

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



Cercetări privind sistemele de recuperare a energiei din gazele de ardere din motoarele cu ardere internă

-REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT-

Autor,

Ing. Achîței George

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ab. ing. Aristotel POPESCU

IAȘI, 2025

“ Τῆς παιδείας αἱ μὲν ρίζαι πικραί, οἱ δὲ καρποὶ γλυκεῖς ”
Rădăcinile educației sunt amare, dar roadele sunt dulci
Aristotel

Cuvânt înainte

Prezenta lucrare de doctorat reprezintă rezultatul unui parcurs complex de cercetare și dezvoltare în domeniul tehnologiilor inovatoare pentru recuperarea energiei din gazele de evacuare ale motoarelor cu ardere internă. Tema abordată este de o actualitate și o importanță majoră, având în vedere provocările globale legate de reducerea poluării atmosferice, eficientizarea consumului de combustibil și necesitatea susținerii tranziției către surse de energie mai curate și regenerabile.

În contextul intensificării crizei climatice și al creșterii presiunii asupra mediului, domeniul conversiei energiei termice reziduale din sistemele auto a căpătat o amploare deosebită, propunând soluții tehnologice care să valorifice energia deșeu și să contribuie simultan la diminuarea emisiilor dăunătoare. Lucrarea de față susține această direcție, explorând și dezvoltând un dispozitiv termoelectric menit să transforme o componentă pasivă a sistemului de evacuare într-un generator activ de energie.

Această cercetare se înscrie într-un cadru științific riguros, combinând fundamentarea teoretică, modelarea numerică și analiza experimentală, într-o abordare multidisciplinară menită să garanteze relevanța științifică și aplicabilitate practică. Rezultatele obținute vin să susțină evoluția tehnologică continuă a industriei auto, alături de preocupările esențiale pentru protecția mediului și eficiența energetică.

În primul rând, doresc să adresez cele mai sincere mulțumiri profesorului meu coordonator, prof. univ. dr. ab. ing. Aristotel Popescu, pentru sprijinul constant, expertiza și îndrumarea deosebită pe tot parcursul elaborării acestei teze. Contribuția sa valoroasă a fost esențială pentru dezvoltarea temei și atingerea obiectivelor științifice propuse. Cu recunoștință, îi mulțumesc pentru profesionalismul și generozitatea care au marcat parcursul meu doctoral.

Adresez profunde mulțumiri domnului conf. univ. dr. ing. Gelu Ianuș, Decan al Facultății de Mecanică Iași, pentru sprijinul acordat, pentru susținerea și încurajarea oferite pe parcursul anilor de elaborare a acestei lucrări. Expertiza sa, disponibilitatea și implicarea constantă au fost esențiale în derularea cercetării și finalizarea acestui demers academic. Îi datorez recunoștință pentru profesionalismul și disponibilitatea care au influențat pozitiv dezvoltarea mea academică și personală pe parcursul studiilor la Facultatea de Mecanică.

Îmi exprim profunda recunoștință membrilor din comisia de îndrumare academică pentru indicațiile valoroase oferite în procesul de redactare a tezei, precum și membrilor comisiei de susținere a tezei de doctorat pentru disponibilitatea de a face parte din această etapă esențială a

parcursului meu academic. Contribuțiile lor au avut un impact real asupra calității și finalizării lucrării.

Mulțumiri deosebite adresez tuturor cadrelor didactice din cadrul Catedrei de Autovehicule Rutiere a Facultății de Mecanică, precum și profesorilor din Catedra de Ingineria Materialelor și cea de Rezistența Materialelor; pentru suportul academic și încurajările oferite, care au facilitat accesul la cunoștințe și resurse indispensabile pentru această cercetare.

De asemenea, mulțumesc colegilor, partenerilor de cercetare și prietenilor care au contribuit cu expertiză, sprijin logistic și resurse pe parcursul studiului, făcând posibilă realizarea unor experimente complexe și o analiză riguroasă.

Nu în ultimul rând, aduc cele mai profunde mulțumiri soției mele, al cărei sprijin emoțional și practic a fost neprețuit în perioada dificilă a derulării cercetării. Recunoștința mea se îndreaptă, de asemenea, către întreaga familie, care a reprezentat un pilon solid în dezvoltarea mea personală și profesională.

Fără ajutorul și susținerea acestor oameni și instituții, realizarea acestei teze ar fi fost mult mai dificilă, iar progresul științific și profesional încetinit. Le sunt recunoscător tuturor celor care au făcut parte din acest demers academic.

Cuprins

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII	1
1.1.Termoelectricitatea.....	1
1.2.Principiile fundamentale ale termoelectricității	1
1.2.1. Efectul Seebeck (1821)	1
1.2.2.Efectul Peltier (1834).....	1
1.2.3.Efectul Thomson (1851)	2
1.3.Materialele termoelectrice	2
3.2.Provocări și limitări.....	3
3.3.Integrarea TEG în arhitectura vehiculului	4
3.4.Surse de căldură disponibile în automobile	4
CAPITOLUL 2. ANALIZA TEORETICA	5
2.1. Funcționarea Generatorului Termoelectric	5
2.2. Transferul de căldură.....	6
2.3. Rezistența termică.....	8
2.4. Rezistența termică de contact.....	8
2.5. Rezistența convectivă.....	8
2.6. Rezistența conductivă	9
2.7. Efectul fluxului termic neuniform asupra ansamblurilor TEG	9
2.8. Modele scurte pentru rețele serie/paralel sub ΔT neuniform	9
2.9. Reguli de proiectare și lucrări conexe.....	10
2.10. Criteriul de eliminare	10
2.11. Condiții la limită	11
2.12. Relevanța modelelor avansate.....	12
2.13. Analiza exergetică a generatoarelor termoelectrice	12
2.14. Definirea exergiei pentru fluxurile termice.....	12
2.15. Randamentul exergetic al TEG	12
2.16. Bilanțul exergetic într-un TEG.....	13
2.17. Coeficientul de performanță ZT	13
2.18. Randamentul	15

CAPITOLUL 3. ANALIZA NUMERICĂ	16
3.1.Scop și domeniu de aplicare	16
3.2.Descrierea sistemului și ipoteze.....	17
3.3.Modelul electric (echivalent Thevenin)	17
3.4.Modelul termic (staționar + dinamic)	17
3.5.Concluzii	20
3.6.Modelarea numerică a dispozitivului pentru recuperarea energiei electrice din gazele de eșapament prin metoda elementelor finite	21
3.7.Modelul geometric	21
3.8.Discretizarea Modelului geometric în Elemente Finite	22
3.9.Condiții la limită	24
3.10.Rezultate obținute	27
3.10.1. Scenariul 1: Regim urban (30-60 km/h)	28
3.10.2.Scenariul 2: Regim extraurban (70-90 km/h)	29
3.10.3. Scenariul 3: Regim de autostradă (90-130 km/h)	29
3.10.4. Scenariul 4: Regim de viteză constantă de 90 km/h la stand.....	30
3.10.5. Scenariul 5: Regim de temperatură ridicată pe stand.....	31
CAPITOLUL 4. STAND EXPERIMENTAL	33
4.1. Instalația experimentală preliminară.....	33
4.1.1. Structura standului	34
4.2. Analiza microstructurală a materialelor	34
4.3. Descrierea constructivă a dispozitivului final.....	36
4.3.1. Proiectarea virtuală și modelarea CAD.....	36
4.3.2. Definirea formei.....	36
4.3.3. Asamblare dispozitivului	38
4.3.4. Metoda de prindere a dispozitivului	42
4.3.5. Testare post-asamblare și optimizări constructive ulterioare	44
4.3.6. Pre-testarea dispozitivului.....	44
4.3.7. Proiectarea finală a dispozitivului.....	45
CAPITOLUL 5. REZULTATE ȘI ANALIZE	47

5.1. Analiza materialelor pentru uniformizarea straturilor termice pentru modulul termoelectric TEC1-12706.....	47
5.1.1. Strat cald Aluminiu – Strat rece Aluminiu.....	48
5.1.2. Strat cald Cupru – Strat rece Aluminiu.....	49
5.1.3. Strat cald Cupru – Strat rece Cupru.....	50
5.1.4. Strat cald Inox– Strat rece OLC.....	51
5.1.5. Analiza comparativă a datelor experimentale pentru straturile protectoare.....	52
5.2. Analiza datelor experimentale ale dispozitivului final.....	54
5.2.1. Analiza datelor experimentale pe vehicul.....	54
5.2.1.2. Caz determinare experimentală pe vehicul în regim de autostradă.....	54
5.3. Erori de măsurare și analiza erorii.....	58
5.3.1. Erori de măsurare.....	58
5.3.2. Analiza erorii pentru determinarea regimului urban.....	58
5.4. Analiza datelor experimentale pe stand.....	59
5.4.1. Caz determinare experimentală pe stand.....	59
5.4.2. Analiza erorii în cazul vitezei de 120 km/h și temperaturii de 550 °C.....	62
CAPITOLUL 6. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE.....	63
6.1. Concluzii finale.....	63
6.2. Contribuții personale.....	65
6.3. Direcții ulterioare de cercetare.....	67
Bibliografie.....	69

Introducere

În contextul global actual, provocările legate de protecția mediului și gestionarea durabilă a resurselor energetice au căpătat o importantă prioritară, impunând revizuiți fundamentale în toate domeniile tehnologice, inclusiv în sectorul transporturilor. Motoarele cu ardere internă, utilizate pe scară largă în industria auto, sunt sursa principală de emisii poluante și consum ridicat de combustibil, contribuind semnificativ la intensificarea fenomenelor de degradare a mediului. Această situație a determinat o intensificare a cercetărilor dedicate recuperării energiei reziduale din sursele termice, în special din gazele de evacuare, ca un răspuns tehnologic performant și eficient la nevoile stringente ale societății moderne.

Recuperarea energiei termice din gazele de eșapament reprezintă o oportunitate valoroasă pentru reducerea amprente energetice și a poluării, prin valorificarea căldurii care, în mod tradițional, este disipată în atmosferă. Tehnologii distincte, precum cele bazate pe fenomene termoelectrice, oferă posibilitatea transformării directe a diferenței de temperatură în energie electrică, utilizabilă ulterior pentru alimentarea sistemelor electrice auxiliare sau pentru stocare. Aceste soluții permit nu numai economii de combustibil, ci și optimizări semnificative ale performanțelor generale ale vehiculului. Totodată, progresele actuale urmăresc reducerea costurilor și creșterea scalabilității, astfel încât să fie posibile implementări pe scară largă care să aibă un impact real asupra reducerii poluării urbane și globale.

Prezenta teză de doctorat se înscrie în această paradigmă tehnologică, propunând un dispozitiv inovator de recuperare a energiei din gazele de evacuare, dezvoltat pentru a putea fi integrat cu ușurință în sistemele auto existente. Scopul principal a fost realizarea unui dispozitiv cu costuri reduse, care să înlocuiască eficient colierul de prindere folosit între toba finală și toba intermediară a vehiculelor, prin adăugarea unei funcționalități suplimentare ce permite conversia în energie electrică pe baza efectului termoelectric. Această soluție combină aspectele mecanice și energetice într-un mod sinergic, vizând creșterea eficienței energetice și reducerea impactului poluant într-un mod sustenabil și practic.

Lucrarea este structurată în șase capitole, fiecare având un rol precis și contribuind în mod direct la acumularea rezultatelor ce definesc originalitatea și relevanța cercetării.

Primul capitol prezintă un studiu documentar aprofundat, esențial pentru înțelegerea cuprinzătoare a domeniului și pentru stabilirea traseului științific al tezei. Se detaliază principalele metode de recuperare a energiei din căldura reziduală, cu accent pe aspectele termoelectrice și pe mecanismele de transfer termic implicate. Sunt explorate și prezentate atât principiile fizice fundamentale ale funcționării modulelor termoelectrice, cât și aplicațiile concrete ale acestora în industria automotiv. În cadrul acestui capitol, accentul este pus pe identificarea agenților și zonelor cele mai propice pentru captarea energiei termice, inclusiv o analiză comparativă a performanțelor materialelor utilizate, caracterizarea sistemelor și potențialul lor de integrare.

Capitolul al doilea abordează partea teoretică, oferind o bază matematică și fizică riguroasă a fenomenelor termoelectrice. Sunt detaliate ecuațiile fundamentale ce definesc funcționarea generatorului termoelectric, inclusiv legile Seebeck și Peltier, alături de analiza termică și electrică care determină performanțele dispozitivului. În cadrul acestui capitol, sunt de asemenea discutate caracteristicile materialelor termoactive, cum ar fi coeficienții Seebeck, conductivitatea termică și rezistența electrică, precum și modul în care aceste proprietăți influențează eficiența conversiei. Finalul capitolului dezvoltă modelul teoretic specific dispozitivului proiectat, oferind premisele pentru simulările ulterioare și experimentările practice.

Capitolul trei trece la dezvoltarea modelului numeric, unde metodologia de simulare este descrisă în detaliu. Pe baza fenomenelor fizice și a parametrilor stabiliți anterior, a fost creat un model numeric care reproduce comportamentul fizic al dispozitivului, folosind metode numerice și un program specializat. Sunt prezentate rezultatele simulărilor ce permit vizualizarea distribuției temperaturii, estimarea fluxurilor de căldură și a răspunsului electric în regimuri variate de funcționare. Acest capitol oferă o evaluare esențială a fezabilității și performanțelor teoretice înainte de realizarea prototipului fizic, ceea ce face posibilă optimizarea proiectului prin ajustarea parametrilor într-o fază timpurie.

Capitolul patru este dedicat descrierii construcției standurilor experimentale și realizării testelor practice, o etapă critică pentru validarea teoretică și numerică anterioară. Aici se descriu în amănunt echipamentele, procedurile de testare și metodologia utilizată pentru a asigura acuratețea și stabilitatea măsurărilor. Se evidențiază dezvoltarea a trei standuri experimentale distincte: unul dedicat testării și selecției materialelor pentru protecția termică a modulelor, unul pentru testarea dispozitivului în laborator și un stand montat pe vehicul, care reflectă condițiile reale de exploatare. Această complexitate metodologică subliniază rigurozitatea cercetării și contribuie la garantarea unei tranziții line între etapa de proiectare și implementare.

Capitolul cinci reunește rezultatele experimentale și oferă analiza comparativă între datele obținute în mediu real și simulările numerice. Printr-o interpretare riguroasă a datelor, sunt evaluate performanțele dispozitivului sub multiple perspective, inclusiv eficiența conversiei termoelectrice, stabilitatea termică și rezistența mecanică, precum și efectele straturilor de protecție aplicate. Sunt realizate diagrame comparative, tabele detaliate și formule interpretative care validează arhitectura dispozitivului. Această analiză este esențială pentru demonstrarea viabilității tehnologice și pentru fundamentarea argumentativă a implementării pe scară largă.

Ultimul capitol oferă concluziile finale ale cercetării, sintetizând clar contribuțiile originale și personale aduse studiului regenerării energiei din gazele de evacuare. Sunt evidențiate perspectivele viitoare de cercetare, incluzând propuneri privind optimizarea materialelor, extinderea aplicațiilor și integrarea tehnologiilor în sisteme auto mai complexe. Aceasta deschide un orizont larg pentru continuitatea și aprofundarea cercetării la nivel avansat, relevând astfel importanța tezei în domeniul ingineriei autovehiculelor, termoelectricității, energiei și protecției mediului.

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII

1.1. Termoelectricitatea

Termoelectricitatea reprezintă un fenomen fizic care descrie conversia directă între energia termică și electrică, constituind baza unor tehnologii esențiale pentru aplicații în domeniul energiilor regenerabile. Conform literaturii științifice contemporane, acest câmp multidisciplinar a cunoscut o evoluție remarcabilă de peste două secole, oferind soluții durabile pentru recuperarea căldurii de deșeuri și conversiei acesteia în energie electrică disponibilă [1], [2].

1.2. Principiile fundamentale ale termoelectricității

Termoelectricitatea este un fenomen fizic care utilizează energia termică pentru a obține energie electrică, utilizând în anumite situații generatoarele termoelectrice (TEG). Principiile fundamentale ale termoelectricității se bazează pe capacitatea materialelor de a transforma diferențele de temperatură în tensiuni electrice și invers, prin intermediul fenomenelor fizice intercorelate cunoscute sub denumirea de efectele Seebeck, Peltier și Thomson.

1.2.1. Efectul Seebeck (1821)

Efectul Seebeck descrie procesul prin care un circuit format din două metale diferite apare o tensiune electrică atunci când joncțiunile acestora se află la temperaturi diferite. Tensiunea produsă în efectul Seebeck este proporțională cu diferența de temperatură dintre cele două joncțiuni, conform ecuației:

$$V = S \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Unde S este coeficientul Seebeck, exprimat în V/K , care indică tensiunea generată per unitate de gradient termic.

1.2.2. Efectul Peltier (1834)

În 1834, fizicianul francez Jean Charles Athanase Peltier a descoperit efectul care poartă numele său, descriind fenomenul invers al efectului Seebeck: atunci când un curent electric trece printr-o joncțiune între două materiale diferite, apare un flux de căldură care determină încălzirea sau răcirea locală a joncțiunii. Fiecare purtător aduce sau absoarbe o cantitate de energie legată de coeficientul Peltier, care este proporțional cu coeficientul Seebeck:

$$\pi = S \cdot T \quad (1.2)$$

În practică, efectul Peltier este utilizat în modulul de răcire termoelectric (TEC), cu aplicații variate: răcirea componentelor electronice sensibile, frigidere portabile fără compresor, instrumente medicale sau sisteme de climatizare localizate.

1.2.3. Efectul Thomson (1851)

Efectul Thomson constă în evoluția unui flux de căldură adițional într-un conductor omogen, când acesta este străbătut de un curent și supus unui gradient de temperatură, un efect mai subtil dar relevant în calculul randamentelor reale.

Relațiile termodinamice fundamentale stabilite de Thomson includ relația Onsager Kelvin:

$$\tau = T \frac{dS}{dT} \quad (1.3)$$

Unde: τ - este coeficientul Thomson, iar această relație conectează coeficientul Thomson cu dependența de temperatură a coeficientului Seebeck [3].

1.3. Materialele termoelectrice

Un conductor care transportă un curent electric generează căldură pe baza produsului dintre rezistența (R) și curentul la pătrat (I), conform legii lui Joule. Transformarea directă a căldurii în electricitate, sau invers (termoelectricitatea), stă la baza construcției termocuplurilor, respectiv a pilelor termoelectrice (o colecție de termocupluri), [4]. Materialele termoelectrice reprezintă un grup special de materiale capabile să convertească diferențele de temperatură în energie electrică și, invers, să transforme curentul electric în fluxuri de căldură.

Literatura de specialitate menționează că performanța materialelor termoelectrice este determinată în special de proprietățile termice și electrice complementare, sintetizate prin coeficientul de performanță (Figure of Merit - FoM) ZT:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{K} \quad (1.4)$$

Unde:

- S - coeficientul Seebeck ($\mu\text{V/K}$), indicând magnitudinea tensiunii induse pe unitate de gradient de temperatură,
- σ - conductivitatea electrică ($1/\Omega\text{m}$), măsurând capacitatea materialului de a conduce curent electric,
- T - temperatura absolută (K),
- K - conductivitatea termică (W/mK), reprezentând capacitatea materialului de a conduce căldura.

Materialele clasice care au fost studiate includ telurura de bismut (Bi_2Te_3), siliciul de galiu, aliajele pe bază de plumb și materiale pe bază de siliciu-germaniu, fiecare adaptat pentru anumite intervale de temperatură și aplicații specifice. Telurura de bismut, de pildă, este predominantă în aplicații la temperaturi scăzute și moderate, datorită proprietăților sale termoelectrice favorabile și stabilității chimice [5], [6].

O direcție majoră în cercetările actuale o reprezintă materialele nanostructurate și compozitele avansate, care permit manipularea transportului termic la scară microscopică, contribuind la diminuarea pierderilor prin conductivitate termică ridicată, fără a afecta conductivitatea electrică. De asemenea, materialele organice termoelectrice atrag interes datorită flexibilității și potențialului lor de integrare în dispozitive portabile și electronice flexibile. Un domeniu cheie al acestor cercetări îl reprezintă încercarea de a obține materiale cu un raport optim între coeficientul Seebeck, conductivitatea electrică și conductivitatea termică, parametri esențiali pentru maximizarea coeficientului de performanță. Prin nanostructurare și ingineria materialelor la scară microscopică, se reușește reducerea pierderilor de căldură prin conductivitate termică, fără a compromite conductivitatea electrică, fapt ce sporește semnificativ eficiența tehnologiilor termoelectrice [5], [6].

Dispozitivele termoelectrice de tip generator (TEG – *Thermoelectric Generator*) și răcitor (TEC – *Thermoelectric Cooler*) reprezintă soluții avansate pentru conversia directă a energiei termice în energie electrică, respectiv pentru realizarea controlului termic prin efectul Peltier. Ele funcționează fără piese în mișcare, folosind proprietățile materialelor semiconductoare pentru a transforma un gradient de temperatură în tensiune electrică (efectul Seebeck) sau invers, pentru a genera un gradient termic prin aplicarea unui curent electric (efectul Peltier).

Randamentul termodinamic al motoarelor cu ardere internă (ICE) este scăzut, deoarece doar între 30 - 35% din energia combustibilului este transformată în lucru mecanic util, restul este disipată în exterior, în principal prin sistemul de răcire și evacuarea gazelor (vezi fig.1.1).

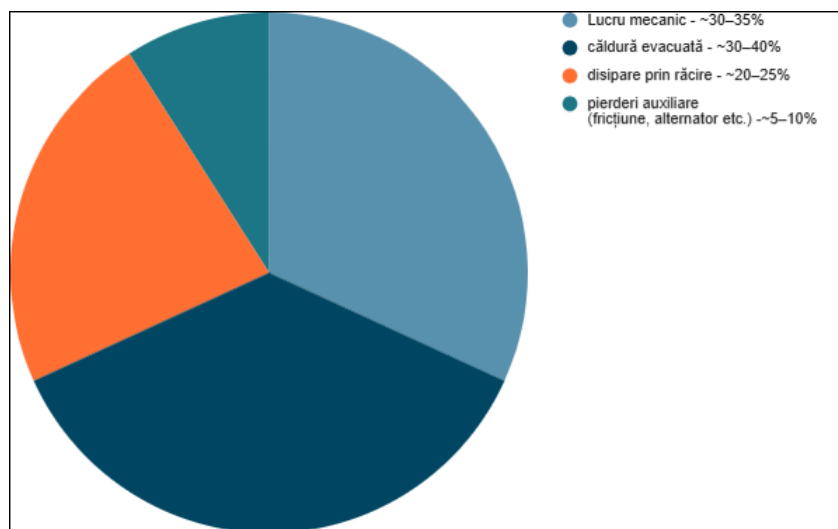


Fig. 1.1 Repartiția pierderilor și a energiei utile într-un motor termic

1.4. Provocări și limitări

Chiar dacă TEG-urile oferă avantaje precum durabilitate, lipsa părților mobile și întreținerea redusă, ele se confruntă cu mai multe provocări:

- eficiență energetică limitată în comparație cu alte metode de recuperare a energiei;

- costuri ridicate ale materialelor semiconductoare performante;
- dificultăți de integrare în spațiul limitat al vehiculului și în condiții de vibrații, șocuri și cicluri termice frecvente;
- degradarea în timp a materialelor din cauza oxidării și diferențelor mari de temperatură.

1.5. Integrarea TEG în arhitectura vehiculului

În industria auto, cel mai frecvent TEG-urile sunt instalate între două schimbătoare de căldură:

- partea caldă în contact cu eșapamentul sau cu lichidul de răcire fierbinte;
- partea rece răcită cu aer sau cu lichid din circuitul motorului.

Energia electrică produsă este direcționată către bateria vehiculului (12V sau 48V), reducând sarcina alternatorului și implicit consumul de combustibil. În vehiculele hibride sau electrice, energia recuperată poate fi stocată direct în bateria de tracțiune. Studii experimentale realizate în programele DOE și BMW au arătat că un ATEG poate aduce o economie de combustibil între 2–4% pe ciclurile oficiale de testare (FTP, HWFET), ceea ce este semnificativ în raport cu obiectivele de reducere a emisiilor.

1.6. Surse de căldură disponibile în automobile

Într-un vehicul, mai multe subsisteme pot valorifica energia din căldura reziduală prin conversia în energie electrică prin generatoarele termoelectrice:

1. Gazele de eșapament – temperaturi ridicate (300–600 °C), flux stabil de căldură. Este sursa principală utilizată în prototipurile dezvoltate de producători ca BMW, GM, Ford. Prototipuri testate pe BMW Seria 5 au generat până la 600 W electric la sarcină maximă.
2. Circuitul de răcire al motorului – temperaturi moderate (80–120 °C), dar stabilitate termică bună. Această opțiune generează puteri mai mici (50–200 W), însă are avantajul integrării facile și a lipsei de penalizări asupra eșapamentului.
3. Sistemul de frânare – discurile și etrierele ating temperaturi mari în timpul frânărilor intense (până la 700 °C). Conceptual, TEG-urile pot fi montate pe aceste componente pentru a recupera o parte din energia disipată, dar dificultățile mecanice (șocuri, vibrații, cicluri rapide de încălzire/răcire) fac ca această aplicație să fie în stadiul experimental.
4. Caroseria și sticla expusă la radiația solară – diferențele de temperatură între interior și exterior ar putea alimenta filme subțiri termoelectrice transparente. În prezent, aceasta rămâne o direcție de cercetare pentru viitor, cu aplicații posibile la geamurile inteligente sau la panourile de acoperiș auto.

CAPITOLUL 2. ANALIZA TEORETICA

Generatoarele termoelectrice reprezintă dispozitive în stare solidă care transformă direct căldura în energie electrică prin intermediul efectelor termoelectrice, oferind o soluție elegantă pentru conversia energetică fără părți mobile. În contextul actual al eficienței energetice și al valorificării căldurii reziduală, înțelegerea fundamentelor teoretice care guvernează funcționarea acestor dispozitive devine esențială pentru dezvoltarea și optimizarea aplicațiilor practice.

2.1. Funcționarea Generatorului Termoelectric

Generatoarele termoelectrice funcționează pe principiul invers al efectului Seebeck, convertind direct diferențele de temperatură în energie electrică fără componente mecanice în mișcare. Dispozitivul este compus din materiale semiconductoare p- și n-tip conectate în serie electrică și paralel termic, având două joncțiuni: una caldă, care preia căldura sursei, și una rece, care disipează căldura către mediul înconjurător (fig. 2.1).

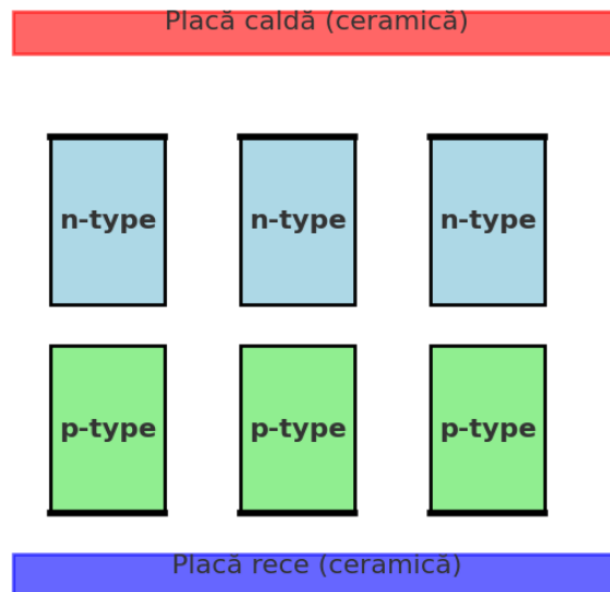


Fig. 2.1 Structura unui modul TEG

Conversia termoelectrică se bazează pe utilizarea diferențelor de temperatură pentru a produce energie electrică, prin efectul Seebeck. În practică, această conversie se realizează prin **modulele termoelectrice**, alcătuite din elemente semiconductoare conectate electric în serie și termic în paralel, între două plăci ceramice izolatoare.

