

RAPORT ȘTIINȚIFIC
Contract nr. 38 PED din 08/01/2025
(PN-IV-P7-7.1-PED-2024-2264)
Etapă 1 - 2025

Luminator pentru clădiri cu răcire integrată prin PCM și sistem BIPVT
Building skylight with integrated PCM cooling and BIPVT system [SKYCOOL]

Proiectul PED își propune analiza implementării sistemelor de învelitori tip terasă necirculabilă prevăzute cu luminatoare care asigură, pe cât posibil, iluminatul natural interior.

Luminatorul propus este compus din următoarele straturi (dinspre exterior spre interior):

- sticlă fotovoltaică cu peliculă fotosensibilă din CdTe, care permite producerea de energie electrică. Sticla fotovoltaică adoptată are un grad de transparență care să asigure confortul optic pe durata verii, fără a afecta prin orbire persoanele din interior;
- un strat din PCM, translucid, care pe durata sezonului cald prezintă următoarele avantaje:
 - acumulare de frig prin solidificare pe durata nopții, formând un strat translucid;
 - cedarea frigului acumulat în timpul nopții sub formă de căldură latentă de topire, în perioadele calde ale zilei, ceea ce permite diminuarea consumului de energie electrică a echipamentelor de climatizare;
 - creșterea eficienței sistemului fotovoltaic prin menținerea suprafeței fotosensibile la temperaturi apropiate de punctul optim de funcționare;
 - valorificarea căldurii acumulate prin solidificarea PCM pentru preîncălzirea a.c.c., având ca scop principal prevenirea supraîncălzirii materialului fotosensibil care determină reducerea semnificativă a energiei electrice generate. Răcirea și resolidificarea PCM se realizează prin intermediul unei serpentine imersate în masa acestuia, care este parcursă de a.c.c. Pe durata sezonului rece, pentru evitarea riscurilor de îngheț, serpentinele se vor goli și usca/curăți prin suflare cu aer comprimat sau agentul termic va fi un amestec de apă cu etilen/propilen glicol;
- două straturi de sticlă cu un strat intermediar de izolator termic: aer, argon, etc.

Studiul de caz al prezentului raport este pentru Cluj-Napoca (46.769° N, 23.590° E, altitudine: 353 m, zonă climatică: temperat continentală). Datele climatice au fost preluate TMY din aplicația Uniunii Europene *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*, set de date obținut prin *SARAH-3* (Surface Radiation Data Set - Heliosat Edition 3), perioada de măsurare și modelare an: 2005-2023 (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.1).

1.1 PROIECTARE ȘI OPTIMIZARE CFD A LUMINATORULUI EXPERIMENTAL BIPVT

Prezentul capitol sintetizează modelarea CFD a unui element al luminatorului, compus din:

- PV (600-1200 mm) sticlă – CdTe – sticlă (3,5/0,1/3,5 mm);
- strat PCM din parafină RT25HC;
- serpentină din țevă din sticlă borosilicat (Țv Ø 10·1,5 mm), înglobată în PCM, în vederea preîncălzirii a.c.c.;
- două straturi de sticlă spre interior cu un strat intermediar de izolator termic.

Geometria 3D a fost realizată în ANSYS Workbench – DesignModeler 2025 ca set de volume distincte pentru transferul termic global, cu proprietăți termo-optice specifice.

Schimbarea de fază a PCM este modelată prin metoda căldurii specifice aparente:

$$c_p(T) = \begin{cases} T < 296,35 \text{ K} \rightarrow c_p(T) = 2000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}; \\ 296,36 \leq T \leq 303,54 \text{ K} \rightarrow c_p(T) = 29658 \text{ J/kg} \cdot \text{K}; \\ T > 303,55 \text{ K} \rightarrow c_p(T) = 2000 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \end{cases}$$

Grila de calcul, prezentată în fig. 1.1.1., a fost generată în ANSYS Meshing ca grilă predominant hex/prismă, cu aproximativ $5 \cdot 10^6$ elemente. Stratul limită constă din 5 straturi pe pereții conductei și la interfețele PV/PCM/sticlă, cu factor de creștere $\sim 1,2$, astfel încât să se redea corect gradientii de viteză și temperatură. Pe diametrul interior al țevii sunt circa 15 celule, iar prin grosimea ei 2 elemente, ceea ce permite modelarea rezistenței la conducție a sistemului: perete–fluid-PCM.

Modelul fizic rezolvă ecuațiile RANS ale transferului de căldură global între toate volumele solide și fluidul din serpentină. Transferul termic prin radiație este descris prin modelul Discrete Ordinates, bazat pe bilanțul termic care constă în egalitatea dintre energia transferată prin radiația solară cu cantitatea de căldură absorbită de materialele solide (sticlă, PCM) și a.c.c. Parametrii radiației solare au fost adoptați pentru Cluj-Napoca, data: 15 iulie, ora 13 30, cer senin: $I_{DIR N} = 900 \text{ W/m}^2$, $I_{dif N} = 140 \text{ W/m}^2$, $t_e = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{cer} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. Straturile de PV, PCM, sticlă și țevă sunt tratate ca medii semitransparente cu indicii de refracție și coeficienții de absorbție specifici, în consecință o fracțiune a radiației solare este absorbită în masa sistemului.

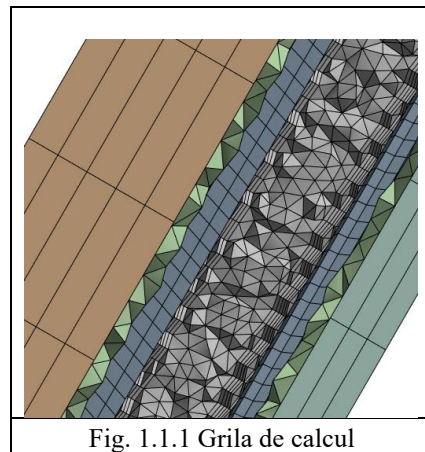


Fig. 1.1.1 Grila de calcul

În regim staționar, fața exterioară însorită absoarbe, în medie, aproximativ $784,6 \text{ W/m}^2$ din radiația solară incidentă, din care fluxul total pierdut către exterior este: $\sim 195,5 \text{ W/m}^2$ ($\sim 25 \%$). Temperatura medie estimată a suprafeței exterioare este $\sim 43,8 \text{ }^\circ\text{C}$, valoare plauzibilă pentru o PV la o temperatură exterioară de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ și convecție moderată. În consecință, fluxul termic total disponibil transmis prin conducție către PCM, a.c.c. și prin convecție spre interiorul încăperii este: $\sim 589 \text{ W/m}^2$, din care $\sim 190 \text{ W}$ este preluat pentru preîncălzirea a.c.c.

Fig. 1.1.2 indică câmpul de temperaturi și fluxul termic al luminatorului fotovoltaic, conform rezultatelor modelării CFD. Câmpul de temperatură, fig. 1.1.2.a, indică faptul că suprafața exterioară a PV, arată o amprentă clară a serpentinei: zonele adiacente sunt vizibil mai reci decât cele dintre țevi, ceea ce indică faptul că a.c.c. reduce aportul radiației solare. Pe suprafața interioară, se observă „dungi reci” cu temperaturi de $\sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$ în zona țevelor, iar în partea superioară zone mai calde, până la $\sim 31 \text{ }^\circ\text{C}$.

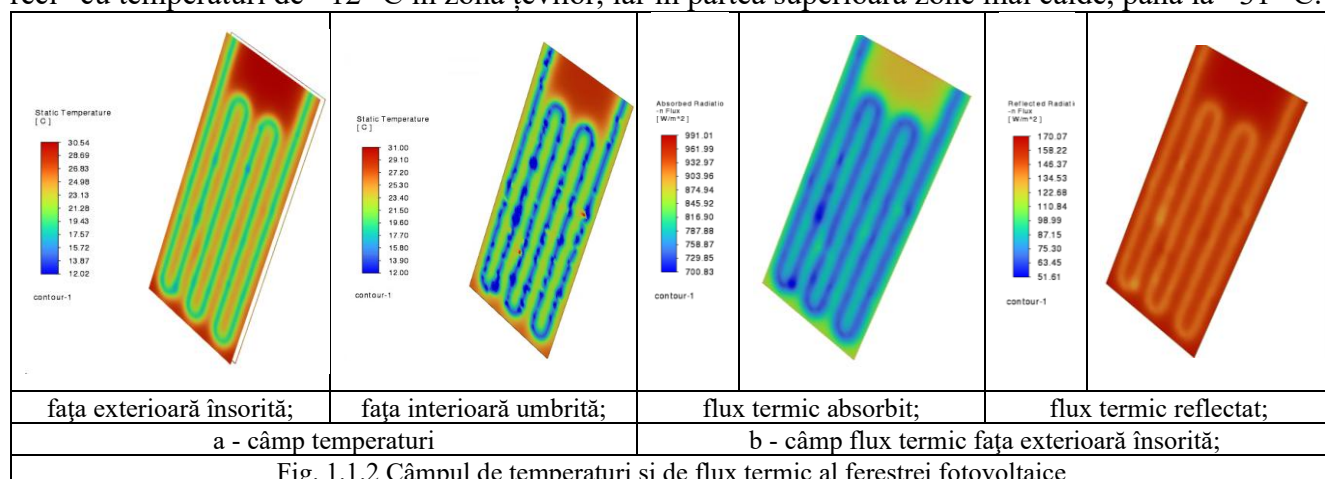


Fig. 1.1.2 Câmpul de temperaturi și de flux termic al ferestrei fotovoltaice

În concluzie, soluția numerică este una stabilă, reziduurile sunt sub pragurile impuse, mărimile monitorizate pe suprafețele cheie s-au stabilizat în platou, respectiv este respectat bilanțul termic al suprafeței însorite. Rezultatele modelului oferă un suport teoretic pentru etapele ulterioare ale cercetării: selecție PCM, analiza dimensiunilor PV (pas serpentină, grosime PCM etc), debit a.c.c., simulări pentru diferite condiții climatice (temperaturi exterioare, radiație solară, etc).

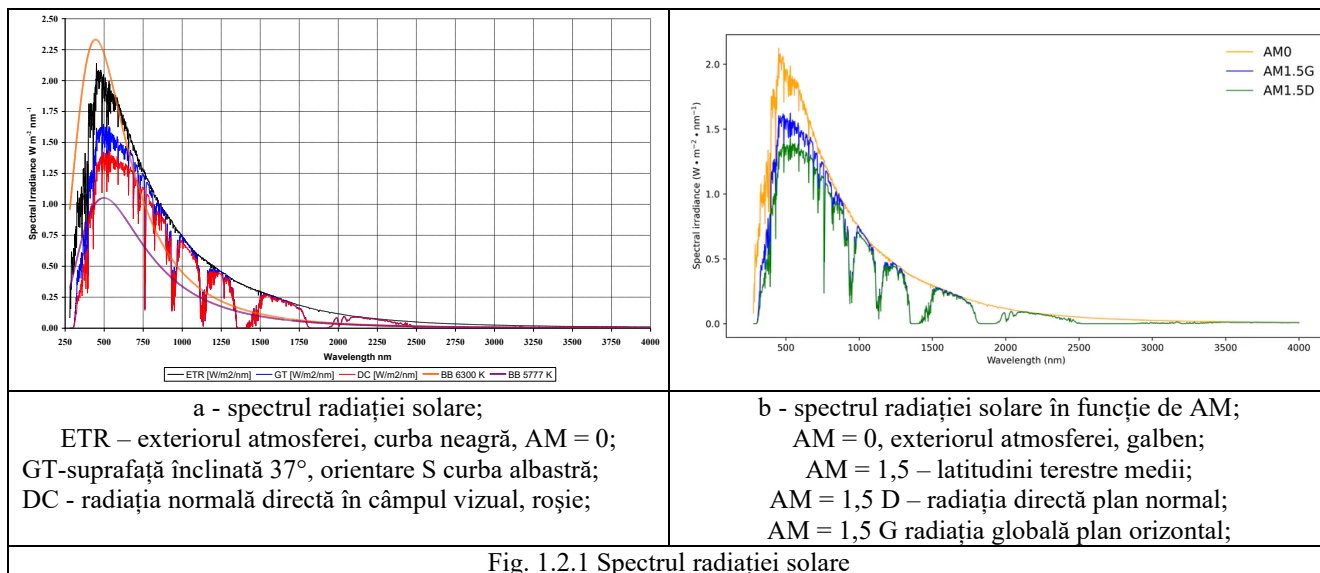
1.2 PROIECTAREA SIMULATORULUI SOLAR.

1.2.1 Spectrul radiației solare

Testarea în condiții de laborator a PV implică proiectarea și realizarea unui simulator solar, capabil, pe cât posibil, să redea caracteristicile radiației solare. Distribuția spectrală a radiației solare în funcție de lungimea de undă este prezentată în fig. 1.2.1 (American Society for Testing and Materials: ASTM, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>).

Curbele din graficele de variație ale spectrului solar, fig. 1.2.1.a, sunt cuprinse între curbele de radiație ale corpului absolut negru BB corespunzând următoarelor temperaturi:

- BB 6300 K - curba roșie superioară, fig. 1.2.1.a, reprezintă radiația BB la 6.300 K având aceeași lungime de undă cu intensitatea maximă a radiației solare;
- BB 5777 K - curba neagră inferioară, fig. 1.2.1.a, reprezintă radiația BB la 5.777 K care emite aceeași cantitate de energie ca soarele.



La nivelul solului, curba distribuției spectrale a radiației solare este sensibil modificată datorită parcurgerii atmosferei terestre. Mărimea fizică care caracterizează influența atmosferei terestre asupra spectrului optic al razei solare incidente este coeficientul AM, care se exprimă ca raportul dintre lungimea parcursă de raza solară incidentă prin atmosfera terestră și înălțimea atmosferei măsurată pe verticală la zenit.

Parametrii de referință de testare ai sticlei fotovoltaice

Conform standardelor (SR EN 15316-4-3 – 2017 Partea 4-3) testarea în condiții de laborator a sticlei fotovoltaice implică asigurarea următorilor parametri de referință:

- intensitatea orizontală a radiației solare: $I_{\text{ref}} = 1.000 \text{ W/m}^2$;
- temperatura celulei: $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- spectrul de referință solar al masei de aer: AM = 1,5.

