



Universitatea Tehnică
de Construcții București

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
Facultatea de Inginerie a Instalațiilor
Departamentul de Sisteme Termohidraulice și Protecția Atmosferei
CAMBI - Centrul de cercetare avansată pentru calitate ambientală și fizica
clădirilor

REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

BEJAN ANDREI - STELIAN

STUDIU NUMERIC ȘI EXPERIMENTAL PRIVIND IMPLEMENTAREA
MATERIALELOR CU SCHIMBARE DE FAZĂ ÎN COLECTOARE SOLARE CU
AER

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
CONF. UNIV. DR. ING. CATALINA TIBERIU

BUCUREȘTI
2020

CUPRINS REZUMAT

CUPRINS REZUMAT	2
Capitolul 1 – Introducere.....	3
Capitolul 2 - Studii experimentale privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer.....	6
2.1. <i>Introducere</i>	6
2.2. <i>Descrierea standului experimental și a protocolului de măsură.....</i>	7
2.3. <i>Rezultate experimentale – analiza variațiilor de temperatură și a creșterii de temperatură.....</i>	10
2.4. <i>Rezultate experimentale – analiza puterii termice și a energiei produse de colectorul solar.....</i>	12
2.5. <i>Rezultate experimentale – analiza eficienței transferului termic în perioada de încălzire/încărcare.....</i>	14
2.6. <i>Rezultate experimentale – analiza eficienței colectorului solar în perioada de încălzire/încărcare ..</i>	15
2.7. <i>Rezultate experimentale – analiza coeficientului de performanță (COP) al colectorului solar și a numărului de ore de funcționare</i>	16
2.8. <i>Concluzii și perspective ale studiilor experimentale efectuate</i>	18
Capitolul 3 - Modelarea numerică a colectoarelor solare cu aer cu materiale cu schimbare de fază integrate	19
3.1. <i>Obiectivele studiului numeric și infrastructura utilizată</i>	19
3.2. <i>Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate (placa absorbanta) – primul model numeric realizat</i>	20
3.3. <i>Realizarea unui model numeric pentru colectorul solar cu orificii lobate si materiale cu schimbare de faza integrate – model simplificat.....</i>	23
3.3.1. <i>Realizarea modelului geometric a colectorului de mari dimensiuni.....</i>	23
3.3.2. <i>Crearea grilei de calcul (studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării) .</i>	24
3.3.3. <i>Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația variației temperaturilor în timp</i>	27
3.3.4. <i>Parametrii finali ai modelului numeric și rezultate</i>	29
3.4. <i>Concluzii și perspective ale studiilor numerice efectuate.....</i>	30
Capitolul 4 - Concluzii și perspective ale lucrării - contribuții personale	32
Referințe bibliografice – selecție	36

Capitolul 1 – Introducere

În contextul economic și energetic mondial actual este primordială reducerea consumurilor de energie menținând confortul termic interior. Totodată este imperativă optimizarea consumurilor de energie prin implementarea soluțiilor eficiente ce utilizează sursele regenerabile de energie și prin implementarea de materiale performante, sustenabile. Dintre sursele de energie regenerabile, energia solară dovedește o penetrare a pieței de profil din România, Europa și nu numai, dar și un raport cost-beneficiu din ce în ce mai bun care permite ca sistemele solare (panouri solare, panouri fotovoltaice) să fie cele mai implementate echipamente “verzi” la nivel mondial. Mai puțin studiate și implementate sunt panourile solare cu aer care au avantajul unui cost mai redus de implementare și al eliminării riscului de îngheț. Colectoarele solare cu aer au primit o atenție deosebită în ultimii ani, acestea având potențialul de a reduce consumurile de încălzire și consumurile pentru preîncalzirea aerului proaspăt necesar ocupanților. Ele pot fi implementate în sectorul rezidențial, dar și în sectorul terțiar, cu precădere în aplicații industriale unde pot menține o temperatura de gardă sau pot încălzi aerul interior. Una dintre cele mai mari provocări ale comunității care studiază colectoarele solare cu aer este stocarea energiei și utilizarea ei atunci când radiația solară nu este disponibilă. Materialele cu schimbare de fază sunt materiale care la anumite temperaturi își schimbă starea de agregare din solid în lichid absorbind căldura latentă de schimbare de fază din mediu. Atunci când temperatura scade, efectul este reversibil, iar materialele se solidifică cedând căldură către mediu. Materialele cu schimbare de fază, care stochează deopotrivă energie sensibilă și energie latentă, au potențialul de a acumula de până la 14 ori mai multă energie.

În contextul energetic actual este foarte important să se atingă confortul interior dintr-o clădire cu un consum minim de energie. Acest lucru este posibil doar prin implementarea de sisteme ce utilizează surse regenerabile de energie și materiale performante, precum și prin corelarea de diverse strategii active și pasive [1] care să contribuie la îmbunătățirea anvelopei clădirii, îmbunătățirea metodelor de producere a energiei termice și îmbunătățirea metodelor de stocare a energiei. În același timp este important ca soluțiile implementate să aibă un cost de investiție și exploatare cât mai redus pentru a putea fi utilizate pe scară cât mai largă, iar raportul cost-beneficiu să fie optim.

Materialele cu rol de stocare a energiei termice (sau TES – thermal energy storage) reprezintă una dintre cele mai promițătoare metode de reducere a consumurilor de energie în clădiri prin incorporarea acestora în anvelopa clădirii sau în sisteme active [2]. Acestea au fost de-a lungul timpului integrate în materiale de construcții, tavane suspendate, pereți exteriori sau de compartimentare, sisteme de ventilare, fațade solare [3], colectoare solari, sisteme fotovoltaice, acumulatoare de apă etc. Conform Heier et al. [4] materialele cu rol în stocarea energiei termice ar putea fi utilizate pentru:

- *reducerea consumurilor de energie prin stocarea energiei pe timpul zilei și utilizarea ei pe timpul nopții;*
- *reducerea consumurilor de energie prin stocarea energiei pe timpul verii și utilizarea ei pe timpul iernii;*
- *îmbunătățirea eficienței sistemelor de răcire încălzire și ventilare;*
- *racire nocturnă;*
- *îmbunătățirea confortului termic prin ameliorarea variațiilor interioare de temperatură;*
- *preluarea vârfurilor de sarcină și reducerea necesarului termic.*

Masa termică este capacitatea unui material de a absorbi și stoca energia termică [5]. Cu alte cuvinte, pentru a schimba temperatura unor materiale cu densitate mare (ex: beton, caramida, marmura) este necesară o cantitate foarte mare de energie. La polul opus se afla materialele cu masă termică scăzută (ex: lemn, metal) care au proprietatea de a ceda rapid căldura înglobată. Materialele cu rol de stocare a energiei termice se pot clasifica în funcție de modul de stocare a energiei astfel: stocare de căldură sensibilă, stocare de căldură latentă și stocare de căldură provenită din reacții chimice [6]. Dintre acestea, metodele de stocare a căldurii latente utilizând materiale cu schimbare de fază (PCM – Phase Change Materials) sunt printre cele mai promițătoare deoarece pot stoca de 5-14 ori mai multă energie decât metodele clasice de stocare a energiei [7, 8]. Conform Soares et al. [7], implementarea materialelor cu schimbare de fază ar putea avea următoarele beneficii:

- creșterea confortului termic prin: reducerea numărului de ore de supraîncălzire, modificarea temperaturii suprafețelor și scăderea valorilor vârfurilor de temperatura);
- creșterea performanței anvelopei clădirii (creșterea rezistenței termice, creșterea capacității termice);
- scăderea necesarului de căldură și necesarului de răcire prin preluarea vârfurilor de sarcină și subdimensionarea sistemelor de climatizare;
- reducerea consumurilor de energie pentru răcire și/sau încălzire;
- reducerea costurilor de exploatare și a emisiilor de CO₂;
- îmbunătățirea eficienței sistemelor ce utilizează surse regenerabile de energie.

Sursele regenerabile de energie pot constitui o formă de producere a energiei cu un impact minim asupra mediului și cu un cost de redus de implementare/exploatare. Dintre acestea, sistemele ce utilizează energia solară sunt ușor de implementat și pot deveni accesibile în zone cu potențial solar [9], având o perioadă relativ redusă de amortizare a investiției. Energia solară poate fi colectată prin intermediul colectoarelor solare și poate fi cedată către agentul termic (apă) sau către aer. Colectoare solare cu aer sunt un tip de colectoare solare termice care utilizează radiația solară pentru a preîncălzi aerul introdus într-o clădire [10]. Conform Paya-Marin [10] acestea se montează de regulă pe fațadele clădirilor, pe partea sudică și prezintă un potențial bun în ceea ce privește încălzirea spațiilor, fiind o soluție eficientă din punct de vedere cost-beneficiu. Colectoarele solare termice cu aer se pot clasifica în funcție de tipul constructiv în colectoare solare vitrate, colectoare solare opace sau colectoare solare perforate și pot fi utilizate în diverse aplicații reprezentând o metodă de captare a energiei solare foarte eficientă [11]:

- uscarea fructelor și legumelor;
- ventilarea serelor;
- uscarea materialelor textile;
- păstrarea temperaturilor de gardă în spații industriale;
- încălzirea clădirilor;
- preîncălzirea aerului proaspăt necesar în clădiri.

Conform Navarro et al. [2], materialele cu rol de stocare a energiei termice sunt o strategie ce poate îmbunătăți eficiența sistemelor ce utilizează surse regenerabile de energie și în special în cazul utilizării energiei solare. De asemenea, materialele cu rol de stocare a energiei termice au un potențial urias în special în cazul clădirilor cu inerție termică scăzută și mai ales în cazul clădirilor comerciale și de birouri. Materialele cu rol de masă termică au fost utilizate de mulți cercetători pentru îmbunătățirea eficienței colectoarelor solare termice cu aer, în special în colectoare cu suprafețe vitrate (ex: perete de tip „Trombe”), dar până în prezent, foarte puține studii fac referire la implementarea elementelor inerțiale sau a materialelor cu schimbare de fază în colectoare solari opaci cu perforații [12]. Implementarea materialelor inerțiale în colectoare solare cu aer are potențialul de a:

- crește numărul de ore de funcționare al sistemului
- crește eficiența globală a sistemului prin acumularea de energie pe perioada când radiația solară este disponibilă și cedarea ei pe perioadele când nu există radiație solară (noaptea sau în perioadele înnourate)
- ameliorează variațiile de temperatură la ieșirea din colector
- crește temperatura aerului la ieșirea din colector, pe perioada când radiația solară nu este disponibilă.

Colectoarele solare perforate pot reprezenta o soluție accesibilă, eficientă, având un raport bun cost-beneficiu. Ele pot fi utilizate pe scară largă în sectorul industrial pentru hale de producție sau hale de depozitare, pentru menținerea unei temperaturi minime de gardă, pentru încălzirea clădirilor sau pentru preîncălzirea aerului proaspăt. Alte aplicații unde se pot utiliza colectoarele solare cu aer sunt depozite de fructe și legume sau spații ce necesită dezumidificare. Aceste colectoare sunt implementate deja pe scară largă în Canada sau în nordul Africii fiind totodată și un produs comercial, de serie. Prezentul studiu are rolul de a studia implementarea orificiilor lobate în cadrul plăcilor metalice absorbante ale colectoarelor solare perforate ce au potențialul de a spori transferul termic (conform studiilor anterioare). Aceste perforații sunt studiate pe colectoare noi, de mari dimensiuni, în regim de laborator (permanent), dar și în situații reale de utilizare (în regim tranzitoriu).

Studiul își propune o abordare nouă asupra potențialului de creștere a perioadei de funcționare și a eficienței colectorului prin implementare de materiale cu schimbare de fază ce permit acumularea unei cantități mari de

energia prin acumularea căldurii latente de schimbare de fază, spre deosebire de materialele clasice ce stochează doar căldură sensibilă. În acest mod, adăugarea materialelor inerțiale și a colectoarelor îmbunătățite astfel, se poate realiza și în cadrul construcțiilor existente fără a îngreuna foarte mult structura clădirii. Prezenta lucrare studiază implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare performante, atât dintr-o perspectivă experimentală, cât și din perspectivă numerică.

Primul capitol al lucrării tratează starea actuală a cercetării în domeniul studiat, reprezentând un studiu bibliografic amplu ce analizează atât implementarea materialelor cu schimbare de fază în clădiri și sisteme din clădiri și implementarea colectoarelor solare în clădiri, cât și posibilitatea de combinare a celor două strategii pentru obținerea unui sistem mai eficient, ce permite o perioadă mai mare de funcționare. Acest capitol tratează, pe rând, elementele inerțiale ce pot fi utilizate pentru stocarea energiei termice în clădiri și sisteme din clădiri, precum și tipuri concrete de materiale pentru stocarea energiei termice, implementarea și impactul implementării materialelor inerțiale în clădiri și sisteme din clădiri. Tot în cadrul studiului bibliografic sunt analizate tipurile de materiale cu schimbare de fază ce pot fi integrate în clădiri și sisteme din clădiri, proprietățile acestora, criteriile de selecție, date despre temperatura de schimbare de fază a materialelor, durata lor de viață, precum și metodele experimentale și numerice aplicate în literatură pentru studiul acestora. În partea a doua a studiului bibliografic sunt analizate colectoarele solare cu aer și sunt evidențiate, pe rând: tipurile și geometriile studiate până în prezent, domeniile de utilizare, principiile de funcționare, parametrii de funcționare, precum și performanțele acestora și caracteristicile tehnice. Conform studiului bibliografic se va putea observa faptul că materialele cu schimbare de fază au fost implementate cu succes în colectoare solare cu apă sau colectoare solare opace de tip perete „Trombe”, însă nu au fost implementate până în prezent în colectoarele solare cu aer. De asemenea, nu s-au identificat în literatura de specialitate studii referitoare la implementarea materialelor cu schimbare de fază pentru stocarea energiei în colectoare solare perforate utilizate ca perete exterior în anvelopa clădirii. Din acest motiv a fost dificilă sintetizarea capitolului ce studiază integrarea celor două sisteme, iar materialele cu schimbare de fază și colectoarele solare cu aer au fost analizate exhaustiv.

Al doilea capitol prezintă studiile experimentale efectuate în cadrul studiilor doctorale. Pentru realizarea colectorului solar cu aer de mari dimensiuni, ce poate fi implementat în aplicații reale, se vor efectua mai multe studii experimentale preliminare pentru înțelegerea modului de funcționare a materialelor cu schimbare de fază și a modalității optime de poziționare a acestora în cavitatea de aer. Primul studiu experimental efectuat se referă la analiza experimentală a proceselor de topire și solidificare pentru un material cu schimbare de fază organic macroîncapsulat într-o cavitate rectangulară de aluminiu. Acest studiu va analiza posibilitatea de integrare a parafinei în bare metalice rectangulare și modalitatea optimă de poziționare a acestora în interiorul cavității de aer a colectorului solar. Apoi barele vor fi integrate într-un colector solar de mici dimensiuni studiat în prealabil în cadrul Facultății de Inginerie a Instalațiilor pentru testarea lor, analiză ce face subiectul celui de-al doilea studiu experimental prezentat. Acesta va stabili poziționarea optimă a recipientelor rectangulare și va optimiza metodologia de realizare a studiilor experimentale. Al treilea studiu experimental realizat este reprezentat de analiza implementării materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare de mari dimensiuni cu perforații lobate (cazul 1 studiat). Materialele cu schimbare de fază au fost montate în mijlocul cavității de aer a colectorului formând astfel o baterie de stocare a energiei termice. Recipientele rectangulare au spații între ele, de asemenea cadrul metalic pe care s-au montat recipientele formează spații care permit circulația aerului în părțile laterale, precum și în partea inferioară și partea superioară a colectorului. Curgerea neregulată, stratificarea termică neobișnuită au determinat realizarea celui de-al patrulea studiu experimental privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer (cazul 2 studiat). În acest caz, materialele sunt amplasate la mijlocul colectorului formând astfel o șicană ce ghidează curgerea aerului prin întregul colector solar. Acest colector se va dovedi ca fiind varianta finală adoptată, cu diferențe de eficiență față de cazul 1 studiat.

Al treilea capitol prezintă modelarea numerică colectoarelor solare cu aer cu materiale cu schimbare de fază integrate. Datorită complexității modelului s-au realizat două studii complementare. Primul studiu numeric se referă la modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate ale colectorului care studiază impactul orificiilor lobate asupra curgerii aerului. Datele de ieșire ale acestui studiu, prezintă datele de intrare în cazul celui de-al doilea studiu numeric care se referă la realizarea modelului numeric simplificat pentru colectorul solar cu orificii lobate și

materiale cu schimbare de fază de mari dimensiuni. Cele două modele numerice realizate vor fi validate și vor sta la baza studiilor parametrice de optimizare a prototipului de colector solar propus în prezenta lucrare.

Capitolul 2 - Studii experimentale privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer

2.1. Introducere

Prezenta lucrare studiază implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer perforate, colectoare de mari dimensiuni ce pot fi implementate în aplicații reale. Totuși, pentru a putea realiza colectorul final au fost necesare o serie de acțiuni și studii preliminare de optimizare. Studiile experimentale au început prin calibrarea senzorilor de temperatură utilizați în cadrul standurilor experimentale. Prima etapă din cadrul studiilor experimentale este reprezentată de analiza experimentală a proceselor de topire și solidificare pentru un material cu schimbare de fază anorganic macroîncapsulat într-o cavitate rectangulară de aluminiu. Acest studiu are drept scop stabilirea soluției optime de încapsulare a materialelor cu schimbare de fază, stabilirea soluției optime de amplasare a recipientelor rectangulară de aluminiu în cadrul colectoarelor și înțelegerea fenomenelor ce au loc în interiorul acestora.

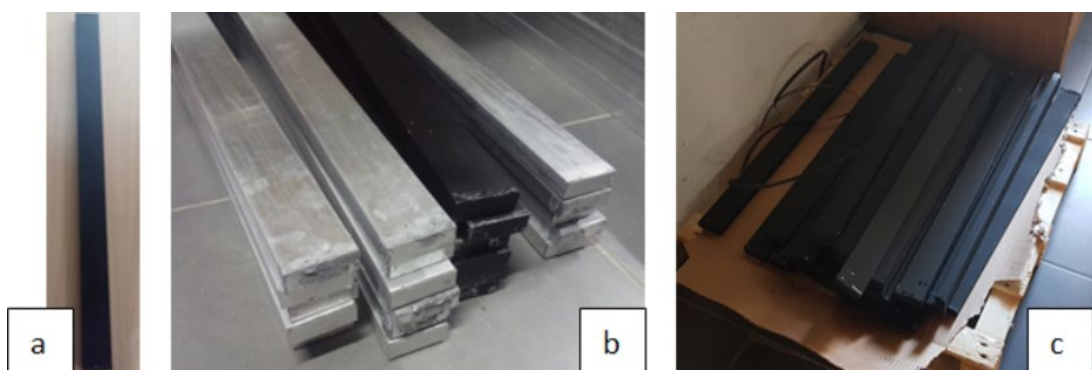


Figura 1. Recipientele cu PCM utilizate (a – recipient cu PCM vopsit; b – recipiente înainte de vopsire; c – recipiente după vopsire)

Concluziile principale ale acestui studiu au evidențiat faptul că recipientele rectangulară de aluminiu nou construite (Figura 1) cu materiale cu schimbare de fază încorporate (de tip parafină RT35), reprezintă soluția optimă de macroîncapsulare, ocupând în totalitate spațiul destinat amplasării acestora, iar poziționarea verticală în cadrul colectorului este cea optimă, datorită schimbului de căldură îmbunătățit. Proprietățile materialului cu schimbare de fază utilizat sunt prezentate în Tabelul 1 și Figura 2, temperatura de topire fiind aleasă conform literaturii studiate, în jurul valorii de 35°C. Fiecare bară de aluminiu (800x60x20mm) conține 0.7l PCM atunci când acesta se află în stare lichidă, respectiv 0,54kg PCM.

