

# Rezumat

## Capitolul 1 – Introducere: Utilizarea materialelor plastice în industria automotive

Industria automotive este una dintre cele mai competitive și reglementate ramuri industriale, fiind supusă permanent presiunii de a produce vehicule mai ușoare, mai sigure, mai eficiente energetic și mai sustenabile. În ultimele două decenii, tendințele majore în proiectarea automobilelor au vizat înlocuirea materialelor tradiționale, precum oțelul sau aluminiul, cu materiale polimerice și compozite. Această tendință este determinată de factori economici (reducerea costurilor), tehnici (libertate de proiectare și integrare funcțională), dar și politici (reglementările privind reducerea emisiilor de CO<sub>2</sub>).

Piese din plastic contribuie nu doar la scăderea masei, ci și la îmbunătățirea performanțelor funcționale. De exemplu, integrarea canalelor de ghidare a aerului direct în structura componentelor plastice permite o aerodinamică optimizată, ceea ce contribuie la reducerea consumului energetic. În același timp, tehnologiile de injectare și supra-injectare permit combinarea mai multor materiale într-o singură piesă, reducând astfel numărul total de componente necesare.

Totuși, creșterea utilizării materialelor plastice vine la pachet cu o serie de provocări. Defectele de fabricație (precum deformările, contracțiile neuniforme, liniile de sudură sau urmele de curgere) pot compromite atât estetica, cât și funcționalitatea pieselor. În industria automotive, unde cerințele estetice și de siguranță sunt extrem de stricte, aceste defecte nu sunt tolerate, ceea ce impune dezvoltarea unor soluții constructive și tehnologice inovative.

Categorie de defect	Exemple
Umplere	Injecții incomplete, goluri de aer
Contractie/Răcire	Retasuri, deformații
Îmbinare	Linii de sudură
Suprafață	Linii de curgere, urme de ardere
Material	Incluziuni, porozități

Optimizarea integrată a parametrilor de injecție a condus la reducerea rebuturilor cauzate de deformații la grile frontale, demonstrând importanța controlului fin al procesului. De asemenea, utilizarea senzorilor în matriță pentru monitorizarea presiunii și temperaturii a permis ajustarea în timp real a parametrilor, asigurând o consistență sporită a calității produselor.

Parametru tehnologic	Interval optim tipic	Efecte asupra piesei
Temperatura materialului	200–280 °C	Suboptim: „short shot” / Prea mare: degradare
Presiunea de injecție	600–1200 bar	Prea mică: umplere incompletă / Prea mare: bavuri
Viteza de injectare	40–120 cm <sup>3</sup> /s	Scăzută: linii vizibile / Ridicată: arderi
Timpu de menținere	2–10 s	Influențează contracția și dimensiunile finale
Temperatura matriței	40–90 °C	Determină finisajul suprafeței și rata de răcire

Simularea numerică a procesului de injecție reprezintă un instrument indispensabil în proiectarea și optimizarea pieselor din plastic pentru industria auto. Software-uri precum Autodesk Moldflow, Moldex3D și Sigmasoft permit previzionarea fluxului materialului, formarea liniilor de sudură, apariția bulelor de aer, distribuția temperaturii și contracțiile piesei.

Una dintre cele mai importante direcții este creșterea utilizării materialelor plastice reciclate și a compușilor bio-bazati. În contextul reglementărilor europene privind economia circulară, producătorii auto sunt obligați să atingă cote de reciclare din ce în ce mai ridicate.

Chiar dacă progresele sunt evidente, literatura indică mai multe provocări care trebuie avute în vedere:

- **Costurile de implementare** – Integrarea soluțiilor digitale și a materialelor inovatoare implică costuri ridicate, ceea ce limitează aplicarea lor pe scară largă, în special în producția de volum mare cu marje reduse;
- **Complexitatea proceselor** – Creșterea complexității proceselor (injecție multi-material, piese cu geometrii complexe, integrare electronică) generează noi tipuri de defecte care nu sunt încă suficient documentate;
- **Lipsa standardizării** – Lipsa unor standarde unitare în monitorizarea și raportarea defectelor face dificilă compararea rezultatelor între diferite studii și uzine;
- **Sustenabilitatea reală** – Deși există progrese în utilizarea materialelor reciclate, există încă limitări legate de proprietățile mecanice și estetice ale acestor materiale, ceea ce restrânge domeniul lor de aplicare

## Capitolul 2 - Analiza structurilor de nervuri de rigidizare

Dorința cea mai mare a oricărui inginer mecanic proiectant este de a obține o piesă cât mai asemănătoare cu model CAD creat de acesta în programele de proiectare dedicate. Pentru piesele injectate din plastic, acest lucru este aproape imposibil. De aceea inginerul mecanic trebuie să dezvolte diferite soluții constructive care ajută la curgerea materialului și rigidizarea carcaselor din plastic dar trebuie să aleagă materialul plastic potrivit pentru proiectul de aplicație pe care îl are în lucru.

Ne propunem ca scop căutarea unor soluții constructive care să diminueze defectele și abaterile de formă ale carcaselor din plastic dar și să comparăm comportamentul diferitor materiale plastice pentru a face o recomandare celor care nu știu ce material să aleagă pentru proiectul lor.

S-au analizat următoarele tipuri de soluții constructive:

- *Structură pătrată de nervuri*
- *Structură de nervuri de tip fagure (HC -Honey Comb)*
- *Structură de nervuri de tip val (wave reinforcement)*
- *Carcasă de plastic cu colțuri ondulate*
- *Carcasă de plastic cu colțuri tăiate*
- *Carcasă de plastic cu colțuri în trepte*
- *Carcasă de plastic cu colțuri teșite și înclinate*
- *Treaptă la baza peretelui vertical*

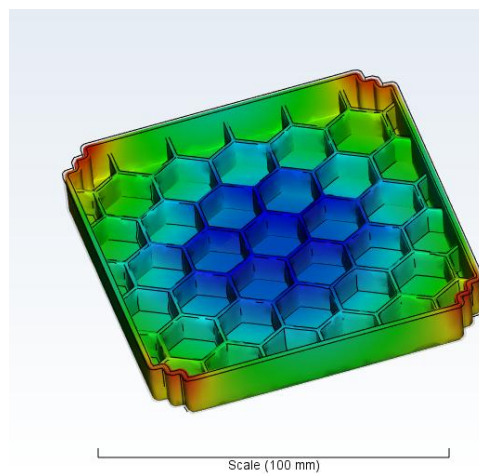
S-au analizat și diferența între materialele plastice standard utilizate cel mai mult în industria automotive și s-a alcătuit un clasament al acestora în funcție de comportamentul materialului plastic la deformație.