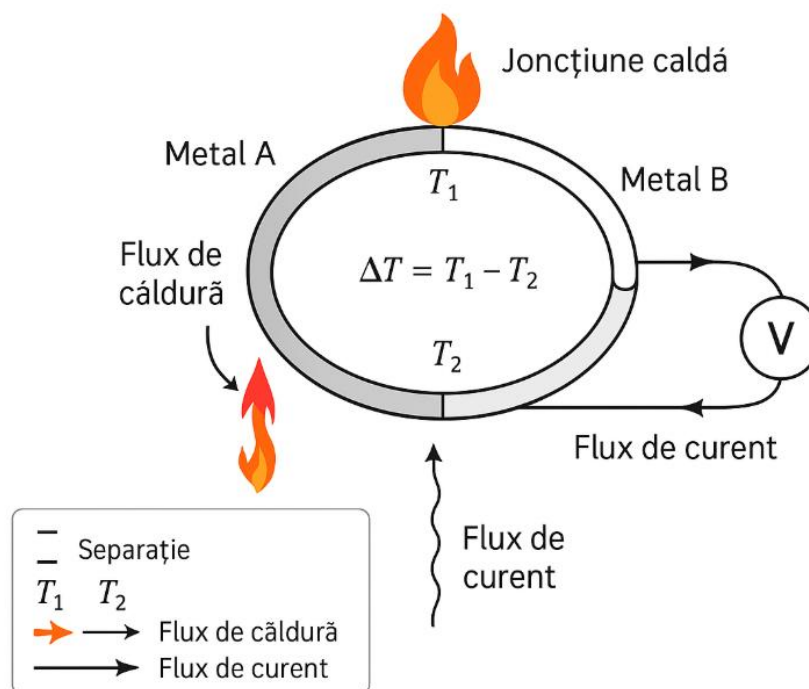


Fig. 2.2 Conversia energiei termice în energie electrică

Figura 2.2 descrie modul în care energia termică este transformată în energie electrică prin intermediul unui termocuplu, bazat pe efectul Seebeck. Sistemul este constituit din două metale diferite, denumite „Metal A” și „Metal B”, care sunt conectate între ele în două puncte numite joncțiunea caldă și joncțiunea rece. Joncțiunea caldă este situată lângă o sursă de căldură, spre exemplu o flacără sau gazele de eșapament, astfel încât temperatura T_1 să crească semnificativ. Cealaltă joncțiune este supusă unei temperatură mai scăzută, notată cu T_2 , ceea ce creează o diferență de temperatură între cele două joncțiuni. Această diferență termică ΔT determină apariția unei tensiuni electromotoare (EMF) în circuitul închis format de metalele A și B. Tensiunea electromotoare reprezintă practic diferența de potențial electric ce apare în circuit fără vreo sursă externă de energie, fiind generată de variația temperaturii

2.2. Transferul de căldură

Unul dintre cele mai importante procese care stau la baza funcționării sistemelor termoelectrice este transferul de căldură. Astfel, eficiența unui generator termoelectric depinde de diferența de temperatură între cele două fețe ale modulului termoelectric, unde intervine fenomenul de transfer termic.

Primul proces, conducția, presupune transmiterea energiei termice prin contact direct între particulele unui material, fără deplasarea fizică a substanței. Acest fenomen are la bază legea lui Fourier, care exprimă fluxul termic proporțional cu gradientul de temperatură și conductivitatea

termică a materialului [7]. Un exemplu comun îl reprezintă transferul de căldură printr-o tijă metalică încălzită într-o sursă externă.

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

unde:

- q = fluxul de căldură [W];
- k = conductivitatea termică a materialului [W/m·K];
- A = aria secțiunii transversale [m²];
- dT/dx = gradientul de temperatură [K/m].

Convecția presupune deplasarea efectivă a masei unui fluid, fie el aer sau lichid. Căldura face ca o porțiune din fluid să se încălzească, să devină mai ușoară și să urce în sus, în timp ce în locul ei intră un fluid mai rece, creând un curent continuu de circulație. Astfel, în jurul unui radiator, de exemplu, aerul cald se ridică treptat, iar aerul rece coboară pentru a-l înlocui.

Convecția apare la interfața dintre o suprafață solidă și un fluid în mișcare, fiind descrisă de legea lui Newton a răcirii:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

unde:

- h - coeficientul de transfer termic convectiv [W/m²·K];
- T_s - temperatura suprafeței solide [K];
- T_∞ - temperatura fluidului aflat departe de suprafață [K].

Fluxul radiativ emis de o suprafață ideală (corp negru) este dat de legea lui Stefan-Boltzmann:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (2.3)$$

unde:

- ε = emisivitatea suprafeței ($0 \leq \varepsilon \leq 1$);
- σ = constanta lui Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m²·K⁴);
- T_s = temperatura suprafeței [K];
- T_{amb} = temperatura mediului ambiant [K].

Cele trei mecanisme pot acționa concomitent, iar în proiectarea sistemelor termoelectrice este critică analiza modului în care acestea interacționează, pentru maximizarea diferenței de temperatură și implicit a performanței energetice [8].

2.3. Rezistența termică

Rezistența termică este un concept ce reflectă cât de greu trece căldura printr-un material sau un sistem. Asemenea unei rezistențe electrice care opune dificultăți curentului electric, rezistența termică măsoară opoziția pe care o întâmpină fluxul de căldură atunci când traversează o suprafață sau un strat de material. Cu alte cuvinte, este cât de mult „se împotrivesc” un material transferului de energie termică.

Matematic, rezistența termică (R) este definită ca raportul dintre diferența de temperatură (ΔT) dintre două puncte și fluxul de căldură (Q) care circulă între ele:

$$R_t = \frac{\Delta T}{Q} \quad (2.4)$$

unde:

- R_t = rezistența termică [K/W];
- ΔT = diferența de temperatură [K];
- Q = fluxul de căldură transferat [W].

2.4. Rezistența termică de contact

Atunci când două suprafețe solide sunt presate una de cealaltă, la nivel microscopic ele nu se ating perfect, ci doar în anumite puncte. Restul interfeței este format din goluri umplute cu aer sau cu materiale intermediare. Această imperfecțiune conduce la apariția unei rezistențe termice de contact, care reduce eficiența transferului de energie.

Valoarea acestei rezistențe depinde de rugozitatea și planeitatea suprafețelor, de presiunea aplicată la montaj, de eventualele materiale interstițiale folosite (paste termoconductoare, folii subțiri etc.) și de condițiile de temperatură. În unele situații, pierderile prin rezistența de contact pot fi semnificative și trebuie minimizate prin finisarea atentă a suprafețelor și prin alegerea unor materiale de umplere cu conductivitate termică ridicată.

2.5. Rezistența convectivă

Transferul de căldură între o suprafață solidă și un fluid aflat în mișcare este caracterizat prin rezistența convectivă, exprimată ca:

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2.5)$$

Unde:

- h - coeficientul convectiv de transfer termic;
- A - aria suprafeței de schimb.

Atunci când viteza de curgere a fluidului crește sau când se folosesc suprafețe extinse și aripioare pentru disipare scade rezistența convectivă. Proiectarea radiatoarelor pentru modulele termoelectrice influențează direct diferența de temperatură pe care o poate exploata modulul, de aceea reducerea acestei rezistențe este una dintre preocupările principale.

2.6. Rezistența conductivă

Căldura care se propagă printr-un material solid întâmpină o opoziție ce poate fi cuantificată prin rezistența conductivă:

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (2.6)$$

Unde:

- L este grosimea stratului,
- k conductivitatea termică a materialului,
- A aria secțiunii prin care are loc transferul.

2.7. Efectul fluxului termic neuniform asupra ansamblurilor TEG

În multe aplicații precum eșapament cu distribuție neuniformă, suprafețe cu „hot spots”, fluxul termic incident nu este uniform pe suprafața ansamblului TEG. Această neuniformitate (NTD) produce mismatch electric între modulele dintr-o rețea serie/paralel, cu impact direct asupra punctului de putere maximă și a eficienței sistemului. Studiul lui He, Zhang, Li, Ji (2015) a arătat că, pentru un gradient mare de flux, performanța totală poate crește dacă se renunță la porțiunile cu flux slab, reducând numărul de module, dar crescând puterea utilă totală a ansamblului. Aceasta este o concluzie contra-intuitivă: mai puține module → putere mai mare, atunci când distribuția termică este foarte neuniformă [9].

2.8. Modele scurte pentru rețele serie/paralel sub ΔT neuniform

Considerăm elementul i (material, dimensiuni și contact date), cu:

- tensiune internă $V_{oc,i} = S_i \Delta T_i$,
 - rezistență internă R_i .
- (2.7)

Rețea în serie (același curent I prin toate)

- Tensiunea pe ansamblu: $V_{\Sigma} = \sum_i (V_{oc,i} - IR_i)$.
- Puterea livrată în sarcină R_L : $P = IV_{\Sigma} - I^2 R_L$.
- Echivalent: $V_{\Sigma} = V_{oc,\Sigma} - IR_{\Sigma}$ cu $V_{oc,\Sigma} = \sum_i S_i \Delta T_i$, $R_{\Sigma} = \sum_i R_i$.

(2.8)

- Pentru maximul de putere (condiție MPP pe serie):

$$I^* = \frac{V_{oc,\Sigma}}{2R_{\Sigma}} = \frac{\sum_i S_i \Delta T_i}{2 \sum_i R_i}, P_{\max} = \frac{V_{oc,\Sigma}^2}{4R_{\Sigma}} \quad (2.9)$$

Observație critică: un element "rece" (cu ΔT_i mic) mărește R_{Σ} dar contribuie slab la $V_{oc,\Sigma} \rightarrow$ scade $P_{\max}$. Rezultatul formal susține recomandarea lui He et al.: eliminarea elementelor cu $S_i \Delta T_i \ll I^* R_i$ (contribuție negativă netă) poate crește $P_{\max}$ [9].

Rețea în paralel (același voltaj V pe toate)

- Curentul prin i : $I_i = (V_{oc,i} - V)/R_i$.
- Curent total: $I_{\Sigma}(V) = \sum_i (V_{oc,i} - V)/R_i$.
- Puterea: $P(V) = VI_{\Sigma}(V)$.

(2.10)

Condiția MPP pe paralel (derivare $dP/dV = 0$) dă un V^* ce ponderă fiecare ramură cu $1/R_i$. Dacă distribuția ΔT_i este largă, ramurile "reci" trag V^* în jos și consumă curent (bypass) $\rightarrow$ reduc P . Soluții: decuplare ramuri "reci" sau reconfigurare dinamică. Concluzia e consistentă cu seria, dar criteriul de decizie depinde de R_i și de ponderarea $1/R_i$ [10].

2.9. Reguli de proiectare și lucrări conexe

Zonare termică + „selection gating”: împărțirea suprafeței în zone de flux apropiat; conectarea în serie a modulelor cu ΔT apropiat; scoaterea din circuit a zonelor cu flux foarte mic. He et al. arată câștig de putere când „partea joasă” este abandonată la gradient mare.

Reconfigurare topologică (dinamică): comutarea conexiunilor serie/paralel pentru a urmări NTD (heterogeneous temperature distribution) — validat teoretic/practic în studii ulterioare (rețele cu comutatoare + MPPT dedicat) [11].

Adaptare MPPT pentru NTD: algoritmi MPPT trebuie să țină cont de mismatch-ul termic, altfel maximumul de putere este ratat persistent [12].

Gestionarea fluxului: fie omogenizarea (heat-spreader, PCM, control debit) $\rightarrow$ putere stabilă, fie neuniformitatea și reconfigurarea electrică. Pentru sisteme solare TE, studii tranzitorii FEM arată beneficii ale PCM/heat-spreader în smulgerea vârfurilor și în îngustarea NTD [13].

2.10. Criteriul de eliminare

Pentru serie, elementul j dăunează dacă scade $P_{\max}$. Comparăm:

$$P_{\max}^{(cu)} = \frac{(V_{oc,\Sigma} + S_j \Delta T_j)^2}{4(R_{\Sigma} + R_j)} \quad (2.11)$$

$$P_{\max}^{(fărăj)} = \frac{V_{oc,\Sigma}^2}{4R_{\Sigma}} \quad (2.12)$$

Rezultă condiție aproximativă (prima ordine):

$$\frac{S_j \Delta T_j}{V_{oc,\Sigma}} < \frac{R_j}{R_{\Sigma}} \Rightarrow \text{merită exclus (la gradient mare)}. \quad (2.13)$$

Dacă aportul de tensiune al modulului "rece" (stânga) este relativ mai mic decât aportul său de rezistență (dreapta), includerea lui reduce $P_{\max}$. Această regulă formalizează observația lui He et al. despre "giving up lower heat-flux part" [9].

2.11. Condiții la limită

Condițiile la limită sunt esențiale în modelarea matematică a sistemelor distribuite și reprezintă restricțiile impuse asupra valorilor variabilelor modelului pe marginile domeniului de definire (spațial sau temporal).

Există mai multe tipuri principale de condiții la limită:

- Condiția Dirichlet: specifică valoarea exactă a variabilei în punctele la limită. De exemplu, temperatura pe suprafața unei plăci poate fi fixată la o valoare constantă.
- Condiția Neumann: specifică valoarea derivatelor (fluxurilor) variabilei la limită, deci stabilesc un flux sau o rată de schimb al mărimii fizice.
- Condiția Robin (combinată): reprezintă o combinație liniară între valoarea variabilei și a derivatelor sale la limită, adesea folosite pentru a modela transferurile de tip convecție sau procesele de schimb termic.
- Condiții periodice: asigură continuitatea valorilor și a fluxurilor la marginile opuse ale domeniului, folosite frecvent în modele cu simetrii repetate.

Aplicarea corectă a condițiilor la limită este esențială pentru acuratețea și stabilitatea soluțiilor numerice ale modelelor distribuite, ele reflectând realitatea fizică și legăturile dintre sistem și mediul înconjurător [14].

Modelul distribuit necesită impunerea condițiilor la limită:

- la joncțiunea caldă: $T(x=0) = T_{\text{hot}}$,
- la joncțiunea rece: $T(x=L) = T_{\text{cold}}$,
- fluxul termic este parțial convertit în electricitate conform legilor efectelor Seebeck și Peltier.

Prin această abordare se poate analiza efectul variației proprietăților termoelectrice cu temperatura și se pot obține valori mai realiste ale performanței.

2.12. Relevanța modelelor avansate

Diferența între cele două modele este esențială în proiectarea TEG-urilor pentru aplicații auto. Modelele concentrate sunt utile pentru dimensionări preliminare și pentru calculul rapid al randamentului, dar modelele distribuite permit optimizarea detaliată a geometriei, a materialelor și a condițiilor la limită. Studiile numerice au arătat că neglijarea efectului distribuției de temperatură poate duce la erori de până la 15–20% în estimarea puterii generate [15].

2.13. Analiza exergetică a generatoarelor termoelectrice

Pe lângă analiza energetică clasică, o abordare mai riguroasă a performanței generatoarelor termoelectrice (TEG) implică utilizarea analizei exergetice. Aceasta ia în considerare nu doar cantitatea de energie, ci și calitatea acesteia, adică capacitatea reală de a fi transformată în lucru mecanic sau electric.

În sistemele auto, unde sursa termică este reprezentată de gazele de eșapament, analiza exergetică evidențiază faptul că doar o fracțiune limitată din energia termică poate fi transformată util, restul fiind iremediabil degradată datorită nivelului scăzut de temperatură al gazelor după conversie. Prin optimizarea contactelor termice și a configurației geometrice a modului, se pot reduce pierderile exergetice și crește utilizarea potențialului disponibil [16], [17]

2.14. Definirea exergiei pentru fluxurile termice

Exergia asociată unui flux de căldură Q , transferat la temperatura T , este dată de:

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2.14)$$

unde T_0 este temperatura mediului de referință (ambient). Spre deosebire de energie, exergia depinde de nivelul de temperatură la care are loc transferul: o unitate de căldură la temperatură înaltă are o valoare exergetică mai mare decât aceeași unitate la temperaturi joase. Astfel, fluxul termic de intrare al unui TEG (Q_{in} la T_{hot}) deține un potențial exergetic mult mai ridicat decât fluxul rezidual (Q_{out} la T_{cold}).

2.15. Randamentul exergetic al TEG

Randamentul exergetic se definește ca raportul dintre exergia transformată în putere electrică și exergia disponibilă la intrare:

$$\eta_{ex} = \frac{P_{out}}{Ex_{in}} \quad (2.15)$$

unde:

$$Ex_{in} = Q_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_{hot}} \right) \quad (2.16)$$

Comparativ cu randamentul energetic ($\eta = P_{out}/Q_{in}$), randamentul exergetic oferă o imagine mai clară asupra performanței, întrucât cuantifică pierderile ireversibile prin raportarea la disponibilitatea teoretică maximă a fluxului termic.

2.16. Bilanțul exergetic într-un TEG

Un bilanț exergetic complet se poate scrie sub forma:

$$Ex_{in} = P_{out} + Ex_{distr} \quad (2.17)$$

unde Ex_{distr} reprezintă exergia distrusă prin ireversibilități, incluzând:

- pierderile Joule,
- conducția termică parazită,
- rezistențele de contact.

Prin cuantificarea acestor termeni, analiza exergetică permite evaluarea clară a locurilor unde are loc degradarea resursei disponibile și sugerează direcții de îmbunătățire. Aceasta reprezintă subliniază că randamentul exergetic al TEG-ului nu depinde doar de raportul dintre energia electrică produsă și căldura absorbită, ci și de calitatea fluxului termic și de reducerea ireversibilităților. În aplicațiile auto, unde sursa caldă (gazele de eșapament) are temperatură variabilă și contactele termice sunt dificil de optimizat, exergia distrusă reprezintă o proporție semnificativă din bilanț, limitând performanța globală a conversiei.

2.17. Coeficientul de performanță ZT

Performanța unui material termoelectric este caracterizată de factorul adimensional:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k} \quad (2.18)$$

unde T este temperatura absolută. În practică, fiecare termen depinde de temperatură:

- $S(T)$ crește sau scade în funcție de structura electronică a materialului,
- $\sigma(T)$ este influențată de concentrația purtătorilor de sarcină și de mobilitatea acestora,
- $k(T)$ include atât contribuția fononică, cât și pe cea electronică, ambele dependente de temperatură.

Astfel, ZT nu mai este o valoare fixă, ci o funcție $ZT(T)$ ce trebuie evaluată prin integrare pe domeniul termic:

$$\overline{ZT} = \frac{1}{T_{hot} - T_{cold}} \int_{T_{cold}}^{T_{hot}} \frac{S(T)^2 \sigma(T) T}{k(T)} dT \quad (2.19)$$

Această valoare medie oferă o estimare mai realistă a performanței modulului.

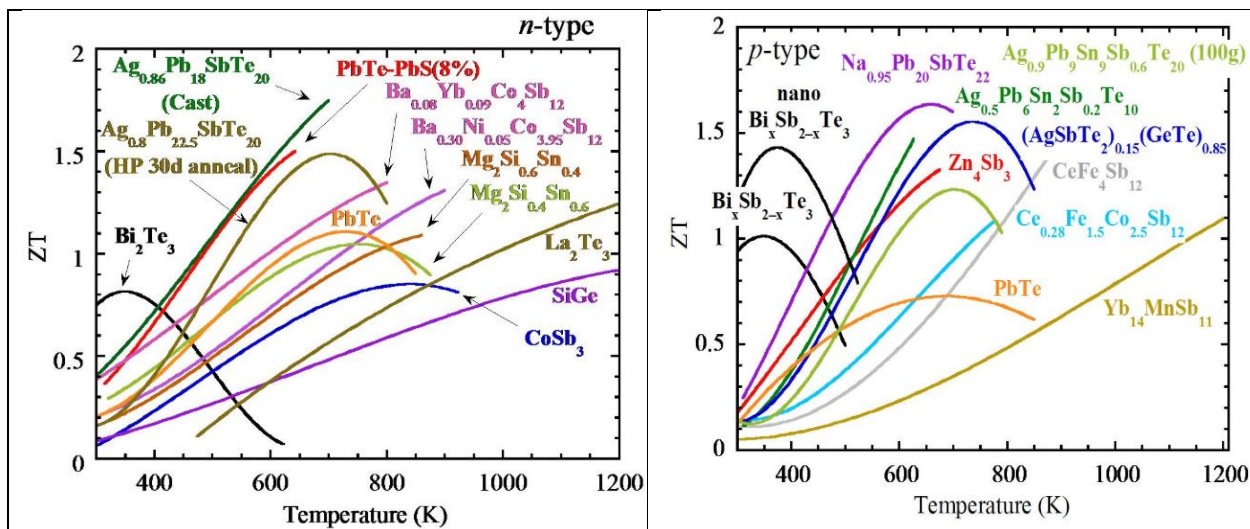


Fig.2.3 Evoluția factorului ZT în funcție de temperatură pentru materiale termoelectrice n-type și p-type [18]

În diagrama din stânga sunt prezentate materiale de tip *n*, unde se remarcă faptul că Bi₂Te₃ are performanțe bune la temperaturi joase (aproximativ 300–400 K), ceea ce îl face util pentru aplicații de micro-răcire. Pe măsură ce temperatura crește, PbTe și aliajele sale dopate ating valori ridicate ale ZT (până la ~1,5), fiind potrivite pentru aplicații la temperaturi medii (500–800 K). La temperaturi mai înalte (800–1100 K), siliciu-germaniul (SiGe) și skutteruditele (CoSb₃, LaTe) devin dominante, cu valori ZT de peste 1, confirmând utilizarea lor în aplicații energetice și în generatoare termoelectrice pentru medii extreme, inclusiv în domeniul aerospațial.

Diagrama din dreapta prezintă materialele de tip *p*, unde se observă că Bi–Sb–Te este performant la temperaturi joase, în jur de 300 K, similar cu varianta n-type. La temperaturi intermediare, PbTe și aliajele sale dopate (de exemplu Zn–Sb sau Ag–Pb–Sb–Te) ating performanțe ridicate, cu ZT apropiat de 1,5. În zona temperaturilor înalte, compuși precum Yb₁₄MnSb₁₁ și clathratele dopate oferă valori ZT competitive, indicând o stabilitate termică superioară și o adaptabilitate pentru aplicații industriale de înalt randament. Creșterea coeficientului Seebeck și scăderea conductivității termice contribuie la îmbunătățirea performanței, compensând în mare parte reducerea conductivității electrice. Astfel, materialul atinge un domeniu de temperatură optim, în care conversia termoelectrică este maximă.

Din punct de vedere aplicativ, acest comportament sugerează că fiecare material are o „fereastră de performanță” bine definită, iar alegerea lui pentru aplicații automotive trebuie corelată cu temperatura medie a gazelor de eșapament sau a sursei de căldură disponibile. Această abordare confirmă importanța utilizării unor analize cu proprietăți dependente de temperatură, deoarece modelele cu parametri constanți pot subestima sau supraestima performanța reală a TEG-urilor cu 15–25% [2], [19], [20].

2.18. Randamentul

Randamentul maxim teoretic al unui TEG cu parametri constanți se scrie:

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta T}{T_{\text{hot}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}}}} \quad (2.20)$$

Însă, atunci când proprietățile depind de temperatură, se utilizează $\overline{ZT}$, iar analiza numerică devine necesară. Rezultatele arată că, pentru materiale precum Bi_2Te_3 , PbTe sau SiGe , variațiile de S , σ și k pot conduce la diferențe de 15-25% între randamentul calculat simplificat și cel obținut prin integrarea exactă [21].

CAPITOLUL 3. ANALIZA NUMERICĂ

Recuperarea căldurii din gazele de eșapament cu ajutorul generatoarelor termoelectrice (TEG) presupune o interacțiune complexă între dinamica fluidelor, transfer de căldură conjugat și conversie termo-electrică neliniară la nivel de module. Modelarea numerică (CFD/FEM) permite explorarea acestor cuplaje fără costurile și limitările testelor pe vehicul, oferind acces la câmpuri spațiale de temperatură, viteză, presiune și la puterea electrică generată în regim staționar sau tranzitoriu. În ultimii ani au apărut cadre hibride tranzitorii CFD-TE capabile să reproducă fidel răspunsul dinamic al unui ATEG (Automotive TEG) pe cicluri de conducere, precum și platforme de optimizare geometrică a schimbătorului de căldură sub constrângerea contrapresiunii admisibile pe evacuare [22], [23].

Obiectivul capitolului este formularea și validarea unui model matematic capabil să prezică tensiunea, curentul și puterea electrică generate de ansamblul de module termoelectrice (TEG) montate pe conducta de evacuare a vehiculului, în funcție de diferența de temperatură impusă, condițiile de răcire și sarcina electrică. Modelul este conceput pentru a fi calibrat pe baza măsurătorilor experimentale efectuate la mai multe regimuri termice (temperaturi) și de viteză.

Ipoteze și delimitări :

- Transferul termic prin ansamblul TEG este descris prin conducție, convecție forțată și radiație; la nivel de modul, pierderile prin radiație sunt incluse efectiv în conductanța termică echivalentă.
- Proprietățile efective (coeficient Seebeck α , rezistență internă R_i , conductanță termică K) se consideră parametri aparent constanți pe intervalele de temperatură analizate; variația lor cu T poate fi introdusă ulterior în formă liniară sau polinomială dacă datele o impun.
- Conexiunea electrică a modulelor este reprezentată de un echivalent Thevenin la bornele ansamblului: sursă ideală V_{oc} în serie cu R_i .
- Contactele termice și rezistențele interfețelor sunt agregate în parametrii echivalenți; distribuțiile neuniforme de temperatură sunt reprezentate prin valori medii pe suprafețele de contact.

3.1. Scop și domeniu de aplicare

Scopul modelului numeric este predicția în timp a mărimilor electrice generate de ansamblu (tensiune în gol V_{oc} , tensiune la borne V , curent I , putere P , randament η) în funcție de condițiile reale de exploatare: temperatura pe țeava de eșapament $T_{pipe}(t)$, temperatura feței calde $T_1(t)$, temperatura feței reci $T_2(t)$, temperatura ambiantă $T_{amb}(t)$, viteza vehiculului $U(t)$ (care controlează convecția prin radiator), sarcina electrică R_L și topologia electrică a stivei. Modelul este folosit atât direct pe măsurători (când introduci T_1 și T_2), cât și în mod predictiv (când introduci T_{pipe} , U , T_{amb} , iar modelul estimează T_1/T_2).

3.2. Descrierea sistemului și ipoteze

Ansamblu fizic: bloc inox $200 \times 60 \times 60$ mm cu alezaj $\varnothing 51$ mm montat între toba intermediară și finală; pe fețele plane se aplică plăci de cupru 50×200 mm ca distribuitor termic; pe cupru se montează 20 module TEC1-12706 (dispunere echivalentă cu $N_s = 20, N_p = 1$, extensibil la serie-paralel), apoi pastă termoconductoare și radiatoare aluminiu (~ 40 mm aripioare). Etanșarea cu șnur ceramic reduce pierderile laterale de căldură și by-pass-ul aerului. Limita de funcționare: $T_1 < 200^\circ\text{C}$.

3.3. Modelul electric (echivalent Thevenin)

Pentru o ramură cu N_s module în serie:

$$V_{oc}^{(\text{ram})} = N_s \alpha(\bar{T}) \Delta T, R_i^{(\text{ram})} = N_s R_i(\bar{T}), \Delta T = T_1 - T_2 \quad (3.1)$$

La o sarcină R_L (de ex. 82Ω) :

$$I = \frac{V_{oc}}{R_i^{(\text{tot})} + R_L}, V = IR_L, P = I^2 R_L = \frac{V_{oc}^2 R_L}{(R_i^{(\text{tot})} + R_L)^2} \quad (3.2)$$

Puterea maximă apare pentru $R_L \approx R_i^{(\text{tot})}$ (principiul compatibilității electrice).

3.4. Modelul termic (staționar + dinamic)

Bilanț termic prin modul

Pe direcția cald $\rightarrow$ rece, fluxul printr-un modul este:

$$q = \alpha(\bar{T}) T_1 I_m - \frac{1}{2} I_m^2 R_i(\bar{T}) + K(\bar{T}) \Delta T \quad (3.3)$$

unde $I_m = I$ pentru serie și $I_m = I/N_p$ pentru paralel. Fluxul total prin stivă: $Q = N_s N_p q$.
Randament: $\eta = P/Q$.

Rețeaua termică echivalentă (noduri și rezistențe)

Se consideră trei noduri principale, fiecare cu capacitate termică:

- Nod PIPE/INOX: temperatura T_{inox} (cuplată la T_{pipe} și la plăcile de cupru prin rezistențe de contact).
- Nod CALD (T1): temperatura la baza modulului pe fața caldă (cupru cald).
- Nod RECE (T2): temperatura pe placa/radiatorul rece.

Legăturile:

$$T_1 = T_{\text{inox}} - Q R_{th,c}, T_2 = T_{\text{amb}} + \frac{Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}}}{h(U) A_{\text{eff}}} + Q R_{th,r} \quad (3.4)$$

Termenii convectiv și radiativ pe rece:

$$Q_{\text{conv}} = h(U) A_{\text{eff}} (T_2 - T_{\text{amb}}), Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_{\text{rad}} (T_2^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3.5)$$

Etanșarea cu șnur ceramic se reflectă în scăderea $R_{th,c}$ (contact mai bun) și/sau în h efectiv mai mare (pierdere laterală redusă).