Tabelul 1. Proprietățile materialelor cu schimbare de fază utilizate – RT35 [13]

<i>Caracteristica</i>	<i>Valoare</i>	<i>Unitate</i>
Interval topire	29-36	°C
Interval solidificare	36-31	°C
Capacitate de stocare a caldurii (26-41°C) ±7,5%	160	kJ/kg
	45	Wh/kg
Caldura specifică	2	kJ/kgK
Densitate solid (la 15°C)	0.86	kg/l
Densitate lichid (la 45°C)	0.77	kg/l
Conductivitate termică	0.2	W/mK
Creșterea volumului	12.5	%
Temperatura maximă de operare	65	°C

Durată de viață	nelimitată	-
-----------------	------------	---

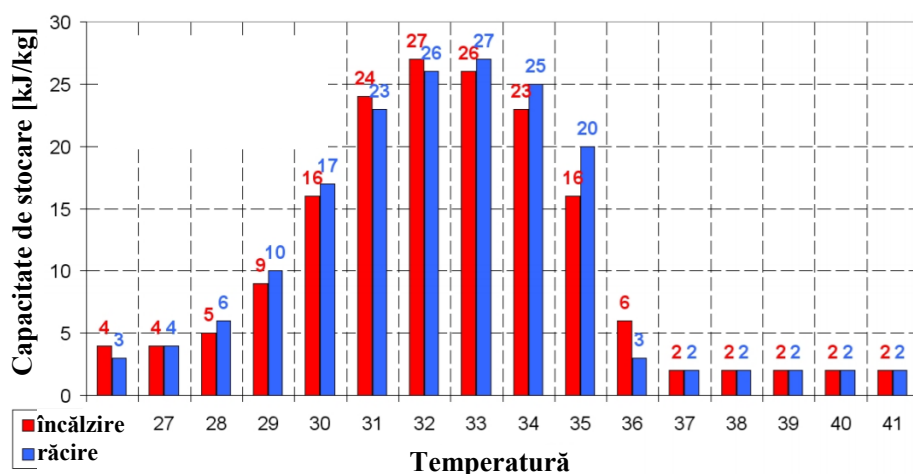


Figura 2. Variația capacității de stocare a PCM-ului organic RT35 tip parafină [13]

A doua etapă din cadrul studiilor experimentale este reprezentată de testarea recipientelor rectangulare cu PCM în cadrul unor colectoare solare perforate de mici dimensiuni studiate în prealabil în cadrul Facultății de Inginerie a Instalațiilor și amplasarea acestora pe peretele posterior al colectorului. Acest studiu preliminar are drept scop identificarea poziției optime și testarea posibilității de implementare în colectoare solare de mari dimensiuni. Rezultatele acestui studiu au arătat faptul că implementarea materialelor cu schimbare de fază au potențialul de a mări numărul de ore de funcționare a colectorului, acumulând energie pe perioada când radiația solară este disponibilă. De asemenea, acest studiu a demonstrat faptul că sunt necesare perioade mai mari de timp pentru studiile experimentale, respectiv este necesară amplasarea bateriei de PCM în centrul cavității de aer pentru sporirea transferului termic.

După testarea recipientelor în colectoarele de mici dimensiuni urmează studiul implementării materialelor cu schimbare de fază în colectoarele de mari dimensiuni, în situația în care acestea sunt amplasate pe un cadru metalic în mijlocul cavității de aer, formând o baterie de stocare a energiei termice (cazul 1, prima formă constructivă studiată). În acest caz, barele rectangulare de aluminiu au spații între ele ce favorizează transferul termic, mai mult, cadrul metalic pe care sunt amplasate acestea formează spații ce favorizează trecerea aerului, dar și o stratificare termică și o distribuție a presiunilor datorată amplasării ventilatorului în partea superioară a colectorului. Rezultatele acestui studiu preliminar au demonstrat faptul că poziționarea materialelor cu schimbare de fază sub forma unei baterii de stocare, în care barele rectangulare de aluminiu au spații între ele, nu este o poziționare optimă datorită stratificării termice la interior și a diferențelor de presiune pe verticală. Poziționarea barelor cu PCM determină pierderi de presiune ce favorizează un transfer termic deficitar, cauzat și de amplasarea ventilatorului la partea superioară a colectorului. Acest studiu a dus la a patra etapă a studiilor experimentale ce studiază colectorul solar de mari dimensiuni cu materiale cu schimbare de fază integrate în recipientele rectangulare de aluminiu ce formează o șicană în interiorul cavității de aer, forțând curgerea aerului în interiorul acestuia. Acesta este colectorul solar final, optimizat ce face subiectul prezentei lucrări și pe baza căruia s-au realizat studiile numerice, iar construcția lui, standului experimental, protocolul de măsură și rezultatele obținute sunt prezentate în continuare.

2.2. Descrierea standului experimental și a protocolului de măsură

În Figura 3 este evidențiată geometria colectoarelor solare construite cu dimensiunile aferente și componentele acestora. Colectorul solar este compus dintr-o placă metalică absorbantă cu perforații lobate prin care aerul exterior este aspirat într-o cavitate rectangulară cu pereți alcătuiți din mai multe straturi, respectiv: OSB la interior, izolație termică (4cm) și OSB la exterior. Golul de aer astfel creat la interiorul colectorului are următoarele dimensiuni: 2000x1020x280 mm. Aerul colectat în cavitatea formată este colectat la partea superioară a sistemului printr-un gol cu dimensiunile 830x150mm, iar apoi este introdus într-o camera de amestec izolată termic, de unde este mai departe evacuat prin intermediul unui ventilator cu turație variabilă Ebmapast (printr-o gura cu diametrul de

180mm). În interior colectorului solar a fost montat un cadru metalic mobil, reprezentând suportul de susținere al recipientelor rectangulare de aluminiu cu materiale cu schimbare de fază înglobate. Acesta va ajuta la studiul poziționării optime a materialelor inerțiale, în interiorul cavității.

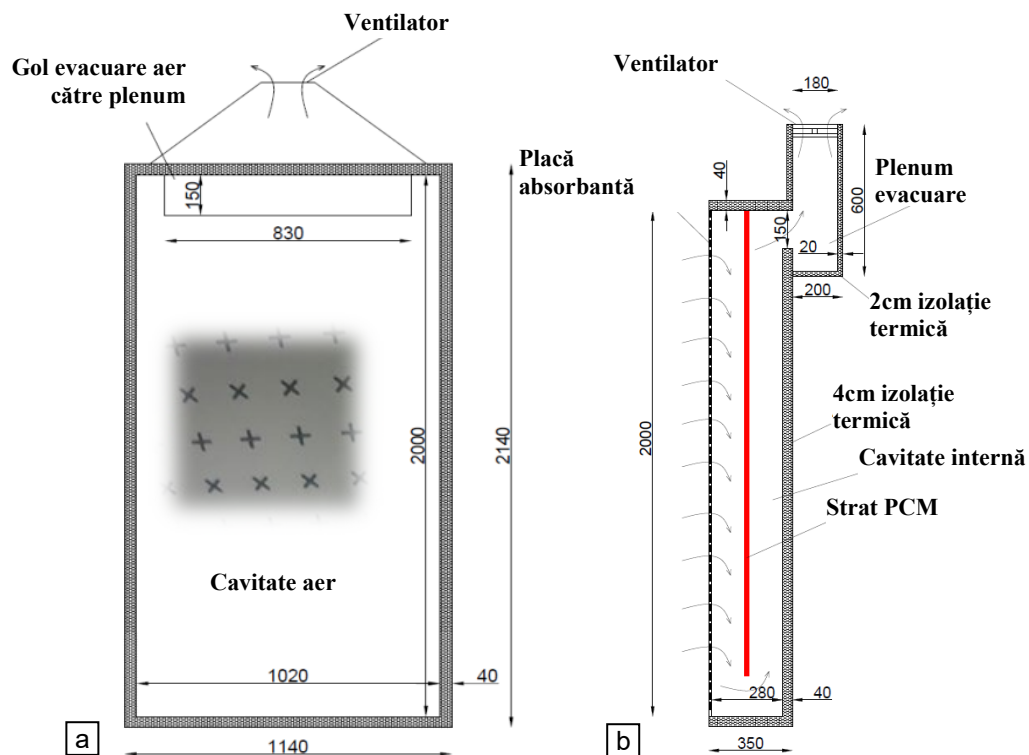


Figura 3. Geometria noului colector solar final propus, cu stratul de PCM sub formă de șicană – cazul 2: secțiune longitudinală (a) și secțiune transversală în care se poate observa șicana de PCM (b)

După aspirația aerului prin orificiile lobate și cedarea căldurii de la placa absorbantă, aerul intră în cavitate și urmează o traiectorie descendentă datorită șicanei cu materiale cu schimbare de fază. Șicana este alcătuită din recipiente rectangulare de aluminiu lipite între ele, cu materiale cu schimbare de fază RT35 macroîncapsulate. Barele utilizate în cadrul studiului precedent au fost lipite între ele, iar spațiile au fost umplute cu polistiren extrudat, fiind păstrate aceleași condiții ca în cazul precedent, precum și aceeași cantitate de materiale cu schimbare de fază. Geometria orificiilor lobate este prezentată în Figura 3a. Pasul dintre orificii este de 20mm (interax), pe fiecare placă fiind aproximativ 5000 de orificii lobate (100x50), acestea fiind amplasate alternativ: '+', 'x', '+', 'x' etc.. Ambele tipuri de orificii, atât cele lobate, cât și cele circulare, au aceeași suprafață (19.635mm^2) și același diametru echivalent de 5mm. În Figura 4 este detaliat colectorul solar cu orificii lobate, iar în mijlocul cavității se poate observa ansamblul mobil pentru PCM.

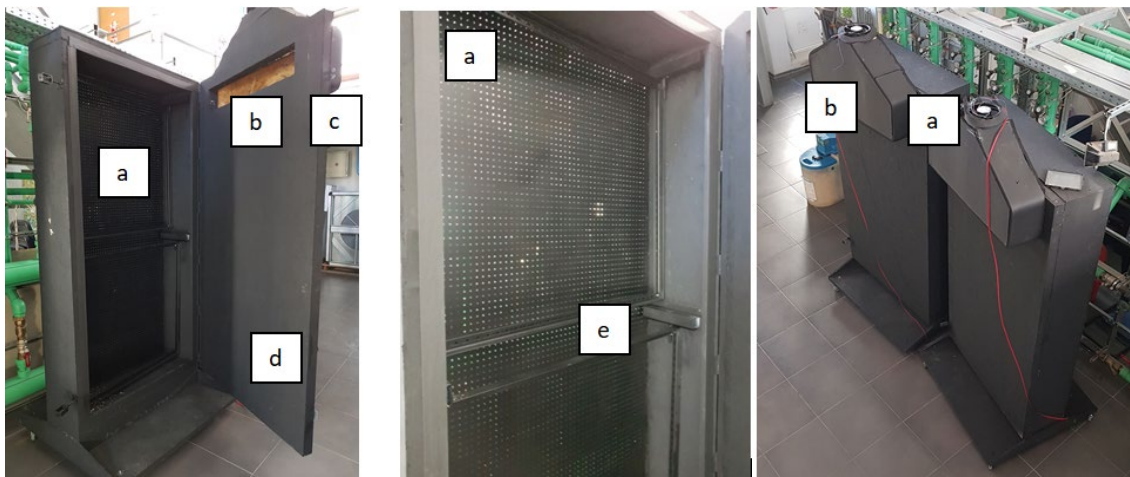


Figura 4. Stand experimental colectoare solare perforate (studiu în regim permanent) – geometria colectorului solar

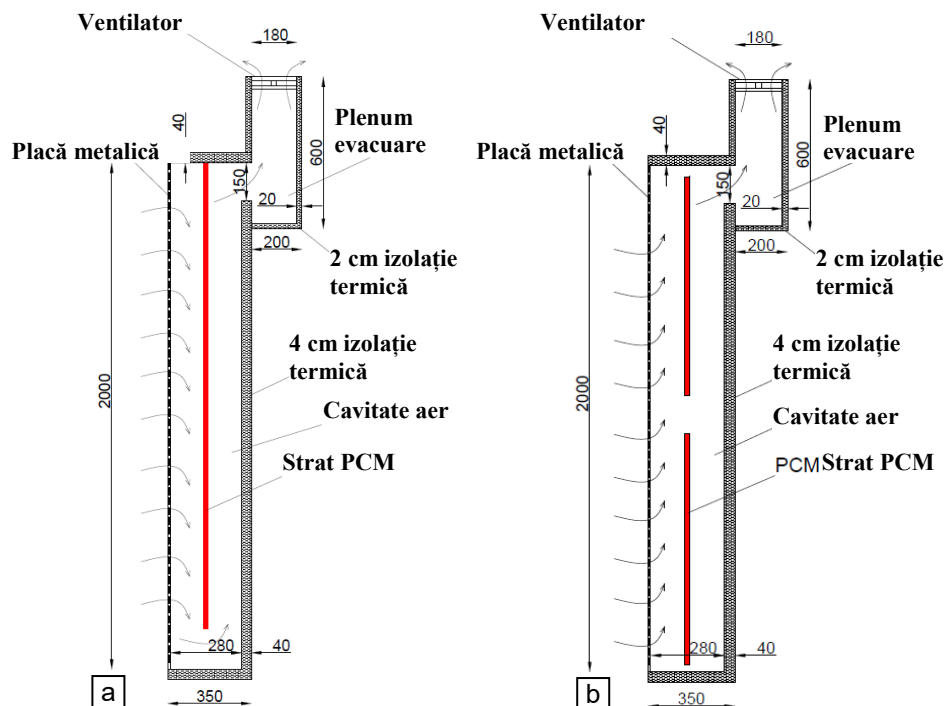


Figura 5. Secțiune transversală cu amplasarea materialelor cu schimbare de fază în interiorul noului colector solar final propus – cazul 2 (a) vs. primul colector solar studiat – cazul 1 (b)

În Figura 5 și Figura 6 se pot observa diferențele dintre cazul precedent (cazul 1) în care barele de aluminiu cu PCM erau poziționate pe cadrele mobile ale colectorului la mijlocul cavității de aer, formând două zone, dar și câteva spații care favorizau o distribuție neuniformă a debitului de aer și o stratificare termică defavorabilă. Noul colector solar (Figura 5a și Figura 6a) prezintă o șicană continuă de materiale cu schimbare de fază ce ghidează curgerea aerului, asigurând ‘spălarea’ întregii suprafețe de schimb de căldură dintre aer și PCM, precum și o transfer termic superior.

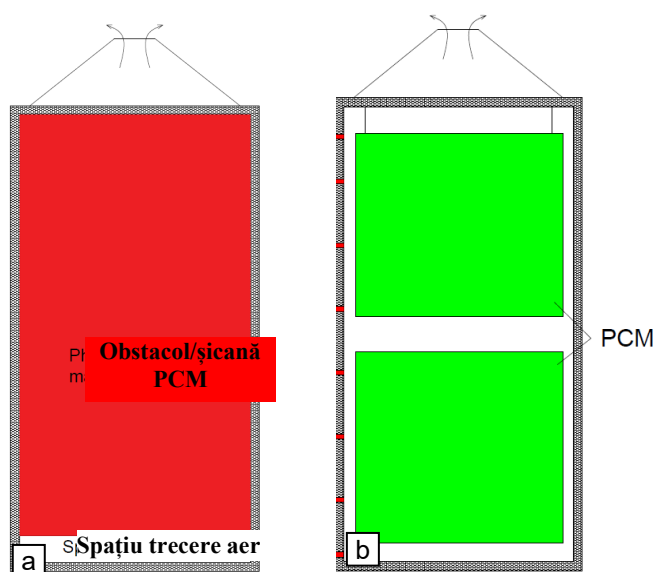


Figura 6. Secțiune longitudinală cu amplasarea materialelor cu schimbare de fază în interiorul noului colector solar final propus – cazul 2 (a) vs. primul colector solar studiat – cazul 1 (b)

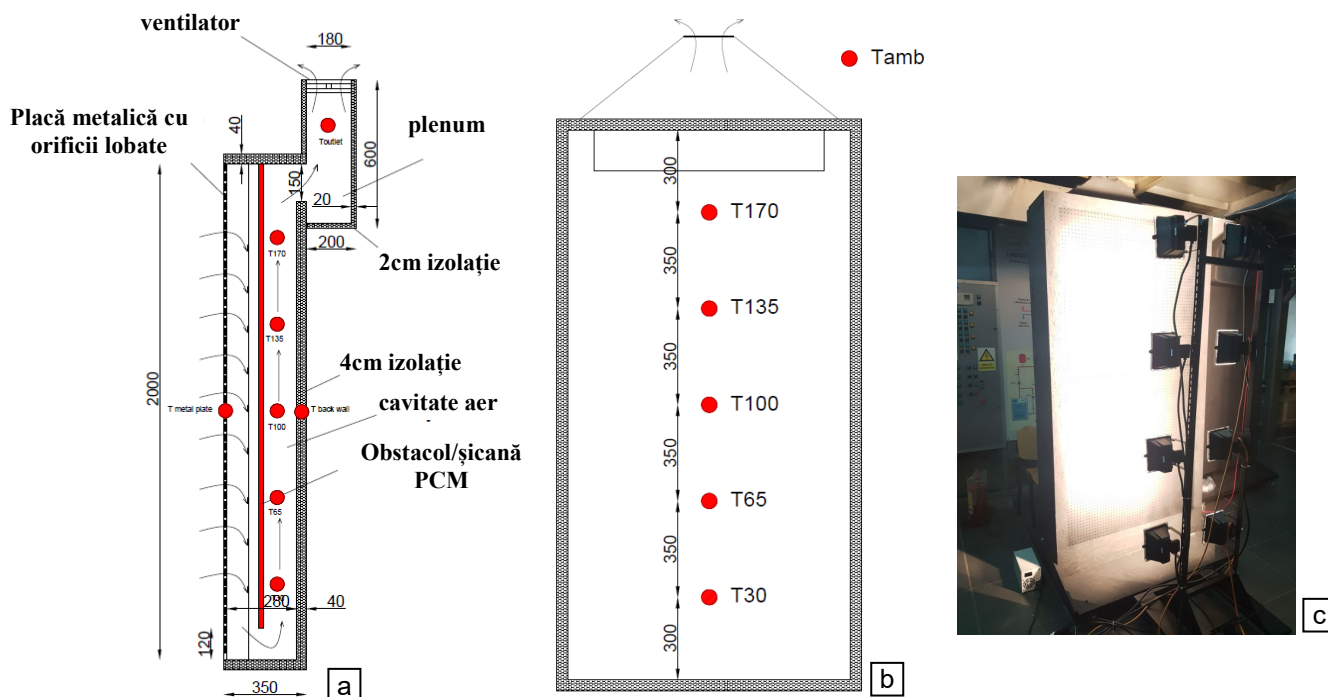


Figura 7. Schema stand experimental - amplasarea senzorilor de temperatură în noul colector studiat – cazul 2; a – secțiune transversală, b – secțiune longitudinală, c – stand experimental propriu-zis

Pentru măsurarea temperaturilor s-au utilizat 9 senzori de temperatură (termocuple de tip K, $\pm 0.2^\circ\text{C}$), iar poziționarea lor este evidențiată în Figura 7:

- un senzor pentru măsurarea temperaturilor pe placa metalică absorbantă (*T metal plate*)
- un senzor pentru măsurarea temperaturii pe peretele posterior al colectorului (*T back wall*)
- cinci senzori ce măsoară stratificarea termică în cavitatea de aer (*T30, T65, T100, T135 și T170*) amplasați în cea de-a doua cavitate de aer nou formată
- un senzor pentru măsurarea temperaturii aerului evacuat din colector (*Toutlet*)
- un senzor pentru măsurarea temperaturii ambientale (*T amb*).

În plus, pentru realizarea studiilor numerice ce fac subiectul următorului capitol au mai fost montați doi senzori ce măsoară temperatura aerului la 5cm de placa absorbantă, în prima cavitate de aer, și un senzor de măsură temperatura pe suprafața barelor (reflectând temperatura materialului). Măsurătorile au fost realizate la interval de timp de un minut, iar datele au fost înregistrate cu ajutorul unui data logger ALMEMO 710. Pentru simularea radiației solare s-au utilizat 8 proiectoare cu halogen de 500W amplasate la 0.8m distanță de placa absorbantă pentru o distribuție uniformă a temperaturii (conform literaturii ele vor simula o radiație solară de aproximativ 800W/m^2). Debitul de aer vehiculat de ventilatorul Ebmpapst alimentat din sursa de curent continuu RXN-602D este de $400\text{ m}^3/\text{h}$, respectiv $200\text{ m}^3/\text{h/m}^2$ de colector. Măsurătorile au fost efectuate timp de 1200 minute (20 de ore). Lămpile au fost pornite în minutul 25 pentru a simula radiația solară, respectiv etapa de încălzire/încărcare a materialelor cu schimbare de fază și au fost oprite după aproximativ 370 minute (în minutul 395) pentru a simula perioada de răcire/descărcare a materialelor cu schimbare de fază, atunci când radiația solară nu mai este disponibilă. Perioada de descărcare are loc timp de 805 minute, până în minutul 1200 când măsurătorile au fost oprite. Asemenea cazului precedent, la interior sunt amplasate 28 de bare rectangulare de aluminiu ce totalizează aproximativ 19.6l PCM atunci când materialul este în fază lichidă, respectiv aproximativ 15.1kg PCM.

2.3. Rezultate experimentale – analiza variațiilor de temperatură și a creșterii de temperatură

În urma studiilor experimentale efectuate s-au putut constata câteva aspecte foarte interesante. În Figura 8 se pot observa variațiile de temperatură pentru cinci puncte pentru cazul colectorului cu orificii lobate, fără PCM: temperatura de ieșire din colector (*Toutlet*), temperatura în mijlocul colectorului (*T 100 middle*), temperatura

peretelui posterior a colectorului ($T_{\text{back wall}}$), temperatura plăcii absorbante ($T_{\text{metal plate}}$) și temperatura aerului ambiant (T_{ambient}). La o temperatură ambiantă de 24.5°C (minutul 390), temperatura aerului evacuat este de 34.7°C , rezultând o creștere de temperatură de 10.2°C . Diferența de temperatură astfel obținută în cazul 2 (cu șicană) este mai mare cu 9.7% față de cazul 1 în care stratul de PCM este sub forma unei baterii de stocare.

