



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie a Instalațiilor

Departamentul de Sisteme Termo-Hidraulice și Protecția Atmosferei

RAPORT DE CERCETARE

**STUDIU NUMERIC PRIVIND IMPLEMENTAREA MATERIALELOR
CU SCHIMBARE DE FAZA IN COLECTOARE SOLARE CU AER**

Doctorand

Ing. Andrei – Stelian BEJAN

Coordonator științific

Conf. univ. dr. ing. Tiberiu CATALINA

BUCUREȘTI

2018

CUPRINS

CUPRINS 2

Lista de figuri	3
-----------------------	---

Lista de tabele.....	6
----------------------	---

REZUMAT 7

1. Introducere, studiu bibliografic.....	9
--	---

1.1. Studiu bibliografic general.....	9
---------------------------------------	---

1.2. Modelarea numerică a colectoarelor solare și a materialelor cu schimbare de fază	15
---	----

1.3. Concluzii și perspective	18
-------------------------------------	----

2. Geometria sistemului și rezultatele studiilor experimentale – sinteza	19
--	----

2.1. Geometrie, materiale	19
---------------------------------	----

2.2. Rezultate regim permanent.....	22
-------------------------------------	----

3. Obiectivele studiului numeric și infrastructura utilizată.....	25
---	----

4. Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate (placa absorbanta)	26
--	----

4.1 Realizarea modelului geometric.....	26
---	----

4.2 Crearea grilei de calcul (studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării)	28
--	----

4.3 Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal	38
---	----

4.4 Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația temperaturilor rezultate	43
--	----

4.5 Parametrii finali ai modelului numeric și rezultate	45
---	----

5. Realizarea unui model numeric pentru colectorul solar cu orificii lobate și materiale cu schimbare de fază integrate – model simplificat.....	49
--	----

5.1. Realizarea modelului geometric	49
---	----

5.2. Crearea grilei de calcul (studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării)	51
---	----

5.3. Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația variației temperaturilor în timp ..	59
--	----

5.4. Parametrii finali ai modelului numeric și rezultate.....	69
---	----

6. Concluzii și perspective	73
-----------------------------------	----

7. Conferințe și publicații	76
-----------------------------------	----

Referințe	78
-----------------	----

Lista de figuri

Figura 1	Model de colector solar termic opac (perforat) [3]	9
Figura 2	Tipuri de geometrii utilizate pentru orificiile plăcii absorbante [19]	11
Figura 3	Diferența de temperatură obținută pentru cele 5 tipuri de geometrii la $110 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ și $190 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ absorbante [19]	11
Figura 4	Eficiența termică a colectorului solar în funcție de debit [19]	11
Figura 5	Geometria colectorului solar: a – vedere din față, b – secțiune longitudinală	20
Figura 6	Geometria colectorului solar: a – amplasare senzori, b – amplasare strat PCM	21
Figura 7	Geometria colectorului solar: a – placă absorbantă, b – gura de aspirație aerului din cavitatea colectorului, c – plenum de amestec, d – peretele posterior al colectorului, e – cadru metalic pentru PCM	21
Figura 8	Stand experimental	22
Figura 9	Variația temperaturilor pentru colectorul fără PCM	22
Figura 10	Variația temperaturilor pentru colectorul cu PCM	23
Figura 11	Stratificarea termică în interiorul colectorului fără PCM	23
Figura 12	Stratificarea termică în interiorul colectorului cu PCM	23
Figura 13	Diferența de temperatură dintre aerul evacuat din colector și aerul ambiental în cazul celor două colectoare (cu și fără PCM)	24
Figura 14	Dispunerea și dimensiunile orificiilor lobate cu diametrul echivalent de 5mm	26
Figura 15	Realizarea modelului 3D în AutoCAD: a – placa absorbantă cu orificii lobate, b – extragerea unei porțiuni din placă de $4 \times 4 \text{ cm}$, c – încadrarea în domeniul de calcul, d – domeniul de calcul 3D (placa încadrată într-un paralelipiped)	26
Figura 16	Importarea geometriei din AutoCAD în ANSYS Design Modeler: a – placuța $4 \times 4 \text{ cm}$, b – domeniul de calcul și dimensiunile aferente	27
Figura 17	Importarea geometriei din AutoCAD în ANSYS Design Modeler – vedere izometrică	27
Figura 18	Eliminarea plăcii absorbante din domeniul de calcul (aerul vehiculat)	28
Figura 19	Nivelul de discretizare pentru cazurile analizate: vedere de ansamblu, detaliu orificiu, detaliu frontieră pentru a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente	29
Figura 20	Grila de calcul pentru 3 zone: inlet (limita domeniului de calcul aferentă intrării aerului ambiant), metal (frontiera plăcii metalice) și outlet (limita domeniului de calcul la 10De de placa metalică)	30
Figura 21	Importarea rezultatelor în Tecplot 360 pentru prelucrarea datelor	32
Figura 22	32	
Figura 23	Campuri de viteză ($u \text{ [m/s]}$ – mărimea vitezei) în planurile longitudinale XY și XZ pentru cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente	33
Figura 24	Campuri de temperatură în planurile longitudinale XY și XZ pentru cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente	35
Figura 25	Campuri de viteză ($u \text{ [m/s]}$ – mărimea vitezei) în plan transversal la 5De (2.5 cm) de placa metalică în cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente	36
Figura 26	Campuri de viteză ($u \text{ [m/s]}$ – mărimea vitezei) în plan transversal la 10De (5 cm) de placa metalică în cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente	37
Figura 27	Campuri de temperatură în planuri transversale	37

Figura 28	Utilizarea tehnicii PIV în măsurarea câmpurilor de viteză rezultate la trecerea aerului prin orificiile unei plăci metalice absoorbante aparținând unui colector solar de mici dimensiuni (conform [85])	38
Figura 29	Câmpuri de viteză în plan	Error! Bookmark not defined.
Figura 30	Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform măsurărilor experimentale PIV la Re2500 în centrul jetului ($Z=0\text{mm}$) (prelucrare după [3])	39
Figura 31	Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform măsurărilor experimentale PIV la Re2500 la 2.5mm de centrul jetului ($Z=+2.5\text{mm}$) (prelucrare după [3])	40
Figura 32	Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform studiului numeric la Re2500 în centrul jetului ($Z=0\text{mm}$)	41
Figura 33	Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform studiului numeric la Re2500 la 2.5mm de centrul jetului ($Z=+2.5\text{mm}$)	41
Figura 34	Variația magnitudinii vitezelor normalizate: studiu numeric vs. studiu experimental (centrul jetului $Z=0\text{mm}$)	42
Figura 35	Variația magnitudinii vitezelor normalizate: studiu numeric vs. studiu experimental (la 2.5mm de centrul jetului $Z=+2.5\text{mm}$)	42
Figura 36	Variația magnitudinii vitezelor normalizate: studiu numeric vs. studiu experimental (la 2.5mm de centrul jetului $Z=+2.5\text{mm}$)	Error! Bookmark not defined.
Figura 37	Câmpurile de temperatură pentru punctul 1 studiat	44
Figura 38	Câmpurile de temperatură pentru punctul 2 studiat	45
Figura 39	Imagini tipice pentru convergența reziduurilor pentru o rulare în regim staționar: a – după 2000 de iterații, b – după 10000 de iterații	46
Figura 40	Câmpuri de viteză la diferite distanțe față de placa metlică absorbantă	47
Figura 41	Câmpuri de viteză și temperatură în planurile longitudinale XY și XZ	47
Figura 42	Vectori de viteză în planul longitudinal XY	47
Figura 43	Vectori de viteză în diferite planuri transversale	48
Figura 44	Câmpuri de viteză și temperatură în planurile longitudinale XY pentru 7 orificii	48
Figura 45	Realizarea geometriei 3D în AutoCAD: a – placa absorbantă cu orificii lobate, b – extragerea unei "felii" din colectorul solar și componentele acesteia	49
Figura 46	Importarea geometriei din AutoCAD în ANSYS DesignModeler: a – vedere din lateral; b – vedere izometrică	50
Figura 47	Definirea corpurilor în ANSYS DesignModeler: a – cavitatea corespunzătoare curgerii aerului prin colector; b – corp PCM	50
Figura 48	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 viteze ce se va integra pe noul inlet	51
Figura 49	Nivelul de discretizare pentru cazurile analizate fara PCM: a) 0.2 (0.18), b) 0.66 (0.61), c) 1.3 (0.7), d) 2.8 (1), e) 5 (2.5), f) 6 (3.5) milioane de elemente	53
Figura 50	Condiții la limită	54
Figura 51	Câmpuri de viteză importante din modelul studiat în capitolul precedent și prelucrate în Tecplot	54
Figura 52	Câmpuri de viteză importante din modelul studiat în capitolul precedent în modelul colectorului solar cu PCM	54

Figura 53	Câmpuri de temperatură în plan longitudinal (simetrie): a) 0.2 (0.18), b) 0.66 (0.61), c) 1.3 (0.7), d) 2.8 (1), e) 5 (2.5), f) 6 (3.5) milioane de elemente (scara temperaturii este în °C)	56
Figura 54	Câmpuri de viteză în plan longitudinal (simetrie): a) 0.2 (0.18), b) 0.66 (0.61), c) 1.3 (0.7), d) 2.8 (1), e) 5 (2.5), f) 6 (3.5) milioane de elemente (scara vitezei este în m/s)	58
Figura 55	Câmpuri de viteză în plan longitudinal	58
Figura 56	Nivelul de discretizare pentru cazul final cu PCM – 5 milioane de elemente	59
Figura 57	Interval de timp extras din studiul experimental pentru validarea numerică – 2 ore, respectiv 7200 secunde	59
Figura 58	Variația de temperatură pentru două ore pentru placa metalică absorbantă și temperatura ambientală (aerul aspirat în colector)	60
Figura 59	Extragerea ecuațiilor de variație a temperaturii plăcii metalice și temperaturii ambientale pentru obținerea condițiilor la limită variabile (UDF): încălzirea (I), oprirea radiației solare (II) și răcirea (III)	61
Figura 60	Validarea experimentală a modelului numeric – curgerea prin placa cu orificii lobate	63
Figura 61	a - Geometria colectorului cu PCM și b - grila de discretizare cu PCM (5 milioane de celule)	64
Figura 62	Variația capacității de stocare a energiei în funcție de temperatură [88]	65
Figura 63	Variația de temperatură pentru două ore	65
Figura 64	Extragerea ecuațiilor de variație a temperaturii în prima cavitate de aer la 5De pentru obținerea condițiilor la limită variabile (UDF): încălzirea (I), oprirea radiației solare (II) și răcirea (III)	66
Figura 65	Rezultatele studiului numeric vs. experimental: T100	68
Figura 66	Rezultatele studiului numeric vs. experimental: Toutlet și Tinlet	69
Figura 67	Imagini tipice pentru convergența reziduurilor pentru o rulare în regim staționar: a – până la 1700 de iterații, b – după 4000 de iterații	70
Figura 68	Rezultatele studiului numeric în regim permanent după 550 iterații (punctul de plecare pentru studiul în regim tranzitoriu): a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	71
Figura 69	Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 600s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	71
Figura 70	Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 1200s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	71
Figura 71	Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 1800s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	72
Figura 72	Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 2400s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	72
Figura 73	Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 3000s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	72
Figura 74	Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 7200s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze	73
Figura 75	Diseminare rezultate – Solar World Congress SWC 2017, Abu Dhabi, EUA	77
Figura 76	Diseminare rezultate – EENVIRO Conference 2017, București, România	77
Figura 77	Diseminarea rezultatelor – comisie LP2M2E Laboratory, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco	77

Lista de tabele

Tabel 1.	Soft-uri de simulare numerică utilizate pentru studiul colectoarelor solare cu aee.....	16
Tabel 2.	Soft-uri utilizate pentru simularea numerică a materialelor cu schimbare de fază.....	17
Tabel 3.	Condiții la limită utilizate în cadrul studiului de independență a mesh-ului.....	30
Tabel 4.	Condiții la limită utilizate pentru validarea modelului numeric	41
Tabel 5.	Condiții la limită utilizate pentru punctul 1.....	44
Tabel 6.	Condiții la limită utilizate utilizate pentru punctul 2	44
Tabel 7.	Condiții la limită utilizate în cadrul studiului de independență a mesh-ului.....	53
Tabel 8.	Condiții la limită utilizate pentru modelarea curgerii prin orificii lobate în regim tranzitoriu	63
Tabel 9.	Caracteristicile materialului cu schimbare de fază utilizat în studiile experimentale [88]	64
Tabel 10.	Condiții la limită utilizate în cadrul validării numerice a colectorului solar cu materiale cu schimbare de fază integrate	68

REZUMAT

Prezenta lucrare reprezintă al treilea raport din cadrul studiilor doctorale și prezintă stadiul studiilor numerice preliminare realizate până în prezent. Cele trei rapoarte de cercetare au fost structurate astfel:

- a) Raportul de cercetare 1, respectiv studiul bibliografic complex privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în clădiri și colectoare solare
- b) Raportul de cercetare 2, respectiv studiul experimental asupra implementării materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer
- c) Raportul de cercetare 3, respectiv studiul numeric privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer

Lucrarea este compusă dintr-o serie de capitole ce tratează implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer, respectiv:

- Studiu bibliografic implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer
- Prezentarea geometriei sistemului și a materialelor componente
- Realizarea modelului numeric ce analizează curgerea aerului prin orificiile lobate ale colectorului
- Realizarea modelului numeric ce analizează implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectorul solar propus
- Concluzii și perspective

În contextul energetic actual, acela al consumurilor tot mai mari de energie, al dezvoltării mondiale continue și al emisiilor mari de CO₂ este tot mai importantă implementarea de materiale performante, sisteme ce utilizează surse regenerabile de energie și sisteme eficiente din punct de vedere energetic în sectorul construcțiilor, pentru a atinge confortul termic interior cu un consum minim de energie.

Implementarea materialelor cu schimbare de fază reprezintă o strategie cu un potențial enorm, un subiect din ce în ce mai atragător pentru cercetătorii din toată lumea. Ele au potențialul de a reduce consumurile de energie pentru răcire prin absorbția căldurii latente din mediu sau prin îmbunătățirea răcirii nocturne (masă termică suplimentară), de a reduce consumurile de energie pentru încălzire prin sporirea capacității de stocare a căldurii, în special pentru clădirile cu masă termică scăzută, de a îmbunătăți confortul termic prin ameliorarea variațiilor de temperatură din interiorul clădirii și de a acoperi vârfurile de consum, contribuind la subdimensionarea sistemelor HVAC. Materialele cu schimbare de fază au fost de-a lungul timpului integrate în pereții exteriori ai clădirilor, pereții interiori, sisteme HVAC, pereți Trombe, colectoare solare cu aer ș.a.. Ele au potențialul de a contribui la eficientizarea sistemelor ce utilizează surse regenerabile de energie

prin acumularea energiei pe perioade lungi și utilizarea acesteia atunci când este necesară consumatorului (de exemplu pe timpul nopții).

Colectoarele solare cu aer reprezintă sisteme cu un cost de investiție scăzut ce au potențialul de a contribui la reducerea consumurilor de energie pentru încălzire și ventilare, iar colectoarele solare perforate constituie una dintre cele mai eficiente soluții în ceea ce privește analiza cost-beneficiu. Colectoarele solare perforate sunt studiate de mai bine de 30 de ani, dar încă nu și-au atins potențialul maxim.

Conform studiul bibliografic realizat materialele cu schimbare de fază nu au fost implementate până în prezent în colectoare solare perforate, acest sistem fiind o noutate absolută în literatură. Colectorul solar cu geometrii lobate are potențialul de a spori transferul termic și de a crește eficiența colectorului solar, iar materialele inerțiale contribuie la ameliorarea variațiilor de temperatură la ieșirea din colector și defazarea energiei termice acumulate pentru utilizarea acesteia ulterior, când este necesară consumatorilor, iar radiația solară lipsește (perioade cu nori sau noaptea). Marele avantaj al PCM este acela că dispune de o capacitate mare de acumulare a căldurii datorită căldurii latente stocate și ocupă mai puțin spațiu față de materialele convenționale.

Colectoarele solare cu materiale inerțiale înglobate au potențialul de a contribui la reducerea consumurilor de energie pentru încălzirea spațiilor, reducerea consumurilor de energie pentru încălzirea aerului proaspăt necesar ocupanților clădirii, uscarea aerului interior, păstrarea unei temperaturi de gardă în interiorul clădirilor și îmbunătățirea confortului termic interior. Adăugarea materialelor inerțiale în colectoarele solare prezintă o serie de beneficii, respectiv ameliorarea variațiilor de temperatură la ieșirea aerului din colector și acumularea de energie termică pentru utilizarea pe perioadele în care nu există suficientă radiație solară, sporind perioada de funcționare a colectorului solar.

Prezenta lucrare reprezintă ultima parte din studiile doctorale ce au drept scop analiza implementării materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu orificii lobate și vine în continuarea studiului bibliografic amplu realizat și a studiilor experimentale realizate până în prezent. Ea tratează pe rând pe lângă studiul bibliografic privind modelarea numerică a colectoarelor solare cu materiale cu schimbare de fază, o sinteză a rezultatelor experimentale obținute până în prezent, realizarea modelului numeric ce analizează curgerea prin orificii lobate și validarea experimentală a acestuia, respectiv realizarea modelului numeric ce analizează colectorul solar cu PCM și validarea experimentală aferentă acestuia.

Ultimul capitol al prezentei lucrări expune perspectivele de cercetare ce vor fi urmate până la sfârșitul studiilor doctorale și concluziile preliminare ale studiilor. Rezultatele prezentei lucrări vor fi în continuare dezvoltate și aprofundate.

Soft-urile utilizate pentru modelarea numerică și prelucrarea datelor sunt ANSYS Fluent 15.0, respectiv Tecplot 360, iar componentele hardware utilizate au fost cele din dotarea Facultății de Inginerie a Instalațiilor, Universitatea Tehnică de Construcții din București.

Surse utilizate pentru realizarea studiului bibliografic au fost: www.sciencedirect.com, www.anelis.ro, www.e-nformation.ro, www.scholar.google.com și www.researchgate.net.

1. Introducere, studiu bibliografic

1.1. *Studiu bibliografic general*

Colectoarele solare termice reprezintă o formă de utilizare a energiei solare ca sursă regenerabilă de energie. Aceste soluții sunt utilizate și studiate încă din cele mai vechi timpuri și se pot clasifica în colectoare solare cu apă și colectoare solare cu aer. Colectoarele solare cu apă sunt o variantă mai des utilizată pentru preparare apă caldă menajeră sau pentru preîncălzirea agentului termic necesar pentru încălzire. Colectoarele solare termice cu aer sunt utilizate pentru preîncălzirea aerului proaspăt necesar, pentru încălzire, pentru uscare sau pentru păstrarea unei temperaturi minime pe timpul iernii. Spre deosebire de colectoarele cu apă, cele cu aer au avantajul faptului că nu există risc de îngheț și au un impact mai redus asupra mediului [1]. Conform Goyal et al. [2] colectoarele solare termice cu aer pot furniza o temperatură de până la 65°C.

În funcție de caracteristicile constructive, colectoarele solare cu aer se pot clasifica în mai multe moduri. Astfel, conform Lai et al. [3] colectoare solare cu aer se pot grupa în:

- a) colectoare solare opace
- b) colectoare solare transparente sau vitrate.

Colectoarele solare opace pot fi la rândul lor de mai multe tipuri: colectoare solare în care elementul absorbant este plan, colectoare solare în care elementul absorbant este perforat sau colectoare solare în care elementul absorbant opac este protejat cu un strat de sticlă.

Indiferent de tipul acestora, principiul de funcționare al colectoarelor solare este același. Radiația solară este captată de un element absorbant care cedează căldura către aerul vehiculat prin cavitatea formată. În cazul colectoarelor solare opace, căldura este captată de regulă, de un panou metalic plan sau perforat de culoare închisă (figura 1), apoi este cedată către aerul vehiculat care este mai apoi colectat la partea superioară a colectorului și introdus în încăpere prin intermediul unui ventilator (iarna sau în perioadele de tranziție). În cazul în care exista elemente inerțiale, căldura acumulată în acestea vara, pe timpul zilei, poate fi mai apoi cedată pe timpul nopții. Pe timpul zilei, vara, colectorul solar poate funcționa ca un spațiu tampon care reduce aporturile de căldură prin anvelopă sau ca o fațadă ventilată cu același rol.

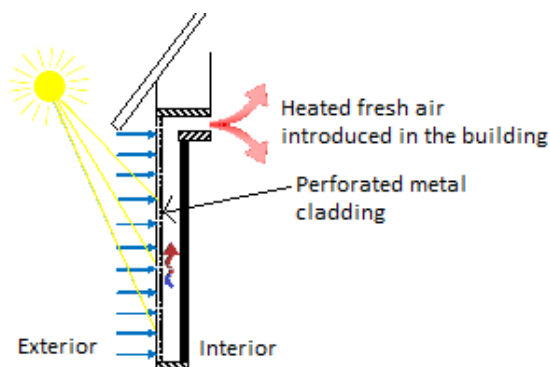


Figura 1 Model de colector solar termic opac (perforat) [4]

Colectoarele solare opace perforate au de regulă un cost mai redus de implementare și o eficiență ridicată în cazul utilizării în sisteme de încălzire, sisteme de preîncălzire a aerului proaspăt sau sistem de uscare [5] și de asemenea pot avea costuri mai reduse pe durata de viață [1]. Colectoarele solare opace se utilizează de regulă pentru aplicații unde temperatura solicitată este mai scăzută [6], iar vânturile laterale nu sunt foarte puternice [7].

Conform studiilor efectuate până în prezent [5, 8-14], colectoarele solare cu aer se pot utiliza pentru următoarele aplicații, având un potențial enorm de reducere a consumurilor de energie și a costurilor de exploatare [10]:

- încălzirea clădirilor
- menținerea unei temperaturi de gardă în spații industriale și uscarea acestora
- uscarea alimentelor
- preîncălzirea aerului proaspăt necesar
- încălzirea și uscarea serelor
- îmbunătățirea eficienței sistemelor fotovoltaice
- reducerea consumului de energie pentru răcire.

Conform Leon și Kumar [10], colectoarele solare cu aer au fost utilizate de multe ori pentru uscare, utilizându-se colectoare cu suprafețe cuprinse între 90-1300mp ce au furnizat o temperatură a aerului între 27-70°C. Din punct de vedere al implementării în clădiri, colectoarele solare cu aer au fost montate [8, 9, 11, 15]: în pereții exteriori (ca fațade solare sau fațade ventilate), în acoperis (ca acoperis ventilat) sau ca sisteme individuale montate pe acoperiș, fațadă sau exteriorul clădirii. O altă soluție interesantă presupune utilizarea colectoarelor solare cu aer pentru încălzirea aerului sau a agentului termic necesar pompelor de căldură [16, 17], în acest mod coeficientul de performanță al pompelor de căldură aer-apă putând fi îmbunătățit. Conform Ciriminna et al. [13] principalul obstacol în implementarea colectoarelor solare cu aer este notorietatea scăzută în piață și accesul dificil la acest tip de tehnologie.

Conform cercetărilor efectuate [11, 18] parametrii importanți ce definesc funcționarea colectoarelor solare opace perforate sunt:

- pasul dintre perforații (și porozitatea plăcii)
- diametrul perforațiilor și forma perforațiilor
- dimensiunea plenumului (cavitatea de curgerea a aerului)
- coeficientul de absorbție al elementului absorbant
- temperatura ambientală
- densitatea aerului
- vâscozitatea cinematică
- conductivitatea termică a aerului
- radiația solară incidentă pe colectorul solar

- debitul de aer și viteza de aspirație
- viteza vântului (lateral sau frontal)
- temperatura plăcii absorbante
- temperatura aerului evacuat.

Un studiu numeric realizat de Van Decker et al. [19] asupra unui colector opac cu perforații arată faptul ca aproximativ 62% din energia termică este cedată aerului în fața plăcii absorbante, 28% în orificiu și aproximativ 10% în spatele plăcii, iar eficiența transferului termic scade odată cu creșterea vitezei de aspirație, a pasului dintre orificii și a diametrului orificiilor, și crește odată cu creșterea vitezei vântului și a grosimii plăcii.

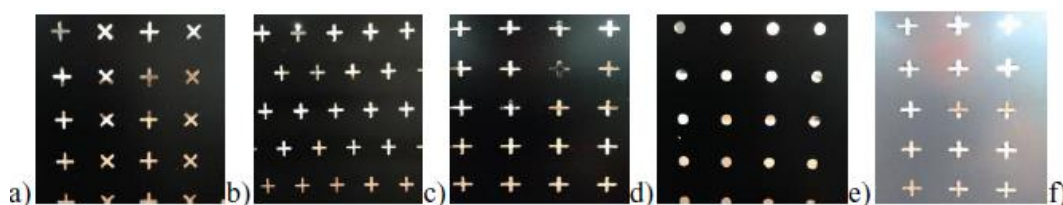


Figura 2 Tipuri de geometrii utilizate pentru orificiile plăcii absorbante [20]

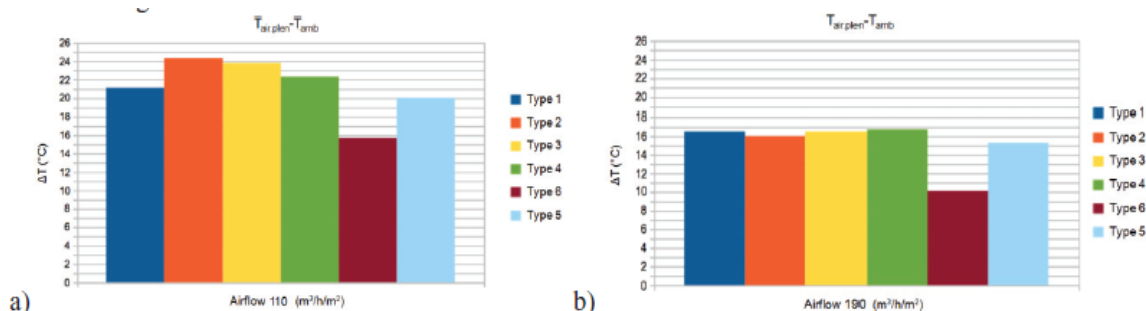


Figura 3 Diferența de temperatură obținută pentru cele 5 tipuri de geometrii la $110 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ și $190 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ [20]

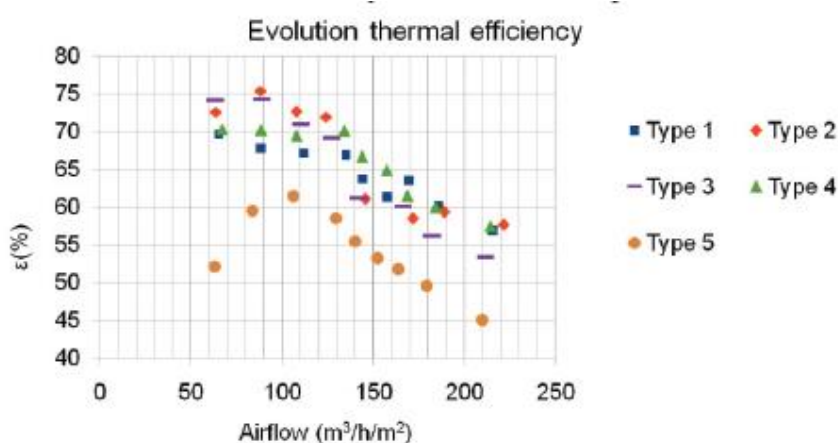


Figura 4 Eficiența termică a colectorului solar în funcție de debit [20]

Un colector solar opac cu perforații cu o eficiență ridicată a fost propus de Croitoru et al. [4, 20]. Studiul propune utilizarea geometriilor lobate în locul celor circulare utilizate ca perforații în colectoarele solare clasice. În figura 2 sunt prezentate tipurile de orificii studiate, iar în figurile 3 și 4 sunt prezentate

rezultatele obținute. Geometriile lobate utilizate sunt cu 15% mai eficiente pentru debite cuprinse între 80-220 m³/h/m² și pot determina o temperatură a aerului evacuat mai mare cu până la 2°C. Forma neconvențională a orificiilor lobate determină o curgere mai complexă ce îmbunătățește transferul termic cu aproximativ 40% [4].

Deși pentru eficiența unui perete Trombe, masa termică este esențială [21], iar tipul de material utilizat cu rol în a mări inerția termică este foarte important, elementele inerțiale nu sunt foarte des implementate și în cazul colectoarelor solare perforate. Pentru a putea folosi energia solară în momentele în care este ea este necesară este foarte importantă acumularea acesteia în sisteme inerțiale [22]. Conform Navarro et al. [23] sistemele ce utilizează energia solară combinate cu elemente inerțiale sunt o alternativă foarte bună la sistemele clasice, integrarea materialelor cu schimbare de fază ce stochează căldură latentă având un impact mai mare față de materialele clasice.

Materialele cu rol de stocare a energiei termice se pot clasifica în funcție de modul de stocare a energiei astfel: stocare de căldura sensibilă, stocare de căldură latentă și stocare de căldura provenită din reacții chimice [24]. 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 [25, 26]. Conform Soares et al. [25], 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.

Elementele inerțiale ce se pot utiliza pentru creșterea performanțelor colectorului solar pot fi materiale clasice ce stochează căldura sensibilă (piatră, cărămidă, beton, apă, granit, nisip, pământ) sau materiale ce stochează căldura latentă [2], de tip materiale cu schimbare de fază. Conform Goyal et al. [2] prin utilizarea masei termice în colectoare solare energia termică este stocată pe timpul zilei și apoi descărcată pe timpul nopții, temperatura aerului evacuat ajunând până la aproximativ 46°C. Același autor subliniază faptul că odată cu creșterea grosimii stratului de masă termică, eficiența colectorului scade, deoarece

materialul stochează și cedează energia termică într-o perioadă mai lungă de timp.

Conform Alkilani et al. [8] colectoarele solare cu aer cu elemente inerțiale înglobate reprezintă una dintre cele mai eficiente metode de utilizare a energiei solare și poate avea mediul ce stochează energia integrat în sistem (în elementul absorbant sau perete) sau separat de sistem (în baterii de stocare). În momentul în care mediul este separat de sistem, căldura obținută poate fi folosită, de exemplu, direct pentru încălzirea spațiilor, iar surplusul poate fi stocat într-o "baterie" cu materiale inerțiale (beton, PCM, apă ș.a.). Dacă mediul ce stochează energia termică este integrat în colectorul solar, colectarea, stocarea și cedarea energiei către aer spre produce în același timp, iar în momentul în care radiația solara nu este suficientă, materialele cu inerție termică cedează căldura, eficientizând și prelungind durata de funcționare a colectorului. În cazul în care se implementează elemente de stocare a energiei în colectoare solare, capacitatea de colectare a energiei solare este mult îmbunătățită [7].

Conform studiilor efectuate până în prezent, materialele cu schimbare de fază organice (parafine) prezintă o serie de avantaje și dezavantaje ce determină posibilitatea implementării lor în clădiri și sisteme din clădiri [24, 25, 27, 28]:

a) Avantaje:

- disponibile într-o gamă largă de temperaturi (20 –70°C)
- inerte din punct de vedere chimic
- stabile în timp (multe cicluri de schimbare de fază)
- valori ridicate ale căldurii latente de schimbare de fază (120-210 J/g)
- valori ridicate ale căldurii specifice (spre deosebire de sărurile hidrate)
- necorozive (doar acizii grași sunt ușor corozivi)
- cost scăzut (în special pentru parafinele comerciale, acizii grași au cost de aproximativ 2-2.5 ori mai mare decât parafina)
- compatibile cu materialele de construcții
- variații mici de volum la schimbarea de fază
- inofensive (nu sunt toxice sau iritante, doar anumite non-parafine au un anumit grad de toxicitate)
- stabile sub 500 °C
- reciclabile

b) Dezavantaje:

- conductivitate termică scăzută (aproximativ 0.2 W/mK)
- ușor inflamabile
- nu sunt compatibile cu recipiente din plastic.