Dinamica termică (capacitativă)

Se scriu ecuații diferențiale pentru evoluția în timp:

$$C_{\text{inox}} \frac{dT_{\text{inox}}}{dt} = \underbrace{H_{\text{pipe} \rightarrow \text{inox}} (T_{\text{pipe}} - T_{\text{inox}})}_{\text{cuplaj la teavă}} - \underbrace{\frac{T_{\text{inox}} - T_1}{R_{th,c}}}_{\text{către fața caldă}}, \quad (3.6)$$

$$C_{\text{cupru}} \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_{\text{inox}} - T_1}{R_{th,c}} - q, C_{\text{rad}} \frac{dT_2}{dt} = q - [h(U) A_{\text{eff}} (T_2 - T_{\text{amb}}) + \varepsilon \sigma A_{\text{rad}} (T_2^4 - T_{\text{sur}}^4)]$$

unde q conține termenii Seebeck/Peltier/Joule/K de la **(Bilanț termic prin modul)**. Acest sistem captează inerțiile (încălzire/răcire pe minute) observate în testele tale (urban, extraurban, autostradă).

Convecția pe radiator – corelație $h(U)$

Se utilizează o formă practică:

$$h(U) = h_0 + c U^m, m \in [0.6, 0.8] \quad (3.7)$$

unde h_0, c, m se calibrează pe datele tale (U, T_2) pentru fiecare regim (urban/extra/auto). Având viteza de aer măsurată (anemometru), U se poate înlocui cu viteza aerului prin aripioare.

Proprietăți dependente de temperatură

Dacă introducerea dependențelor reduce semnificativ eroarea, se activează:

$$\alpha(\bar{T}) = \alpha_0 + a_1 \bar{T}, R_i(\bar{T}) = R_{i0} + b_1 \bar{T}, K(\bar{T}) = K_0 + k_1 \bar{T} \quad (3.8)$$

cu $\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$. În lipsa dovezilor experimentale clare, se păstrează forma constantă.

Date de intrare și algoritm de calcul

Intrări

- Măsurate: $T_1(t), T_2(t)$ (sau) $T_{\text{pipe}}(t), U(t), T_{\text{amb}}(t)$;
- Configurație: N_s, N_p, R_L (ex. 82Ω), geometrie radiator ($A_{\text{eff}}, A_{\text{rad}}$), ε ;

- Parametri: $\alpha, R_i, K, R_{th,c}, R_{th,r}, h_0, c, m, C_{inox}, C_{cupru}, C_{rad}$ (inițial nominale, apoi calibrate).

Pașii de calcul (schemă explicită)

1. Dacă T_1, T_2 sunt date: $\Delta T = T_1 - T_2$.

Dacă T_{pipe}, U, T_{amb} sunt date: integrarea (Dinamica termică (capacitativă)) pe pas dt și obținem T_1, T_2 .

2. Tensiune în gol: $V_{oc} = N_s \alpha(\bar{T}) \Delta T$.
3. Rezistență internă totală: $R_i^{(tot)} = N_s R_i(\bar{T}) / N_p$.
4. Mărimi la sarcină: $I = \frac{V_{oc}}{R_i^{(tot)} + R_L}, V = IR_L, P = I^2 R_L$.
5. Bilanț termic: calculează $q, Q = N_s N_p q, \eta = P/Q$.
6. Condiții de siguranță: verifică $T_1 < 200^\circ\text{C}$ și $P \leq P_{rated}$ al rezistorului.

Identificarea parametrilor

- α : panta regresiei $V_{oc} - \Delta T$ pe măsurători în gol (mai multe ΔT).
- $R_i^{(tot)}$: din curba $V(R_L)$ sau $P(R_L)$ la ΔT aproape constant (maximul puterii la $R_L \simeq R_i^{(tot)}$).
- h_0, c, m : din T_2 vs. U (și T_{amb}), pe secvențe în regim stabil.
- $R_{th,c}, R_{th,r}$: prin potrivire globală a lui T_1, T_2 (și eventual Q dacă este măsurat) pe același set.
- K, C : ajustate pentru a minimiza eroarea pe transient (creșteri/scăderi de temperatură).

Funcția obiectiv: minimizarea sumelor pătrate pe vectorul $[V, I, P, T_1, T_2]$ (cu ponderi setate după incertitudinile de măsurare). Se raportează RMSE, MAPE, R^2 pe setul de validare.

Validare pe regimuri de rulare

Modelul se validează pe trei regimuri (urban 30 – 60 km/h, extraurban 60 – 90 km/h, autostradă 100-130 km/h). Pentru fiecare:

1. se rulează modelul cu serii de intrare reale (T_1, T_2) sau (T_{pipe}, U, T_{amb});
2. se compară V, I, P calculate cu cele măsurate pe $R_L = 82\Omega$;
3. se trasează diagrame paritate P_{model} vs. P_{exp} și se raportează erorile.

Opțional, se prezintă curbele $V_{oc}(\Delta T), V(\Delta T), I(\Delta T), P(\Delta T)$ și $P(R_L)$ (pentru a evidenția sarcina optimă).

Considerații de proiectare și sensibilitate

Se evaluează sensibilitatea lui P la variațiile parametrilor cheie:

$$S_x = \frac{\partial \ln P}{\partial \ln x}, x \in \{\alpha, R_i, K, h, R_{th,c}, R_{th,r}\}. \quad (3.9)$$

În practică, P este foarte sensibil la α și la potrivirea sarcinii ($R_L \approx R_i^{(\text{tot})}$); η este sensibilă la K și h (calitatea răcirii). Plăcile de cupru și etanșarea reduc neuniformitățile și pierderile laterale (efect vizibil în $R_{th,c}$ și în h efectiv).

3.5. Concluzii

Modelul numeric propus îmbină un nucleu electro-termic riguros (Seebeck–Peltier–Joule–Fourier) cu o rețea termică dinamică simplă, calibrată pe măsurători reale în trei regimuri de exploatare auto. Introducerea convecției dependente de viteză $h(U)$, a contactelor termice și, la nevoie, a proprietăților dependente de temperatură permite reproducerea fidelă a evoluțiilor V , I , P pe trasee reale, păstrând controlul asupra complexității. Modelul este astfel potrivit atât pentru estimarea performanței (inclusiv în proiectare și optimizare de sarcină), cât și pentru corelarea directă cu datele experimentale colectate pe același montaj.

3.6. Modelarea numerică a dispozitivului pentru recuperarea energiei electrice din gazele de eşapament prin metoda elementelor finite

În cadrul acestui capitol s-a realizat analiza numerică a dispozitivului destinat recuperării energiei electrice, utilizând metoda elementelor finite. Modelarea numerică a fost efectuată în ANSYS Workbench 2022 R2, prin intermediul modulului Transient Termic, având ca obiectiv

captarea procesului de transfer termic de la suprafața caldă a modulului termoelectric către partea sa rece, precum și evaluarea distribuției câmpului de temperatură în întregul ansamblu constructiv.

Aspectele esențiale exploatate în această etapă au constat în:

- definirea cu precizie a geometriei numerice și a domeniilor de calcul ce reflectă structura dispozitivului;
- alocarea proprietăților termofizice specifice ale materialelor componente, incluzând conductivitatea termică, densitatea și capacitatea termică specifică;
- impunerea condițiilor la limită consistente, prin setarea temperaturii inițiale a sistemului, precum și aplicarea temperaturii prescrise pe suprafața din cavitatea
- dispozitivului acolo de unde provine sursa de căldură, în corelație cu coeficienții de convecție aferenți suprafețelor expuse mediului ambiant;
- configurarea regimului de încărcare tranzitorie, care permite urmărirea evoluției liniare a temperaturii în timp și analiza comportamentului termic integrat al dispozitivului în condiții de funcționare reale.

Această metodologie asigură o înțelegere aprofundată nu doar a răspunsului termic al dispozitivului la variațiile de temperatură, ci și a influenței poziției de montaj pe conducta de evacuare, unde variațiile mari de temperatură pot genera fluctuații semnificative ce afectează eficiența și performanța conversiei energetice.

3.7. Modelul geometric

Modelul geometric al ansamblului pentru recuperarea căldurii din gazele de evacuare a vehiculului și transformarea în energie electrică a fost realizat utilizând mediul de modelare tridimensională **SolidWorks**, integrat în platforma ANSYS Workbench (Ansys, 2023).

Geometria a fost generată și este prezentată în Figura 3.1, care include:

- Suprafețe de contact cu gazele de ardere care simulează transferul de căldură către zona caldă a modulului termoelectric;
- dispozitivul propriu-zis, modelat conform configurației prezentat în **Capitolul 4**;
- suprafețele de contact din pastă termoconductoare care ajută la transferul termic și umplerea golurilor de aer;
- suprafețele de contact din cupru care ajută la transferul termic uniform preluat de la suportul de inox către modulele termoelectrice.

- Suprafețele de contact din aluminiu de tip radiator care în partea superioară ajută la contactul cu aerul care circulă pe sub vehicul și răcește partea superioară a modulului termoelectric

Modelul creat permite reproducerea fidelă a fenomenelor mecanice reale, cu asumarea de simplificări minore a unor componente din ansamblu.

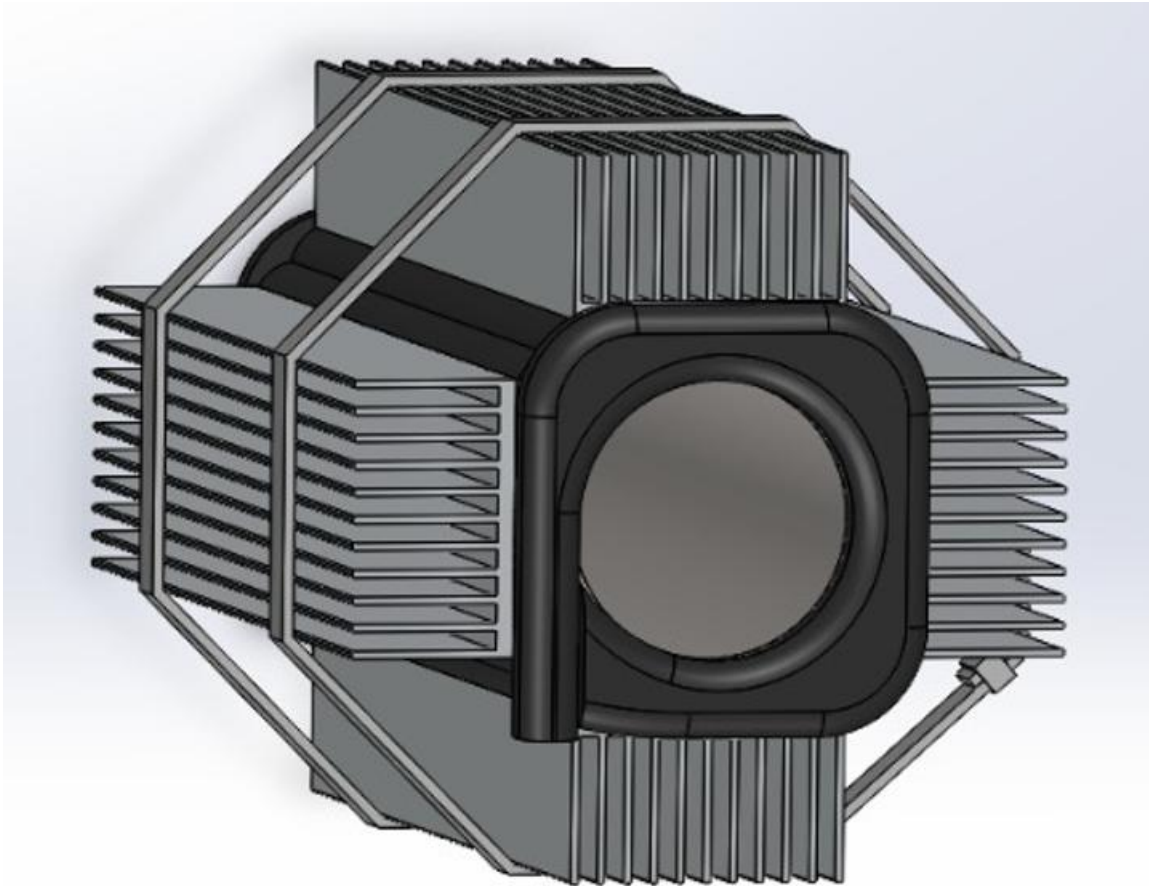


Fig. 3.1 Modelul geometric 3D utilizat în cadrul studiului termic

3.8. Discretizarea Modelului geometric în Elemente Finite

Modelul geometric realizat a fost importat în programul ANSYS Workbench pentru analiza tranzient-termic.

Pentru simularea contactului dintre suprafețele modelului, au fost definite proprietăți mecanice specifice: transfer termic, temperaturi de contact, coeficientul de convenție al aerului și temperatura mediului ambiant.

Modelul tridimensional al ansamblului a fost discretizat în:

- **SOLID279** este un element 3D cu 20 noduri, utilizat pentru analize termice atât tranzitorii, cât și staționare. Acest element are capacitatea de a conduce căldura în toate cele trei direcții și

poate integra în calcul generarea internă de căldură. De asemenea, permite aplicarea condițiilor la limită, cum ar fi temperaturi presetate sau fluxuri termice. În cadrul simulării, SOLID279 reprezintă elementul esențial pentru discretizarea volumului solid prin care se realizează transferul de căldură, fiind componenta principală a materialului modelat.

- **SOLID291** este un element termic tridimensional, cu 10 noduri, de tip tetraedru, conceput special pentru a fi utilizat în zone cu geometrie complexă unde elementele hexaedrice nu se potrivesc corespunzător. Acest element asigură conducție termică în toate cele trei dimensiuni și permite aplicarea condițiilor la limită asemănătoare celor oferite de SOLID279. În simulare SOLID291 este folosit pentru a modela zone provocatoare din punct de vedere geometric, cum ar fi colțuri sau volume cu forme neregulate, acolo unde utilizarea SOLID279 nu ar fi fost eficientă.

- **CONTA174** este un element de contact tridimensional utilizat în analiza problemelor structurale și termice. Acesta permite transferul de căldură prin contact direct între două suprafețe, asigurând conducția termică. De asemenea, poate include efectul rezistenței termice la contact (TCC – Thermal Contact Conductance). În simulare CONTA174 este folosit pentru a modela schimbul termic ce are loc între două corpuri aflate în contact, cum ar fi între o bară din inox și celulele Peltier.

- **TARGE170** este un element de tip țintă (target) utilizat împreună cu CONTA174. Acesta reprezintă suprafața rigidă sau partea opusă în contact, fără să aibă proprietăți fizice independente, fiind folosit doar pentru a defini geometria zonei de contact. În simulare acesta servește drept partea „pasivă” în perechea de contact, facilitând aplicarea elementului CONTA174 pentru a modela transferul termic dintre suprafețe.

- **SURF152** este un element de suprafață tridimensional folosit pentru a modela procesele de convecție și radiație termică. Acesta se aplică pe fața unui element solid și oferă posibilitatea de a introduce coeficientul de convecție (h) și temperatura mediului înconjurător. De asemenea, poate reprezenta radiația termică prin specificarea emisivității suprafeței. În cadrul simulării SURF152 este utilizat pentru a reda transferul de căldură între suprafața solidului și aerul din jur.

SOLID279 și SOLID291 sunt folosite pentru a reprezenta volumul solid în simulările de transfer termic prin conducție. Elementele CONTA174 și TARGE170 permit modelarea schimbului termic între suprafețe aflate în contact, inclusiv efectul rezistenței termice la nivelul contactului. SURF152 este utilizat pentru a simula transferul de căldură dintre solid și mediul ambiant, prin convecție și radiație. Împreună, aceste elemente oferă posibilitatea realizării unei simulări termice complexe și realiste, în care căldura se propagă prin solide, se transmite la interfețele de contact și se disipează în mediul înconjurător.

În urma procesului de discretizare, modelul 3D final conține **158922 de elemente** și **375765 de noduri**.

Modelul discretizat obținut este prezentat în Figura 3.2.

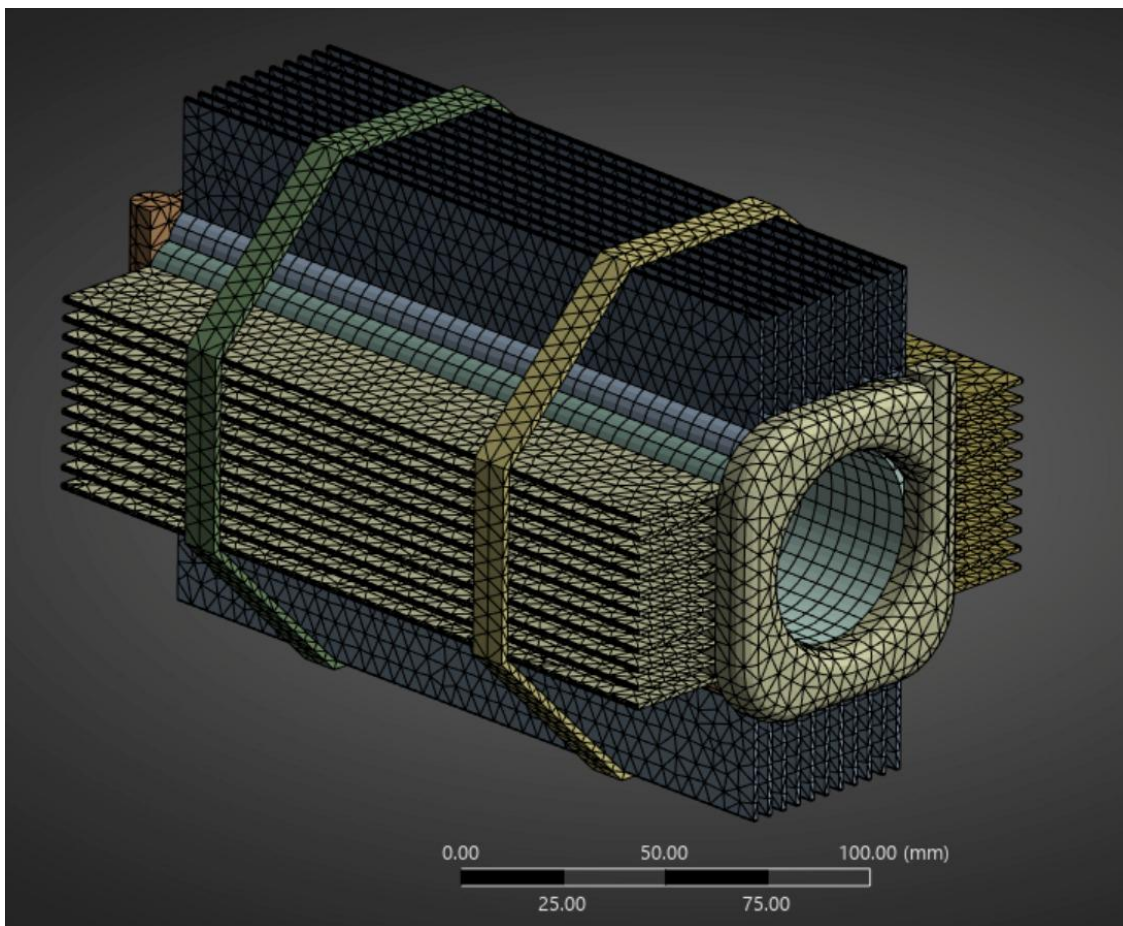


Fig. 3.2 Modelul discretizat al dispozitivului pentru recuperarea energiei electrice din gazele de eșapament

3.9. Condiții la limită

Definirea condițiilor la limită și a proprietăților materialelor constituie etape fundamentale în elaborarea unui model numeric termic, având un impact direct asupra fidelității simulării în raport cu comportamentul experimental real. În cadrul prezentei analize termice, efectuate în ANSYS, s-a urmărit evaluarea distribuției temperaturii în dispozitivul proiectat, considerând drept factor principal de variație diferența de temperatură impusă.

Simularea a incorporat următoarele condiții la limită esențiale:

- Temperatura inițială a ansamblului, configurată pentru analiza tranzitorie, care a definit starea inițială a sistemului și a permis urmărirea evoluției câmpului termic în timp.
- Temperatura prescrisă pe cavitatea suportului din oțel inoxidabil, ce a reprezentat sursa termică a modelului și a generat propagarea căldurii prin componentele dispozitivului.
- Coeficientul de convecție al aerului și temperatura mediului ambiant, care au caracterizat procesele de disipare a căldurii către exterior prin suprafețele expuse.

Aceste condiții la limită au avut un rol determinant în stabilirea regimului de echilibru termic, influențând atât creșterea temperaturii pe suprafața caldă a modulului termoelectric, cât și evacuarea termică către fața rece și radiatorul din aluminiu.

Proprietăți termofizice ale materialelor

Pe lângă condițiile la limită, proprietățile termofizice ale materialelor au fost critice pentru precizia modelului. Parametrul principal l-a constituit conductivitatea termică (k), care definește capacitatea materialelor de a transporta căldura. Materiale cu conductivități ridicate, precum cuprul și aluminiul, au facilitat transferul termic rapid, pe când oțelul inoxidabil și pasta termoconductoare au introdus rezistențe suplimentare în calea fluxului de căldură. De asemenea, densitatea (ρ) și căldura specifică (c) au determinat inerția termică a materialelor, influențând răspunsul tranzitoriu la încălzire și răcire.

Modul de încărcare termică

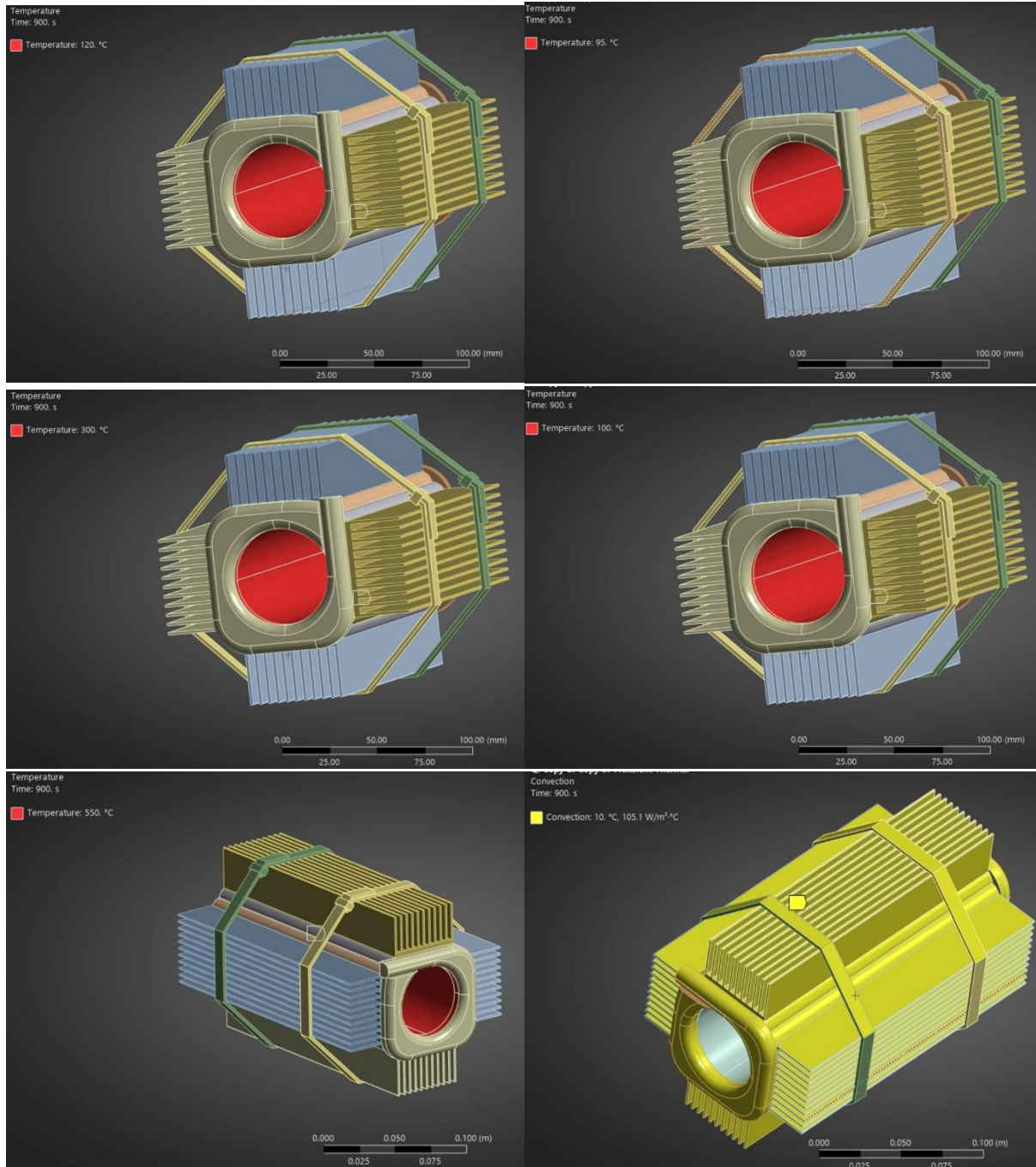
Încărcarea modelului s-a definit prin variația temperaturii în timp, pornind de la temperatura mediului ambiant și crescând linear până la valoarea impusă prin condițiile la limită. Această formulare asigură o creștere uniformă și controlată a temperaturii, fără oscilații sau salturi bruște, reflectând condițiile reale de funcționare ale dispozitivului. În cadrul analizei tranzitorii, încărcarea liniară permite surprinderea fidelă a evoluției câmpului termic pe durata întregii simulări.

Modul de aplicare a încărcărilor

Aplicarea condițiilor termice s-a realizat etapizat, conform pașilor următori:

- Stabilirea temperaturii inițiale a ansamblului la valoarea mediului ambiant, definind astfel starea de pornire a modelului.
- Impunerea temperaturii pe cavitatea suportului din inox, reprezentând sursa de încălzire a dispozitivului.
- Transferul termic prin pasta de contact către placa de cupru și ulterior către suprafața caldă a modulului termoelectric, care preia fluxul termic.
- Propagarea căldurii către partea rece a modulului și transmiterea ulterioară către radiatorul din aluminiu.
- Aplicarea coeficientului de convecție a aerului pe suprafețele exterioare expuse, simulând efectul curgerii aerului printre lamelele radiatorului și asigurând astfel disiparea termică către mediul înconjurător.

Prin această succesiune metodică, modelul numeric a reprodus corect atât procesul de încălzire controlată impus de sursa termică, cât și mecanismele de disipare a căldurii prin materialele componente și schimbul termic cu mediul exterior.