Radiația solară este compusă din: radiația ultravioletă λ : $10 \div 380 \text{ nm}$, domeniul vizibil λ : $380 \div 700 \text{ nm}$, respectiv radiația IR λ : $> 700 \text{ nm}$.

1.2.2 Simularea radiației solare

În vederea realizării simulatorului solar s-au adoptat următoarele tipuri de becuri:

- Benzi LED pentru simularea spectrului vizibil: Toshiba LUMIBARTW-112-4098, Linear Z 112, CRI 98 în domeniul spectrului vizibil λ : $380 - 750 \text{ nm}$;
- Becuri infraroșii cu incandescență care simulează radiația IR $\lambda > 700 \text{ nm}$.

În vederea testării în condiții de laborator a luminatoarelor prevăzute cu PV s-a proiectat un simulator solar, compus din următoarele subansambluri:

Lampa simulator solar

Corespunzător modului de PV: $600 \times 1.200 \text{ mm}$, s-a proiectat o lampă pentru simulatorul solar având dimensiuni acoperitoare: $800 \times 1.400 \text{ mm}$, prezentată în fig. 1.2.2. Răcirea LED-urilor se realizează cu 2 ventilatoare axiale (debit: $845 \text{ m}^3/\text{h}$).

Alimentare energie electrică

Instalația electrică a simulatorului solar cuprinde:

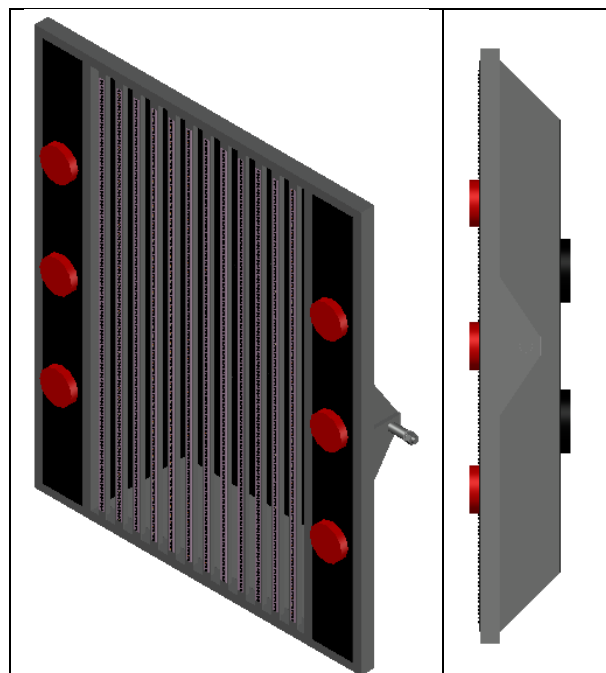


Fig. 1.2.2 Panou simulator solar;
benzi LED Toshiba LUMIBARTW-112-4098, 60 buc;
becuri radiație infraroșie 6 buc;

- alimentarea cu curent electric continuu 24 Vcc a benzilor LED, prin intermediul unei surse de alimentare de laborator cu 2 canale care permite reglarea intensității luminoase prin limitarea intensității curentului electric pentru fiecare canal al sursei;
- alimentarea cu curent electric 230 V a becurilor infraroșii, reglabil printr-un variator de tensiune, și a ventilatoarelor axiale.

Echipamente de măsură

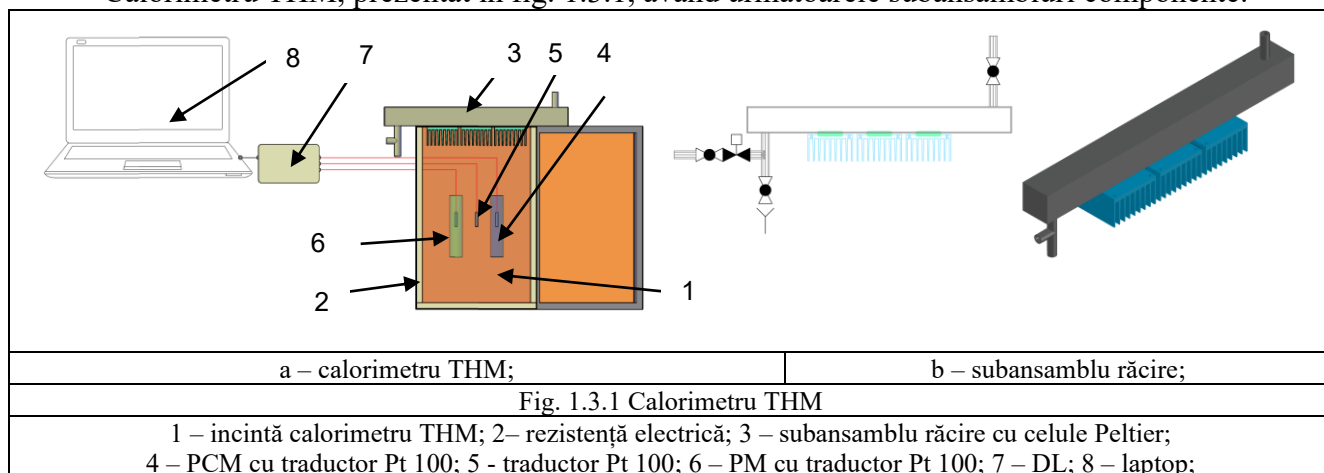
Măsurarea și reglarea intensității radiației solare artificiale se realizează prin intermediul unui Fotoradiometru multisenzor, care permite monitorizarea spectrului de radiații: UV ($\lambda=220 \div 400$ nm), UVA ($\lambda=315 \div 400$ nm), vizibil ($\lambda=380 \div 780$ nm), spectral albastru ($\lambda=400 \div 700$ nm), IR ($\lambda=700 \div 1300$ nm), și măsurarea nivelului de iluminare.

1.3 PROIECTAREA CALORIMETRULUI THM

Determinarea proprietăților termice ale schimbării de fază se efectuează utilizând un calorimetru DSC, care permite obținerea cu precizie științifică a proprietăților termice, utilizând probe de ordinul mg. Trecerea la aplicații tehnice necesită completarea datelor furnizate de DSC cu măsurători efectuate pe mostre cu dimensiuni apropiate de aplicația inginerescă.

Pentru prima dată, metoda calorimetrului THM a fost propusă de Yinpeng et al. (Yinpeng Z. et al., 1999) în 1999. Calorimetrul THM este o incintă climatică care permite încălzirea și răcirea controlată a mostrei de PCM și a unei cantități identice a PM (apă distilată, ulei siliconic, etc) a cărei proprietăți termice sunt cunoscute. Determinarea proprietăților și comportarea PCM la schimbarea de fază, în funcție de temperatură, se face prin compararea cu comportarea PM.

Calorimetru THM, prezentat în fig. 1.3.1, având următoarele subansambluri componente:



- incinta calorimetrului, dimensiuni: $L \times l \times h$: $400 \times 250 \times 600$ mm, din tablă izolată cu saltele din vată minerală prevăzută cu rezistențe electrice;
- subansamblu răcire permite răcirea controlată a THM la temperaturi de $\sim 10^\circ\text{C}$ (fig. 1.3.1.b);
 - elementele active de răcire: 3 celule Peltier: $P_{\text{răcire}} = 3 \cdot 136 \text{ W} = 408 \text{ W}$;
 - radiatoare nervurate cu aripioare din aluminiu: 3 buc, amplasate în interior, pentru disiparea frigului în interiorul incintei;
 - subansamblu disipare căldură produsă de celulele Peltier în apa de răcire;
- subansamblu încălzire permite încălzirea controlată a THM la temperaturi de 70°C , compus din rezistențe electrice din film de carbon, $P_{\text{termică}} = 400 \text{ W/m}^2$, dispuse în incinta calorimetrului, pe pereții interiori protejate cu un înveliș din tablă de Al;
- instalație electrică alimentare cu energie electrică a rezistențelor, 230 Vca, respectiv a celulelor Peltier, curent continuu, tensiune 15 Vcc;
- tablou măsură și automatizare.

Alimentarea cu energie electrică a calorimetrului THM, se realizează după cum urmează:

- alimentarea rezistențelor electrice (230 Vca) se efectuează printr-un controler programabil comandat de un senzor de temperatură Pt 100, care monitorizează temperatura din THM în faza de încălzire – topire PCM;
- alimentarea celulelor Peltier (15 Vcc) se realizează prin intermediul unei surse de curent continuu cu 2 canale și a unui releu pentru cuplarea, decuplarea celulelor Peltier, comandat de un traductor de temperatură Pt 100, care măsoară temperatura THM în faza de răcire – solidificare

a PCM. La funcționarea celulelor Peltier se comandă pornirea/oprirea EV de alimentare cu apă de răcire a suprafeței de disipare a căldurii.

Sistemul de achiziții (fig. 3.1.a) de date trebuie să asigure măsurarea temperaturii din interiorul incintei THM, a probei de PCM și a probei martor, care se realizează prin intermediul a 3 traductoare de temperatură Pt 100 racordate la un sistem de achiziții de date.

1.4 CRITERII DE SELECȚIE PCM BAZATE PE DATELE CLIMATICE

În prezentul studiu s-au luat în considerare următoarele trei criterii de selecție ale PCM constând asigurarea: (1) exigențelor de microclimat interior, (2) a unei temperaturi adecvate pentru eficientizarea producției de energie electrică fotovoltaică și (3) posibilităților de acumulare a energiei termice utile.

1.4.1 Determinarea temperaturii de schimbare de fază a PCM

Calculul termic preliminar al luminatorului prevăzut cu sticlă fotovoltaică se bazează pe bilanțul termic al stratului de PCM și pe ecuația transferului termic global dintre mediul ambiant și PCM.

Algoritmul de calcul se referă la schimbarea de fază în următoarele ipoteze simplificatoare:

- se consideră că temperatura întregii mase de PCM este constantă în timp și egală cu temperatura schimbării de fază, neglijând variația de entalpie sensibilă a PCM;
- bilanțul termic al solidificării și al topirii, s-a întocmit pentru același interval de timp $\Delta\tau$;
- mecanismul transferului termic pentru perioada de solidificare a PCM, desfășurată pe durata nopții, constă în: convecția naturală a aerului rece exterior, transfer termic radiant către cer urmate de conducție prin stratul de PV;
- similar pe durata caldă a zilei, corespunzător topirii PCM, mecanismul transferului termic constă din: convecția naturală a aerului cald exterior, radiația către cer, absorbția radiației solare incidente de către PCM și conducție prin stratul de PV;
- se neglijează gradientul de temperatură prin grosimea stratului de PCM și transferul termic către mediul din interior.

În vederea selecției PCM, se consideră cunoscute variația diurnă a temperaturii exterioare: $t_{N,\tau}$, $t_{Z,\tau}$, [°C], și intensitatea radiației solare incidente pe suprafața înclinată a luminatorului: I_r [W/m²], prin valori discrete, corespunzătoare unor intervale de timp de câte o oră ($\Delta\tau=1h$). Selecția temperaturii de schimbare de fază a PCM se face pe baza bilanțului termic al stratului de PCM al luminatorului.

Bilanțul termic al solidificării PCM

Bilanțul termic al volumului de control al PCM, corespunzător perioadei de solidificare constă în egalitatea dintre cantitatea de căldură cedată mediului ambiant și căldura latentă de solidificare, este sintetic prezentat în tab. 1.4.1.

Tab. 1.4.1 Bilanțul termic al procesului de solidificare

$Q_{Sol} = m_{PCM} \cdot l_{Sol} = \sum_{\tau_{Nin}}^{\tau_{Nfin}} k \cdot S \cdot (t_{N,\tau} - t_{PCM}) \cdot \Delta\tau; \quad [J]$		
$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_C + \alpha_R} + \frac{\delta_{St}}{\lambda_{St}}}$ [W/m ² ·K]	Convecție [W/m ² ·K]	$\alpha_C = \frac{Nu \cdot \lambda_{aer}}{l_{ech}} = \frac{m \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot \lambda_{aer}}{l_{ech}} = \frac{m \cdot \left(\frac{g \cdot \beta \cdot (t_{N,\tau} - t_{PCM}) \cdot l_{ech}^3}{\nu_{aer}^2} \cdot Pr \right)^n \cdot \lambda_{aer}}{l_{ech}} = C_C \cdot (t_{N,\tau} - t_{PCM})^n;$
	Radiație [W/m ² ·K]	$\alpha_R = \varepsilon_{cer} \cdot C_0 \cdot \frac{T_{cer,N,\tau}^4 - T_{PCM}^4}{T_{cer,N,\tau} - T_{PCM}} \cdot 10^{-8} = C_R \cdot \frac{T_{cer,N,\tau}^4 - T_{PCM}^4}{T_{cer,N,\tau} - T_{PCM}}; T_{cer} = \varepsilon_{cer}^{0,25} \cdot t_{N,Z,\tau} + 273,15;$ $\varepsilon_{cer} = 0,711 + 0,56 \cdot \frac{t_r}{100} + 0,73 \cdot \left(\frac{t_r}{100} \right)^2 + 0,013 \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot \tau}{12} \right) + 0,00012 \cdot (p_b - 1000);$
$\rightarrow Q_{Sol} = m_{PCM} \cdot l_{Sol} = \sum_{\tau_{Nin}}^{\tau_{Nfin}} \frac{1}{\frac{1}{C_C \cdot (t_{N,\tau} - t_{PCM})^n + C_R \cdot \frac{T_{cer,N,\tau}^4 - T_{PCM}^4}{T_{cer,N,\tau} - T_{PCM}}} + \frac{\delta_{St}}{\lambda_{St}}} \cdot S \cdot (t_{N,\tau} - t_{PCM}) \cdot \Delta\tau; \quad [J] \quad (1.4.1)$		

Ecuației (1.4.1), având ca necunoscută temperatura de schimbare de fază a PCM, s-a rezolvat folosind funcția „Goal Seek” a programului Excel. Utilizarea automată a funcției „Goal Seek” pentru fiecare zi a lunii de calcul s-a realizat în Excel-Visual Basic (VBA).