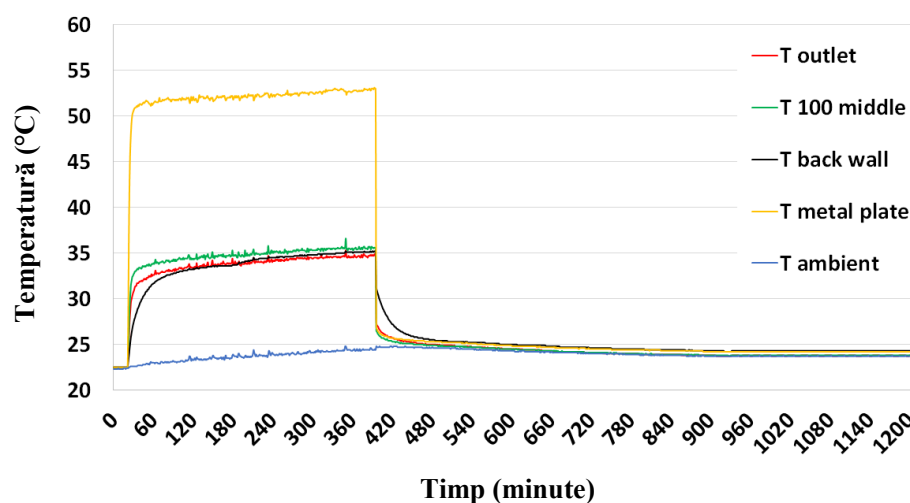


Figura 8. Colectorul solar cu orificii lobate fără PCM, valori de temperatură obținute în 5 puncte de referință – cazul 2

Se poate observa că temperatura la ieșirea din colector are valori apropiate de temperatura aerului în mijlocul acestuia și temperatura peretelui posterior al colectorului, fapt care se poate datora transferului termic ce se realizează preponderent în prima cavitate de aer formată între placa absorbantă și șicană. După oprirea lămpilor, valorile celor cinci temperaturi măsurate se egalizează rapid, doar temperatura peretelui posterior are un defazaj de aproximativ 140 de minute, constituind o mică masă termică.

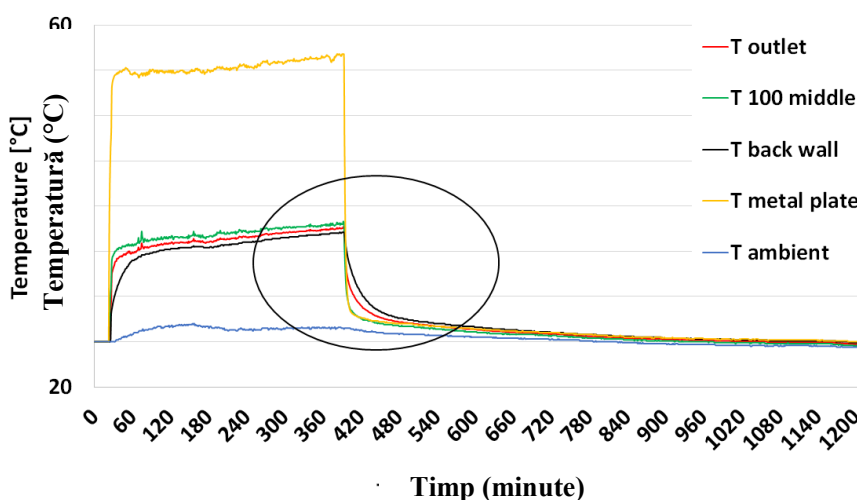


Figura 9. Colectorul solar cu orificii lobate cu PCM, valori de temperatură obținute în 5 puncte de referință – cazul 2

În Figura 9 se pot observa variațiile de temperatură pentru aceleași cinci puncte pentru cazul colectorului cu orificii lobate, cu PCM în șicana din interiorul cavității. La o temperatură ambiantă de 26.5°C (minutul 390), temperatura aerului evacuat este de 37.6°C , rezultând o creștere de temperatură de 11.1°C . Diferența de temperatură astfel obținută în cazul 2 (cu șicană) este mai mare cu 7.8% față de cazul 1. În același timp, temperatura măsurată pe placa absorbantă este de 56.8°C , temperatura pe peretele posterior este de 37.1°C , iar temperatura în mijlocul colectorului este 38°C . Se poate observa că temperatura la ieșirea din colector are valori mai scăzute decât temperatura în mijlocul cavității mai ales în prima parte a măsurătorilor, atunci când materialele cu schimbare de fază din partea superioară a colectorului acumulează energia latentă, însă ulterior cele două valori se egalizează

treptat. După oprirea proiectoarelor, energia este cedată lent către aerul vehiculat în interiorul colectorului. Spre deosebire de cazul 1, o parte din energia acumulată în PCM este cedată plăcii metalice absorbante datorită vehiculării aerului prin prima cavitate de aer formată. De asemenea, o parte din energia acumulată de PCM este cedată peretelui posterior. Mai mult, energia acumulată pe perioada când radiația solară este disponibilă este cedată lent aerului vehiculat prin colector atunci când radiația solară nu este disponibilă.

În continuare cea mai importantă analiză în cazul studiului unui colector solar cu aer este studiul creșterii de temperatură determinat de utilizarea colectorului. În Figura 10 este prezentată variația diferenței de temperatură dintre aerul evacuat din colector și aerul ambiant în ambele cazuri, cu și fără PCM integrate. Impactul materialelor cu schimbare de fază este evident prin acumularea energiei în perioada de încălzire în care radiația solară este disponibilă și cedarea acesteia în perioada de răcire în care lămpile cu halogen sunt oprite. Se poate observa că în cazul colectorului fără PCM variația este relativ liniară începând cu minutul 80 și atinge un maxim de 10.2°C (mai mare față de cazul 1 studiat anterior). În schimb, în cazul colectorului solar cu PCM, dacă la început această variație are valori mai mici decât în cazul fără PCM (intervalul 60-240 minute) datorită topirii materialelor cu schimbare de fază și acumulării de energie, după minutul 240 diferența de temperatură este mai mare și atinge un maxim de 11.1°C, respectiv cu 8.8% mai mult față de cazul fără PCM (valoare mai mare față de cazul 1 studiat anterior). Fenomenul de topire al materialelor este evident timp de 180 de minute. Mai mult decât atât, colectorul solar cu șicană are o creștere de temperatură mai mare față de cazul 1 al colectorului cu două zone de PCM și cu spații între barele de aluminiu, în ambele situații: cu (7.8%) și fără PCM (9.7%). După ce radiația solară este oprită, temperatura aerului evacuat din colectorul solar fără PCM atinge rapid valoarea temperaturii aerului ambiant (după aproximativ 70 de minute), în timp ce, în cazul utilizării PCM, temperatura aerului evacuat este mai mare timp de 800 de minute, până la egalizarea temperaturilor la sfârșitul măsurătorilor. După oprirea lămpilor, temperatura aerului evacuat din colectorul cu PCM este mai mare decât temperatura aerului ambiant cu până la 1.1°C, atingând valori mai mari chiar și cu 2.4°C (în special la începutul procesului de răcire). Se poate observa că energia acumulată de materialele cu schimbare de fază este cedată mai lent în cazul colectorului cu șicană față de cazul precedent, datorită reducerii suprafeței de schimb de căldură și datorită faptului că schimbul de căldură se va produce preponderent în prima cavitate de aer.

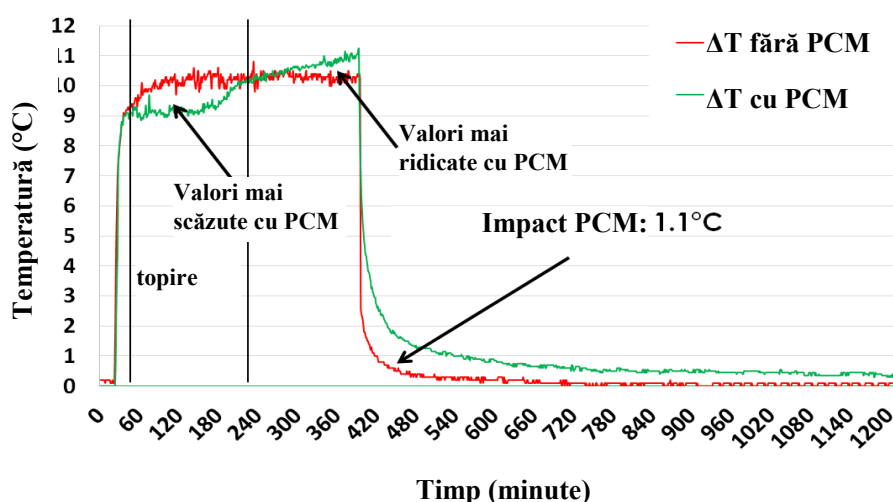


Figura 10. Diferența de temperatură dintre aerul evacuat din colector (T_{outlet}) și aerul ambiant ce intră în colector (T_{amb}) – cazul 2

2.4. Rezultate experimentale – analiza puterii termice și a energiei produse de colectorul solar

În continuare se va analiza variația capacității de încălzire a celor două colectoare solare și a energiei termice produse de acestea. Capacitatea de încălzire $Q[W]$ și energia termică produsă de colectorul solar $E[Wh]$ se pot calcula cu ajutorul următoarelor formule :

$$Q = D \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T [W]$$

$$\Delta T = T_{\text{outlet}} - T_{\text{ambient}} [^{\circ}\text{C}]$$

$$E = Q \cdot t [\text{Wh}]$$

, unde:

D = debitul de aer al colectorului solar [m^3/h]

ρ = densitatea aerului = 1.2 kg/m^3

c_p = căldura specifică a aerului = $1.013 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$

ΔT = diferența de temperatură dintre aerul evacuat din colector (T_{outlet}) și aerul ambiental (T_{ambient})

t = durata de timp [s].

În Figura 11 este prezentată variația capacității termice de încălzire (puterea termică) a celor doua colectoare solare pe perioada desfășurării măsurărilor experimentale. Puterea termică maximă a colectorului solar fără PCM este de 1458.7 W (în minutul 324), respectiv 1.46 kW , în timp ce colectorul solar cu PCM atinge un maxim de 1519.5 W (în minutul 394), respectiv 1.52 kW , cu 4.1% mai mult. Așa cum se poate observa, vârful este atins mai rapid în cazul colectorului fără PCM datorită lipsei de inerție termică. Puterea specifică maximă a colectorului solar fără PCM este de 729.4 W/m^2 (0.73 kW/m^2), în timp ce în cazul colectorului cu PCM, aceasta atinge o valoare sensibil mai mare, respectiv 759.8 W/m^2 (0.76 kW/m^2).

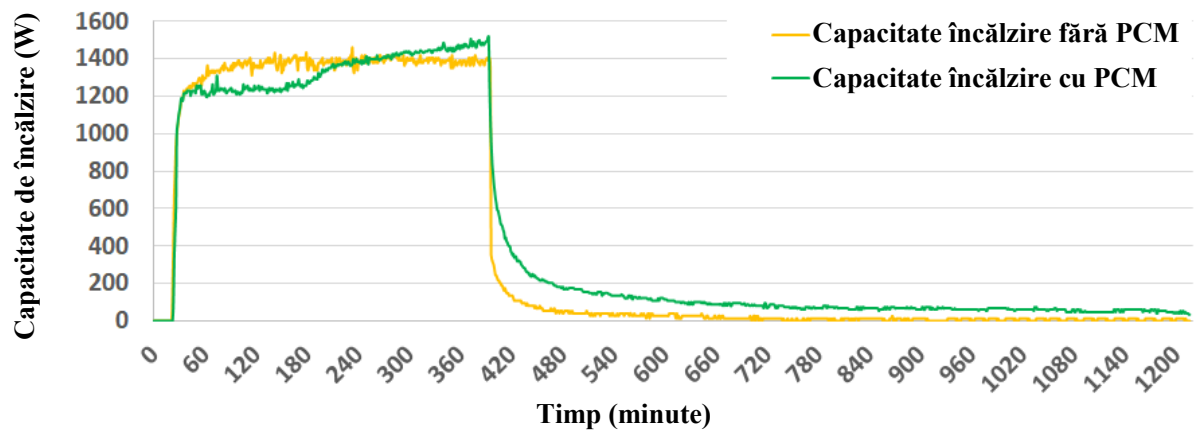


Figura 11. Variația capacității termice de încălzire a colectorului solar cu și fără PMC

Puterea de încălzire specifică (Q_{spec}) a fiecarui colector solar poate fi calculată cu relația:

$$Q_{\text{spec}} = Q/S [\text{W/m}^2]$$

, unde:

Q = puterea de încălzire a colectorului [W]

S = suprafața plăcii absorbante a colectorului solar [m^2].

Pe perioada de încălzire/încărcare, puterea medie a colectorului solar cu PCM este de 1.32 kW (0.66 kW/m^2), sensibil mai scăzută față de colectorul solar fără PCM care atinge o valoare de 1.36 kW (0.68 kW/m^2), fapt care se datorează acumulării de energie în materialele cu schimbare de fază. Pe perioada de răcire/descărcare, puterea medie a colectorului solar cu PCM este de 117 W (58.5 W/m^2), de aproape 4.7 ori mai mare față de colectorul solar fără PCM care atinge o valoare de 25 W (12.5 W/m^2), fapt care se datorează cedării de energie a materialelor cu schimbare de fază către aerul vehiculat prin colectorul solar. Se poate observa de asemenea, că în perioada de încălzire/încărcare energia este acumulată mai rapid (topirea este evidentă între minutul 60 și minutul 240), în timp ce procesul de solidificare se produce mai lent, pe întreaga etapă de răcire/descărcare, cu o perioadă în care procesul este mai intens (între minutul 400 și minutul 660).

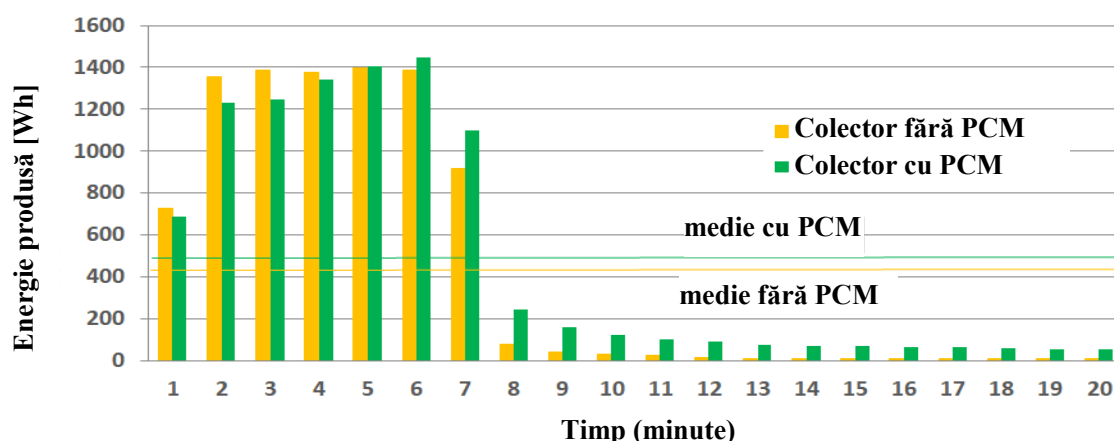


Figura 12. Cantitate de energie produsă în fiecare ora cu și fără PCM

În Figura 12 este prezentată cantitatea de energie termică produsă de cele două colectoare solare cu și fără PCM în fiecare oră de funcționare pe perioada efectuării măsurărilor experimentale. Se poate observa că în cazul utilizării PCM colectorul solar produce un maxim de 1.445kWh într-o oră de funcționare (a 6-a oră de funcționare), în timp ce colectorul fără PCM produce un maxim de 1.397kWh (a 5-a oră de funcționare). Colectorul solar cu PCM produce în medie 484Wh în fiecare oră de funcționare, pe parcursul studiilor experimentale, în timp ce colector solar fără PCM produce în medie 440Wh. În perioada de încălzire/încărcare cantitatea de energie produsă de colectorul solar este asemănătoare în ambele cazuri, diferențele apărând în prima parte a studiilor experimentale atunci când materialele cu schimbare de fază își schimbă starea de agregare. În schimb, în perioada de răcire/descărcare a energiei, cantitatea de energie produsă de colectorul solar cu PCM este de până la 9 ori mai mare în anumite ore. În etapa de încălzire colectorul solar cu PCM produce 7.4kWh, mai puțin decât colectorul solar fără PCM care produce 7.6kWh. În etapa de răcire colectorul solar cu PCM produce 2,3kWh, de două ori mai mult decât colectorul solar fără PCM care produce 1.2kWh. Analizând comparativ pe toată perioada de desfășurare a studiilor experimentale cele două colectoare cu și fără PCM, cantitatea totală de energie produsă de colectorul fără PCM este de 8.8kWh (4.4kWh/m²), în timp ce colectorul solar cu PCM produce 9.7kWh (4.85kWh/m²), respectiv cu 10.2% mai multă energie în cele 20 de ore de funcționare. Acest fapt poate fi explicat prin faptul că recipientele cu materiale cu schimbare de fază captează mai multă energie din radiația solară ce pătrunde prin orificiile lobate ale plăcii metalice absorbante, transferul termic fiind astfel îmbunătățit. Energia specifică produsă (E_{spec}) de fiecare colector solar poate fi calculată cu relația:

$$E_{spec} = E/S [Wh/m^2]$$

2.5. Rezultate experimentale – analiza eficienței transferului termic în perioada de încălzire/încărcare

Conform literaturii studiate, pe lângă analiza diferenței de temperatură dintre aerul evacuat din colector și cel ambiant, analiza capacității sale de încălzire și analiză energiei produse de acesta este important să analiză eficiența transferului termic pe perioada de încălzire (ϵ), atunci când radiația solară este disponibilă (lămpile sunt pornite). Eficiența transferului termic poate fi calculată ca raport între diferența dintre temperatura aerului la ieșirea din colector și temperatura ambiantă, respectiv diferența dintre temperatura medie pe placa metalică absorbantă și temperatura ambiantă și poate fi calculată cu următoarea formulă:

$$\epsilon = (T_{outlet} - T_{ambient}) / (T_{metal\ plate} - T_{ambient}) [\%]$$

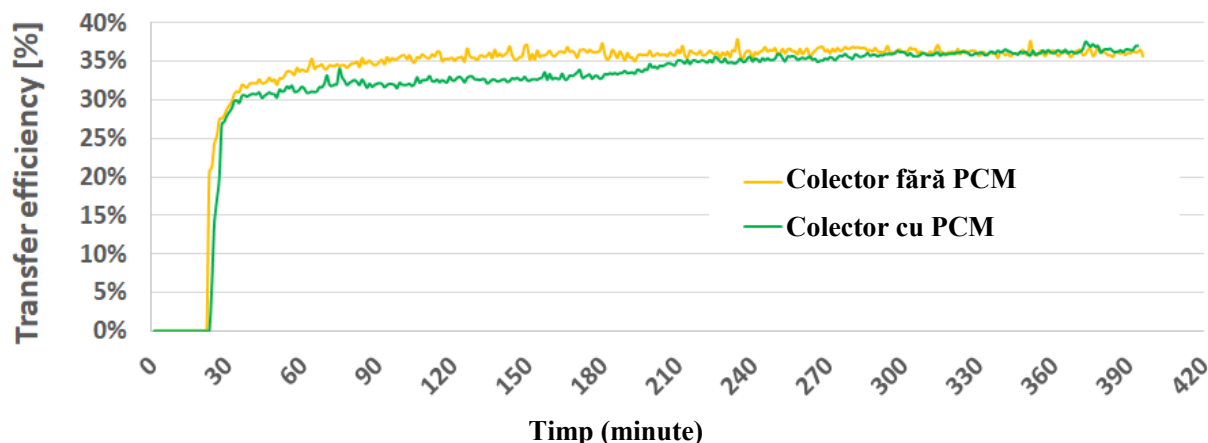


Figura 13. Eficiența transferului termic cu și fără PCM

Variația eficienței transferului termic pentru cele două colectoare este prezentată în Figura 13. Se poate observa faptul că eficiența transferului termic în cazul colectorului solar cu PCM are constant valori mai mici față de cazul colectorului fără PCM. Eficiența medie a colectorului cu PCM este de 34.11%, în timp ce eficiența medie a colectorului fără PCM este de 35.6%. Acest aspect se poate datora faptului că o parte din cantitatea de energie absorbită de placa metalică absorbantă este cedată prin fenomenul de radiație către șicana cu materiale cu schimbare de fază integrate în recipientele rectangulare de aluminiu, eficiența transferului termic ținând cont doar de temperatura plăcii cu perforații lobate. Acest fenomen este vizibil în special în prima parte a etapei de încălzire/încărcare între minutul 30 și minutul 210 în care se produce topirea PCM. Ulterior acestui minut, eficiența transferului se egalizează, colectorul solar cu PCM atingând valoarea maximă de 37.54%, în timp ce colectorul solar fără PCM atinge valoarea maximă de 37.89%. Pe perioada de răcire/descărcare, eficiența transferului termic nu poate fi evaluată întrucât temperatura plăcii absorbante este relativ egală cu temperatura aerului ambiental. Eficiența globală a colectorului va putea fi estimată prin analiza coeficientului de performanță a colectorului solar (COP).