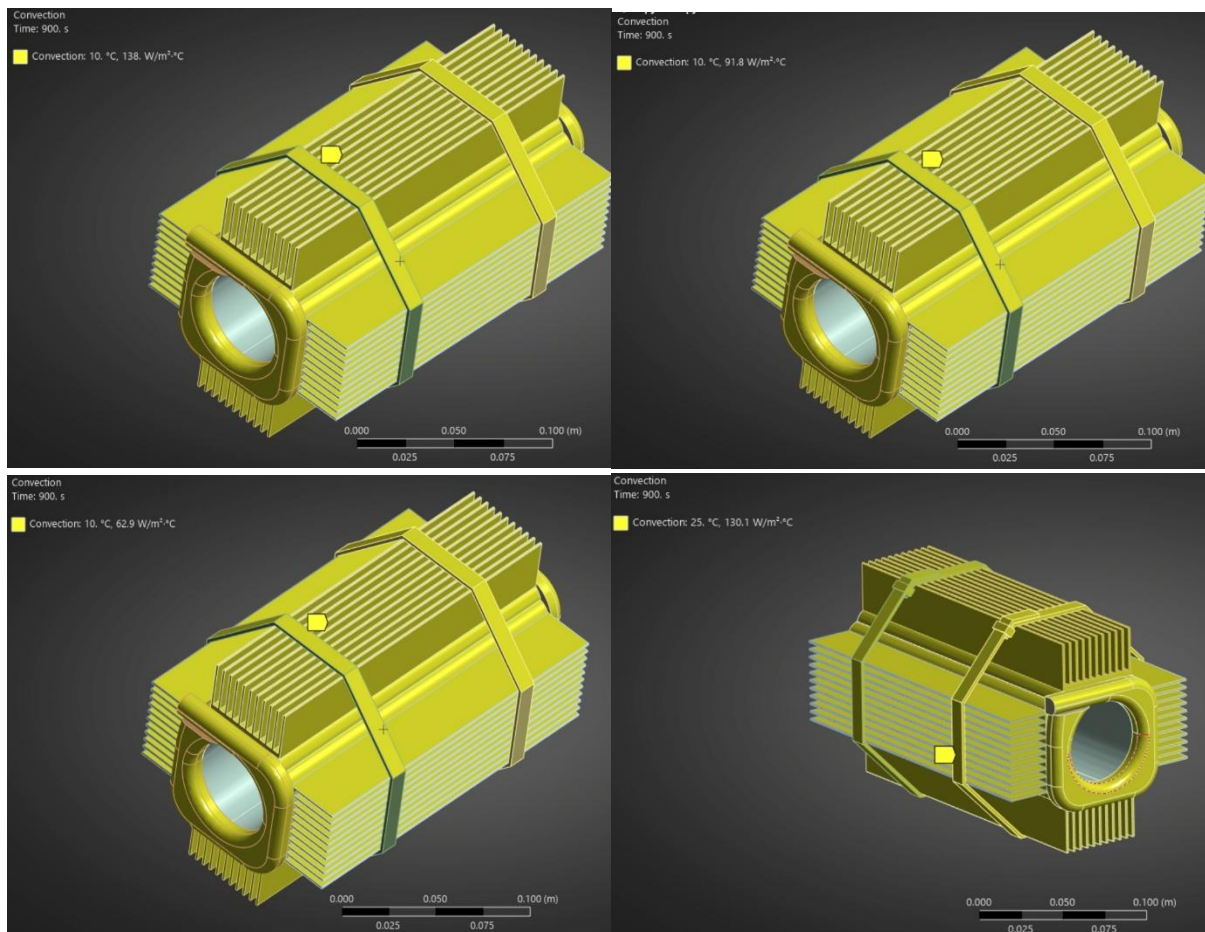


Fig. 3.3 Schema de încărcare a condițiilor la limită

3.10. Rezultate obținute

În acest subcapitol sunt prezentate rezultatele obținute prin intermediul modelărilor numerice realizate în cadrul ANSYS, având ca obiectiv analiza comportamentului termic al dispozitivului proiectat. Simulările au fost organizate în cinci scenarii distincte, fiecare dintre acestea reflectând condiții diferite de operare și regimuri variabile de încărcare termică.

Primele trei scenarii au fost concepute pentru a reflecta integrarea dispozitivului pe vehicul și funcționarea acestuia în condiții reale de trafic, astfel:

- primul scenariu a vizat regimul de rulare urban, caracterizat prin viteze cuprinse între 30 și 60 km/h;
- al doilea scenariu a considerat regimul exterior, corespunzător circulației în afara zonelor urbane, cu viteze între 70 și 90 km/h;
- al treilea scenariu a analizat regimul de mers pe autostradă, pentru viteze situate în intervalul 110-130 km/h.

Pe lângă aceste condiții de exploatare reale, alte două scenarii au fost realizate în cadrul unui stand de laborator, unde dispozitivul a fost supus unor condiții controlate distincte față de mediul de trafic, impunându-se o temperatură inițială specifică setup-ului experimental.

În continuare, se vor discuta și interpreta rezultatele aferente fiecărui scenariu, evidențiindu-se diferențele determinate de condițiile de funcționare și modul în care acestea influențează distribuția câmpului termic în configurația întregii structuri a dispozitivului.

3.10.1. Scenariul 1: Regim urban (30-60 km/h)

În cadrul primului scenariu, analiza s-a concentrat asupra comportamentului dispozitivului în condiții reprezentative pentru traficul urban, caracterizat prin viteze moderate situate în intervalul 30–60 km/h. În acest regim, solicitările termice asupra ansamblului sunt generate de ciclurile repetate de accelerație și frânare, specifice unui trafic intens și intermitent, ceea ce determină o încălzire progresivă a sistemului de evacuare.

Încărcarea termică aplicată a constat într-o variație liniară a temperaturii de la 29,216 °C până la 98,819 °C, desfășurată pe o durată totală de 900 de secunde (15 minute). Această formulare a permis surprinderea evoluției tranzitorii a câmpului termic, oferind un interval temporal suficient pentru a atinge un regim termic apropiat de staționar.

Pentru condițiile la limită, s-a impus o temperatură constantă de 95 °C pe cavitatea suportului din oțel inoxidabil, reprezentând temperatura medie de operare a ansamblului în regimul analizat. În paralel, pe suprafețele expuse mediului înconjurător, s-a aplicat un coeficient de convecție de 62,9 W/m²K, pentru simularea efectului curgerii aerului generat de deplasarea vehiculului în regimul urban.

Această configurare a condițiilor permite simularea fidelă a mediului termic caracteristic regimului urban, facilitând evaluarea eficienței transferului termic dinspre sursa de căldură către modulul termoelectric și ulterior către mediul ambiant.

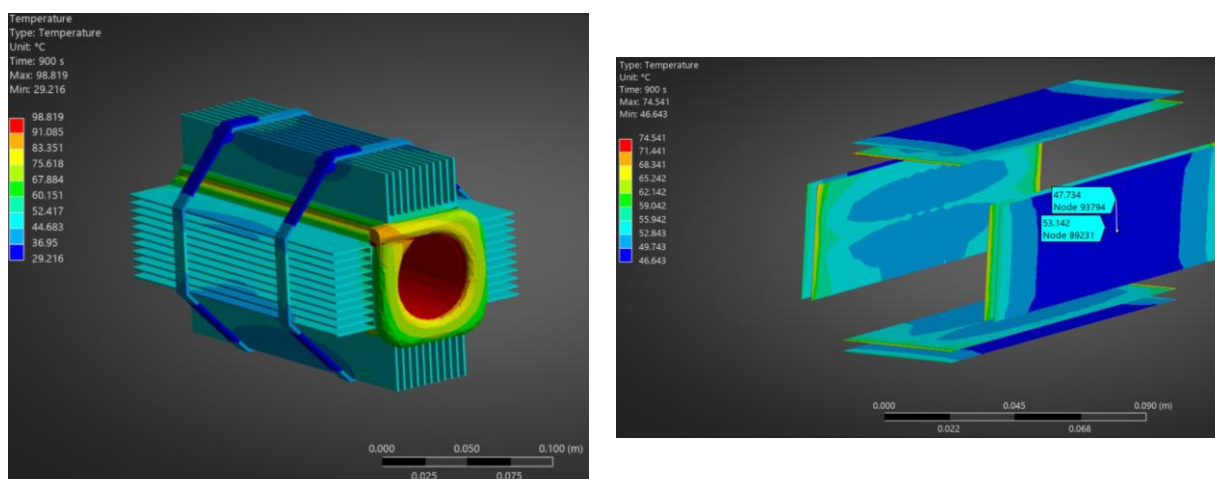


Fig 3.4 Scenariul 1 de încărcare termică

3.10.2. Scenariul 2: Regim extraurban (70-90 km/h)

Al doilea scenariu a fost dedicat evaluării performanței dispozitivului în condiții specifice traficului extraurban, caracterizat prin viteze superioare, cuprinse între 60 și 90 km/h. În acest context, funcționarea motorului devine mai stabilă, iar debitul gazelor de eșapament crește semnificativ, generând o creștere rapidă a temperaturii în cadrul ansamblului testat.

Încărcarea termică a fost modelată printr-o variație liniară a temperaturii pe parcursul a 900 de secunde (15 minute), interval de timp adecvat pentru surprinderea răspunsului tranzitoriu și analiza tendinței sistemului către regimul de echilibru termic. Această metodă permite o reprezentare realistă a propagării căldurii în structura dispozitivului în condiții de exploatare extraurbană.

În privința condițiilor la limită, pe cavitatea suportului din oțel inoxidabil s-a impus o temperatură constantă de 100 °C, reflectând nivelul mediu al temperaturii de operare aferent regimului extraurban. Pe suprafețele exterioare expuse mediului înconjurător, a fost aplicat un coeficient de convecție de 91,8 W/m²K, valoare care corespunde intensității crescute a curgerii aerului caracteristice vitezelor mai mari, favorizând astfel o disipare termică mai eficientă.

Această configurare a condițiilor experimentale reproduce fidel mediul termic specific regimului extraurban, oferind o perspectivă detaliată asupra transferului termic și a comportamentului dispozitivului sub solicitări termice mai ridicate comparativ cu regimul urban.

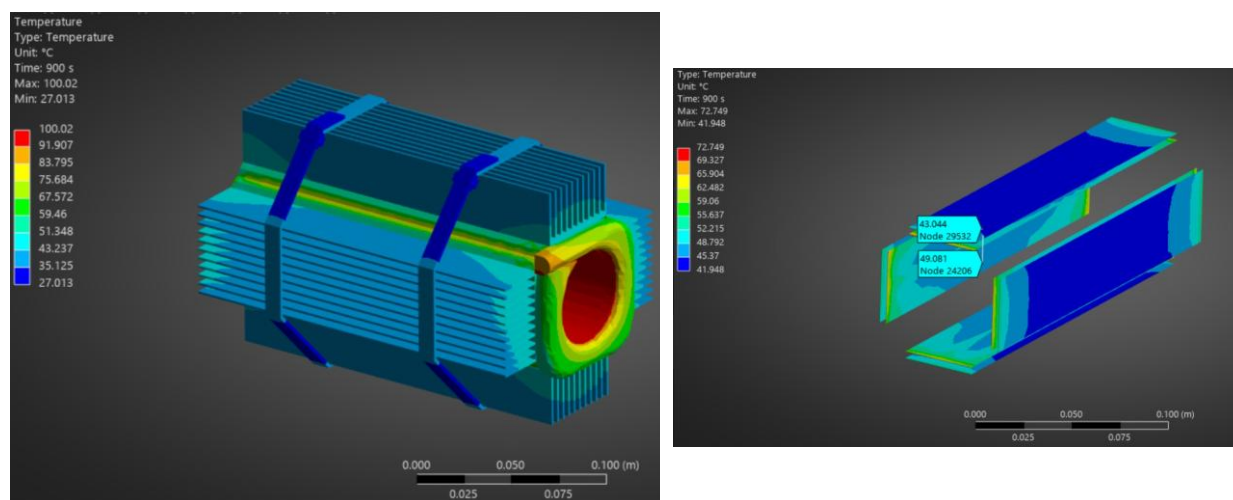


Fig. 3.5 Scenariul 2 de încărcare termică

3.10.3. Scenariul 3: Regim de autostradă (90-130 km/h)

În cel de-al treilea scenariu, s-a analizat comportamentul dispozitivului în condițiile de exploatare pe autostradă, caracterizate prin viteze înalte, situate în intervalul 90–130 km/h. În

aceste condiții, motorul funcționează la sarcini superioare, iar temperatura gazelor de evacuare atinge valori semnificativ crescute, generând astfel o solicitare termică intensă asupra ansamblului.

Încărcarea termică a fost reprezentată printr-o variație liniară a temperaturii pe o durată de 900 de secunde (15 minute), metodă care a facilitat observarea reacției dispozitivului la creșteri rapide și susținute ale temperaturii. Această abordare permite o descriere detaliată a comportamentului tranzitoriu și a tendinței de stabilizare termică în condiții de operare intensă.

În ceea ce privește condițiile la limită, s-a impus o temperatură constantă de 120 °C pe cavitatea suportului din oțel inoxidabil, reflectând nivelul termic caracteristic regimului de autostradă. Pe suprafețele exterioare expuse aerului ambiant s-a aplicat un coeficient de convecție de 138 W/m²K, valoare ce corespunde vitezei ridicate a fluxului de aer și capacității sporite a disipării termice prin convecție forțată.

Prin acest scenariu s-a putut evalua performanța termică a dispozitivului în condițiile de solicitare maximă specific rulării pe autostradă, evidențiindu-se modul în care intensitatea transferului termic influențează distribuția diferențiată a temperaturilor între fața caldă și cea rece a modului termoelectric.

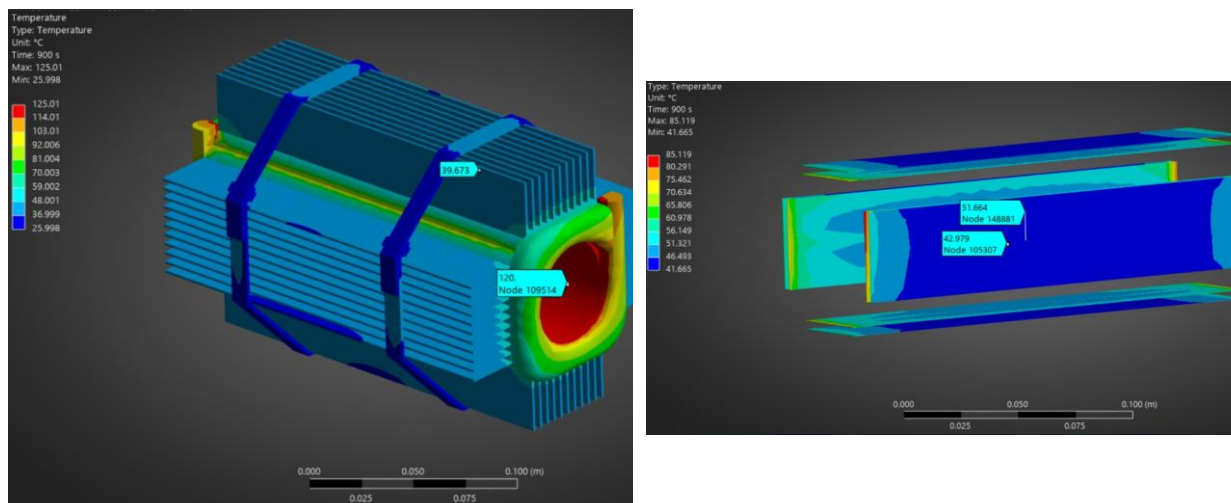


Figura 3.6 Scenariul 3 de încărcare termică

3.10.4. Scenariul 4: Regim de viteză constantă de 90 km/h la stand

Al patrulea scenariu a fost dedicat investigării comportamentului termic al dispozitivului în condiții de viteză constantă de 90 km/h, obținute pe un stand de testare. Acest tip de regim este relevant prin faptul că reflectă o stare de funcționare stabilă, lipsită de variații ale sarcinii sau turației motorului, oferind astfel cadrul necesar pentru o analiză precisă a echilibrului termic al ansamblului.

Încărcarea termică a fost reprezentată printr-o variație liniară a temperaturii, desfășurată pe durata a 900 de secunde (15 minute), asigurând monitorizarea progresivă a procesului de încălzire

și stabilizare termică într-un regim constant, distinct față de scenariile ce implică accelerații sau fluctuații termice.

Pentru condițiile la limită, s-a stabilit o temperatură de 300 °C pe cavitatea suportului din oțel inoxidabil, corespunzătoare nivelului termic înregistrat în timpul testelor efectuate pe stand. De asemenea, pe suprafețele externe expuse aerului ambiant a fost aplicat un coeficient de convecție de 105,1 W/m²K, corespunzător regimului de curgere a aerului în jurul radiatorului la viteza constantă de 90 km/h.

Acest scenariu a furnizat date esențiale privind comportamentul termic al dispozitivului în condiții controlate și repetabile, facilitând evaluarea distribuției temperaturii și eficienței transferului termic în regim de funcționare stabil.

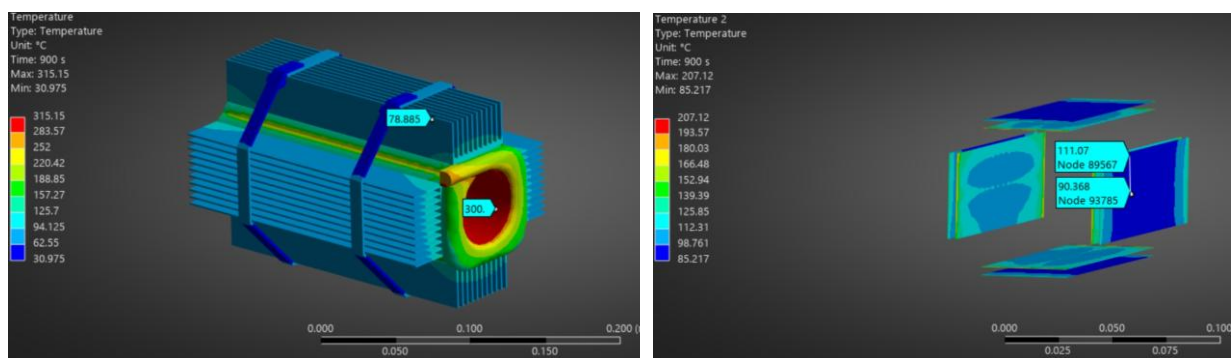


Fig. 3.7 Scenariul 4 de încărcare termică

3.10.5. Scenariul 5: Regim de temperatură ridicată pe stand

Cel de-al cincilea scenariu a fost conceput pentru investigarea comportamentului termic al dispozitivului în condiții de temperatură extrem de ridicată, simulate pe standul de testare. Scopul principal a fost evaluarea rezistenței termice a ansamblului și modul în care componentele își păstrează funcționalitatea atunci când sunt expuse la valori termice ce se apropie de limitele superioare de operare.

Încărcarea termică a fost modelată printr-o creștere liniară a temperaturii pe o durată de 900 de secunde (15 minute), facilitând surprinderea comportamentului tranzitoriu și procesul de stabilizare la nivelul sistemului. Această abordare este esențială pentru analiza dinamicii termice în condiții limită, în care solicitările termice asupra materialelor sunt maxime.

Pentru condițiile la limită, s-a impus o temperatură constantă de 550 °C pe cavitatea suportului din oțel inoxidabil, reprezentând cel mai sever scenariu evaluat în cadrul experimentelor. Pe suprafețele exterioare expuse mediului ambiant, a fost aplicat un coeficient de convecție de 130,1 W/m²K, valoare care simulează disiparea termică eficientă în condiții de convecție forțată, datorată vitezei ridicate a fluxului de aer.

Acest scenariu a furnizat informații relevante privind performanța termică a dispozitivului la temperaturi extreme, evidențiind atât distribuția internă a fluxului de căldură în ansamblu, cât și eficiența disipării termice prin modulul termoelectric și radiatorul asociat. Rezultatele obținute sunt fundamentale pentru determinarea limitelor de funcționare sigură și pentru anticiparea riscurilor potențiale de supraîncălzire în condiții operative reale.

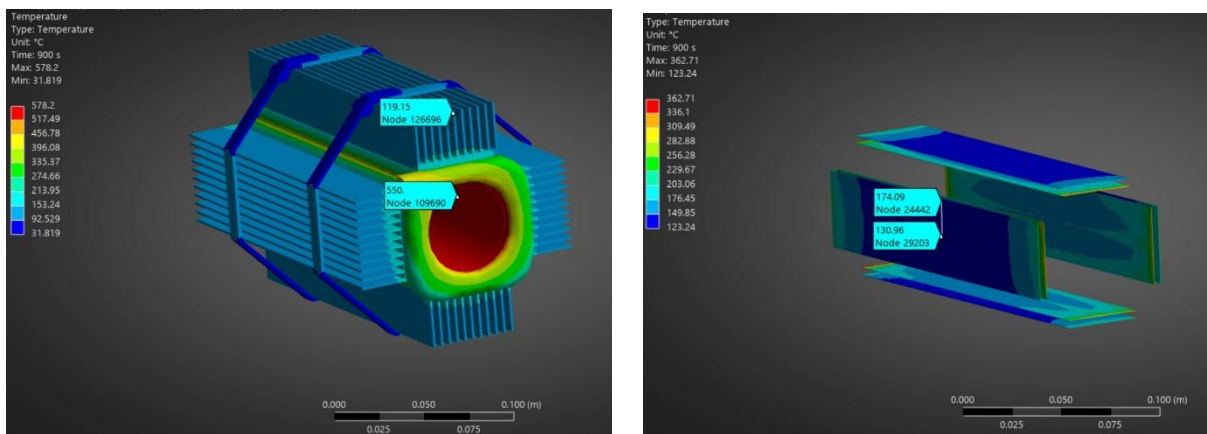


Fig. 3.8 Scenariul 5 de încărcare termică

CAPITOLUL 4. STAND EXPERIMENTAL

4.1. Instalația experimentală preliminară

În prima fază a cercetării a fost realizată o instalație experimentală de laborator, concepută pentru a testa capacitatea modulelor termoelectrice de tip **TEC1-12706** de a genera energie electrică prin efectul Seebeck (vezi fig.4.1). Obiectivele acestei instalații sunt: pe de-o parte, verificarea rezistenței modulelor la expunerea la temperaturi ridicate și, pe de altă parte, identificarea materialelor cele mai potrivite pentru contactul termic, în vederea proiectării dispozitivului final ce urma să fie montat pe conducta de eșapament a unui vehicul.

Metodologia a presupus expunerea modulelor termoelectrice la un flux de aer cald, furnizat de un pistol electric cu temperatură reglabilă între 300 °C și 650 °C, fără utilizarea unui sistem activ de răcire. Pe parcursul experimentului, am urmărit cu atenție comportamentul termic și electric al modulelor, înregistrând date la intervale regulate, din aproximativ 15 în 15 secunde. Măsurătorile au fost făcute între 15 și 30 de minute, pentru a avea o imagine cât mai amplă asupra performanței modulelor termoelectrice. Am monitorizat mai mulți parametri importanți, cum ar fi tensiunea în gol, tensiunea și curentul când modulele sunt încărcate, puterea electrică generată, dar și cum evoluează diferența de temperatură dintre suprafețele modulelor pe parcursul timpului.



Fig. 4.1 Stand de testare materiale pentru uniformizarea straturilor termice

4.1.1. Structura standului

Standul experimental a fost construit din profile de aluminiu extrudat, asamblate prin șuruburi, pentru a crea o structură solidă, dar în același timp flexibilă și ușor reglabilă. În partea centrală a cadrului au fost prevăzute canale longitudinale, unde puteau fi montate două bare filetate. Acestea permiteau reglaje atât pe orizontală (stânga-dreapta), cât și pe verticală, prin desfiletare și repoziționare.

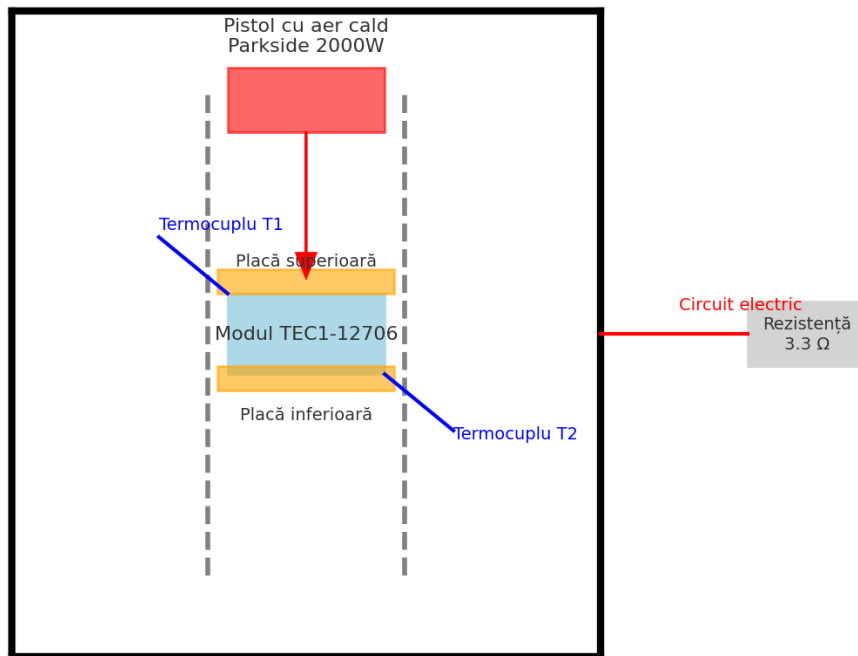


Fig. 4.2 Schiță stand experimental

Între cele două bare puteau fi fixate plăci metalice, între care se introduceau modulele TEC, în configurație tip sandwich. Această flexibilitate constructivă a permis testarea unor materiale diferite (cupru, aluminiu, oțel carbon, inox), fiecare având o conductivitate termică specifică, pentru a observa influența asupra gradientului de temperatură și implicit asupra performanței modulului. Pe partea superioară a standului a fost montat un suport metalic prevăzut cu colier, în care era introdus pistolul cu aer cald. Aceasta asigură o poziționare fixă a sursei de căldură, precum și o distribuție uniformă a aerului cald asupra suprafeței modulului.

4.2. Analiza microstructurală a materialelor

În studiul experimental, un pas esențial a fost analiza microstructurală a materialelor folosite pentru suprafețele de contact. Această etapă a fost necesară pentru a putea evalua măsura în care calitatea microstructurală a materialelor, poate influența capacitatea de transfer termic între

sursa de căldură și modulele TE, respectiv prin compactitatea rețelei cristaline și omogenitatea compoziției. Zonele în care apar incluziuni nemetalice sau micropori întrerup calea de propagare a fononilor și a electronilor liberi, cei doi principali purtători de căldură în metale. În aceste regiuni, rezistența termică locală crește, iar fluxul de căldură nu mai este transmis uniform. Astfel, chiar dacă teoretic un material prezintă o conductivitate termică ridicată (ex. cuprul sau aluminiul), prezența unor goluri sau incluziuni poate conduce la o scădere semnificativă a eficienței sale reale.

S-a utilizat Microscopul Electronic cu Scanare Quattro C (SEM), din dotarea laboratorului de Știința și Ingineria Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Iași. Acest echipament permite realizarea unor imagini de înaltă rezoluție ale microstructurii materialelor, cu o capacitate de mărire de peste 1.000.000X. Astfel, pot fi observate detalii precum granulația, uniformitatea și eventuale defecte precum goluri, porozități, fisuri ori incluziuni nemetalice. Principiul de funcționare a microscopului electronic consta în scanarea suprafeței probei cu un fascicul focalizat de electroni, care generează semnale ce oferă informații atât despre topografia, cât și despre compoziția materialului studiat.

În contextul aplicației de față, unde TEG-urile funcționează exclusiv pe baza gradientului de temperatură dintre partea caldă și partea rece, orice perturbare a transferului de căldură la nivelul materialului de contact conduce la diminuarea diferenței de temperatură efective (ΔT). Aceasta se traduce direct într-o scădere a tensiunii și a curentului generate, conform relației de definiție a efectului Seebeck. Distribuția neuniformă a temperaturii, datorată neomogenității materialului, poate induce tensiuni interne suplimentare în modulul TE. Aceste tensiuni termice pot conduce, în timp, la degradarea contactului dintre module și suprafețele de prindere, reducând stabilitatea și durata de viață a întregului ansamblu. Astfel, analiza microstructurală nu are doar rol de verificare a calității materialelor, ci este o etapă esențială în fundamentarea selecției materialelor pentru protecția și integrarea modulelor TEG în dispozitive practice de recuperare a energiei termice. Rezultatele acestei investigații sunt prezentate în continuare pentru fiecare material analizat: oțelul carbon OLC 35, inoxul austenitic, cuprul și aluminiul.

Analiza microstructurală a evidențiat unele defecte existente în materialele analizate, după cum urmează: OLC 35 - incluziuni nemetalice (oxizi, sulfuri), micropori, microfisuri; oțel inox - incluziuni oxidice (Cr, Mn), microfisuri; cupru - incluziuni oxidice rare; aluminiu - incluziuni oxidice, micropori. Detaliile acestei analize se regăsesc în Anexa 3.