Conform Paloma et al. [29] cea mai importantă proprietate a materialelor cu schimbare de fază în cazul implementării acestora în clădiri este capacitatea de stocare a energiei termice (care trebuie să fie cât mai mare). De asemenea, conform aceluiași autor, foarte importante sunt temperatura de schimbare de fază, conductivitatea termică, densitatea, vâscozitatea, inflamabilitatea și stabilitatea în timp. Mai mulți cercetători au studiat și clasificat proprietățile utile ale PCM [24, 25, 27, 30-32], cele mai importante criterii ce guvernează selecția acestora pentru a stoca energie termică fiind:

a) Proprietăți termice și fizice:

- temperatură de schimbare de fază conform cu temperaturile de operare (de exemplu temperaturile interioare dintr-o clădire sau temperatura de lucru a colectoarelor solare)
- valori ridicate ale conductivității termice
- capacitate specifică de stocare a căldurii latente mare
- densitate mare și căldură specifică mare
- stabilitate termică în timp și stabilitate în timpul schimbării de fază
- variații mici de volum la schimbarea de fază
- presiune mică a vaporilor la temperatura de operare

b) Proprietăți cinetice:

- rată mare de cristalizare (ciclu complet de schimbare de fază)
- fără suprarăcire

c) Proprietăți chimice:

- cicluri reversibile complete de topire/solidificare
- stabilitate chimică în timp și păstrarea proprietăților în timp după un număr mare de cicluri de schimbare de fază
- necorozive și compatibile cu materialele de construcții
- netoxice, neinflamabile, non-explozive

d) Proprietăți economice:

- disponibile pe piață în cantități mari
- cost redus

e) Proprietăți referitoare la impactul asupra mediului:

- energie înglobată redusă pentru producerea materialului
- potențial de reciclare (posibilitatea de a fi separate de materialele în care sunt înglobate)
- materiale nepoluante.

Conform literaturii studiate, există mai multe modalități prin care materialele cu schimbare de fază pot fi utilizate în clădiri [24, 28, 32-35], iar cele mai utilizate metode sunt microîncapsularea și macroîncapsularea. Conform Iten și Liu [36] pentru a alege recipientul optim pentru diferite aplicații este important să cunoaștem: detalii despre aplicație și spațiul disponibil, condițiile la limită și materialele aferente. Aceiași autori menționează faptul că recipientele metalice sunt cele mai utilizate în scopul de a spori conductivitatea termică (în special aluminiul, cuprul și oțelul) și, de asemenea, recipientele rectangulare sunt cele mai des utilizate datorită construcției facile și densității mari de stocare a materialului (până la 90% din volumul total). Totodată, acestea sunt foarte ușor de montat și încadrat în spațiul disponibil. Pe lângă geometrie și materialul din care este confecționat, un alt aspect important al recipientului metalic cu materiale cu schimbare de fază este poziția acestuia față de verticală [37] ce poate avea un rol determinant în ceea ce privește transferul termic, aceasta influențând convecția naturală în cavitatea creată [38]. În cele mai multe studii experimentale și numerice, fenomenul de convecție în interiorul cavității este neglijat.

Conform studiilor bibliografice ample realizate până în prezent [8, 9, 11, 15, 30, 39] sistemele alcătuite din colectoare solare opace perforate și materiale cu schimbare de fază au fost foarte puțin studiate. 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. Conform Nkwetta et al. [9] colectoarele solare cu perforații cu materiale cu schimbare de fază integrate au potențialul de a reduce consumurile de energie și de a stoca energia pentru utilizarea ei pe timpul serii, atunci când este nevoie de aceasta.

1.2. Modelarea numerică a colectoarelor solare și a materialelor cu schimbare de fază

Conform studiului bibliografic realizat, pentru analiza numerică a colectoarelor solare s-au utilizat diverse tipuri de programe de simulare, acestea fiind prezentate în tabelul de mai jos:

Tabel 1. Soft-uri de simulare numerică utilizate pentru studiul colectoarelor solare cu aer

Soft utilizat	Studiu	Referință
TASCflow	A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind condition	[40]
a u m	Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired plate collectors	[41]
	Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area	[42]
	Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors	[5]
	The performance of first transpired solar collector installation in Turkey	[43]
TRNSYS	Validation of Unglazed Transpired Solar Collector Assisted Air Source Heat Pump Simulation Model	[17]
e s ș Fluent	Performance analysis of a solar air heating system with latent heat storage in a lightweight building	[44]
	PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings	[45]
	Numerical Study of Convective Heat Transfer for Flat Unglazed Transpired Solar Collectors	[46]
	Energy and exergy analyses of Photovoltaic/Thermal flat transpired collectors: Experimental and theoretical study	[47]
	Experimental and two-dimensional numerical simulation of an unglazed transpired solar air collector	[48]
	Thermal Performance Analysis of A PCM Combined Solar Chimney System for Natural Ventilation and Heating/Cooling	[49]
	Comparison of modelled heat transfer and fluid dynamics of a flat plate solar air heating collector towards experimental data	[1]
EnergyPlus	Glazed building wall as a solar thermal collector	[22]
Comsol	A Three-Dimensional Modeling of Photovoltaic Thermal Collector	[50]

a
te observa in tabelul de mai sus, pentru studiul numeric al colectoarelor solare perforate 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 [23, 51-58]. Totuși, pentru a alege tipul de material cu schimbare de fază pentru o aplicație specifică într-o clădire sunt necesare studii numerice [59], datorită complexității fenomenelor ce apar în procesul de topire/solidificare. Problema care apare se datorează caracterului nelinear al fenomenelor și faptului ca cele doua faze, solid și lichid, au diferite proprietăți termofizice [60].

Conform bibliografiei studiate soft-urile care s-au utilizat pentru analiza materialelor cu schimbare de fază sunt: TRNSYS, EnergyPlus, ESP-r, Ansys Fluent, DesignBuilder, Codymur, WUFIplus sau Comsol. În tabelul de mai jos sunt sintetizate studiile realizate cu aceste soft-uri.

Tabel 2. Soft-uri utilizate pentru simularea numerică a materialelor cu schimbare de fază

Software	Studiu	Referință
TRNSYS	Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM	[61]
	Modeling and simulation of a phase change material system for improving summer comfort in domestic residence	[62]
	Reducing energy consumption in buildings using phase change material (PCM)	[63]
	Phase Change Material (PCM) composite insulating panel with high thermal efficiency	[64]
	Thermal energy storage in Swedish single family house – a case study	[65]
EnergyPlus	Evaluation of Phase Change Materials for Cooling in a Super-Insulated Passive House	[66]
	Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation	[67]
	Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model	[68]
	Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies	[69]
	PCM thermal energy storage in buildings: experimental study and applications	[70]
ESP-r	The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada	[71]
	Computational Optimization of Passive use of Phase Change Materials in Lightweight Low-Energy Houses	[72]
Ansys Fluent	PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings	[45]
	Performance analysis of a solar air heating system with latent heat storage in a lightweight building	[44]
	Simulation of Melting Process of a Phase Change Material (PCM) using ANSYS (Fluent)	[73]
DesignBuilder	The Implementation of Phase Changing Materials in Energy-efficient Buildings. Case Study: EFdeN Project	[74]
	Comparison of different PCMs impact on indoor comfort in a energy positive house	[75]
Codymur	Optimization of a phase change material wallboard for building use	[76]
WUFIplus	PCM Application-Effect on Energy Use and IA Temperature	[77]
	Analysis of simulation models of PCM in buildings under latvia's climate conditions	[78]
Comsol	Application of Phase Change Materials in Gypsum Boards to Meet Building Energy Conservation Goals	[79]

Așa cum se poate observa în tabelul de mai sus, programe de simulare precum Energyplus, ESP-r, TRNSYS sau DesignBuilder au fost utilizate pentru analiza efectului implementării PCM în clădiri (în general în sisteme pasive), iar pentru a analiza efectul la scara mică, la nivelul unui perete, element de

construcție sau sistem activ, s-au utilizat soft-uri precum Comsol, Ansys Fluent, TRNSYS, Codymur.

Așadar, conform celor prezentate mai sus am decis să utilizez pentru studiul colectoarelor solare cu aer cu materiale cu schimbare de fază integrate, 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).

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

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

Toate aceste etape au fost detaliate și tratate pe larg în capitolele prezentate în continuare.

1.3. *Concluzii și perspective*

Așadar, în ultimii ani se observă o tendință ascendentă în ceea ce privește implementarea materialelor cu schimbare de fază în clădiri, tot mai mulți cercetători fiind interesați de impactul acestora asupra eficienței energetice și confortului termic în clădiri.

Conform Arkar et al. [44] materialele cu schimbare de fază au avantajul de a stoca foarte multă energie la o variație foarte mică de temperatură, la valori ale temperaturii apropiate de cele ce definesc confortul termic interior. Conform studiilor efectuate până în prezent [15, 25, 30, 60, 80-82] se poate observa faptul că materialele cu schimbare de fază pot fi parte a unor strategii pasive sau active de reducere a consumurilor de energie și îmbunătățire a confortului termic în clădiri, cu rezultate remarcabile.

Conform literaturii analizate există foarte puține studii experimentale și numerice referitoare la implementarea materialelor inerțiale în colectoare solare opace cu aer, în plus, nu s-au identificat studii privind utilizarea PCM în colectoare solare perforate.

Așa cum a fost prezentat în capitolul precedent, materialele cu schimbare de fază pot fi implementate în colectoare solare, sporind eficiența acestora și contribuind la încălzirea spațiilor sau preîncălzirea aerului proaspăt introdus în încăperi. Mai mult decât atât, implementarea materialelor inerțiale în colectoare solare are potențialul de a crește eficiența globală a acestora prin defazarea energiei acumulate, prin acumularea energiei termice pe perioadele când radiația solară este disponibilă și utilizarea atunci când radiația solară nu este disponibilă

(perioade înnoirate sau noaptea). În plus, prin acumularea energiei, temperatura aerului evacuat din colector pe timpul zilei este mai scăzută, îmbunătățindu-se astfel confortul termic interior. Conform literaturii studiate, materialele cu schimbare de fază au fost integrate în colectoare solare vitrate și în special în pereți Trombe, dar și în colectoare opace. Totuși, se poate observa ca utilizarea PCM în colectoare solare perforate este tratată de foarte puține studii.

Din punct de vedere al studiilor numerice, conform literaturii studiate se poate observa că multi cercetători au optat pentru soft-ul de simulare numerică ANSYS Fluent atât pentru studiul curgerii în colectoare solare, cât și pentru studiul implementării materialelor cu schimbare de fază. Din acest motiv am decis utilizarea acestui software în cadrul studiilor doctorale. Modul de abordare al simularilor numerice este abordat pe larg în capitolele următoare.

2. Geometria sistemului si rezultatele studiilor experimentale – sinteza

2.1. Geometrie, materiale

În precedentele două rapoarte de cercetare din cadrul studiilor doctorale am prezentat pe larg studiul bibliografic ce justifică ipotezele facute, precum și studiul experimental preliminar ce a fost continuat și dezvoltat ulterior. Pentru a putea înțelege modelarea geometrică și rezultatele studiului numeric este necesară prezentarea sintetică a colectorului solar real.

În figura 5 este prezentată geometria colectorului solar. Aceste are dimensiunile 2140x1140mm, iar placa metalică absorbantă cu orificii lobate este de 2000x1020mm.

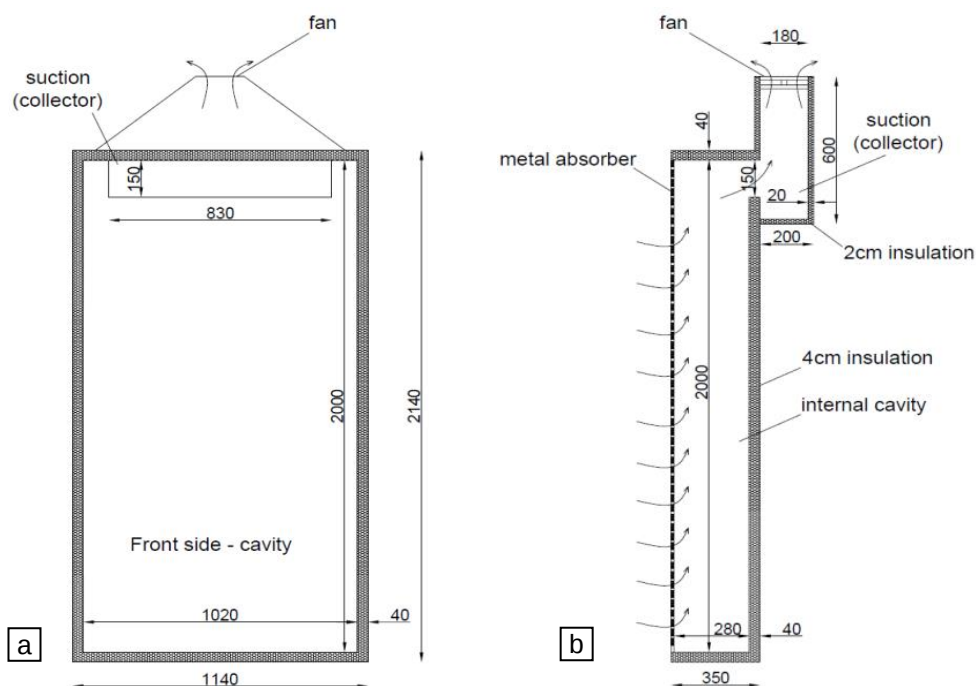


Figura 5 Geometria colectorului solar: a – vedere din față, b – secțiune longitudinală

După apirația 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 (figura 6). Șicana este alcătuită din recipiente rectangulare de aluminiu lipite între ele cu materiale cu schimbare de fază macroîncapsulate. Aluminiul a fost utilizat pentru sporirea conductivității termice, forma rectangulară respectând cerințele standului experimental. Materialul cu schimbare de fază utilizat este RT35 cu temperatura de schimbare de fază la 35°C și a fost ales pentru a respecta temperatura medie de lucru din cavitatea colectorului. Cantitatea totală de materiale cu schimbare de fază integrată în recipiente rectangulare de aluminiu amplasate în colectorul solar cu perforații este de până la 28kg. Pe lângă cei 8 senzori K-Type (precizie $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) prezentați în figura 6 s-au utilizat încă 3 senzori: unul ce măsoară temperatura aerului ambiant, unul ce măsoară temperatura pe suprafața barelor cu PCM (reflectând temperatura materialelor cu schimbare de fază) și unul la 5cm de placa metalică absorbantă.

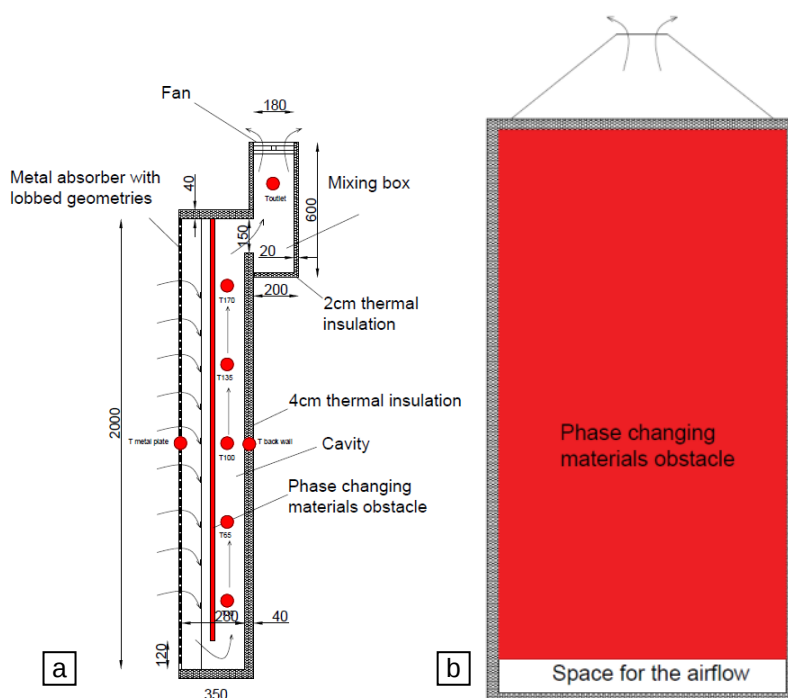


Figura 6 Geometria colectorului solar: a – amplasare senzori, b – amplasare strat PCM

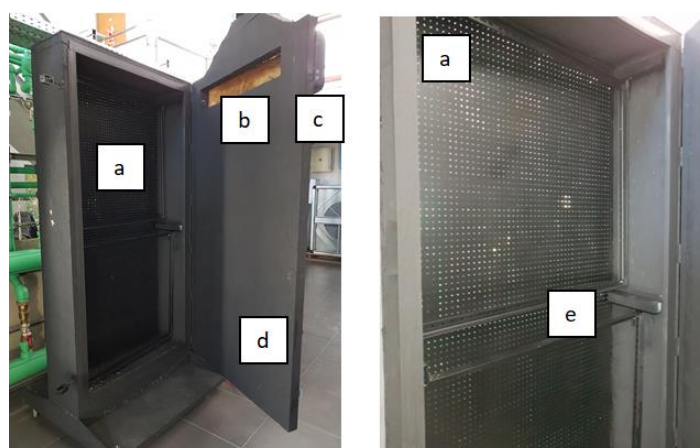


Figura 7 Geometria colectorului solar: a – placă absorbantă, b – gura de aspirație aerului din cavitatea colectorului, c – plenum de amestec, d – peretele posterior al colectorului, e – cadru metalic pentru PCM

În figura 7 sunt prezentate componentele colectorului solar, iar în figura 8 este prezentat colectorul solar cu geometria sala reala. Pereții colectorului solar sunt realizați din OSB și izolație termică de 4cm. Aerul este vehiculat prin intermediul unui ventilator axial rezultând un debit de aer de $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Radiația solară a fost simulată prin intermediul a 8 lampi cu halogen de 500W fiecare. Studiile experimentale au fost realizate în condiții de laborator, în regim permanent, iar rezultatele sunt prezentate în continuare.

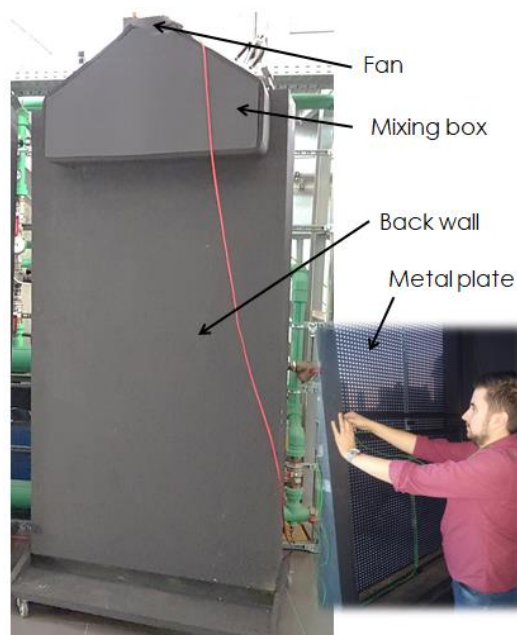


Figura 8 Stand experimental

2.2. Rezultate regim permanent

În continuare sunt prezentate pe scurt rezultatele experimentale obținute în regim permanent ce vor fi în continuare utilizate pentru validarea modelului numeric. Mai multe rezultate experimentale utile în validarea modelului numeric sunt prezentate în capitolele următoare.

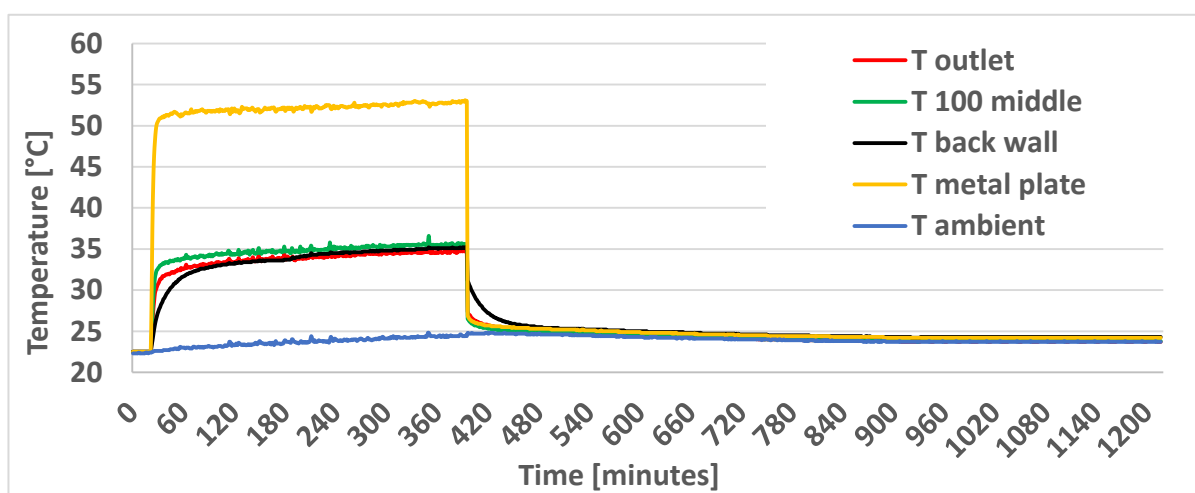


Figura 9 Variația temperaturilor pentru colectorul fără PCM

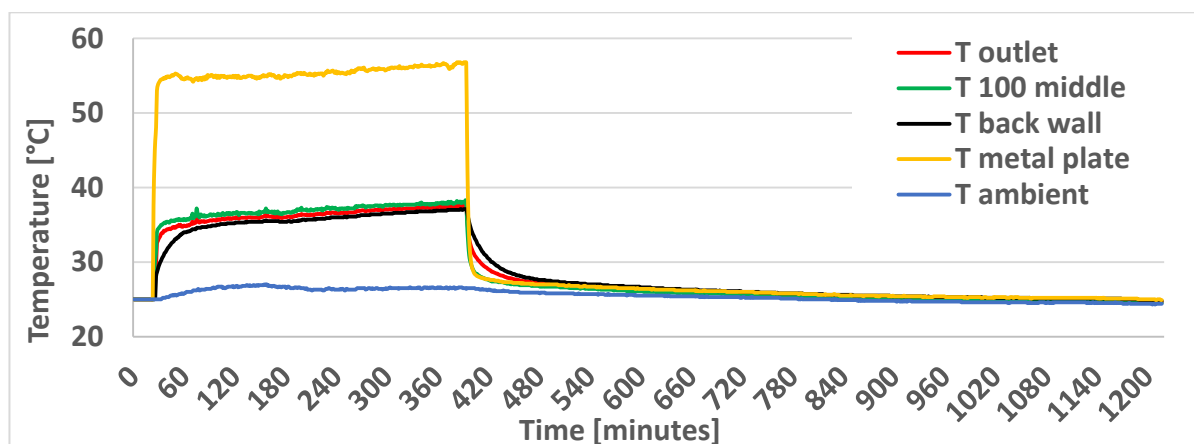


Figura 10 Variația temperaturilor pentru colectorul cu PCM

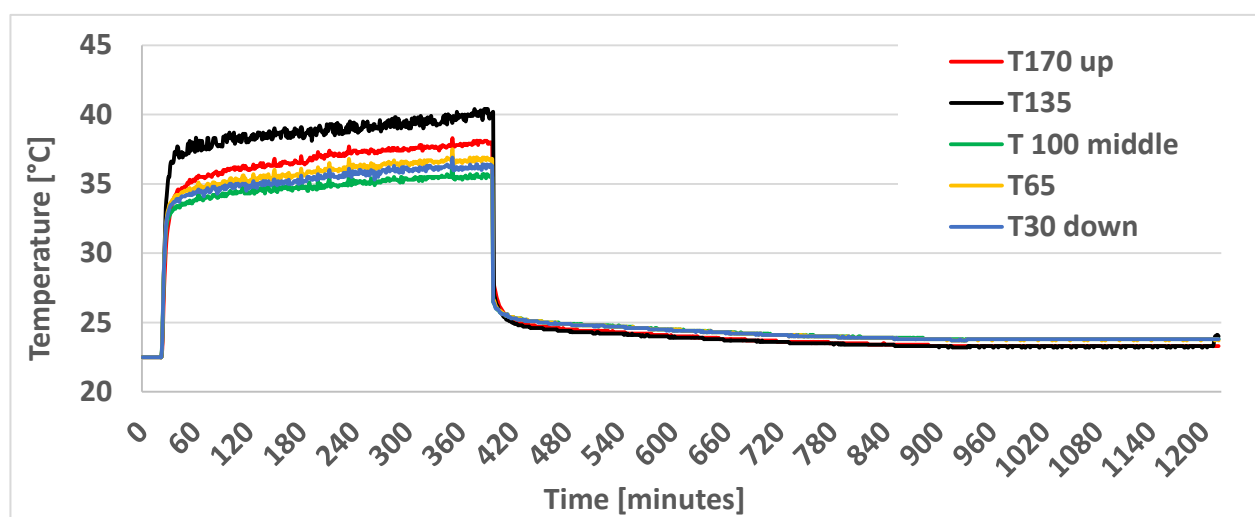


Figura 11 Stratificarea termică în interiorul colectorului fără PCM

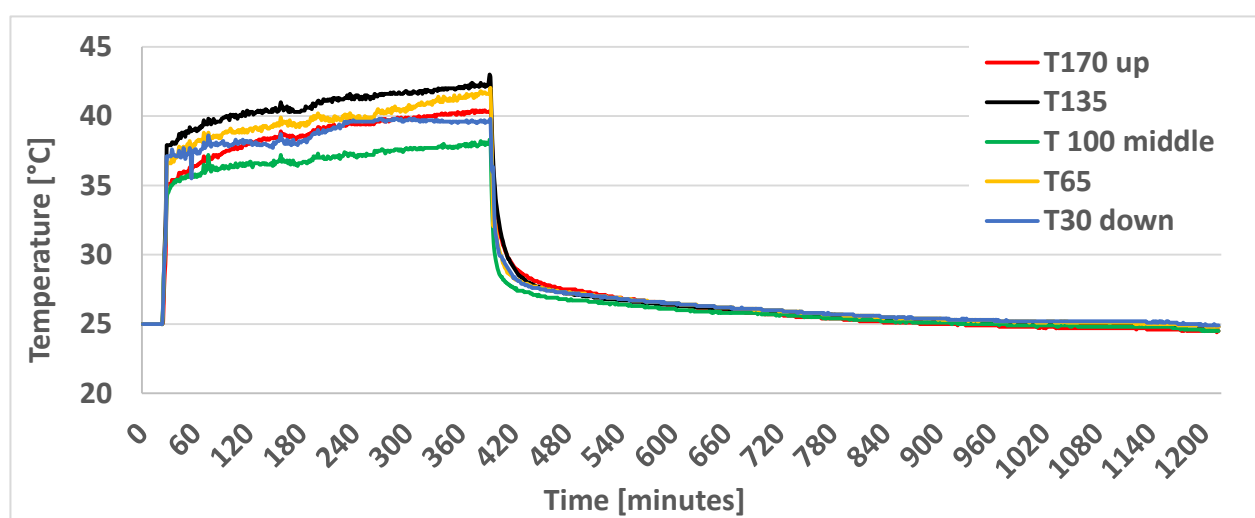


Figura 12 Stratificarea termică în interiorul colectorului cu PCM

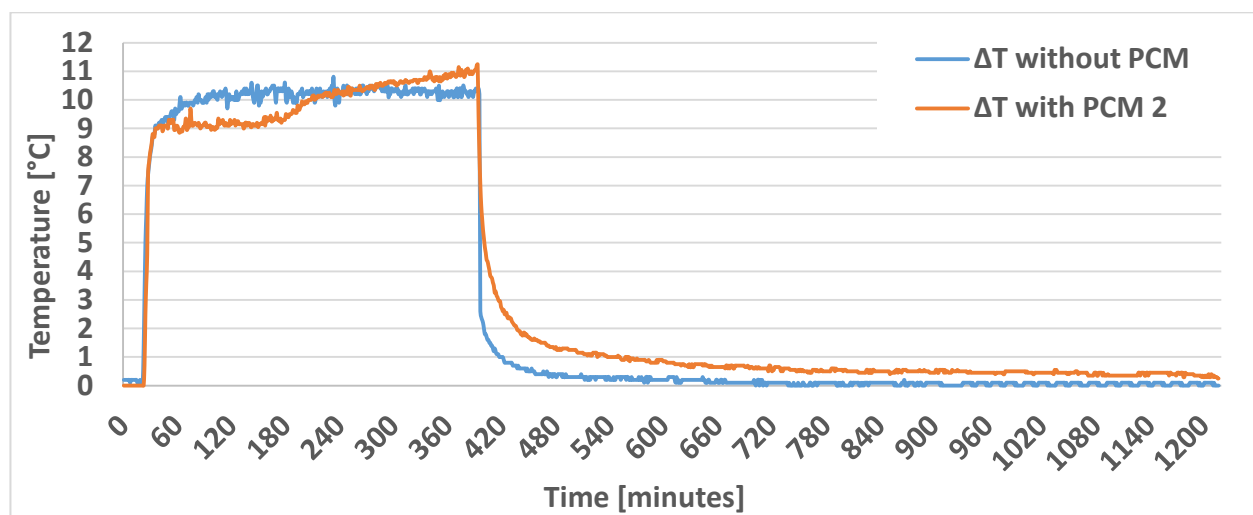


Figura 13 Diferența de temperatură dintre aerul evacuat din colector și aerul ambiental în cazul celor două colectoare (cu și fără PCM)

În figura 9 este prezentată variația temperaturilor pentru colectorul fără PCM, iar în figura 10 este prezentată variația temperaturilor pentru colectorul cu PCM. Se poate observa că pe perioada când radiația solară este disponibilă materialele cu schimbare de fază înmagazinează căldura, iar atunci când radiația solară nu mai este disponibilă acestea încep să cedeze căldura către aerul vehiculat în cavitatea colectorului solar, având potențialul de a-i mări eficiența globală, mărindu-i numărul de ore de funcționare. În figurile 11 și 12 sunt prezentate stratificările termice în interiorul colectorului solar în cea de-a doua cavitate (după ce aerul vehiculat trece de șicana cu PCM).

Concluziile studiului experimental sunt:

- În cazul colectorului solar fără PCM diferența maximă dintre aerul evacuat și aerul aspirat este de $\Delta T = 10.2^{\circ}\text{C}$
- În cazul colectorului solar cu PCM diferența maximă dintre aerul evacuat și aerul aspirat este de $\Delta T = 11.2^{\circ}\text{C}$, cu 8.8% mai mult
- După ce radiația solară nu mai este disponibilă diferența de temperatură dintre aerul aspirat și cel evacuat este mai mare timp de 800 minute în cazul utilizării PCM
- Procesul de topire este vizibil timp de 180 de minute
- Capacitatea maximă de încălzire este de 0.75 kW/m^2
- Eficiența maximă de transfer termic atinsă este de până la 38%.

3. Obiectivele studiului numeric și infrastructura utilizată

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 doua etape:

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

În capitolele 4 și 5 sunt tratate cele doua 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++. De asemenea au fost utilizate doua stații de calcul din dotarea Facultății de Inginerie a Instalațiilor, respectiv:

- 1) Laptop utilizat în prima parte a studiilor cu următoarele caracteristici:
 - Procesor: Intel Core i7 – 6500 2.5Ghz, 4 procesoare
 - 12 GB RAM
- 2) Stație de calcul utilizată în cadrul simulărilor complexe ce necesită o putere mare de calcul, cu următoarele caracteristici:
 - Procesor: Intel Xeon 3.4Ghz, 16 procesoare
 - 128 GB RAM

4. Modelarea numerică a curgerii aerului prin orificiile lobate (placa absorbanta)

4.1 Realizarea modelului geometric

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 [4, 20], poate îmbunătăți 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 temperatura între aerul aspirat și aerul evacuat. Dispunerea orificiilor în varianta prezentată în figura 14 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.