<b>1</b>	<b>Generic PC + GF20</b>
<b>2</b>	Generic PP + GF30
<b>3</b>	Generic PC
<b>4</b>	Generic ABS
<b>5</b>	Generic PBT + GF30
<b>6</b>	Generic PA6+GF35
<b>7</b>	Generic PC+ABS
<b>8</b>	Generic PA66+GF30
<b>9</b>	Generic PP
<b>10</b>	Generic PC+PBT
<b>11</b>	Generic PA6

12	Generic PBT
13	Generic PA66

Au fost analizate rezultatele simulărilor făcute mai sus și putem concluziona că valoarea cea mai bună a deformației maxime a fost înregistrată pentru structura de rigidizare cu nervuri de tip fagure 10x1,6x9 și carcasa de plastic cu colțuri în trepte 8x4. Având în vedere faptul că zonele modificate din carcasă pentru cele două soluții constructive sunt diferite, putem folosi în același design combinația celor două metode de compensare a defectelor carcaselor de plastic.

În figura de mai jos se poate observa combinarea a două soluții de rigidizare compatibile cu valoarea cea mai mică a deformației maxime pentru carcasa aleasă inițial de plastic.



*Simulări cu forță exterioară de 800 N*



Test generic cu forță externă cu cilindru metalic având 40 mm diametru

În cadrul acestei analize s-a proiectat drept caz inițial un modul alcătuit din două carcase din plastic, o placă de circuite fixată între cele două carcase și 4 conectori diferiți, cu o lungime a ansamblului de 180 mm, o lățime de 160 mm și o înălțime totală de 35 mm, cu o grosime de perete a carcaselor de 1,6 mm.

Respectând regulile generale de proiectare avem o grosime constantă a peretelui pe toată suprafața carcaselor. Pentru a facilita scoaterea ușoară a piesei din matriță avem implementat în acest model inițial și un unghi de extracție generic de  $1^\circ$ . Modelul acestei carcase a fost creat cu ajutorul programului de proiectare dedicat Catia V5. Modelul carcaselor a fost îmbunătățit cu mai multe soluții constructive de rigidizare studiate anterior.

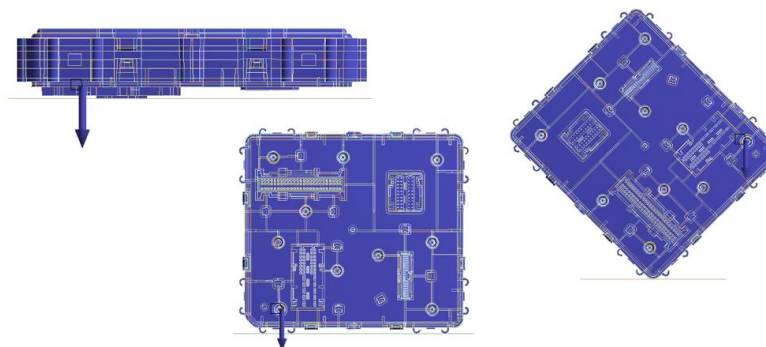
Materialul generic folosit pentru carcasele din plastic în simulările cu acest modul este Fibremod GB205U (PP-GF20) ce are o densitate de  $1040 \text{ kg/m}^3$ , un modul de elasticitate de  $4800 \text{ MPa}$  și o rezistență maximă la tracțiune de  $83 \text{ MPa}$ .

Pentru a verifica beneficiile și robustețea modului proiectat se v-a supune modulul unor succesiuni de încărcări externe.

Se v-a simula apăsarea cu un cilindru cu diametru  $40 \text{ mm}$  în trei poziții diferite cu o forță externă de  $800 \text{ N}$ .

#### *Simulări test de cădere*

În cadrul acestui subcapitol se prezintă rezultatele simulării căderii modului generic descris în simulările de forță externă de  $800 \text{ N}$  de la înălțimea de  $1 \text{ metru}$  pe o suprafață de beton. Acest test coincide cu procedura de testare descrisă în standardul ASTM D5276 care prezintă metodele standard de încercare pentru testul de cădere.



Cele trei cazuri de cădere liberă

Pentru rezultate cât mai relevante se va face simularea pentru cădere liberă în trei situații.

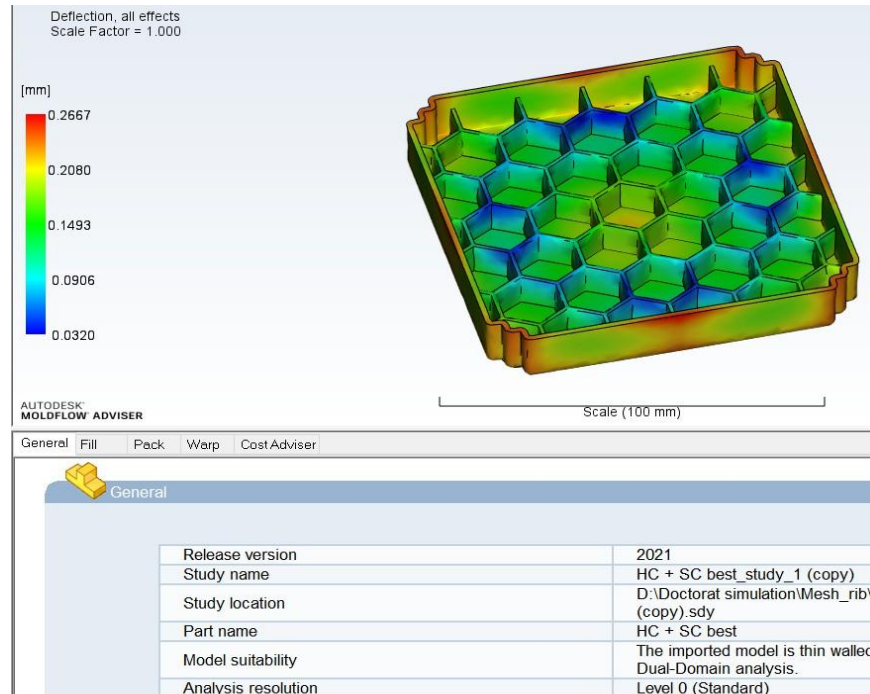
Testul de cădere liberă realizat și rezumat în tabelul din dreapta asupra modulului cu carcasă din material plastic a evidențiat un comportament mecanic corespunzător cerințelor de rezistență și fiabilitate impuse. În urma încercării, nu s-au observat fisuri, deformări plastice permanente sau desprinderi ale componentelor, ceea ce confirmă integritatea structurală a ansamblului.