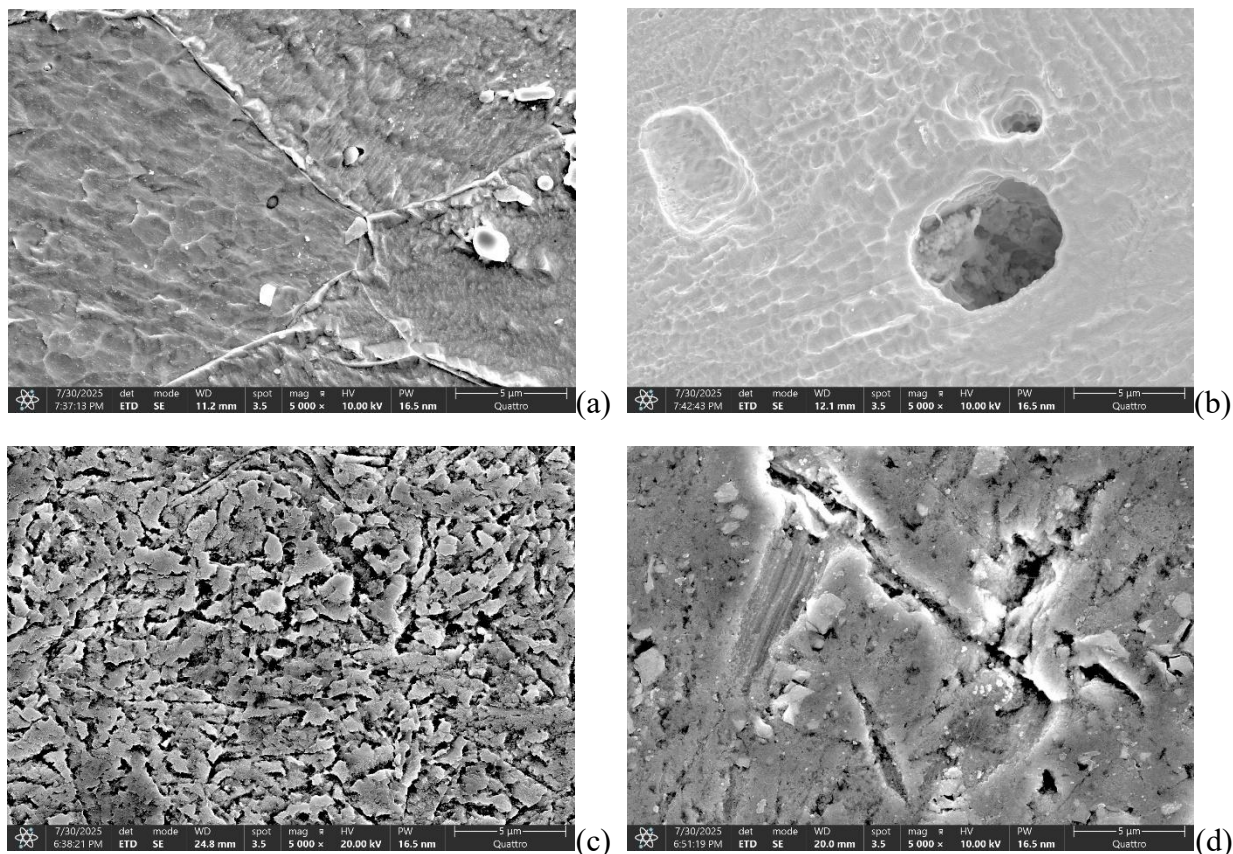


Fig. 4.3 Imagini SEM ale microstructurilor puterea de mărire 5000x:
(a) oțel OLC35, (b) oțel inox, (c) cupru, (d) aluminiu.

4.3. Descrierea constructivă a dispozitivului final

4.3.1. Proiectarea virtuală și modelarea CAD

În procesul elaborării dispozitivului destinat captării energiei electrice din fluxul termic al țevii de eșapament, proiectarea virtuală a reprezentat o etapă fundamentală și determinantă pentru succesul întregului sistem. Pentru aceasta, a fost utilizat software-ul SolidWorks, un program avansat de modelare tridimensională asistată de calculator (CAD), promovat internațional pentru precizia și versatilitatea sa în domeniul ingineriei mecanice și al proiectării sistemelor complexe. SolidWorks sintetizează funcționalități extinse ce includ modelarea parametrică, asamblarea inteligentă a componentelor, simulări tehnice și analiza comportamentului structural și termic, ceea ce îl face indispensabil în realizarea unor soluții tehnologice eficiente și fiabile.

4.3.2. Definirea formei

Proiectarea arhitecturii dispozitivului a fost realizată printr-o analiză riguroasă a cerințelor funcționale și geometrice specifice mediului de instalare, respectiv conducta de evacuare, în zona tobei intermediare de eșapament, caracterizată printr-un profil cilindric și o suprafață curbată pe alocuri. Această particularitate geometrică impune o serie de provocări tehnice, în special în ceea

ce privește integrarea modulelor termoelectrice, care prezintă o formă plană, rigidă și necesită o suprafață de contact stabilă pentru a asigura un transfer termic eficient și un montaj mecanic sigur. Aplicarea modulelor cu suprafață plană pe o suprafață cilindrică generează tensiuni și deformări locale cauzate de nepotrivirea geometrică, care pot depăși capacitatea de adaptare a modulelor și a interfeței de contact, determinând astfel o fixare inadecvată și o uniformitate termică destul de redusă. Această situație compromite atât performanța termică, cât și durabilitatea pe termen lung a întregului dispozitiv.

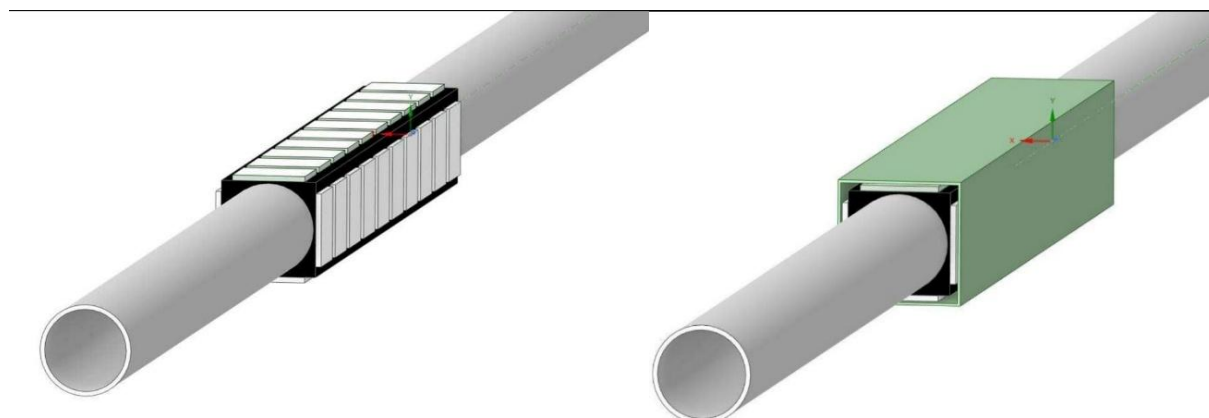


Fig. 4.4 Arhitectura preliminară a dispozitivului

Pentru a răspunde acestei provocări, s-a optat pentru introducerea unui suport intermediar cu fețe plane, iar rezistența sa să fie ridicată la temperaturi și coroziune, proprietăți esențiale în mediul agresiv al țevii de evacuare a vehiculului. Blocul de material ales drept suport care să facă contactul cu țeava de eșamanet are o formă paralelipipedică, conferind astfel o geometrie regulată ce servește drept platformă de montare pentru modulele TEG. Prin prelucrarea mecanică de înaltă precizie, a fost realizată o cavitate internă cilindrică cu diametrul exact corespunzător țevii de evacuare a vehiculului pe care se realizează probele, permițând astfel o fixare precisă și stabilă a dispozitivului pe suprafața cilindrică, minimizând jocurile mecanice și asigurând o transmisie termică optimă.

Această configurare constructivă oferă numeroase avantaje tehnice importante. În primul rând, realizarea cu precizie a cavității asigură o potrivire exactă între elementul suport și țeava de eșapament a vehiculului, minimizând astfel potențialele pierderi de căldură la nivelul punctului de contact. În al doilea rând, folosirea blocului paralelipipedic pentru a separa modulele termoelectrice plane de suprafața cilindrică a țevii ajută la protejarea acestora, prevenind deformările și deteriorările cauzate de solicitările mecanice și termice repetate. Mai mult decât atât, suprafețele plane ale blocului facilitează o fixare constantă și aplicarea uniformă a adezivilor termoconductorilor, optimizând eficiența transferului termic între componente.

Arhitectura aleasă reprezintă un compromis optim între adaptabilitatea geometrică, eficiența termică, rezistența mecanică și durabilitatea funcțională, asigurând performanțe ridicate

ale dispozitivului în condițiile specifice de operare pe conducta de evacuare a unui vehicul în zona tobei intermediare (Fig.4.4).

4.3.3. Asamblare dispozitivului

A urmat etapa de asamblare propriu-zisă, desfășurată cu rigurozitate pentru a menține integritatea termică și mecanică a dispozitivului. Înainte de a aplica stratul de pastă termoconductoare pe blocul de inox, pe una dintre fețe, cea de pe care am ales să înregistrez diferențele de temperatură de la modulele termoelectrice am realizat cu ajutorul unui polizor unghiular un mic canal în care să fie introdus firul de termocuplu de tip k. Am ales să fac acest mic șanț în material pentru a păstra zona de contact uniformă fără a avea vreo denivelare din cauza firului de termocuplu și pentru a evita pierderile de transfer termic. Acest canal a fost făcut fix de dimensiunea firului de termocuplu și a fost poziționat astfel încât să pot citi temperatura de pe fața caldă a modului termoelectric. În zona de finalizare a acestui canal la locul de întâlnire cu tabla de cupru aceasta din urmă a fost găurită cu ajutorul unui burghiu pentru a trece firul de termocuplu și a avea contact direct cu modul termoelectric.

Pasta termoconductoare a fost aplicată cu atenție pe ambele suprafețe de contact și anume între blocul de inox și plăcuța din cupru, precum și între aceasta și modulele termoelectrice pentru a elimina toate punctele de contact neuniform sau goluri de aer care ar fi putut afecta negativ transferul termic (Fig. 4.9).

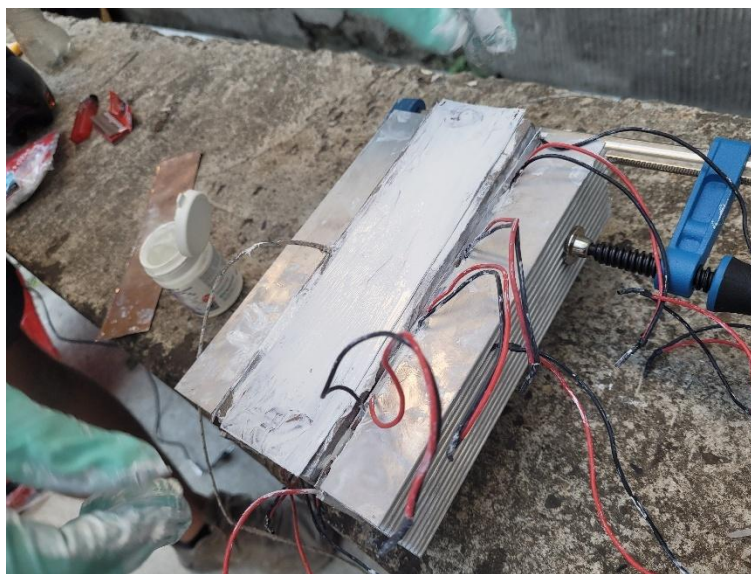


Fig. 4.9 Aplicare pasta termoconductoare

Stratul protector realizat din cupru a fost poziționat cu precizie pe blocul din inox, fiind fixat printr-un procedeu adecvat pentru a asigura o suprafață continuă și netedă ce optimizează distribuția termică (Fig. 4.10). În prealabil stratul din tablă de cupru a fost debitat la dimensiunile dorite și pregătit pentru asamblarea în dispozitivul final. Pe fețele materialelor care intră în contact

s-a aplicat un strat uniform din această pastă termoconductoare pe care l-am finisat cu ajutorul unei spatule din lemn.



Fig. 4.10 Aplicarea stratului protector din cupru

Modulele termoelectrice model TEC1-12706 au fost montate cu mare grijă pe plăcuța de cupru, dispuse uniform pentru a asigura un echilibru al distribuției termice și electricității generate (Fig. 4.11). Dispunerea în regim uniform a celor 20 de module a fost controlată meticulos, iar modul de fixare a fost realizat astfel încât să prevină orice mișcare sau vibrație care ar putea deteriora componentele delicate în timpul funcționării.

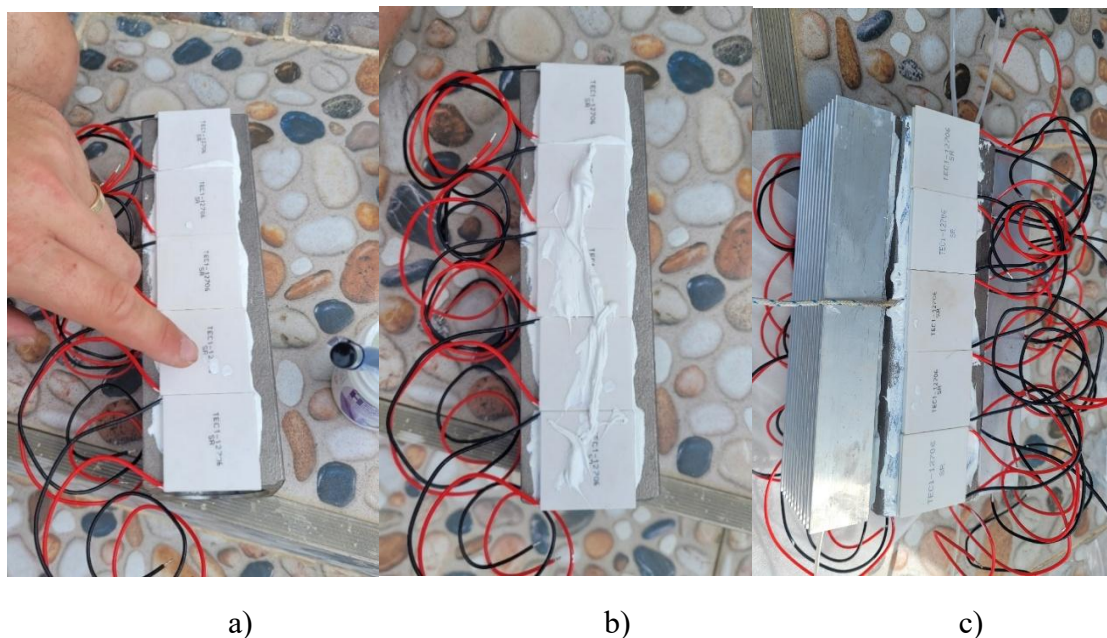


Fig. 4.11 Aplicarea modulelor TEC1-12706 în dispozitiv a),b) vedere uniforma a așezării modulelor pe fața cu fir de termocuplu c)

Peste aceste module se aplică din nou un strat de pastă termoconductoare după care se trece la montarea radiatorului din aluminiu, materialul ales pentru partea de răcire. Pentru a avea o temperatură exactă și din partea superioară a acestui modul termoelectric este necesară montarea unui fir de termocuplu de tip k așa cum am montat și în partea inferioară. Dacă în arhitectura părții inferioare am prevăzut un canal prin care să treacă firul de termocuplu fără a fi vreo denivelare pe zona modulelor așa și în zona superioară pe partea rece trebuie montat acest fir pentru a prelua datele exacte de temperatură fără a aduce modificări care să permită diminuarea transferului termic. În consecință am realizat în partea inferioară a radiatorului printre două lamele cu ajutorul unui burghiu o gaură foarte mică prin care am introdus vârful firului de termocuplu care va lua contact direct cu modulul termoelectric, iar acest lucru ne va permite să avem temperatura exactă din partea superioară (Fig. 4.12).



Fig. 4.12 Procesul de introducere a firului de termocuplu prin radiatorul de aluminiu

Partea rece a modulelor a fost echipată cu radiatoare din aluminiu, fixate solid prin elemente mecanice specifice, care să asigure stabilitatea mecanică și să maximizeze disiparea termică pasivă prin intermediul curenților naturali de aer proveniți din deplasarea vehiculului. Atenția la detaliile de prindere a radiatoarelor a fost crucială pentru a preveni șocurile termice și vibrațiile și pentru a menține permanent contactul termic optim (Fig.4.13).

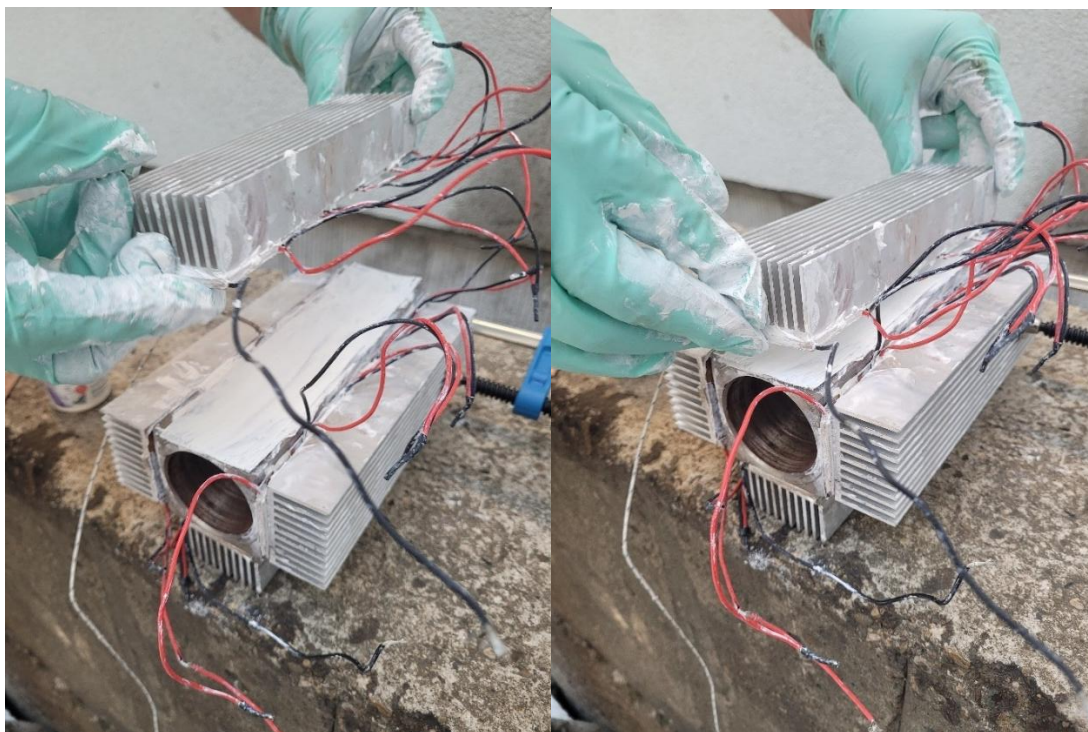


Fig. 4.13 Montarea Radiatoarelor de aluminiu în partea superioară

Pentru a fixa toate componentele dispozitivului, provizoriu am folosit cleme autoblocante din nailon cu care am prins foarte bine toate cele patru radiatoare de aluminiu de blocul de inox (Fig. 4.14). Această prindere este una provizorie strict pentru fixare deoarece ele nu pot fi folosite în arhitectura dispozitivului final în primul rând prin prisma materialului din care sunt făcute pentru că nu rezistă la temperaturi ridicate iar în al doilea rând grosimea acestora trece prin canalul cu diametrul de 51 mm din blocul de inox și astfel nu se va mai putea realiza montarea dispozitivului în perfectă siguranță pe țeava de eșapament. În acest moment s-a realizat configurarea dispozitivului pentru a se trece la testele preliminare și a studia ceea ce se întâmplă în urma probelor efectuate.

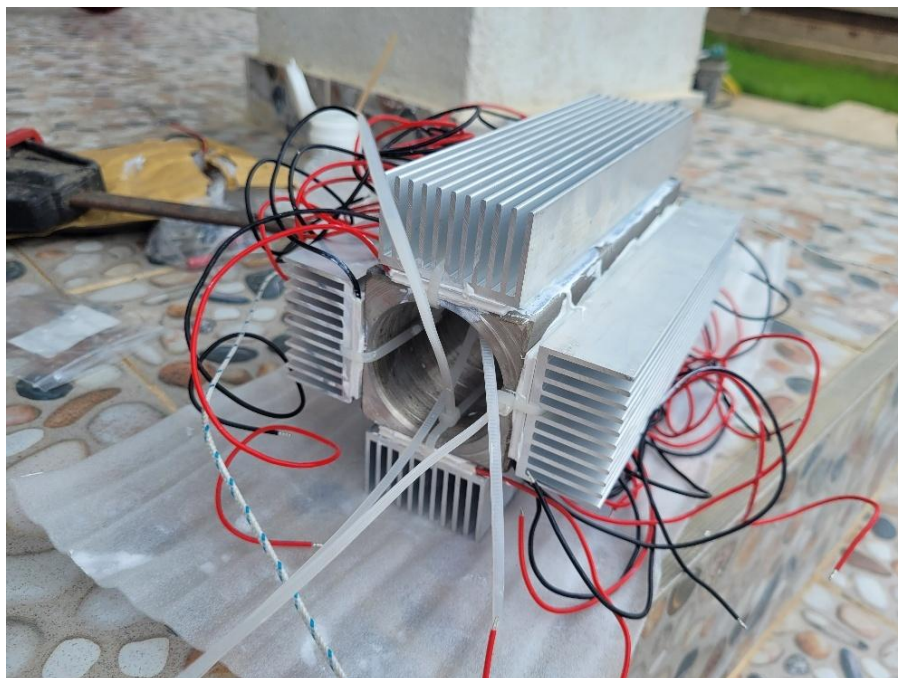


Fig. 4.14 Dispozitiv preliminar pregătit pentru testare

Un ultim aspect, fiind unul dintre cele mai importante aspecte ale dispozitivului a fost înserierea tuturor celor 20 de module termoelectrice prin legarea fir cu fir de tip serie și protejarea legăturilor acestora, care a fost realizată cu ajutorul unui tub termoretractabil negru.

Toate aceste operațiuni au fost executate respectând proceduri standardizate de control al calității, inclusiv inspecții vizuale și măsurători dimensionale cu instrumente adecvate, pentru a asigura conformitatea strictă cu specificațiile proiectului. Prin această metodologie complexă de fabricație și asamblare, s-a garantat realizarea unui dispozitiv pregătit pentru testări și capabil să răspundă rigorilor operative ale sistemului de captare a energiei termoelectrice din energia reziduală a țevii de evacuare.

4.3.4. Metoda de prindere a dispozitivului

După asamblarea fizică a dispozitivului termoelectric, s-a constatat necesitatea unei metode de fixare suplimentare pentru radiatoarele de aluminiu, componente critice în procesul de disipare termică, care fără un sistem de prindere eficient nu pot asigura stabilitatea necesară în timpul testelor și montajului pe țeava de evacuare. Această instabilitate ar fi compromis nu doar rigiditatea ansamblului, ci și corectitudinea măsurărilor în condiții reale.

Pentru a remedia această situație, s-au ales coliere metalice reglabile prin mecanism de înșurubare, având un diametru nominal de 160 mm. Dimensiunea colierelor a fost determinată anterior în faza de proiectare digitală, unde acestea au fost integrate în modelul CAD al ansamblului pentru a verifica compatibilitatea și spațiul necesar (Fig.4.40). Această abordare a permis să se asigure că colierele vor înconjura toate cele patru fețe ale dispozitivului, oferind o

fixare uniformă și echilibrată, care să nu afecteze geometric ansamblul sau să inducă deformări nedorite.

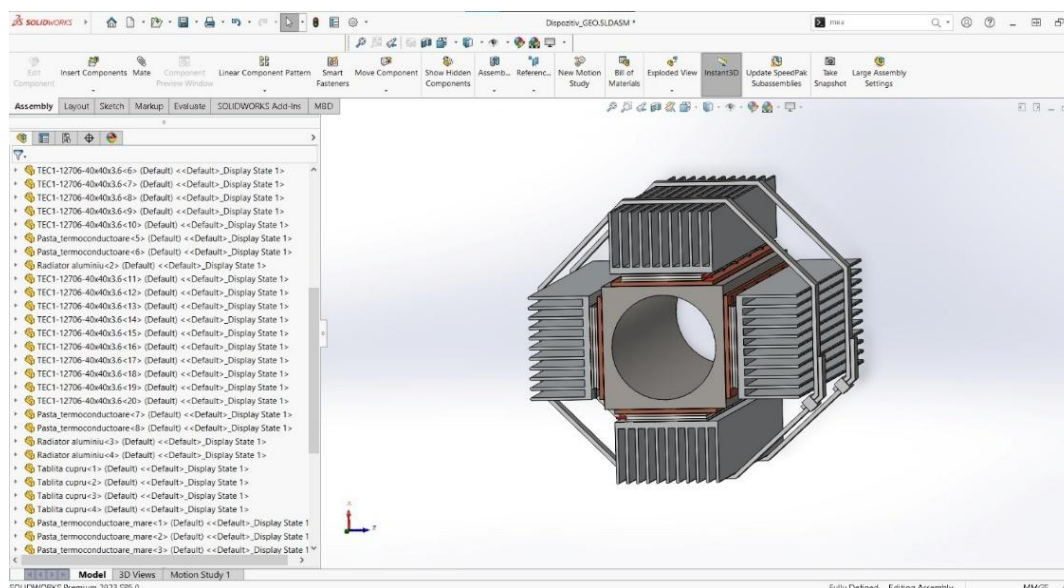


Fig. 4.15 Proiectarea colierelor de prindere a dispozitivului

Colierele sunt confecționate din oțel inoxidabil de înaltă calitate, un material ales pentru rezistența înaltă la coroziune și solicitări mecanice, elemente esențiale pentru utilizarea în medii provocatoare, cum este cel al sistemului de evacuare auto. Proprietățile mecanice superioare ale inoxului garantează menținerea forței de strângere chiar și în condiții de vibrații intense și variații termice ciclice, fără degradarea mecanismului sau pierderi de prindere.

Mecanismul de strângere al colierelor se bazează pe înșurubarea unui șurub reglabil cu filet fin, care permite controlul precis al forței aplicate. Acest aspect este crucial, deoarece o strângere prea puternică ar putea induce tensiuni excesive asupra structurii dispozitivului, riscând deformarea sau deteriorarea componentelor. Pe de altă parte, o strângere insuficientă nu asigură stabilitatea necesară, permițând mișcarea sau alunecarea radiatorului în timpul funcționării și testării.

În concluzie, utilizarea colierelor metalice reglabile a oferit o soluție practică, durabilă și flexibilă pentru fixarea radiatorului, contribuind decisiv la stabilitatea ansamblului și la acuratețea testelor experimentale. Integrarea colierului în faza de proiectare a facilitat identificarea rapidă a dimensiunilor optime și verificarea compatibilității geometrice, diminuând riscurile în faza de fabricare și asamblare fizică, aspecte cheie pentru succesul implementării dispozitivului în condiții reale de operare.

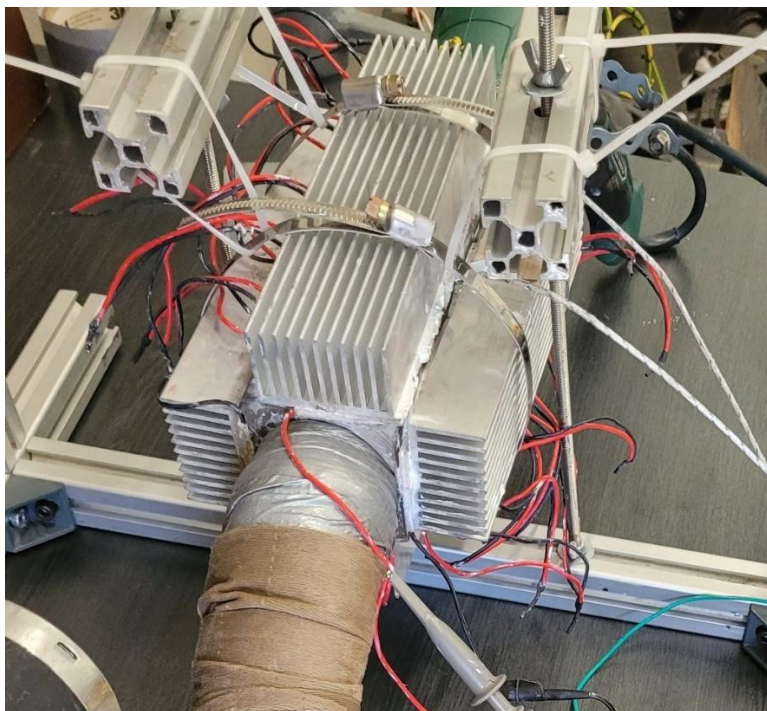


Fig. 4.16 Dispozitiv pregătit de testare

4.3.5. Testare post-asamblare și optimizări constructive ulterioare

După finalizarea procesului tehnologic de fabricație și asamblare, primul ansamblu funcțional al dispozitivului a fost instalat și supus unor metode riguroase de testare experimentală, desfășurate pentru a verifica performanțele funcționale și stabilitatea în condiții cât mai apropiate de cele de exploatare reală. Validarea inițială a dispozitivului a avut un caracter iterativ, urmărind identificarea și remediarea eventualelor deficiențe legate de eficiența transferului termic, stabilitatea mecanică și integritatea electrică.