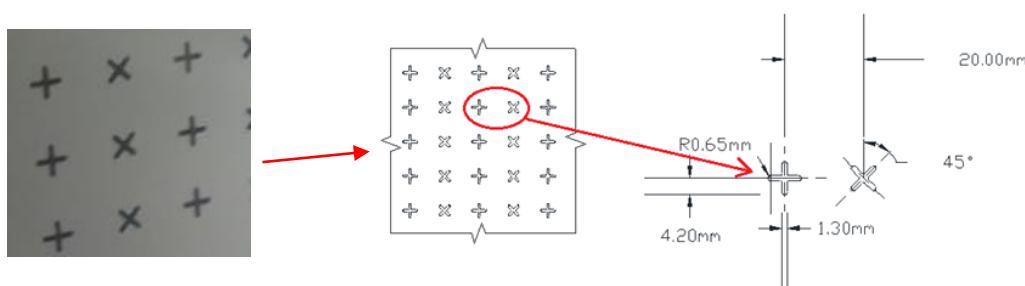


Figura 14 Dispunerea și dimensiunile orificiilor lobate cu diametrul echivalent de 5mm

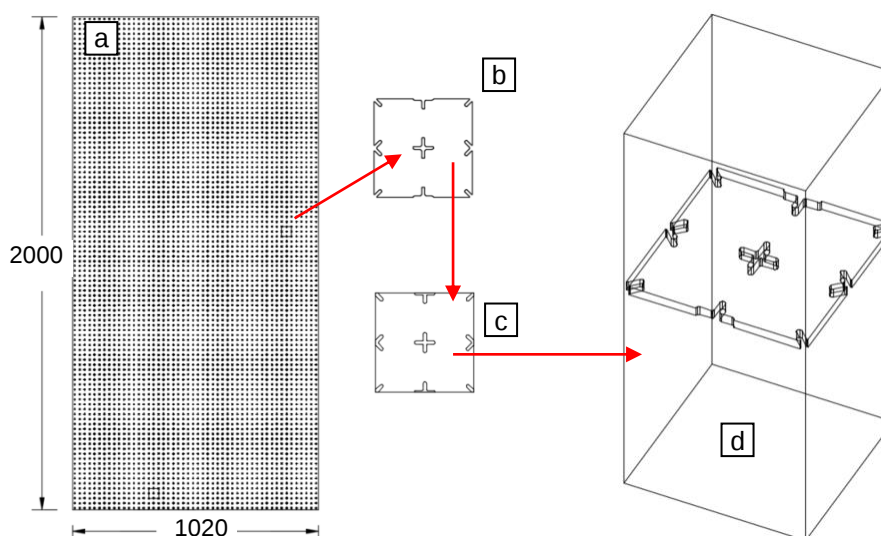


Figura 15 Realizarea modelului 3D în AutoCAD: a – placa absorbantă cu orificii lobate, b – extragerea unei porțiuni din placă de 4x4cm, c – încadrarea în domeniul de calcul, d – domeniul de calcul 3D (placa încadrată într-un paralelipiped)

În figura 14 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.

Așa cum se poate observa în figura 15a, 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 15b).

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 15c și 15d). 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.

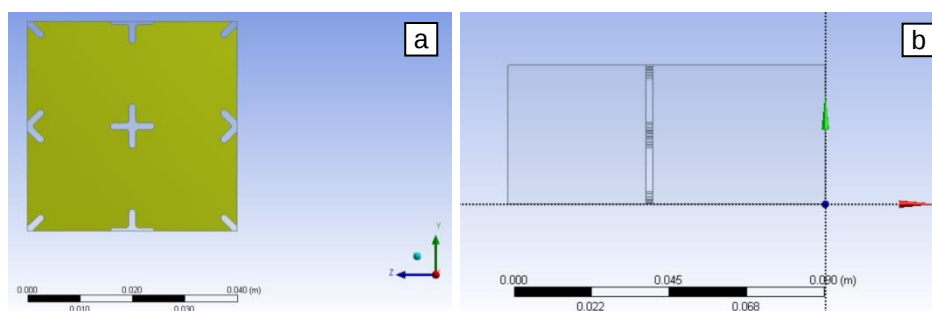


Figura 16 Importarea geometriei din AutoCAD în ANSYS Design Modeler: a – placuța 4x4cm, b – domeniul de calcul și dimensiunile aferente

Realizarea geometriei 3D a fost realizată în AutoCAD și salvată în format .igs ce poate fi mai apoi importat în ANSYS Design Modeler (figura 16 și figura 17).

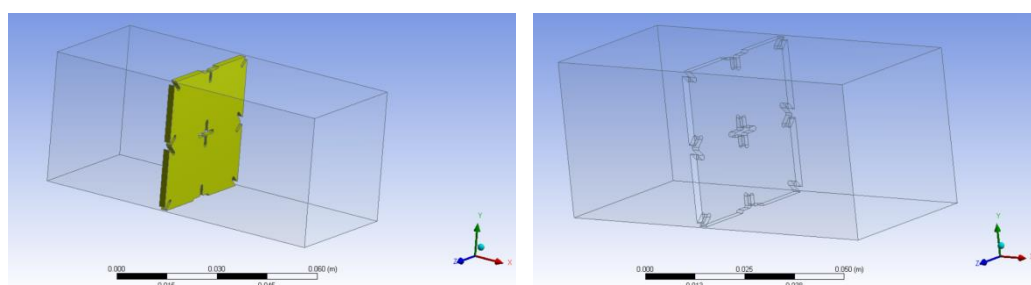


Figura 17 Importarea geometriei din AutoCAD în ANSYS Design Modeler – vedere izometrică

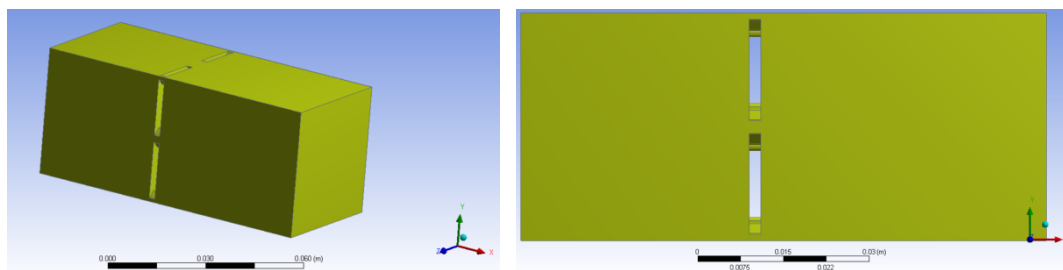


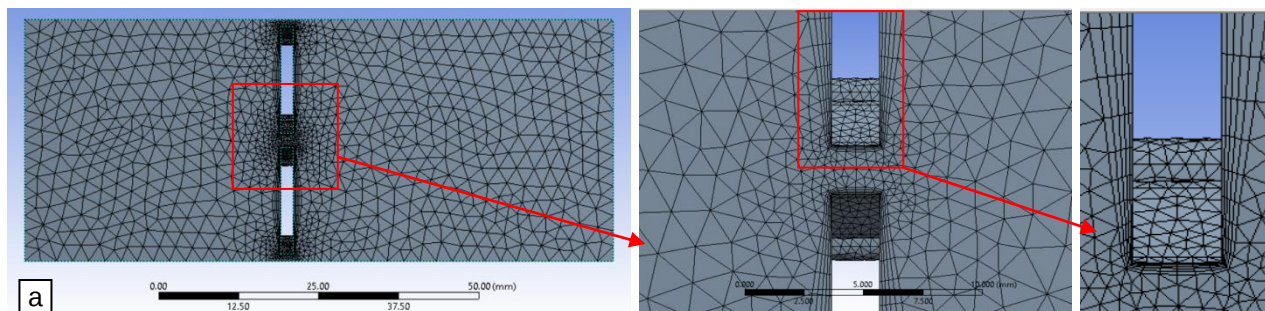
Figura 18 Eliminarea plăcii absorbante din domeniul de calcul (aerul vehiculat)

Ținând cont de faptul că placa metalică de 2mm grosime este din aluminiu ce are o conductivitate termică mare, transferul termic prin aceasta se produce foarte rapid rezultând o temperatură relativ uniformă pe întreaga suprafață, iar fenomenele de transfer la interior nu sunt foarte complexe și nu influențează rezultatul simulării. Așadar, placa metalică de 4x4cm a fost extrasă din domeniul de calcul, rămânând astfel doar aerul vehiculat (figura 18).

Dupa realizarea geometriei și denumirea corespunzătoare a suprafețelor, aceasta a fost importată în ANSYS Meshing pentru realizarea discretizării spațiale.

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

Dupa construirea propriu-zisă a geometriei, următorul pas în realizarea modelului numeric este alegerea discretizării spațiale. 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. Studiul are drept scop atingerea unui rezultat cât mai corect, acesta fiind cu atât mai precis cu cât numărul de celule este mai mare. Dar, cu cât numărul de celule este mai mare, cu atât timpul de calcul va deveni implicit mai mare, iar resursele de calcul necesare vor crește. Studiul de independență a mesh-ului începe prin alegerea mai multor niveluri de discretizare ce determină un număr din ce în ce mai mare de celule. De la un anumit număr de celule în sus rezultatele obținute variază nesemnificativ, această grilă de calcul fiind soluția optimă din punct de vedere al raportului rezultat-resurse de calcul.



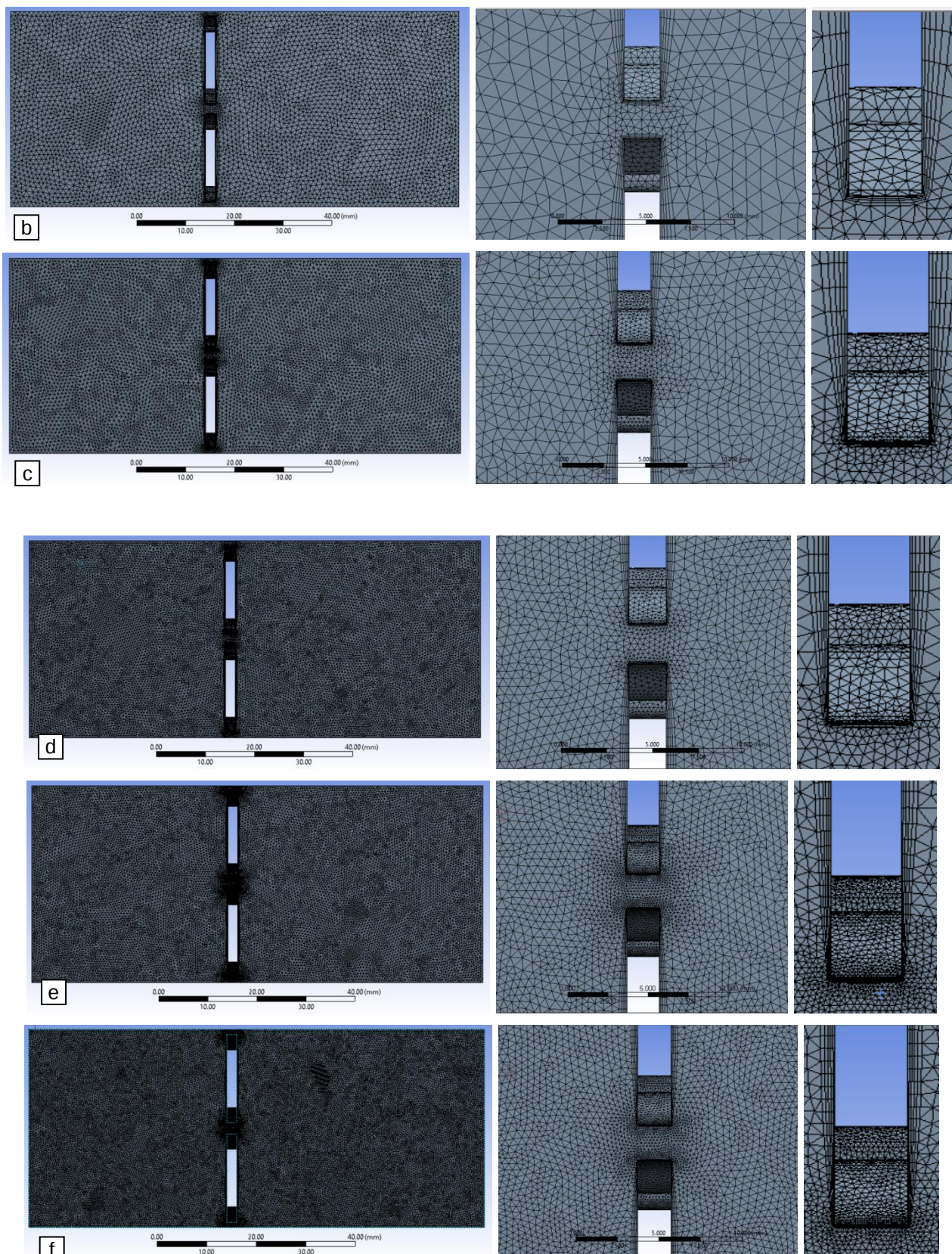


Figura 19 Nivelul de discretizare pentru cazurile analizate: vedere de ansamblu, detaliu orificiu, detaliu frontieră pentru a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente

Pentru realizarea studiului de independență am ales 6 niveluri de discretizare (figura 19), respectiv: 0.2, 0.62, 1.5, 3, 5.3 și 7.3 milioane de elemente de calcul tetraedrale. Nivelul de discretizare optim se stabilește prin simulări numerice individuale, utilizând condiții la limită și modele de calcul identice.

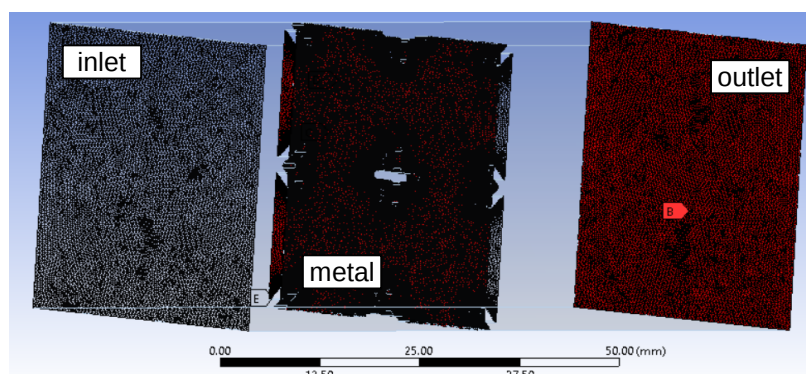


Figura 20 Grila de calcul pentru 3 zone: inlet (limita domeniului de calcul aferentă intrării aerului ambiant), metal (frontiera plăcii metalice) și outlet (limita domeniului de calcul la 10De de placa metalică)

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

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

Cele 6 niveluri de discretizare au fost rând pe rând importate în ANSYS Fluent și pentru fiecare s-au impus aceleași condiții la limită prezentate în tabelul 3. Viteza la intrare (în zona inlet) este de 0.05555 m/s corespunzătoare debitului nominal de 400 m³/h pentru întreg colectorul (conform ecuațiilor de mai jos), temperatura aerului ambiant aspirat (inlet) este de 25°C, iar temperatura plăcii metalice este de 50°C (corespunzătoare unei valori ale radiației solare de 530 W/m²).

$$Q = 400 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0.1111 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$N_o = 5000$$

$$Q_o = \frac{Q}{N_o} = \frac{0.1111}{5000} = 0.00002222 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$S_o = \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.005^2}{4} = 0.000019635 \text{ m}^2$$

$$v_o = \frac{Q_o}{S_o} = \frac{0.00002222 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.000019635 \text{ m}^2} = 1.312 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D_{4x4} = (0.00002222) \cdot 4 = 0.00008888 \frac{m^3}{s}$$

$$S_{4x4} = 0.04 \cdot 0.04 = 0.0016 m^2$$

$$v_{4x4} = 0.00008888 \div 0.0016 = 0.05555 \frac{m}{s}$$

, unde:

Q = debitul total de aer ce străbate colectorul;

Q_o = debitul total de aer ce străbate orificiul;

N_o = numărul de orificii;

Q_{4x4} = debitul pe placa metalică cu 4 orificii echivalente (4x4cm);

S_o = suprafața orificiului;

S_{4x4} = suprafața plăcii metalice cu 4 orificii echivalente (4x4cm);

V_o = viteza în orificiu;

v_{4x4} = viteza rezultată la intrare (în zona inlet).

Pe lângă alegerea modelului ce activează ecuația conservării energiei, am ales modelul de turbulență k-ε RNG (cu Enhanced wall function – funcție la perete îmbunătățită (EWF) pentru a calcula câmpul de viteze în apropierea peretelui) ce se pretează, conform literaturii studiate [83], în cazul curgerilor turbionare și în cazul curgerilor cu numere Reynolds mici ($Re \approx 422$ în cazul prezentului studiu conform ecuațiilor de mai jos, curgere laminară). Deși cercetătorii cu experiență în studiile CFD recomandă analiza mai multor combinații de discretizare spațială și model de turbulență [84], timpul redus pentru realizarea prezentului studiu nu ne-a permis compararea mai multor modele de turbulență în acest caz. Având în vedere datele amintite, am realizat simulări numerice pentru cele 6 grile de calcul, rezultatele fiind importate în Tecplot și analizate în continuare.

$$Re = \frac{\rho_{aer} \cdot v_o \cdot De}{\mu_{aer}}$$

$$Re = \frac{1.185 \cdot 1.312 \cdot 0.005}{0.0000184} = 422$$

, unde;

ρ_{aer} = densitatea aerului la 25 °C = 1.185 kg/m³;

De = diametrul echivalent al orificiului;

μ_{aer} = vâscozitatea dinamică = 0.0000184 kg/ms.

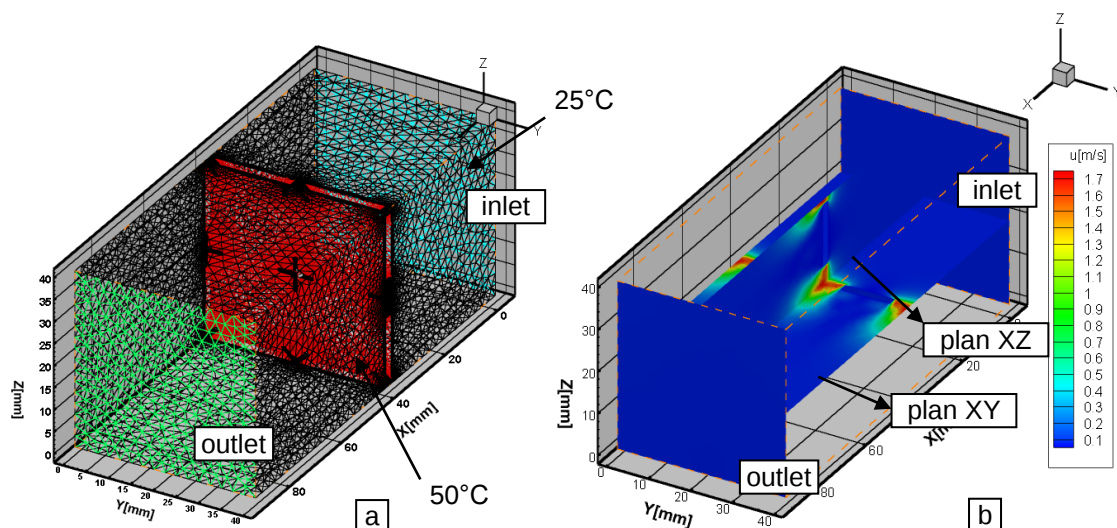
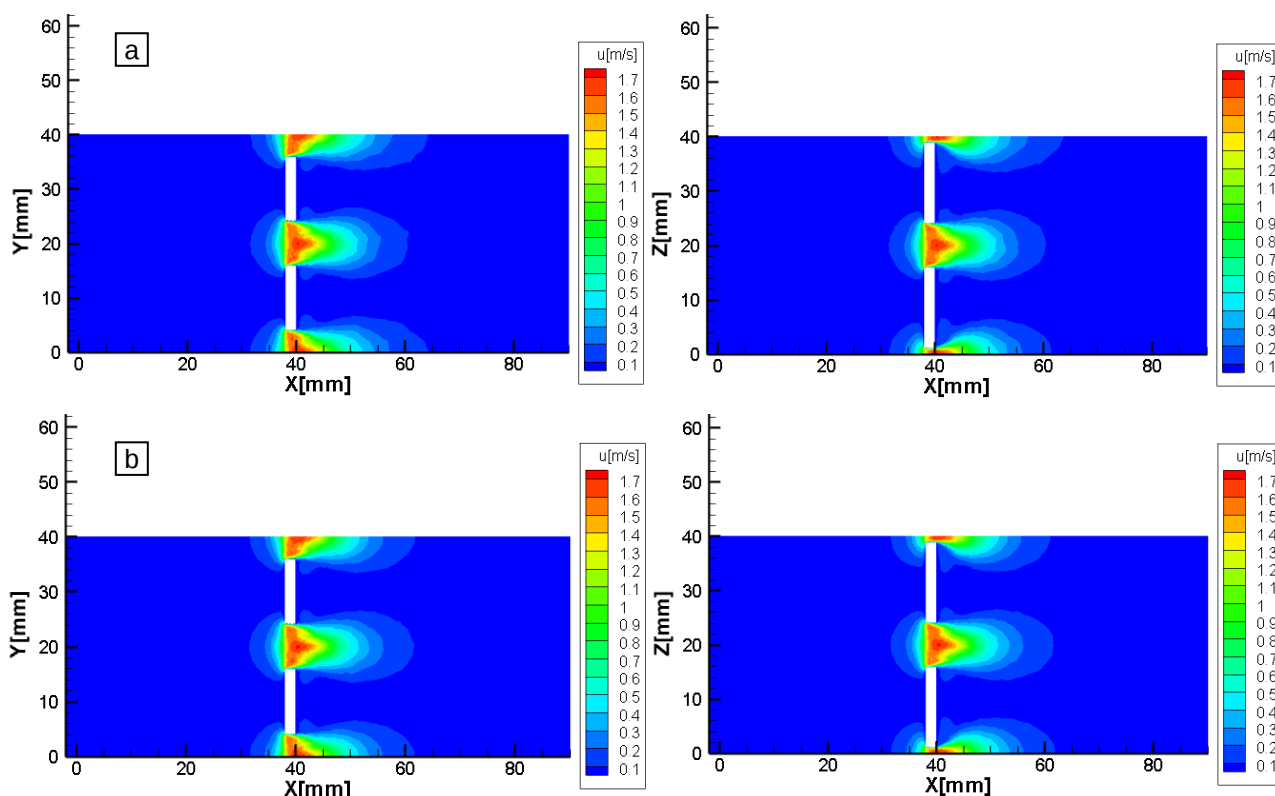


Figura 21 Importarea rezultatelor in Tecplot 360 pentru prelucrarea datelor

Figura 22

În figura 21 sunt prezentate datele importate în soft-ul de prelucrare a datelor, Tecplot. Figura 21a prezintă distribuția celulelor pentru unul dintre cele 6 cazuri, iar figura 21b prezintă distribuția magnitudinii vitezei în două planuri longitudinale XY și XZ. În continuare vor fi analizate campurile de viteză în cele două planuri pentru fiecare dintre cele 6 cazuri amintite.



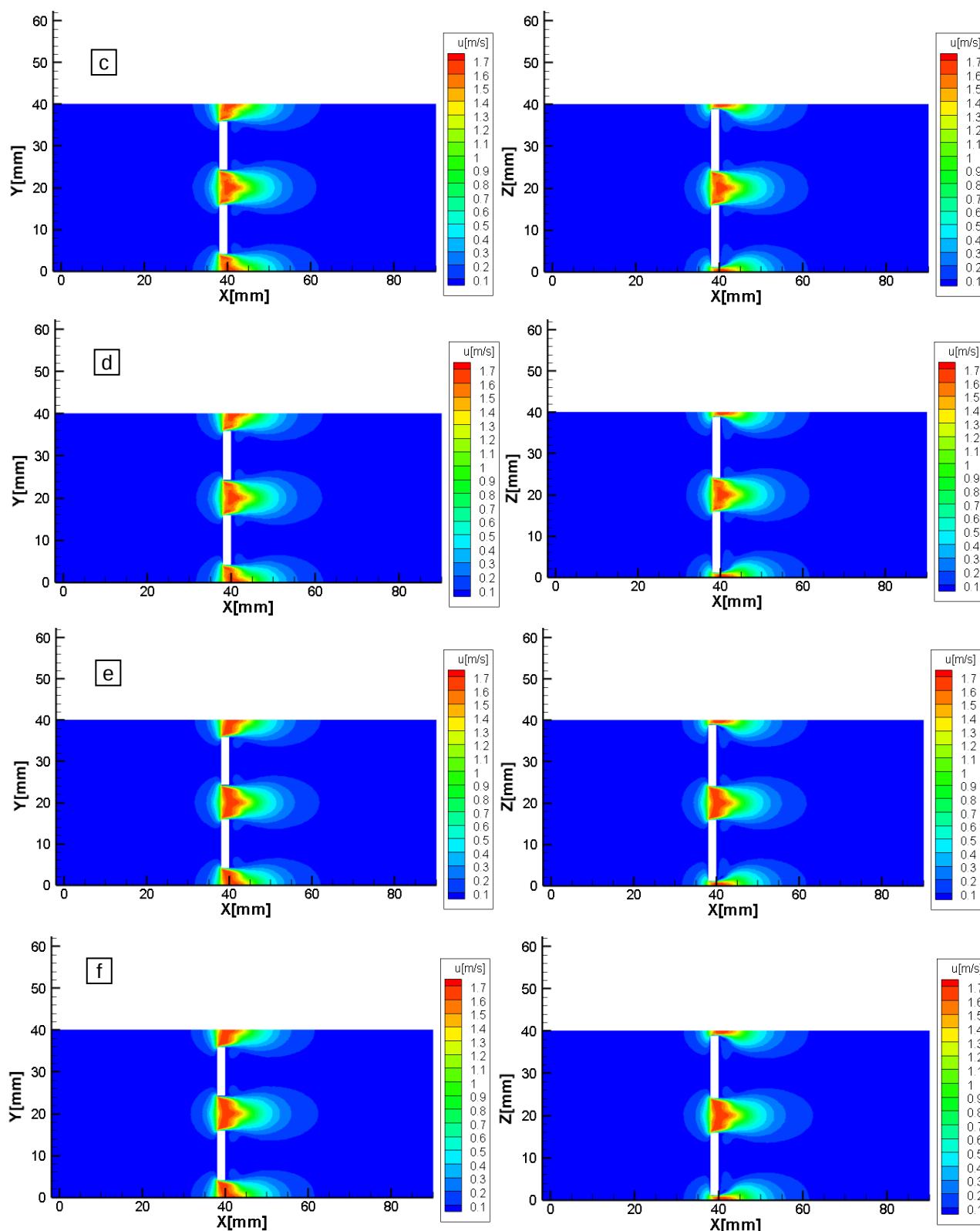
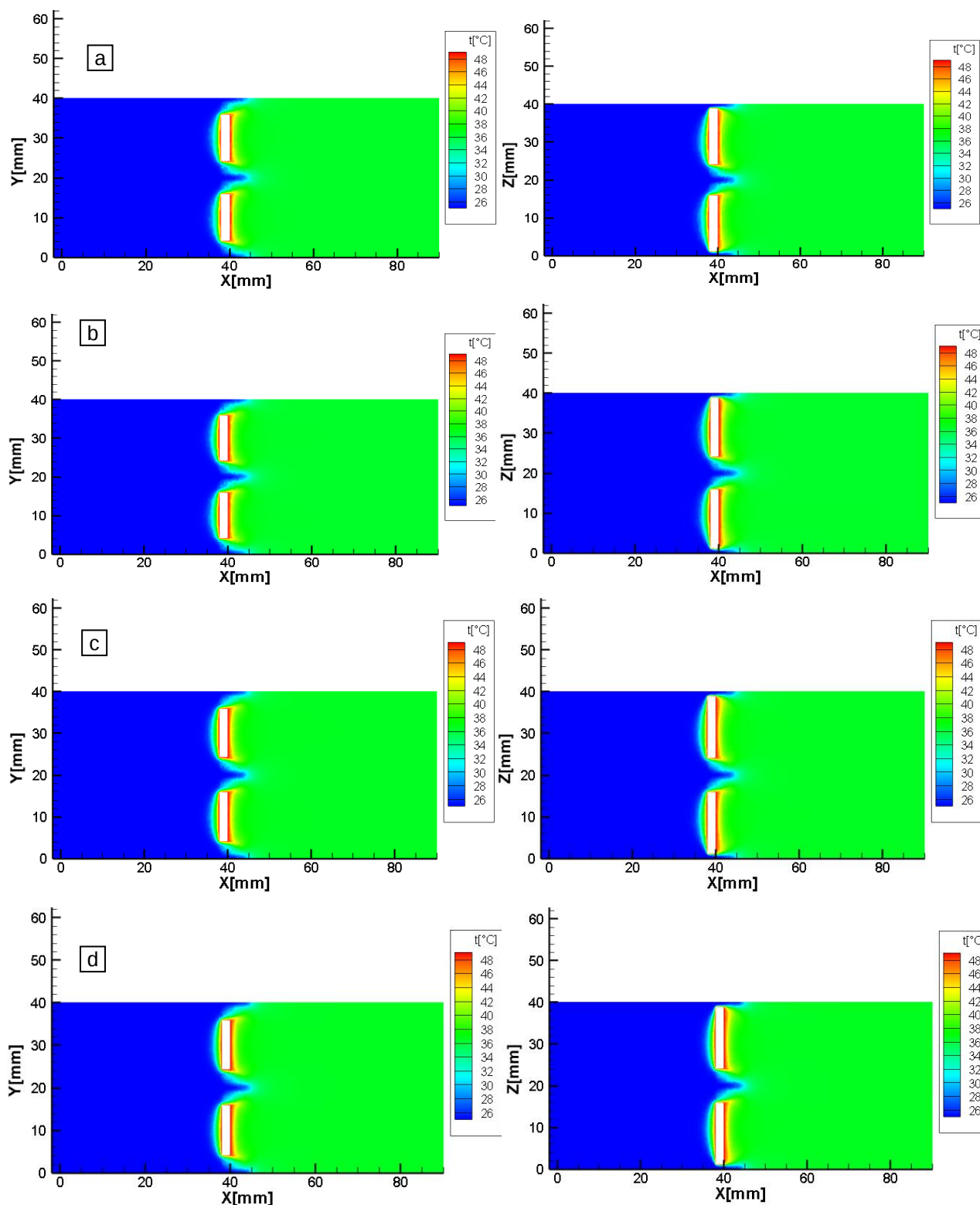


Figura 23 Campuri de viteză (u [m/s] – mărimea vitezei) în planurile longitudinale XY și XZ pentru cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente

Așa cum se poate vedea în imaginile din figura 23, câmpurile de viteză în planurile XY și XZ sunt relativ asemănătoare pentru toate cele 6 cazuri fără a

aparea diferențe vizibile. Având în vedere aceste rezultate vom analiza distribuția temperaturilor în aceleași planuri longitudinale (figura 54).