2.6. Rezultate experimentale – analiza eficienței colectorului solar în perioada de încălzire/încărcare

Conform literaturii studiate, pe lângă analiza diferenței de temperatură dintre aerul evacuat din colector și cel ambiant, analiza capacității sale de încălzire, analiză energiei produse de acesta și analiza eficienței transferului termic pe perioada de încălzire, un alt factor important ce trebuie analizat este eficiența colectorului solar (η). Eficiența unui colector solar depinde de capacitatea sa de încălzire (P , calculată anterior), suprafața plăcii absorbante (S) și radiația solară incidentă pe placa metalică și se poate calcula cu următoarea formulă:

$$\eta = P / S \cdot I_r [\%]$$

, unde:

I_r = radiația solară [W/m^2].

Eficiența colectorului [%]

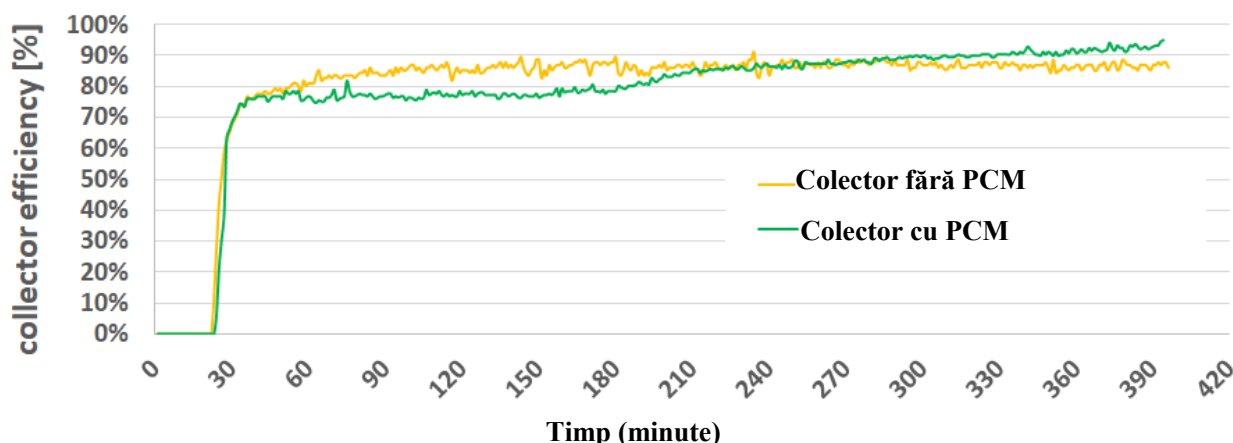


Figura 14. Eficiența colectorului solar cu și fără PCM

În Figura 14 este prezentată variația eficienței colectoarelor solar cu și fără materiale cu schimbare de fază integrate. Variația este similară cu variația diferenței de temperatură dintre aerul evacuat din colector și aerul ambiental, întrucât toți ceilalți termeni implicați au valori constante: debit de aer, caldura specifică, densitate, suprafață de schimb sau radiație solară. Se poate observa că eficiența colectorului solar cu PCM este mai scăzută în prima parte a procesului de încălzire/încărcare datorită acumulării de căldură latentă în materialul cu schimbare de fază, iar după topirea materialului eficiența acestuia este superioară datorită transferului termic îmbunătățit (stratul de PCM captează radiația solară prin orificiile lobate ale plăcii metalice absorbante și acumulează căldură sensibilă atunci când se află în stare lichidă). Eficiența maximă a colectorului cu PCM este de 94.97%, în timp ce eficiența maximă a colectorului fără PCM este de 91.17%. Totuși, eficiența medie a colectorului solar cu PCM este mai scăzută pe perioada de încălzire/încărcare datorită materialelor cu schimbare de fază care acumulează energie: 83.59%, spre deosebire de 85.54% în cazul fără PCM. Conform literaturii studiate, lămpile cu halogen amplasate conform standului experimental prezentat pot genera echivalentul unei valori ale radiației solare de 800W/m^2 . Totuși, această valoare este estimativă, iar studiul eficienței colectorului solar necesită aprofundare în studiile post-doctorale ce vor fi desfășurate ulterior. Pe perioada de răcire/descărcare, eficiența colectorului solar nu poate fi evaluată întrucât lămpile cu halogen sunt oprite simulând astfel perioada în care radiația solară nu este disponibilă. Eficiența globală a colectorului va putea fi estimată corespunzător prin analiza coeficientului de performanță a colectorului solar (COP).

2.7. Rezultate experimentale – analiza coeficientului de performanță (COP) al colectorului solar și a numărului de ore de funcționare

Deoarece eficiența globală a transferului termic și eficiența globală a colectoarelor solare nu poate fi evaluată pentru toată perioada studiată, inclusiv pentru etapa de răcire/descărcare, deoarece valoarea radiației solare este nulă, iar temperatura plăcii absorbante este relativ egală cu temperatura aerului ambiental, este necesară introducerea unui nou termen pentru evaluarea eficienței globale a celor două colectoare solare.

Poole et al. [14] menționează în lucrarea sa termenul de coeficient de performanță al colectorului solar (COP) calculat similar ca în cazul pompelor de căldură, ca raport între energia termică produsă de colectorul solar (E) și energia electrică consumată de ventilatorul utilizat pentru vehicularea aerului (E_{vent}) sau ca raport între puterea termică de încălzire a colectorului și puterea electrică a ventilatorului ($P_{\text{vent}}=67\text{W}$). Formula de calcul a coeficientului de performanță a colectorului solar este prezentată mai jos:

$$COP = E/E_{\text{vent}} = P/P_{\text{vent}}$$

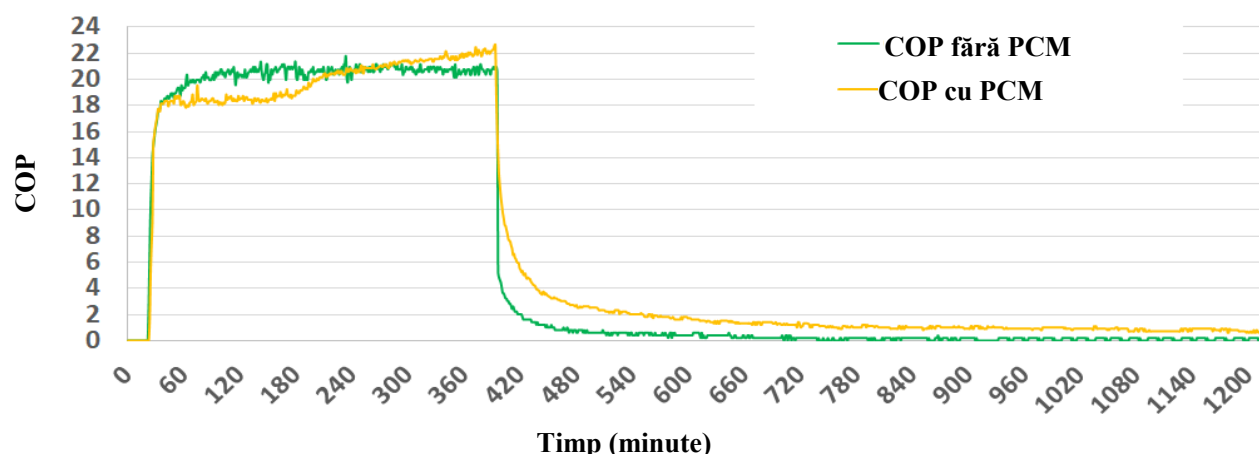


Figura 15. Variația COP-ului colectoarelor solare cu și fără PCM

În Figura 15 este prezentată variația COP-ului pentru cele două colectoare solare cu și fără PCM, evoluția acestor valori fiind similară cu evoluția diferențelor de temperatură dintre aerul evacuat din colector și aerul ambiental. COP-ul maxim în cazul colectorului solar cu PCM este de 22.7, în timp ce COP-ul maxim al colectorului fără PCM este de 21.77. Datorită prezenței materialelor cu schimbare de fază, pe perioada de încălzire/încărcare, colectorul cu PCM are un COP mediu sensibil mai scăzut față de colectorul solar fără PCM: 19.7, față de 20.3. În mod evident, pe perioada de răcire/descărcare, colectorul cu PCM are un COP mediu de 4 ori mai mare față de colectorul solar fără PCM: 1.7, față de 0.4. Atunci când valoarea COP-ului colectorului solar scade sub valoarea 1, încălzirea cu ajutorul unei baterii electrice devine mai avantajoasă din punct de vedere economic. Așadar, începând cu minutul 457 colectorul solar fără PCM ar trebui să fie oprit, în timp ce colectorul solar cu PCM ar trebui să fie oprit începând cu minutul 937, atunci când COP-ul devine subunitar, deși acesta mai poate furniza energie termică (încă aproximativ 0.3kWh).

În Figura 16 este prezentată valoarea medie a COP-ului în fiecare oră de funcționare. Se poate observa ca COP-ul colectorului cu PCM este mai scăzut în prima parte a studiului, deoarece materialele cu schimbare de fază acumulează energie, în timp ce după oprirea radiației solare, COP-ul este considerabil mai mare în favoarea colectorului cu PCM.

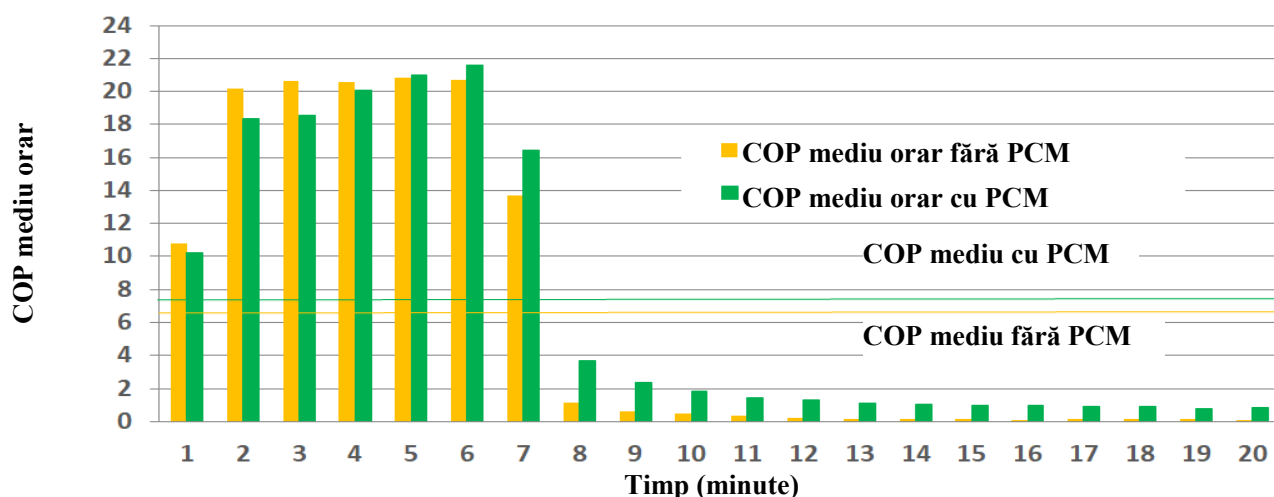


Figura 16. COP-ul mediu orar al colectoarelor solare cu și fără PCM

COP-ul mediu al colectorului solar fără materiale cu schimbare de fază înglobate este de 6.6, în timp ce COP-ul mediu al colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază înglobate este de 7.3, respectiv cu 10.6% mai mare. Putem deci concluziona faptul ca eficiența globală a colectorului solar este cu 10.6% mai mare în cazul colectorului cu PCM.

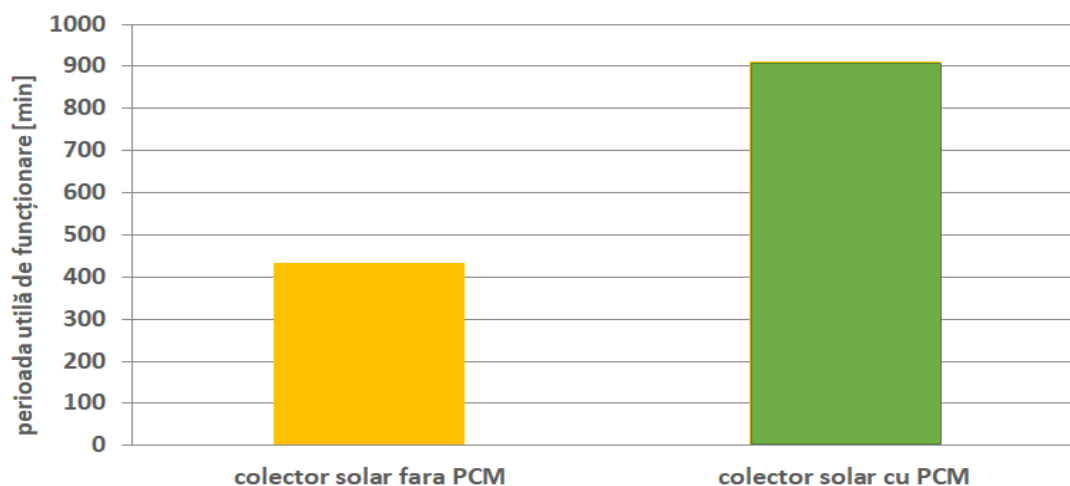


Figura 17. Perioada utilă de funcționare a colectoarelor solare cu și fără PCM

În perioada de încălzire/încărcare energia este acumulată mai rapid (topirea este evidentă între minutul 60 și minutul 240), în timp ce procesul de solidificare se produce mai lent, pe întreaga etapă de răcire/descărcare, cu o perioadă în care procesul este mai intens (între minutul 400 și minutul 660). Așadar, încărcarea se produce rapid fiind susținută de radiația solară, în timp ce descărcarea energiei se face lent și necesită metode de îmbunătățire a transferului termic.

Perioada utilă de funcționare a colectorului solar poate fi definită ca intervalul de timp în care coeficientul de performanță al colectorului este supraunitar, fiind mai eficient decât încălzirea electrică clasică. În Figura 17 este prezentată perioada utilă de funcționare pentru cele două colectoare solare. În cazul colectorului solar fără PCM, COP-ul are o valoare supraunitară începând cu minutul 23 și până în minutul 457, rezultând 434 minute de funcționare. Spre deosebire de colectorul clasic, colectorul solar cu PCM prezintă o valoare supraunitară a COP-ului începând cu minutul 23 și până în minutul 937, rezultând 913 minute de funcționare. Analizând aceste aspecte putem concluziona faptul că în situația utilizării PCM, colectorul solar are o perioadă utilă de funcționare mai mare cu 110% față de colectorul fără PCM, respectiv acesta funcționează cu 480 minute mai mult, în același interval de timp studiat.

Am observat așadar, că în urma studiului în regim permanent, colectorul solar perforat cu materiale cu schimbare de fază integrate are potențialul de a crește eficiența globală a sistemului, de a crește numărul de ore de funcționare și diferența de temperatură dintre aerul ambiental aspirat și cel evacuat. Pentru a analiza ameliorarea variațiilor de temperatură și pentru a analiza impactul real a colectoarelor este necesar studiul colectoarelor în regim tranzitoriu.

2.8. Concluzii și perspective ale studiilor experimentale efectuate

După studiul recipientelor de aluminiu cu materiale cu schimbare de fază macroîncapsulate, studiul preliminar în colectoare de mici dimensiuni și primul studiu realizat pe colectoare de mari dimensiuni în care stratul de PCM forma o baterie de stocare în mijlocul cavității de aer, am decis îmbunătățirea colectorului, rezultând forma sa finală ce sta la baza prezentei lucrări și a studiilor numerice următoare. Prezentul capitol studiază implementarea materialelor cu schimbare de fază sub forma unei șicane ce ghidează curgerea aerului în interiorul colectorului solar. În urma studiilor experimentale realizate s-au putut concluziona următoarele:

- diferența de temperatură dintre aerul ambiental și cel evacuat din colectorul fără PCM este de maxim 10.2 °C (cu 9.7% mai mult față de cazul colectorului fără șicană)
- temperatura maximă a aerului evacuat din colectorul solar fără PCM este de 34.7 °C
- diferența de temperatură dintre aerul ambiental și cel evacuat din colectorul cu PCM este de maxim 11.1 °C (cu 7.8% mai mult față de cazul colectorului fără șicană)
- temperatura maximă a aerului evacuat din colectorul solar cu PCM este de 37.6 °C
- diferența maximă de temperatură dintre aerul ambiental și cel evacuat este mai mare în cazul cu PCM cu 8.8%

- COP-ul maxim în cazul colectorului solar cu PCM este de 22.7, în timp ce COP-ul maxim al colectorului fără PCM este de 21.77
- datorită prezenței materialelor cu schimbare de fază, pe perioada de încălzire/încărcare, colectorul cu PCM are un COP mediu sensibil mai scăzut față de colectorul solar fără PCM: 19.7, față de 20.3. În mod evident, pe perioada de răcire/descărcare, colectorul cu PCM are un COP mediu de 4 ori mai mare față de colectorul solar fără PCM: 1.7, față de 0.4
- atunci când valoarea COP-ului colectorului solar scade sub valoarea 1, încălzirea cu ajutorul unei baterii electrice devine mai avantajoasă din punct de vedere economic. Așadar, începând cu minutul 457 colectorul solar fără PCM ar trebui să fie oprit, în timp ce colectorul solar cu PCM ar trebui să fie oprit începând cu minutul 937, atunci când COP-ul devine subunitar, deși acesta mai poate furniza energie termică
- COP-ul colectorului cu PCM este mai scăzut în prima parte a studiului, deoarece materialele cu schimbare de fază acumulează energie, în timp ce după oprirea radiației solare, COP-ul este considerabil mai mare în favoarea colectorului cu PCM
- COP-ul mediu al colectorului solar fără materiale cu schimbare de fază înglobate este de 6.6, în timp ce COP-ul mediu al colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază înglobate este de 7.3, respectiv cu 10.6% mai mare
- eficiența globală a colectorului solar este cu 10.6% mai mare în cazul colectorului cu PCM
- în perioada de încălzire/încărcare energia este acumulată mai rapid (topirea este evidentă între minutul 60 și minutul 240), în timp ce procesul de solidificare se produce mai lent, pe întreaga etapă de răcire/descărcare, cu o perioadă în care procesul este mai intens (între minutul 400 și minutul 660)
- perioada utilă de funcționare (atunci când COP-ul este supraunitar) a colectorului solar fără PCM este de 434 de minute, în timp ce în cazul colectorului cu PCM aceasta este de 937 de minute, rezultând o perioadă de funcționare mai mare cu 110% (479 minute mai mult).

Ținând cont de concluziile prezentului studiu putem concluziona că implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare poate crește eficiența globală a sistemului, numărul de ore de funcționare și chiar diferența de temperatură dintre aerul ambiant și cel evacuat. Mai mult decât atât, în cadrul studiului în regim tranzitoriu, s-a putut observa o ameliorare a variațiilor de temperatură la ieșirea de colector, amplitudinea variațiilor de temperatură fiind mai scăzută în cazul cu PCM. Acest colector poate fi implementat în diferite situații: preîncălzirea aerului, încălzirea spațiilor, uscarea aerului, preîncălzirea aerului ce intră apoi într-un recuperator de căldură și poate fi implementat în diferite aplicații: sectorul rezidențial, hale industriale, hale de depozitare, hale de producție etc., așa cum s-a putut observa în aplicațiile prezentate în cadrul studiului bibliografic. În continuare sunt necesare studii experimentale aprofundate, pe perioade mai lungi de timp și amplasarea mai multor senzori care să analizeze variațiile de temperatură în prima cavitate de aer. De asemenea este necesar studiul colectoarelor solare în regim tranzitoriu în condiții reale de funcționare și condiții climatice diferite pe perioade mai lungi de timp (minim un an de funcționare). Toate aceste studii vor face subiectul studiilor post-doctorale. De asemenea, în cadrul studiilor următoare este necesară realizarea unui studiu parametric complex care să studieze:

- vehicularea unor debite variabile de aer
- tipuri diferite de materiale cu schimbare de fază pentru mai multe aplicații
- amplasarea optimă a șicanei la interior
- diferite forme constructive ale colectoarelor și recipientelor cu materiale cu schimbare de fază
- impactul orificiilor plăcii absorbante asupra colectorului.

Capitolul 3 - Modelarea numerică a colectoarelor solare cu aer cu materiale cu schimbare de fază integrate

3.1. Obiectivele studiului numeric și infrastructura utilizată

Conform literaturii studiate, pentru studiul numeric al colectoarelor solare perforate, respectiv pentru studiul integrării materialelor cu schimbare de fază în sisteme active sau pasive, foarte multi cercetători au utilizat ANSYS Fluent, software CFD (Computational Fluid Dynamics).

Foarte multi cercetători și-au îndreptat atenția către studii experimentale privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în clădiri [15-23]. Totuși, pentru a alege tipul de material cu schimbare de fază pentru o aplicație specifică într-o clădire sunt necesare studii numerice [24], datorită complexității fenomenelor ce apar în procesul de topire/solidificare. Problema care apare se datorează caracterului nelinier al fenomenelor și faptului ca cele două faze, solid și lichid, au diferite proprietăți termofizice [25].

Așadar, conform celor prezentate anterior, pentru studiul colectoarelor solare cu aer cu materiale cu schimbare de fază integrate ce face subiectul prezentei teze de doctorat se va utiliza soft-ul de simulare numerică CFD ANSYS Fluent. Soft-urile de tip CFD au la baza ecuațiile fundamentale ce guvernează dinamica fluidelor: ecuația de continuitate, ecuația conservării energiei și ecuația conservării impulsului. Ecuațiile Navier-Stokes rezultate nu se pot rezolva analitic, iar soft-urile CFD încearcă găsirea unei soluții aproximative prin metode de discretizare spațială ce transformă ecuațiile cu derivate parțiale în ecuații algebrice (calculul se realizează iterativ).