Performanța obținută se datorează atât configurației constructive optimizate (dispunerea nervurilor de rigidizare, grosimea uniformă a pereților, sistemul de prindere), cât și caracteristicilor materialului polimeric utilizat, care a permis disiparea energiei de impact fără deteriorări semnificative.

Astfel, se poate concluziona că soluția constructivă analizată îndeplinește condițiile de rezistență la solicitări mecanice accidentale, asigurând fiabilitatea și durabilitatea produsului în condiții reale de exploatare. Rezultatele obținute pot constitui o bază de referință pentru optimizarea ulterioară a modelului și validarea procesului tehnologic de fabricație.

#### *Rezultat și concluzii pentru analiza structurilor de nervuri de rigidizare și materialele plastice*

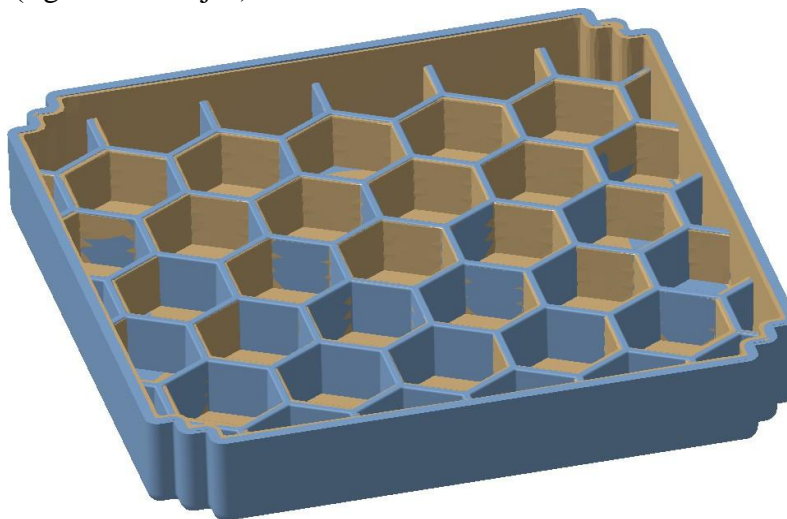
Cel mai bun rezultat se obține tot timpul prin combinarea celor mai bune soluții de compensare a comportamentului materialelor plastice: aplicarea soluțiilor constructive potrivite pentru modelul carcasei și alegerea materialului ce ne asigură cea mai mică deformație asupra piesei finalei. În figura de mai jos s-a obținut deformația maximă de 0.2667 mm asupra carcasei ranforsate cu structura cu cel mai bun rezultat din această analiză și materialul cu rezultatul cel mai bun la deformație.



Cel mai bun rezultat (Carcasă din policarbonat cu 20% fibră de sticlă și nervuri tip fagure 10x1,6x9 + colt în trepte 8x4)

*Rezultat și concluzii pentru analiza structurilor de nervuri de rigidizare și materialele plastice*

În funcție de tipul carcasei și de aplicația acesteia, putem accepta o anumită deformație ce nu v-a influența funcționalitatea carcasei în producție, această deviere fiind cunoscută sub numele de toleranță, sau putem reduce și mai mult deformarea piese finale prin aplicarea unei contra-curburi în miezul matriței (figura de mai jos).



Model modificat în Moldflow care estimează miezul matriței cu contra-curbură (piesa albastră este deformată anterior, iar cea crem este piesa proiectată)

Recomandăm realizarea unor simulări de curgere a materialului asemănătoare cu cele realizate în această analiză înainte de a comanda o matriță pentru piesele injectate din plastic. Aceste simulări ne oferă indicii privitoare la piesa pe ce dorim să o realizăm: dacă este optimizată suficient, dacă s-au ales soluțiile constructive eficiente pentru modelul creat sau dacă s-a ales materialul potrivit pentru aplicația dorită. De asemenea, putem reduce costuri prin prevenirea ulterioarelor corecții în matriță care sunt destul de scumpe.

### Capitolul 3 - Cercetări experimentale și recomandări de proiectare pentru materiale plastice termoconductive

Gestionarea căldurii reprezintă un aspect esențial în proiectarea și funcționarea modulelor electronice. Indiferent dacă sursa termică provine din baterii, circuite integrate, diode luminoase (LED), procesoare (CPU) sau alte componente electronice, eficiența sistemului de răcire influențează direct fiabilitatea și durata de viață a echipamentelor.

În ultimii ani, pe piață au fost introduse rășini termoconductive avansate, care pot substitui, în anumite aplicații, materialele metalice tradiționale, precum aluminiul sau magneziul. Aceste metale sunt recunoscute pentru conductivitatea termică ridicată și pentru proprietățile dielectrice favorabile, însă disponibilitatea redusă și creșterea costurilor de producție au generat interesul pentru soluții alternative pe bază de polimeri termoconductivi.

Comparativ cu metalele, materialele plastice termoconductive oferă o flexibilitate superioară în proiectare, permițând realizarea unor geometrii complexe și optimizate din punct de vedere funcțional. Totodată, amprenta de carbon asociată producției acestor rășini este de aproximativ cinci ori mai redusă, iar costurile materialului pot fi cu până la 30% mai mici. Utilizarea lor conduce la reducerea masei componentelor, aspect care determină scăderea consumului de combustibil în aplicațiile auto și la diminuarea costurilor matrițelor și a operațiilor secundare (curățare, ștanțare, frezare).

Compoziția acestor materiale include, în medie, aproximativ 60% umpluturi minerale și aditivi, conferind materialului o rigiditate ridicată, dar și o fragilitate pronunțată. În cadrul procesului de injectare, aceste caracteristici generează provocări semnificative, în special în ceea ce privește aplicarea proceselor de asamblare mecanică – înșurubare, clipsare sau nituire – care necesită o abordare de model adaptată pentru a preveni apariția fisurilor sau a ruperilor locale.

S-a analizat comportamentul asamblărilor filetate ale materialelor plastice termoconductive.

Au fost realizate o serie de teste experimentale pe piese din material plastic proiectate inițial pentru materiale termoplastice convenționale, precum PP (polipropilenă) sau PBT (polibutilen

tereftalat), armate cu fibre de sticlă ori pudră minerală (de tip talc). În imaginile prezentate mai jos se pot observa fisuri care fac piesele obținute improprie pentru utilizare.



Proiectări necorespunzătoare pentru piese din plastic conductiv termic

O primă concluzie desprinsă din aceste teste a fost aceea că grosimea materialului în zona domurilor de înșurubare trebuie să fie mai mare decât grosimea utilizată pentru piesele realizate din termoplastice standard. În unele cazuri, grosimea poate fi chiar similară sau superioară celei utilizate la piesele turnate din aliaje de aluminiu sau magneziu. Din acest motiv, au fost dezvoltate mai multe variante de model pentru domurile de înșurubare, în vederea identificării configurației optime pentru materialele plastice termoconductive.