Bilanțul termic al topirii PCM

Bilanțul termic al volumului de control al PCM, corespunzător perioadei de topire constă în egalitatea dintre suma căldurii latente de topire a PCM și a căldurii acumulate la preîncălzirea a.c.c., între: $t'_{a.c.c.} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ și $t''_{a.c.c.} = t_{PCM} - 5 \text{ } ^\circ\text{C}$, pe de-o parte, cu suma căldurii primite convecție naturală și

radiație din mediul ambiant (vz. tab. 1.4.1) și a celei absorbite din radiația solară incidentă ($A_{PCM} = 35\%$) conform Dong Li et al. (Dong Li et al., 2018), pe de altă parte, conform relației:

$$Q_{Top} + Q_{acc} = m_{PCM} \cdot l_{Top} + m_{acc} \cdot c_{acc} \cdot (t''_{acc} - t'_{acc}) = \sum_{\tau_{zin}}^{\tau_{zfin}} [k \cdot (t_{Z,\tau} - t_{PCM}) + A_{PCM} \cdot I_{\tau}] \cdot S \cdot \Delta\tau; \quad [J] \quad (1.4.2)$$

Ecuția bilanțului termic pe durata zilei (rel. 1.4.2) permite determinarea cantității de a.c.c. preîncălzită de volumul de control al luminatorului fotovoltaic:

$$m_{acc} = \frac{\sum_{\tau_{zin}}^{\tau_{zfin}} [k \cdot (t_{Z,\tau} - t_{PCM}) + A_{PCM} \cdot I_{\tau}] \cdot S \cdot \Delta\tau - m_{PCM} \cdot l_T}{c_{acc} \cdot (t''_{acc} - t'_{acc})}; \quad [kg]$$

respectiv raportat la unitatea de suprafață a ferestrei:

$$m_{acc,1m^2} = \frac{m_{acc}}{S} = \frac{\sum_{\tau_{zin}}^{\tau_{zfin}} [k \cdot (t_{Z,\tau} - t_{PCM}) + A_{PCM} \cdot I_{\tau}] \cdot S \cdot \Delta\tau - m_{PCM} \cdot l_T}{S \cdot c_{acc} \cdot (t''_{acc} - t'_{acc})}. \quad [kg/m^2]$$

1.4.2 Selecția PCM

Date de intrare: orientare luminator fotovoltaic: S; unghi înclinare: 30° ; perioada sezon cald: iunie-septembrie; valoarea estimată inițial pentru temperatura de schimbarea de fază: $20^\circ C$.

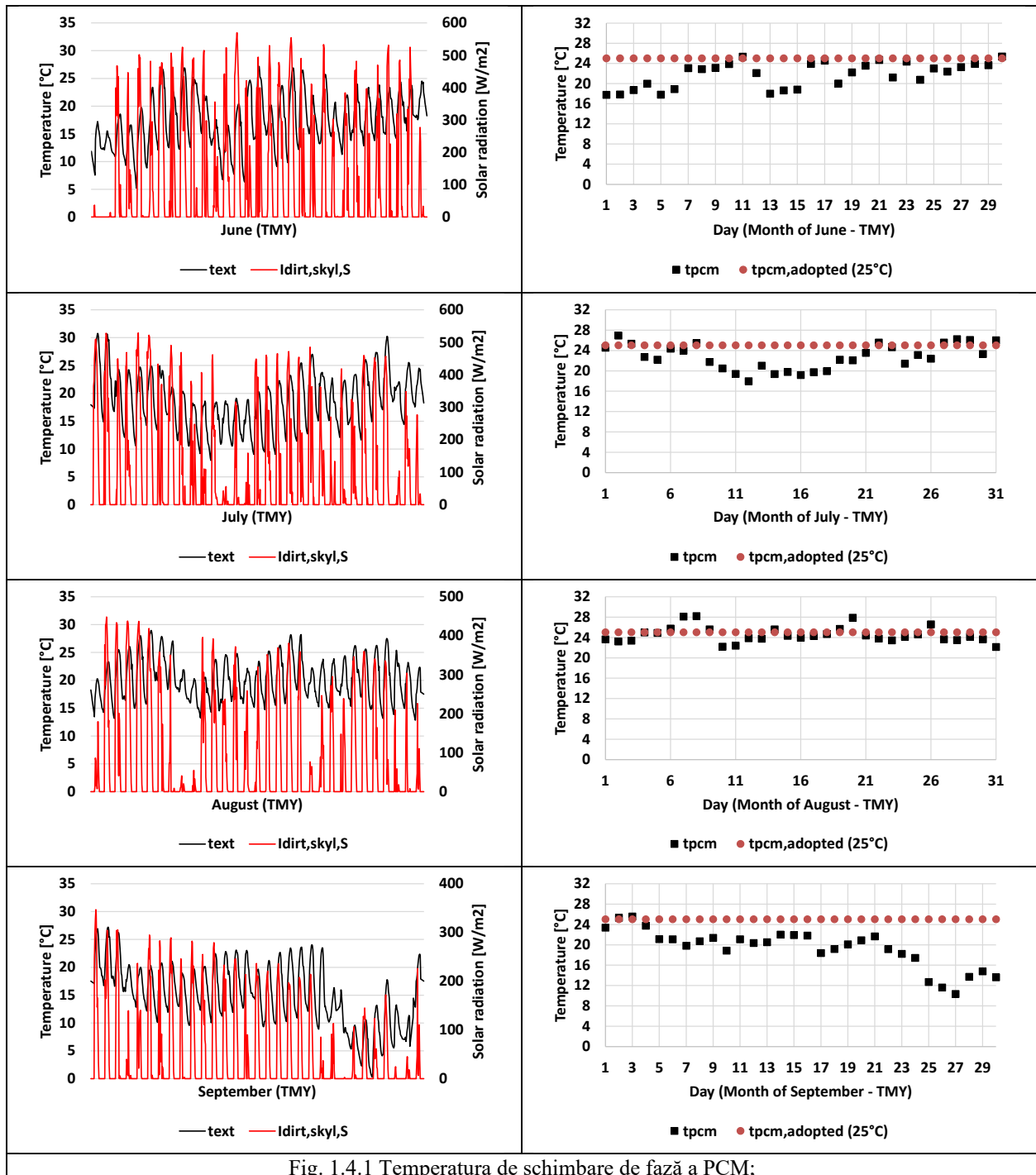


Fig. 1.4.1 Temperatura de schimbare de fază a PCM;

Figura 1.4.1 prezintă: temperaturile de schimbare de fază ale PCM obținute prin calcul, pentru fiecare zi a lunii (t_{PCM} , °C), temperatura de schimbare de fază adoptată ($t_{PCM,adopted}$, °C), în comparație cu condițiile climatice externe: temperatura exterioară a aerului (t_{ext} , °C) și intensitatea radiației solare incidente pe luminatorul studiat ($I_{dirt,sky,S}$, W/m²).

Pentru resolidificarea PCM pe durata zilei, s-a determinat cantitatea de apă preîncălzită produsă, considerând temperatura de intrare în serpentină 10 °C și temperatura de ieșire ($t_{PCM} - 5$)°C=20°C. Cantitățile rezultate de a.c.c. preîncălzită sunt prezentate în fig. 1.4.2.

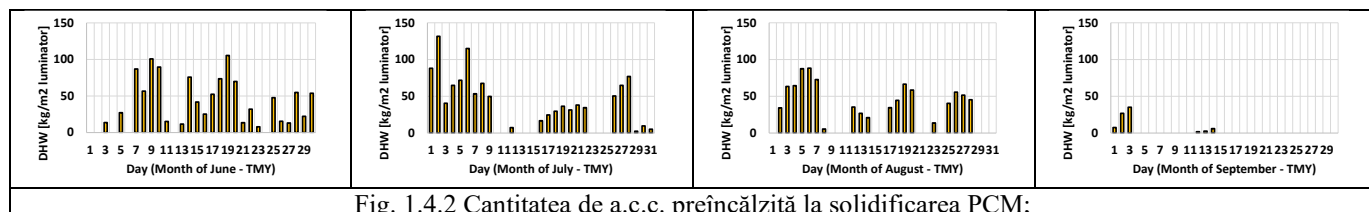


Fig. 1.4.2 Cantitatea de a.c.c. preîncălzită la solidificarea PCM;

Coroborând rezultatele calculului cu criteriul (1) de selecție al PCM: asigurarea confortului termic interior și criteriul (2) pentru asigurarea menținerii constante a temperaturii elementelor PV, se vor adopta PCM cu temperatura de schimbare de fază în jurul valorilor: 25 – 26 °C. În consecință, se va evalua posibilitatea utilizării materialelor PCM producător Rubitherm: Parafina RT25HC (temperatura schimbare fază cf. fișă tehnică: 22-26°C) și amestecuri hidrați de săruri SP25E2 și SP26E (temperaturi nominale de schimbare de fază ~25°C, respectiv ~26°C).

1.5 DEFINIREA EXIGENȚELOR IAQ ȘI METODOLOGIA DE PROIECTARE HVAC

În prezentul studiu de caz s-a considerat soluția clasică a luminatoarelor compuse din trei straturi de sticlă fumurie reflexivă, care în etapa următoare a cercetării urmează a fi comparate cu soluția cu PV. S-a analizat o Sală de Sport, datorită exigențelor impuse de condițiile specifice de microclimat interior, care implică un consum ridicat de energie electrică al instalației HVAC și a instalației de iluminat interior, precum și un necesar mare de a.c.c., ceea ce conduce la un consum ridicat de combustibil convențional al centralei termice. Aceste cerințe au fost selectate pentru cercetarea numerică a soluției adoptate, în vederea analizei eficienței energetice a soluției tehnice propuse, pe durata sezonului cald.

Imobilul: Sală de Sport: S+D+P+E, are următoarea configurație:

- Subsol: parcare subterană;
- Demisol: Teren de joc, Grupuri sanitare, spații auxiliare etc;
- Parter: Tribune, Foaier, Circulații, spații Birouri și auxiliare, Grupuri sanitare etc;
- Etaj: Tribune, Foaier, Circulații, Presă, Grupuri sanitare etc.
- Învelitoarea: pe suprafața terenului de joc sunt prevăzute luminatoare din sticlă fumurie reflexivă (2000*1500 mm, buc: 17*25) orientare: S, unghi înclinare: 30 °.

Prezentul studiu de caz analizează instalația HVAC care asigură condițiile de microclimat, pe perioada sezonului cald, atât în cazul zilelor cu antrenamente – fără spectatori, cât și în situația zilelor cu competiții sportive, după cum urmează:

- **Terenul de joc** - asigurarea aportului de aer proaspăt și evacuarea aerului viciat prin două instalații HVAC cu câte o CTA, fiecare deservind jumătate din suprafața terenului;
- **Tribunele pentru spectatori** - asigurarea aerului proaspăt și evacuarea aerului viciat prin două instalații HVAC, prevăzute cu câte o CTA, fiecare deservind câte o tribună;
- **Spațiile de circulație adiacente** - asigurarea microclimatului interior prin intermediul unor VCV de pardoseală sau de tavan, care compensează aporturile de căldură prin anvelopa construcției, precum și degajările de căldură din interior.

BR ale CTA și VCV funcționează cu apă cu etilen/propilen glicol 45 %: 7/12 °C furnizată de agregatul de apa răcită – chiller amplasat pe învelitoare. Soluția tehnică adoptată permite funcționarea independentă a instalațiilor HVAC în funcție de modul de utilizare a spațiilor respective.

1.5.1 Parametrii de confort interior

Climatizarea are drept scop realizarea unei ambianțe care să răspundă condițiilor de confort termic și cerințelor de calitate IAQ, prezentate în tab. 1.5.1.

Tab. 1.5.1 Parametrii de confort termic și IAQ pentru Sala de sport (conf. Normativ NP065-02 și I5-2022)

• temperatură interioară, [°C]	antrenament: 20÷22 °C; competiție: 16÷20 °C; adoptat: 22 °C;
• umiditate relativă, [%];	$\varphi = 30 \div 60$ %; adoptat: $\varphi = 50$ %;
• viteză aer nivel ocupanți, [m/s];	viteza curenților de aer maxim: 0,15 m/s;
• calitate aer interior, [mg/m ³];	degajat de activitatea metabolică umiditate max.: 15.400 mg/m ³ CO ₂ 1.600 mg/m ³ ;
• debit aer HVAC, [m ³ /s, m ³ /h];	$\dot{V} = n_p \cdot \dot{V}_p + S_u \cdot \dot{V}_{S,u}$; $\dot{V}_p = \text{min. } 25 \text{ m}^3/\text{h/sportiv}$; $\dot{V}_p = \text{min. } 20 \text{ m}^3/\text{h/spect.}$;
• nivel zgomot, [dB(A)];	40 ÷ 75 dB(A).
• iluminat interior artificial, [W/m ²];	antrenament: 300 lx; competiție: 500 ÷ 750 lx

1.5.2 Parametrii climatici exteriori de calcul

Parametrii exteriori pentru sezonul cald în cazul instalațiilor HVAC se adoptă în funcție de locație, corespunzând valorilor zilei celei mai calde din TMY, fiind prezentați în tab. 1.5.2 și tab. 1.5.3.