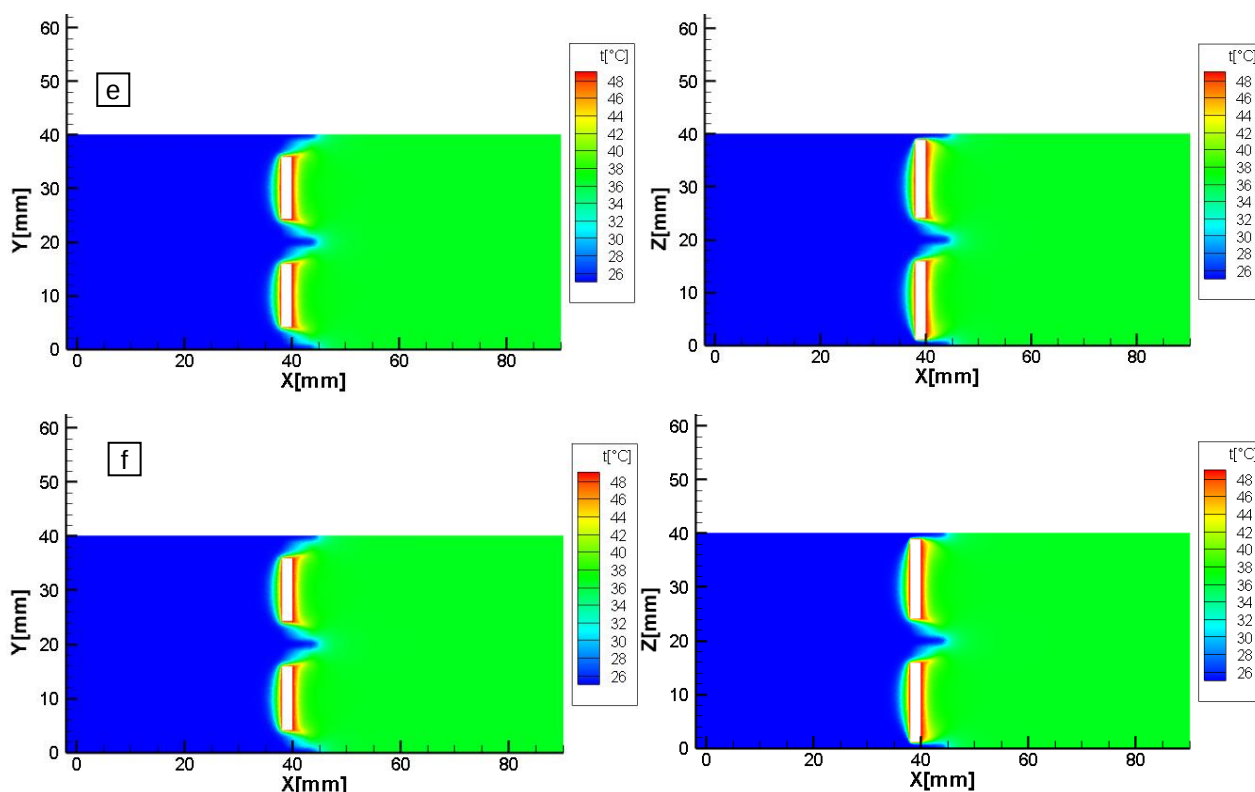
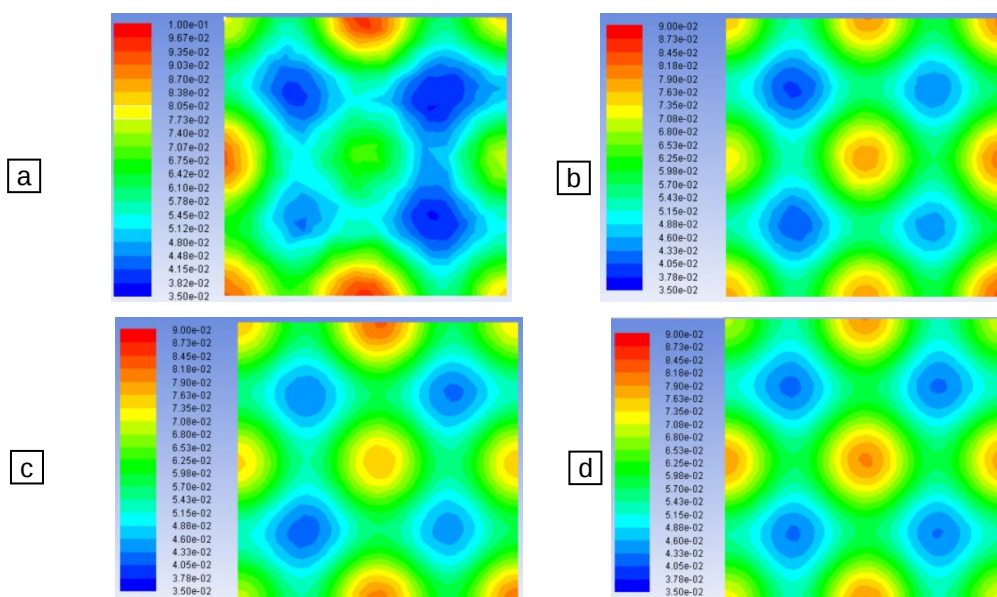


Figura 24 Campuri de temperatură în planurile longitudinale XY și XZ pentru cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente

Așa cum se poate observa în figura 24, câmpurile de temperaturi în planurile XY și XZ sunt asemănătoare în toate cele 6 cazuri și nu putem determina cu precizie soluția optimă în ceea ce privește discretizarea spațială. În continuare vom analiza câmpurile de viteză la 5De distanță față de placa metalică, respectiv 10De distanță față de placa absorbantă (în outlet). În cazul prezentului studiu, câmpurile de viteză la 10De sunt cele mai relevante în realizarea modelului numeric.



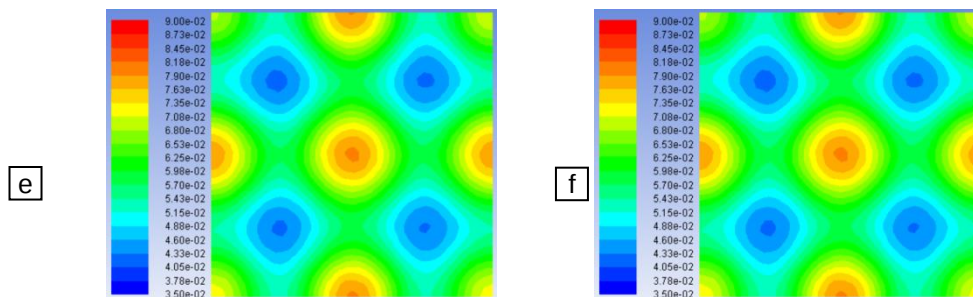
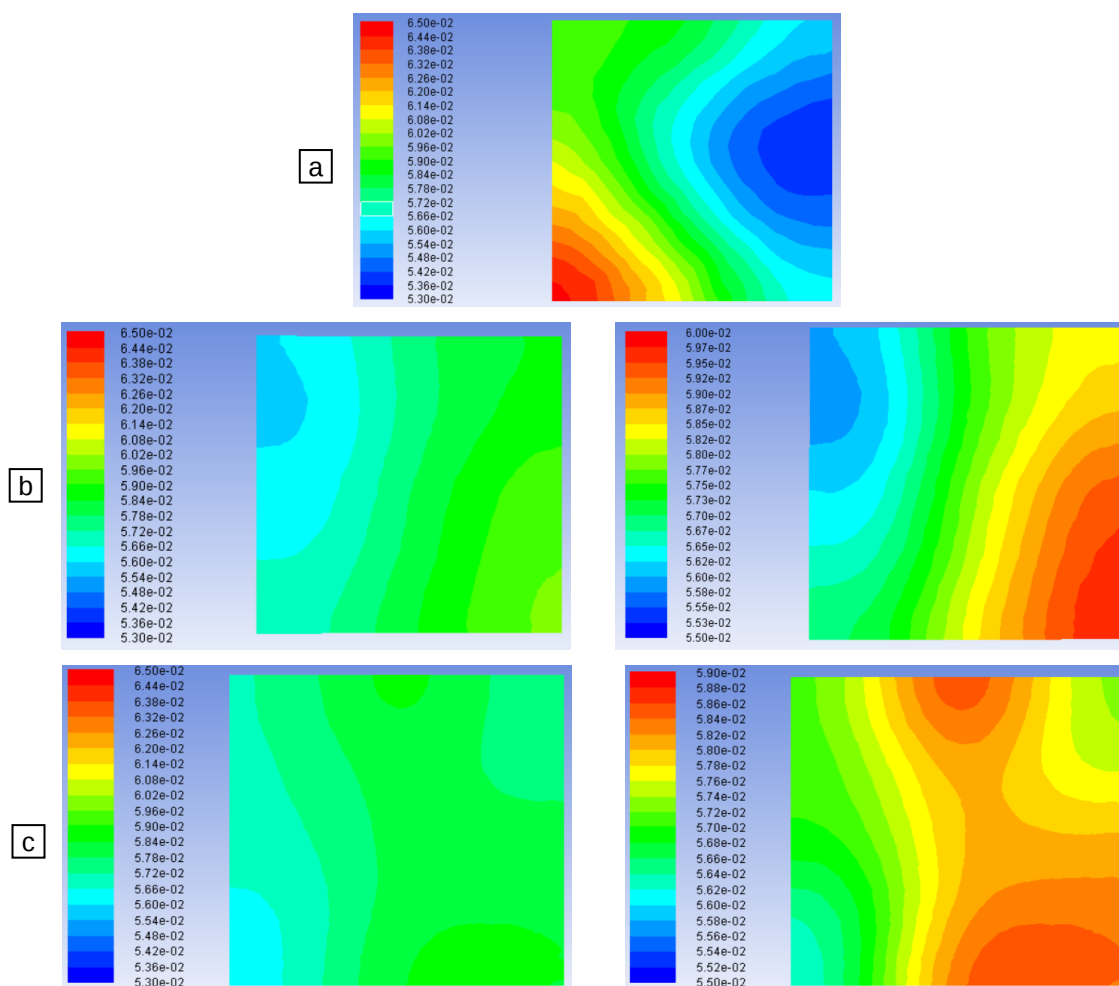


Figura 25 Campuri de viteză (u [m/s] – mărimea vitezei) în plan transversal la $5De$ (2.5cm) de placa metalică în cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente

În figura 25 sunt prezentate câmpurile de viteză la $5De$ în toate cele 6 cazuri. Se poate observa că începând cu 3 milioane de elemente nu se mai evidențiază variații semnificative ale câmpurilor de viteză. Mai mult decât atât, în figura 26 sunt prezentate câmpurile de viteză la $10De$ în toate cele 6 cazuri. Se poate observa că la 0.2, 0.62 și 1.5 milioane de elemente câmpurile rezultate sunt neuniforme. Începând cu 3 milioane și chiar 5.3 milioane de elemente nu se mai observă variații vizibile ale câmpurilor de viteză, aceasta devenind din ce în ce mai uniformă.



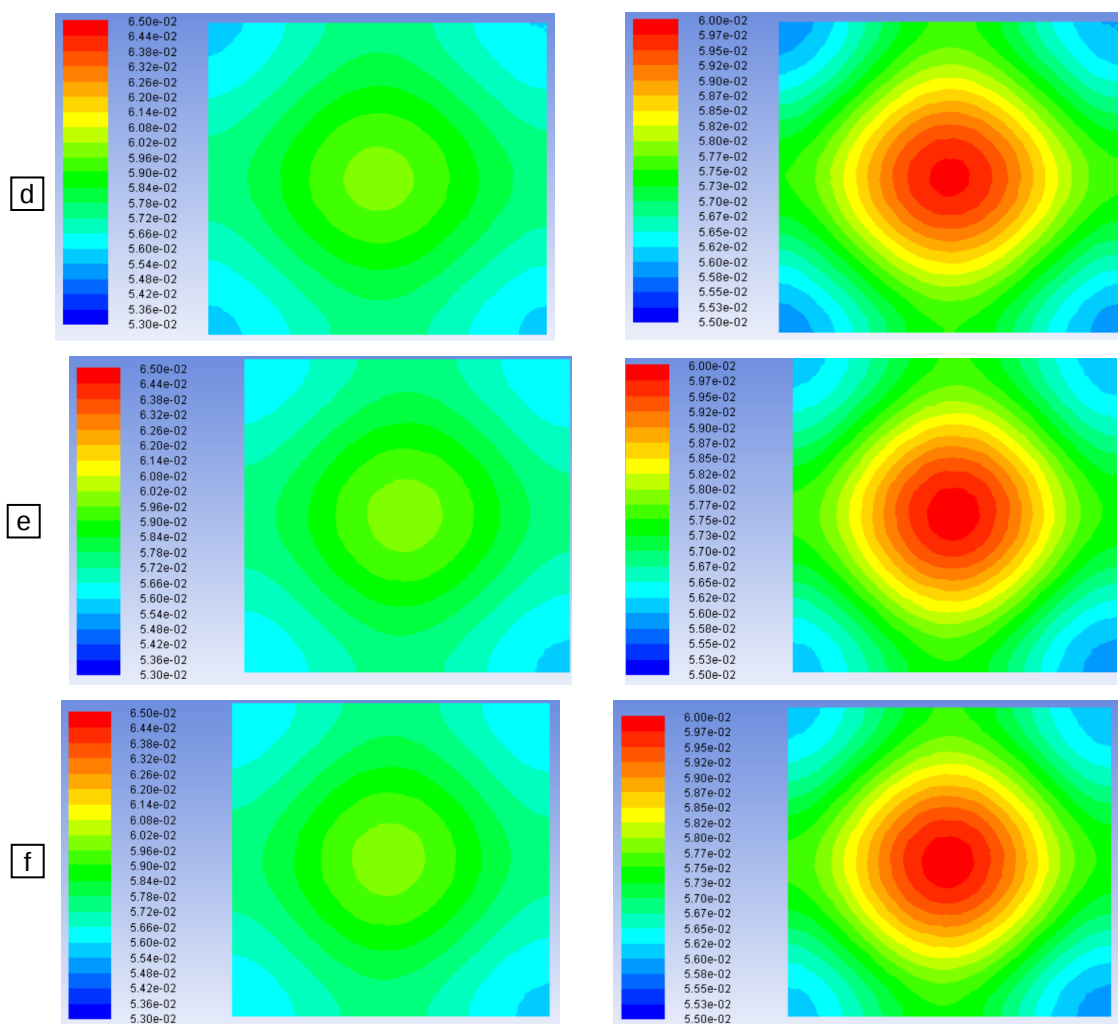


Figura 26 Campuri de viteză (u [m/s] – mărimea vitezei) în plan transversal la $10De$ (5cm) de placa metalică în cele 6 cazuri a) 0.2, b) 0.62, c) 1.5, d) 3, e) 5.3, f) 7.3 milioane de elemente

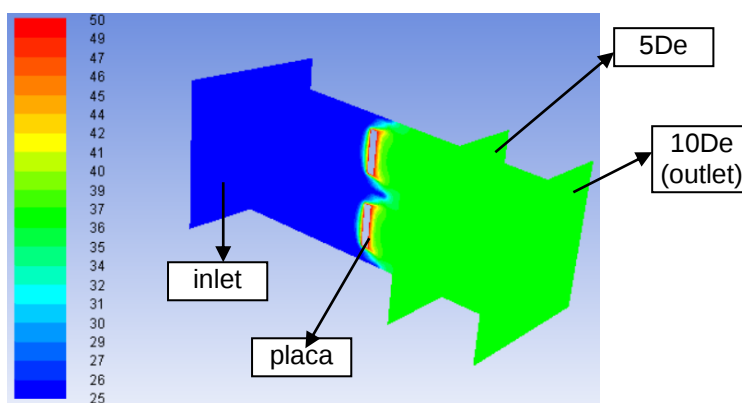


Figura 27 Campuri de temperatură în planuri transversale

Așadar, pentru verificarea calității discretizării am analizat pentru toate cele 6 cazuri câmpurile de viteză și temperatură în planurile longitudinale XY și XZ, respectiv în planurile transversale la $5De$ și $10De$ distanță de placa metalică. Dacă în prima situație nu s-au identificat diferențe semnificative, în plan transversal putem constata că începând cu 5.3 milioane de elemente nu se mai observa

variații vizibile între câmpurile de viteză. În plan transversal la 10De, deși în figură apar diferențe, distribuția vitezelor este relativ uniformă având variații foarte mici între 0.055 și 0.06 m/s. De asemenea, în plan transversal am observat că nu există diferențe vizibile în ceea ce privește câmpurile de temperatură în cele 6 cazuri (figura 27). Considerând condițiile la limite impuse, temperatura aerului la 5De, respectiv 10De este aceeași, aproximativ 37 °C.

În concluzie, în urma studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării, am ales geometria de 5.3 milioane de elemente deoarece este o soluție independentă de grila de calcul, iar aceasta va fi utilizată în continuare în cadrul modelului numeric analizat.

După realizarea studiului de independență a soluției față de calitatea discretizării a urmat validarea experimentală a modelului numeric. Aceasta a fost realizată prin două abordări diferite:

- a) Prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal
- b) Prin comparația temperaturilor rezultate în cavitatea colectorului solar

4.3 Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal

Pentru validarea câmpurilor de viteză în plan longitudinal au fost comparate măsurătorile realizate prin intermediul tehnicii PIV (Particle Image Velocimetry sau Măsurarea Vitezelor cu Imagini de Particule) cu rezultatele simulărilor numerice obținute în condiții similare.

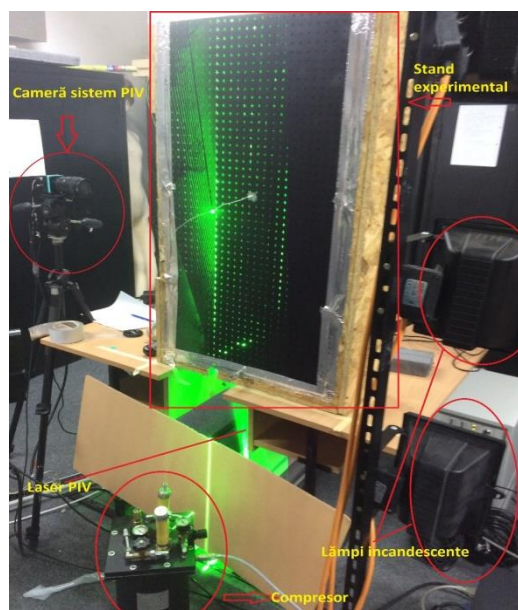


Figura 28 Utilizarea tehnicii PIV în măsurarea câmpurilor de viteză rezultate la trecerea aerului prin orificiile unei plăci metalice absoorbante aparținând unui colector solar de mici dimensiuni (conform [85])

Tehnica PIV este un mijloc de studiu a curgerilor generate de diverse grile/unități de difuzie a aerului ce da posibilitatea măsurării câmpurilor instantanee de viteze (figura 28). Rezultatele experimentale utilizate pentru validarea modelului numeric au fost preluate din studii precedente realizate în cadrul Facultății de Inginerie a Instalațiilor (Universitatea Tehnică de Construcții din București) [4], studii ce au urmărit analiza câmpurilor de viteză la curgerea apei prin orificii lobate similare la valori Reynolds $Re=2500$.

Pentru validarea numerică am analizat câmpurile de viteze în plan longitudinal XY în planul ce strabate centrul orificiului lobat (centrul jetului – $Z=0\text{mm}$) și la 2.5mm de acesta ($Z=2.5\text{mm}$), așa cum se poate vedea în figura 29.

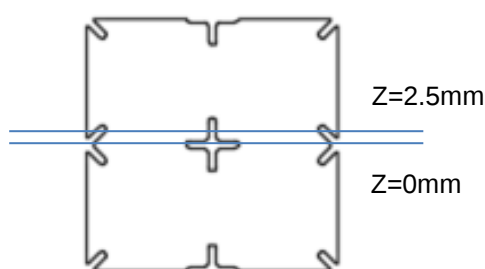


Figura 29 Planuri longitudinale utilizate pentru validare

În figura 30 sunt prezentate câmpurile de viteză în plan longitudinal XY conform măsurătorilor experimentale la $Re2500$ pentru 3 jeturi diferite ($Y00$, $Y20$ și $Y40$) în centrul acestora ($Z=0\text{mm}$). Datele experimentale au fost importate și prelucrate în Tecplot pentru jetul $Y40$, iar datele afișate reprezintă magnitudinea vitezei. Datorită lipsei datelor în imediata apropiere a jetului, am decis prelucrarea datelor începând cu $x=10\text{mm}$ și am extras valorile vitezei în 50 de puncte. În cazul studiului experimental, valorile normalizate ale magnitudinii vitezei în cele 50 de puncte sunt prezentate în figura 34.

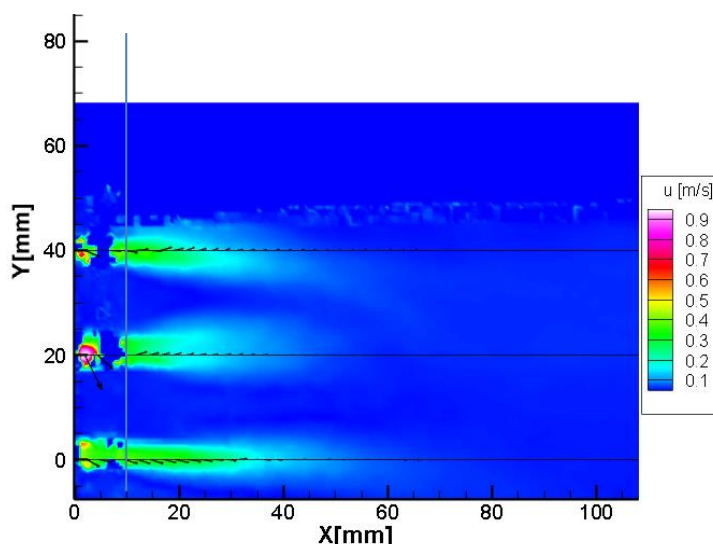


Figura 30 Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform măsurătorilor experimentale PIV la $Re2500$ în centrul jetului ($Z=0\text{mm}$) (prelucrare după [4])

În figura 31 sunt prezentate câmpurile de viteză în plan longitudinal XY conform măsurătorilor experimentale la $Re2500$ pentru 3 jeturi diferite ($Y00$, $Y20$ și

Y40) la 2.5mm de centrul acestora ($Z=2.5\text{mm}$). Datele experimentale au fost importate și prelucrate în Tecplot pentru același jet (Y40), iar datele afișate reprezintă magnitudinea vitezei. Valorile normalizate ale magnitudinii vitezei în cele 50 de puncte sunt prezentate în figura 35.

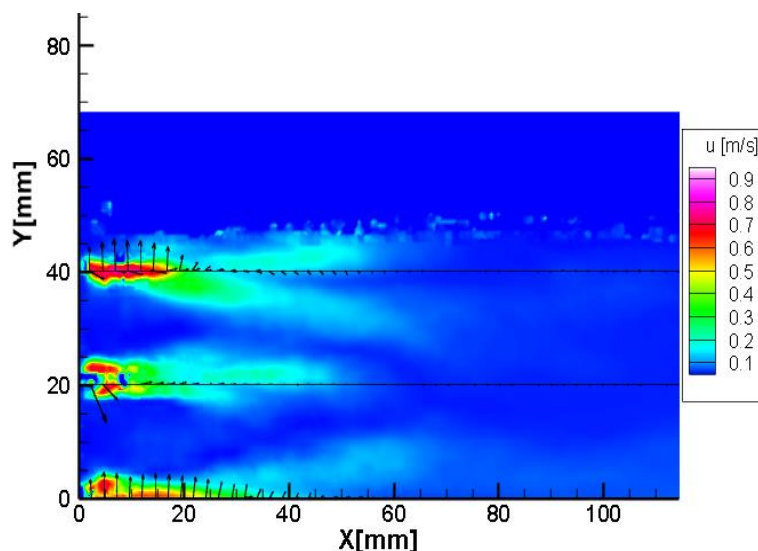


Figura 31 Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform măsurărilor experimentale PIV la $Re=2500$ la 2.5mm de centrul jetului ($Z=+2.5\text{mm}$) (prelucrare după [4])

În cazul real al colectorului solar cu orificii lobate, debitul de aer considerat este de $200 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ ($400 \text{ m}^3/\text{h}$) ceea ce determină o viteză a aerului în orificiul lobat de 1.312 m/s , curgerea fiind caracterizată de un număr Reynolds mic ($Re=422$). Pentru a putea compara rezultatele modelului numeric cu rezultatele obținute experimental în vederea validării este necesar ca în condițiile la limita, la intrarea în domeniul de calcul, viteza aerului să aibă o valoare corespunzătoare unui număr Reynolds $Re=2500$ în orificiul lobat. Pentru aceasta este necesar să calculăm viteza nouă în orificiu (v_o') și apoi viteza rezultată la intrarea în domeniul de calcul (v_{4x4}'), astfel:

$$Re' = \frac{\rho_{aer} \cdot v_o' \cdot De}{\mu_{aer}}$$

$$v_o' = \frac{Re' \cdot \mu_{aer}}{\rho_{aer} \cdot De} = \frac{2500 \cdot 0.0000184}{1.185 \cdot 0.005} = 7.764 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D_o' = 7.764 \cdot 0.000019635 = 0.000152 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D_{4x4}' = 0.000152 \cdot 4 = 0.0006 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v_{4x4}' = \frac{0.0006}{0.0016} = 0.375 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Următorul pas în validarea experimentală a modelului numeric prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal a fost realizarea cazului

numeric. Pentru aceasta am importat grila de calcul cu 5.3 milioane de elemente în ANSYS Fluent și am păstrat modelul ce utilizează ecuația conservării energiei și modelul de turbulență k- ϵ RNG (cu EWF) conform capitolului precedent. Condițiile la limită utilizate sunt prezentate în tabelul 4, noua valoare a vitezei la intrarea în domeniul de calcul fiind esențială în cadrul validării.

Tabel 4. Condiții la limită utilizate pentru validarea modelului numeric

Condiție la limită	Valoare	Unitate de măsură
Magnitudinea vitezei (inlet)	0.375	m/s
Temperatură introducere (inlet)	25	°C
Temperatură placii metalice (metal)	50	°C

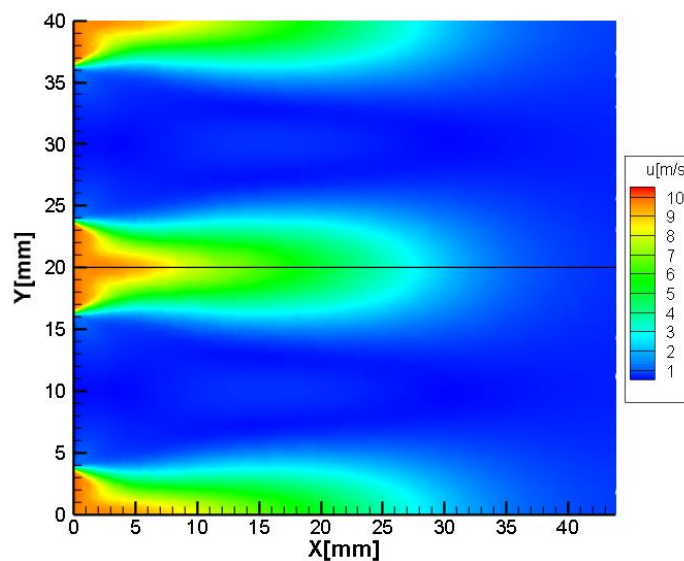


Figura 32 Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform studiului numeric la Re_{2500} în centrul jetului ($Z=0mm$)

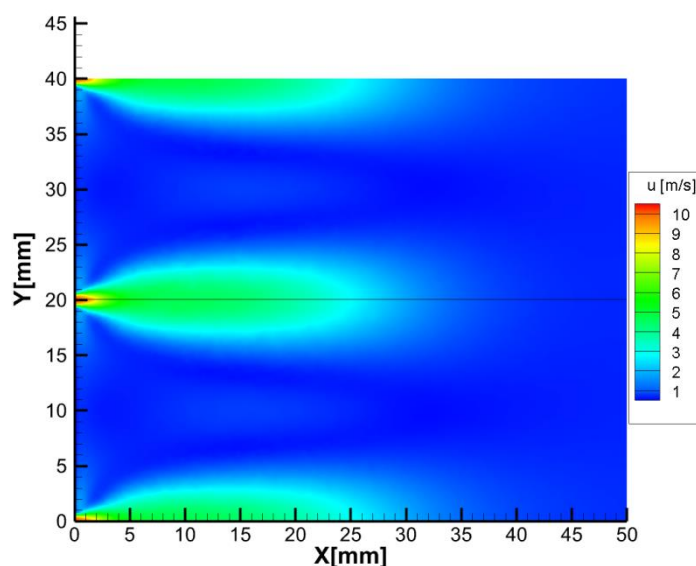


Figura 33 Câmpuri de viteză în plan longitudinal XY conform studiului numeric la Re_{2500} la 2.5mm de centrul jetului ($Z=+2.5mm$)

După rularea simulării numerice am obținut câmpurile de viteză pentru Re_{2500} la curgerea aerului prin orificiul lobat. Datele obținute au fost importate în soft-ul de prelucrare a datelor Tecplot. Câmpurile de viteză în plan longitudinal XY în centrul jetului și la 2.5 mm de centrul jetului sunt prezentate în figura 32 și figura 33. Pentru jetul din mijoc am extras valori ale magnitudinii vitezei în 50 de puncte, similar cu situația precedentă pentru a putea compara profilele de viteză. În cazul studiului numeric, valorile normalizate ale magnitudinii vitezei în cele 50 de puncte sunt prezentate de asemenea în figura 34 și figura 35.

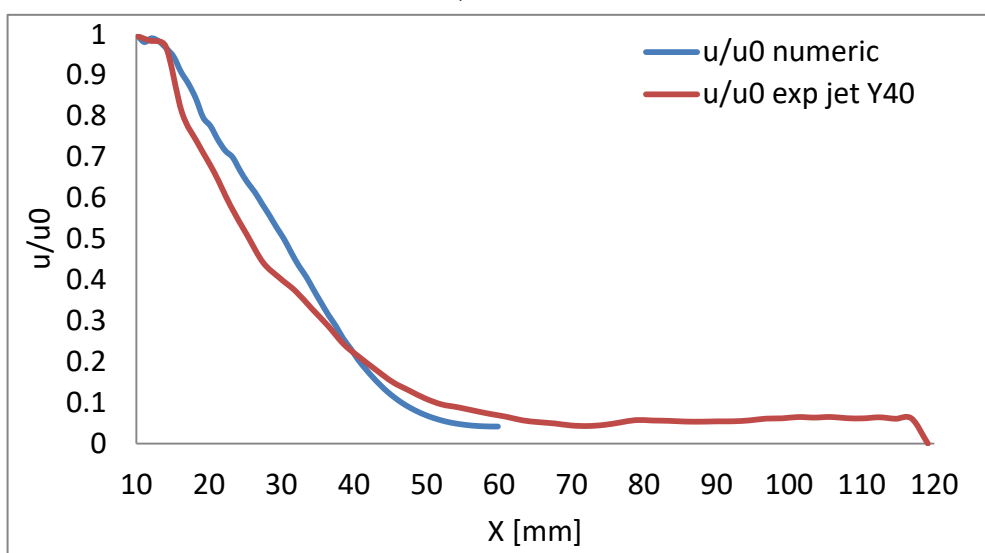


Figura 34 Variația magnitudinii vitezelor normalizate: studiu numeric vs. studiu experimental (centrul jetului $Z=0\text{mm}$)

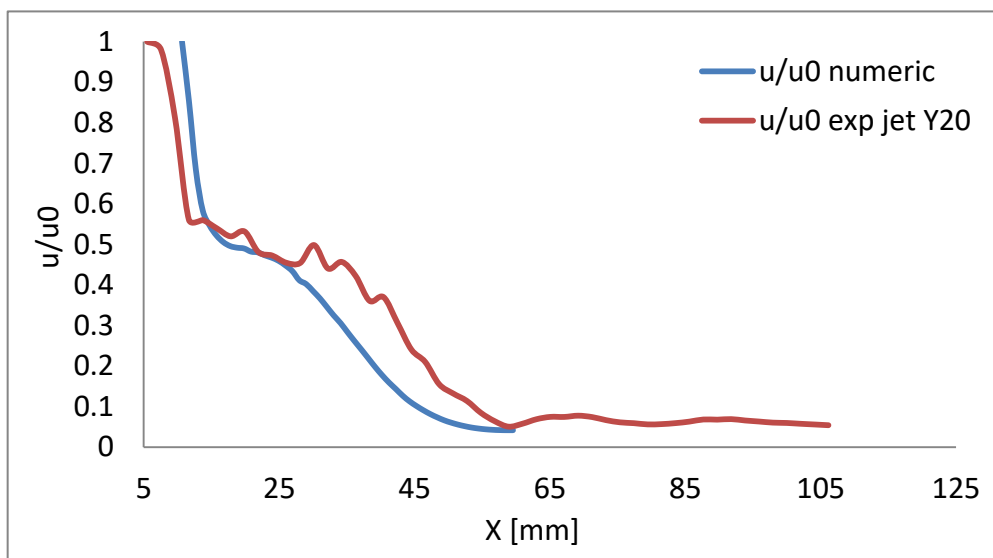


Figura 35 Variația magnitudinii vitezelor normalizate: studiu numeric vs. studiu experimental (la 2.5mm de centrul jetului $Z=+2.5\text{mm}$)

Pentru a compara corespunzător profilele magnitudinii vitezelor în cele două cazuri este necesar ca atât rezultatele numerice cât și cele experimentale să fie normalizate. În figura 34 este prezentată variația vitezelor normalizate în cele 50 de puncte din planul longitudinal XY ce trece prin mijlocul jetului ($Z=0\text{mm}$), atât în cazul numeric, cât și în cazul experimental (jetul Y40). Se poate vedea că

profilele de viteză în ax longitudinal sunt practic asemănătoare, iar după 10De variația este similară. În figura 35 este prezentată variația vitezelor normalizate în cele 50 de puncte din planul longitudinal XY ce trece la 2.5mm de mijlocul jetului ($Z=2.5\text{mm}$), atât în cazul numeric, cât și în cazul experimental (jetul Y20). Se poate vedea că profilele de viteză în ax longitudinal sunt practic asemănătoare, iar după 10De variația este similară. Diferența dintre alura curbelor este data de deviația jetului Y20 în acea porțiune în cadrul studiilor experimentale.