Etapele unei simulări numerice CFD ce au fost parcurse sunt următoarele:

- *Realizarea modelului geometric*
- *Crearea grilei de calcul – studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării*
- *Impunerea condițiilor la limită și configurarea cazului numeric*
- *Validarea modelului numeric prin compararea rezultatelor numerice cu cele experimentale*
- *Calculul soluției și postprocesarea*

Conform studiului bibliografic realizat implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer perforate nu a fost studiată până în prezent. Scopul studiului numeric este de a realiza un model numeric care să simuleze fidel curgerea aerului prin colectorul solar cu PCM și fenomenele de transfer ce au loc la interiorul acestuia. În acest sens, realizarea modelului numeric presupune două etape:

- *Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate (placa absorbantă)*
- *Realizarea modelului numeric al colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate.*

În subcapitolele următoare sunt tratate cele două etape prezentate mai sus. Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate are drept scop surprinderea corectă a fenomenelor ce au loc la curgerea aerului prin acestea și analiza impactului geometriei orificiilor asupra colectorului. Simularea colectorului solar la dimensiunile sale reale ar presupune un timp de calcul foarte mare datorită unei grile de discretizare foarte mare, un timp care ar fi practic nefezabil pentru finalizarea studiilor. Profilele și câmpurile de temperatură și viteză obținute în urma primului studiu vor fi integrate în modelul numeric al colectorului solar cu PCM.

Pentru realizarea studiului numeric a fost utilizat soft-ul de simulare numerică CFD ANSYS Fluent 15.0 și toate componentele acestuia: ANSYS DesignModeler, ANSYS Workbench și ANSYS Mesher. Pentru prelucrarea datelor s-a utilizat Tecplot 360, Notepad și Microsoft Excel, iar pentru realizarea funcțiilor de variație în regim tranzitoriu a anumitor parametri s-a utilizat limbajul de programare C++ (compilatorul ANSYS Fluent este MS Visual Studio C++). De asemenea au fost utilizate două stații de calcul din dotarea Facultății de Inginerie a Instalațiilor.

3.2. Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate (placa absorbanta) – primul model numeric realizat

Pentru a putea realiza modelarea numerică a colectorului solar cu perforații lobate cu materiale cu schimbare de fază integrate într-o perioadă de timp fezabilă am simplificat pe cât posibil geometria plăcii absorbante ce face parte din colectorul solar plecând de la premisa simetriei fenomenelor de transfer și a câmpurilor de viteze. Așa cum se poate observa din literatură, forma orificiilor influențează considerabil eficiența colectorului solar [26, 27], poate

îmbunătățește transferul termic și poate determina o temperatură mai mare a aerului din cavitatea colectorului. Forma neconvențională lobată a orificiilor plăcii absorbante este o formă ce determină curgeri complexe îmbunătățind transferul termic și conform literaturii este geometria ce ajută la obținerea celor mai mari diferențe de temperatură între aerul aspirat și aerul evacuat. Dispunerea orificiilor în varianta prezentată în Figura 18 este, de asemenea, cea mai eficientă soluție în cazul debitelor mari de aer. Având în vedere aceste argumente, am decis să țin cont de efectul perforațiilor asupra curgerii și eficienței colectorului solar. Mai mult, aceasta abordare va putea crea în viitor premisa unor studii de influență a orificiilor asupra materialelor cu schimbare de fază.

În Figura 18 se poate observa dispunerea și geometria orificiilor lobate. Acestea sunt dispuse alternativ pe orizontală (plus, stea, plus, stea, plus ș.a.m.d.) la pas de 20 mm și au diametrul echivalent de 5mm.

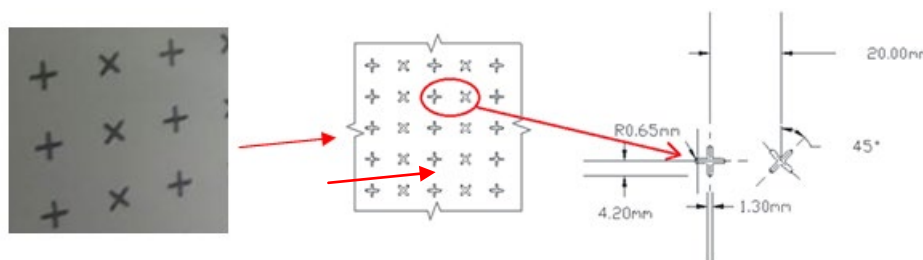


Figura 18. Dispunerea și dimensiunile orificiilor lobate cu diametrul echivalent de 5mm

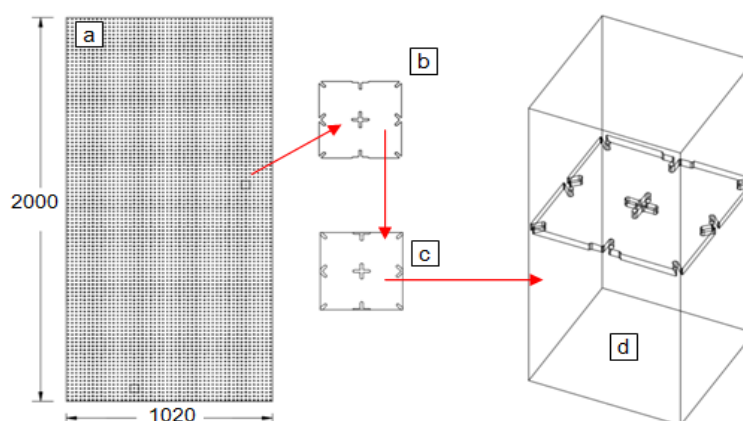


Figura 19. Realizarea modelului 3D în AutoCAD: a – placa absorbantă cu orificii lobate, b – extragerea unei porțiuni din placă de 4x4cm, c – încadrarea în domeniul de calcul, d – domeniul de calcul 3D (placa încadrată într-un paralelipiped)

Așa cum se poate observa în Figura 19a, placa absorbantă cu o suprafață aproximativă de 2m^2 și o grosime de 2mm prezintă un număr foarte mare de orificii lobate pe întreaga sa arie (5000 de orificii). Modelarea întregii plăci absorbante cu orificii lobate ar presupune o discretizare spațială complexă, respectiv un număr foarte mare de celule în grila de calcul pentru a putea surprinde cu precizie fenomenele ce au loc în apropierea orificiilor. Acest lucru ar determina o perioadă foarte mare de timp pentru realizarea studiilor numerice. Ținând cont de simetria curgerii și a fenomenelor de transfer am selectat pentru studiu o placă metalică de 4x4cm ce cuprinde 4 orificii echivalente (Figura 19b). Placa de 4x4cm a fost apoi încadrată într-un paralelipiped de 9.2x4x4cm ce va constitui aerul vehiculat în domeniul de calcul ținând cont de direcția de curgere (Figura 19c și Figura 19d). Astfel, în amonte placa este poziționată la 4cm de limita domeniului de calcul, iar în aval placa este poziționată la 5cm de limita domeniului de calcul, respectiv 10 diametre echivalente (10De). Din studiile experimentale efectuate în cadrul Facultății de Inginerie a Instalațiilor am observat că după 10De curgerea se uniformizează în cazul orificiilor lobate. Câmpurile de viteze astfel obținute la distanța de 5cm de placa metalică vor fi apoi introduse în modelul numeric simplificat al colectorului solar de mari dimensiuni. În Figura 20 se poate observa geometria și domeniul de calcul aferente primului studiu numeric.

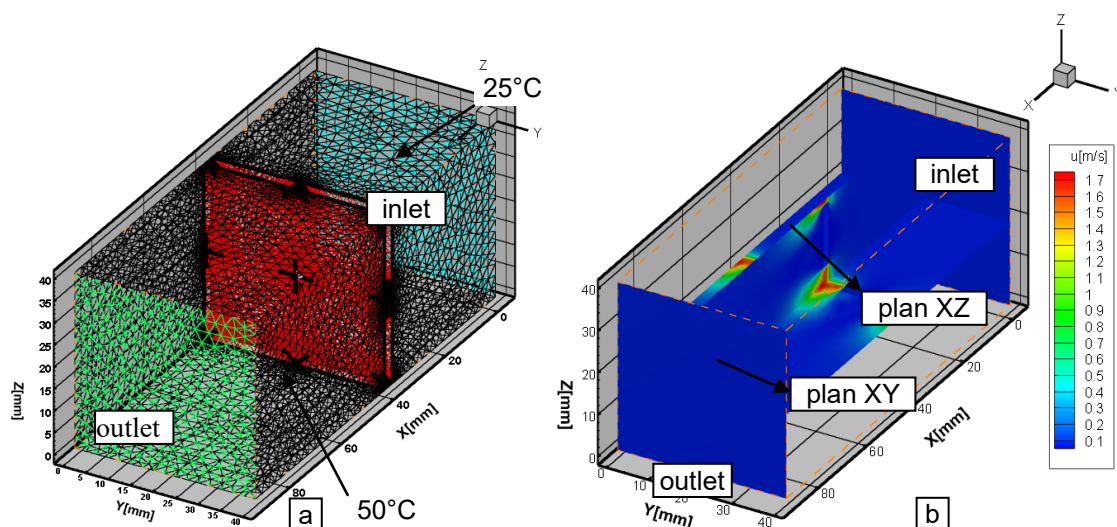


Figura 20. Geometria și domeniul de calcul

Conform studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării a rezultat o geometrie cu 5.3 milioane de elemente tetraedrale ce nu influențează rezultatele simulărilor numerice, fiind o soluție stabilă (Figura 21).

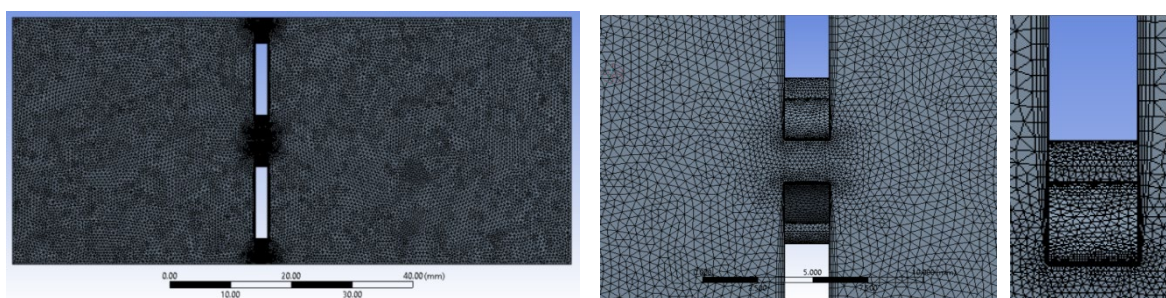


Figura 21. Grila de discretizare cu 5.3 milioane de elemente tetraedrale

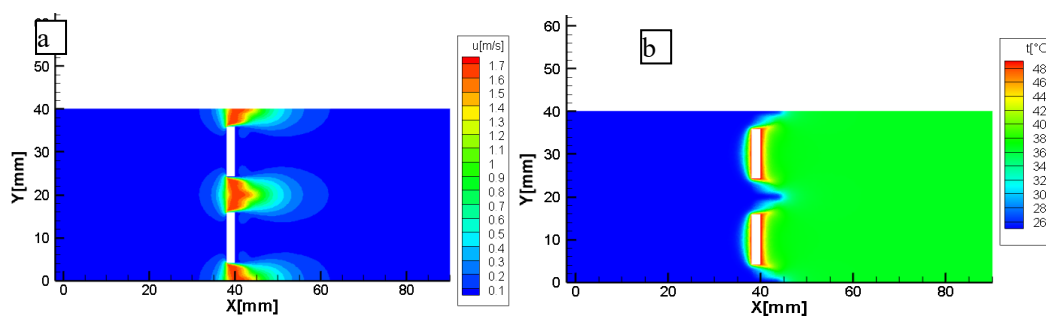


Figura 22. Câmpuri de viteză (a) și temperatură (b) rezultate în plan longitudinal XY

Am ales de asemenea modelul de transfer de energie ce ține cont de ecuația conservării energiei și modelul de turbulență k-ε RNG (cu EWF) care conform literaturii se pretează pentru tipul de curgere studiat. Având valorile de temperatură în diferite puncte în urma studiului experimental, nu am utilizat și modelul de transfer de căldură prin radiație pentru a obține un model simplificat și a facilita pe cât posibil obținerea rezultatului. Acest model va fi în viitor dezvoltat și va sta la baza continuării studiilor post-doctorale.

Pentru aerul vehiculat în domeniul de calcul am ales din baza de date a soft-ului ANSYS Fluent proprietățile corespunzătoare, de asemenea pentru placa absorbantă metalică am ales ca material aluminiul. Condițiile la limită impuse sunt cele prezentate în Tabelul 2, însă acestea pot fi modificate pentru obținerea diverselor rezultate și pentru realizarea de studii parametrice (post-procesarea propriu-zisă a modelului).

Tabelul 2. Condiții la limită utilizate în cadrul studiului de independență a mesh-ului

<i>Condiție la limită</i>	<i>Valoare</i>	<i>Unitate de măsură</i>
Viteza medie la intrarea în domeniu (velocity inlet)	0.05555	m/s
Temperatură introducere (inlet)	25	°C
Temperatură plăcii metalice (metal)	50	°C

Schema de interpolare utilizată este „second order upwind” pentru analiza termenilor convectivi, iar schema de cuplare presiune-viteză este determinată de algoritmul „SIMPLE”. Conform literaturii studiate, convergența soluției este atinsă atunci când reziduurile adimensionale ale ecuațiilor de curgere sunt mai mici de 10^{-3} , în consecință pentru a obține rezultate relevante am impus ca și criteriu de convergență a acestora să fie mai mici de 10^{-5} . Imagini tipice pentru convergența reziduurilor adimensionale sunt prezentate în figura de mai jos.

Modelul numeric realizat a fost validat în două moduri: prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal și prin comparația temperaturilor rezultate. Datele de ieșire ale acestui model vor constitui date de intrare pentru modelul numeric al colectorului solar de mari dimensiuni.

Obținerea câmpurilor de viteză și temperatură ca rezultat al geometriei orificiilor la 10De va da crea oportunitatea continuării studiilor. Având aceste rezultate, putem transpune către modelul numeric al colectorului solar impactul real al orificiilor lobate. De asemenea, în viitor vom putea analiza impactul orificiilor asupra materialelor cu schimbare de fază implementate în colectoare solare. În capitolul următor vom prezenta realizarea modelului numeric al colectorului solar cu orificii loate și materiale cu schimbare de fază integrate. Rezultatele obținute în prezentul capitol prin utilizarea modelului numeric studiat vor fi integrate în modelul la dimensiuni reale și vor constitui date de intrare în domeniul de calcul (inlet-ul noului model).

3.3. Realizarea unui model numeric pentru colectorul solar cu orificii lobate și materiale cu schimbare de fază integrate – model simplificat

3.3.1. Realizarea modelului geometric a colectorului de mari dimensiuni

După realizarea modelului numeric ce analizează curgerea aerului prin orificiile lobate (placa absorbantă) am continuat cu modelarea propriu-zisă a colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate. Câmpurile de viteză și temperatură rezultate în urma modelului studiat în capitolul precedent (outlet la 10De), vor constitui date de intrare pentru noul model numeric (inlet), așa cum este prezentat în continuare. Pentru a putea realiza modelarea numerică într-o perioadă de timp rezonabilă am decis simplificarea geometriei reale plecând de la premisa simetriei fenomenelor ce compun întregul colector. În Figura 23 se poate observa placa absorbantă prin care este aspirat aerul ambiental în cavitatea colectorului solar. Din aceasta am extras un rând de orificii (Figura 23a), rezultând o ”felie” transversală prin colectorul solar (Figura 23b). Aspirația (inlet-ul) colectorului este astfel compusă din 50 de plăci cu orificii lobate 4x4cm studiate în capitolul precedent și are dimensiunile 4x200cm. Așadar, aerul vehiculat prin colector cu proprietățile stabilite la 10De ”pătrunde” în noul model, intră în cavitatea dintre placa absorbantă și materialele cu schimbare de fază, continuă traiectoria descendentă datorită șicanei cu PCM, iar după ce ajunge la partea inferioară a colectorului va urma o traiectorie ascendentă ce se finalizează prin evacuarea aerului din colector (outlet). Dimensiunile ”feliei” obținute este respectă geometria reală a colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate.

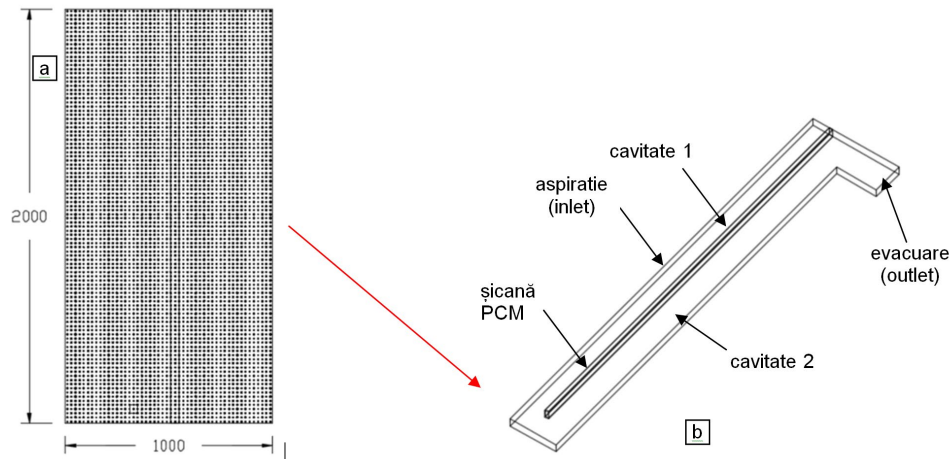


Figura 23. Realizarea geometriei 3D în AutoCAD: a – placa absorbantă cu orificii lobate, b – extragerea unei “felii” din colecteur solar și componentele acesteia

Modelarea întregului colector solar ar presupune o discretizare spațială complexă, respectiv un număr foarte mare de celule în grila de calcul pentru a putea surprinde cu precizie fenomenele ce au loc. După realizarea geometriei colectorului solar în soft-ul de proiectare AutoCAD, modelul 3D a fost salvat în format .igs și importat în ANSYS Design Modeler. Aspiratia colectorului solar a fost împărțită în 50 de fețe 4x4 cm pentru a putea integra câmpurile de viteză obținute la 10De de placa absorbantă cu orificii lobate (Figura 24).

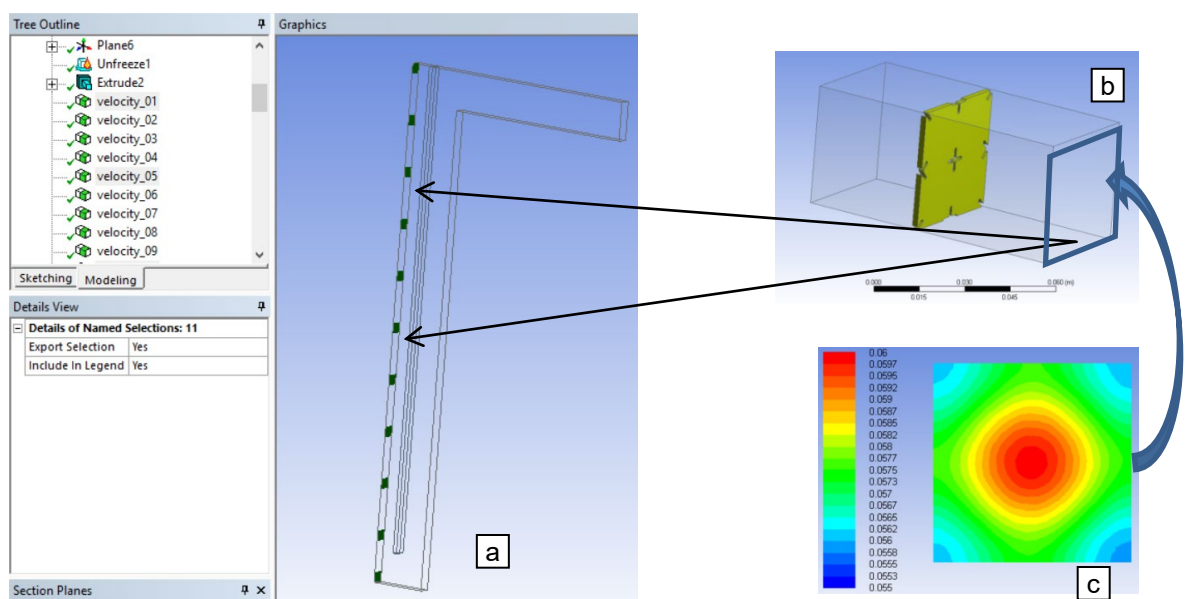


Figura 24. Crearea zonelor specifice aspirării aerului (inlet) unde se vor introduce profilele de viteză și temperatura din capitolul anterior a – 50 de zone pe inlet; b – outlet-ul studiul anterior devine inlet-ul studiul actual; c – câmpul de viteză ce se va integra pe noul inlet

3.3.2. Crearea grilei de calcul (studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării)

Similar etapelor parcurse în capitolul precedent, după construirea propriu-zisă a geometriei, următorul pas în realizarea modelului numeric este alegerea discretizării spațiale. Iar pentru a determina numărul de elemente de calcul (celule) pentru rezolvarea problemei este necesară realizarea unui studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării.