Tab. 1.5.2 Parametrii exteriori și proprietățile aerului umed

• temperaturi exterioare: $t_{e,max}; t_{e,ef}; t_{e,med}; [^{\circ}\text{C}];$	umiditatea relativă: φ , [%];	$\rho_{a,um} = \frac{10^{-4}}{T_a} \cdot (34,84 \cdot p_a - 13,17 \cdot p_{vap})$
• echivalență aer însoțit: $t_{e,s} = t_{e,ef} + \frac{A}{\alpha_e} \cdot I_{gl}; [^{\circ}\text{C}];$	• conținutul de umiditate: $x = 0,622 \cdot \frac{p_{vap}}{p_a - p_{vap}};$	$i_{a,um} = 1,005 \cdot t_a + x \cdot (2490,37 + 1,9672 \cdot t_a)$

Tab. 1.5.3 Intensitatea radiației solare incidente în funcție de elementele de construcție

Intensitatea radiației solare globale, [W/m ²];	
• elemente construcție cu inerție termică:	$I_{gl} = a_1 \cdot a_2 \cdot I_{DIR} + I_{dif}$;
• elemente construcție fără inerție termică:	$I_{gl} = a_1 \cdot a_2 \cdot I_{DIR}^{max} + I_{dif}^{max}$.
• suprafețe înclinate:	$I_{DIR,\gamma_t} = I_{DIR,N} \cdot \cos \theta$;

1.5.3 Aporturile de căldură

Fluxurile termice care pătrunde prin elementele de construcție exterioare și interioare ale unei încăperi climatizate sunt prezentate în tab. 1.5.4.

Tab. 1.5.4 Aporturile de căldură prin elementele de construcție cu și fără inerție termică

Flux termic pătruns prin elemente exterioare și interioare construcție, [W]: $\dot{Q}_{CON} = \dot{Q}_{PE} + \dot{Q}_{FE} + \dot{Q}_{PI}$	
• fluxul termic pătruns prin elementele de construcție cu inerție termică, [W];	$\dot{Q}_{PE} = S_{PE} \cdot [k_{PE} \cdot (t_{e,s,med} - t_i) + \eta \cdot \alpha_i \cdot (t_{e,s} - t_{e,s,med})];$
• fluxul termic pătruns prin elementele de construcție fără inerție termică, [W];	$\dot{Q}_{FE} = \dot{Q}_{FEI} + \dot{Q}_{FET} = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot m \cdot (S_{FE,s} \cdot I_{DIR}^{max} + S_{FE} \cdot I_{dif}^{max}) + S_{FE} \cdot k_{FE} \cdot (t_{e,s,FE} - t_i);$
• fluxul termic pătruns în încăperea prin elementele de construcție interioare, [W]	$\dot{Q}_{PI} = S_{PI} \cdot k_{PI} \cdot (t_{inv} - t_i);$

Degajările de căldură din interiorul construcției se însumează considerând un scenariu plauzibil de activitate, de ocupare și de simultaneitate, fiind prezentate în tab 1.5.5.

Tab. 1.5.5 Degajările interioare de căldură

Degajări interioare, [W];	• metabolism, [W];	• iluminat, [W];	• utilaje, [W];
$\dot{Q}_{int} = \dot{Q}_{met} + \dot{Q}_{il} + \dot{Q}_{ut,el}$	$\dot{Q}_{met} = \sum n_{p,i} \cdot \dot{q}_{met,i}$	$\dot{Q}_{il} = c_{il} \cdot \sum S_{u,i} \cdot P_{il,i}$	$\dot{Q}_{ut} = \sum c_{ut,el,i} \cdot n_{ut,el,i} \cdot P_{ut,el,i}$

1.5.4 Breviar de calcul instalație climatizare

Aporturile de căldură din exterior – necesarul de frig, s-au determinat pentru ziua cea mai caldă din Cluj-Napoca: 1 iulie (TMY), conform scenariului de activitate: teren joc - zi de antrenamente – ora defavorabilă: 12:00, tribune – zi de competiții – ora defavorabilă 20:00, ceea ce a permis dimensionarea echipamentelor instalației HVAC, rezultatele fiind prezentate în tab. 1.5.6.

Tab. 1.5.6 Dimensionarea instalației HVAC

Echipament	Relație calcul	$\dot{V}_{CTA,ap}$ [m ³ /h]	Nec. frig [kW]	Put. inst. [kW]
VCV – 46 buc;	$\dot{Q}_{VCV} = \dot{Q}_{PE} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{int};$		294,775	294,87
CTA – 2 buc - teren joc;	$\dot{Q}_{CTA} = \dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{CTA,ap} \cdot (i'_{CTA,ap} - i''_{CTA,ap});$	13665	225,85	228
CTA – 2 buc – tribune;	$\dot{Q}_{CTA} = \dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{CTA,ap} \cdot (i'_{CTA,ap} - i''_{CTA,ap});$	20525	279,75	282

În conformitate cu algoritmul de calcul anterior prezentat s-a elaborat un program de calcul, în limbaj MATLAB, care permite calculul automat al aporturilor de căldură. Schema logică de principiu a programului este prezentată în fig. 1.5.1.

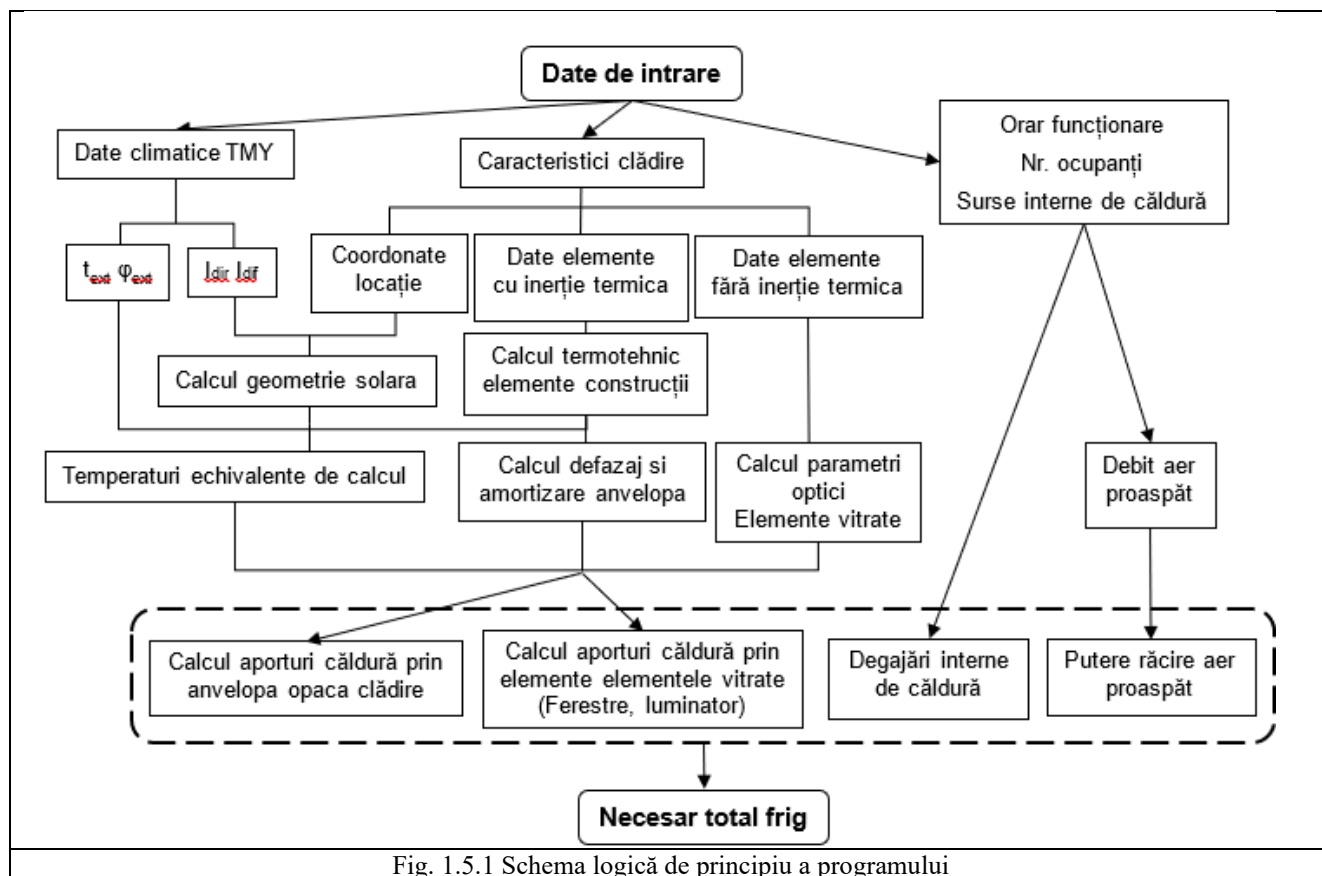


Fig. 1.5.1 Schema logică de principiu a programului

1.6 EXECUȚIA ȘI TESTAREA CALORIMETRULUI THM

Execuția calorimetrului THM

Pe baza proiectului realizat în activitatea 1.3, s-a executat calorimetrul THM, compus din: **1.** Tablou comandă și automatizare THM pentru controlul temperaturii interioare (fig. 1.6.1); **2.** Incinta calorimetrului dotată cu sistem de răcire cu module Peltier răcite cu apă și încălzire prin rezistențe din peliculă de carbon prevăzute în pereții laterali ai incintei (fig. 1.6.2); **3.** Alimentator de laborator multicanal pentru alimentare cu curent electric continuu a elementelor Peltier (max. (60V, 20A)/canal).

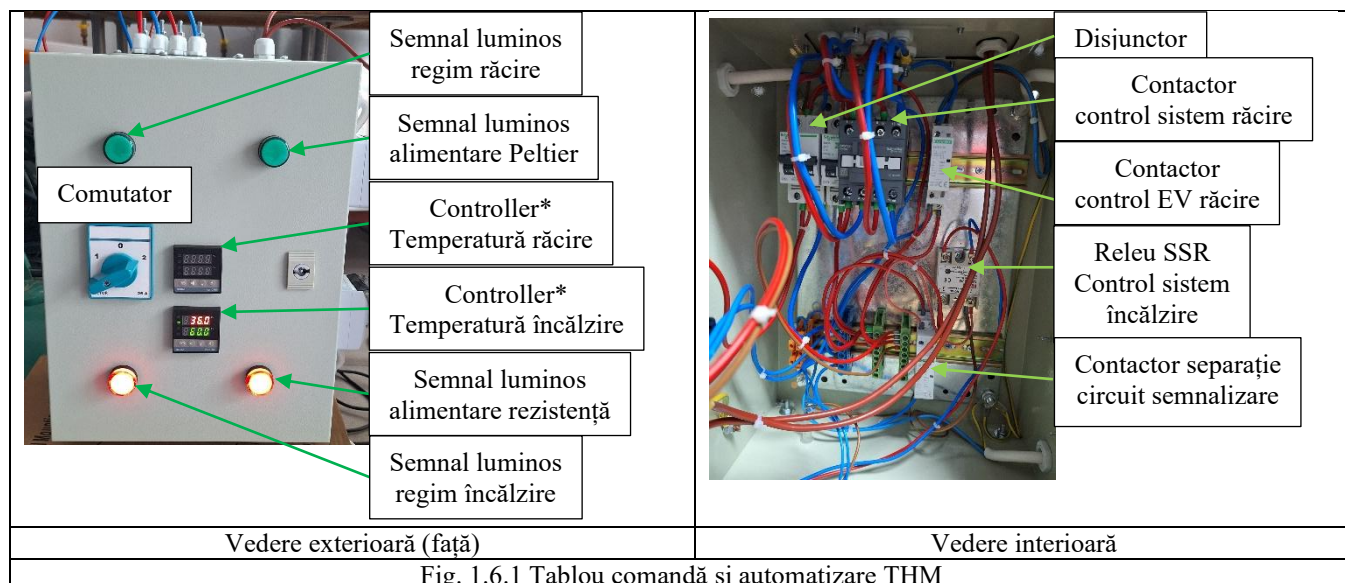
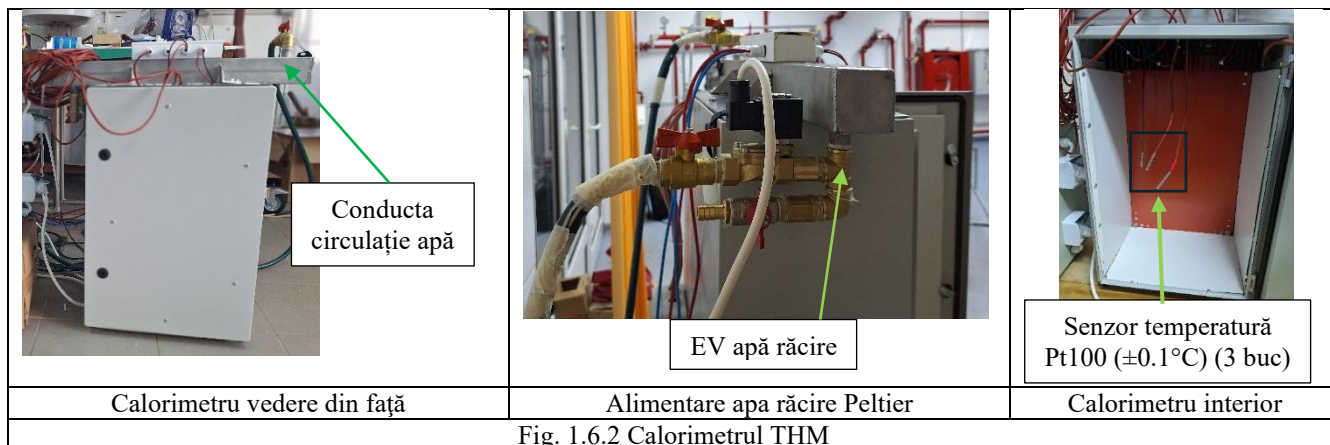


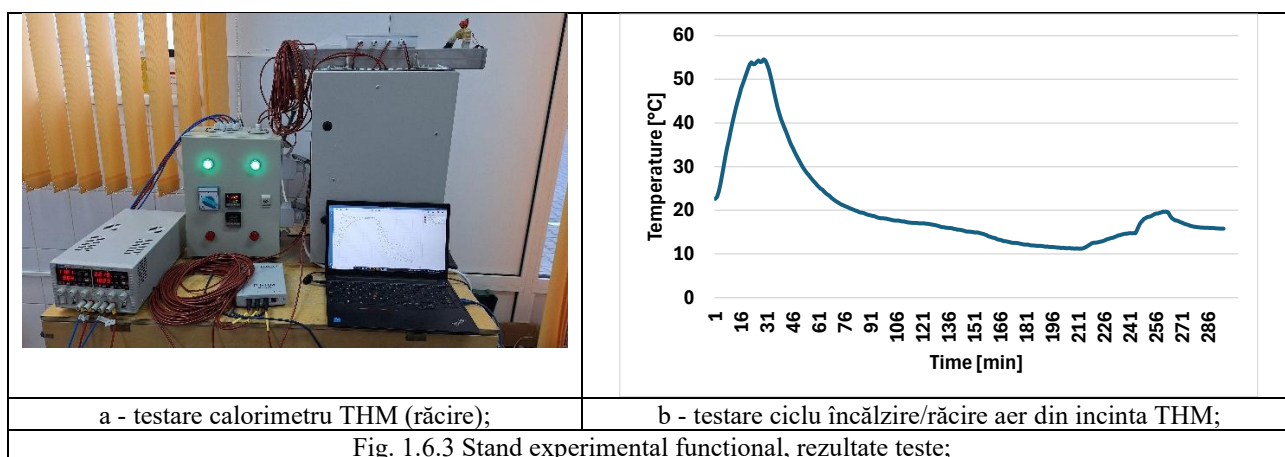
Fig. 1.6.1 Tablou comandă și automatizare THM

Analizele se vor realiza cu senzori de temperatură din rezistența de platina 100 Ω , acuratețe ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) pentru măsurarea: temperaturii mostrei studiate PCM, temperaturii PM (apă distilată) și a temperaturii aerului interior. Incinta este dotată cu 2 senzori pentru controlul temperaturii interioare pe durata încălzirii, respectiv răcirii. Citirea temperaturilor se realizează prin intermediul unui USB DL PT-104, 4 canale, compatibil cu rezistențele din platină Pt100 și opțiuni de atenuare zgomot.