Așadar, comparând valorile obținute experimental cu rezultatele numerice la Re_{2500} putem concluziona faptul că modelul numeric reproduce fenomenele reale ale curgerii în limite acceptabile. Mai mult decât atât începând cu 10De profilele de viteză sunt similare ceea ce confirmă premisele considerate la construcția geometriei.

4.4 Validarea experimentală a modelului numeric prin comparația temperaturilor rezultate

Deși validarea experimentală a modelului numeric prin comparația câmpurilor de viteză în plan longitudinal este cea mai relevantă în cazul curgerii prin placa absorbantă cu orificii lobate, am decis să verific și temperatura rezultată în situația de încălzire. În cazul studiului implementării materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare, atenția este îndreptată în special asupra variațiilor de temperatură și mai puțin asupra variațiilor de viteză, deși acestea pot influența în mod considerabil rezultatele.

Pentru aceasta validare vom compara rezultatele studiului experimental în două puncte (minutul 110 și minutul 255) cu rezultatele obținute în urma rulării modelului numeric. Studiul experimental a fost realizat în condiții similare cu studiile prezentate în capitolul 2, în plus montandu-se un nou senzor în prima cavitate (1st cavity) după aspirarea aerului în colectorul solar prin orificiile lobate, la 5cm de placa absorbantă.

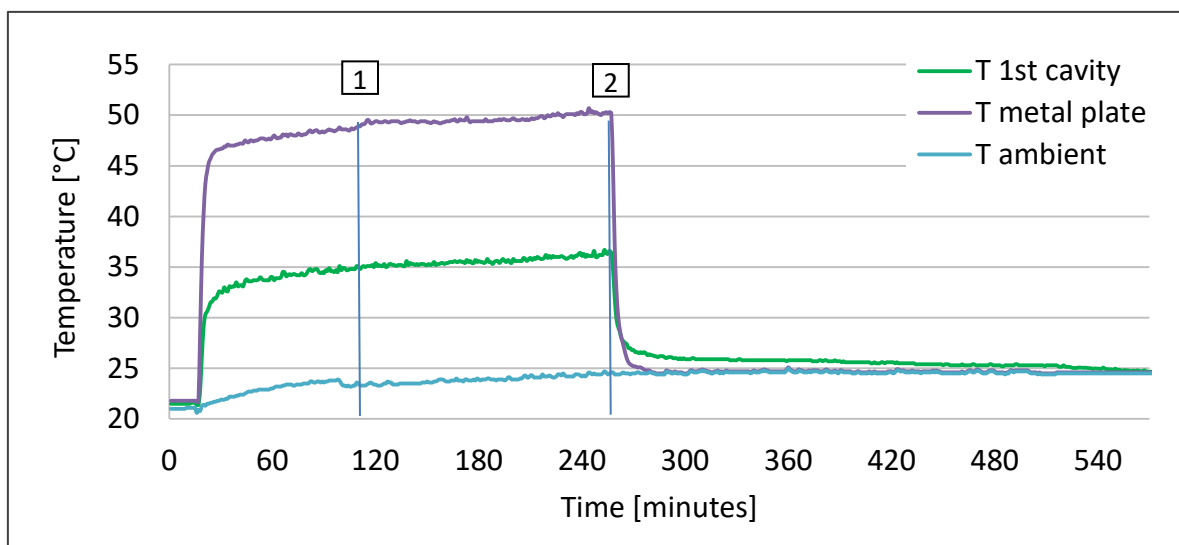


Figura 36 Variația temperaturilor în cazul măsurătorilor experimentale

Așa cum se poate observa în studiul experimental în figura de mai sus, în punctul 1 (minutul 110) la o temperatură ambiantă de 24°C și o temperatură pe placa absorbantă de 49°C, temperatura aerului în cavitate la 5cm de placa absorbantă este de aproximativ 35°C. De asemenea, în punctul 2 (minutul 255) la o temperatură ambiantă de 25°C și o temperatură pe placa absorbantă de 52°C, temperatura aerului în cavitate la 5cm de placa absorbantă este de aproximativ 36.5°C. Acestea au constituit și condițiile la limita impuse pentru studiul numeric (tabelul 5 și tabelul 6).

Tabel 5. Condiții la limită utilizate pentru punctul 1

Condiție la limită	Valoare	Unitate de măsură
Magnitudinea vitezei (inlet)	0.055	m/s
Temperatură introducere (inlet)	24	°C
Temperatură placii metalice (metal)	49	°C

Așa cum se poate vedea în figura 37, câmpul de temperatură la ieșirea din domeniul de calcul (outlet) în cazul punctul 1 studiat are o valoare asemanatoare cu cea obținută în cadrul măsurătorilor experimentale. Mai mult decât atât, temperaturile se uniformizează foarte rapid după ce curentul aer strabate placa metalică absorbantă și preia căldura de la aceasta.

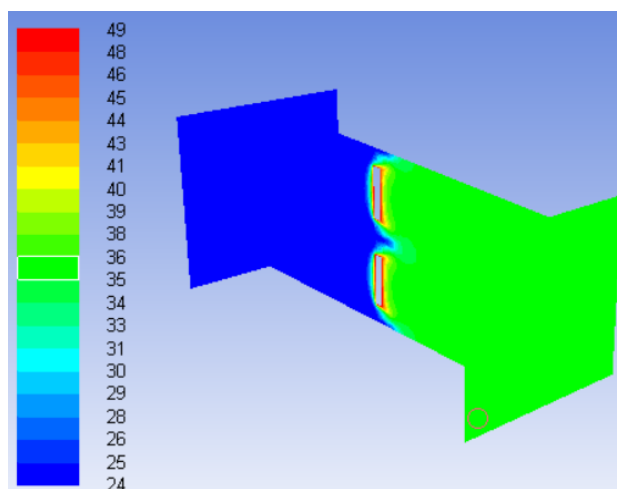


Figura 37 Câmpurile de temperatură pentru punctul 1 studiat

Așa cum se poate vedea în figura 38, câmpul de temperatură la ieșirea din domeniul de calcul (outlet) în cazul punctul 2 studiat are o valoare asemanatoare cu cea obținută în cadrul măsurătorilor experimentale, respectiv 36.5°C.

Tabel 6. Condiții la limită utilizate utilizate pentru punctul 2

Condiție la limită	Valoare	Unitate de măsură
Magnitudinea vitezei (inlet)	0.055	m/s
Temperatură introducere (inlet)	25	°C
Temperatură placii metalice (metal)	50	°C

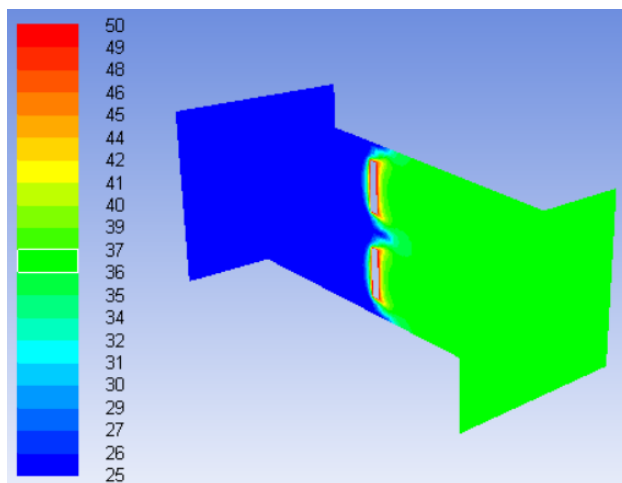


Figura 38 Cămpurile de temperatură pentru punctul 2 studiat

Așadar, ținând cont de toate aspectele prezentate în ultimele două capitole putem afirma faptul ca modelul numeric reproduce fenomenele reale ale curgerii și transferului de călduri surprinse în cazul studiilor experimentale și poate fi utilizat mai departe în cadrul analizelor numerice.

4.5 Parametrii finali ai modelului numeric și rezultate

Având în vedere analizele elaborate în prezentul capitol, putem concluziona parametrii finali ai modelului numeric ce studiază curgerea aerului prin placa metalică absorbantă cu orificii lobate.

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.

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 3, însa acestea pot fi modificate pentru obținerea diverselor rezultate și pentru realizarea de studii parametrice (post-procesarea propriu-zisă a modelului).

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.

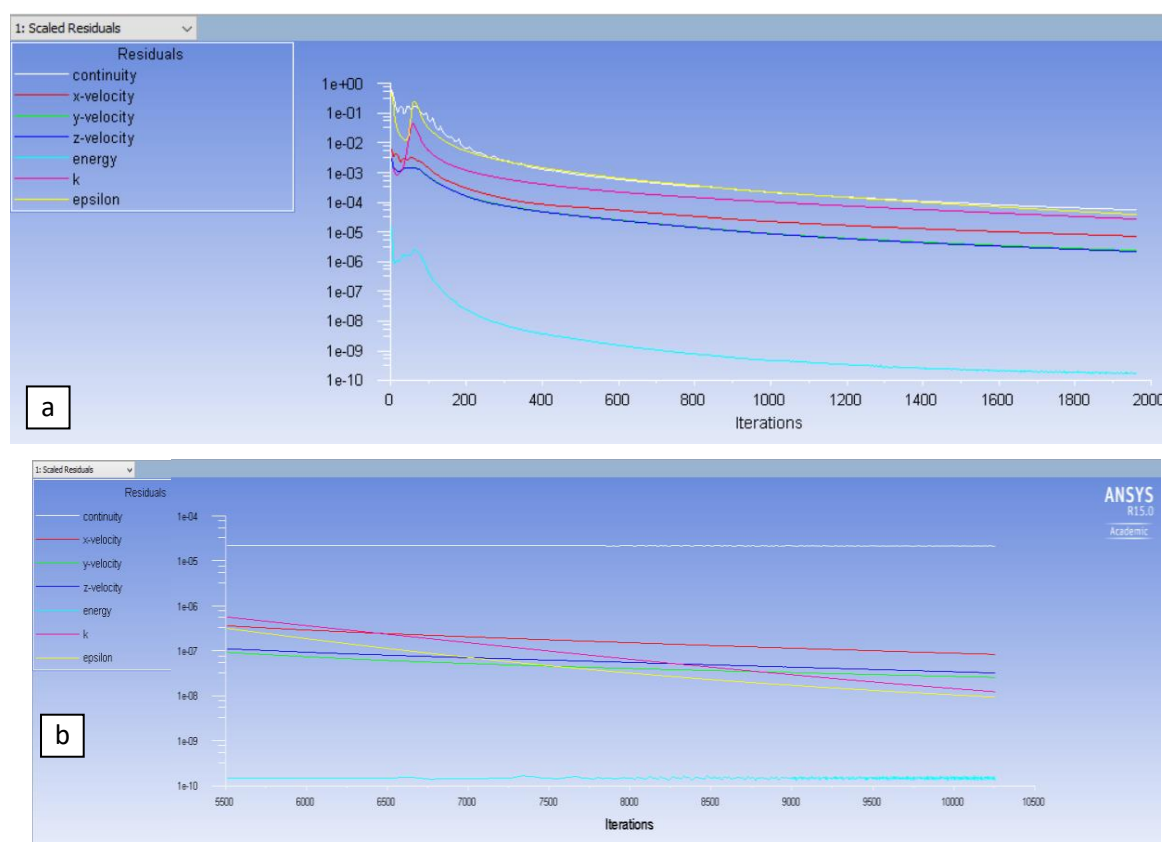


Figura 39 Imagini tipice pentru convergența reziduurilor pentru o rulare în regim staționar: a – după 2000 de iterații, b – după 10000 de iterații

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).

În continuare sunt prezentate câteva dintre rezultatele modelului numeric construit și analizat în prezentul capitol luând în considerare condițiile la limită prezentate în tabelul 3 ce surprind etapa de “încălzire”.

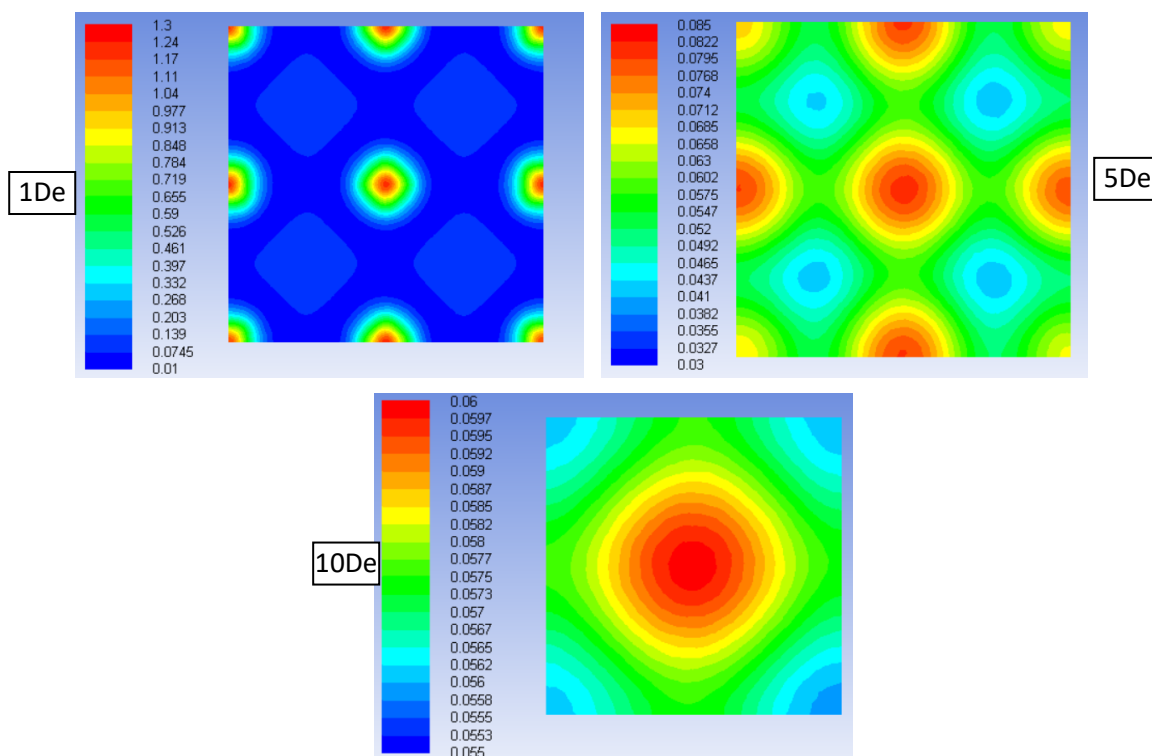


Figura 40 Câmpuri de viteză la diferite distanțe față de placa metlică absorbantă

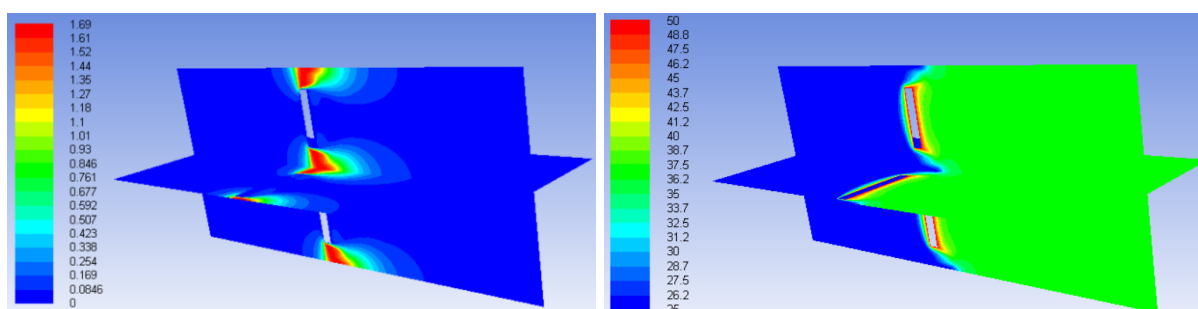


Figura 41 Câmpuri de viteză și temperatură în planurile longitudinale XY și XZ

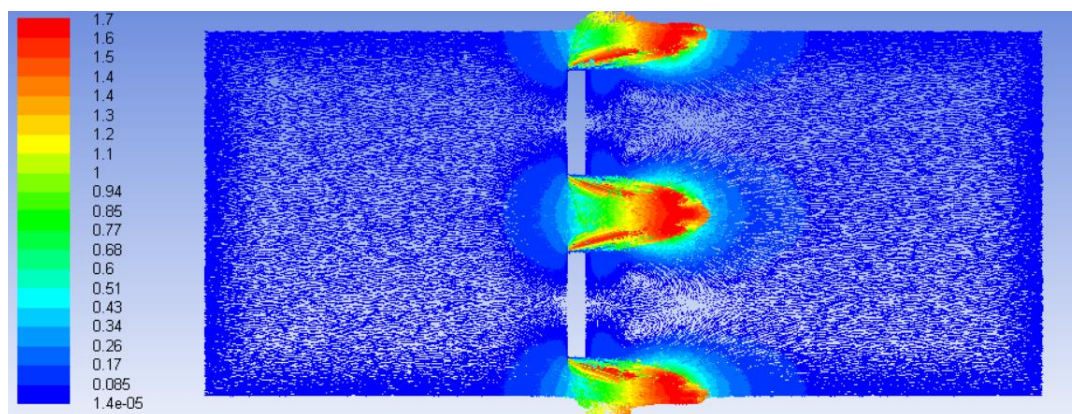


Figura 42 Vectori de viteză în planul longitudinal XY

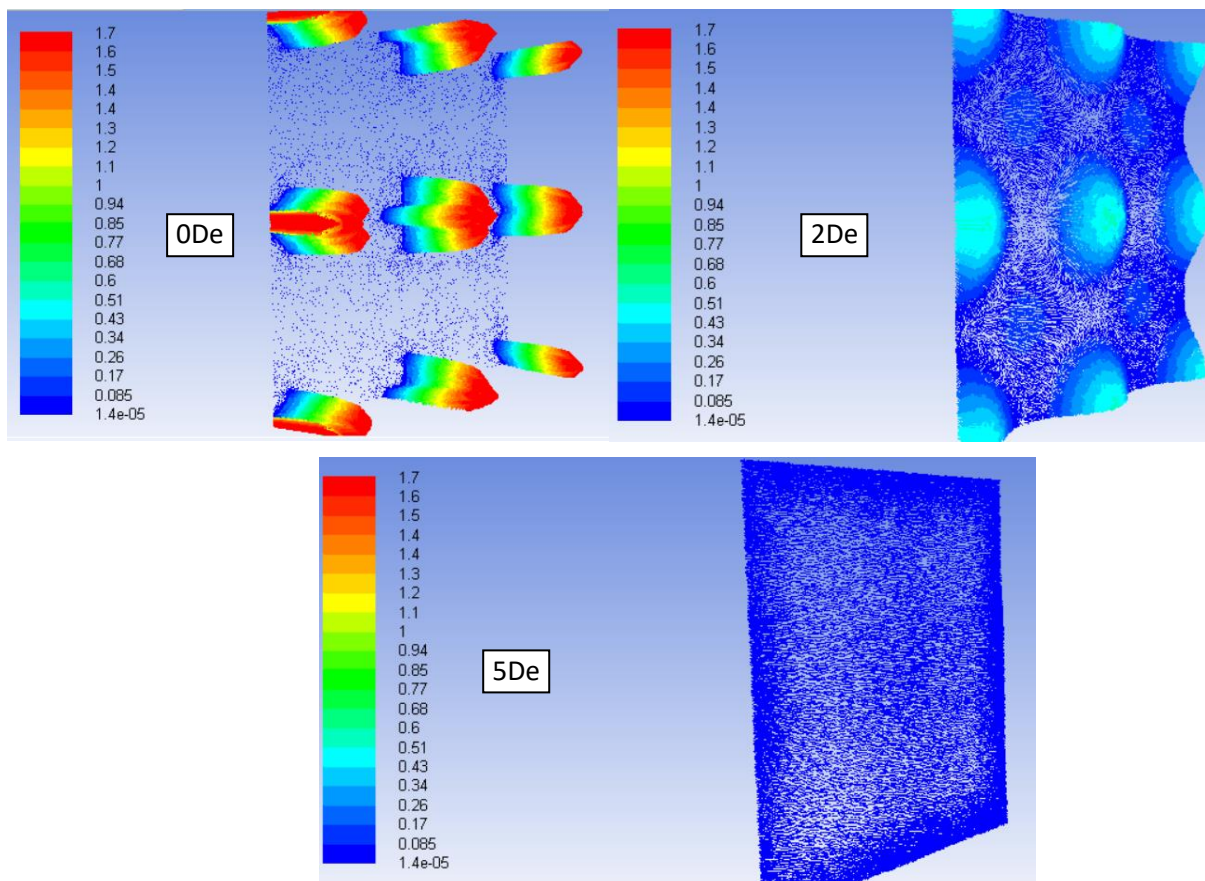


Figura 43 Vectori de viteză în diferite planuri transversale

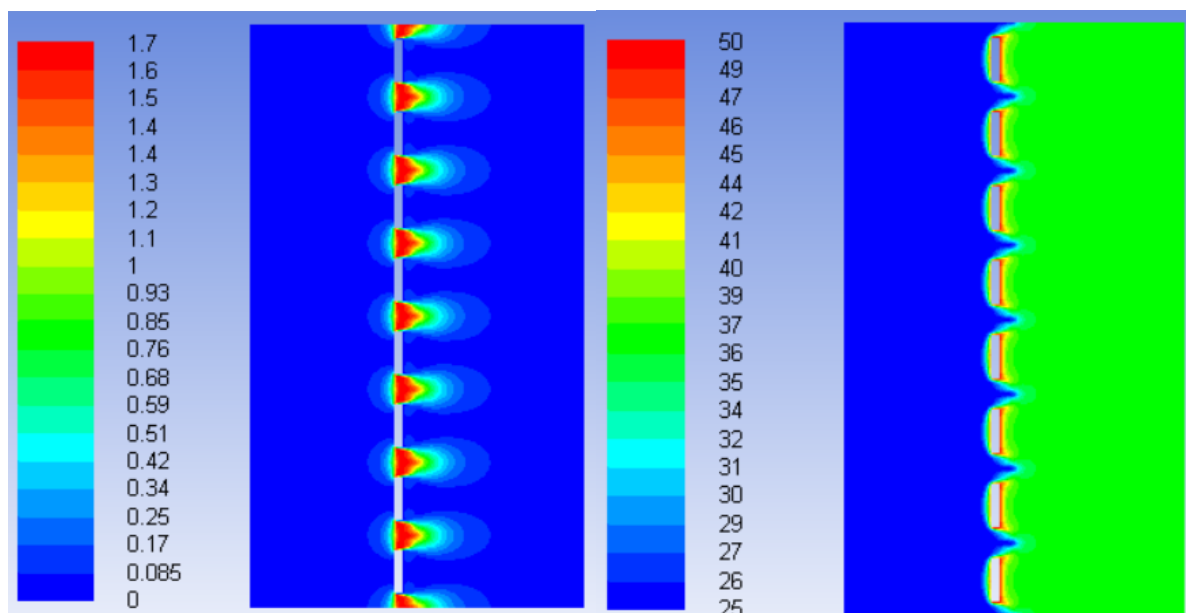


Figura 44 Câmpuri de viteză și temperatură în planurile longitudinale XY pentru 7 orificii

5. Realizarea unui model numeric pentru colectorul solar cu orificii lobate si materiale cu schimbare de faza integrate – model simplificat

5.1. Realizarea modelului geometric

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 modelul 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 45 se poate observa placa absorbantă prin care este aspirat aerul ambiental în cavitatea colectorului solar. Din aceasta am extras un rând de orificii (figura 45a), rezultând o "felie" transversală prin colectorul solar (figura 45b). 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.

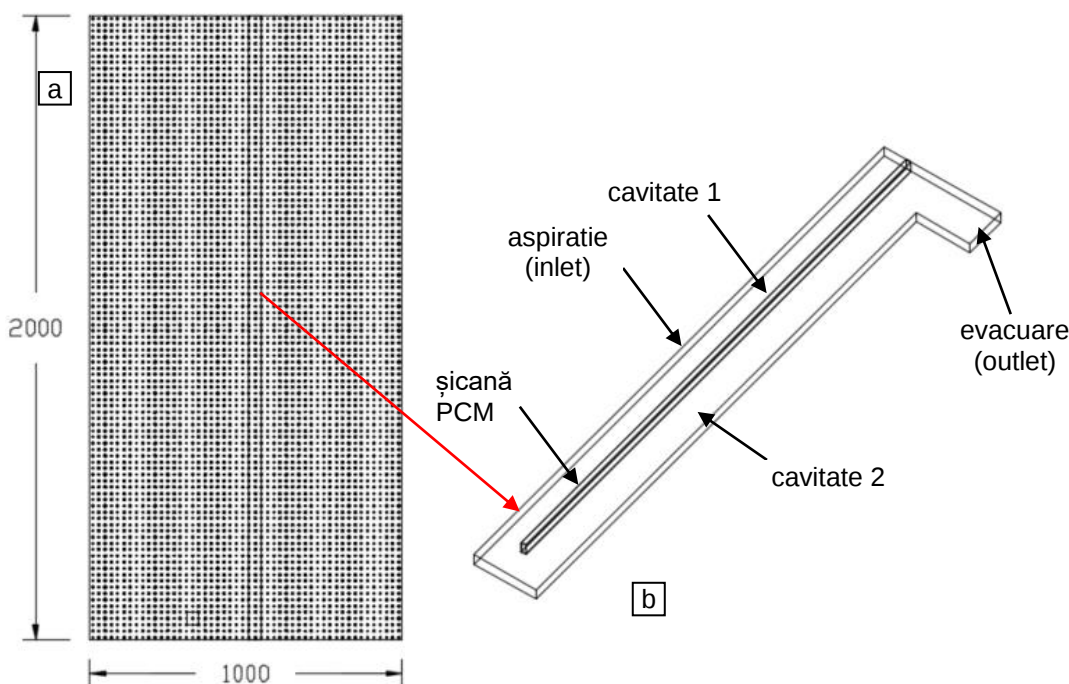


Figura 45 Realizarea geometriei 3D în AutoCAD: a – placa absorbantă cu orificii lobate, b – extragerea unei "felii" din colectorul solar și componentele acesteia

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 (figura 46).

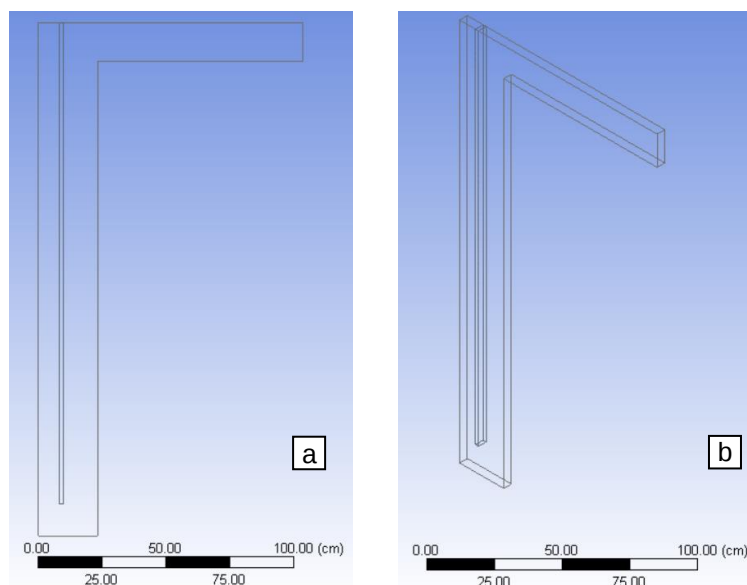


Figura 46 Importarea geometriei din AutoCAD în ANSYS DesignModeler: a – vedere din lateral; b – vedere izometrică

În figura 47 se poate observa modul de definire al corpurilor în cazul geometriei realizate în ANSYS. Pentru a obține o curgere cât mai stabilă la evacuarea aerului vechiulat prin colectorul solar, zona apropiată de outlet a fost prelungită față de cazul real.

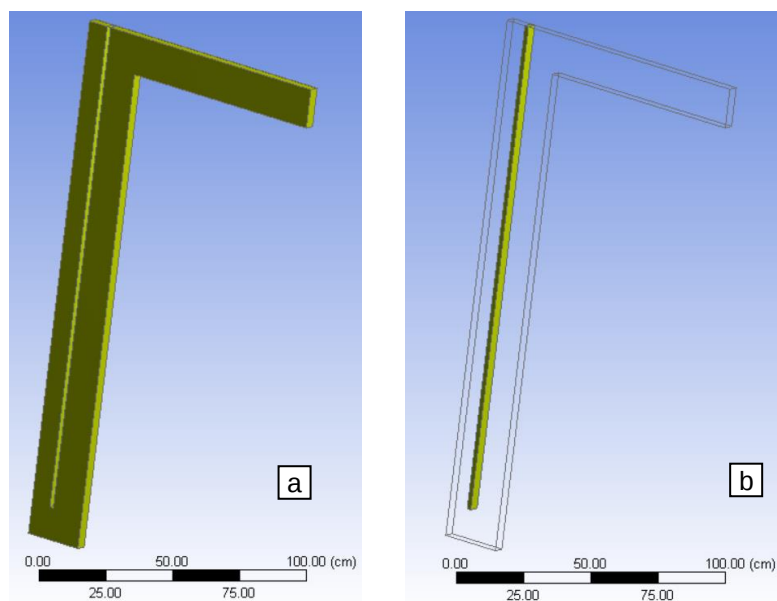


Figura 47 Definirea corpurilor în ANSYS DesignModeler: a – cavitatea corespunzătoare curgerii aerului prin colector; b – corp PCM

Aspirația 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 48).