Pentru realizarea studiului de independență am ales de asemenea 6 niveluri de discretizare, respectiv: 0.2, 0.66, 1.3, 2.8, 5 și 6 milioane de celule. Pentru a nu realiza studiul de independență a mesh-ului în regim dinamic, fapt ce ar prelunge substanțial prezentul studiu, am decis eliminarea stratului de PCM din model și realizarea studiului în regim staționar. Acest aspect nu va afecta rezultatul final deoarece ne propunem să studiem cu precădere curgerea aerului prin colectorul solar cu PCM și temperaturile rezultate (nu și fenomenele ce au loc în cavitatea cu PCM). Scoțând cavitatea cu PCM au rezultat următoarele niveluri de discretizare: 0.18, 0.61, 0.7, 1, 2.5 și respectiv 3.5 milioane de elemente. Nivelul de discretizare optim se stabilește prin simulări numerice individuale, utilizând condiții la limită și modele de calcul identice.

Cele 6 niveluri de discretizare au fost apoi importante pe rând în ANSYS Fluent și pentru fiecare dintre acestea s-au impus aceleași condiții la limita prezentate în Tabelul 3. Viteza la intrare corespunde câmpurilor de viteze preluate din studiul precedent și are valori cuprinse între 0.055 și 0.06 m/s pentru fiecare dintre cele 50 de fețe aferente rezultând o viteză totală de aproximativ 2.75 m/s. Temperatura aerului introdus la 10De este de 26°C, iar temperatura peretelui dintre stratul de PCM și cavitate este de 40°C. Aceste ipoteze reprezintă momentul de răcire, respectiv cedarea căldurii acumulate în materialele cu schimbare de fază către aerul vehiculat în perioadele când radiația solară nu este disponibilă.

Tabelul 3. Condiții la limită utilizate în cadrul studiului de independență a mesh-ului

Condiție la limită	Valoare	Unitate de măsură
Magnitudinea vitezei (inlet)	Câmpul de viteze preluat din studiul precedent cu valori între 0.055-0.06 m/s pentru fiecare dintre cele 50 de fețe	
Temperatură introducere (inlet)	26	°C
Temperatură PCM (perete între PCM și cavitate)	40	°C

Câmpul de viteză obținut la 10De în capitolul precedent a fost importat în soft-ul de prelucrare a datelor Tecplot. Pe acesta s-a realizat o matrice de puncte ce au fost ulterior exportate în Notepad și prelucrate în coordonate X, Y și Z astfel încât să se poată integra în coordonatele noului model. Profilele nou create au fost ulterior importate și preluate în condițiile la limită în zona inlet.

Pe lângă alegerea modelului ce activează ecuația conservării energiei, am ales modelul de turbulență k- Ω SST (cu corecții în cazul unui număr Reynolds mic cum este cazul studiat și corecții în cazul curgerilor în care există șicane, coturi etc.). Acesta este unul dintre cele mai fiabile modele de turbulență și se pretează, conform literaturii studiate, în cazul curgerilor cu numere Reynolds mici [28] și în cazul curgerilor de aer în cavități rectangulare de aer [29]. Deși cercetătorii cu experiență în studiile CFD recomandă analiza mai multor combinații de discretizare spațială și model de turbulență, timpul redus pentru realizarea prezentului studiu nu ne-a permis compararea mai multor modele de turbulență în acest caz [30]. Având în vedere datele amintite, am realizat simulări numerice pentru cele 6 grile de calcul, iar rezultatele pentru studiul în regim staționar sunt prezentate în continuare.

În urma simulărilor efectuate pentru cele 6 grile de discretizare, se poate observa că pentru 0.2 și 0.66 milioane de celule distribuția temperaturilor este relativ asemănătoare și uniformă, iar începând cu 1.3 milioane de celule aceasta se modifică. Totuși, începând cu grila de calcul de 2.8 milioane de celule distribuția temperaturilor începe să se uniformizeze din nou, în timp ce la 5 milioane și respectiv 6 milioane de celule rezultatele sunt practic similare. Se poate observa că în partea de jos a colectorului solar temperatura aerului vehiculat este mai ridicată datorită apariției turbulențelor și a circulației aerului la o viteză relativ mică, aspect observat și la partea superioară a cavității secundare. Acolo unde există temperaturi scăzute ale aerului se observa de asemenea și viteze mai mari ale acestuia.

În urma simulărilor efectuate pentru cele 6 grile de discretizare, se poate observa că pentru 0.2 și 0.66 milioane de celule distribuția vitezelor este relativ asemănătoare și uniformă, în timp ce începând cu 1.3 milioane de celule aceasta se modifică similar cu situația câmpurilor de temperatură. Totuși, începând cu grila de calcul de 2.8 milioane de celule distribuția vitezelor începe să se uniformizeze, în timp ce la 5 milioane și respectiv 6 milioane de celule rezultatele sunt practic similare. Se poate observa, de asemenea, că în partea de jos a colectorului solar, în cea

dea doua cavitate, viteza aerului în apropierea peretelui crește datorită șicanei cu PCM și determină apariția unor turbioane în apropierea acestuia ce determină creșterea temperaturilor. Câmpurile de viteză și temperatură rezultate sunt prezentate în Figura 26 și în Figura 27.

Așadar, în urma studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării, ținând cont de aspectele prezentate mai sus am decis să utilizez în continuare cazul cu 5 milioane de elemente deoarece acesta determină o soluție independentă de tipul de grila de discretizare utilizată (Figura 25).

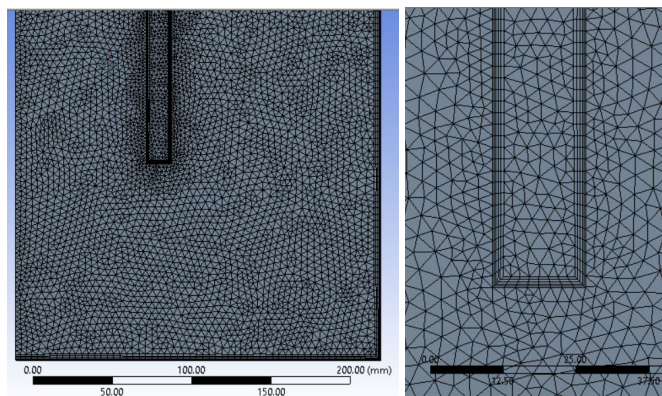


Figura 25. Nivelul de discretizare pentru cazul final cu PCM – 5 milioane de elemente

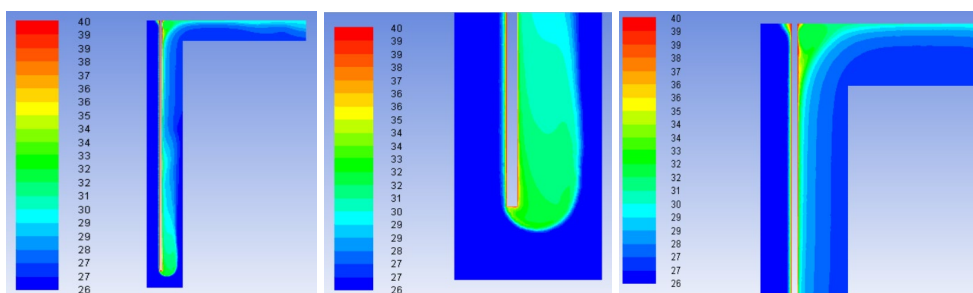


Figura 26. Câmpuri de temperatură în plan longitudinal (simetrie) – pentru grila cu 5 milioane de elemente

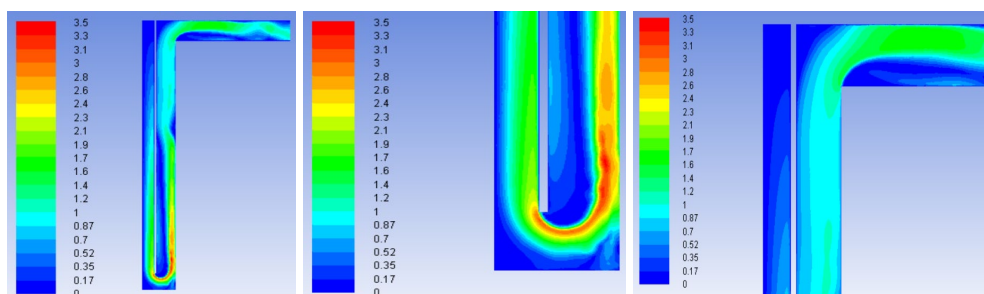


Figura 27. Câmpuri de viteză în plan longitudinal (simetrie) – pentru grila cu 5 milioane de elemente

3.3.3. Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația variației temperaturilor în timp

După realizarea studiului de independență a soluției față de grila de discretizare urmează validarea experimentală a modelului numeric al colectorului solar cu orificii lobate cu materiale cu schimbare de fază înglobate. Validarea se va realiza în două etape. În prima fază vom obține variația temperaturii la 10De în regim tranzitoriu utilizând modelul analizat în capitolul 4 și o vom compara cu măsurătorile efectuate. Variația temperaturii la 10De va fi apoi impusă în modelul de mari dimensiuni („felia” prin colector).

După validarea în regim tranzitoriu a modelului numeric ce analizează curgerea aerului prin placa metalică cu orificii lobate urmează validarea în regim tranzitoriu a modelului colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate. În acest sens, la geometria și grila de discretizare aferente cavității de aer, ce au fost prezentate în capitolele precedente am adăugat geometria și grila de discretizare aferente materialului cu schimbare de fază (Figura 28).

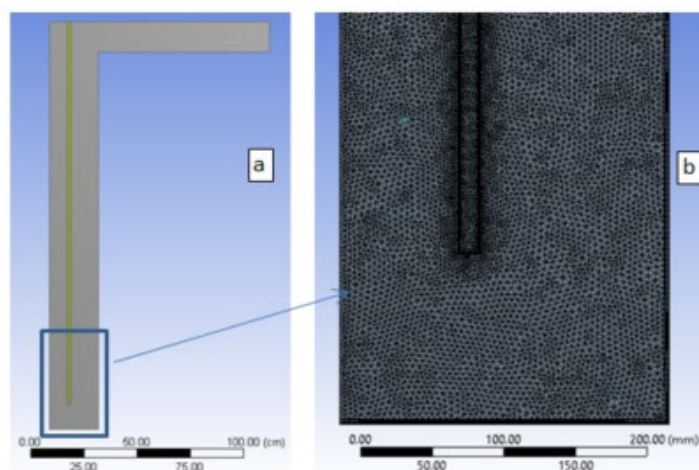


Figura 28. a - Geometria colectorului cu PCM și b - grila de discretizare cu PCM (5 milioane de celule)

După importarea grilei de discretizare în solverul Fluent am trecut la realizarea setarilor cazului modelului numeric. Pentru aceasta am activat modelul ce utilizează ecuația conservării energiei și modelul de turbulență $k-\Omega$ SST conform capitolului precedent. Următorul pas a fost definirea materialelor utilizate în studiul numeric: aerul și materialele cu schimbare de fază. Proprietățile aerului au fost preluate din biblioteca ANSYS Fluent. Pentru materialele cu schimbare de fază am utilizat proprietățile parafinei RT35 prezentate în Tabelul 1 și utilizate în cadrul studiului experimental. Pentru a simplifica modelul numeric am considerat ca materialele cu schimbare de fază sunt în stare solidă și au o căldură specifică variabilă în funcție de temperatură. Variația căldurii înglobate sau cedate de materialul cu schimbare de fază la fiecare modificare a temperaturii cu 1°C este prezentată în Figura 2 și a fost introdusă ca proprietate a materialului. În acest fel, modelul numeric creat ia în considerare efectul termic al materialelor cu schimbare de fază, neglijând fenomenele ce au loc în cavitatea rectangulară, inclusiv efectul convecției naturale și procesele de topire/solidificare. Capacitatea de stocare a energiei este prezentată ca sumă între căldura sensibilă și căldura latentă de schimbare de fază.

Pentru a afla temperatura aerului la ieșirea din colectorul solar (T_{outlet}) este necesar să cunoaștem variația temperaturii aerului la 10De și valoarea temperaturii inițiale a materialelor cu schimbare de fază. Pentru a realiza validarea numerică într-o perioadă de timp fezabilă am utilizat extras aceeași perioadă de 120 de minute pentru studiu, iar rezultatele experimentale sunt evidențiate în Figura 29. Pentru a impune ca și condiție la limită variația temperaturii la 100De am utilizat rezultatele experimentale în locul celor numerice prezentate anterior, acestea fiind practic similare. Pentru a putea realiza validarea numerică este necesară monitorizarea temperaturii materialelor cu schimbare de fază, iar în acest sens s-a completat standul experimental cu un nou senzor de temperatură, iar studiile

au fost completate în consecință. Pentru a realiza programul în limbaj C++ ce descrie variația temperaturii la 10De a fost necesară împărțirea pe trei paliere de variație, similar cazului precedent. Prima etapa corespunde unei variații liniare de temperatură descrise printr-o ecuație de gradul întâi. Etapa a doua ce coincide cu scaderea bruscă a temperaturii este caracterizată printr-o ecuație polinomială de gradul 4. Etapa a treia ce corespunde descărcării energiei termice este caracterizată printr-o ecuație polinomială de gradul 2. După obținerea celor trei ecuații de variație am realizat programul în C++ ce va determina introducerea unor condiții la limită variabile în modelul numeric realizat în Fluent.

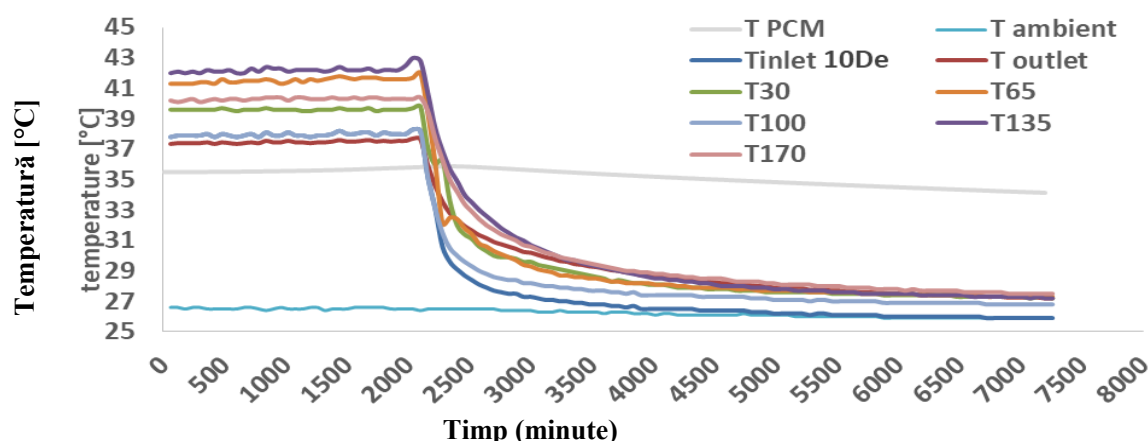


Figura 29. Variația de temperatură pentru două ore

Condițiile la limită utilizate în cadrul studiului numeric sunt prezentate în Tabelul 4. Variația temperaturii la 10De este data de UDF-ul determinat, câmpurile de viteze au fost importate pentru cele 50 de fețe, ca rezultat al studiului prezentat în capitolul precedent. De asemenea, au fost monitorizate temperaturile în diferite puncte din colectorul solar modelat numeric, precum și temperaturii medii pe suprafețe. Solverul Fluent da posibilitatea impunerii unei temperaturi inițiale pentru un anumit material. Temperatura inițială în cazul de față pentru materialele cu schimbare de fază fiind de 35.5°C (funcția „patch” din inițializare), conform rezultatelor experimentale.

Tabelul 4. Condiții la limită utilizate în cadrul validării numerice a colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate

Condiție la limită	Valoare	Unitate de măsură
Magnitudinea vitezei (v inlet 10De)	Câmpul de viteze preluat din studiul prezentat în cap. 4 cu valori între 0.055-0.06 m/s pentru fiecare dintre cele 50 de fețe	
Temperatură introducere (T inlet 10De)	Variație impusă din UDF (user defined function)	
Temperatură PCM (valoare inițială impusă)	35.5	°C

Pentru a porni de la o soluție stabilă am rulat calculul în regim permanent, iar după stabilizarea soluției am setat cazul pentru simulare numerică în regim tranzitoriu impunând următoarele condiții următoare: pasul de timp de 10s, 720 pași de timp (7200 secunde) și respectiv 20 iterații pe fiecare pas de timp. Pe lângă aceste setări, cazul a fost rulat și pentru 5s, 10s și 20s, respectiv pentru 10 iterații, 15 iterații, 20 de iterații și 30 de iterații. Concluziile au fost următoarele: peste 10s și sub 20 de iterații fenomenul nu este redat cu precizie în cazul etapei II corespunzătoare căderii bruște de temperatură.

Pentru validarea modelului numeric al colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază înglobate am ales să compar temperatura aerului în a doua cavitate de aer, în mijlocul cavității la 100cm de partea inferioară a colectorului (T100). În Figura 30 este prezentată variația temperaturii T100 atât în situația studiului numeric, cât și în situația studiului experimental. De asemenea, pentru validarea modelului numeric am ales să compar și temperatura aerului evacuat din colectorul solar (T outlet) în studiul experimental și în studiul numeric. În Figura 31

sunt suprapuse atât rezultatele numerice, cât și cele experimentale măsurate. Variația temperaturii la 10De respectă variația impusă prin UDF-ul prezentat mai sus. De asemenea alura curbei de variație a temperaturii aerului evacuat din colector în situația modelului numeric este similară cu cea obținută experimental cu mici diferențe ce se pot datora faptului că modelul numeric nu conține și celelalte elemente ale colectorului solar real ce pot contribui la inerția termică a sistemului (ex: OSB, izolație termică) etc.

Comparând valorile obținute experimental cu rezultatele numerice am putut concluziona faptul că modelul numeric creat reproduce fenomenele reale de transfer termic în limite acceptabile.

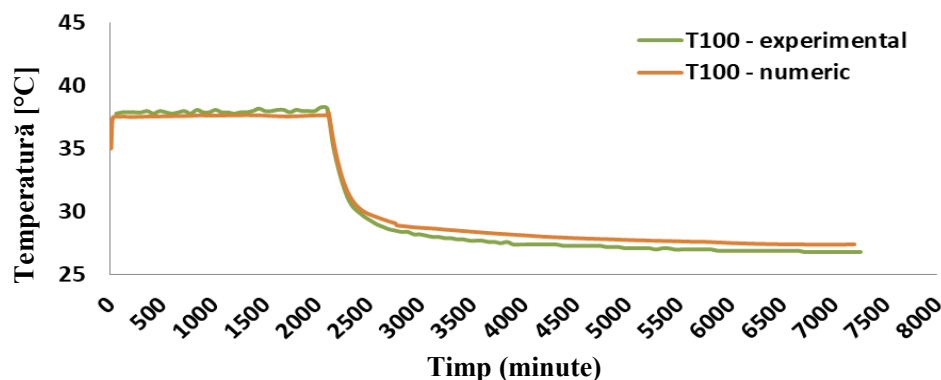


Figura 30. Rezultatele studiului numeric vs. experimental: T100

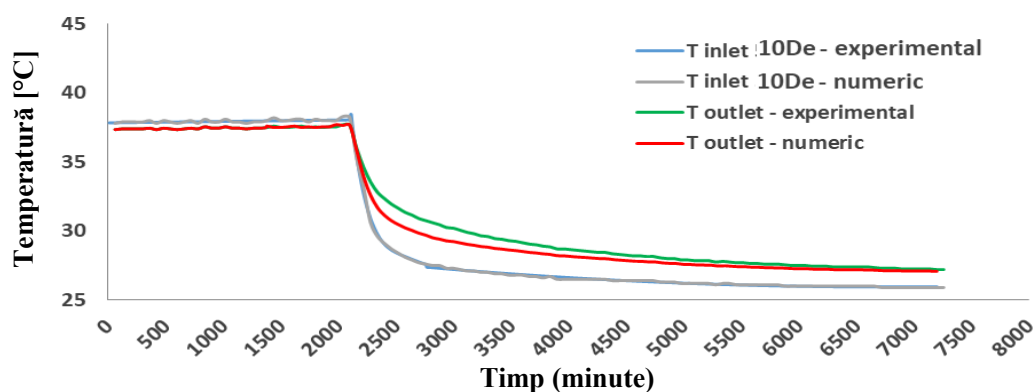


Figura 31. Rezultatele studiului numeric vs. experimental: Toutlet și Tinlet

3.3.4. Parametrii finali ai modelului numeric și rezultate

Având în vedere analizele elaborate în prezentul capitol, putem concluziona parametrii finali ai modelului numeric ce analizează colectorul solar cu materiale cu schimbare de fază integrate. Geometria are la bază o formă simplificată ce reprezintă o "felie" prin colectorul solar, intrarea în domeniul de calcul fiind alcătuită din 50 de fețe ale căror condiții la limită, în special câmpuri de viteze, au fost preluat din modelul ce analizează curgerea prin placa cu orificii lobate, studiat în capitolul precedent.

