4 Modelul de carcasă pentru baterie utilizat în simulări.....	146
Fig. 6.5 Grup de baterii compus din 12 module	147
Fig. 6.6 Distribuția energiei pe structura autovehiculului	147
Fig. 6.7 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă simplă, 10 m/s.....	149
Fig. 6.8 Detalii tensiune von Mises, carcasa simplă, 10 m/s.....	150
Fig. 6.9 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă optimizată, 10 m/s	150
Fig. 6.10 Detaliu tensiune von Mises, carcasă optimizată, 10 m/s	151
Fig. 6.11 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă simplă, 20 m/s.....	151
Fig. 6.12 Detaliu tensiune von Mises, carcasă simplă, 20 m/s.....	152
Fig. 6.13 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă optimizată, 20 m/s	153
Fig. 6.14 Detaliu tensiune von Mises, carcasă optimizată, 20 m/s	153
Fig. 6.15 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă simplă, 29 m/s.....	154
Fig. 6.16 Detaliu tensiune von Mises, carcasă simplă, 29 m/s.....	154
Fig. 6.17 Detalii ale solicitării mecanice asupra modulelor, carcasă optimizată, 29 m/s	155
Fig. 6.18 Detaliu tensiune von Mises, carcasă optimizată, 29 m/s	155

Lista tabelelor

Tabelul 1.1 Activitățile de cercetare asociate obiectivelor specifice ale tezei de doctorat.....	18
Tabelul 1.2 Etapele asociate planului de lucru	20
Tabelul 1.3 Diagrama Gantt a activităților asociate planului de lucru a tezei de doctorat.....	22
Tabelul 2.1 Caracteristici tehnice și performanțe ale vehiculelor electrice [31]	32
Tabelul 2.2 Materiale și caracteristici mecanice generale	35
Tabelul 2.3 Incidente în exploatarea vehiculelor electrice dotate cu baterii Li-Ion [60].....	41
Tabelul 2.4 a- Experimente mecanice principale pe celule electrochimice	51
Tabelul 3.1 a- Parametrii tehnico-funcționali ai celulelor energetice ...	65
Tabelul 4.1 a- Parametrii ai celulelor energetice cilindrice.....	103
Tabelul 4.2 Specificațiile celulelor 18650 și 21700 și a componentelor lor interne	104
Tabelul 4.3 Specificațiile celulelor prismatice de tip pungă și a componentelor interne	104
Tabelul 6.1 Rezultate centralizate pentru cele 6 cazuri de simulare ...	156
Tabelul 7.1 Rezultatele parametrilor monitorizați la experiment (forța de deformare).....	161
Tabelul 7.2 Rezultatele parametrilor monitorizați la experiment.....	162