4.3.6. Pre-testarea dispozitivului

Primele cicluri de testare au relevat existența unor diferențe semnificative în distribuția suprafeței de transfer termic, determinate de nepotrivirea ușoară a dimensiunilor dintre blocul suport (60 x 200 mm), modulele termoelectrice (40 x 40 mm) și radiatoarele anexate (50 x 200 mm). Aceste diferențe au generat zone marginale în care scurgerea de căldură era mai mare, ceea ce a condus la o eficiență termică redusă și la o distribuție inegală a temperaturilor pe sistem.

Pentru remediarea acestor neconformități constructive, s-a adoptat un sistem adițional de etanșare și izolare termică prin montarea unei garnituri speciale termo-rezistente, realizată din materiale cu proprietăți izolatoare ridicate și stabilitate la temperaturi extreme, de până la 1100 °C. Garnitura conține inserții de fibra ceramică, material recunoscut pentru performanțele sale superioare în domeniul izolării termice la temperaturi înalte, asigurând o etanșare eficientă la nivelul tuturor marginilor dispozitivului, în special în zonele colțurilor și spațiilor intermediare dintre module și radiator (Fig. 4.16).

Aplicarea acestei garnituri a condus la o reducere notabilă a scurgerilor termice pe marginile dispozitivului, contribuind la atingerea unui gradient termic optim între partea caldă și cea rece a modulelor și, implicit, creșterea performanței energetice a sistemului. Aceasta a permis obținerea unor valori de putere și tensiune mult îmbunătățite, confirmând relevanța și necesitatea optimizărilor constructive.

Întreaga etapă de testare a fost însoțită de o monitorizare atentă a parametrilor electrici și termici ai dispozitivului, stabilind un cadru riguros pentru validarea construcției finale înainte de utilizarea în condiții reale. Testarea a fost combinată cu metode riguroase de măsurare a temperaturilor, fluxurilor de aer și răspunsului electric, pregătind astfel terenul pentru fazele ulterioare experimentale și de evaluare cantitativă.

Această metodologie de testare, caracterizată printr-o abordare iterativă, a permis nu doar observația stadiului inițial de funcționare, ci și aplicarea imediată a modificărilor constructive care au rezultat în optimizări marcante ale performanței, subliniind importanța unei analize detaliate în fazele post-asamblare.

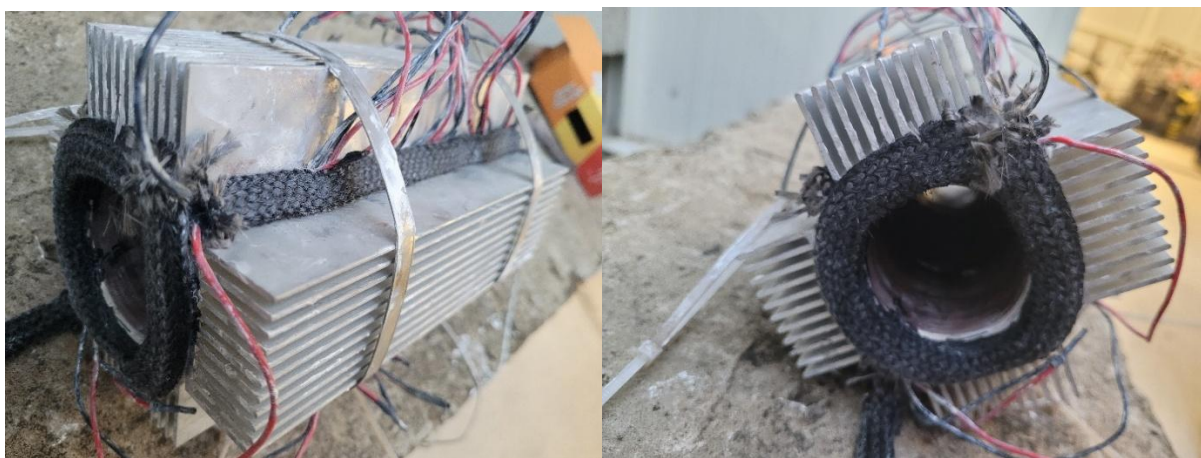


Fig. 4.16 Montare șnur cu inserție fibră ceramică pentru etanșarea dispozitivului

4.3.7. Proiectarea finală a dispozitivului

În urma realizării testelor post asamblare am reușit să realizez optimizările constructive necesare astfel încât dispozitivul thermoelectric conceput să aibă un randament cât mai ridicat sub această formă. Următoarea etapă a fost realizarea proiectării finale a dispozitivului în programul SolidWorks (Fig. 4.17).

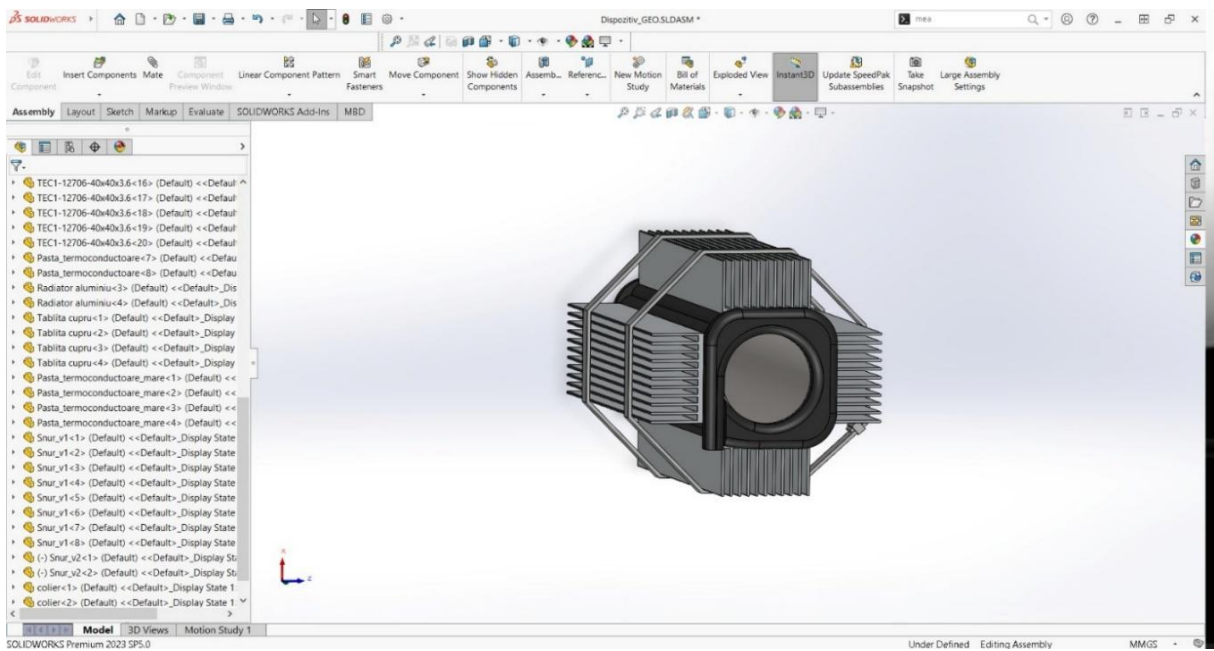


Fig. 4.17 Proiectarea dispozitivului final

CAPITOLUL 5. REZULTATE ȘI ANALIZE

5.1. Analiza materialelor pentru uniformizarea straturilor termice pentru modulul termoelectric TEC1-12706

Prima etapă a investigațiilor experimentale a constat în testarea funcționalității modulului termoelectric Peltier TEC1-12706, realizat pe un stand de testare proiectat și construit special în acest scop (Fig. 5.1). Acest modul, caracterizat prin dimensiuni compacte de 40×40 mm a fost supus unor condiții controlate de temperatură, replicate prin utilizarea unui pistol cu aer cald ce a aplicat treptat căldura necesară pe suprafața dispozitivului.

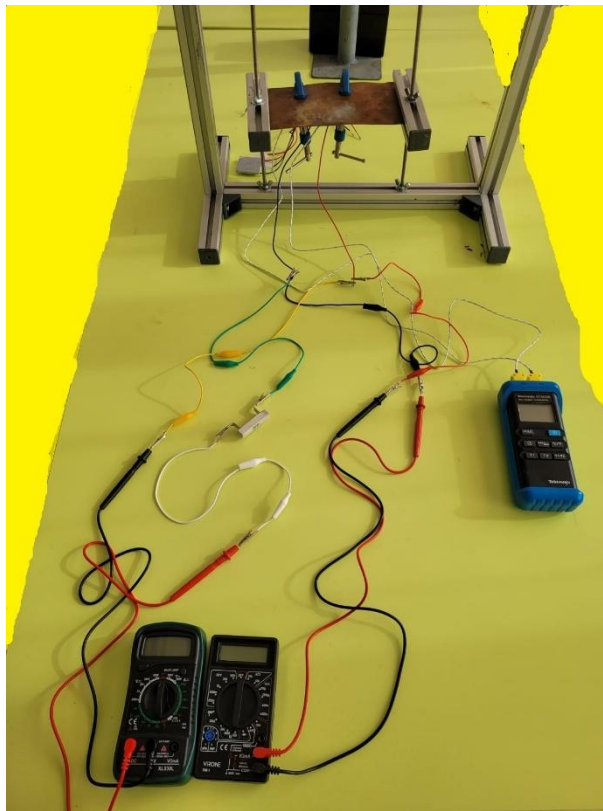


Fig. 5.1 Stand de testare materiale pentru uniformizarea straturilor termice

Un aspect esențial al studiului a vizat evaluarea diferitelor materiale utilizate ca straturi protectoare, plasate strategic atât pe partea „caldă” a modulului, cât și pe partea „rece”, pentru a determina influența lor asupra performanței termoelectrice și asupra durabilității modulului. Aplicarea acestor straturi protectoare a avut scopul de a asigura protecție mecanică și termică, prevenind deteriorarea componentelor și optimizând transferul termic.

În timpul testelor, s-au monitorizat continuu valorile electrice și termice generate de modul, printr-un circuit electric de supraveghere conectat la sistemul experimental, cu scopul de a cuantifica eficiența fiecărui strat protector introdus și de a identifica materialele care oferă cel mai bun echilibru între protecție și performanță.

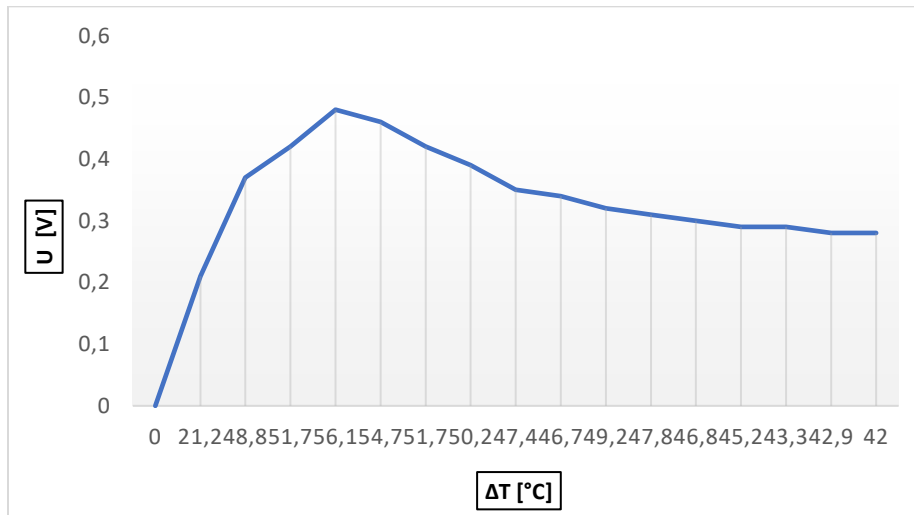
Această fază preliminară a experimentului reprezintă baza pentru selecția finală a straturilor termo-protectoare integrate în dispozitivul complet, asigurând astfel atât funcționarea optimă, cât și fiabilitatea pe termen lung a sistemului termoelectric dezvoltat.

5.1.1. Strat cald Aluminiiu – Strat rece Aluminiiu

În acest test în care am folosit ca material protector atât pentru zona caldă cât și pentru zona rece aluminiiu putem observa că diferența de temperatură maximă a fost la secunda 120 atunci când ΔT a atins o valoare de 56,1 °C, având o tensiune de 0,48 volți cu o intensitate de 0,145 A, având legată în circuit această rezistență de 3,3 Ω cu o putere disipată de 10 W. Din acel moment diferența de temperatură a început treptat să scadă iar automat valorile de tensiune și intensitate la rândul lor au început să scadă.

Este important de specificat este că partea rece în acest test a fost lăsată liberă pentru a vedea comportamentul materialului fără a fi influențat de aerul care ar curge pe sub acest strat. Din această încercare se observă că aluminiiu se încălzește destul de repede și transmite căldura într-un timp relativ scurt și pe suprafața rece.

Pentru o înțelegere mai facilă a datelor rezultate în urma realizării acestui test am atașat o reprezentare grafică (Fig 5.2, 5.3) a valorilor înregistrate de aparatele de măsură având ca scop analizarea influenței factorilor care contribuie la realizarea experimentelor desfășurate asupra parametrilor prestabiliți.



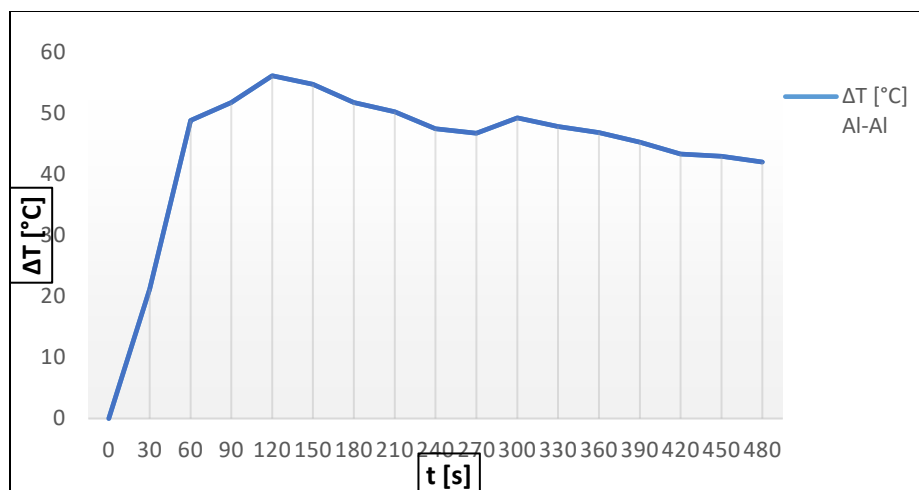


Fig. 5.3 Variația diferenței de temperatură în funcție de timp pentru Al sus și Al jos

5.1.2. Strat cald Cupru – Strat rece Aluminiiu

În continuare am abordat o altă structură pentru a testa straturile protectoare ale modulului termoelectric, iar de această dată am încercat să combin două materiale diferite pentru a vedea ce rezultate obțin.

În acest test am folosit pentru partea superioară materialul de cupru, iar pentru partea inferioară materialul de aluminiu, după cum se poate observa și din rezultatele din tabelul anexat temperatura T_1 crește foarte repede în primele secunde, ceea ce ne confirmă faptul că cuprul este un bun conductor termic.

Pentru a vedea evoluția datelor experimentale care ne interesează am analizat grafic cum influențează factorii implicați și în acest test (Fig. 5.4, 5.5).

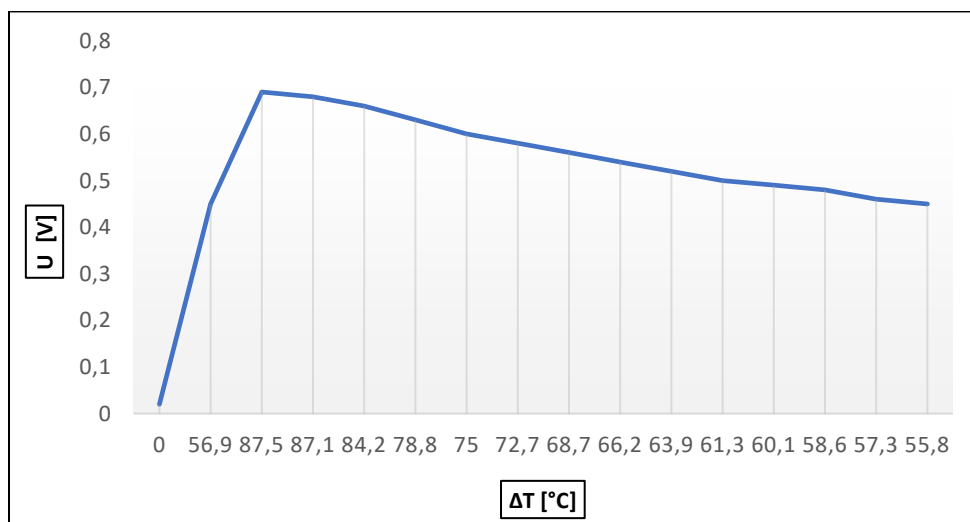


Fig. 5.4 Variația tensiunii în funcție de diferența de temperatură pentru Cu sus și Al jos

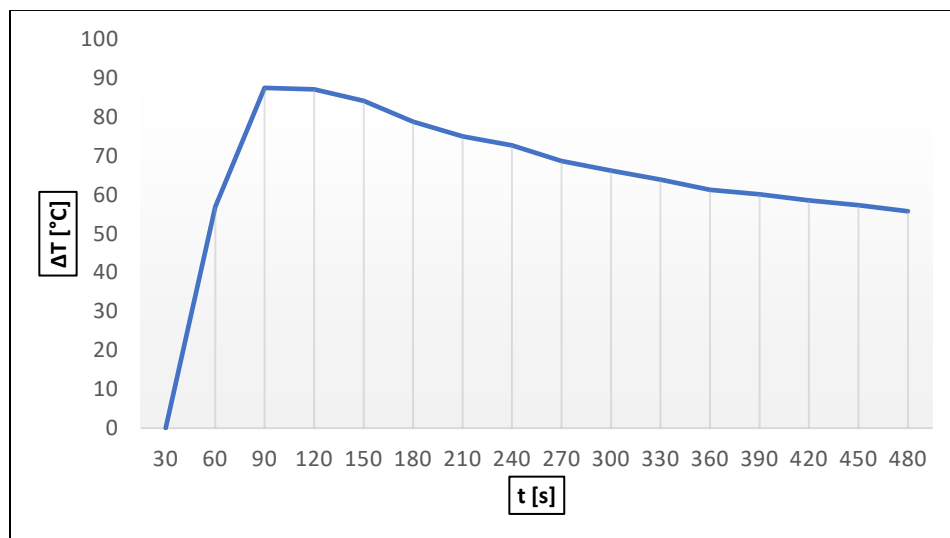


Fig. 5.5 Variația diferenței de temperatură în funcție de timp Cu sus și Al jo

5.1.3. Strat cald Cupru – Strat rece Cupru

Observând din analiza precedentă faptul că stratul protector de cupru din zona superioară, cea caldă a atins temperaturi foarte mari, următoarea analiză a fost ca modulul termoelectric să fie așezat între cele două straturi protectoare din cupru.

În continuare am analizat grafic (Fig. 5.6, 5.7) și aceste date experimentale rezultate pentru aceste materiale folosite ca straturi protectoare.

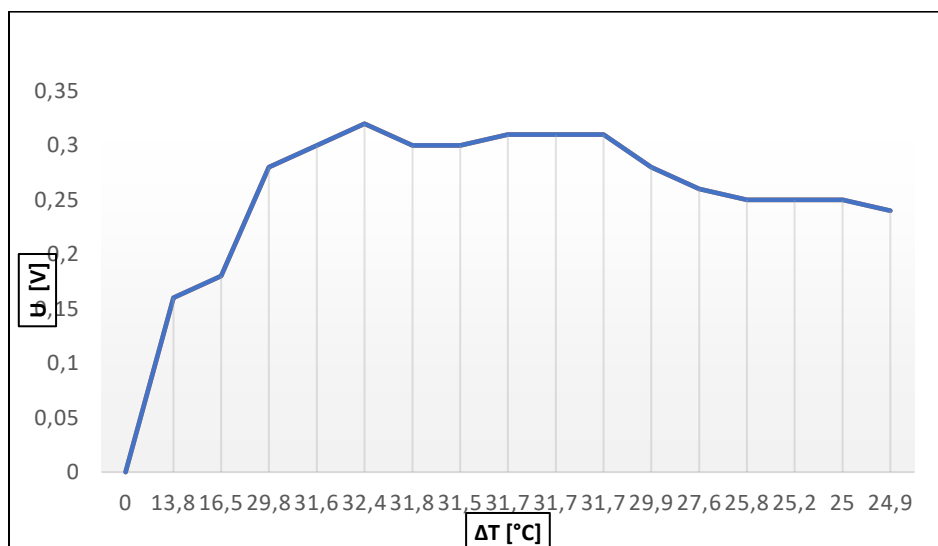


Fig. 5.6 Variația tensiunii în funcție de diferența de temperatură

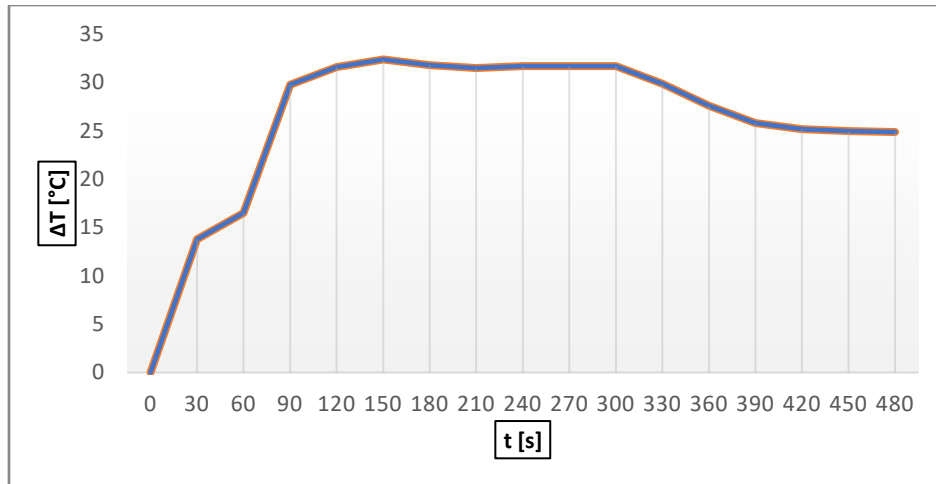


Fig. 5.7 Variația diferenței de temperatură în funcție de timp

5.1.4. Strat cald Inox– Strat rece OLC

În urma efectuării celor trei probe am ales să fac o ultimă testare pentru straturile protectoare care vor fi de o parte și de alta a modului termoelectric, pentru a reuși să analizez și să compar rezultatele obținute în vederea alegerii potrivite pentru a proteja acest modul termoelectric să reziste în timp și în același timp să ajute la producerea tensiunii și a curentului. Drept urmare în ultima analiză am folosit ca strat protector superior inoxul, iar ca strat inferior OLC.

Pentru a observa mai bine ce se produce în intermediul acestui test, am ales sa fac o analiză grafică explicită (Fig.5.8, 5.9).

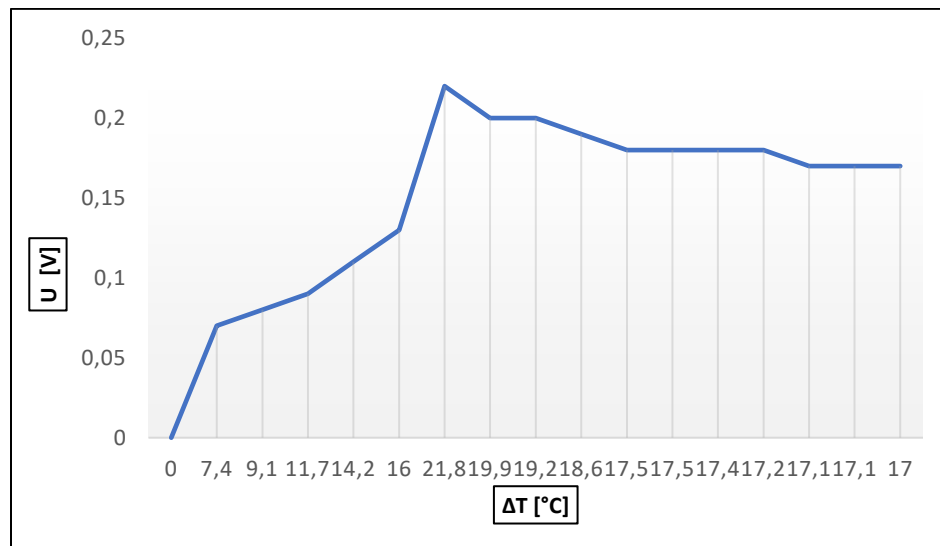


Fig. 5.8 Variația tensiunii în funcție de diferența de temperatură

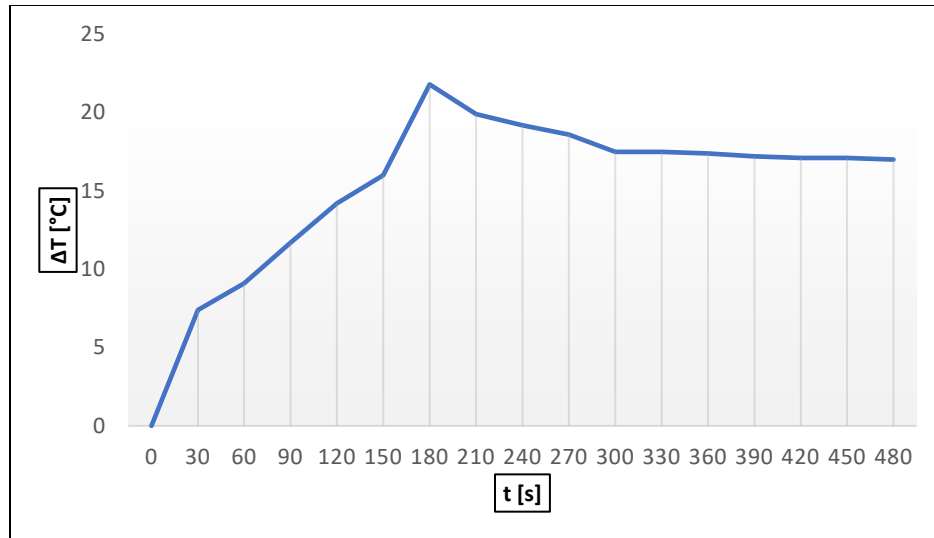


Fig. 5.9 Variația diferenței de temperatură în funcție de timp

5.1.5. Analiza comparativă a datelor experimentale pentru straturile protectoare

Acestea au fost cele patru măsurători încercate cu materiale diferite atât în stratul superior, zona caldă cât și în stratul inferior, zona rece pentru a putea alege cel mai bun strat protector pentru fiecare zonă a modului termoelectric. În continuare am ales să fac o analiză comparativă grafică a celor patru teste realizate pentru aceste tipuri diferite de materiale (Fig. 5.10, 5.11).