Conform studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării a rezultat o geometrie cu 5 milioane de elemente tetraedrale ce nu influențează rezultatele simulărilor numerice, fiind o soluție stabilă. Grila de discretizare prezintă 2.5 milioane de celule în zona cavității de aer și 2.5 milioane de celule în zona ce delimitează materialele cu schimbare de fază. Am ales de asemenea modelul de transfer de energie ce ține cont de ecuația conservării energiei și modelul de turbulență k- Ω SST (cu corecții în cazul unui număr Reynolds mic și corecții în cazul curgerilor în care există șicane, coturi etc.) care conform literaturii se pretează pentru tipul de curgere studiat. Având valorile de temperatură în diferite puncte în urma studiului experimental, nu am utilizat și modelul de transfer de căldură prin radiație pentru a obține un model simplificat și a facilita pe cat posibil obținerea rezultatului. Acest model va fi în viitor dezvoltat și va sta la baza continuării studiilor post-doctorale. Pentru aerul

vehiculat în domeniul de calcul am ales din baza de date a soft-ului ANSYS Fluent proprietățile corespunzătoare, de asemenea pentru materialele cu schimbare de fază am impus caracteristicile parafinei RT35 și am considerat că materialul este în stare solidă având caldură specifică variabilă în funcție de temperatură. Chiar dacă procesele de topire și solidificare nu pot fi momentan studiate, impactul termic al materialelor cu schimbare de fază este redat cu fidelitate. Pentru impunerea condițiilor la limită am utilizat profilele de viteză obținute în modelul anterior, iar pentru a putea studia colectorul în regim tranzitoriu am impus condiții la limita variabile (UDF-uri) realizate în limbaj de programare C++. De asemenea, pentru inițializare am impus o temperatură inițială pentru materialul cu schimbare de fază. Schema de interpolare utilizată este „second order upwind” pentru analiza termenilor convectivi, iar schema de cuplare presiune-viteză este determinată de algoritmul „SIMPLE”. Conform literaturii studiate, convergența soluției este atinsă atunci când reziduurile adimensionale ale ecuațiilor de curgere sunt mai mici de 10^{-3} , în consecință pentru a obține rezultate relevante am impus ca și criteriu de convergență a acestea să fie mai mici de 10^{-5} .

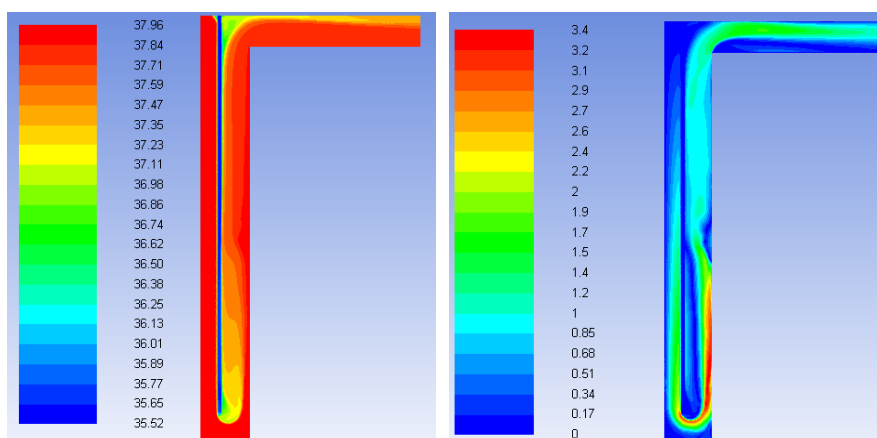


Figura 32. Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 1200s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

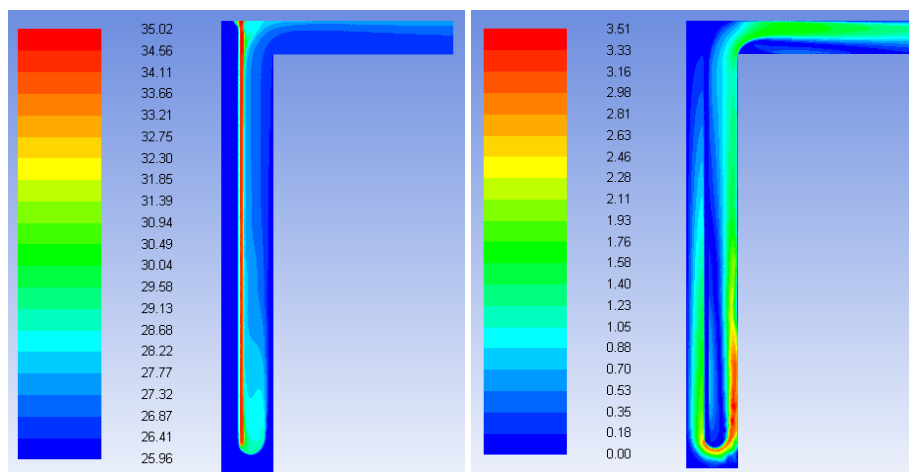


Figura 33. Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 7200s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

În Figura 32 și Figura 33 sunt prezentate câmpuri de temperatură și viteză pentru colectorul solar după diferite intervale de timp din cadrul studiului numeric.

3.4. Concluzii și perspective ale studiilor numerice efectuate

Conform studiului bibliografic realizat implementarea materialelor cu schimbare de fază nu a fost studiată anterior din punct de vedere experimental și numeric, neexistând un model numeric care să simuleze fenomenele ce au loc în interiorul colectorului.

Studiul numeric este destul de dificil datorită numărului mare de orificii ale plăcii absorbante și datorită fenomenelor complexe ce au loc în interiorul colectorului solar. Așadar, prezentul studiu propune analiza unui model numeric simplificat, dar care să poată fi validat experimental. Studiul numeric este împărțit așadar în două etape:

- *modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate ce analizează curgerea printr-o parte din placa absorbantă a colectorului (4 orificii)*
- *modelarea numerică a colectorului de mari dimensiuni (studiu curgerii printr-o "felie" din colectorul solar).*

Datele de ieșire din cadrul primului studiu reprezintă date de intrare pentru cel de-al doilea model realizat. Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate are drept scop surprinderea corectă a fenomenelor ce au loc la curgerea aerului prin acestea și analiza impactului geometriei orificiilor asupra colectorului. Simularea colectorului solar la dimensiunile sale reale ar presupune un timp de calcul foarte mare datorită unei grile de discretizare foarte mare, un timp care ar fi practic nefezabil pentru finalizarea studiilor. Profilele și câmpurile de temperatură și viteză obținute în urma primului studiu au fost așadar integrate în modelul numeric al colectorului solar cu PCM de mari dimensiuni. După realizarea modelului numeric ce analizează curgerea aerului prin orificiile lobate (placa absorbantă) am continuat cu modelarea propriu-zisă a colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate. Câmpurile de viteză și temperatură rezultate în urma primului model (outlet la 10De), vor constitui date de intrare pentru noul model numeric (inlet). Modelarea întregului colector solar ar presupune o discretizare spațială complexă, respectiv un număr foarte mare de celule în grila de calcul pentru a putea surprinde cu precizie fenomenele ce au loc.

Primul model studiat ce studiază curgerea aerului prin orificiile lobate prezintă, conform studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării, o geometrie cu 5.3 milioane de elemente tetraedrale ce nu influențează rezultatele simulărilor numerice, fiind o soluție stabilă. Pentru acest model am ales modelul de transfer de energie ce ține cont de ecuația conservării energiei și modelul de turbulență k- ϵ RNG (cu EWF) care conform literaturii se pretează pentru tipul de curgere studiat. Având valorile de temperatură în diferite puncte în urma studiului experimental, nu am utilizat și modelul de transfer de căldură prin radiație pentru a obține un model simplificat și a facilita pe cât posibil obținerea rezultatului. Acest model va fi în viitor dezvoltat și va fi utilizat în cadrul studiilor post-doctorale. Pentru aerul vehiculat în domeniul de calcul am ales din baza de date a soft-ului ANSYS Fluent proprietățile corespunzătoare, de asemenea pentru placa absorbantă metalică am ales ca material aluminiul și condiții la limită conform datelor experimentale. Acest model a fost validat experimental în două moduri: prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal și comparația temperaturilor rezultate în cavitatea colectorului solar. Având aceste rezultate, putem transpune către modelul numeric al colectorului solar impactul real al orificiilor lobate.

Geometria celui de-al doilea model numeric al colectorului de mari dimensiuni are la bază o formă simplificată ce reprezintă o "felie" prin colectorul solar, intrarea în domeniul de calcul fiind alcătuită din 50 de fețe ale căror condiții la limită, în special câmpuri de viteze, au fost preluat din modelul ce analizează curgerea prin placa cu orificii lobate (primul model realizat). Conform studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării a rezultat o geometrie cu 5 milioane de elemente tetraedrale ce nu influențează rezultatele simulărilor numerice, fiind o soluție stabilă. Grila de discretizare prezintă 2.5 milioane de celule în zona cavității de aer și 2.5 milioane de celule în zona ce delimitează materialele cu schimbare de fază. Am ales de asemenea modelul de transfer de energie ce ține cont de ecuația conservării energiei și modelul de turbulență k- Ω SST (cu corecții în cazul unui număr Reynolds mic și corecții în cazul curgerilor în care există șicane, coturi etc.) care conform literaturii se pretează pentru tipul de curgere studiat. Având valorile de temperatură în diferite puncte în urma studiului experimental, nu am utilizat și modelul de transfer de căldură prin radiație pentru a obține un model simplificat și a facilita pe cât posibil obținerea rezultatului. Acest model va fi în viitor dezvoltat și va sta la baza continuării studiilor post-doctorale și astudiilor parametrice ce optimizează a colectorului solar studiat. Pentru aerul vehiculat în domeniul de calcul am ales din baza de date a soft-ului ANSYS Fluent proprietățile corespunzătoare, de asemenea pentru materialele cu schimbare de fază am impus caracteristicile parafinei RT35 și am considerat că materialul este în stare solidă având căldură specifică variabilă în funcție de temperatură. Chiar dacă procesele de topire și solidificare nu pot fi momentan studiate, impactul termic al materialelor cu schimbare de fază este redat cu fidelitate. Al doilea

model realizat a fost validat experimental comparând variația temperaturilor în timp, în regim tranzitoriu. În cadrul studiilor numerice s-au putut observa vârtejurile create în cea de-a doua cavitate de aer ce determină o stratificare termică neobișnuită creată de introducerea șicanei de materiale cu schimbare de fază.

Modelul realizat va fi aprofundat și dezvoltat în cadrul studiilor post-doctorale, această variantă fiind una simplificată. Acesta va sta la baza unor studii parametrice complexe pentru optimizarea colectorului solar ce vor analiza diferite tipuri de materiale cu schimbare de fază, diferite geometrii ale orificiilor, diferite poziționări ale șicanei cu PCM, diferite debite de aer vehiculate ș.a.

Capitolul 4 - Concluzii și perspective ale lucrării - contribuții personale

Prezenta lucrarea tratează în mod exhaustiv implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare perforate cu aer, atât dintr-o perspectivă experimentală, cât și dintr-una numerică realizând totodată o analiză amplă a stadiului cercetărilor din domeniul studiat.

Primul capitol al lucrării este reprezentat de un studiu bibliografic amplu ce analizează, pe rând, implementarea materialelor cu schimbare de fază în clădiri și instalațiile din clădiri, implementarea colectoarelor solare cu aer în clădiri și integrarea celor două subiecte, respectiv înglobarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer și potențialul noului sistem studiat asupra reducerii consumurilor de energie și a costurilor de operare a unei clădiri. În ultima perioadă se observă o tendință ascendentă și o atenție deosebită a cercetătorilor asupra implementării materialelor cu schimbare de fază în clădiri și sisteme din clădiri, tot mai mulți oameni de știință fiind interesați de impactul acestora și de simplificarea modului de lucru cu acestea, iar încrederea comunității în aceste materiale este în creștere înțelegând tot mai mult potențialul lor. Totuși, costurile actuale sunt încă ridicate datorită unui număr relativ redus de producători existenți pe piață, fiind încă o piață de nișă. Conform literaturii studiate, materialele cu schimbare de fază au avantajul de a stoca foarte multă energie la o variație mică de temperatură și la valori ale temperaturilor de lucru foarte apropiate de nivelul de confort termic sau de temperaturile necesare în sistemele din clădiri. Aceste materiale au fost de-a lungul timpului integrate în elemente de construcție, plăci de gips-carton, instalații solare sau acumulate de agent termic, fațade ventilate sau în sisteme active de ventilare. Studiile realizate până în prezent relevă faptul că materialele cu schimbare de fază pot fi ușor parte a unor strategii pasive sau active de reducere a consumurilor de energie și îmbunătățire a confortului termic în clădiri, cu rezultate remarcabile, ele putând fi parte din elementele de anvelopă a clădirii sau din sistemele de încălzire, răcire și ventilare ale acestora. Colectoarele solare perforate cu aer sunt o alternativă cost-beneficiu la colectoarele solare opace sau vitrate mai intens studiate (ex: peretele de tip „Trombe”), în timp ce colectoarele solare cu aer, în general, pot reprezenta o soluție mai viabilă spre deosebire de colectoarele bine-cunoscute cu agent termic apă, neavând risc de îngheț și având costuri reduse de exploatare. Totuși, datorită dificultăților ce apar la stocarea energiei, colectoarele solare cu aer sunt încă rar implementate în aplicații reale, având succes în special în America de Nord și în nordul Africii. Colectoarele solare cu aer pot fi implementate în orice tip de aplicație, însă până în prezent au fost utilizate în domeniul industrial: hale de producție, hale de depozitare, hale de depozitare legume și fructe, cu scopul menținerii unei temperaturi de gardă sau pentru uscarea legumelor. Conform studiului bibliografic realizat, materialele cu schimbare de fază pot fi implementate în colectoare solare cu aer, sporind eficiența globală a acestora și numărul de ore de funcționare, contribuind astfel la încălzirea spațiilor sau la preîncălzirea aerului proaspăt introdus în încăperi. Mai mult decât atât, creșterea inerției termice a colectoarelor poate conduce la ameliorarea variațiilor de temperatură în cazul aerului evacuat din colector către mediul interior sau către un recuperator de căldură. Așadar, implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoarele solare cu aer poate conduce la stocarea energiei pe timpul zilei, atunci când radiația solară este disponibilă și utilizarea ei pe perioadele înnoirate sau noaptea, atunci când nu există radiație solară.

Conform studiilor bibliografice ample realizate până în prezent [11, 12, 31-34] sistemele alcătuite din colectoare solare opace perforate și materiale cu schimbare de fază au fost foarte puțin studiate. În urma studiului bibliografic realizat, nu s-au identificat în literatura de specialitate studii referitoare la implementarea materialelor cu schimbare de fază pentru stocarea energiei în colectoare solare perforate utilizate ca perete exterior în anvelopa clădirii. De

asemenea, există nu a fost identificate în literatură un model numeric care să analizeze colectoarele solare cu geometrii lobate, dar nici colectoarele solare perforate cu materiale cu schimbare de fază integrate. Așadar, o prima contribuție personală constă în sinteza bibliografică amplă realizată în cadrul capitolului ce analizează starea actuală a cercetărilor în domeniul studiat, date fiind toate aspectele enumerate anterior și lipsa unui astfel de studiu în literatura de specialitate care să analizeze integrat implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoarele solare cu aer. Acest studiu deschide noi perspective și oportunități de cercetare în domeniu ce vor face subiectul continuării studiilor doctorale.

Al doilea capitol al lucrării se referă la analiza experimentală a integrării materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer de mari dimensiuni ce pot fi integrate în anvelopa clădiri sau sisteme din clădiri. Pentru a ajunge la prototipul final studiat, au fost necesare pentru etape majore preliminare care au condus la optimizarea modelului final. Primul studiu experimental a analizat procesele de topire și solidificare a materialelor cu schimbare de fază organice (parafină RT35) macroîncapsulate în recipiente rectangulare de aluminiu. Datorită faptului că nu au fost identificate pe piață recipiente care să poată fi integrate în colectorul solar proiectat, am integrat materialul studiat în bare de aluminiu, o metodă nouă de încapsulare care conduce la optimizarea spațiului și posibilitatea de a utiliza o cantitate mare de materiale cu schimbare de fază. Acest studiu a avut drept scop validarea soluției constructive alese, înțelegerea proceselor ce au loc în interiorul recipientelor cu PCM și indentificarea poziției optime a acestora în colectorul solar. Primul studiu experimental a concluzionat faptul că timpul de topire și acumulare a căldurii este mai redus în cazul recipientelor poziționate vertical, stratificarea termică în interior fiind evidentă. Aluminiul utilizat distribuie uniform căldura datorită conductivității termice sporite, iar perioada de solidificare a materialelor este mai lentă față de perioada de topire. Al doilea studiu experimental a constatat în testarea recipientelor nou-construite în colectoare solare de mici dimensiuni validate deja în studii precedente realizate în cadrul Facultății de Inginerie a Instalațiilor. Acest studiu a avut drept scop indentificarea poziției optime a recipientelor în interiorul colectoarelor solare de mari dimensiuni și observarea impactului acestora asupra temperaturii aerului evacuat din colector. Concluziile au demonstrat faptul că materialele cu schimbare de fază trebuie amplasate în mijlocul cavității pentru creșterea suprafeței de schimb de căldură, studiul trebuie realizat pe o perioadă mai lungă de timp pentru a putea reface ciclul de schimbare de fază, iar implementarea materialelor inerțiale are potențialul estimat inițial, de a crește eficiența globală a sistemului și numărul de ore de funcționare, motiv pentru care am trecut la următorul studiu asupra colectorului de mari dimensiuni. Al treilea studiu experimental din cadrul celui de-al doilea capitol al prezentei lucrări tratează analiza experimentală a colectorului de mari dimensiuni cu perforații lobate și materiale cu schimbare de fază înglobate, primul caz în care barele de PCM sunt amplasate sub forma unei baterii de stocare a energiei, în mijlocul cavității de aer, cu spații între recipiente, precum și cu spații între cadrul metalic susținător și pereții colectorului. Acest studiu a evidențiat geometria colectorului solar de mari dimensiuni ce poate fi montaj în aplicații reale și a concluzionat faptul că datorită amplasării ventilatorului la partea superioară a colectorului apare o diferență de presiune pe verticală care forțează curgerea aerului în special în partea superioară a acestuia, fapt influențat și de pierderile de sarcină impuse de poziționarea recipientelor rectangulare. Atât stratificarea termică, cât și studiul presiunilor au confirmat aceste ipoteze.