Testarea calorimetrului THM

Calorimetrul THM, prezentat în fig. 1.6.3, a fost testat în condiții de laborator pentru verificarea capacității de încălzire și răcire a mediului interior. Calorimetru este capabil să simuleze condițiile de noapte specifice sezonului cald din locația de desfășurare a determinărilor experimentale. Temperatura minimă a aerului în incinta este de 11.21 °C. Temperaturile interioare pot fi setate și menținute la valorile impuse prin intermediul controlerelor REX-C100FK07.



1.7 EXECUȚIA STANDULUI EXPERIMENTAL DEMONSTRATIV - LUMINATOR BIPVT

Pe baza rezultatelor obținute în urma realizării activității 1.7, s-a executat luminatorul studiat experimental în cadrul proiectului. Serpentina de răcire a PCM-ului s-a executat din tuburi de sticlă borosilicat 3,3, Țv Ø 10·1,5 mm. Figura 1.7.1 prezintă luminatorul pe durata execuției elementului vitrat.

Microclimatul interior se evaluează prin calculul temperaturii MRT: $\bar{t}_r$, [°C], conform ISO 7726:1998, în ipoteza convecției interioare naturale:

$$\bar{t}_r = \left[(t_{GN} + 273.15)^4 + \frac{0.25 \cdot 10^8}{\varepsilon_{GN}} \cdot \left(\frac{|t_{GN} - t_{a,int}|}{D_{GN}} \right)^{0.25} \cdot (t_{GN} - t_{a,int}) \right]^{0.25} - 273.15;$$

unde: $\varepsilon_{GN} = 0.95$ [-] este coeficientul de emisivitate termică glob negru mat.



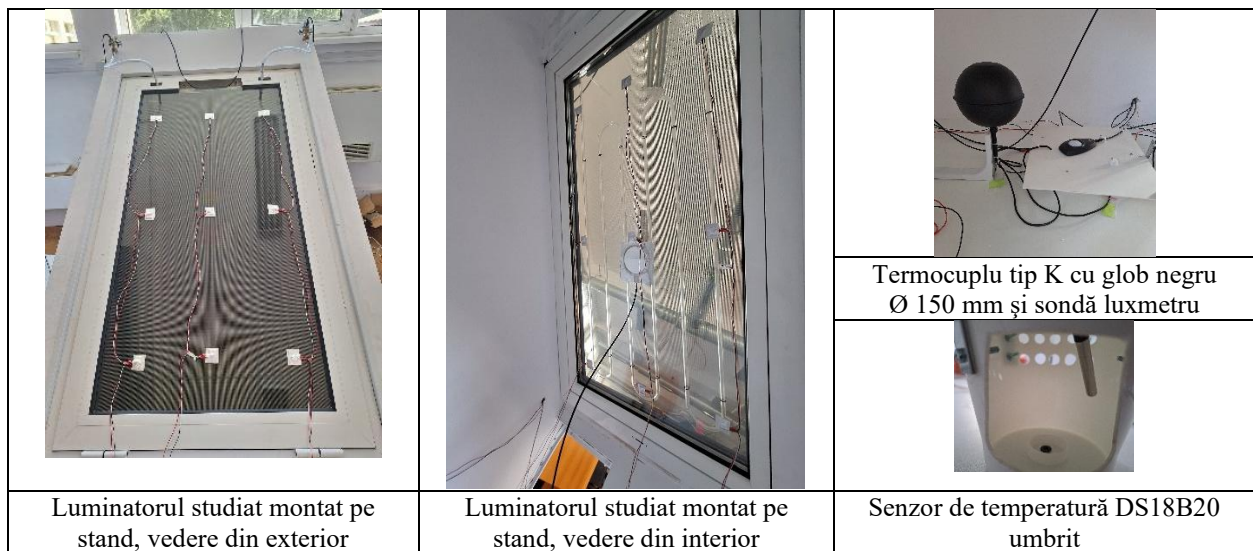


Fig. 1.7.1 Standul experimental demonstrativ pentru studiul eficienței soluției tehnice propuse de luminator

Aparatură de măsură și sistemul de achiziții de date este prezentat în fig 1.7.2

● Parametrii termici și ai mediului ambiant:

Parametru	Temp. radiantă	Iluminat	Temp. sticlă și a.c.c.	Flux termic
Echipament	GN termocuplu K	luxmetru	DS18B20	FukseFlux HFP01
Domeniu	0÷120 °C, CP 1	0÷100000 lux	-55÷ +125 (±0.5) °C	-2000 ÷ +2000 W/m ²
Achiziții date	Testo IAQ DL		Arduino MEGA 2560	DL PicoScope 2000

● Parametrii fotovoltaici:

- simulare consumator printr-o sarcină electronică programabilă CC Multicomp, 300 W, 0÷120 V, 30A;
- sarcina și elementul CdTe sunt conectate la controllerul MPPT (Victron Energy 150|35, $I_{max}=35A$, $U_{max}=150V$;

- monitorizare fotovoltaic prin sistem de comunicare Victron Energy Cerbo GX, portal VRM.

● Controlul circulației a.c.c prin serpentină se realizează printr-o EV: ½", normal închis, 230V și un Modul releu cu 2 canale, 5V. În funcție de temperatura pe suprafața exterioră a sticlei, setată în mediul de programare ArduinoIDE, EV permite circulația a.c.c. prin serpentină pentru răcirea PCM și a PV.

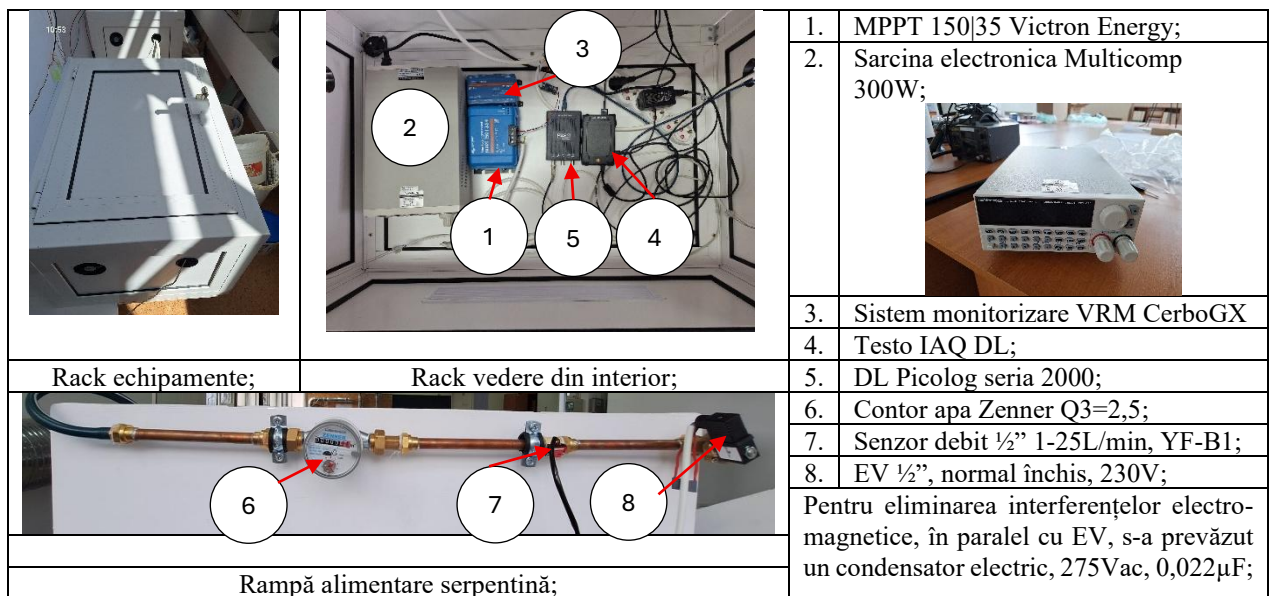


Fig. 1.7.2 Instalație experimentală de achiziții de date

1.8 EXECUȚIA ȘI TESTAREA SIMULATORULUI SOLAR.

Pe baza proiectului realizat în cadrul activității 1.2, s-a executat simulatorul solar. Fig. 1.8.1 prezintă simulatorul solar pe durata execuției și în stare de funcționare.

Simulatorul solar a fost testat cu un Fotoradiometru HD2402 Delta OHM dotat cu senzori multipli pentru analiza calității luminii, amplasat la ~200 mm de simulatorul solar. Rezultatele analizei spectrale sunt prezentate în fig. 1.8.2.

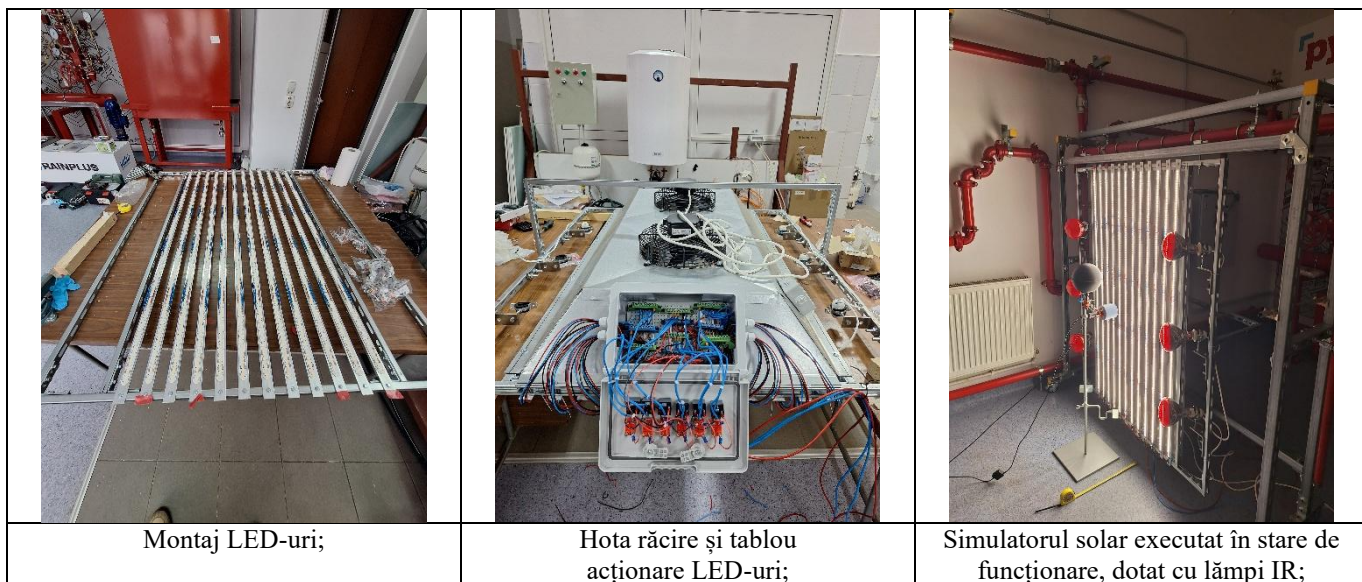


Fig. 1.8.1 Simulatorul solar

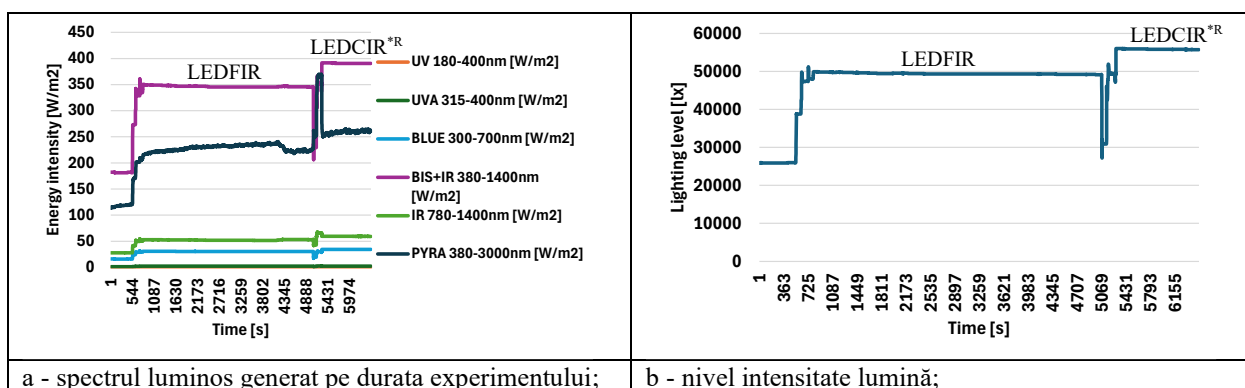
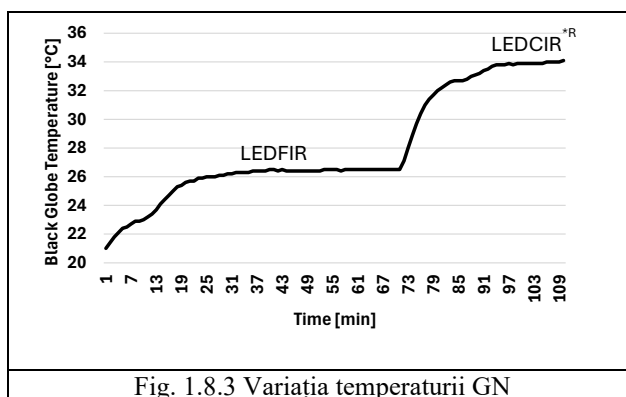


Fig. 1.8.2 Rezultate analiză simulator solar
LEDFIR – LED (23V/13.5A) fără IR LEDCIR – LED (23V/13.5A) cu IR
*^R – radiometru orientat spre IR



Pe lângă fluxul luminos, simulatorul este capabil să genereze un flux termic radiant măsurat prin intermediul GN prezentat în fig. 1.8.3, temperatura încăperii fiind 20 °C. Utilizând LED-urile ca sursă de lumină, temperatura măsurată pe GN se stabilizează la ~26,5 °C. Combinat cu sursele de lumină IR temperatura crește la ~34.1 °C. Scopul simulatorului este asigurarea unei surse de lumină controlabilă pentru generarea energiei PV și a unei surse de energie termică cu IR pentru analiza experimentală a capacității de răcire a PCM cu serpentină imersată. Se estimează că prin aplicarea

simulatorului, soluția tehnică propusă în cadrul proiectului poate fi verificată la nivel de laborator, cu o sursă de lumină programabilă, independent de condițiile meteorologice exterioare.