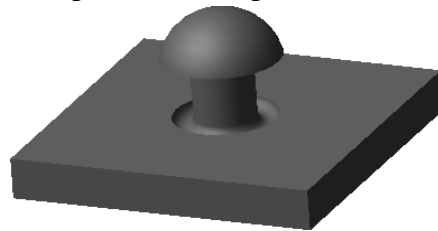
Matrița de testare a șurubului (stânga) și piesa (dreapta)

Pentru realizarea testelor de înșurubare s-a utilizat o mașină universală de testare ZwickRoell Z250 Boss-Screw, iar rezultatele afișate în graficele din slideul anterior au fost prelucrate cu software-ul dedicat al echipamentului. Pe baza acestor grafice au fost determinate valorile prezentate în tabelele din slideul anterior și de pe acest slide, corespunzătoare cuplurilor optime de înșurubare.

S-a putut concluziona că, pentru testele de înșurubare, cel mai bun model al unui dom de șurub realizat din material plastic cu conductivitate termică este cel care are orificiul pentru șurub cu 10% mai mic decât diametrul șurubului, o grosime a materialului de **2,4 mm**, iar cuplul optim de înșurubare care trebuie aplicat este de aproximativ **1,4 Nm**.

#### *Modelul niturilor pentru materiale plastice cu conductivitate termică*

Pentru fixarea a două componente, la piesele din plastic se utilizează, de obicei, un nit. Regulile de proiectare pentru realizarea unui model de nit din material plastic cu conductivitate termică sunt puțin diferite, din cauza proprietăților mecanice ale acestor materiale. Datorită cantității mari de umpluturi din rășină, materialul devine fragil după injectare și este necesară o grosime mai mare a peretelui. În figurile din dreapta este prezentat modelul de nit care, în urma mai multor teste, s-a dovedit a fi potrivit pentru acest tip de materiale.

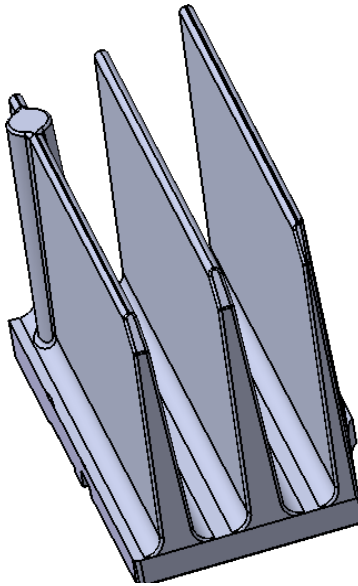


Modelul nitului

Grosimea (diametrul) nitului trebuie să fie de **3 mm** sau mai mare. Această valoare poate porni de la un diametru de **1,8 mm** pentru materialele plastice obișnuite, iar în cazuri speciale poate fi chiar mai mică decât această valoare.

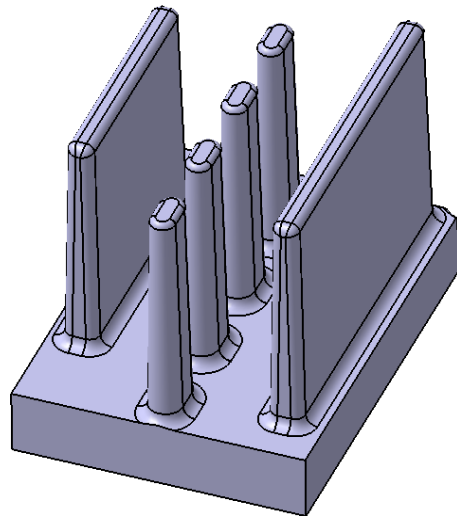
#### *Modelul generic al elementului de răcire pentru reducerea deformațiilor*

Pentru piesele din aluminiu se utilizează de obicei nervuri lungi și subțiri (ca în figura cu modelul generic de mai jos) în modelele destinate disipării termice. Înlocuind aluminiul cu material plastic cu conductivitate termică, s-a observat o contracție semnificativă a plasticului, iar pentru același model s-a măsurat o deformație totală („warping”) a piesei de aproximativ 4 mm.



Modelul generic al unui radiator din aluminiu

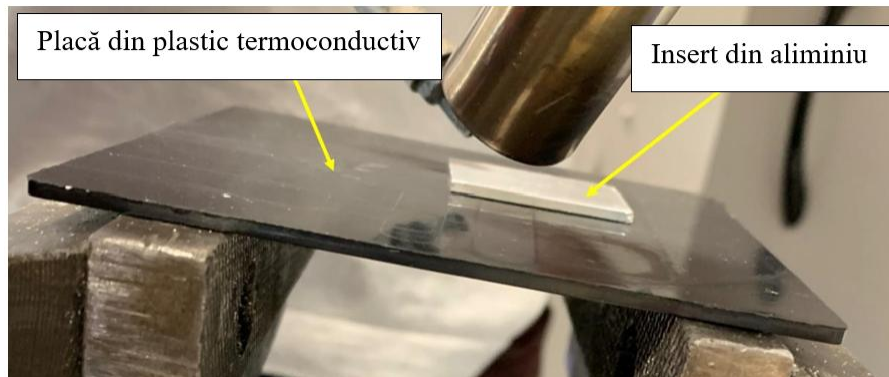
Pentru obținerea unei piese funcționale, planeitatea trebuie controlată riguros și redusă cât mai aproape de zero. În urma investigațiilor efectuate, s-a dezvoltat un model generic pentru elemente de răcire, care înlocuiește nervurile lungi și subțiri cu nervuri mai scurte sau chiar cu pini dispuși punctual (ca în figura de mai jos). Această soluție reduce efectul de deformare (warping) cu aproximativ 75% și mărește suprafața de schimb termic cu aerul, devenind, astfel, mai eficientă pentru răcire.