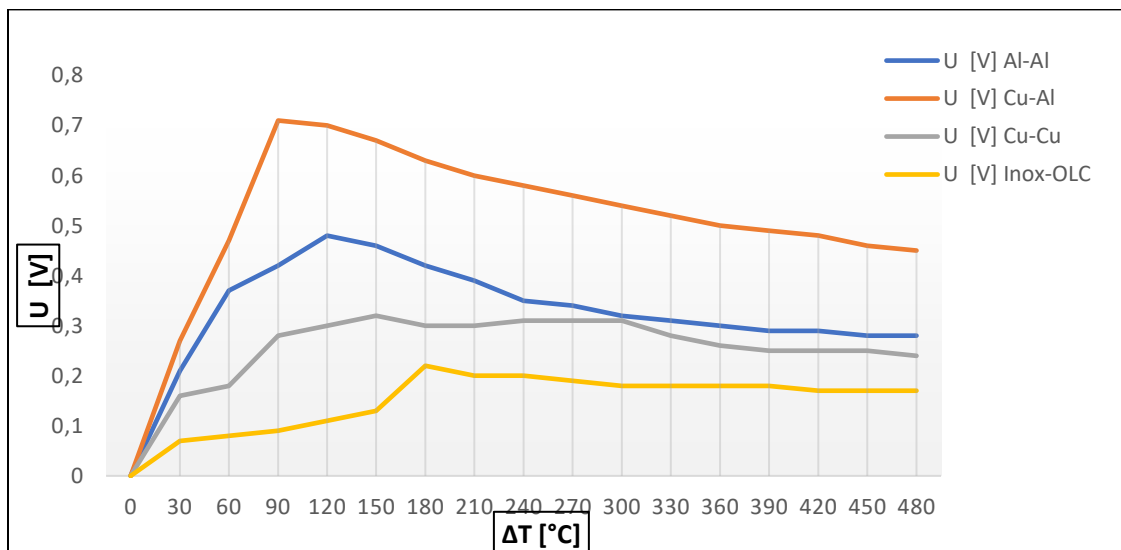


Fig. 5.10 Variația comparativă a tensiunii în funcție de diferența de temperatură

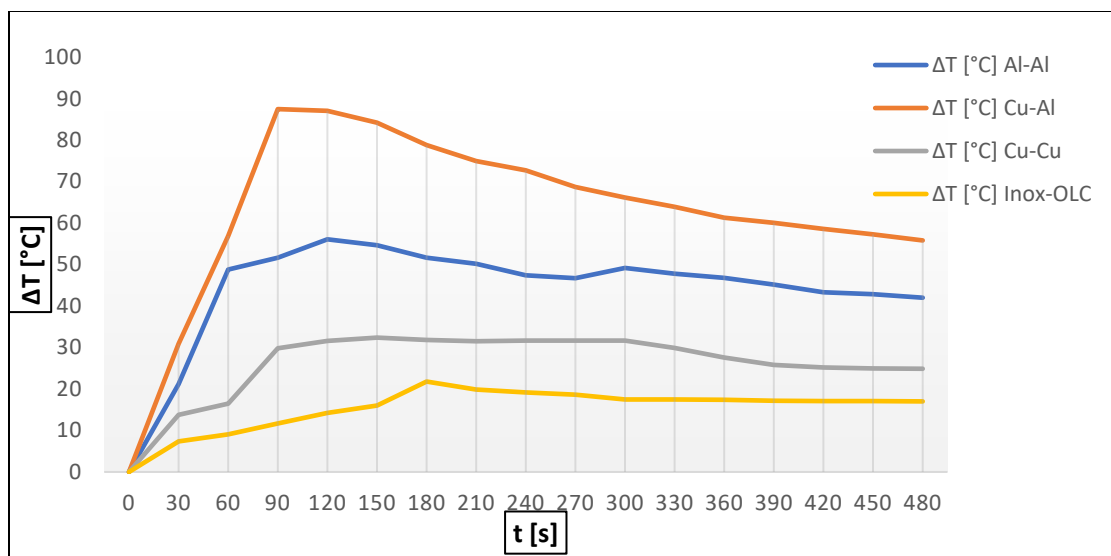


Fig. 5.11 Variația comparativă a diferenței de temperatură în funcție de timp

În urma analizei tuturor celor patru probe testate, se poate observa o caracteristică remarcabilă a inoxului, utilizat în poziția superioară a modului termoelectric. Deși inoxul se încălzește mai lent comparativ cu alte materiale precum cuprul, acesta capătă după o perioadă de aproximativ 180 de secunde un regim termic stabilizat. Stabilitatea este reflectată atât în menținerea unei diferențe de temperatură constante (ΔT), cât și în valorile tensiunii electrice generate, care nu prezintă fluctuații sau tendințe de scădere substanțială pe durata testului.

Această constanță termică asigură o funcționare predictibilă și o livrare continuă și stabilă de energie electrică, aspect esențial pentru aplicațiile practice în care curentul generat trebuie să fie fiabil și perseverent pe termen lung. Deși cea mai mare diferență de temperatură a fost înregistrată pentru combinația cupru sus – aluminiu jos, care a atins un ΔT maxim de aproximativ 87,5 °C, inoxul se remarcă prin durabilitate și stabilitate, caracteristici decisiv relevante în contextul utilizării modulelor termoelectrice TEC1-12706, pentru care manipularea parametrilor termici este critică în vederea asigurării longevității și performanței optime.

Pe baza acestor rezultate, alegerea materialelor pentru configurația finală a dispozitivului s-a orientat către utilizarea inoxului în contact direct cu zona caldă, urmată de o placă conductivă din cupru care să optimizeze uniformizarea fluxului termic către modul termoelectric. Pentru partea rece, radiatorul este realizat din aluminiu, material ce oferă eficiență crescută în disiparea căldurii prin convecție naturală. Această combinație asigură un echilibru optim între stabilitate termică, performanță energetică și durabilitate, constituind o soluție tehnologică viabilă pentru dispozitivul dezvoltat.

5.2. Analiza datelor experimentale ale dispozitivului final

5.2.1. Analiza datelor experimentale pe vehicul

5.2.1.2. Caz determinare experimentală pe vehicul în regim de autostradă

În situația determinării experimentale a dispozitivului montat pe vehiculul de testare am ales să prezint unul dintre cazurile studiate pentru a analiza performanțele dispozitivului și a face ulterior o analiză comparativă cu rezultatele testelor efectuate atât pe standul de probă cât și cu rezultatele testelor din simularea analizei numerice. Am ales să detaliez în continuare experimentul în regim de autostradă, cel cu viteză cuprinsă între 110-130 km/h pentru a vedea comportamentul acestui dispozitiv montat pe vehicul la o viteză ridicată. În tabelul 5.5 din anexa 5 vom regăsi toate datele de intrare și datele monitorizate atent cu dispozitivele prezentate anterior.

În cadrul acestei etape experimentale, dispozitivul termoelectric a fost montat în poziția proiectată inițială, substituind colierul care leagă toba intermediară de toba finală a vehiculului prevăzut, conform descrierilor anterioare. Analiza valorilor măsurate indică o temperatură maximă a țevii de evacuare, în proximitatea dispozitivului, de aproximativ 120 °C, așa cum se poate observa în figura 5.18 o valoare moderată care reflectă un regim termic controlat și favorabil pentru funcționarea modulelor termoelectrice fără a expune componentele la condiții termice ce ar putea afecta integritatea și durabilitatea acestora. Diferența maximă de temperatură ΔT înregistrată între fețele caldă și rece ale modulului a fost de 8,9 °C și a evoluat într-un mod constant și liniar pe durata testului, fără oscilații semnificative, fluctuațiile fiind minime, în limite de zecimi de grade Celsius. Această stabilitate termică accentuează calitatea etanșării și eficiența răcirii active asigurate prin sistemul de circulație a aerului rece controlat, realizat cu ajutorul suflantei montate sub vehicul.

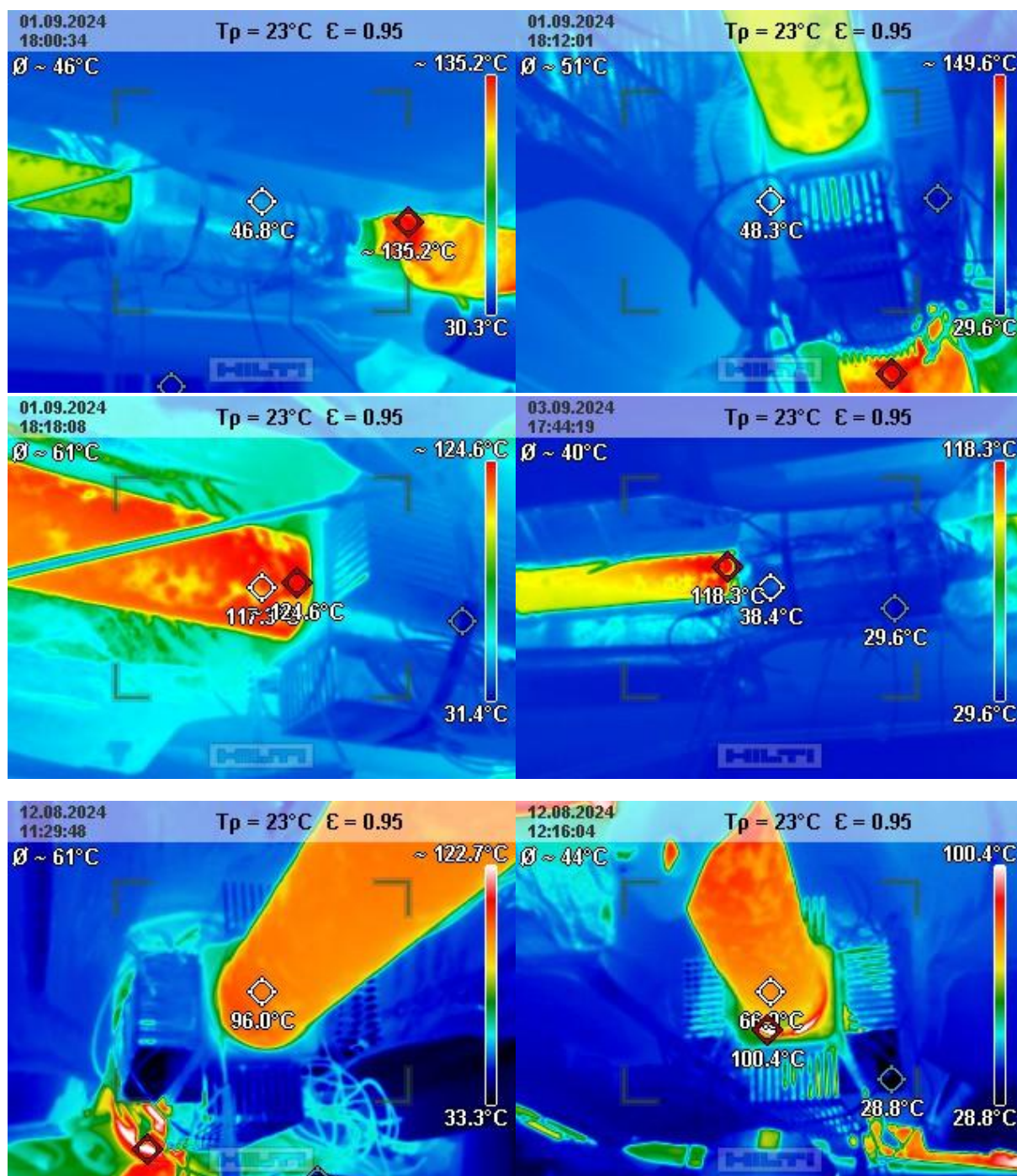


Fig. 5.12 Variații de temperatură a gazelor de evacuare prin țeava de eșapament în timpul testării

Paralel cu creșterea temperaturii gazelor de evacuare, temperatura interioară a blocului suport din inox a crescut gradual, menținând astfel o diferență termică robustă care a condus la generarea unei tensiuni electrice de circa 5,85 V, măsurată în circuitul prevăzut cu rezistență de 82 Ω , așa cum se poate observa în figura 5.13.

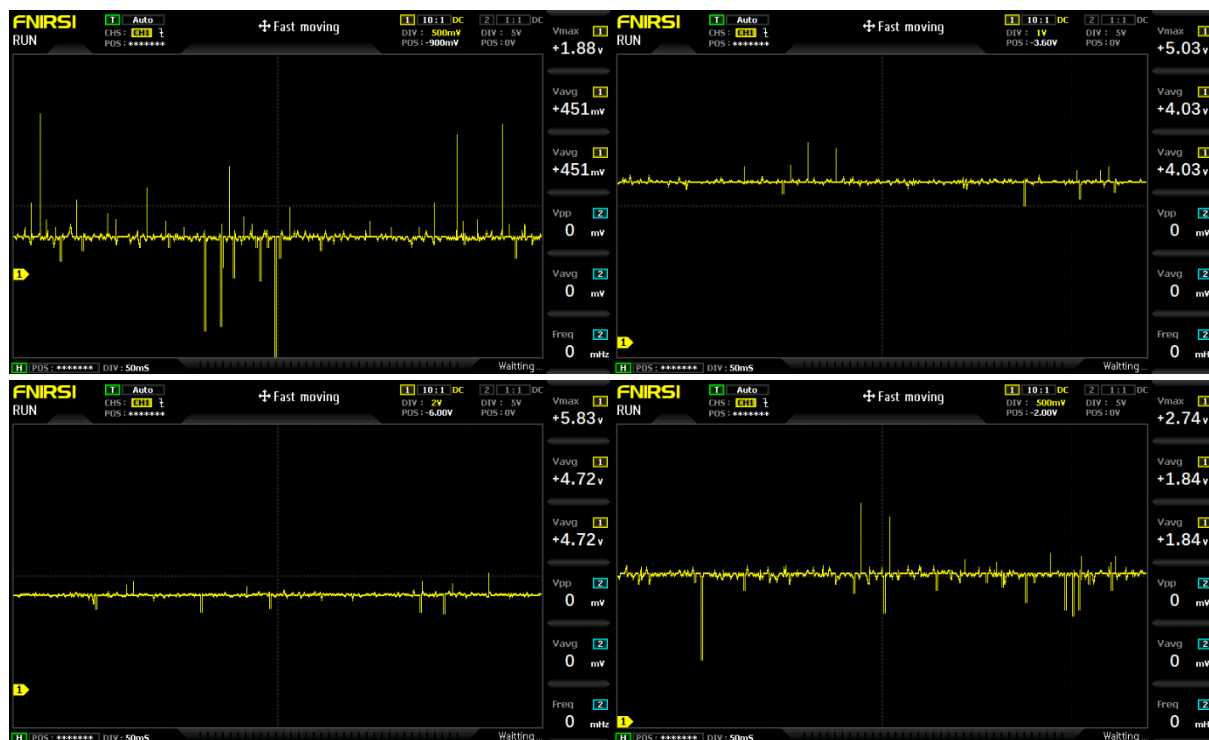


Fig. 5.13 Variația tensiunii monitorizată pe Osciloscop

Această analiză a fost supusă inițial simulării. Detaliile analizei numerice efectuate prin simularea în softul ANSYS au fost prezentate în capitolul 3, iar rezultatele pentru această determinare la care am prezentat datele experimentale se află în scenariul 3 al capitolului menționat, acolo unde se află rezultatele analizei numerice în urma simulării. În continuare vom face o analiză comparativă între rezultatele simulării și rezultatele datelor experimentale din tabelul de mai sus pentru a observa dacă datele măsurate în condițiile de laborator pot fi validate pentru dispozitivul de recuperare a energiei.

Validarea acestor rezultate se realizează printr-o comparare cu rezultatele simulărilor numerice efectuate în mediul ANSYS, unde au fost reproduse cu fidelitate condițiile experimentale: temperatura maximă de 120 °C a țevii de evacuare și durata totală de testare de 900 de secunde, împreună cu parametrii mediului ambiant și proprietățile materialelor componente. Din simulare rezultă o valoare a variației diferenței de temperatură de 8,69 °C, apropiată de cea măsurată experimental care este de 8,9 °C, mai mult decât atât și în simulare se poate observa că variația temperaturii crește constant și liniar exact ca în determinările experimentale din laborator. Această variație se poate observa mai bine în analiza grafică din figura 5.14.

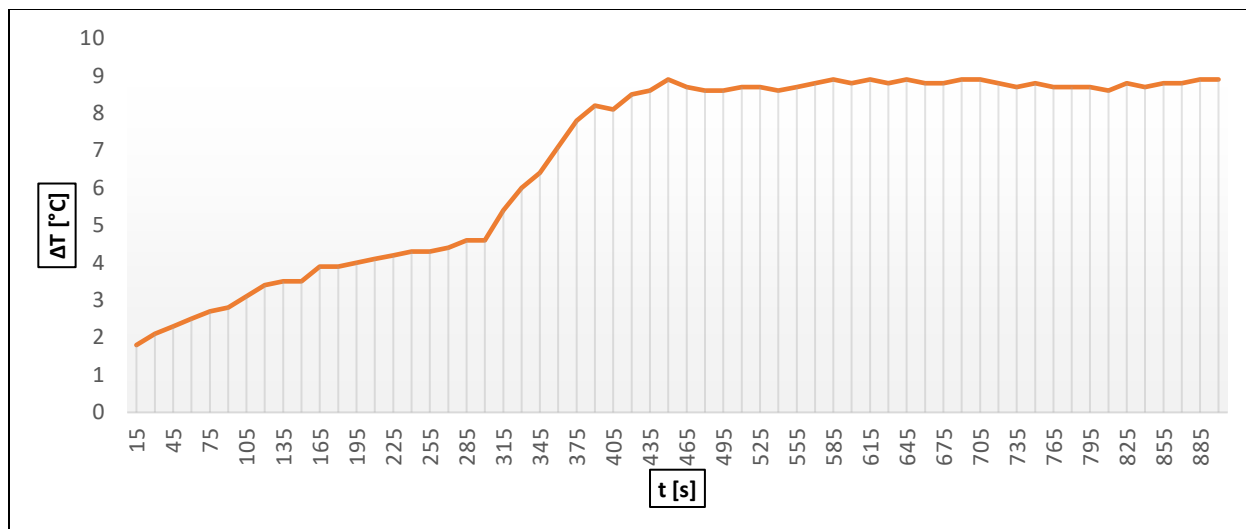


Fig. 5.14 Variația diferenței de temperatură în funcție de timp

Se cunoaște că variația tensiunii este direct proporțională cu variația diferenței de temperatură astfel în continuare vom regăsi în figura 5.15 analiza grafică a variației tensiunii în funcție de diferența de temperatură pentru acest caz în care se poate observa că și aceasta crește liniar și uniform.

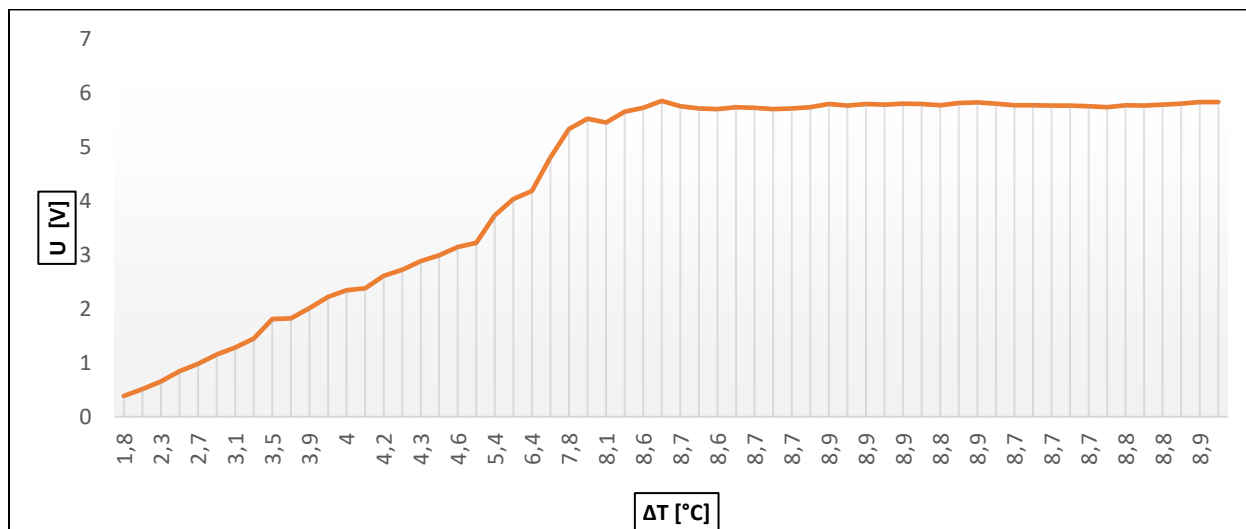


Fig. 5.15 Variația tensiunii în funcție de diferența de temperatură

După cum s-a observat între diferența de temperatură din simulare și diferența de temperatură din măsurarea datelor experimentale există o diferență a aceste variații ceea ce înseamnă că în testarea acestui dispozitiv pot apărea și anumite erori. În continuare vom analiza pe scurt partea de erori de măsurare și analiza erorii în cazul dat.

5.3. Erori de măsurare și analiza erorii

5.3.1. Erori de măsurare

În orice cercetare experimentală sau numerică, calculul erorilor joacă un rol esențial în interpretarea și validarea rezultatelor. Nicio măsurătoare sau simulare nu poate fi considerată complet precisă, deoarece aparatele și metodele utilizate au propriile limite de precizie și incertitudini. În cazul măsurătorilor experimentale, aceste incertitudini provin din caracteristicile aparatelor de măsură, cum ar fi clasa de precizie, condițiile ambientale sau modul de utilizare. În ceea ce privește analiza numerică, erorile pot apărea din cauza ipotezelor și simplificărilor din model, din valorile parametrilor termici utilizați sau din condițiile la limită impuse simulărilor.

Astfel, calculul erorii procentuale oferă o măsură cuantificabilă și obiectivă a abaterii, ceea ce permite o interpretare riguroasă și fundamentată a concordanței dintre modelul numeric și experimentele fizice.

Pentru a evalua diferența dintre rezultatele numerice și cele experimentale se utilizează, de regulă, eroarea procentuală relativă, exprimată prin relația:

$$E[\%] = \frac{|\Delta T_{\text{exp}} - \Delta T_{\text{num}}|}{\Delta T_{\text{exp}}} \times 100 \quad (5.1)$$

unde ΔT_{exp} reprezintă valoarea măsurată experimental, iar ΔT_{num} valoarea obținută prin simulare.

5.3.2. Analiza erorii pentru determinarea regimului urban

Pentru măsurătorile determinate anterior atât în simulare cât și în determinările reale din laborator pentru regimul de mers pe autostrada vom putea calcula eroarea conform formulei (5.1) pentru a constata dacă dispozitivul poate fi validat sau nu.

Aplicând această formulă pentru datele obținute în cadrul studiului de față, respectiv rezultă:

$$E = \frac{|8.9 - 8.69|}{8.9} \times 100 \approx 2.36\% \quad (5.2)$$

Această valoare a erorii procentuale demonstrează o concordanță foarte bună între măsurători și simulări, diferența încadrându-se în limitele normale generate de marja de eroare a aparaturii de măsură și de simplificările impuse în modelul numeric. Astfel, rezultatele confirmă faptul că modelul realizat în ANSYS reproduce în mod satisfăcător comportamentul termic observat experimental în cazul dispozitivului termoelectric analizat.

5.4. Analiza datelor experimentale pe stand

5.4.1. Caz determinare experimentală pe stand

În urma determinărilor anterioare și a testării dispozitivului direct pe vehicul pentru regimul de mers pe autostradă, am ales spre analiză un caz în care se simulează viteza unui vehicul cu 120 km/h, la care am ales un coeficient de convecție mediu. Pe stand am stabilit temperatura caldă foarte ridicată pentru a testa atât comportamentul dispozitivului cât și performanțele acestuia. Drept urmare am stabilit în dreptul pistolului cu aer cald temperatura de 550 °C, o temperatură extremă care dacă ar lua contact direct cu modulele termoelectrice din dispozitiv cu siguranță acestea ar ceda. Prin această încercare se poate demonstra fiabilitatea, durabilitatea și performanța acestui dispozitiv de recuperare a energiei.

Analiza datelor experimentale obținute pe standul de testare relevă performanțe consistente și stabile ale dispozitivului termoelectric proiectat. Pe parcursul celor 900 de secunde de măsurare, diferența maximă de temperatură înregistrată între zonele caldă și rece ale modulului a atins valoarea de 41,8 °C. Această diferență termică impresionantă semnalează o capacitate ridicată a dispozitivului de a menține un gradient termic susținut, esențial pentru conversia eficientă a energiei termice în energie electrică.

Evoluția acestei diferențe de temperatură a fost caracterizată printr-o creștere progresivă și uniformă, așa cum se poate observa în figura 5.16, fără fluctuații relevante, fapt care evidențiază un control termic adecvat și o stabilitate bine asigurată atât de configurația materialelor utilizate, cât și de funcționarea suflantei cu aer rece ce asigură o răcire continuă și eficientă a zonei reci. Temperatura blocului suport din inox a crescut într-un ritm constant, iar răcirea prin intermediul lamelelor radiatorului a contribuit semnificativ la menținerea diferenței termice într-un interval stabil pe toată durata experimentului.

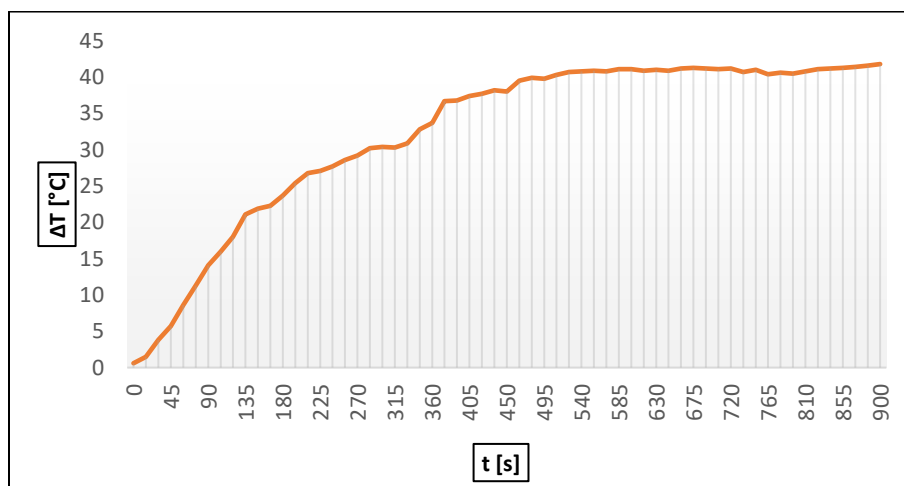


Fig. 5.16 Variația diferenței de temperatură în funcție de timp

Monitorizarea fluxului de temperatura din timpul testului care a fost realizată cu camera termică se poate observa în figura 5.17.

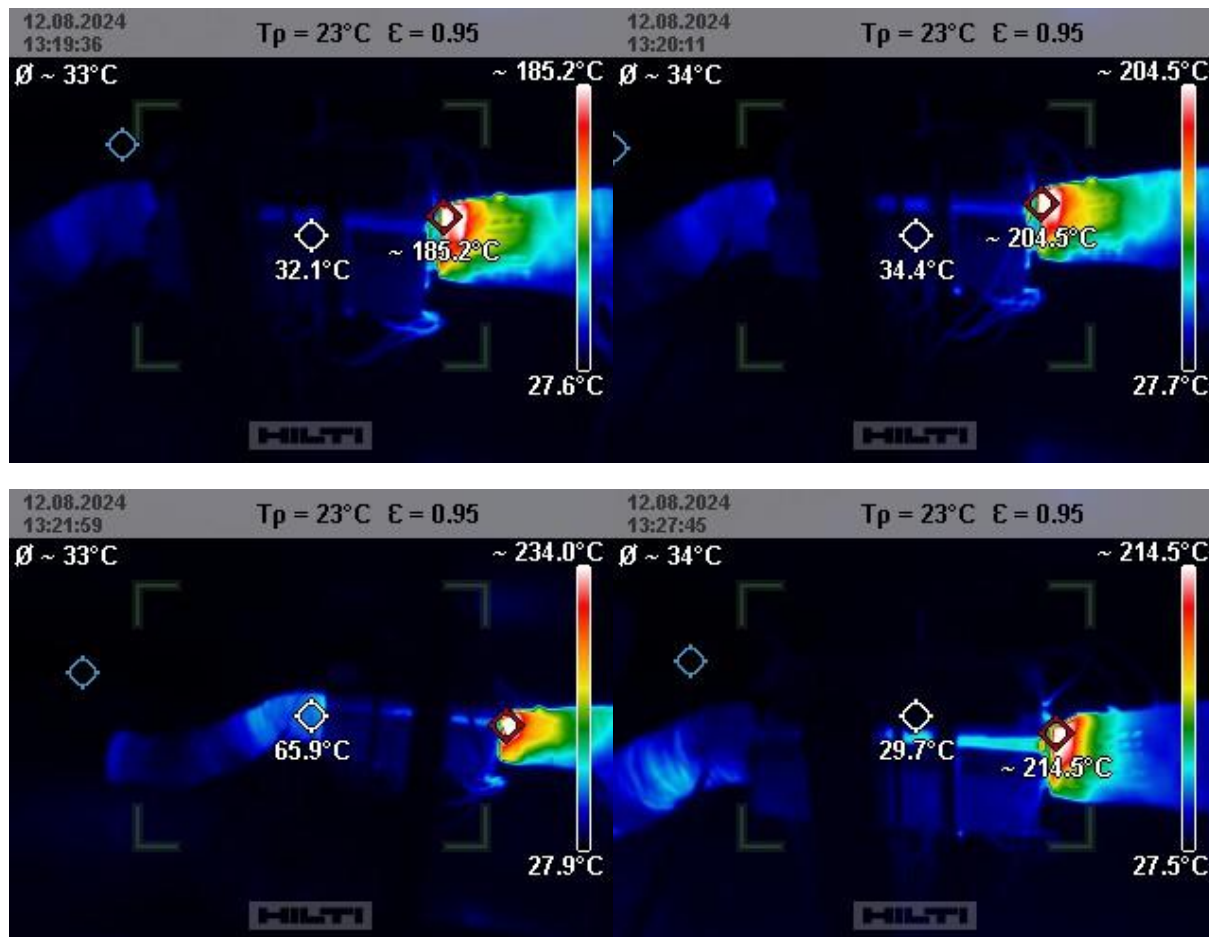


Fig. 5.17 Fluxul de temperatura din timpul determinării experimentale la 550°C

Tensiunea este influențată direct de variația temperaturii, iar în această situație unde avem o variație de temperatură destul de ridicată am atins o valoare a tensiunii de peste 30 de volți în circuit cu rezistența de $82\ \Omega$ mai exact o valoare de 30,9 volți. Tensiunea a fost monitorizată cu ajutorul lor cilor scopului așa cum se poate vedea în figura 5.18.