1.9 MĂSURĂTORI CALORIMETRICE DSC

1.9.1 Metodologie DSC

Pentru realizarea măsurătorilor DSC s-a utilizat un echipament DSC 3 Mettler-Toledo (Columbus, Ohio), termogramele fiind înregistrate și prelucrate cu software-ul STARE. În cadrul cercetării s-a evaluat comportamentul termic al unor PCM Rubitherm, din categoria organic – parafine RT și materiale anorganice SP, conform specificațiilor producătorului. Comportamentul termic al PCM a fost evaluat pe un domeniu de temperatură caracteristic, ținându-se cont de temperatura maximă de operare și efectul de supercooling, prezentate în tab. 1.9.1.

Tab. 1.9.1 Domenii de temperatură utilizate în măsurătorile DSC pe PCM Rubitherm RT și SP

PCM	Domeniu temperatură măsurare [°C]	PCM	Domeniu temperatură măsurare [°C]
RT 21	-10°C ÷ 40°C	SP 25 E2	0°C ÷ 40°C*, -30°C ÷ 40°C**
RT 25 HC	-10°C ÷ 40°C	SP 26 E	-20°C ÷ 40°C*, -30°C ÷ 40°C**
RT 28	-10°C ÷ 40°C	SP 31	-20°C ÷ 45°C*, -30°C ÷ 45°C**
RT 28 HC	-10°C ÷ 40°C		
RT 31	-10°C ÷ 40°C		

* viteză de încălzire de 1 K/min sau 3 K/min; **viteză de încălzire de 5 K/min

Pentru toate probele s-a utilizat o metodă de încălzire-răcire-încălzire², în următoarele secvențe de regim termic: 5 minute izoterm, încălzire: 1-3-5 K/min (ștergere istoric termic), 5 minute izoterm (echilibrare), răcire: 1-3-5 K/min, 5 minute izoterm (echilibrare), încălzire: 1-3-5 K/min. Temperaturile de început („onset”) și de sfârșit („endset”) ale evenimentului termic, vârful („peak”-ul) evenimentului termic și entalpiile corespunzătoare au fost determinate din termogramele înregistrate, din segmentul de răcire și al doilea segment de încălzire.

1.9.2 Rezultate determinărilor DSC

În cazul tuturor probelor, termogramele relevă evenimente termice la încălzire - topire și răcire - solidificare/cristalizare, evidențiate prin apariția de peak-uri caracteristice.

Rezultate determinări PCM organic

Rezultatele măsurătorilor DSC pentru probele RT, la o viteză de încălzire de 1 K/min, 3 K/min, respectiv 5 K/min sunt prezentate în tab. 1.9.2. În cazul PCM organice, curbele probelor RT 21, RT 28, RT 31 (atât pe segmentul de încălzire, cât și pe cel de răcire) și RT 25 HC (doar pe segmentul de răcire) prezintă caracter bimodal sau trimodal, determinat de o dublă fază de tranziției, respectiv de fenomenul de supercooling. Doar în cazul probei RT 28 HC, termogramele relevă curbe cu aspect unimodal.

Conform rezultatelor DSC, domeniile de topire și solidificare au fost mai largi decât cele raportate în fișele tehnice ale produselor RT, respectiv cu creșterea vitezei de încălzire/răcire, domeniile de temperatură corespunzătoare schimbării de fază au devenit mai largi. Valorile entalpiilor de topire/solidificare sunt inferioare celor raportate în fișele tehnice ale produselor RT.

Tab. 1.9.2 Rezultatele măsurătorilor DSC pentru probele RT

Fenomen termic/PCM	RT 21	RT 25 HC	RT 28	RT 28 HC	RT 31
Topire – viteză 1 K/min					
Temperatură început (°C)	4,05 ¹ / 10,06 ² / 19,00 ³	25,96	-1,68 ¹ /22,21 ²	26,92	-4,26 ¹ /16,72 ² / 24,31 ³
Peak (°C)	5,23 ¹ / 11,52 ² / 22,60 ³	26,19	-,74 ¹ /26,52 ³	28,47	-2,99 ¹ / 18,43 ² / 29,08 ³
Temperatură sfârșit (°C)	6,40 ¹ / 12,39 ² / 23,85 ³	27,72	-0,11 ¹ /27,60 ²	29,62	-2,02 ¹ / 19,38 ² / 32,07 ³
Entalpie topire (J/g)	4,14 ¹ / 4,24 ² / 92,53 ³	196,02	14,68 ¹ /119,89 ²	215,95	13,47 ¹ / 1,16 ² / 100,36 ³
Solidificare/Cristalizare – viteză 1 K/min					
Temperatură început (°C)	22,57 ¹ / 4,92 ²	25,86 ¹ / 18,57 ²	26,36 ¹ / -1,17 ²	26,91	30,61 ¹ / 19,31 ² / -3,92 ³
Peak (°C)	22,19 ¹ / 4,46 ²	25,08 ¹ / 19,40 ²	26,17 ¹ / -2,55 ²	27,29	30,42 ¹ / 18,41 ² / -4,57 ³
Temperatură sfârșit (°C)	21,53 ¹ / 2,88 ²	23,31 ¹ / 18,51 ²	21,60 ¹ / -3,92 ²	25,39	29,60 ¹ / 17,03 ² / -5,57 ³
Entalpie cristalizare (J/g)	101,73 ¹ / 6,48 ²	149,78 ¹ /32,88 ²	119,80 ¹ /13,50 ²	215,22	99,39 ¹ / 0,94 ² / 12,15 ³
Topire – viteză 3 K/min					
Temperatură început (°C)	4,38 ¹ / 10,62 ² / 19,94 ³	22,35	-2,03 ¹ / 20,98 ²	26,00	-4,44 ¹ / 16,98 ² / 24,39 ³
Peak (°C)	6,90 ¹ / 12,17 ² / 24,40 ³	26,18	-0,99 ¹ / 26,04 ³	28,74	-2,45 ¹ / 18,98 ² / 29,85 ³
Temperatură sfârșit (°C)	8,14 ¹ / 13,30 ² / 25,92 ³	28,30	-0,19 ¹ / 27,61 ²	30,95	-1,02 ¹ / 19,97 ² / 32,40 ³
Entalpie topire (J/g)	6,29 ¹ / 5,05 ² / 98,89 ³	196,58	13,65 ¹ /117,72 ²	209,67	14,06 ¹ / 1,23 ² / 105,70 ³
Solidificare/Cristalizare – viteză 3 K/min					
Temperatură început (°C)	23,87 ¹ / 6,41 ²	25,65 ¹ / 18,72 ²	25,68 ¹ / -1,62 ²	26,57	30,06 ¹ / 19,30 ² / -3,34 ³
Peak (°C)	23,68 ¹ / 5,78 ²	24,55 ¹ / 19,35 ²	24,55 ¹ / -2,86 ²	25,40	28,66 ¹ / 18,47 ² / -4,77 ³
Temperatură sfârșit (°C)	20,58 ¹ / 4,41 ²	21,68 ¹ / 18,28 ²	19,89 ¹ / -4,39 ²	22,84	21,58 ¹ / 16,59 ² / -6,97 ³
Entalpie cristalizare (J/g)	103,97 ¹ / 9,29 ²	148,25 ¹ /27,17 ²	117,55 ¹ /12,43 ²	209,79	103,46 ¹ / 0,90 ² / 13,84 ³
Topire – viteză 5 K/min					
Temperatură început (°C)	4,41 ¹ / 9,16 ² / 19,38 ³	23,19	-1,85 ¹ / 20,52 ²	27,02	-4,02 ¹ / 16,67 ² / 24,37 ³
Peak (°C)	6,62 ¹ / 11,76 ² / 24,29 ³	28,67	-0,70 ¹ / 25,87 ³	29,98	-2,17 ¹ / 18,97 ² / 30,47 ³
Temperatură sfârșit (°C)	8,43 ¹ / 14,25 ² / 26,13 ³	30,42	0,49 ¹ / 28,25 ²	33,24	-0,64 ¹ / 20,17 ² / 33,52 ³
Entalpie topire (J/g)	11,07 ¹ /16,52 ² /127,60 ³	199,14	13,45 ¹ /122,97 ²	218,94	13,63 ¹ / 1,58 ² / 106,58 ³
Solidificare/Cristalizare – viteză 5 K/min					
Temperatură început (°C)	22,89 ¹ / 5,30 ²	25,63 ¹ /20,13 ²	25,48 ¹ / -1,91 ²	26,94	30,26 ¹ / 18,93 ² / -3,90 ³
Peak (°C)	21,77 ¹ / 4,51 ²	22,33 ¹ /19,58 ²	23,38 ¹ / -3,44 ²	25,74	27,33 ¹ / 17,87 ² / -5,03 ³
Temperatură sfârșit (°C)	17,23 ¹ / 2,64 ²	19,75 ¹ /17,87 ²	17,88 ¹ / -5,00 ²	22,44	21,05 ¹ / 15,84 ² / -7,36 ³
Entalpie topire (J/g)	120,75 ¹ / 11,38 ²	147,4 ¹ /49,81 ²	125,02 ¹ /11,74 ²	218,68	105,24 ¹ / 1,06 ² / 11,42 ³

¹ Peak-ul 1, ² Peak-ul 2, ³ Peak-ul 3

Rezultate determinări PCM anorganic

În cazul PCM anorganice, în primă fază s-au realizat măsurători pe mai multe domenii de temperatură, pentru a putea surprinde topirea și solidificarea probelor SP. Fișele tehnice ale SP menționează domenii pozitive de temperatură de solidificare, în experimentele preliminare s-a constatat absența cristalizării, chiar și în cazul expunerii la temperaturi inferioare celei de solidificare. Astfel, măsurătorile DSC pentru probele SP au fost realizate și pe domeniu negativ de temperatură.

În cazul probelor SP, odată cu creșterea vitezei de încălzire/răcire s-a observat o deplasare mai accentuată a domeniului de solidificare față de cel de topire, diferențele între temperatura de topire și solidificare devenind, tot mai accentuate. S-a constatat solidificarea probelor SP la temperaturi diferite de cele din fișele tehnice, inclusiv în domeniul negativ de temperatură. Pentru toate probele analizate, valorile entalpiilor au fost mai mici decât cele raportate în fișele cu specificațiile produselor.

Concluzii

În cazul mostrelor SP, având în vedere caracterul necongruent al fenomenelor de solidificare, aplicarea materialelor anorganice disponibile SP în cadrul etapelor de demonstrare experimentală este riscantă. De asemenea, apariția fenomenului de supercooling, care este specific materialelor anorganice, poate determina lipsa acumulării sau acumulare incompletă de frig determinată de temperaturile ambiante scăzute pe durata nopților de vară în cazul climatului temperat continental din Cluj-Napoca. De asemenea, SP poate determina coroziunea suprafețelor metalice cu care este în contact.

Cu toate că parafina prezintă dezavantaje precum: densitate, călduri specifice și latente mai scăzute, în comparație cu SP, modalitatea mai ușoară de preparare și aplicare o face favorabilă pentru utilizare în această etapa a studiului soluției tehnice propuse.

1.10 MĂSURĂTORI CALORIMETRICE THM

Măsurătorile calorimetrice THM au fost efectuate pentru un ciclu complet format din solidificare urmată de topirea PCM în următoarele condiții:

- PM – apă distilată, PCM – parafina RT25 HC;
- dimensiuni țevi: $\bar{T}_v$ Cu Ø 18·1, h = 245 mm, înălțime PM și PCM: ~ 219 mm;
- masă probă PCM: m_{PCM} , [kg], masă probă martor: m_{PM} , [kg];
- variația temperatură - timp: PCM: $t_{PCM}^T = f(\tau)$, PM: $t_{PM}^T = f(\tau)$, THM: $t_{THM}^T = f(\tau)$, sunt prezentate în fig. 1.10.1. S-au dedus ecuațiile polinomiale ale variației temperatură – timp, pentru fiecare zonă de determinare a proprietăților termice.