Model optimizat pentru elemente de răcire din material plastic termoconductiv

*Soluție de răcire cu inserție de aluminiu lipită la temperaturi ridicate de o carcasă din plastic cu conductivitate termică*

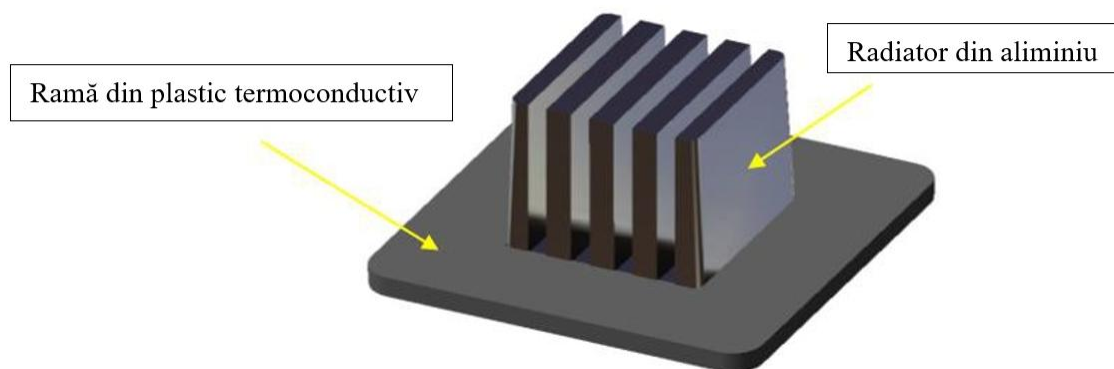
Conceptul de răcire este inovator și nu implică utilizarea vreunui adeziv sau a unor materiale suplimentare pentru fixarea inserției de aluminiu în carcasa din plastic cu conductivitate termică. Îmbinarea dintre componente se realizează atunci când inserția de aluminiu ajunge la 350°C și este presată pe carcasa din TCP, care începe să se topească și să încadreze inserția. Temperatura a fost măsurată folosind o cameră termică Fluke TS75+.



Proces de lipire între insertul din aluminiu și placa din material plastic termoconductiv

Prin adăugarea acestei inserții metalice, s-a obținut o scădere a temperaturii de aproximativ 19%, datorită unei disipări mai eficiente a căldurii.

*Soluție de răcire cu radiator din aluminiu și cadru de carcasă din plastic cu conductivitate termică*



Imagine de ansamblu a soluției de răcire cu doua elemente

Nu este necesară utilizarea de șuruburi, nituri, sudură cu laser sau alte procese mecanice pentru fixarea pieselor între ele. Asamblarea strânsă dintre radiator și carcasă le menține împreună, iar odată așezat peste componentele fierbinți (așa cum se vede în figura de mai jos), cu pastă termică

sub radiator pentru a asigura un schimb termic corespunzător, radiatorul rămâne fix și nu poate cădea din poziția sa.

Avantajele acestei soluții sunt: nu sunt necesare componente sau procese suplimentare pentru asamblarea pieselor, același efect de răcire ca o carcasă complet din aluminiu, flexibilitate mai mare în modelul piesei din plastic, economii de costuri datorate prețului materialului comparativ cu o carcasă complet din aluminiu și aplicabilitate multiplă pe diferite produse (aceleași radiatoare pot fi utilizate pe mai multe produse).

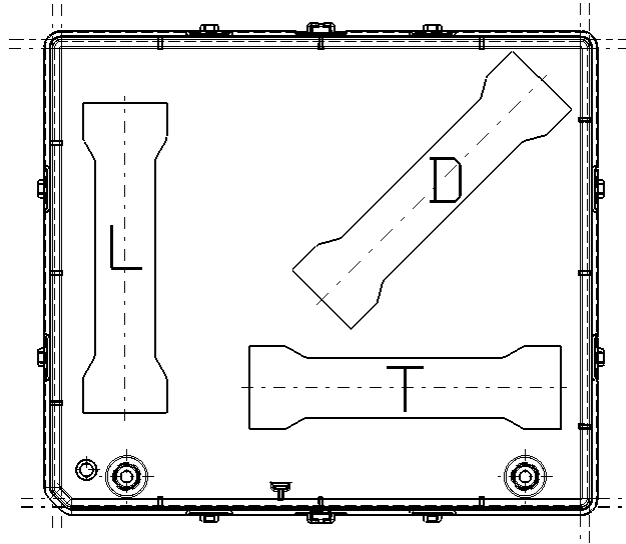
#### Capitolul 4 - Analiza comportamentului mecanic al componentelor din plastic și rășină

##### *Teste de tracțiune pe epruvete din plastic pe bază de polipropilenă cu diferite ranforsări*

S-au ales trei carcase din materiale diferite cu dimensiuni similare de gabarit, grosime de material identică și cu un singur punct de injecție poziționat pe mijlocul carcasei:

- Carcasa 1 – Material PP-GB30GF10 (polipropilenă copolimer ranforsată cu 30% bile de sticlă și 10% fibre de sticlă) cu rezistență la tracțiune de 44.1 MPa;
- Carcasa 2 – Material PP-TD40 (polipropilenă copolimer ranforsată cu 40% talc) cu rezistență la tracțiune de 32 MPa;
- Carcasa 3 – Material PP-GF20 (polipropilenă copolimer ranforsată cu 20% fibră de sticlă) cu rezistență la tracțiune de 80 MPa.

În aceste teste s-a dorit decuparea din fiecare carcasă a trei epruvete (asemănător cu situația din figura de mai jos) dispuse longitudinal, transversal și diagonal față de lungimea carcasei și dispuse în jurul punctului de injecție, din zona plană a fiecărei carcase, și să le solicităm la tracțiune pentru a studia efectul distribuției aditivilor (fibrelor și mineralelor) din materialul plastic. Având în vedere răspândirea radială a fibrelor în raport cu punctul de injecție, cele trei epruvete vor înregistra valori diferite pentru încercarea la tracțiune.



Distribuire epruvete pe carcasă

Pentru determinarea rezistenței la tracțiune a materialelor plastice s-au utilizat epruvete de tip halteră (figura de mai jos) conform standardului ASTM D 3039 Metode de testare standard pentru proprietăți la tracțiune pe materiale plastice compozite.

Comportamentul mecanic al celor trei materiale plastice a fost evaluat prin teste de tracțiune în conformitate cu ISO 527-1:2019. Rezultatele arată coeficienții lui Poisson ai materialelor, evidențiind diferențele în deformarea laterală sub încărcare axială. În mod notabil, PP-GF20 a prezentat cel mai scăzut coeficient al lui Poisson, indicând o deformare transversală limitată, în timp ce PP-GB30GF10 a demonstrat un răspuns lateral mai pronunțat. Complementar, graficul cu valorile modulului lui Young, oferă informații despre rigiditatea fiecărui material. Dintre cele trei, PP-TD40 a înregistrat cel mai ridicat modul, sugerând o rezistență superioară la deformarea elastică. Aceste rezultate oferă o înțelegere comparativă a proprietăților elastice critice pentru aplicații structurale.