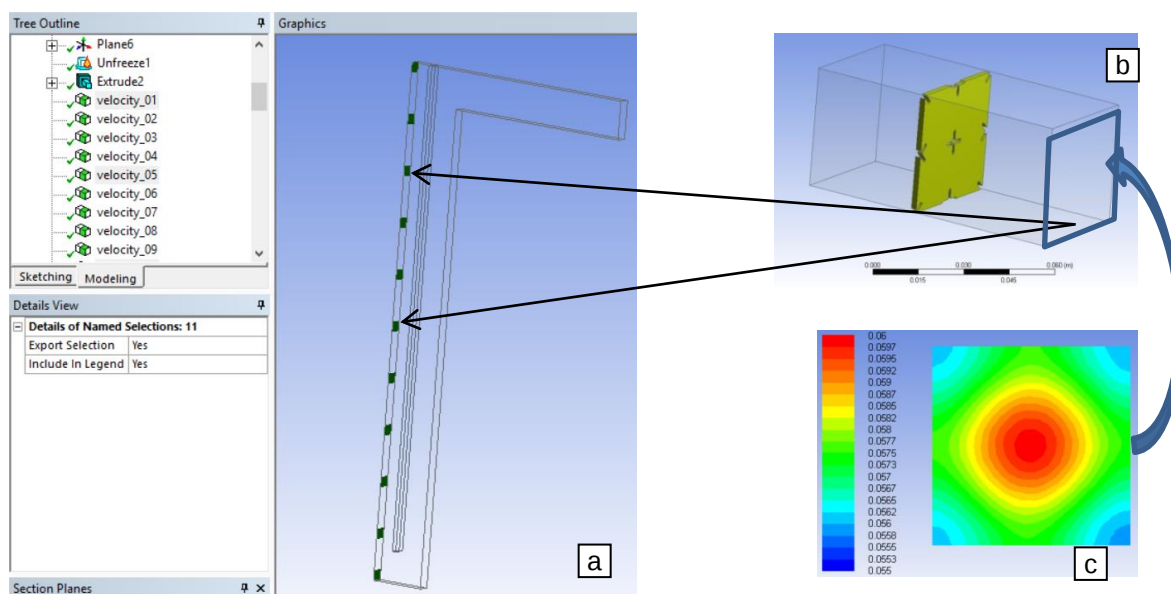


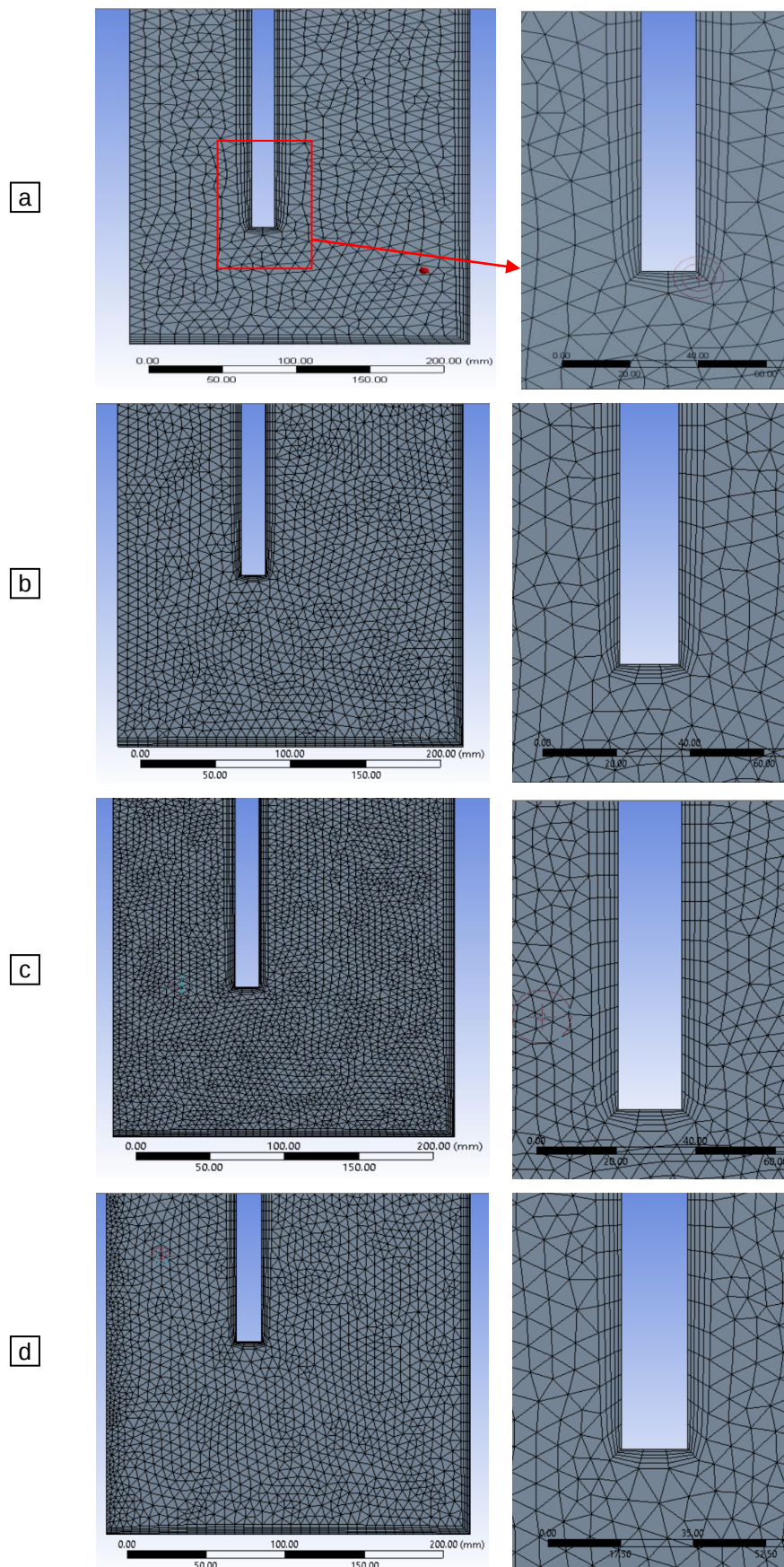
Figura 48 Crearea zonelor specifice aspirării aerului (inlet) unde se vor introduce profilele de viteză și temperatura din capitolul anterior a – 50 de zone pe inlet; b – outlet-ul studiul anterior devine inlet-ul studiul actual; c – câmpul de viteze ce se va integra pe noul inlet

5.2. 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 prelungi substanțial prezentului 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 precadere 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.

Nivelurile de discretizare sunt prezentate în figura 49 și se poate observa creșterea treptată a concentrației de elemente de discretizare în special în stratul limită. Nivelul de discretizare optim se stabilește prin simulări numerice individuale, utilizând condiții la limită și modele de calcul identice.



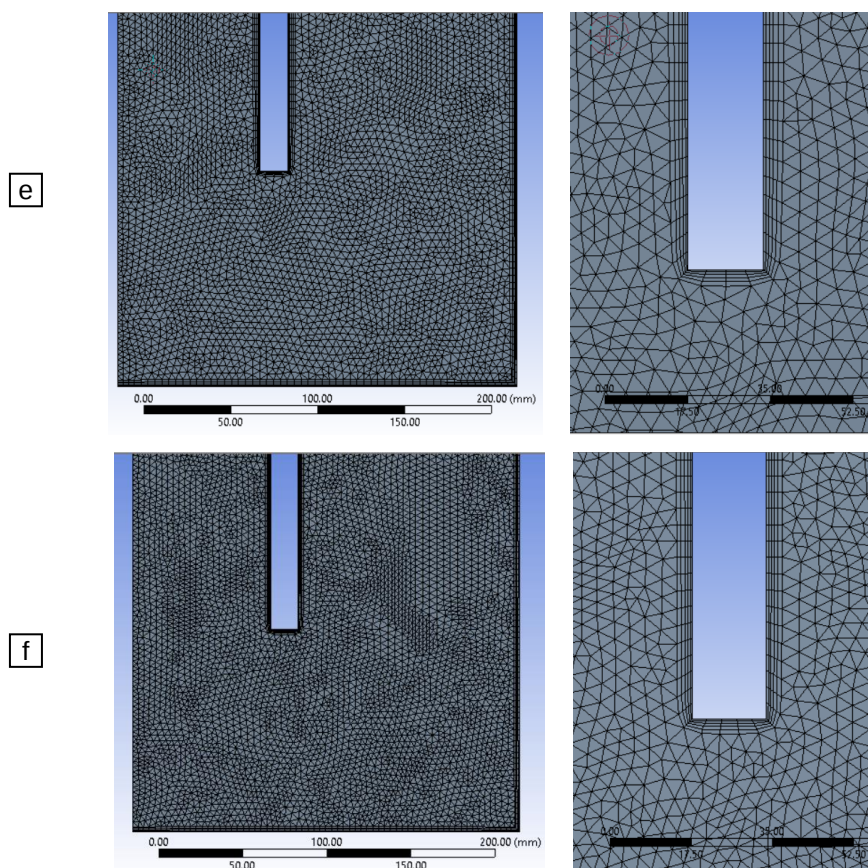


Figura 49 Nivelul de discretizare pentru cazurile analizate fara PCM: a) 0.2 (0.18), b) 0.66 (0.61), c) 1.3 (0.7), d) 2.8 (1), e) 5 (2.5), f) 6 (3.5) milioane de elemente

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 7. 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. Zonele unde s-au impus condiții la limită sunt prezentate în figura 50.

Tabel 7. 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

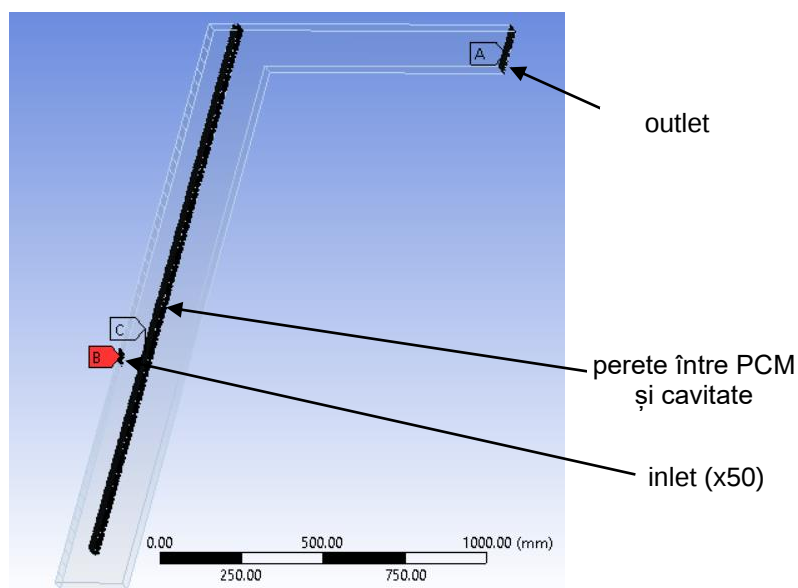


Figura 50 Condiții la limită

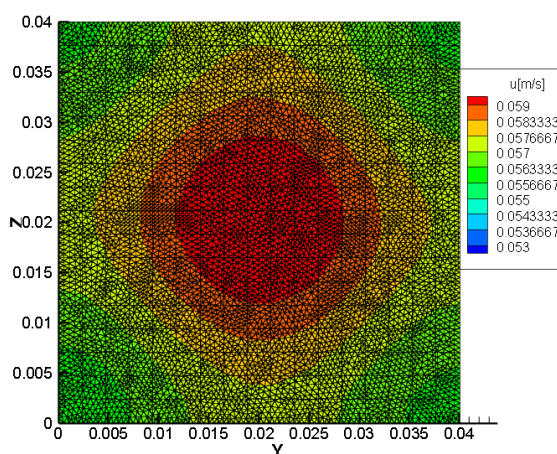


Figura 51 Câmpuri de viteză importante din modelul studiat în capitolul precedent și prelucrate în Tecplot

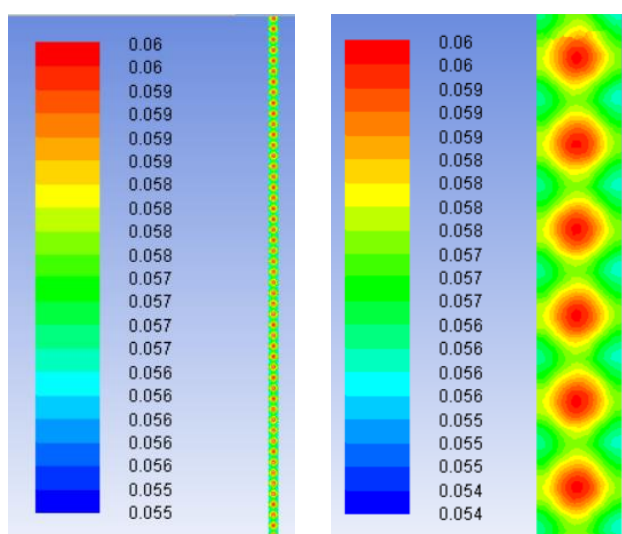
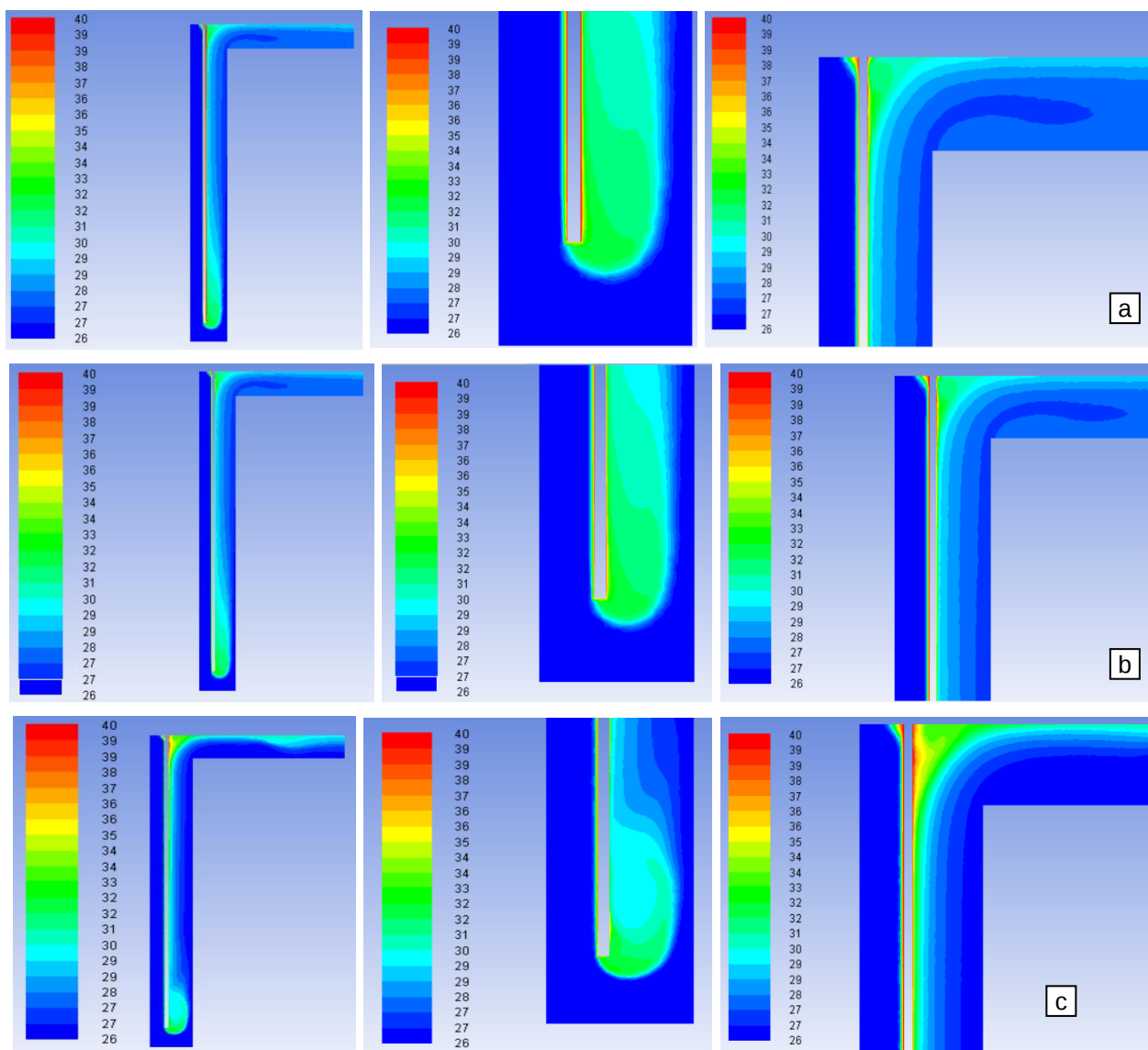


Figura 52 Câmpuri de viteză importante din modelul studiat în capitolul precedent în modelul colectorului solar cu PCM

Câmpul de viteză obținut la 10De în capitolul precedent a fost importat în soft-ul de prelucrare a datelor Tecplot (figura 51). 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 imporate 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 [86] și în cazul curgerilor de aer în cavități rectangulare de aer [87]. 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 [84]. 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.



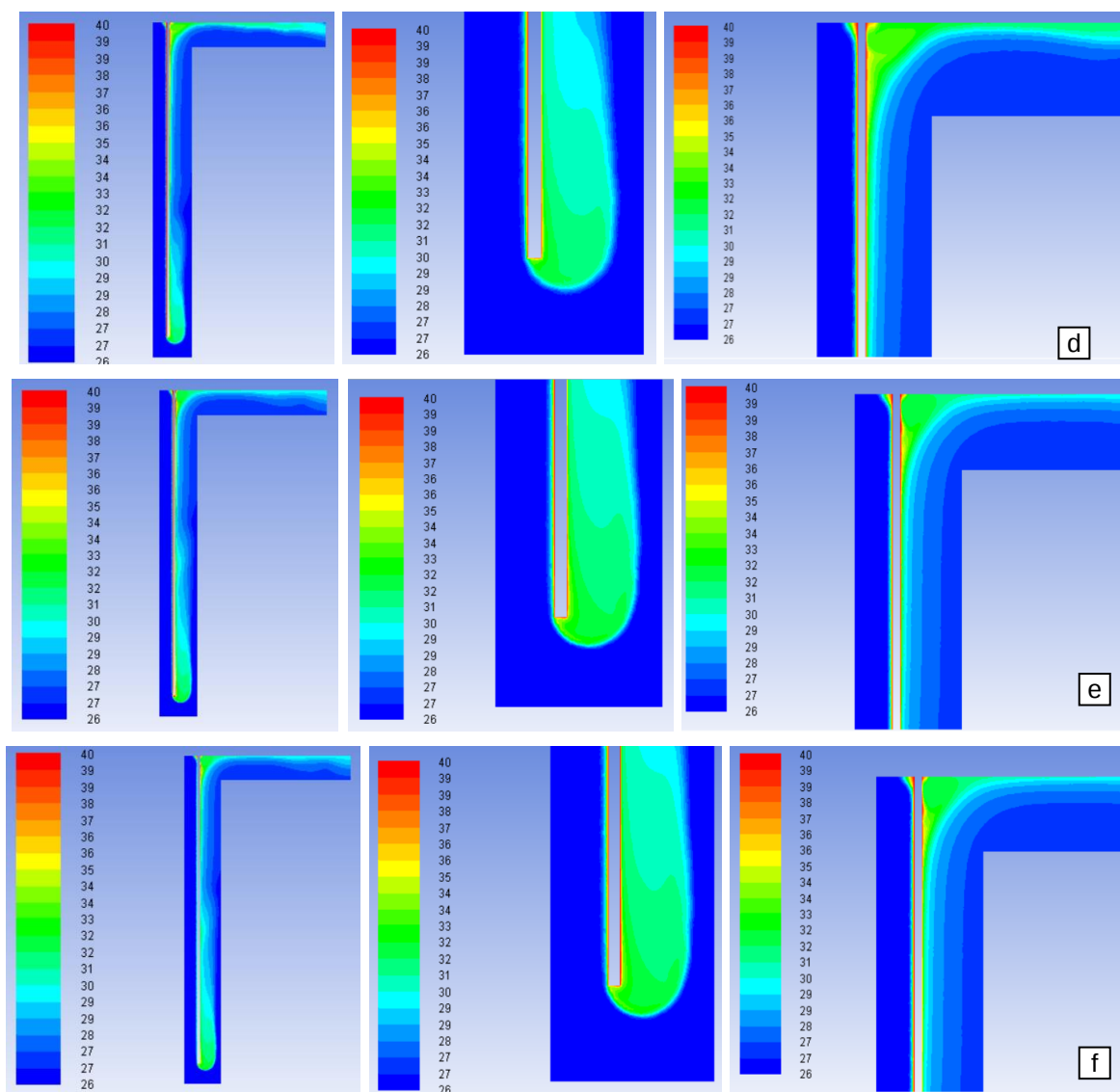
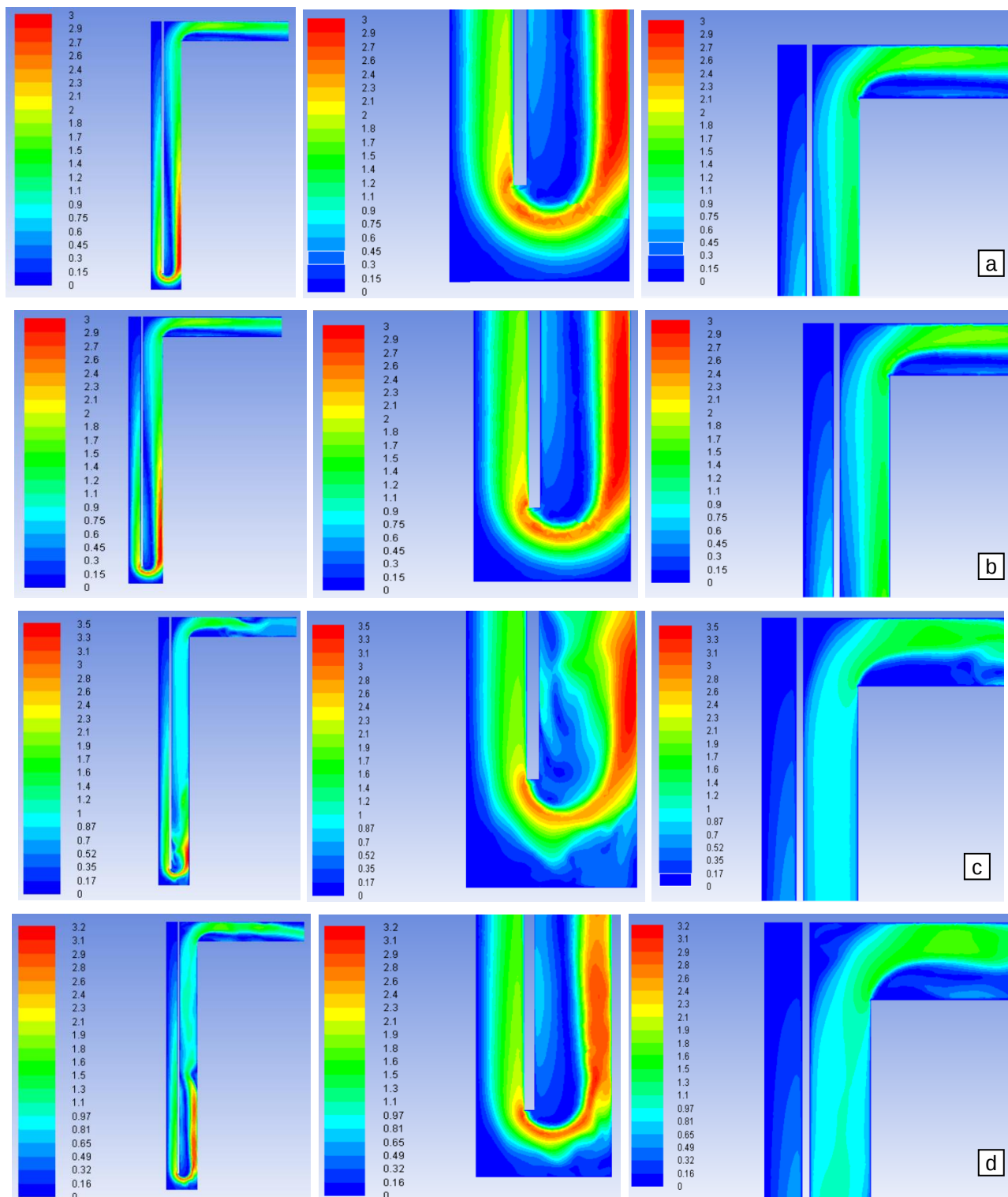


Figura 53 Câmpuri de temperatură în plan longitudinal (simetrie): a) 0.2 (0.18), b) 0.66 (0.61), c) 1.3 (0.7), d) 2.8 (1), e) 5 (2.5), f) 6 (3.5) milioane de elemente (scara temperaturii este în °C)

În figura 53 sunt prezentate câmpurile de temperatură în plan longitudinal (XY) pentru cele 6 grile de discretizare alese. 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 turbioanelor 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 observă de asemenea și viteze mai mari ale acestuia (figura 54).



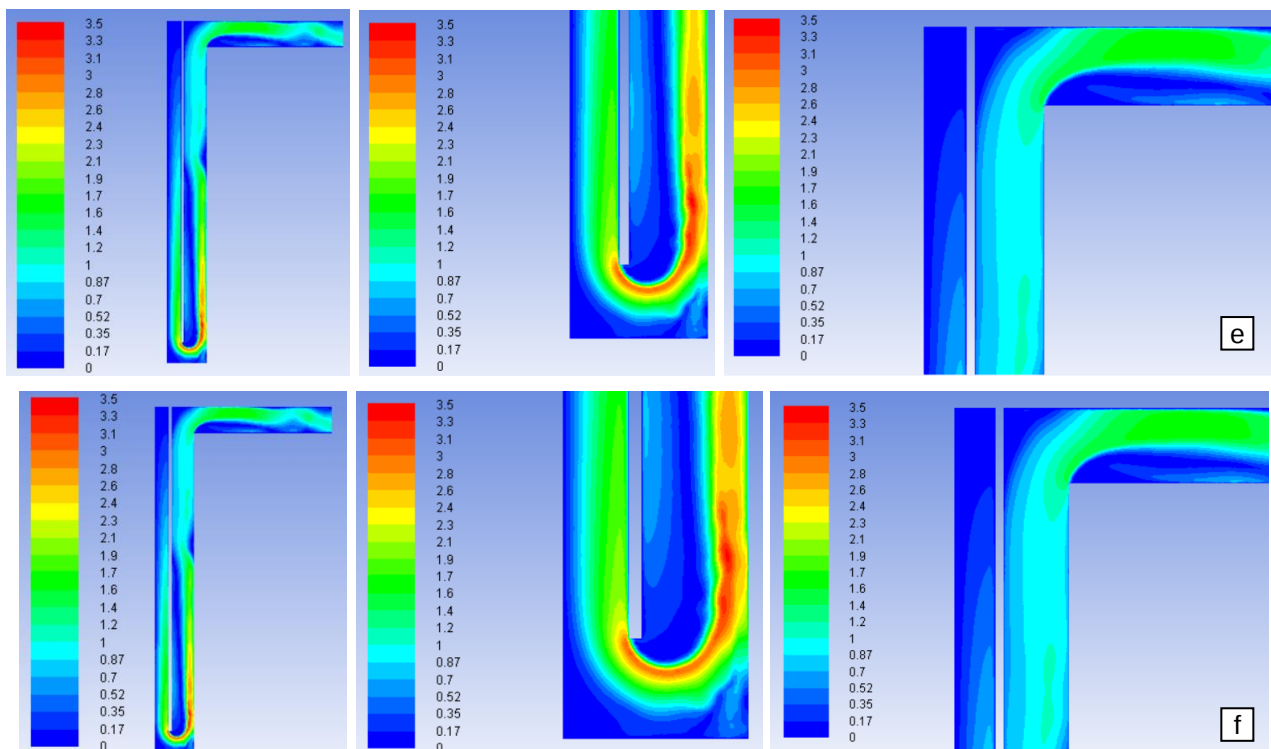


Figura 54 Câmpuri de viteză în plan longitudinal (simetrie): a) 0.2 (0.18), b) 0.66 (0.61), c) 1.3 (0.7), d) 2.8 (1), e) 5 (2.5), f) 6 (3.5) milioane de elemente (scara vitezei este în m/s)

În figura 54 sunt prezentate câmpurile de viteză în plan longitudinal (XY) pentru cele 6 grile de discretizare alese. 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 că în partea de jos a colectorului solar, în cea de a doua cavitate, viteza aerului în apropierea peretelui crește datorită șicanei cu PCM și determină apariția unor turbioane în apropierea acesteia ce determină creșterea temperaturilor (figura 55).

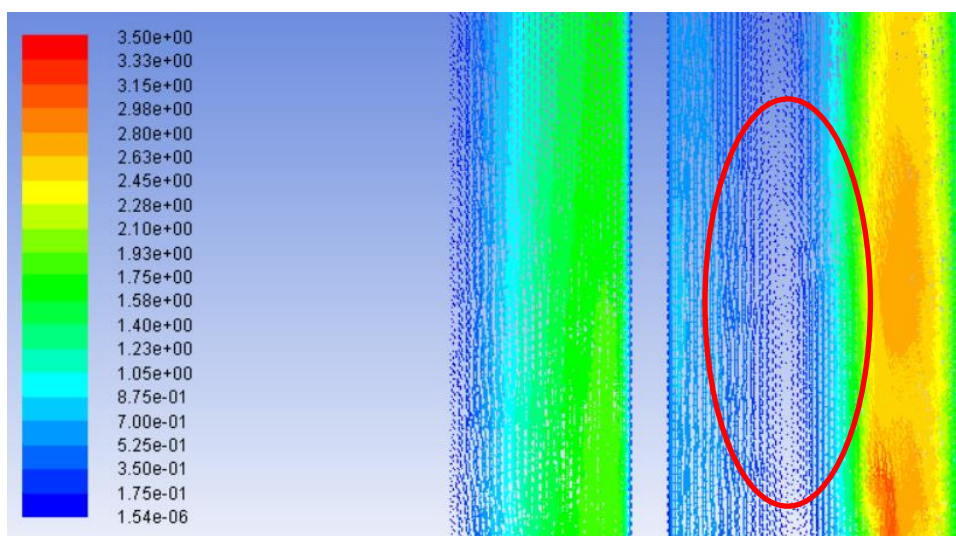


Figura 55 Vectori de viteză în plan longitudinal – apariția turbioanelor

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 56). Aceasta grila de discretizare completează grila din figura 49e și este prezentată în figura 56 e evidențiază și discretizarea cavității cu materiale cu schimbare de fază.

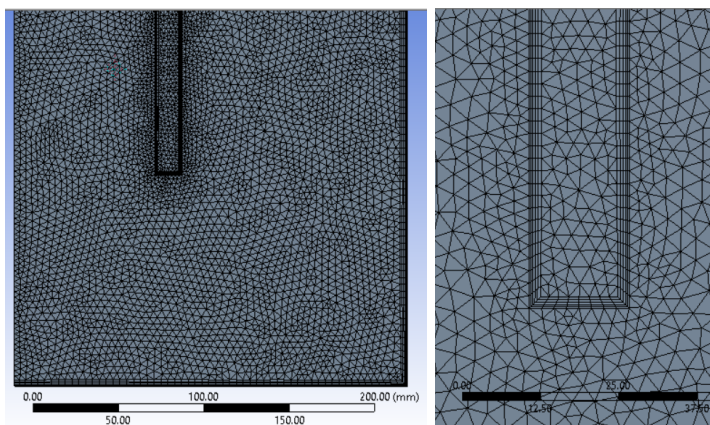


Figura 56 Nivelul de discretizare pentru cazul final cu PCM – 5 milioane de elemente

5.3. 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).

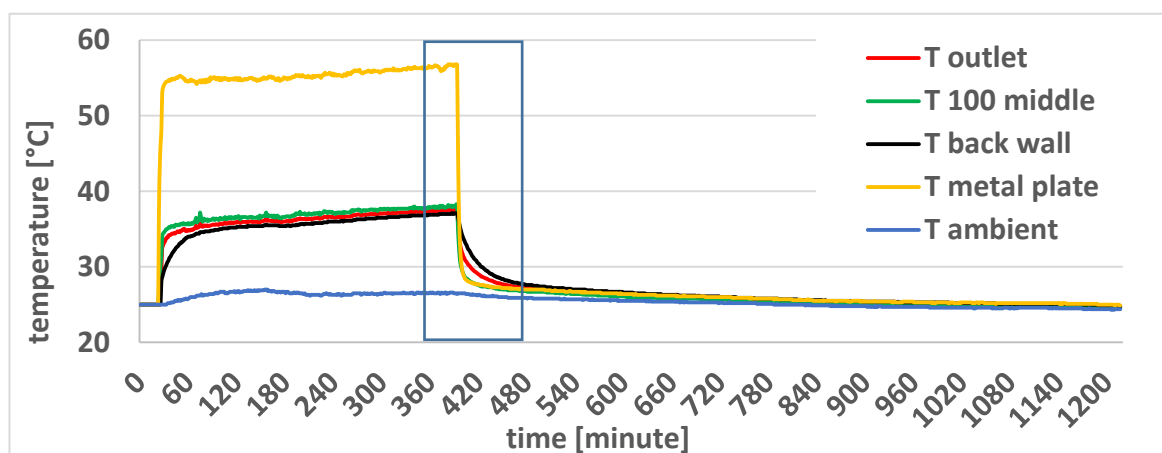


Figura 57 Interval de timp extras din studiul experimental pentru validarea numerică – 2 ore, respectiv 7200 secunde

Pentru a realiza validarea modelului într-un interval de timp fezabil, am decis extragerea a 120 de minute din rezultatele experimentale (figura 57) ce surprind principalele etape (palieri de variație) din cadrul studiului, respectiv: încălzirea – acumularea de energie (I), oprirea radiației solare (II) și răcirea – cedarea energiei acumulate (III). Aceste etape sunt prezentate în figura 58 care surprinde variația temperaturii ambientale aspirate prin orificiile lobate și variația temperaturii pe placa metalică absorbantă timp de 120 de minute. Variațiile celor două valori sunt necesare a fi introduse în model (condiții la limită) pentru determinarea variației temperaturii la ieșirea din domeniul de calcul, respectiv la 10De.