Așadar, în urma concluziilor celui de-al treilea studiu experimental, a rezultat perfectarea prototipului colectorului solar, respectiv realizarea celui de-al patrulea studiu experimental care se referă la implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu perforații lobate de mari dimensiuni, în care stratul de PCM formează o șicană în mijlocul colectorului ce ghidează curgerea aerului prin cavitatea interioară a acestuia. Acest model constructiv este cel final adoptat și cel care s-a dovedit a avea cele mai bune performanțe. Colectorul a fost studiat exhaustiv în regim permanent pentru a observa impactul materialelor, însă s-au realizat și câteva studii preliminare în regim tranzitoriu. În urma studiului experimental realizat s-a putut concluziona faptul că diferența de temperatură dintre aerul ambiantal și cel evacuat din colectorul fără PCM este de maxim 10.2 °C (cu 9.7% mai mult față de cazul colectorului fără șicană), iar temperatura maximă a aerului evacuat din colectorul solar fără PCM este de 34.7 °C. Transferul de căldură se realizează preponderent în prima cavitate de aer formată, iar după oprirea lămpilor valorile temperaturilor se egalizează rapid în cazul fără PCM. Mai mult decât atât, diferența de temperatură dintre aerul ambiantal și cel evacuat din colectorul fără PCM este de maxim 11.1 °C (cu 7.8% mai mult față de cazul colectorului fără șicană), în timp ce temperatura maximă a aerului evacuat din colectorul solar fără PCM este de

37.6 °C. Temperatura la ieșirea din colector este mai scăzută în cazul cu PCM în prima parte a studiilor, atunci când PCM acumulează energie, iar după oprirea radiației solare energia este cedată lent către aerul vehiculat (în cazul cu PCM). Se poate observa totuși că stratificarea termică în cazul colectoarelor este neobișnuită, fapt care se poate datora vartejurilor ce pot apărea în urma amplasării șicanei (fapt confirmat în cadrul studiilor numerice efectuate. Diferența maximă de temperatură dintre aerul ambiental și cel evacuat, principalul factor ce trebuie analizat în cazul colectoarelor solare, este mai mare în cazul cu PCM cu 8.8%. Fenomenul de topire este evident timp de 180 de minute, perioadă în care creșterea de temperatură în cazul colectorului cu PCM este mai mică față de cazul fără PCM. Deși cazul al doilea studiat, cu stratul de PCM sub forma unei șicane, prezintă rezultate mai bune, transferul de căldură este mai lent, iar descărcarea energiei se produce mai lent față de cazul precedent. În perioada de încălzire/încărcare energia este acumulată mai rapid (topirea este evidentă între minutul 60 și minutul 240), în timp ce procesul de solidificare se produce mai lent, pe întreaga etapă de răcire/descărcare, cu o perioadă în care procesul este mai intens (între minutul 400 și minutul 660). Capacitate termică maximă a colectorului solar fără PCM este de 1.46kW (0.73kW/m²), în timp ce colectorul cu PCM atinge un maxim de 1.52kW (0.76kW/m², cu 4.1% mai mult). Pe perioada de încălzire/încărcare, puterea medie a colectorului solar cu PCM este de 1.32kW (0.66kW/m²), sensibil mai scăzută față de colectorul solar fără PCM care atinge o valoare de 1.36kW (0.68kW/m²), fapt care se datorează acumulării de energie în materialele cu schimbare de fază. Pe perioada de răcire/descărcare, puterea medie a colectorului solar cu PCM este de 117W (58.5W/m²), de aproape 4.7 ori mai mare față de colectorul solar fără PCM care atinge o valoare de 25W (12.5W/m²), fapt care se datorează cedării de energie a materialelor cu schimbare de fază către aerul vehiculat prin colectorul solar. În cazul utilizării PCM colectorul solar produce un maxim de 1.445kWh într-o oră de funcționare (a 6-a oră de funcționare), în timp ce colectorul fără PCM produce un maxim de 1.397kWh (a 5-a oră de funcționare). Colectorul solar cu PCM produce în medie 484Wh în fiecare oră de funcționare, pe parcursul studiilor experimentale, în timp ce colector solar fără PCM produce în medie 440Wh. În etapa de încălzire colectorul solar cu PCM produce 7.4kWh, mai puțin decât colectorul solar fără PCM care produce 7.6kWh. În etapa de răcire colectorul solar cu PCM produce 2,3kWh, de două ori mai mult decât colectorul solar fără PCM care produce 1.2kWh. Cantitatea totală de energie produsă de colectorul fără PCM este de 8.8kWh (4.4kWh/m²), în timp ce colectorul solar cu PCM produce 9.7kWh (4.85kWh/m²), respectiv cu 10.2% mai multă energie în cele 20 de ore de funcționare, așadar ambele colectoare solare cu și fără PCM au potențialul de a se amortiza rapid prin comparație cu utilizarea unei baterii de încălzire electrice. Eficiența medie a transferului termic în cazul colectorului cu PCM este de 34.11%, în timp ce eficiența medie a transferului termic în cazul colectorului fără PCM este de 35.6%. Acest aspect se poate datora faptului că o parte din cantitatea de energie absorbită de placa metalică absorbantă este cedată prin fenomenul de radiație către șicana cu materiale cu schimbare de fază integrate în recipientele rectangulare de aluminiu. După perioada de topire, eficiența transferului termic se egalizează ușor, colectorul solar cu PCM atingând valoarea maximă de 37.54%, în timp ce colectorul solar fără PCM atinge valoarea maximă de 37.89%. Eficiența maximă a colectorului cu PCM este de 94.97%, în timp ce eficiența maximă a colectorului fără PCM este de 91.17%. Totuși, eficiența medie a colectorului solar cu PCM este mai scăzută pe perioada de încălzire/încărcare datorită materialelor cu schimbare de fază care acumulează energie: 83.59%, spre deosebire de 85.54% în cazul fără PCM. Pe perioada de răcire/descărcare, eficiența colectorului solar nu poate fi evaluată întrucât lămpile cu halogen sunt oprite simulând astfel perioada în care radiația solară nu este disponibilă. Eficiența globală a colectorului poate fi estimată corespunzător doar prin analiza coeficientului de performanță a colectorului solar (COP). COP-ul maxim în cazul colectorului solar cu PCM este de 22.7, în timp ce COP-ul maxim al colectorului fără PCM este de 21.77. Datorită prezenței materialelor cu schimbare de fază, pe perioada de încălzire/încărcare, colectorul cu PCM are un COP mediu sensibil mai scăzut față de colectorul solar fără PCM: 19.7, față de 20.3. În mod evident, pe perioada de răcire/descărcare, colectorul cu PCM are un COP mediu de 4 ori mai mare față de colectorul solar fără PCM: 1.7, față de 0.4

Atunci când valoarea COP-ului colectorului solar scade sub valoarea 1, încălzirea cu ajutorul unei baterii electrice devine mai avantajoasă din punct de vedere economic. Așadar, începând cu minutul 457 colectorul solar fără PCM ar trebui să fie oprit, în timp ce colectorul solar cu PCM ar trebui să fie oprit începând cu minutul 937, atunci când COP-ul devine subunitar, deși acesta mai poate furniza energie termică. Mai mult, COP-ul colectorului cu PCM este mai scăzut în prima parte a studiului, deoarece materialele cu schimbare de fază acumulează energie, în timp ce după oprirea radiației solare, COP-ul este considerabil mai mare în favoarea colectorului cu PCM. COP-ul mediu al colectorului solar fără materiale cu schimbare de fază înglobate este de 6.6, în timp ce COP-ul mediu al colectorului

solar cu materiale cu schimbare de fază înglobate este de 7.3, respectiv cu 10.6% mai mare. În perioada de încălzire/încărcare energia este acumulată mai rapid (topirea este evidentă între minutul 60 și minutul 240), în timp ce procesul de solidificare se produce mai lent, pe întreaga etapă de răcire/descărcare, cu o perioadă în care procesul este mai intens (între minutul 400 și minutul 660). Așadar, perioada utilă de funcționare (atunci când COP-ul este supraunitar) a colectorului solar fără PCM este de 434 de minute, în timp ce în cazul colectorului cu PCM aceasta este de 937 de minute, rezultând o perioadă de funcționare mai mare cu 110% (479 minute mai mult). Mai mult, în regim tranzitoriu, pe perioada zilei, amplitudinea variației în cazul colectorului fără PCM este de 4.2°C, în timp ce în cazul colectorului cu PCM amplitudinea variației temperaturii la ieșirea din colector este de 2.8°C, respectiv cu 33% mai mică.

Așadar, una dintre principalele contribuții originale ale acestui studiu se referă la realizarea și analiza experimentală a prototipului fizic al colectorului de mari dimensiuni cu orificii lobate cu materiale cu schimbare de fază integrate, ce poate integrat în fațada unei clădiri, sistem ce nu a mai fost studiat până în prezent. Mai mult decât atât nu a fost indentificat în literatură un colector solar de mari dimensiuni cu orificii lobate. Geometria recipientelor rectangulare de aluminiu și combinația cu parafina R35 este simplă, dar totodată nu a fost indentificată în literatura studiată. Aceste recipiente simple au avantajul de a ocupa puțin spațiu și de a se integra ușor, optimizând spațiul ocupat.

Toate acest studii experimentale stau la baza studiilor viitoare post-doctorale care vor urmări studiul topirii/solidificării materialelor cu schimbare de fază în recipiente transparente pentru a înțelege mai bine procesele ce au loc în interiorul acestora. De asemenea, vor fi studiate experimental diferite tipuri de materiale cu schimbare de fază integrate în cavitățile rectangulare studiate. Aceste bare cu PCM nou-propuse vor putea fi implementate nu doar în colectoare solare, dar și în elementele de anvelopă ale unei clădiri sau în sisteme active. Mai mult decât atât se vor realiza studii parametrice aprofundate pe colectorul de mari dimensiuni ce vor analiza diferite debite de aer vehiculate prin colector, diferite tipuri de materiale inerțiale, diferite cantități de materiale inerțiale, poziționări diferite ale acestora și chiar diferite geometrii ale orificiilor sau ale colectorului solar. De asemenea, pentru un calcul economic relevant și pentru o analiză care să confirme datele obținute în regim permanent este necesară studierea colectoarelor solare în regim tranzitoriu, în condiții climatice reale, pe perioade mai lungi de timp (de exemplu, pe perioada unui an). Totuși, în regim tranzitoriu este necesară alegerea unei temperaturi de schimbare de fază mai scăzută pentru a beneficia de ciclul de schimbare de fază și la temperaturi mai scăzute ale aerului exterior. De asemenea, rezultate mai bune vor fi obținute la debite mai mici ale aerului vehiculat prin colector.

Dacă din punct de vedere experimental, implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare perforate cu aer nu a fost studiată până în prezent, în mod evident, nu au fost identificate în literatură modele numerice utile pentru optimizarea acestuia. Al treilea capitol al prezentei lucrări se referă la realizarea modelului numeric al colectorului solar de mari dimensiuni. Datorită fenomenelor complexe ce au loc în interiorul colectorului și a numărului mare de orificii lobate practicate în placa metalică absorbantă, a fost necesară realizarea a doua modele numerice. Primul model numeric realizat analizează modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate ce studiază curgerea printr-o parte din placa absorbantă a colectorului (4 orificii lobate). Datele de ieșire ale acestui model, reprezintă datele de intrare pentru cel de-al doilea model studiat, astfel că se poate transpune efectul orificiilor asupra materialelor cu schimbare de fază. Al doilea studiu realizat se referă la modelarea numerică a colectorului de mari dimensiuni, respectiv studiu curgerii și a distribuțiilor de temperatură și viteză printr-o Ț "felie" din colectorul solar de mari dimensiuni. S-a obținut așadar, un model numeric simplificat, validat experimental. Simularea colectorului solar la dimensiunile sale reale ar presupune un timp de calcul foarte mare datorită unei grile de discretizare foarte mare, un timp care ar fi practic nefezabil pentru finalizarea studiilor. Profilele și câmpurile de temperatură și viteză obținute în urma primului studiu au fost așadar integrate în modelul numeric al colectorului solar cu PCM de mari dimensiuni. După realizarea modelului numeric ce analizează curgerea aerului prin orificiile lobate (placa absorbantă) am continuat cu modelarea propriu-zisă a colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate. Câmpurile de viteză și temperatură rezultate în urma primului model (outlet la 10De), au constituit date de intrare pentru noul model numeric (inlet). Modelarea întregului colector solar ar presupune o discretizare spațială complexă, respectiv un număr foarte mare de celule în grila de calcul pentru a putea surprinde cu precizie fenomenele ce au loc.

Modelele numerice realizate, validate experimental, reprezintă o altă contribuție originală a acestei lucrări, în literatura de specialitate nefiind identificate modele similare neexistând studii privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer de mari dimensiuni cu orificii lobate. Modelul numeric realizat va fi aprofundat și dezvoltat în cadrul studiilor post-doctorale aceasta variantă fiind una simplificată pentru optimizarea timpilor de calcul în regim tranzitoriu. Acest model va sta la baza studiilor parametrice ce se vor efectua pentru optimizarea prototipului colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate. Vor fi studiate diferite tipuri de materiale de cu schimbare de fază cu diferite temperaturi de topire/solidificare, diferite cantități de materiale, diferite tipuri de materiale inerțiale, diferite debite ale aerului vehiculat, poziționări diferite ale șicanei cu PCM în interiorul cavității de aer, diferite geometrii ale orificiilor ș.a. cu scopul de a optimiza colectorul solar până la identificarea soluției optime.

Mai mult decât atât, studiile realizate au evidențiat o descărcare lentă a energiei stocate în materialele cu schimbare de fază, fapt semnalat și în literatura de specialitate. Studiile viitoare se vor axa pe îmbunătățirea conductivității termice a recipientelor rectangulare de aluminiu cu materiale cu schimbare de fază integrate prin montarea unor aripioare metalice cu rol în sporirea suprafeței de schimb de căldură. Alte metode inovatoare de sporire a transferului termic se referă la implementarea nano-particulelor în materialele cu schimbare de fază, care a dat naștere unui sector studiat intens în ultimii trei ani numit studiu materialelor cu schimbare de fază îmbunătățite cu nano-particule [35]. Literatura de specialitate evidențiază faptul ca folosind aripioare metalice, particule metalice sau nano-particule, eficiența transferului termic și viteza proceselor de topire/solidificare poate fi îmbunătățită la integrare materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare [36-38]. Leong et al. [39] evidențiază faptul ca proprietățile ideale ale materialelor inerțiale cu nano-particule integrate sunt: conductivitate termică mare, capacitate mare de stocare a energiei, temperatură de schimbare de fază potrivită aplicației studiate, variații mici de volum, cost redus de investiție, stabilitate mare și temperatură scăzută de subrăcire. Există o serie de nano-particule ce pot fi implementate care utilizează metalul, oxizi metalici, spume metalice, nano-tuburi de carbon, nano-particule de carbon, grafen și grafit, iar tehnologiile actuale pot produce nano-particule foarte mici [39]. Grafenul și grafitul sunt printre cele mai bune nano-particule ce pot fi integrate în materialele cu schimbare de fază și pot determina o conductivitate termică cu 101.2% mai mare pentru doar 3% concentrație [40]. Mai mult, utilizând nano-particule de grafit în concentrații cuprinse între 0 și 10%, conductivitatea termică poate fi îmbunătățită cu 540 până la 1000%, dar trebuie acordată atenție capacității de stocare [41]. Așadar, materialele cu schimbare de fază cu nano-particule integrate au potențialul de a spori și mai mult perioada de funcționare a colectoarelor solare cu aer, astfel de sisteme nefiind studiate până în prezent [36, 42, 43].

Concluzia prezentului studiu este că implementarea materialelor cu schimbare de fază în sisteme solare este o soluție de viitor ce poate crește gradul de implementare a acestora în clădiri prin creșterea eficienței globale și a numărului de ore de funcționare a acestora. Implementarea pe scară largă a colectoarelor solare cu aer și a materialelor cu schimbare de fază va scădea treptat costurile de investiție, iar perioada lor de amortizare va fi din ce în ce mai atractivă, devenit în timp soluții uzuale în aplicațiile din clădiri.

Referințe bibliografice – selecție

1. Catalina, T., A. Bejan, C. Butacu, M.-T. Pasti, and e. al., *Case eficiente energetic de la teorie la practica. Casa solara EFdeN*, ed. M. ROM. 2015.
2. Navarro, L., A. de Gracia, S. Colclough, M. Browne, S.J. McCormack, P. Griffiths, and L.F. Cabeza, *Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems*. Renewable Energy, 2016. **88**: p. 526-547.
3. Hengstberger, F., C. Zauner, K. Resch, S. Holper, and M. Grobbauer, *High temperature phase change materials for the overheating protection of facade integrated solar thermal collectors*. Energy and Buildings, 2016. **124**: p. 1-6.
4. Heier, J., C. Bales, and V. Martin, *Combining thermal energy storage with buildings – a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **42**: p. 1305-1325.
5. *Australia's guide to environmentally sustainable homes*. Australian Government, Department of Climate Change and Energy Efficiency. 2010.
6. Khadiran, T., M.Z. Hussein, Z. Zainal, and R. Rusli, *Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **57**: p. 916-928.
7. Soares, N., J.J. Costa, A.R. Gaspar, and P. Santos, *Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency*. Energy and Buildings, 2013. **59**: p. 82-103.
8. Kylii, A. and P.A. Fokaides, *Life Cycle Assessment (LCA) of Phase Change Materials (PCMs) for building applications: A review*. Journal of Building Engineering, 2016. **6**: p. 133-143.

9. IEA. *Solar's Untapped Potential*. 2005; Available from: <http://www.iea-shc.org/solarenergy/potential.htm>.
10. Paya-Marin, M.A., *Chapter 5 - Solar Air Collectors for Cost-Effective Energy-Efficient Retrofitting*, in *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*. 2017, Woodhead Publishing. p. 141-168.
11. Shukla, A., D.N. Nkwetta, Y.J. Cho, V. Stevenson, and P. Jones, *A state of art review on the performance of transpired solar collector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(6): p. 3975-3985.
12. Alkilani, M.M., K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, and M.H. Ruslan, *Review of solar air collectors with thermal storage units*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1476-1490.
13. Rubitherm. [cited 2017]; Available from: <https://www.rubitherm.eu/en/productCategories.html>.
14. Poole, M.R., S.B. Shah, M.D. Boyette, L.F. Stikeleather, and T. Cleveland, *Performance of a coupled transpired solar collector—phase change material-based thermal energy storage system*. Energy and Buildings, 2018. **161**: p. 72-79.
15. Bejan, A.S., T. Catalina, and A.T. Munteanu, *Indoor Environmental Quality Experimental Studies in an Energy-efficient Building. Case study: EFdeN Project*. Energy Procedia, 2017. **112**: p. 269-276.
16. Entrop, A.G., H.J.H. Brouwers, and A.H.M.E. Reinders, *Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses*. Solar Energy, 2011. **85**(5): p. 1007-1020.
17. Kuznik, F. and J. Virgone, *Experimental assessment of a phase change material for wall building use*. Applied Energy, 2009. **86**(10): p. 2038-2046.
18. Kuznik, F., J. Virgone, and J.-J. Roux, *Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation*. Energy and Buildings, 2008. **40**(2): p. 148-156.
19. Navarro, L., A. de Gracia, A. Castell, and L.F. Cabeza, *Experimental evaluation of a concrete core slab with phase change materials for cooling purposes*. Energy and Buildings, 2016. **116**: p. 411-419.
20. Navarro, L., A.d. Gracia, A. Castell, and L.F. Cabeza, *Experimental study of an active slab with PCM coupled to a solar air collector for heating purposes*. Energy and Buildings, 2016. **128**: p. 12-21.
21. Silva, T., R. Vicente, N. Soares, and V. Ferreira, *Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution*. Energy and Buildings, 2012. **49**: p. 235-245.
22. Soares, N., A.R. Gaspar, P. Santos, and J.J. Costa, *Experimental study of the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials*. Applied Energy, 2015. **142**: p. 192-205.
23. Soares, N., A.R. Gaspar, P. Santos, and J.J. Costa, *Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications*. Energy and Buildings, 2016. **116**: p. 18-34.
24. Dutil, Y., D. Rousse, S. Lassue, L. Zalewski, A. Joulin, J. Virgone, F. Kuznik, K. Johannes, J.-P. Dumas, J.-P. Bédécarrats, A. Castell, and L.F. Cabeza, *Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation*. Renewable Energy, 2014. **61**: p. 132-135.
25. Sharma, A., V.V. Tyagi, C.R. Chen, and D. Buddhi, *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(2): p. 318-345.
26. Croitoru, C., I. Nastase, I. Voicu, A. Meslem, and M. Sandu, *Thermal Evaluation of an Innovative Type of Unglazed Solar Collector for Air Preheating*. Energy Procedia, 2016. **85**: p. 149-155.
27. Croitoru, C., I. Nastase, F. Bode, and A. Meslem, *Thermodynamic investigation on an innovative unglazed transpired solar collector*. Solar Energy, 2016. **131**: p. 21-29.
28. ANSYS, Manual - Ansys Fluent Chapter 4.1.5. The k-omega and SST Models.
29. Ji, Y., *CFD modelling of natural convection in air cavities*. CFD Letters, 2014. **Vol. 6 (1)**.
30. Croitoru, C. and I. Colda, *Studii teoretice si experimentale referitoare la influenta turbulentei aerului din incaperile climatizate asupra confortului termic*. 2011.
31. Bruno, F., *USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCMs) FOR SPACE HEATING AND COOLING IN BUILDINGS*, in *AIRAH performance enhanced buildings environmentally sustainable design conference*. 2005.
32. Nkwetta, D.N. and F. Haghighat, *Thermal energy storage with phase change material—A state-of-the art review*. Sustainable Cities and Society, 2014. **10**: p. 87-100.
33. Tyagi, V.V. and D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(6): p. 1146-1166.
34. Zhang, T., Y. Tan, H. Yang, and X. Zhang, *The application of air layers in building envelopes: A review*. Applied Energy, 2016. **165**: p. 707-734.
35. Ma, Z., W. Lin, and M.I. Sohel, *Nano-enhanced phase change materials for improved building performance*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **58**: p. 1256-1268.
36. Khan, M.M.A., N.I. Ibrahim, I.M. Mahbubul, H. Muhammad. Ali, R. Saidur, and F.A. Al-Sulaiman, *Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: A review*. Solar Energy, 2018. **166**: p. 334-350.
37. Kasaeian, A., L. bahrami, F. Pourfayaz, E. Khodabandeh, and W.-M. Yan, *Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review*. Energy and Buildings, 2017. **154**: p. 96-112.
38. Li, W., D. Zhang, T. Jing, M. Gao, P. Liu, G. He, and F. Qin, *Nano-encapsulated phase change material slurry (Nano-PCMS) saturated in metal foam: A new stable and efficient strategy for passive thermal management*. Energy, 2018. **165**: p. 743-751.
39. Leong, K.Y., M.R. Abdul Rahman, and B.A. Gurnathan, *Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges*. Journal of Energy Storage, 2019. **21**: p. 18-31.
40. Dsilva Winfred Rufuss, D., L. Suganthi, S. Iniyan, and P.A. Davies, *Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity*. Journal of Cleaner Production, 2018. **192**: p. 9-29.
41. Zayed, M.E., J. Zhao, A.H. Elsheikh, Y. Du, F.A. Hammad, L. Ma, A.E. Kabeel, and S. Sadek, *Performance augmentation of flat plate solar water collector using phase change materials and nanocomposite phase change materials: A review*. Process Safety and Environmental Protection, 2019. **128**: p. 135-157.
42. Al-Jethelah, M., S.H. Tasnim, S. Mahmud, and A. Dutta, *Nano-PCM filled energy storage system for solar-thermal applications*. Renewable Energy, 2018. **126**: p. 137-155.
43. Qiu, L., Y. Ouyang, Y. Feng, and X. Zhang, *Review on micro/nano phase change materials for solar thermal applications*. Renewable Energy, 2019. **140**: p. 513-538.