Pe baza testelor efectuate, este evident că performanța mecanică a compozitelor pe bază de polipropilenă este puternic influențată de tipul și concentrația umpluturilor, materialele armate cu fibre de sticlă (cum ar fi PP-GF20 și PP-GB30GF10) prezentând o rigiditate și o rezistență la tracțiune semnificativ mai mari comparativ cu variantele umplute cu talc, precum PP-TD40. Orientarea fibrelor de sticlă, indusă de procesul de injecție, joacă un rol critic în creșterea modulului lui Young de-a lungul direcției fluxului, contribuind la comportamentul anizotrop al materialului.

*Teste de zgâriere pentru carcasele prototip fabricate din rășină polimerică*



Probe pentru testul de zgâriere decupate din carcasa de referință

Secvențele de zgâriere au avut durată de timp stabilită la 60 secunde și deplasarea mesei liniare la 10 mm, rezultând o viteză de înaintare a lamei de 0,167 mm/s.

Parametrii înregistrați în timpul testelor au fost: forța de încărcare  $F_z$ , forța tangențială  $F_x$ , timpul și deplasarea mesei liniare a tribometrului. Pe baza acestor parametri s-au trasat apoi graficele de variație a forțelor cu timpul și cu deplasarea.

Graficele indică variația liniară în timp a forței de încărcare  $F_z$  pentru fiecare probă testată. Forța de încărcare a fost modificată după fiecare test, începând de la 5 N, cu incrementări de 1 N. Pe aceste grafice sunt vizibile punctele în care testul a fost oprit (echipamentul a intrat în modul de siguranță și suportul a fost retras), deoarece s-a atins limita senzorului.

Testarea cu forță constantă în timp presupune ca, în faza de preîncărcare, vârful de testare să fie apăsat pe epruveta de test cu o anumită forță, care rămâne apoi constantă pe toată durata deplasării acestuia. Aceasta înseamnă că indentorul induce o tensiune localizată în material încă de la început, spre deosebire de testele anterioare, în care forța creștea în timp, iar tensiunile din material se dezvoltau progresiv.

În testele de zgâriere, probele de rășină SLA Black V4 au prezentat rezistențe diferite în funcție de orientare. Probele cu orientare orizontală (H) au rezistat mai bine la zgâriere comparativ cu cele cu orientare verticală (V) sau diagonală (D).

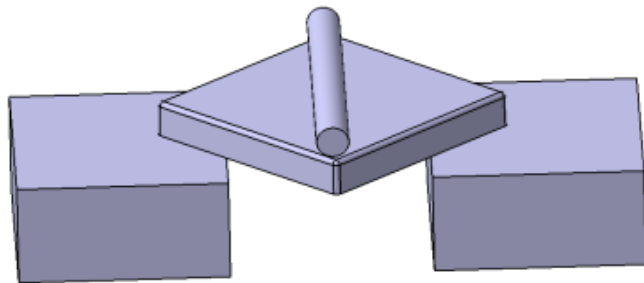
Pentru probele cu straturi transversale, zgârieturile au o propagare adâncă, fără desprinderi semnificative de material. Suprafețele prezintă o rezistență medie la zgâriere, cu adâncime constantă. Aderența straturilor nu a fost afectată, deoarece forța aplicată de vârf a fost paralelă cu straturile.

Pentru probele cu straturi perpendiculare, testul a arătat desprinderi vizibile de material cauzate de delaminarea parțială. Rezistența la zgâriere este scăzută, cu urme adânci și fracturi locale.

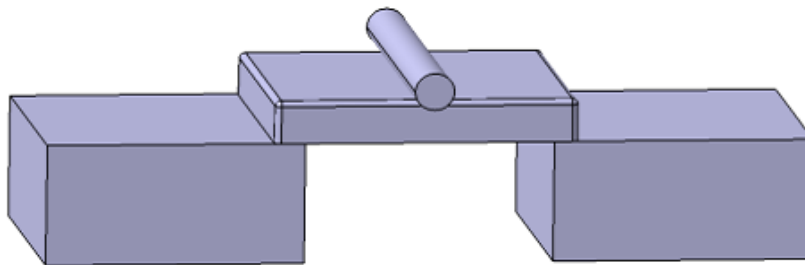
Pentru probele cu orientare diagonală a straturilor, urmele de zgâriere sunt vizibil instabile, cu mici urme de săpături în anumite zone. În zonele unde vârful întâlnește straturile, apar micro-delaminări locale. Comparativ cu cazurile anterioare, rezistența la zgâriere este inconstantă, fără deteriorări majore.

Testul de zgâriere efectuat pe probele imprimate 3D cu rășină Formlabs Black V4 a evidențiat vulnerabilitatea suprafeței materialelor fotopolimerice la solicitări mecanice localizate, subliniind importanța luării în considerare a rezistenței suprafeței alături de proprietățile mecanice generale în aplicațiile de proiectare. Aceste rezultate oferă informații valoroase pentru selecția materialelor și modelul componentelor, în special în aplicațiile care necesită atât integritate structurală, cât și durabilitate a suprafeței.

#### *Teste de încovoiere pe carcase prototip din rășină polimerică*



Încovoiere diagonală



Încovoiere transversală

Regimul de încercare a fost stabilit prin viteza de creștere a deplasării la valoarea de 0,5mm/min. Rezultatele obținute în urma încercării sunt prezentate în diagramele sigma/epsilon (tensiune/deformație specifică liniară) prezentate mai jos, folosind datele furnizate de soft-ul mașinii de încercat.

Testele de încovoiere efectuate pe cele cinci carcase cu diferite niveluri de ranforsare au evidențiat influența semnificativă a structurii interne asupra comportamentului mecanic al componentelor. Carcasa de referință, neranforsată, a înregistrat cele mai mari deformații atât în testele de încovoiere transversală, cât și longitudinală, indicând rigiditatea minimă specifică materialului fotopolimeric Black V4 în absența elementelor de întărire. Această observație confirmă importanța introducerii nervurilor sau a altor elemente de ranforsare pentru creșterea rezistenței la încovoiere a pieselor SLA.

Comparativ, carcasa cu nivel progresiv de ranforsare au prezentat un comportament mecanic intermediar, unde creșterea rigidității a fost proporțională cu cantitatea și distribuția ranforsărilor. Rezultatele au demonstrat că orientarea și geometria nervurilor influențează semnificativ atât deformația maximă, cât și distribuția tensiunilor pe întreaga structură. În testele longitudinale, unde ranforsările erau aliniată cu direcția principală de încărcare, s-a observat o creștere mai pronunțată a rigidității comparativ cu încovoierea transversală, evidențiind caracterul anizotrop al componentelor SLA și rolul orientării ranforsărilor în optimizarea performanțelor mecanice.