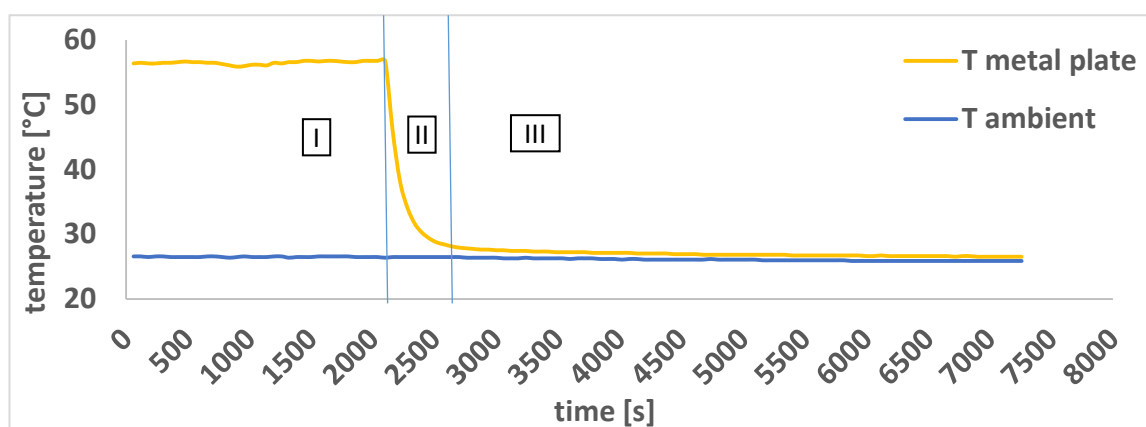


Figura 58 Variația de temperatură pentru două ore pentru placa metalică absorbantă și temperatura ambientală (aerul aspirat în colector)

Pentru a introduce în ANSYS Fluent variația unui parametru în funcție de timp este necesară realizarea unei funcții definite de utilizator (UDF = User Defined Function). Aceasta reprezintă un program realizat în limbajul de programare C++ ce calculează temperatura dorită în funcție de timp. Pentru a realiza acest program este necesară împărțirea rezultatelor experimentale în trei funcții distincte ce corespund celor de palieri de variație enumerate mai sus.

Primul palier de variație a temperaturii (I) este caracterizat printr-o variație liniară și este prezentat în figura 59-I. Tot în aceeași figură este prezentată și ecuația de variație a temperaturii ambientale determinată de asemenea de o alura liniară. Al doilea palier de variație a temperaturii pe placa metalică absorbantă coincide cu oprirea bruscă a surse de căldură și scăderea rapidă a temperaturii și este prezentată în figura 59-II. Aceasta etapă este caracterizată printr-o ecuație polinomială de gradul 4. Al treilea palier de variație a temperaturii reprezintă răcirea sistemului și prezintă o variație liniară.

Ecuatiile corespunzătoare celor trei etape de variație a temperaturii plăcii absorbante și temperaturii ambientale sunt prezentate în figura de mai jos.

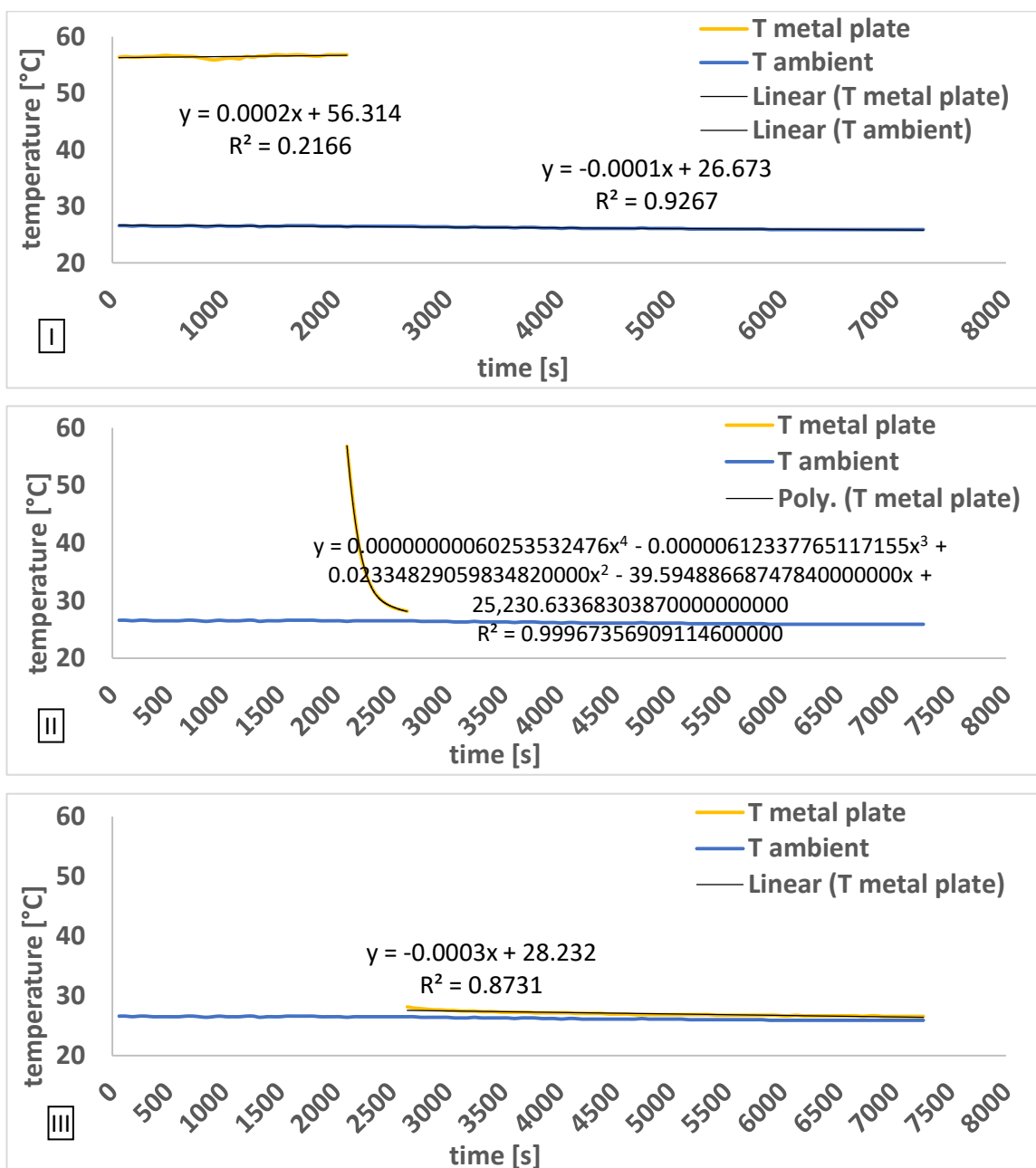


Figura 59 Extragerea ecuațiilor de variație a temperaturii plăcii metalice și temperaturii ambientale pentru obținerea condițiilor la limită variabile (UDF): încălzirea (I), oprirea radiației solare (II) și răcirea (III)

După obținerea celor patru ecuații de variație am realizat programul în C++ ce va determina introducerea unor condiții la limită variabile în modelul numeric realizat în Fluent. Programul a trecut prin multiple faze de testare, iar forma sa finală este prezentată în continuare:

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(Tmetal, thread, position)
{
    face_t f;
```

```

real t = CURRENT_TIME;
begin_f_loop(f, thread)
{
    if (t <= 2100)
        F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 + 0.0002*t + 56.314;
    else if (2100 < t && t <= 2640)
        F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 + (6.0253532476*pow(10,-
10))*pow(t,4) - (6.12337765117155*pow(10,-6))*pow(t,3) +
0.0233482905983482*pow(t,2) - 39.5948866874784*t +
25230.6336830387;
    else if (t > 2640)
        F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 - 0.0003*t + 28.232;
}
end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(Tinlet, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 - 0.0001*t + 26.673;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

După realizarea UDF-ului necesar studiului în regim tranzitoriu am setat cazul modelului numeric conform capitolului 4. Am utilizat modelul de turbulenta $k-\epsilon$ RNG și condițiile la limită prezentate în tabelul 8. De asemenea am utilizat funcția de monitorizare a temperaturilor pe suprafețe pentru obținerea graficelor de variație a temperaturii în timp. 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: pasul de timp de 20s, 360 pași de timp (7200 secunde) și respectiv 10 iterații pe fiecare pas de timp.

Tabel 8. Condiții la limită utilizate pentru modelarea curgerii prin orificii lobate în regim tranzitoriu

Condiție la limită	Valoare	Unitate de măsură
Magnitudinea vitezei (v_{ambient})	0.055	m/s
Temperatură introducere (T_{ambient})	Variabilă conform UDF	
Temperatură placii metalice ($T_{\text{metal plate}}$)	Variabilă conform UDF	

Pentru a putea compara rezultatele studiului numeric cu cele ale studiului experimental am completat standul experimental cu un senzor de temperatură amplasat la 5cm de placa absorbantă. Rezultatele suprapuse ale simulării numerice și a măsurătorilor sunt prezentate în figura 60. Așa cum se poate observa variația temperaturii ambientale și variația temperaturii pe placa metalică absorbantă respecta ecuațiile impuse în condițiile la limită, iar variația temperaturii la 10De (Toutlet) din studiul numeric respecta valorile din studiul experimental, alura curbelor fiind practic asemănătoare.

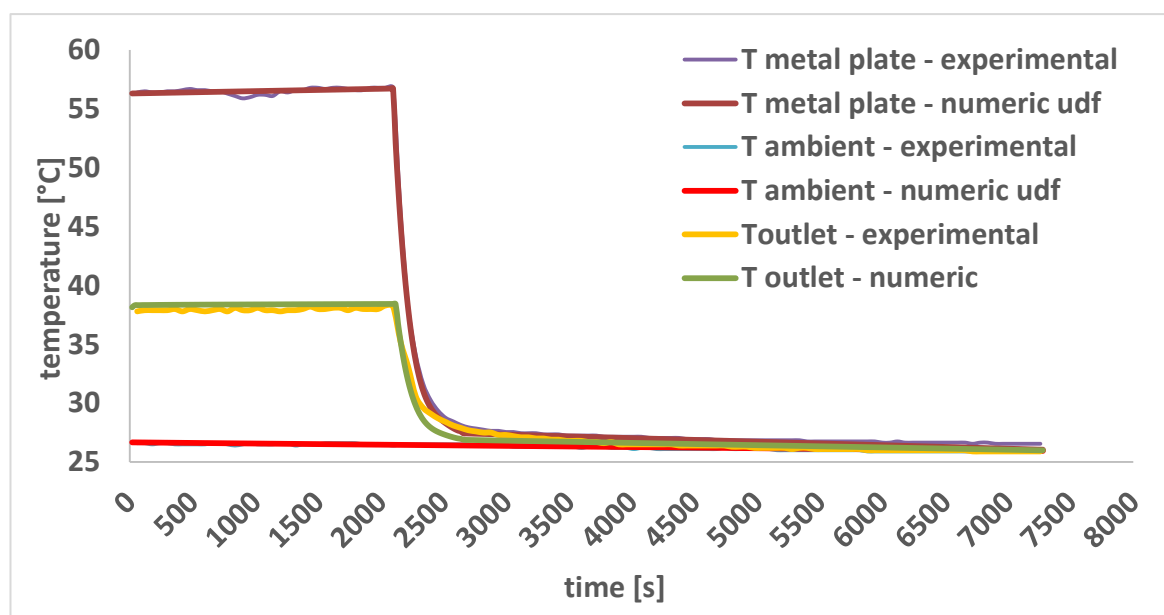


Figura 60 Validarea experimentală a modelului numeric – curgerea prin placa cu orificii lobate

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 61).

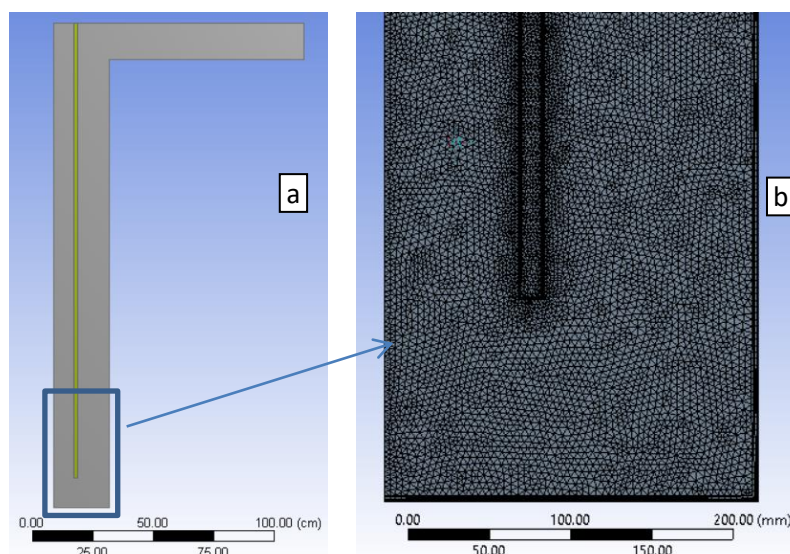


Figura 61 a - Geometria colectorului cu PCM și b - grila de discretizare cu PCM (5 milioane de celule)

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 9 și utilizate în cadrul studiului experimental.

Tabel 9. Caracteristicile materialului cu schimbare de fază utilizat în studiile experimentale [88]

Caracteristică	Valoare	Unitate de măsură
Producător	Rubitherm	
Model	RT 35 (parafină)	
Temperatură de topire	29-36 (vârf la 33)	°C
Temperatură de solidificare	36-31 (vârf la 35)	°C
Capacitate de stocare a energiei $\pm 7.5\%$ (sensibil + latent între 26-41°C)	160	kJ/kg
Capacitate de stocare a energiei $\pm 7.5\%$ (sensibil + latent între 26-41°C)	45	Wh/kg
Căldură specifică	2	kJ/kg·K
Densitate solid (15°C)	0.86	kg/l
Densitate lichid (45°C)	0.77	kg/l
Conductivitate termică	0.2	W/m·K
Variația volumului	12.5	%
Temperatura maximă de operare	65	°C

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 62 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.

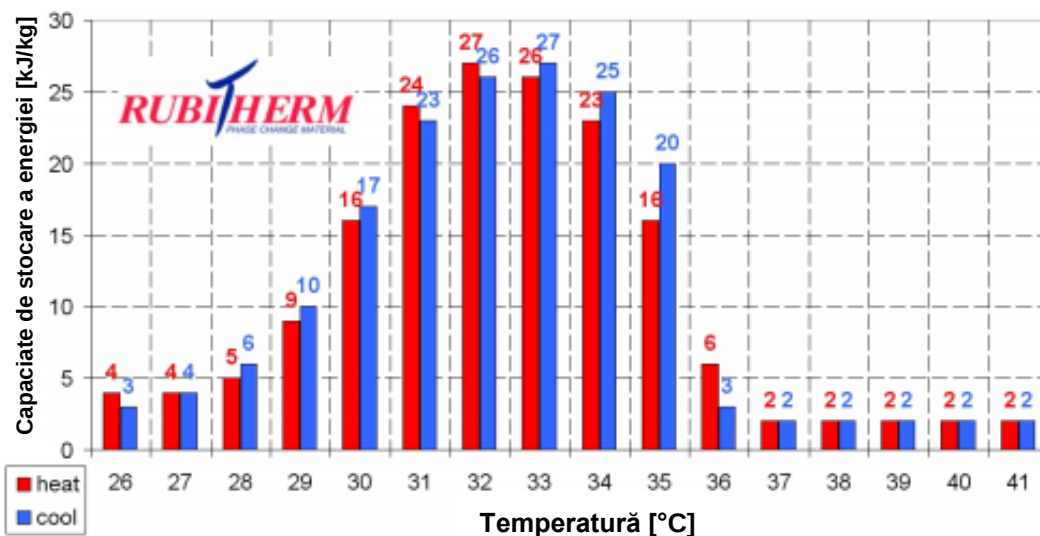


Figura 62 Variația capacității de stocare a energiei în funcție de temperatură [88]

Pentru a afla temperatura aerului la ieșirea din colectorul solar (T_{outlet}) este necesar să cunoaște 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 63.

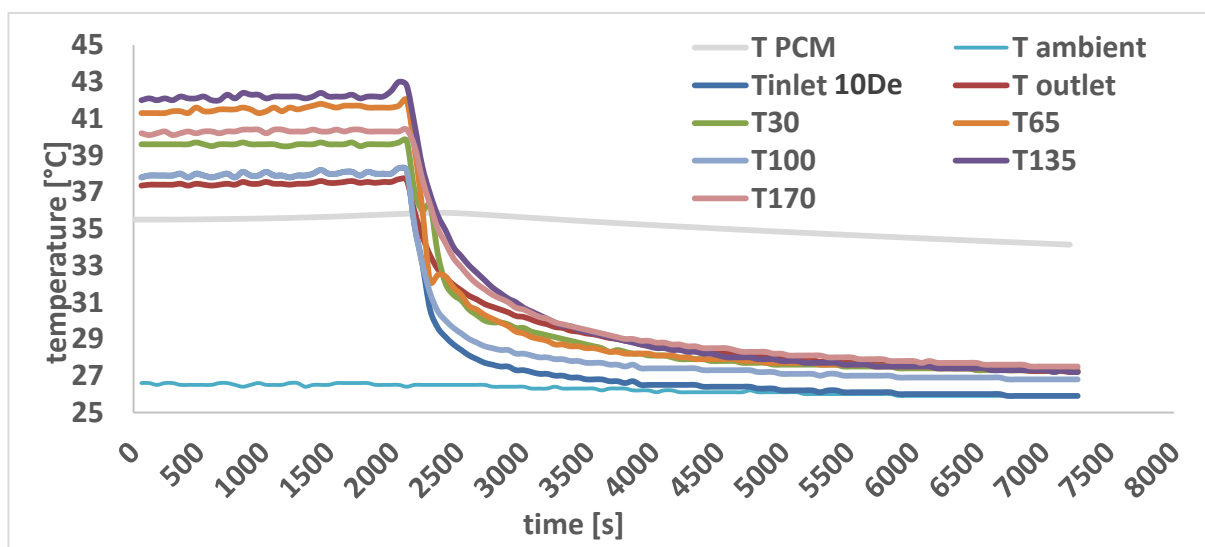


Figura 63 Variația de temperatură pentru două ore

Pentru a impune ca și condiție la limită variația temperaturii la 10De 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.

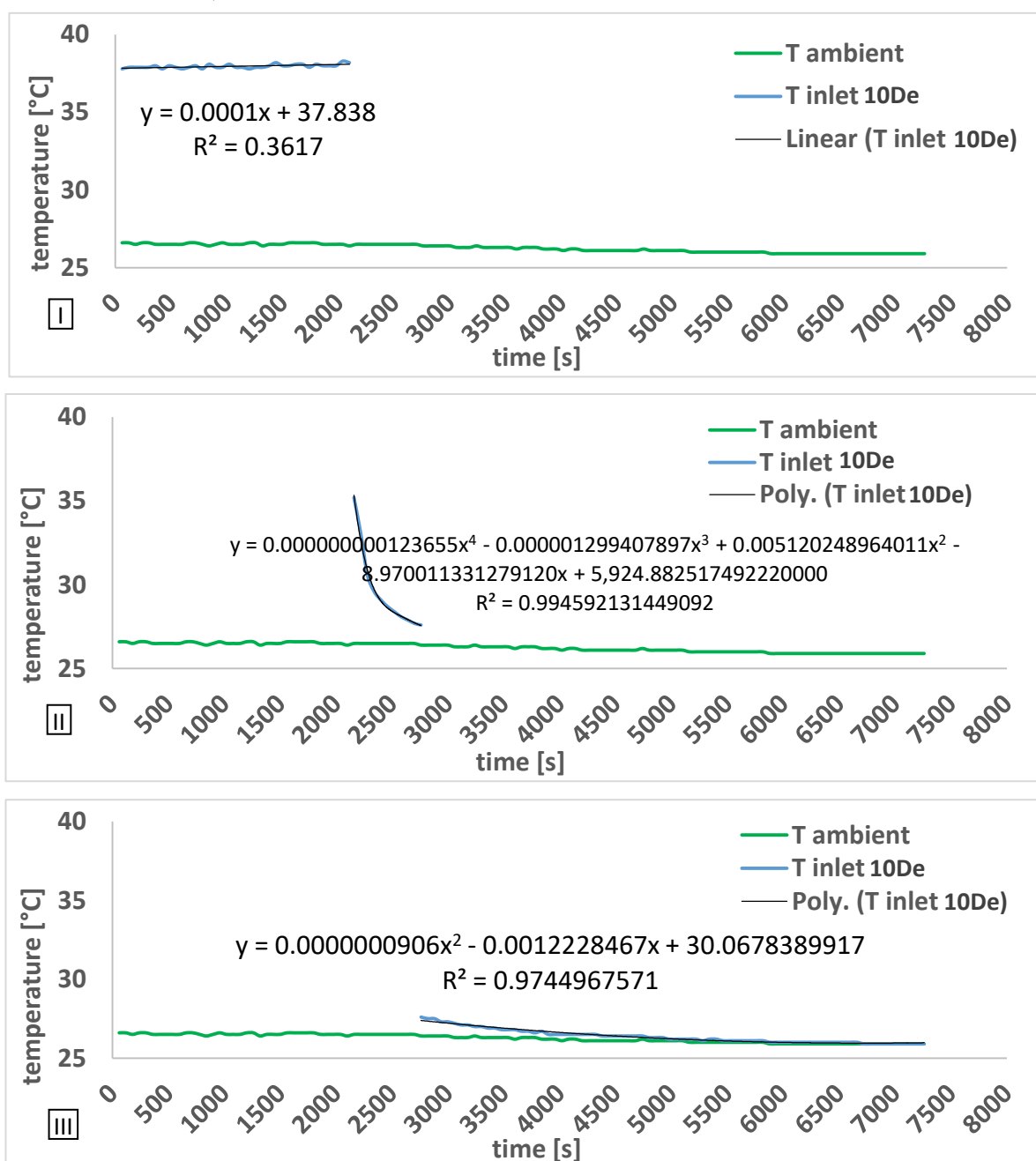


Figura 64 Extragerea ecuațiilor de variație a temperaturii în prima cavitate de aer la 10De pentru obținerea condițiilor la limită variabile (UDF): încălzirea (I), oprirea radiației solare (II) și răcirea (III)

Prima etapa corespunde unei variații liniare de temperatură descrise printr-o ecuație de gradul întâi, prezentată în figura 64-I. Etapa a doua ce coincide cu scăderea bruscă a temperaturii este caracterizată printr-o ecuație polinomială de gradul 4, prezentată în figura 64-II. Etapa a treia ce corespunde descărcării energiei termice este caracterizată printr-o ecuație polinomială de gradul 2, prezentată în figura 64-III.

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. Programul a trecut prin multiple faze de testare, iar forma sa finală este prezentată în continuare:

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(Tinlet, thread, position)
{
    face_t f;

    real t = CURRENT_TIME;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (t <= 2100)

            F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 + 0.0001*t + 37.838;

        else if (2100 < t && t <= 2760)

            F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 + 0.000000000123655*pow(t,4) -
            0.000001299407897*pow(t,3) + 0.005120248964011*pow(t,2) -
            8.97001133127912*t + 5924.88251749222;

        else if (t > 2760)

            F_PROFILE(f, thread, position) = 273.15 + 0.0000000906*pow(t,2) -
            0.0012228467*t + 30.0678389917;