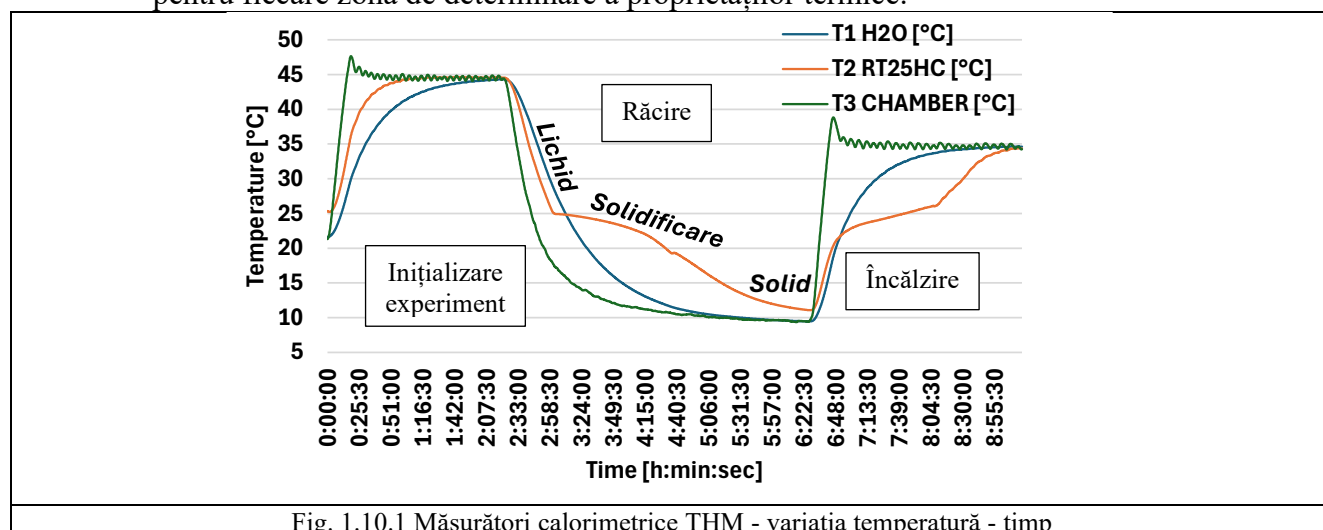


Fig. 1.10.1 Măsurători calorimetrice THM - variația temperatură - timp

Răcire - solidificare

a. răcire fază lichidă

Date măsurate:

PM PCM	masa [g]	c_p [J/kg·K]	t_{start} [°C]	τ_{start} [s]	t_{stop} [°C]	τ_{stop} [s]	$t_{THM} = -7 \cdot 10^{-10} \cdot \tau^3 + 7 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2 - 0,0218 \cdot \tau + 41,495$; [°C]
Apă distilată	49,44	4181	43,997	0	24,872	2710	$t_{PM} = 9 \cdot 10^{-10} \cdot \tau^3 - 4 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2 - 0,0034 \cdot \tau + 44,137$; [°C]
$\bar{T}_v$ apă	80,11	385	43,997		24,872		
RT 25 HC	38,86		43,949	0	24,899	2380	$t_{PCM} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot \tau^3 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2 - 0,0081 \cdot \tau + 44,325$; [°C]
$\bar{T}_v$ RT 25 HC	79,939	385	43,949		24,899		

Date calculate:

$$A_{f,l}^{PM} = \int_0^{\tau_{start}^{PM}} (t^{PM} - t^{THM}) \cdot d\tau = 23324 \text{ K} \cdot \text{s}; A_{f,l}^{PCM} = \int_0^{\tau_{start}^{PCM}} (t^{PCM} - t^{THM}) \cdot d\tau = 14235,3 \text{ K} \cdot \text{s};$$

$$C_{f,l,PCM} = \frac{\int_0^{\tau_{stop}^{PCM}} (t^{PCM} - t^{THM}) \cdot d\tau}{\int_0^{\tau_{stop}^{PM}} (t^{PM} - t^{THM}) \cdot d\tau} \cdot \frac{m_{PM} \cdot c_{PM} + m_{tub} \cdot c_{tub}}{m_{PCM}} - \frac{m_{tub} \cdot c_{tub}}{m_{PCM}} = 2938,82 \text{ J/kg} \cdot \text{K};$$

b. solidificare:

Date măsurate:

	masa	c_p	t_{start}	τ_{start}	t_{stop}	τ_{stop}	$t_{THM} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \tau^2 - 0,0021 \cdot \tau + 16,306; [^{\circ}\text{C}]$
	[g]	[J/kg·K]	[$^{\circ}\text{C}$]	[s]	[$^{\circ}\text{C}$]	[s]	
Apă distilată	49,44	4181	24,872	0	19,134	1240	$t_{PM} = 9 \cdot 10^{-7} \cdot \tau^2 - 0,0057 \cdot \tau + 24,851; [^{\circ}\text{C}]$
Țv apă	80,11	385	24,872				
RT 25 HC	38,86		24,899	0	19,133	5700	$t_{PCM} = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \tau^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \tau + 24,696; [^{\circ}\text{C}]$
Țv RT 25 HC	79,939	385	24,899				

Date calculate:

$$A_{sol}^{PM} = \int_{\tau_{PM=0}}^{\tau_{stop}^{PM}} (t^{PM} - t^{THM}) \cdot d\tau = 8273 \text{ K} \cdot \text{s}; A_{sol}^{PCM} = \int_{\tau_{start sol=0}}^{\tau_{stop sol}} (t^{PCM} - t^{THM}) \cdot d\tau = 58707,2 \text{ K} \cdot \text{s};$$

$$l_{sol,PCM} = \frac{\int_{\tau_{start sol=0}}^{\tau_{stop sol}} (t^{PCM} - t^{THM}) \cdot d\tau}{\int_{\tau_{PM=0}}^{\tau_{stop}^{PM}} (t^{PM} - t^{THM}) \cdot d\tau} \cdot \frac{(m_{PM} \cdot c_{PM} + m_{tub} \cdot c_{tub}) \cdot \Delta t^{PM}}{m_{PCM}} - \frac{m_{tub} \cdot c_{tub} \cdot \Delta t^{PCM}}{m_{PCM}} = 244334 \text{ J/kg}$$

Rezultatele determinărilor experimentale efectuate cu calorimetrul THM sunt confirmate de valorile obținute prin calorimetrie DSC și de cele indicate de literatura de specialitate (Bergman T.L. et al., 2011).

1.11 ELABORARE SOFTWARE MATLAB PENTRU SIMULAREA COMPORTAMENTULUI TERMIC AL CLĂDIRII DOTATE CU SISTEM HVAC.

1.11.1 Parametrii inițiali

Simularea comportamentului termic al HVAC și implicit a imobilului: Sală de sport pe perioada sezonului cald, necesită cunoașterea *parametrilor inițiali* – la momentul oarecare: τ , după cum urmează:

- parametri climatici exteriori preluați din TMY, prezentați în activitatea 1.5.2;
- parametri de confort interior conform scenariului de activități, prezentați în activitatea 1.5.1;
- caracteristicile construcției – conform planurilor de arhitectură;
- proiectul tehnic al instalației HVAC având echipamentele adoptate conform activitatea 1.5.4.

1.11.2 Aporturile de căldură

Gradientul temperaturii în elementele de construcții cu inerție termică

Pe baza parametrilor inițiali la momentul: τ , s-a determinat, conform legii lui Fourier, gradientul temperaturii prin elementele de construcție cu inerție termică: pereții exteriori și interiori în regim nestaționar prin conducție unidirecțională prin straturi neomogene, cu relația:

$$\frac{dt_{PE,(PI)}^{\tau}}{d\tau} = a \cdot \frac{d^2 t_{PE,(PI)}^{\tau}}{dx^2};$$

utilizând următoarele condiții de contur:

fața exterioară: strat 1, $x = 0$;	contact straturi: strat $i \rightarrow i+1$	fața interioară: strat n , $x = \delta_p$;
$-\lambda_1 \cdot \frac{dt_{PE,1}^{\tau}}{dx} = \alpha_e \cdot (t_{PE,1}^{\tau} - t_{e,s}^{\tau})$;	$-\lambda_{st,i} \cdot \frac{dt_{PE,(PI),i}^{\tau}}{dx} = -\lambda_{st,i+1} \cdot \frac{dt_{PE,(PI),i}^{\tau}}{dx}$;	$-\lambda_n \cdot \frac{dt_{PE,(PI),n}^{\tau}}{dx} = \alpha_i \cdot (t_{PE,(PI),n}^{\tau} - t_i^{\tau})$;

Rezolvarea ecuației diferențiale s-a efectuat prin intermediul diferențelor finite: discretizare timp $\Delta\tau$ și grosime strat: Δx . Corespunzător fiecărui pas de timp a rezultat un sistem de ecuații liniare având ca necunoscute temperaturile din fiecare nod de calcul. Sistemul de ecuații matriciale s-a rezolvat folosind un solver direct din MATLAB. În consecință, s-au determinat fluxurile termice intrate la momentul oarecare: τ ale Sălii de sport, prezentați în tab. 11.11.1.

Tab. 1.11.1 Fluxurile termice intrate

Fluxul termic intrat prin:	Fluxuri termice [W]
- elem. cu inerție termică:	$\dot{Q}_{PE}^{\tau} = \alpha_i \cdot S_{PE} \cdot (t_{PE,n}^{\tau} - t_i^{\tau})$; $\dot{Q}_{PI}^{\tau} = \alpha_i \cdot S_{PI} \cdot (t_{PI,n}^{\tau} - t_i^{\tau})$;
- elem. fără inerție termică:	$\dot{Q}_{FE,I}^{\tau} = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot m \cdot (S_{FE,S} \cdot I_{DIR}^{\tau} + S_{FE} \cdot I_{dlf}^{\tau})$; $\dot{Q}_{FE,T}^{\tau} = S_{FE} \cdot k_{FE} \cdot (t_{e,s,FE}^{\tau} - t_i^{\tau})$;
Degajări interioare:	$\dot{Q}_{met}^{\tau} = \sum n_{p,i} \cdot \dot{q}_{met,i}$; $\dot{Q}_{il}^{\tau} = c_{il} \cdot \sum S_{u,i} \cdot p_{il,i}$; $\dot{Q}_{ut,el}^{\tau} = \sum c_{ut,el,i} \cdot n_{ut,el,i} \cdot P_{ut,el,i}$;

1.11.3 Simularea aportul de frig a instalației HVAC

În vederea compensării aporturilor de căldură pentru asigurarea confortului și a calității aerului interior s-a simulat funcționarea de instalației HVAC, având echipamentele adoptate la activitatea 1.5.4.

Calculul concentrației de CO₂

În concordanță cu scenariul de funcționare a Sălii de sport, funcționarea CTA este determinată de concentrația de CO₂ degajată de ocupanți: G_p, [g/h]. Variația în timp a concentrației de CO₂ este descrisă prin ecuația diferențială (Tang H. et al., 2023):

$$\frac{dCO_{2,i}}{dt} = -N_h \cdot CO_{2,i} + N_h \cdot CO_{2,e} + \frac{n_p \cdot G_p}{V} = -N_h \cdot CO_{2,i} + N_h \cdot CO_{2,e} + \frac{n_p}{V} \cdot \frac{0.00276 \cdot A_d \cdot met \cdot RQ}{0.23 \cdot RQ + 0.77}.$$

Simularea funcționării CTA

Similar oricărui aparat termic, calculul termic de verificare permite determinarea performanțelor termice ale CTA, practic a REC și a BR, în cazul funcționării la parametri diferiți față de cei de proiectare (Kuehn T.H. et al., 1998).

• *simularea funcționării REC – specific REC răcire la conținut de umiditate constant:*

Parametrii inițiali	REC - Răcire la conținut de umiditate constant: x _{e,ap} = ct.;	Parametrii calculați
$\dot{V}_{REC,ap} = \dot{V}_{CTA,ap}$; [m ³ /s]		
$t'_{e,ef} = t'_{REC,ap}$; [°C]	$t''_{REC,ap} = \frac{t'_{REC,ap} + \frac{k_{REC} \cdot S_{REC}}{\dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{ev} \cdot c_{p, ev}} t'_{REC,ev}}{1 + \frac{k_{REC} \cdot S_{REC}}{\dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{ev} \cdot c_{p, ev}}};$	$t''_{REC,ap}$; [°C]
$t'_i = t'_{REC,ev}$; [°C];	$t''_{REC,ev} = \frac{t'_{REC,ev} + \frac{k_{REC} \cdot S_{REC}}{\eta_{REC} \cdot \dot{V}_{CTA,ev} \cdot \rho_{ev} \cdot c_{p, ev}} t'_{REC,ap}}{1 + \frac{k_{REC} \cdot S_{REC}}{\eta_{REC} \cdot \dot{V}_{CTA,ev} \cdot \rho_{ev} \cdot c_{p, ev}}};$	$t''_{REC,ev}$; [°C]
soluția constructivă	$\dot{Q}_{REC} = \dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{ap} \cdot c_{p, ap} \cdot (t'_{REC,ap} - t''_{REC,ap});$	$\dot{Q}_{REC} < 0$; [kW]

• *simularea funcționării BR – cazul 1: temperatura suprafeței BR ≥ t_r → răcire la conținut de umiditate constant:*

Parametrii inițiali	BR - Răcire la conținut de umiditate constant: x' _{BR} = x'' _{BR} = x _{e,ap} = ct.; Parametrii calculați
$\dot{V}_{BR,ap} = \dot{V}_{CTA,ap}$; [m ³ /s]	
$t'_{BR,ap} = t'_{REC,ap}$ [°C]	$t''_{BR,ap} = t'_{BR,ap} - (t'_{BR,apa} - t'_{BR,apa}) \cdot \frac{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}}{\dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{BR,ap} \cdot c_{p, a, um}}; [°C]$
$\dot{m}_{BR,apa}$; [kg/s] $t'_{BR,apa} = t'_{CH}$; [°C];	$t''_{BR,apa} = \frac{t'_{BR,apa} + t'_{BR,ap} \cdot \frac{1}{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}} \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{\dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{BR,ap} \cdot c_{p, a, um}} - \frac{1}{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}} \right) k_{BR} \cdot S_{BR}} \right]}{1 + \frac{1}{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}} \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{\dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{BR,ap} \cdot c_{p, a, um}} - \frac{1}{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}} \right) k_{BR} \cdot S_{BR}} \right]}; [°C]$
soluția constructivă	$\dot{Q}_{BR} = \dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{BR,ap} \cdot c_{p, a, um} \cdot (t''_{BR,ap} - t'_{BR,ap}); \dot{Q}_{BR} < 0$; [kW]