În urma testelor experimentale de încovoiere efectuate pe carcase realizate din rășina fotopolimerică Black V4 (Formlabs), au fost obținute date esențiale pentru definirea completă a comportamentului mecanic al materialului. Pe baza măsurărilor forță-deplasare și a curbelor experimentale, s-a putut construi o curbă completă tensiune-deformație (stress-strain) în format digital, utilizată ulterior pentru calibrarea modelului numeric din ANSYS Mechanical.

În concluzie, integrarea parametrilor obținuți experimental în ANSYS a condus la o corelare foarte bună între testele fizice și simulările numerice, demonstrând că materialul Black V4 poate fi caracterizat complet pe baza testelor de încovoiere, iar modelul obținut poate fi utilizat ulterior pentru predicția comportamentului structural al componentelor similare în aplicații de design și validare virtuală.

### *Test de cădere liberă (1 m) pe suprafață betonată*



Stand de încercări cădere liberă de la 1 metru pe suprafață betonată

Fiecare modul a fost supus la trei căderi libere succesive de la înălțimea de 1,0 m, asupra suprafeței betonate. Pozițiile de impact au fost diferite pentru fiecare cădere, după cum urmează:

- Poziție orizontală (plană) (1) – simulând o cădere pe fața principală a modulului.
- Poziție laterală (2) – simulând o cădere pe muchie.
- Poziție cu conectorii în jos (3) – caz în care zona sensibilă de conectică este expusă direct impactului.
- 

După fiecare cădere, s-au efectuat următoarele evaluări:

- Evaluare vizuală – inspecție pentru fisuri, deformări plastice, desprinderi, ciobiri ale carcasei sau deteriorări la nivelul conectorilor.
- Evaluare acustică (sonoră) – agitarea ușoară a modulului și verificarea auditivă a eventualelor zgomote interne (indicative pentru desprinderi ale componentelor interne).
- Evaluare electrică – măsurare cu un multimetru digital între doi pini de test (selecțaiți în funcție de configurația fiecărui modul). S-a înregistrat valoarea înainte de test și după fiecare cădere; variațiile au fost comparate cu toleranța admisă specificată de producător.

Rezultatele obținute au evidențiat o comportare foarte bună pentru modulul 1 și modulul 5, care au trecut toate testele fără a prezenta defecte vizibile, zgomote interne sau variații ale valorilor electrice măsurate. Aceste rezultate indică o bună rezistență mecanică a carcaselor, respectiv o fixare sigură a componentelor interne și a conectorilor.

În cazul modulului 2, s-a observat ruperea unei urechi de prindere după testul de cădere numărul 3 (poziția 3 – conectorii în jos). Acest tip de defect sugerează o zonă de concentrare a tensiunilor în apropierea punctelor de fixare, posibil datorată modelului carcasi sau rigidității materialului utilizat.

Modulul 3 a prezentat defecțiuni acustice încă de la prima cădere, fiind sesizat un zgomot intern specific deplasării libere a unei componente, fapt ce indică o desprindere parțială a unui element intern sau o insuficiență în sistemul de prindere internă.

De asemenea, modulul 4 a înregistrat un rezultat neconform la testul de sunet la a treia cădere, cu aceeași cauză – apariția unui zgomot intern. Acest comportament indică o diminuare progresivă a integrității structurale interne după repetarea șocurilor mecanice.

În concluzie, testele au demonstrat o bună rezistență generală a modulelor testate, cu excepția celor la care sistemele de prindere interne sau exterioare au evidențiat o sensibilitate crescută la impact. Se recomandă, pentru modulele 2, 3 și 4, o revizuire a modelului de carcasă și o optimizare a sistemului de fixare internă, în vederea creșterii fiabilității la șocuri mecanice repetate.

Testul de cădere liberă permite evaluarea capacității modulelor electronice de a rezista la șocuri mecanice care pot apărea în procesele de manipulare, montaj sau exploatare. Prin corelarea rezultatelor vizuale, acustice și electrice se pot evidenția punctele sensibile de proiectare (ex. grosimea pereților carcasi, tipul de prindere al conectorilor, rigiditatea clipsurilor) și se pot formula recomandări pentru îmbunătățirea modelului constructiv al pieselor din plastic destinate mediului automotive.

## Contribuții personale

Prezenta teză de doctorat aduce contribuții originale în domeniul utilizării materialelor plastice în industria automotive, printr-o abordare integrată ce combină analiza teoretică, simulările numerice și cercetările experimentale. Principalele contribuții se pot sintetiza astfel:

1. Analiza defectelor pieselor injectate din plastic și propunerea de soluții constructive
2. Simulări numerice și optimizarea procesului de injecție
3. Cercetări experimentale privind comportamentul mecanic al componentelor din plastic
4. Propuneri de soluții de răcire și integrare a materialelor termoconductive
5. Aplicarea conceptelor de Industrie 4.0 (digitalizarea proceselor tehnologice) și metode digitale în proiectare și optimizare
6. Dezvoltarea și validarea de prototipuri funcționale
7. Integrarea soluțiilor de răcire în modelul componentelor plastice
8. Corelarea rezultatelor experimentale cu simulările numerice
9. Propuneri de bune practici pentru proiectarea pieselor plastice în automotive
10. Consolidarea direcțiilor viitoare de cercetare

## Direcții viitoare de cercetare

Pe baza sintezei și a limitărilor identificate în cercetare, se propun următoarele direcții prioritare de investigare în domeniul pieselor injectate din materiale plastice pentru industria automotive:

1. Modele predictive bazate pe inteligență artificială
2. Optimizarea integrată a materialelor și parametrilor de proces
3. Matrițe inteligente și senzori integrați
4. Metodologii multi-obiectiv pentru optimizarea producției
5. Standardizare și evaluare a materialelor reciclate
6. Performanță mecanică și termomecanică sub solicitări complexe

Aceste direcții viitoare stabilesc cadrul pentru cercetări ulterioare care să combine simulările numerice, analiza experimentală și metodele digitale de optimizare, contribuind la creșterea performanței, sustenabilității și fiabilității pieselor plastice în industria automotive.

## Concluzii finale

Prezenta teză de doctorat a abordat într-o manieră integrată problematica utilizării materialelor plastice în industria automotive, combinând analiza teoretică, simulările numerice și cercetarea experimentală. Cercetările au vizat optimizarea performanței mecanice și termice a pieselor injectate, reducerea defectelor și creșterea fiabilității componentelor, având o relevanță directă pentru proiectarea și producția de carcase și elemente structurale din plastic.