    }

    end_f_loop(f, thread)
}
```

Condițiile la limită utilizate în cadrul studiului numeric sunt prezentate în tabelul 10. Variația temperaturii la 10De este data de UDF-ul determinat mai sus, câmpurile de viteze au fost importate pentru cele 50 de fețe, ca rezultat al studiului prezentat în capitolul 4. 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.

Tabel 10. 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 fete	
Temperatură introducere (T inlet 10De)	Variație impusă din UDF (user defined function)	
Temperatură PCM (valoare inițială impusa)	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 (T_{100}). În figura 65 este prezentată variația temperaturii T_{100} atât în situația studiului numeric, cât și în situația studiului experimental.

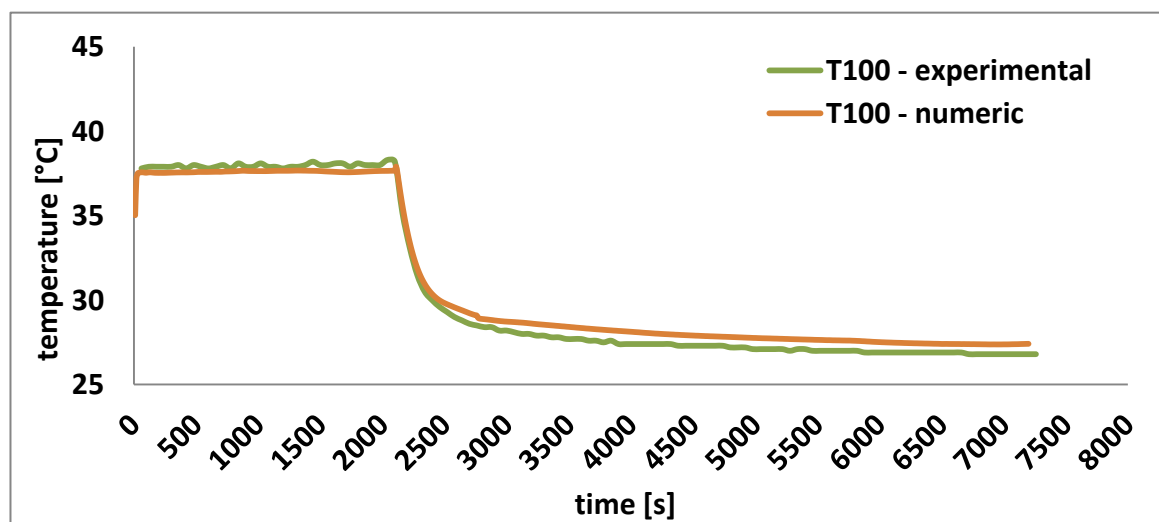


Figura 65 Rezultatele studiului numeric vs. experimental: T_{100}

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 66 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

contribuila 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.

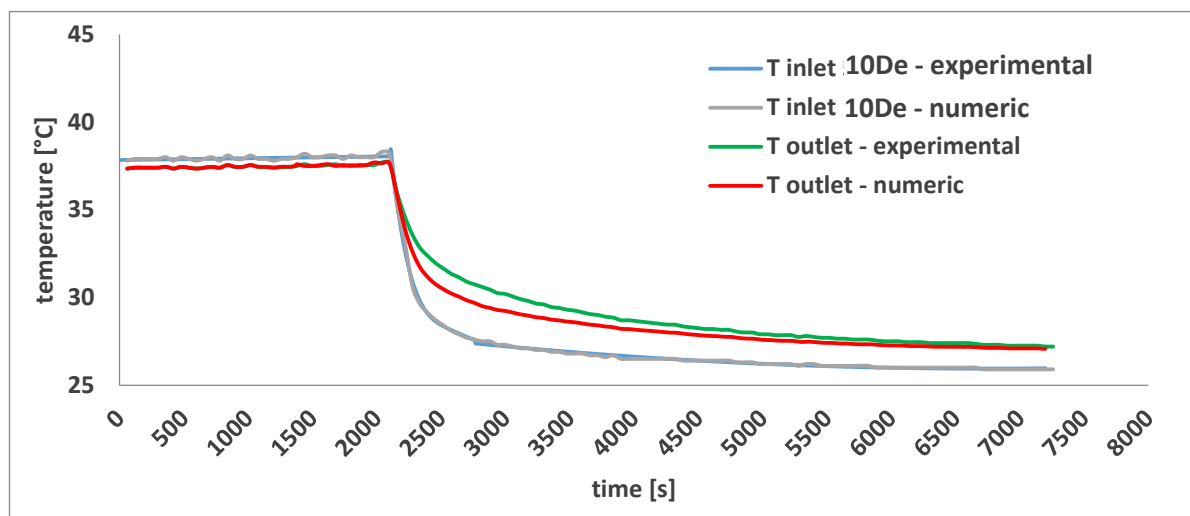


Figura 66 Rezultatele studiului numeric vs. experimental: Toutlet și Tinlet

5.4. 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 $k-\Omega$ 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.

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} . Imagini tipice pentru convergența reziduurilor adimensionale sunt prezentate în figura de mai jos.

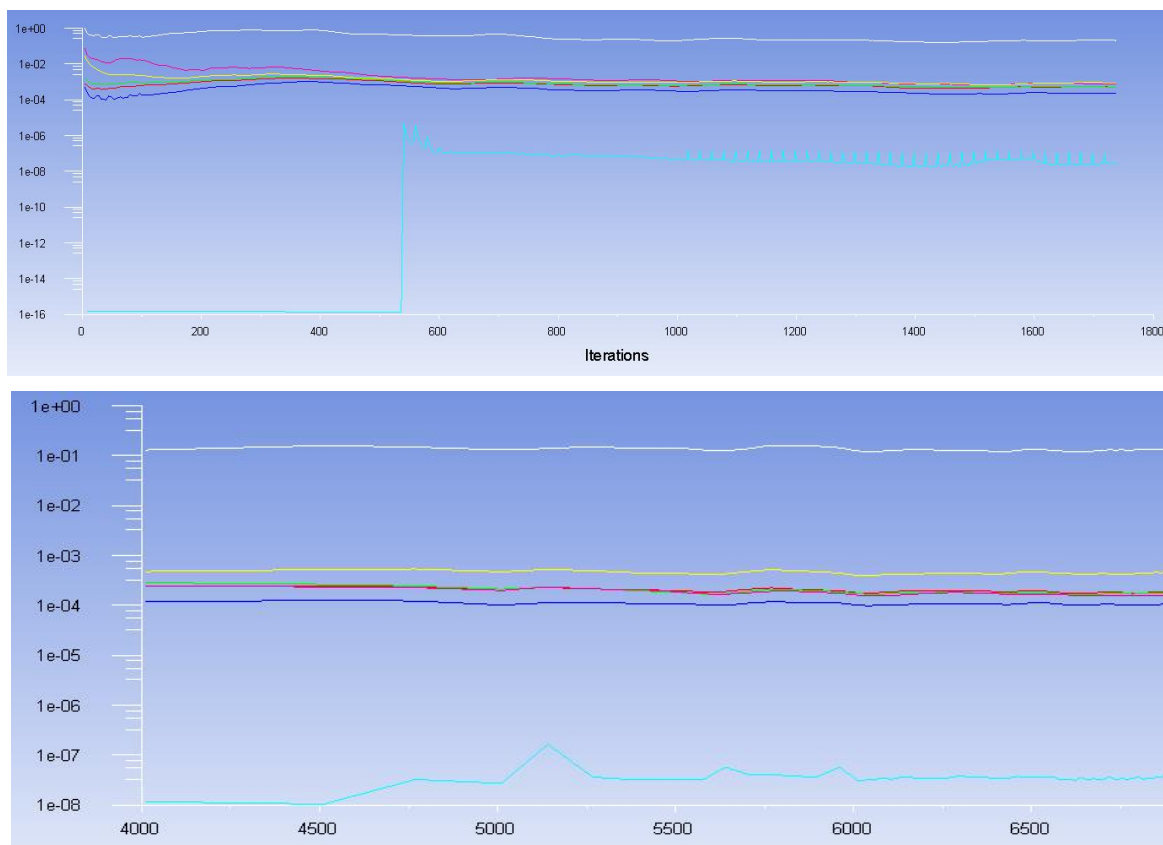


Figura 67 Imagini tipice pentru convergența reziduurilor pentru o rulare în regim staționar: a – până la 1700 de iterații, b – după 4000 de iterații

Modelul realizat va fi aprofundat și dezvoltat în cadrul studiilor doctorale, această variantă fiind una preliminară simplificată. Acesta va sta la baza unor studii parametrice complexe pentru optimizarea colectorului solar.

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

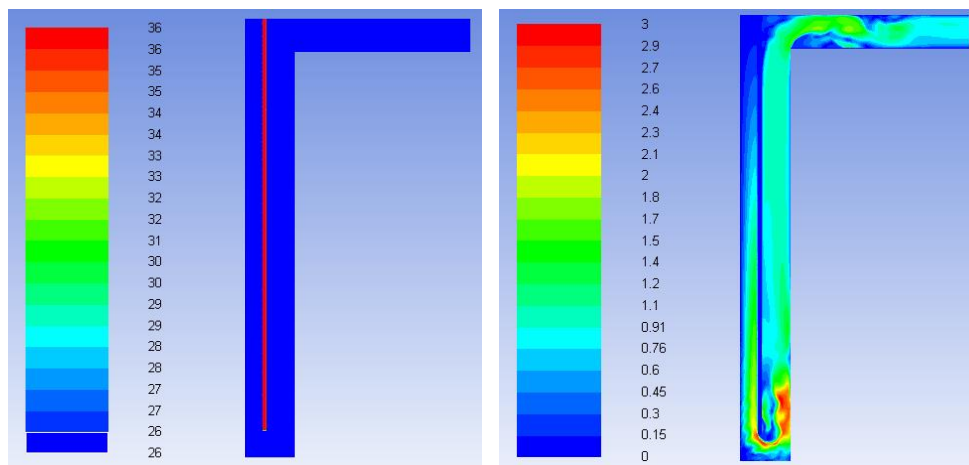


Figura 68 Rezultatele studiului numeric în regim permanent după 550 iterații (punctul de plecare pentru studiul în regim tranzitoriu): a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

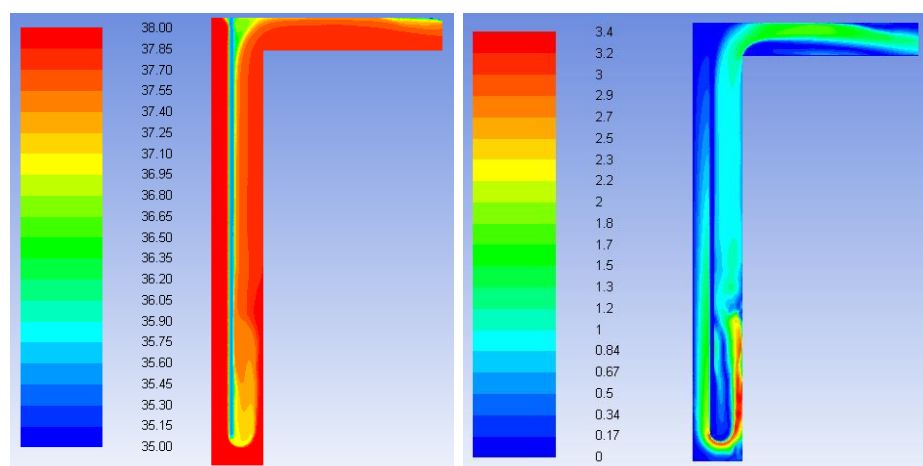


Figura 69 Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 600s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

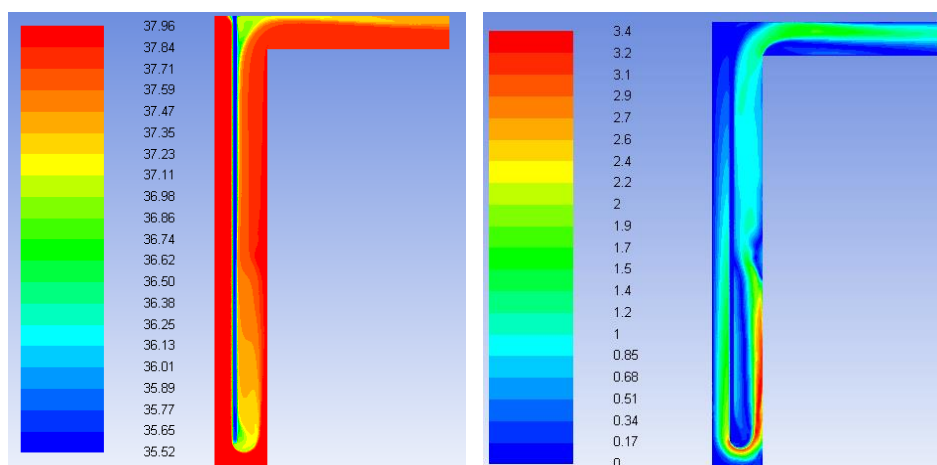


Figura 70 Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 1200s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

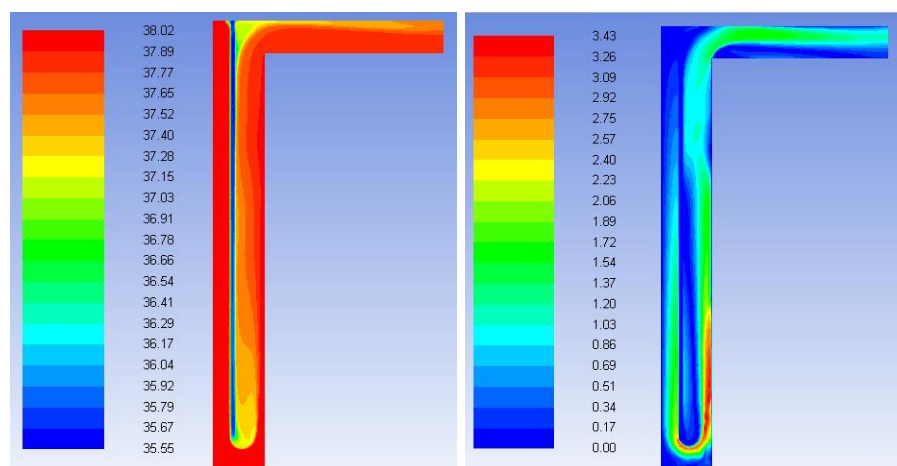


Figura 71 Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 1800s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

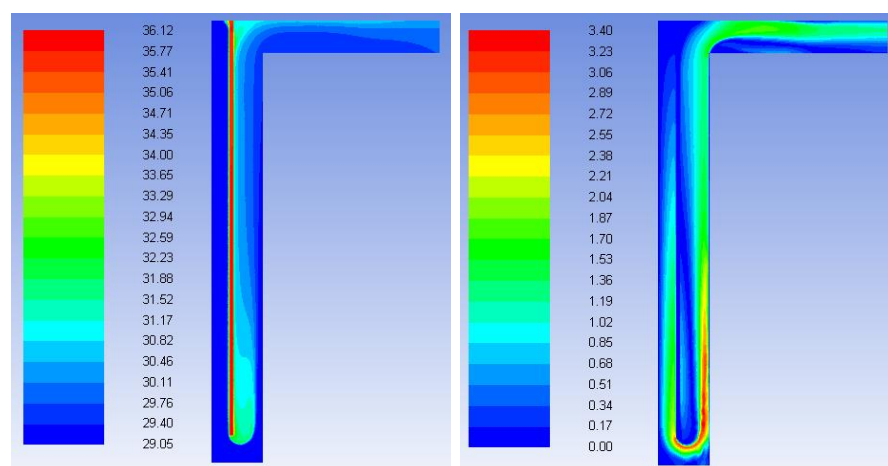


Figura 72 Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 2400s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

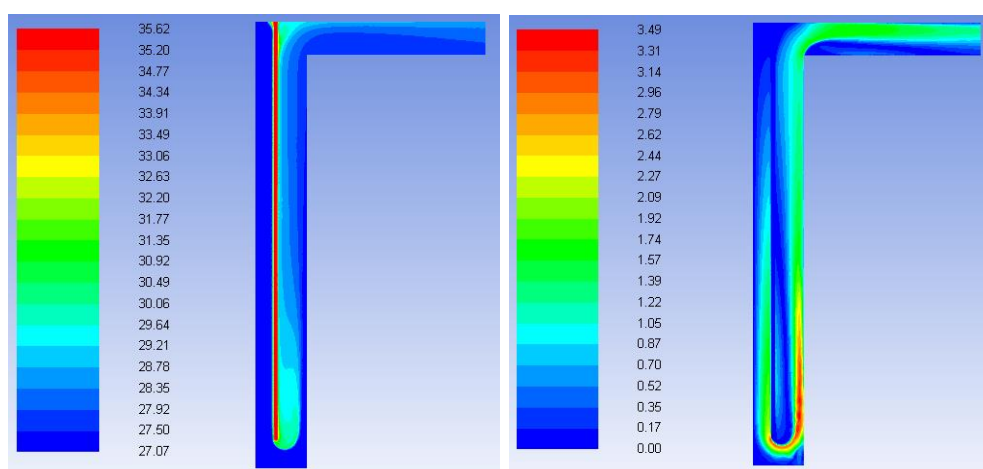


Figura 73 Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 3000s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

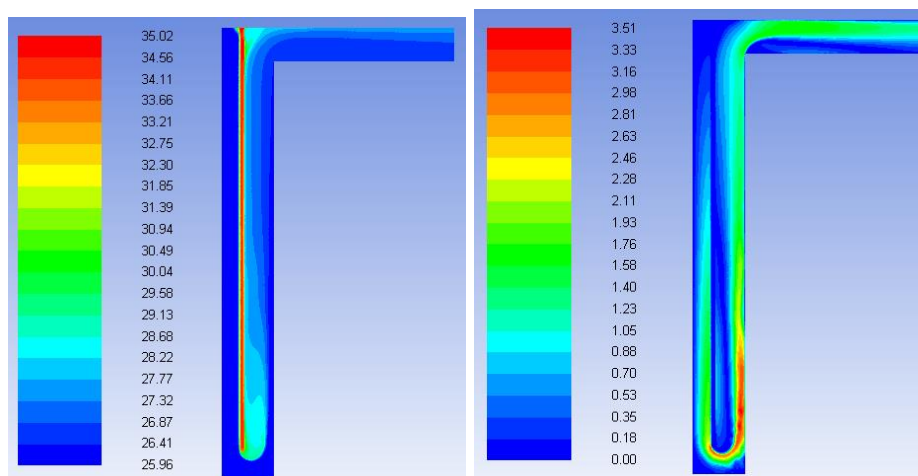


Figura 74 Rezultatele studiului numeric în regim tranzitoriu după 7200s: a – câmp de temperaturi, b – câmp de viteze

6. Concluzii și perspective

Prezenta lucrare reprezintă al treilea raport din cadrul studiilor doctorale și prezintă stadiul studiilor numerice preliminare realizate până în prezent. Cele trei rapoarte de cercetare au fost structurate astfel:

- d) Raportul de cercetare 1, respectiv studiul bibliografic complex privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în clădiri și colectoare solare
- e) Raportul de cercetare 2, respectiv studiul experimental asupra implementării materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer
- f) Raportul de cercetare 3, respectiv studiul numeric privind implementarea materialelor cu schimbare de fază în colectoare solare cu aer

Primul raport tratează într-o manieră aprofundată analiza bibliografică realizată la începutul studiilor doctorale privind oportunitatea implementării materialelor cu schimbare de fază în clădiri. Conform studiului bibliografic realizat materialele cu schimbare de fază nu au fost implementate până în prezent în colectoare solare perforate, acest sistem fiind o noutate absolută în literatură. Colectorul solar cu geometrii lobate are potențialul de a spori transferul termic și de a crește eficiența colectorului solar, iar materialele inerțiale contribuie la ameliorarea variațiilor de temperatură la ieșirea din colector și defazarea energiei termice acumulate pentru utilizarea acesteia ulterior, când este necesară consumatorilor, iar radiația solară lipsește (perioade cu nori sau noaptea). Marele avantaj al PCM este acela că dispune de o capacitate mare de acumulare a căldurii datorită căldurii latente stocate și ocupă mai puțin spațiu față de materialele convenționale.

Al doilea raport tratează studiile experimentale preliminare realizate privind implementarea materialelor cu schimbare de fază integrate în colectoare solare perforate ce au fost completate ulterior. Colectoarele solare cu materiale inerțiale

înglobate au potențialul de a contribui la reducerea consumurilor de energie pentru încălzirea spațiilor, reducerea consumurilor de energie pentru încălzirea aerului proaspăt necesar ocupanților clădirii, uscarea aerului interior, păstrarea unei temperaturi de gardă în interiorul clădirilor și îmbunătățirea confortului termic interior. Adăugarea materialelor inerțiale în colectoarele solare prezintă o serie de beneficii, respectiv ameliorarea variațiilor de temperatură la ieșirea aerului din colector și acumularea de energie termică pentru utilizarea pe perioadele în care nu există suficientă radiație solară, sporind perioada de funcționare a colectorului solar.

Prezenta lucrare ce reprezintă raportul 3 din cadrul studiilor doctorale tratează modelarea numerică a colectoarelor solare cu materiale cu schimbare de fază integrate. Raportul este structurat în 5 capitole de bază ce tratează pe rând mai multe aspecte importante în analiza numerică a sistemului propus.

Primul capitol se referă la studiul bibliografic privind modelarea numerică a colectoarelor solare și a materialelor cu schimbare de fază ce concluzionează faptul printre cele mai utilizate soft-uri utilizate pentru analiza sistemului propus este ANSYS Fluent, iar etape de bază ce trebuie parcurse într-un studiu CFD sunt:

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

Toate etapele de mai sus sunt tratate pe larg în capitolele 4 și 5. În capitolul 2 este prezentată geometria colectorului solar real ce a fost ulterior importată în Fluent. De asemenea este prezentată o sinteză a rezultatelor experimentale obținute până în prezent ce vor folosi la validarea modelelor numerice. În continuarea studiilor doctorale studiile experimentale vor fi completate și definitive atît în regim tranzitoriu, cât și în regim permanent.

Capitolul 3 pune în evidență obiectivele prezentului studiu, respectiv:

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

Totodată, capitolul 3 prezintă infrastructura utilizată pentru studiile numerice, respectiv stațiile de calcul din dotarea Facultății de Inginerie a Instalațiilor și softurile utilizate: ANSYS Fluent 15.0, Tecplot 360 ș.a.

Capitolele 4 și 5 sunt capitolele de referință ale prezentei lucrări. Capitolul 4 tratează realizarea modelului numeric ce surprinde curgerea aerului prin orificiile lobate. Acesta are drept scop obținerea rezultatelor la 10De distanță de placa absorbantă pentru introducerea lor în modelul numeric al colectorului solar și

poate fi utilizat ulterior pentru studiul diferitelor tipuri de orificii. Modelul simplificat tratează doar 4 orificii echivalente din colectorul solar pentru optimizarea timpului de calcul. A fost realizat un studiu de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării din care a rezultat faptul că începând cu 5.3 milioane de elemente de calcul rezultă o soluție stabilă ce va fi utilizată în continuare. Validarea experimentală a fost realizată prin comparația vitezelor în plan longitudinal și prin comparația temperaturilor rezultate. S-au activat în ANSYS Fluent modelele ce utilizează ecuația conservării energiei și modelul de turbulență k- ϵ RNG (cu EWF) conform studiilor identificate în literatură și s-au impus condițiile la limită aferente. Comparând valorile obținute experimental cu rezultatele numerice la Re2500 am putut concluziona faptul că modelul numeric creat reproduce fenomenele reale ale curgerii în limite acceptabile. Mai mult decât atât începând cu 10De profilele de viteză sunt similare ceea ce confirmă premisele considerate la construcția geometriei.

Modelul realizat în cadrul capitolului 4 este un model simplificat pentru optimizarea timpilor de calcul ce nu ia în considerare transferul prin radiație și va fi îmbunătățit în următoarele studii efectuate. Acesta poate fi utilizat în viitor pentru:

- Studiul impactului geometriei orificiilor asupra colectorului solar
- Studii parametrice privind geometria orificiilor
- Obținerea condițiilor la limită pentru modelul colectorului solar cu PCM.

Capitolul 5 tratează realizarea modelului numeric pentru colectorul solar cu orificii lobate și materiale cu schimbare de fază integrate. Geometria realizată în Ansys respecta geometria colectorului real, fiind practic o "felie" prin acesta. Intrarea în domeniul de calcul este compusă din 50 de fețe ce vor prelua condițiile la limită rezultate din modelul precedent, în special câmpuri de viteze. A fost de asemenea realizat studiul de independență a soluției în funcție de calitatea discretizării în regim permanent, rezultând faptul că grila de calcul alcătuită din 5 milioane de celule (2.5 milioane de celule reprezentând cavitatea de aer și 2.5 milioane de celule reprezentând materialele cu schimbare de fază) este cea optimă în acest caz. 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 și în cazul curgerilor de aer în cavități rectangulare de aer. Pentru validarea modelului numeric în regim tranzitoriu am utilizat programa predefinite realizate în limbaj de programare C++ ce determină impunerea unor condiții la limită variabile în timp (UDF). Pentru a simplifica modelul numeric am considerat ca materialele cu schimbare de fază sunt în stare solidă și au o caldură specifică variabilă în funcție de temperatură. Comparând valorile obținute experimental cu rezultatele numerice am putut concluziona faptul că modelul numeric creat reproduce fenomenele reale de transfer termic în limite acceptabile.

Modelul realizat în cadrul capitolului 5 este un model simplificat pentru optimizarea timpilor de calcul ce nu ia în considerare transferul prin radiație și va fi îmbunătățit în următoarele studii efectuate. Acesta poate fi utilizat în viitor pentru:

- Studii parametrice și optimizarea parametrilor colectorului solar
- Studiul topirii și solidificării materialelor cu schimbare de fază.

În continuare studiilor doctorale, modelele numerice realizate vor fi îmbunătățite pentru obținerea unor rezultate mai precise. De asemenea se vor studia rezultatele în regim tranzitoriu în condiții diferite: diferiți pași de timp, număr diferit de iterații/pasul de timp.

7. Conferințe și publicații

Publicate:

- a) Andrei-Stelian Bejan, Abdelouhab Labihi, Cristiana-Verona Croitoru, Florin Bode, Mihnea Sandu - Experimental Investigation of the Performance of a Transpired Solar Collector Acting as a Solar Wall, Solar World Congress 2017 Abu Dhabi, EUA
- b) Andrei Bejan, Abdelouhab LABIHI, Cristiana Verona Croitoru, Daniel Bordianu and Hassan Chehouani - Transpired Solar Collectors Energy Efficiency Improvement Using Inertial Materials, 2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM), Bucharest, Romania
- c) Andrei – Stelian Bejan, Abdelouhab Labihi, Cristiana Verona Croitoru, Tiberiu Catalina, Hassan Chehouani and Brahim Benhamou - Experimental investigation of the charge/discharge process for an organic PCM macroencapsulated in an aluminium rectangular cavity, Advances in Heat and Mass Transfer for the Built Environment (EENVIRO Workshop 2017), Bucharest, Romania
- d) Andrei-Stelian Bejan, Abdelouhab Labihi, Cristiana Croitoru, Tiberiu Catalina - Air solar collectors in building use, Advances in Heat and Mass Transfer for the Built Environment (EENVIRO Workshop 2017), Bucharest, Romania
- e) A. Bejan, C. Croitoru, F. Bode, I. Nastase, M. Sandu, A. Labihi - Inertial elements integration on thermal solar collectors, 4th International Conference On Building Energy, Environment (COBEE 2018), Melbourne, Australia
- f) A. Bejan, M. Sandu, L. Tacutu, C. Croitoru, I. Nastase – Airflow study inside an enclosure with a PCM wall and a solar collector, Roomvent & Ventilation 2018 Conference, 2-5 June, Finland

În curs de publicare:

- a) A.S. Bejan, T. Catalina, D.B. Mocanescu, A. Ene - Experimental study of an innovative glazed solar air collector tested in real conditions, 1st Doctoral School Conference 2018, Romania



Figura 75 Diseminare rezultate – Solar World Congress SWC 2017, Abu Dhabi, EUA



Figura 76 Diseminare rezultate – EENVIRO Conference 2017, București, România



Figura 77 Diseminarea rezultatelor – comisie LP2M2E Laboratory, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco

Referințe

1. Reichl, C., et al., *Comparison of modelled heat transfer and fluid dynamics of a flat plate solar air heating collector towards experimental data*. Solar Energy, 2015. **120**: p. 450-463.
2. Goyal, R.K., G.N. Tiwari, and H.P. Garg, *Effect of thermal storage on the performance of an air collector: A periodic analysis*. Energy Conversion and Management, 1998. **39**(3–4): p. 193-202.
3. Lai, C.-M. and S. Hokoi, *Solar façades: A review*. Building and Environment, 2015. **91**: p. 152-165.
4. Croitoru, C.V., et al., *Thermodynamic investigation on an innovative unglazed transpired solar collector*. Solar Energy, 2016. **131**: p. 21-29.
5. Dymond, C. and C. Kutscher, *Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors*. Solar Energy, 1997. **60**(5): p. 291-300.
6. Molineaux, B., B. Lachal, and O. Guisan, *Thermal analysis of five unglazed solar collector systems for the heating of outdoor swimming pools*. Solar Energy, 1994. **53**(1): p. 27-32.
7. Gao, L., H. Bai, and S. Mao, *Potential application of glazed transpired collectors to space heating in cold climates*. Energy Conversion and Management, 2014. **77**: p. 690-699.
8. Alkilani, M.M., et al., *Review of solar air collectors with thermal storage units*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1476-1490.
9. 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.
10. Leon, M.A. and S. Kumar, *Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors*. Solar Energy, 2007. **81**(1): p. 62-75.
11. Zhang, T., et al., *The application of air layers in building envelopes: A review*. Applied Energy, 2016. **165**: p. 707-734.
12. Zhang, T., et al., *A glazed transpired solar wall system for improving indoor environment of rural buildings in northeast China*. Building and Environment, 2016. **98**: p. 158-179.
13. Rosaria Ciriminna, F.M., Mario Pecoraino, Mario Pagliaro, *Solar Air Heating and Ventilation in Buildings: A Key Component in the Forthcoming Renewable Energy Mix*. Energy Technology, 2017. **5**: p. 1-9.
14. Paya-Marin, M.A., et al., *Large scale test of a novel back-pass non-perforated unglazed solar air collector*. Renewable Energy, 2015. **83**: p. 871-880.
15. Shukla, A., et al., *A state of art review on the performance of transpired solar collector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(6): p. 3975-3985.
16. Brown, C., et al., *Transpired Solar Collector Installations in Wales and England*. Energy Procedia, 2014. **48**: p. 18-27.
17. Januševičius, K., et al., *Validation of Unglazed Transpired Solar Collector Assisted Air Source Heat Pump Simulation Model*. Energy Procedia, 2016. **95**: p. 167-174.
18. Wang, X., et al., *A simplified method for evaluating thermal performance of unglazed transpired solar collectors under steady state*. Applied Thermal Engineering, 2017. **117**: p. 185-192.
19. Van Decker, G.W.E., K.G.T. Hollands, and A.P. Brunger, *Heat-exchange relations for unglazed transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch*. Solar Energy, 2001. **71**(1): p. 33-45.
20. Croitoru, C., et al., *Thermal Evaluation of an Innovative Type of Unglazed Solar Collector for Air Preheating*. Energy Procedia, 2016. **85**: p. 149-155.
21. Hami, K., B. Draoui, and O. Hami, *The thermal performances of a solar wall*. Energy, 2012. **39**(1): p. 11-16.
22. Kisilewicz, T., *Glazed building wall as a solar thermal collector*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2009. **9**(1): p. 83-99.
23. Navarro, L., et al., *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.

24. Khadiran, T., et al., *Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **57**: p. 916-928.
25. Soares, N., et al., *Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency*. Energy and Buildings, 2013. **59**: p. 82-103.
26. Kylili, 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.
27. Memon, S.A., *Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **31**: p. 870-906.
28. Kalnæs, S.E. and B.P. Jelle, *Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities*. Energy and Buildings, 2015. **94**: p. 150-176.
29. Giro-Paloma, J., et al., *Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **53**: p. 1059-1075.
30. 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.
31. Waqas, A. and Z. Ud Din, *Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **18**: p. 607-625.
32. Zhou, D., C.Y. Zhao, and Y. Tian, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*. Applied Energy, 2012. **92**: p. 593-605.
33. Cabeza, L.F., et al., *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1675-1695.
34. Mehling, H.C., Luisa F., *Heat and cold storage with PCM - An up to date introduction into basics and applications*. Springer, 2008.
35. Konuklu, Y., et al., *Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications*. Energy and Buildings, 2015. **106**: p. 134-155.
36. Iten, M. and S. Liu, *A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems*. Energy Conversion and Management, 2014. **77**(Supplement C): p. 608-627.
37. Baïri, A., E. Zarco-Pernia, and J.M. García de María, *A review on natural convection in enclosures for engineering applications. The particular case of the parallelogrammic diode cavity*. Applied Thermal Engineering, 2014. **63**(1): p. 304-322.
38. Korti, A.I.N. and F.Z. Tlemsani, *Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM storage unit*. Journal of Energy Storage, 2016. **5**(Supplement C): p. 177-186.
39. Bruno, F., *USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCMs) FOR SPACE HEATING AND COOLING IN BUILDINGS*, in *AIRAH performance enhanced buildings environmentally sustainable design conference*. 2005.
40. Arulanandam, S.J., K.G.T. Hollands, and E. Brundrett, *A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions*. Solar Energy, 1999. **67**(1-3): p. 93-100.
41. Gunnewiek, L.H., K.G.T. Hollands, and E. Brundrett, *Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired-plate collectors*. Solar Energy, 2002. **72**(4): p. 317-325.
42. Gunnewiek, L.H., E. Brundrett, and K.G.T. Hollands, *Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area*. Solar Energy, 1996. **58**(4-6): p. 227-237.
43. Eryener, D. and H. Akhan, *The Performance of First Transpired Solar Collector Installation in Turkey*. Energy Procedia, 2016. **91**: p. 442-449.
44. Arkar, C., et al., *Performance analysis of a solar air heating system with latent heat storage in a lightweight building*. Applied Thermal Engineering, 2016. **95**: p. 281-287.
45. Osterman, E., V. Butala, and U. Stritih, *PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings*. Energy and Buildings, 2015. **106**: p. 125-133.

46. Li, S., *Numerical Study of Convective Heat Transfer for Flat Unglazed Transpired Solar Collectors*. Energy Procedia, 2012.
47. Gholampour, M. and M. Ameri, *Energy and exergy analyses of Photovoltaic/Thermal flat transpired collectors: Experimental and theoretical study*. Appl. Energy 164, 2016.
48. Badache, M., et al., *Experimental and two-dimensional numerical simulation of an unglazed transpired solar air collector*. Energy Procedia, 2012.
49. Li, Y., *Thermal Performance Analysis of a PCM Combined Solar Chimney System for Natural Ventilation and Heating/Cooling (Thesis)*. 2013, Coventry University.
50. Hocine, H.B.C.e., et al., *A Three-Dimensional Modeling of Photovoltaic Thermal Collector*. INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, 2016. **Vol.6, No.2**.
51. 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.
52. 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.
53. Kuznik, F. and J. Virgone, *Experimental assessment of a phase change material for wall building use*. Applied Energy, 2009. **86**(10): p. 2038-2046.
54. 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.
55. Navarro, L., et al., *Experimental evaluation of a concrete core slab with phase change materials for cooling purposes*. Energy and Buildings, 2016. **116**: p. 411-419.
56. Silva, T., et al., *Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution*. Energy and Buildings, 2012. **49**: p. 235-245.
57. Soares, N., et al., *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.
58. Soares, N., et al., *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.
59. Dutil, Y., et al., *Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation*. Renewable Energy, 2014. **61**: p. 132-135.
60. Sharma, A., et al., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(2): p. 318-345.
61. Kuznik, F., J. Virgone, and K. Johannes, *Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM*. Energy and Buildings, 2010. **42**(7): p. 1004-1009.
62. Borderon, J., J. Virgone, and R. Cantin, *Modeling and simulation of a phase change material system for improving summer comfort in domestic residence*. Applied Energy, 2015. **140**: p. 288-296.
63. Teodosiu Catalin, A.L., Raluca Teodosiu. *Reducing Energy Consumption in Buildings Using Phase Change Material*. in *4th Energy Performance of Buildings Abstract book (RCEPB IV)*. 2012.
64. Bogdan Diaconu, M.C. *Phase Change Material (PCM) composite insulating panel with high thermal efficiency in International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT TECHNOLOGIES and EQUIPMENT*. 2010.
65. Johan Heier, C.B., Viktoria Martin. *Thermal energy storage in Swedish single family houses – a case study*. in *The 12th International Conference on Energy Storage*. 2012. Innostock.
66. Sage-Lauck, J.S. and D.J. Sailor, *Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building*. Energy and Buildings, 2014. **79**: p. 32-40.
67. Solgi, E., R. Fayaz, and B.M. Kari, *Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation*. Renewable Energy, 2016. **85**: p. 725-731.
68. Saffari, M., et al., *Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model*. Energy and Buildings, 2016. **112**: p. 159-172.

69. Tabares-Velasco, P.C., C. Christensen, and M. Bianchi, *Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies*. Building and Environment, 2012. **54**: p. 186-196.
70. Guarino, F., et al., *PCM Thermal Energy Storage in Buildings: Experimental Study and Applications*. Energy Procedia, 2015. **70**: p. 219-228.
71. Berardi, U. and M. Manca, *The Energy Saving and Indoor Comfort Improvements with Latent Thermal Energy Storage in Building Retrofits in Canada*. Energy Procedia, 2017. **111**: p. 462-471.
72. Sigalas, G., *Computational Optimization of Passive use of Phase Change Materials in Lightweight Low-Energy Houses*. 2011, Technische Universiteit Eindhoven University of Technology.
73. Vikas, A. Yadav, and S.K. Soni, *Simulation of Melting Process of a Phase Change Material (PCM) using ANSYS (Fluent)*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2017.
74. Bejan, A.S. and T. Catalina, *The Implementation of Phase Changing Materials in Energy-efficient Buildings. Case Study: EFdeN Project*. Energy Procedia, 2016. **85**: p. 52-59.
75. Andrei – Stelian Bejan, T.C., Joseph Virgone. *Comparison of different PCMs impact on indoor comfort in a energy positive house*. in CLIMA 2016, Aalborg University. 2016.
76. Kuznik, F., J. Virgone, and J. Noel, *Optimization of a phase change material wallboard for building use*. Applied Thermal Engineering, 2008. **28**(11–12): p. 1291-1298.
77. Shrestha, M., *PCM Application - Effect on Energy Use and IA Temperature*. 2012, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Architecture and Fine Arts.
78. Janis Kazjonovs, D.B., Aleksandrs Korjajkins, Ansis Ozolins, Andris Jakovics. *ANALYSIS OF SIMULATION MODELS OF PCM IN BUILDINGS UNDER LATVIA'S CLIMATE CONDITIONS*. in 4th International Conference CIVIL ENGINEERING. 2013.
79. Sharifi, N.P., A.A.N. Shaikh, and A.R. Sakulich, *Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals*. Energy and Buildings, 2017. **138**: p. 455-467.
80. Kuznik, F., et al., *A review on phase change materials integrated in building walls*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(1): p. 379-391.
81. Navarro, L., et al., *Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems*. Renewable Energy, 2016. **88**: p. 526-547.
82. Navarro, L., et al., *Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system*. Renewable Energy, 2016. **85**: p. 1334-1356.
83. Manual. *ANSYS Fluent Chapter 12.4.2 RNG k-epsilon Model*. accesat martie 2018; Available from: www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node479.htm.
84. Croitoru, C. and I. Colda, *Studii teoretice si experimentale referitoare la influenta turbulentei aerului din incaperile climatizate asupra confortului termic*. 2011.
85. Bordianu, D., C. Croitoru, and I. Nastase, *Studiul termoaerului al elementelor de anvelopă cu colector solar integrat*. 2016.
86. Manual, *Ansys Fluent Chapter 4.1.5. The k-omega and SST Models*. accesat aprilie 2018.
87. Ji, Y., *CFD modelling of natural convection in air cavities*. CFD Letters, 2014. **Vol. 6**(1).
88. Rubitherm. [cited June 2017; Available from: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT35_EN_31052016.PDF.

c