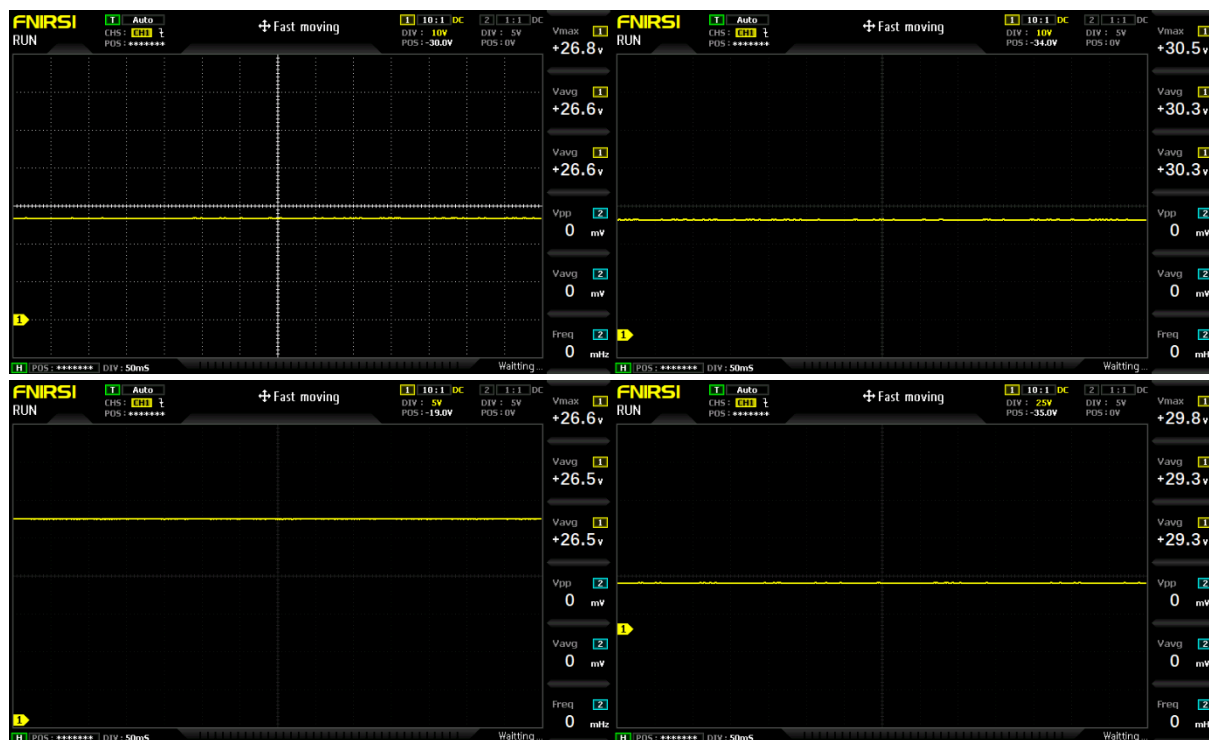


Fig. 5.18 Monitorizarea tensiunii pentru testul la 550 °C cu ajutorul Osciloscopului

Variația tensiunii s-a comportat direct proporțional cu variația temperaturii după cum este analizat grafic în figura 5.19 unde ne este prezentată o ascensiune liniară având o creștere progresiv treptată, fără a avea fluctuații relevante ceea ce denotă că arhitectura și structura dispozitivului este una fiabilă.

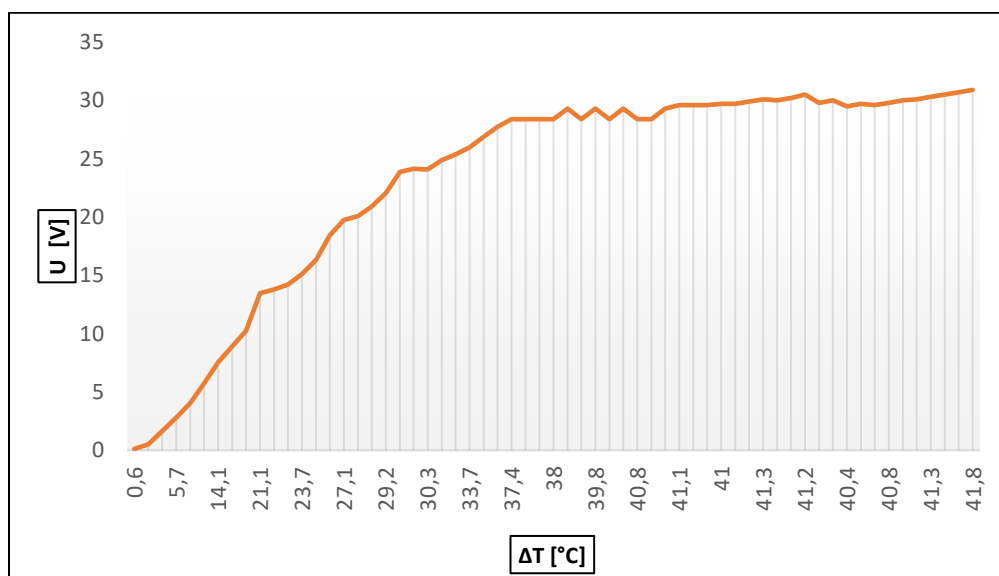


Fig. 5.19 Variația tensiunii în funcție de diferența de temperatură

Comparația cu simularea numerică realizată în ANSYS, care a presupus condiții identice și anume o temperatură sursă de 550 °C și un interval de timp de 900 de secunde, cu un coeficient de convecție de 130,1 [W/m²*K] descrisă în capitolul 3 la scenariul 5, a evidențiat o diferență de temperatură maximă de 43,13 °C. Determinarea experimentală din laborator s-a obținut o diferență de temperatură maximă de 41,8 °C ceea ce înseamnă că între variația de temperatură din simulare și cea din determinarea experimentală există o mică diferență a valori. Pentru a stabili dacă eroarea dintre măsurătorile de pe standul experimental și cele din simulare este în parametri în continuare se va calcula eroarea pentru această probă de încercare.

5.4.2. Analiza erorii în cazul vitezei de 120 km/h și temperaturii de 550 °C

Pentru evaluarea concordanței dintre rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare, se utilizează eroarea procentuală relativă, definită prin relația:

$$E[\%] = \frac{|\Delta T_{\text{exp}} - \Delta T_{\text{num}}|}{\Delta T_{\text{exp}}} \times 100 \quad (5.3)$$

unde ΔT_{exp} reprezintă valoarea măsurată experimental, iar ΔT_{num} valoarea calculată prin simulare numerică. În cazul de față rezultă:

$$E = \frac{|41.8 - 43.13|}{41.8} \times 100 = \frac{1.33}{41.8} \times 100 \approx 3.18\% \quad (5.4)$$

Această valoare arată că diferența dintre simulare și experiment este redusă, adică eroarea se încadrează în limite acceptabile pentru validarea numerică, fiind comparabilă cu marja de eroare inherentă aparaturii de măsură și cu simplificările introduse în modelul de calcul. Această concordanță evidențiază acuratețea și validitatea modelului numeric utilizat, confirmând în același timp metodologiile riguroase aplicate în testele experimentale. Stabilitatea și coerența parametrilor evidențiați pe tot parcursul experimentului oferă o bază solidă pentru o evaluare tehnică optimistă privind capacitatea și fiabilitatea dispozitivului în condiții reale de operare auto.

Concluzionând, aceste rezultate susțin cu încredere aplicabilitatea practică a sistemului termoelectric în cadrul instalațiilor vehiculului, deschizând calea pentru optimizări susținute și integrarea tehnologiei în medii operationale diverse. Această etapă reprezintă un moment cheie în procesul de verificare și validare a performanțelor dispozitivului, în vederea dezvoltării sale ulterioare spre aplicări pe scară industrială.

CAPITOLUL 6. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE

6.1. Concluzii finale

În cadrul acestei cercetări, s-a abordat cu maximă rigurozitate și profunzime tema proiectării, dezvoltării și testării unui dispozitiv termoelectric destinat recuperării energiei termice reziduale în sistemele de evacuare ale vehiculelor. Lucrarea reflectă un efort științific și tehnic vast, desfășurat printr-o succesiune amplă de etape complementare, care cuprind selecția și analiza materialelor, optimizarea construcției dispozitivului, precum și verificarea funcționalității prin metode experimentale riguroase și simulări numerice detaliate.

Prima etapă corelată cu selecția materialelor a fost esențială pentru fundamentarea succesului întregului sistem. Analiza comparativă a mai multor compoziții a condus la alegerea optimă a materialelor cu capacități superioare de rezistență termică și stabilitate mecanică, adaptate pentru a crea un dispozitiv fiabil în condiții severe de temperatură. Mai mult, investigațiile microstructurale au evidențiat faptul că imperfecțiunile din materiale, în special golurile din structura componentelor, influențează negativ transferul termic și performanța dispozitivului, impunând astfel o atenție sporită pentru nivelul de finisare și controlul calității materialelor.

Testele preliminare efectuate pe standul de laborator au avut un rol strategic în procesul de optimizare. În această fază, a fost demonstrată necesitatea adăugării șnururilor ceramice ca garnituri de etanșare la marginile dispozitivului pentru a reduce pierderile termice și a crește stabilitatea termică. Datorită acestei intervenții, s-au obținut rezultate finale mult ameliorate, caracterizate prin creșteri constante și predictibile ale diferențelor de temperatură și ale parametrilor electrici măsurați.

Continuând, testele efectuate pe vehicul au confirmat capacitatea dispozitivului de a funcționa cu stabilitate în condiții reale de exploatare. Dispozitivul, montat în locul destinat înlocuind colierul de prindere dintre țeava de eșapament intermediară și finală, a demonstrat o diferență maximă de temperatură la nivelul modulelor termoelectrice în jurul valorii de 8,9 °C, iar tensiunile generate au ajuns până la aproximativ 6 V pe circuitul de sarcină. Aceste performanțe termice și electrice au fost însoțite de o evoluție progresivă și lipsită de oscilații majore, denotând o funcționare stabilă și eficientă a sistemului.

Validarea numerică a acestor rezultate prin simulările ANSYS, care au replicat fidel condițiile experimentului, a evidențiat o diferență termică foarte apropiată, cu o eroare relativă de doar 2,36%, confirmând acuratețea modelului și metodologia experimentală.

Un aspect esențial și definitoriu al acestei cercetări îl reprezintă testele realizate în regim termic sever pe standul de laborator, unde dispozitivul a fost supus unor condiții de temperatură ridicată, simulând astfel condițiile extreme ale mediului de funcționare în zona sistemului de evacuare auto. Aici, temperatura sursei calde a fost controlată și menținută la valoarea de 550 °C, un prag termic semnificativ, fiind peste limita superioară recomandată teoretic pentru modulele termoelectrice tip TEC1-12706.

În aceste condiții severe, dispozitivul demonstrat nu numai că a rezistat structurii materiale, dar a generat o diferență de temperatură ΔT remarcabilă, ce a depășit 40 °C, indicând o capacitate de acumulare și transfer termic deosebit de eficientă. Această diferență termică ridicată a condus la obținerea unei valori de tensiune electrică în circuitul de sarcină, cu rezistența de 82 Ω , ce a depășit pragul de 30 V, un rezultat ce evidențiază potențialul uriaș al dispozitivului pentru convertirea eficientă a energiei termice în energie electrică.

Aceste performanțe remarcabile s-au realizat în parametri stabili și repetați, garantând fiabilitatea și robustețea dispozitivului în condiții de exploatare realiste. Validarea numerică a acestui comportament, realizată prin simulările în ANSYS, a demonstrat o eroare foarte mică, de doar 3,18%, cu mult sub pragul de 5%, reafirmând fezabilitatea practică a sistemului dezvoltat.

Această etapă este una definitorie pentru cercetare, evidențiind nu doar performanțele extraordinare ale dispozitivului în condiții extreme ci și capacitatea acestuia de a susține o producție stabilă și semnificativă de energie electrică. Ea oferă astfel o bază solidă pentru dezvoltări ulterioare, optimizări și aplicarea pe scară largă în industria auto, contribuind la eficiența energetică și sustenabilitatea transporturilor.

Un aspect important care merită subliniat în încheierea acestei cercetări îl reprezintă potențialul ridicat al dispozitivului termoelectric dezvoltat pentru integrarea în vehiculele din grupul VAG, contextul concret în care s-au desfășurat testele experimentale. Din punct de vedere economic, costurile de fabricație ale acestui dispozitiv sunt apreciabil reduse și competitive în raport cu costul unui colier clasic utilizat pentru prinderea țevelor dintre toba intermediară și toba finală. Aceasta face ca investiția în acest sistem să fie una avantajoasă, oferind dublu beneficiu: nu doar fixarea fizică a elementelor de evacuare, dar și recuperarea energiei termo-electrice. Prin valorificarea căldurii disipate în mod tradițional, se reduce consumul de carburant, în același timp generându-se energie electrică utilă pentru alimentarea sistemelor auxiliare ale vehiculului.

Un alt avantaj fundamental al dispozitivului este arhitectura sa modulară și accesibilă, care permite intervenții relativ facile pentru operațiunile de mentenanță și service, un factor esențial pentru adoptarea cu succes în mediul auto industrial. Acest caracter practic subliniază utilitatea și sustenabilitatea soluției propuse, inclusiv din perspectiva eficienței și durabilității pe termen lung.

Astfel, dincolo de caracteristicile tehnice și performanțele demonstrate, această inovație oferă o soluție tehnică viabilă și rentabilă, un potențial real pentru extinderea aplicabilității în cadrul industriei vehiculelor din grupul VAG și nu numai, fiind proiectată să răspundă atât

criteriilor economice, cât și celor operaționale, un detaliu esențial pentru succesul implementării la scară largă.

În concluzie, lucrarea aduce o contribuție substanțială la domeniul conversiei termoelectrice aplicate în industria autovehiculelor, demonstrând printr-o metodologie integrată și riguroasă fezabilitatea tehnică și performanțele remarcabile ale sistemului dezvoltat. Rezultatele experimentale validate numeric oferă o perspectivă clară asupra viitorului aplicabil al tehnologiei, deschizând noi direcții pentru cercetare și implementare industrială.

6.2. Contribuții personale

Cercetarea prezentă în această teză s-a concentrat pe elaborarea unor metode inovatoare dedicate recuperării energiei termice din gazele de eșapament, având aplicabilitate directă în domeniul autovehiculelor. Contribuțiile personale se evidențiază atât prin caracterul complex al cercetării, cât și prin abordarea integrată care a combinat analiza teoretică, simulările numerice și testarea experimentală.

Contribuțiile personale pot fi sintetizate după cum urmează:

Analiza amănunțită a literaturii de specialitate și a tehnologiilor disponibile, care a asigurat o bază solidă a direcțiilor de studiu și identificarea unor goluri de cercetare. Acest proces a permis selectarea materialelor și metodelor cu cea mai mare relevanță, precum și dezvoltarea unei metodologii proprii, adaptate particularităților temei abordate.

În plan experimental, a fost proiectat și realizat un stand dedicat testării materialelor și capacității modulelor termoelectrice de tip TEC1-12706 de a genera energie electrică prin efectul Seebeck. Prin intermediul acestui stand, au fost efectuate teste pentru identificarea materialelor cele mai potrivite pentru contactul termic.

Un element inovator al cercetării a fost efectuarea unei analize microstructurale asupra materialelor OLC35 (oțel carbon de calitate, cu 0.35%C), oțel inoxidabil, cupru și aluminiu. Aceste investigații au fost realizate cu ajutorul Microscopului Electronic cu Scanare Quattro C (SEM) ceea ce a furnizat informații detaliate privind structura internă, integritatea mecanică și stabilitatea la temperaturi ridicate. Aceste date au constituit baza pentru alegerea soluțiilor constructive și a strategiilor de optimizare.

În paralel cu activitatea experimentală, a fost realizată o analiză teoretică detaliată asupra principiilor de funcționare ale modulelor termoelectrice. S-au luat în considerare efectele Seebeck, Peltier și Thomson, precum și influența parametrilor geometrici și a proprietăților fizice asupra performanțelor. Această analiză a permis formularea unui cadru conceptual solid pentru evaluarea randamentului global al dispozitivului și pentru estimarea puterii electrice recuperate în condiții variabile de regim.

Un rezultat important al acestei cercetări îl reprezintă dezvoltarea unui dispozitiv pentru recuperarea energiei electrice din gazele de eșapament, pentru care a fost depus cerere de brevet la OSIM [George Achiței, Lamara Achiței, Aristotel Popescu „Dispozitiv pentru recuperarea energiei electrice din gazele de eșapament, utilizând module termoelectrice integrate pe un bloc din inox cu răcire pasivă”], evidențiind astfel caracterul inovator și potențialul de aplicabilitate practică al soluției propuse.

O contribuție personală importantă constă în dezvoltarea unei arhitecturi constructive a dispozitivului termoelectric care facilitează atât producția industrială de serie, cât și integrarea ușoară în sistemul de evacuare al vehiculelor. Designul modular și adaptabil permite înlocuirea rapidă și simplificată a colierelor tradiționale dintre toba intermediară și toba finală cu acest dispozitiv inovator, fără modificări majore ale infrastructurii vehiculului. Mai mult, costurile de fabricație estimate pentru acest dispozitiv sunt competitive, iar diferența față de un colier clasic este redusă, ceea ce crește atractivitatea economică a soluției și o poziționează ca o alternativă viabilă pentru producătorii de autovehicule care urmăresc optimizarea eficienței energetice și reducerea emisiilor.

Pentru validarea experimentală inițială, dispozitivul a fost supus unei serii de teste pe un stand fix, special amenajat în condiții controlate de laborator. Această etapă a avut un rol decisiv în verificarea funcționalității și performanței ansamblului la un nivel fundamental. Tot pe acest stand au fost realizate și pretestările în faza de asamblare a dispozitivului, care au permis identificarea unor aspecte critice ce au condus la o primă optimizare semnificativă. Astfel, s-a introdus un sistem de garnituri realizate din șnur ceramic aplicat la nivelul muchiilor dispozitivului, intervenție ce a fost ulterior confirmată ca fiind esențială pentru obținerea unor valori stabile și crescătoare ale parametrilor termici și electrice. Această optimizare a avut un impact pozitiv major, sporind acuratețea și reproducibilitatea testelor finale.

Ulterior, pentru o validare completă și aplicabilă în condiții reale, a fost dezvoltat un al doilea stand experimental, montat direct pe vehiculul de test. Dispozitivul termoelectric a fost fixat în zona critică a sistemului de evacuare, respectiv între toba intermediară și toba finală, exact în poziția prevăzută pentru utilizarea practică. Testele au fost realizate în condiții reale de trafic, ceea ce a permis evaluarea parametrilor de funcționare ai sistemului într-un mediu dinamic și complex. Această abordare a fost vitală pentru conferirea credibilității și relevanței practice a concluziilor cercetării, arătând în mod clar capacitatea dispozitivului de a opera stabil și eficient în condițiile specifice mediului auto.

Un aspect crucial al cercetării l-a reprezentat compararea detaliată între rezultatele obținute prin simulări numerice și cele experimentale. Analiza comparativă a demonstrat o bună corelare între cele două seturi de date, diferențele fiind încadrate în limite acceptabile. Astfel confirmând precizia simulărilor și soliditatea metodologiei aplicate.

În ansamblu, aceste contribuții personale se remarcă prin integrarea unor abordări multidisciplinare, inovativitatea soluțiilor propuse și validarea acestora atât prin metode numerice, cât și experimentale. Rezultatele obținute reprezintă un avans semnificativ în domeniul recuperării energiei termice din gazele de eșapament și pot constitui fundamentul pentru dezvoltări viitoare și implementări industriale.

6.3. Direcții ulterioare de cercetare

Pe baza rezultatelor solide și validărilor experimentale obținute, următoarele direcții de cercetare constituie pași esențiali pentru evoluția și perfecționarea dispozitivului termoelectric dezvoltat și pentru consolidarea aplicabilității sale în domeniul automotive:

Optimizarea materială adaptată condițiilor termice specifice

Pentru vehiculele în care temperatura din zona colierului de prindere dintre toba intermediară și toba finală este mai scăzută decât în cazul analizat în acest studiu, o direcție importantă este optimizarea grosimii suportului din oțel inoxidabil. Reducerea grosimii pereților suportului ar permite o preluare mai rapidă a căldurii și un transfer termic mai eficient către placa de cupru, sporind astfel diferența termică disponibilă pentru modulele termoelectrice. Această ajustare structurală ar putea fi esențială pentru adaptarea și maximizarea performanțelor dispozitivului în condiții termice variabile, asigurând o versatilitate mai mare a sistemului pe diverse categorii de vehicule.

Extinderea utilizării dispozitivului în regimuri termice ridicate păstrând arhitectura existentă

Având în vedere demonstrarea rezistenței dispozitivului la temperaturi înalte din testele pe stand, o altă direcție valoroasă este extinderea implementării sale în vehicule unde temperatura în zona colierului poate fi semnificativ mai ridicată. Menținând arhitectura inovatoare și robustă dezvoltată, aceste aplicații ar viza obținerea unor valori crescute ale tensiunii, cu scopul maximizării energiei recuperate. Această extindere poate include, de asemenea, utilizarea unor module termoelectrice avansate cu parametri superiori, care, deși au un cost de achiziție mai ridicat, pot genera tensiuni și puteri electrice superioare, deci pot sprijini mai eficient sistemele electrice ale vehiculului.

Dezvoltarea unor sisteme de stocare și distribuție a energiei generate

Pentru a asigura o utilizare eficientă și stabilă a energiei electrice produse, o direcție cheie o reprezintă integrarea unui sistem de stocare care să acumuleze energia generată variabil de dispozitiv. Prin montarea unei baterii dedicate sau a unor soluții avansate de acumulare a energiei, se poate asigura o tensiune electrică constantă, stabilă, fără fluctuațiile inerente captării directe. În plus, dezvoltarea unui sistem de management al energiei care să distribuie această energie stocată în mod optim către sistemele auxiliare ale vehiculului este esențială pentru maximizarea beneficiilor funcționale și energetice.

Îmbunătățiri și inovații în managementul termic și nanostructural

Perspectivile pentru performanțe sporite trec și prin optimizarea materialelor folosind tehnologii nanostructurale inovatoare, pentru a îmbunătăți coeficientul de performanță termoelectrică (ZT). Totodată, cercetările privind metode avansate de răcire activă și pasivă pot aduce soluții pentru menținerea și creșterea diferențelor de temperatură, prin tehnologii de răcire cu fază schimbătoare, microcanale specializate sau structuri capilare, care să optimizeze gestionarea fluxului termic, prelungească viața dispozitivului și să crească eficiența totală a sistemului.

Integrarea sistemului într-o arhitectură inteligentă „smart vehicle”

O altă direcție importantă este integrarea dispozitivului termoelectric în arhitectura vehiculului inteligent, care integrează funcții multiple de management energetic și de sustenabilitate. În această perspectivă, sistemul poate fi parte activă a unui ecosistem energetic conectat la alte surse de energie regenerabilă din vehicul, sprijinind trecerea către mobilitatea electrică sau hibridă. Capacitatea de a furniza energie electrică complementar vehiculului electric poate avea un impact major asupra autonomiei și performanței generale.

Evaluarea ciclului de viață și impactul ecologic

În contextul creșterii cerințelor privind sustenabilitatea, viitoarele cercetări trebuie să includă o evaluare aprofundată a ciclului de viață al dispozitivului, analizând impactul acestuia asupra mediului înconjurător. Aceasta implică studii privind reciclabilitatea materialelor utilizate, reducerea emisiilor de carbon prin utilizarea energiei recuperate și durabilitatea pe termen lung a sistemului. Astfel de cercetări vor integra tehnologia dezvoltată în tendințele globale privind protecția mediului și eficiența energetică.

Bibliografie

- [1] D. Beretta *et al.*, "Thermoelectrics: From history, a window to the future," 2019. doi: 10.1016/j.mser.2018.09.001.
- [2] J. He and T. M. Tritt, "Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward," 2017. doi: 10.1126/science.aak9997.
- [3] M. Zebarjadi and O. Akbari, "A Model for Material Metrics in Thermoelectric Thomson Coolers," *Entropy*, vol. 25, no. 11, 2023, doi: 10.3390/e25111540.
- [4] X. Yuan, Y. Zhao, and Z. Dai, "Typical thermoelectric materials: Progress and prospects," *Phys Lett A*, vol. 535, p. 130280, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.physleta.2025.130280.
- [5] T. Zhu, "Advances in Thermoelectric Materials Research," *Small Science*, vol. 5, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.1002/smssc.202500029.
- [6] M. S. Ummah, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 8th Edition*, vol. 11, no. 1. 2019.
- [7] D. M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781420038903.
- [8] W. He, G. Zhang, G. Li, and J. Ji, "Analysis and discussion on the impact of non-uniform input heat flux on thermoelectric generator array," *Energy Convers Manag*, vol. 98, pp. 268–274, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.04.006.
- [9] Y. Chen *et al.*, "Dynamic reconfiguration for TEG systems under heterogeneous temperature distribution via adaptive coordinated seeker," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s41601-022-00259-6.
- [10] M. Tang, J. Wang, Y. Ou, and Z. Tang, "A Novel Thermoelectric Generation Array Reconfiguration to Reduce Mismatch Power Loss Under Nonuniform Temperature Distribution," *Int J Energy Res*, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/7820395.
- [11] D. Zhang, L. Song, L. Wang, X. Li, X. Chang, and P. Wu, "A Systematic Review and Analysis of MPPT Techniques for TEG Systems Under Nonuniform Temperature Distribution," *Front Energy Res*, vol. 10, Jul. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.942347.
- [12] S. Shittu *et al.*, "Transient and non-uniform heat flux effect on solar thermoelectric generator with phase change material," *Appl Therm Eng*, vol. 173, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115206.
- [13] A. Vande Wouwer, "Modeling and Simulation of Distributed Parameter Systems," 2009.

- [14] Y. Apertet, H. Ouerdane, O. Glavatskaya, C. Goupil, and P. Lecoœur, "Optimal working conditions for thermoelectric generators with realistic thermal coupling," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 97, no. 2, p. 28001, Jan. 2012, doi: 10.1209/0295-5075/97/28001.
- [15] A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley, 2016. doi: 10.1002/9781119245964.
- [16] Y. Apertet, H. Ouerdane, C. Goupil, and Ph. Lecoœur, "Irreversibilities and efficiency at maximum power of heat engines: The illustrative case of a thermoelectric generator," *Phys Rev E*, vol. 85, no. 3, p. 031116, Mar. 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.85.031116.
- [17] Tim Hogan, Jonathan D'Angelo, Muhammad Farhan, Muhammad Khan, Nuraddin Matchanov, and Chun-I Wu, "Thermoelectrics." [Online]. Available: <https://www.egr.msu.edu/~hogant/Research%20page.htm>
- [18] A. D. LaLonde, Y. Pei, H. Wang, and G. Jeffrey Snyder, "Lead telluride alloy thermoelectrics," *Materials Today*, vol. 14, no. 11, pp. 526–532, Nov. 2011, doi: 10.1016/S1369-7021(11)70278-4.
- [19] X. Zhang and L.-D. Zhao, "Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity," *Journal of Materiomics*, vol. 1, no. 2, pp. 92–105, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jmat.2015.01.001.
- [20] E. M. Barber, *Thermoelectric materials : advances and applications*. Pan Stanford Publishing, 2015.
- [21] D. Luo *et al.*, "A hybrid transient CFD-thermoelectric numerical model for automobile thermoelectric generator systems," *Appl Energy*, vol. 332, p. 120502, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120502.
- [22] D. Luo, R. Wang, Y. Yan, W. Yu, and W. Zhou, "Transient numerical modelling of a thermoelectric generator system used for automotive exhaust waste heat recovery," *Appl Energy*, vol. 297, p. 117151, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117151.