### 1. Sinteza principalelor rezultate

- S-a realizat o clasificare detaliată a defectelor și neconformităților pieselor injectate din plastic, evaluând impactul acestora asupra funcționalității și durabilității produselor.
- S-au identificat soluții constructive eficiente pentru reducerea defectelor, inclusiv prin optimizarea geometriei pieselor și a structurilor de nervuri de rigidizare. Diferite tipuri de nervuri (pătrate, fagure, valuri, colțuri modificate) au fost comparate prin simulări numerice pentru a determina configurația optimă.
- S-au realizat simulări comparative pentru diferite materiale plastice, evidențiindu-se influența proprietăților materialelor asupra comportamentului mecanic și termic al componentelor.

### 2. Contribuții la metodologia de cercetare și simulare

- S-a demonstrat aplicabilitatea simulărilor numerice FEM/CAE în corelarea parametrilor de injecție cu performanța finală a pieselor, validată ulterior prin teste experimentale.
- S-a implementat o metodologie integrată de analiză a comportamentului pieselor sub sarcini statice și dinamice, inclusiv simularea impactului, a vibrațiilor și a solicitărilor termomecanice.

- S-au evidențiat corelațiile între simulările numerice și comportamentul real al materialelor termoconductive, ceea ce permite previzionarea fiabilă a performanțelor pieselor în condiții reale de exploatare.

### 3. Rezultate experimentale relevante

- S-au efectuat teste de tracțiune, încovoiere și zgâriere pe epruvete și prototipuri, precum și teste de cădere liberă pe diferite direcții, pentru evaluarea rezistenței mecanice și identificarea defectelor funcționale.
- Testele experimentale au confirmat eficiența soluțiilor constructive propuse și au furnizat date originale privind comportamentul mecanic și termic al carcaselor și elementelor plastice, inclusiv sub sarcini complexe și solicitări termice.
- S-a demonstrat importanța selecției corecte a materialelor plastice și a materialelor de armare, precum și influența geometriei pieselor asupra rezistenței la impact și deformării sub sarcini variabile.

### 4. Propuneri de soluții inovative

- S-au elaborat și testat soluții de răcire cu inserții de aluminiu și radiatoare integrate în carcasele din plastic, optimizând transferul termic și reducând deformațiile în aplicațiile electronice din automotive.
- S-au propus bune practici și recomandări pentru proiectarea pieselor plastice, incluzând criterii de geometrie, integrarea nervurilor de rigidizare și soluții constructive pentru reducerea defectelor, cu relevanță directă pentru industria automotive.

### 5. Relevanța digitalizării și a metodelor moderne

- S-a evidențiat aplicabilitatea conceptelor de Industrie 4.0, inclusiv modelul digital echivalent, gemenii digitali și analiza volumelor mari de date, în monitorizarea și optimizarea proceselor de injecție.

- S-a propus utilizarea senzorilor integrați în matrițe pentru controlul parametrilor locali, precum și dezvoltarea de modele predictive bazate pe inteligență artificială pentru anticiparea defectelor în timp real.

#### 6. Limitări și provocări identificate

- S-au identificat limitări în privința simulărilor numerice pentru materiale plastice cu proprietăți anisotrope sau comportament viscoelastic complex, unde modelele existente necesită ajustări pentru corelarea exactă cu datele experimentale.
- Unele teste experimentale au fost realizate pe loturi prototip, ceea ce poate limita extrapolarea directă a rezultatelor la producția de serie mare.
- S-a constatat necesitatea unor standarde și metodologii internaționale pentru clasificarea defectelor și evaluarea materialelor plastice reciclate, pentru a asigura reproducibilitatea și comparabilitatea rezultatelor.

#### 7. Direcții viitoare de cercetare

- S-a recomandat dezvoltarea de modele predictive bazate pe inteligență artificială pentru anticiparea defectelor în timp real.
- S-a propus optimizarea integrată a materialelor și parametrilor de proces pentru piese complexe și multi-material.
- S-a sugerat implementarea de matrițe inteligente cu senzori integrați pentru monitorizarea și controlul parametrilor locali.
- S-a identificat necesitatea standardizării internaționale pentru clasificarea defectelor și evaluarea materialelor reciclate.
- S-a recomandat dezvoltarea de metodologii multi-obiectiv pentru optimizarea simultană a calității, costurilor și sustenabilității.

- S-a propus investigarea performanței mecanice și termomecanice a pieselor plastice sub solicitări complexe și condiții reale de exploatare.

## 8. Impactul și relevanța tezei

- Teza aduce contribuții originale în domeniul materialelor plastice pentru automotive, prin integrarea cercetării experimentale, simulărilor numerice și a conceptelor moderne de digitalizare.

- Rezultatele obținute oferă ghiduri și recomandări practice pentru proiectarea componentelor plastice, creșterea fiabilității și reducerea defectelor, cu aplicabilitate directă în industria automotive.

- Direcțiile viitoare de cercetare propuse constituie un cadru coerent pentru continuarea studiilor, având potențialul de a genera soluții inovative și durabile pentru producția de componente plastice.

## Bibliografie

Bibliografia include studii privind materialele plastice, simulări CAE, optimizarea structurilor de ribi, materiale termoconductive și aplicații în industria automotive. Referințele respectă standardele IEEE și sunt utilizate pentru validarea teoretică și experimentală a cercetării.

## Publicații științifice

1. \*Mechanical Behavior Analysis of Polypropylene-Based Composites and a Photopolymer Resin via Tensile and Scratch Testing.\* \*\*Polymers\*\*, 2025. Pal Gabriel Sergiu, Viorel Goanță, Morăraș Ciprian, Vlad Cârlescu.
2. \*Design recommendation for thermal conductive plastic parts in automotive industry.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2022. Pal Gabriel Sergiu, D.P. Bistriceanu, V. Vornicu.
3. \*Cooling solutions by matching plastic and metal in automotive industry.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2022. Pal Gabriel Sergiu, D.P. Bistriceanu, V. Vornicu.

4. \*Experimental study of the removable assemblies with screws from high pressure injection pumps.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2022. D.P. Bistriceanu, C. Bujoreanu, Pal Gabriel Sergiu.
5. \*Influence of tightening screws process in high-pressure injection pump.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2020. D.P. Bistriceanu, Pal Gabriel Sergiu, Stelian Alaci, C. Bujoreanu.
6. \*Design guideline for plastic parts that need to fulfil EN62368 norm.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2020. Pal Gabriel Sergiu, Viorel Goanță, D.P. Bistriceanu.
7. \*Step of the vertical walls for warpage compensation on plastic housings.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2020. Pal Gabriel Sergiu, Viorel Goanță, D.P. Bistriceanu.
8. \*Study on the sealing defects impact on high pressure pump.\* \*\*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*\*, 2020. D.P. Bistriceanu, Pal Gabriel Sergiu, Florina Ciornei, C. Bujoreanu.