• *simularea funcționării BR – cazul 2: temperatura suprafeței BR < t_r → răcire și dezumidificare după panta ε = $\frac{\Delta i}{\Delta x}$, conținutul de umiditate al aerului răcit scade:*

Parametrii inițiali	BR - Răcire și dezumidificare: x'' _{BR,ap} < x' _{BR} = x _{e,ap} ; Parametrii calculați
$\dot{V}_{BR,ap} = \dot{V}_{CTA,ap}$; [m ³ /s]	
$i'_{BR,ap} = i'_{REC,ap}$; [J/kg]	$i''_{BR,ap} = \frac{i'_{BR,ap} \cdot (1 - c_1) \cdot e^{-(1 - c_1) \cdot c_2 \cdot S_{BR}} + i'_{F,ap} \cdot [1 - e^{-(1 - c_1) \cdot c_2 \cdot S_{BR}}]}{1 - e^{-(1 - c_1) \cdot c_2 \cdot S_{BR}}}; [J/kg] \rightarrow \text{în care } \begin{cases} c_1 = \frac{\dot{m}_{CTA,ap} \cdot b}{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}} \\ c_2 = \frac{k_{BR}^*}{\dot{m}_{CTA,ap}} \end{cases}$
$x'_{BR,ap} = x_{e,ap}$; [kg _{vap} /kg _{a,us}]	$x''_{BR,ap} = x_{aer,sat} + (x'_{BR,ap} - x_{aer,sat}) \cdot \frac{i'_{BR,ap} - i_{aer,sat}}{i'_{BR,ap} - i_{aer,sat}}; [kg_{vap}/kg_{a,us}]$
$t'_{BR,ap} = t'_{REC,ap}$ [°C]	$t''_{BR,ap} = \frac{i'_{BR,ap} - 2490,37 \cdot x'_{BR,ap}}{1,005 + 1,9672 \cdot x'_{BR,ap}}; [°C]$
$\dot{m}_{BR,apa}$; [kg/s] $t'_{BR,apa} = t'_{CH}$ [°C];	$t''_{BR,apa} = t'_{BR,apa} + \frac{\dot{m}_{CTA,ap}}{\eta_{BR} \cdot \dot{m}_{BR,apa} \cdot c_{p, apa}} \cdot (i'_{BR,ap} - i'_{BR,apa}); [°C]$
soluția constructivă	$\dot{Q}_{BR} = \dot{V}_{CTA,ap} \cdot \rho_{BR,ap} \cdot (i'_{BR,ap} - i'_{BR,ap}); \dot{Q}_{BR} < 0$; [kW]

Simularea funcționării VCV

În principiu, simularea funcționarea VCV este similară simulării BR a CTA în cazul răcirii cu dezumidificare. Calculul termic de verificare al VCV, adoptate pe baza proiectului instalației HVAC, permite determinarea performanțelor termice ale VCV, practic a parametrilor aerului interior recirculat

și răcit la ieșirea din VCV ($\dot{V}_{VCV,as}^\tau$, t_{VCV}^τ , i_{VCV}^τ , x_{VCV}^τ) și implicit a puterii de răcire efective ale acestora: $\dot{Q}_{VCV} = \dot{V}_{VCV,as}^\tau \cdot (\rho_{VCV,ev}^\tau \cdot i_{VCV}^{\tau''} - \rho_i^\tau \cdot i_i^\tau)$; $\dot{Q}_{VCV} < 0$; [kW].

1.11.4 Simularea funcționării instalației HVAC

Simularea funcționării instalației HVAC implică analiza scenariul de funcționare a echipamentelor acesteia, după cum urmează:

- funcționarea CTA este comandată de concentrația de $CO_{2,i}^\tau$ descrisă matematic prin parametrul de control CTA:

$$if\ CO_{2,i}^\tau \begin{cases} CO_{2,i}^\tau < CO_{2,i,impus}^\tau \rightarrow CTA\ nu\ functioneaza \rightarrow CTA = 0 \rightarrow CTA \cdot \dot{V}_{CTA,ap}^\tau = 0 \\ CO_{2,i}^\tau \geq CO_{2,i,impus}^\tau \rightarrow CTA\ functioneaza \rightarrow CTA = 1 \rightarrow CTA \cdot \dot{V}_{CTA,ap}^\tau > 0 \end{cases};$$

- funcționarea BR este comandată de temperatura interioară t_i^τ , descrisă matematic prin parametrul de control BR:

$$if\ CTA = 1 \ \& \ \begin{cases} t_i^\tau \leq t_{i,impus}^\tau \rightarrow BR\ nu\ functioneaza \rightarrow BR = 0 \rightarrow t_{REC,ap}^{\tau''}, x_{e,ap}^{\tau''}, i_{REC,ap}^{\tau''} \rightarrow notat\ i_{REC,ap}^{\tau''} = i_{BR,ap}^{\tau''} \\ t_i^\tau > t_{i,impus}^\tau \rightarrow BR\ functioneaza \rightarrow BR \rightarrow if \ \begin{cases} x_{e,ef}^\tau \leq x_{BR,sat}^\tau \rightarrow t_{BR,ap}^{\tau''}, x_{BR,ap}^{\tau''} = x_{e,ef}^\tau, i_{BR,ap}^{\tau''} \\ x_{e,ef}^\tau > x_{BR,sat}^\tau \rightarrow t_{BR,ap}^{\tau''}, x_{BR,ap}^{\tau''}, i_{BR,ap}^{\tau''} \end{cases} \end{cases};$$

rezultă aportul de frig al CTA la momentul: τ :

$$\dot{Q}_{CTA}^\tau = CTA \cdot \dot{V}_{CTA,ap}^\tau \cdot (\rho_{BR,ap}^{\tau''} \cdot i_{BR,ap}^{\tau''} - \rho_i^\tau \cdot i_i^\tau); \dot{Q}_{CTA}^\tau < 0; \quad [kW]$$

- funcționarea VCV este comandată de temperatura interioară t_i^τ , descrisă matematic prin parametrul de control VCV:

$$if\ t_i^\tau \begin{cases} t_i^\tau \leq t_{i,impus}^\tau \rightarrow VCV\ nu\ functioneaza \rightarrow VCV = 0 \rightarrow VCV \cdot \dot{V}_{VCV,as}^\tau = 0 \\ t_i^\tau > t_{i,impus}^\tau \rightarrow VCV\ functioneaza \rightarrow VCV = 1 \rightarrow VCV \cdot \dot{V}_{VCV,as}^\tau > 0 \end{cases} \rightarrow$$

$$if\ VCV = 1 \ \& \ \begin{cases} x_i^\tau \leq x_{VCV,sat}^\tau \rightarrow t_{VCV}^{\tau''}, x_{VCV}^{\tau''} = x_i^\tau, i_{VCV}^{\tau''} \\ x_i^\tau > x_{VCV,sat}^\tau \rightarrow t_{VCV}^{\tau''}, x_{VCV}^{\tau''}, i_{VCV}^{\tau''} \end{cases};$$

rezultă aportul de frig al VCV la momentul: τ :

$$\dot{Q}_{VCV}^\tau = VCV \cdot \dot{V}_{VCV,as}^\tau \cdot (\rho_{VCV,ev}^\tau \cdot i_{VCV}^{\tau''} - \rho_i^\tau \cdot i_i^\tau); \dot{Q}_{VCV}^\tau < 0. \quad [kW]$$

Pe baza algoritmului anterior prezentat se scrie ecuația bilanțului termic la momentul oarecare: τ , pentru intervalul de timp: $\Delta\tau$, după cum urmează:

$$M_{a,um}^\tau \cdot (i_i^{\tau+\Delta\tau} - i_i^\tau) = \underbrace{\alpha_i \cdot S_{PE} \cdot (t_{PE,n}^\tau - t_i^\tau) \cdot \Delta\tau}_{PE} + \underbrace{\alpha_i \cdot S_{PI} \cdot (t_{PI,n}^\tau - t_i^\tau) \cdot \Delta\tau}_{PI} +$$

$$+ \underbrace{[c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot m \cdot (S_{FE,s}^\tau \cdot I_{DIR}^\tau + S_{FE}^\tau \cdot I_{dif}^\tau) + S_{FE} \cdot k_{FE} \cdot (t_{e,s,FE}^\tau - t_i^\tau)] \cdot \Delta\tau}_{FE} +$$

$$+ \underbrace{(\dot{Q}_{met}^\tau + \dot{Q}_{il}^\tau + \dot{Q}_{ut,el}^\tau) \cdot \Delta\tau}_{DEGAJARI\ INTERNE} + \underbrace{CTA \cdot \dot{V}_{CTA,ap}^\tau \cdot (\rho_{BR,ap}^{\tau''} \cdot i_{BR,ap}^{\tau''} - \rho_i^\tau \cdot i_i^\tau) \cdot \Delta\tau}_{CTA} +$$

$$+ \underbrace{VCV \cdot \dot{V}_{VCV,as}^\tau \cdot (\rho_{VCV,ev}^\tau \cdot i_{VCV}^{\tau''} - \rho_i^\tau \cdot i_i^\tau) \cdot \Delta\tau}_{VCV}; [kJ]$$

rezultând entalpia aerului interior la momentul: $\tau + \Delta\tau$, care permite determinarea temperaturii aerului interior la momentul: $\tau + \Delta\tau$:

$$t_i^{\tau+\Delta\tau} = \frac{i_i^\tau - l_{vap} \cdot x_i^{\tau+\Delta\tau}}{c_{p,a,us} + c_{p,vap} \cdot x_i^{\tau+\Delta\tau}} = \frac{i_i^\tau - 2490,37 \cdot x_i^{\tau+\Delta\tau}}{1,005 + 1,9672 \cdot x_i^{\tau+\Delta\tau}}. \quad [^\circ C]$$

În conformitate cu algoritmul de calcul anterior prezentat s-a elaborat un program de calcul în limbaj MATLAB, care permite calculul automat al tuturor parametrilor de simulare a instalației HVAC și a răspunsului termic al Sălii de sport.

1.12 ELABORARE PROGRAM DE SIMULARE MATLAB PENTRU LUMINATORUL BIPVT

Modelul fizic al fenomenelor optice specifice luminatorului BIPVT, implică, într-o primă etapă, analiza transmiterii razei solare incidente pe o fereastră compusă din mai multe straturi transparente. Fenomenele optice s-au analizat ținând cont de reflexiile multiple pe cele două fețe ale sticlei, având coeficienți de reflexie diferiți, precum și de reflexiile dintre straturile de materiale transparente. Relațiile de calcul ale reflectanței: ρ , [-], absorbanței: α , [-] și transmitanței: τ , [-], sistemului optic s-au determinat în cazul general, fiind prezentate sintetic în tab. 1.12.1.

Notății	
I_g – radiație solară incidentă exterior $\rightarrow$ interior, [W];	r – coeficientul de reflexie, [-];
I^* – radiație incidentă interior $\rightarrow$ exterior, [W];	τ – coeficientul de transmisie, [-];
Indici	
$_{refl}$ – reflectat; $_{trans}$ – transmis; $_{abs}$ – absorbit; $_{TIM}$ – material transparent; $_{TOT}$ – total; $_{SIST\ n\ TIM}$ – sistem n TIM;	
indice prim: număr suprafață transparentă; indice secund: 1 – sens exterior spre interior; 2 – sens exterior spre interior;	
TIM – 1 buc cu coeficienți diferiți de reflexie pe cele două fețe:	
rază incidentă exterior $\rightarrow$ interior	rază incidentă interior $\rightarrow$ exterior
$\rho_{TIM\ TOT\ 1,1} = r_{1,1} + \frac{\tau_{1,1}^2 \cdot (1-r_{1,1})^2 \cdot r_{1,2}}{1-\tau_{1,1}^2 \cdot r_{1,1} \cdot r_{1,2}};$	$\rho_{TIM\ TOT\ 1,2} = r_{1,2} + \frac{\tau_{1,2}^2 \cdot (1-r_{1,2})^2 \cdot r_{1,1}}{1-\tau_{1,2}^2 \cdot r_{1,1} \cdot r_{1,2}};$
$I_{refl} = I_g \cdot \rho_{TIM\ TOT\ 1,1};$	$I_{refl} = I^* \cdot \rho_{TIM\ TOT\ 1,2};$
$\tau_{TIM\ TOT\ 1,1} = \frac{\tau_{1,1} \cdot (1-r_{1,1}) \cdot (1-r_{1,2})}{1-\tau_{1,1}^2 \cdot r_{1,1} \cdot r_{1,2}};$	$\tau_{TIM\ TOT\ 1,2} = \tau_{TIM\ TOT\ 1,1} = \frac{\tau_{1,1} \cdot (1-r_{1,2}) \cdot (1-r_{1,1})}{1-\tau_{1,1}^2 \cdot r_{1,1} \cdot r_{1,2}};$
$I_{trans} = I_g \cdot \tau_{TIM\ TOT\ 1,1}$	$I_{trans} = I^* \cdot \tau_{TIM\ TOT\ 1,1};$
$\alpha_{TIM\ TOT\ 1,1} = \frac{(1-r_{1,1}) \cdot (1-\tau_{1,1}) \cdot (1+\tau_{1,1} \cdot r_{1,2})}{1-\tau_{1,1}^2 \cdot r_{1,1} \cdot r_{1,2}};$	$\alpha_{TIM\ TOT\ 1,2} = \frac{(1-r_{1,2}) \cdot (1-\tau_{1,1}) \cdot (1+\tau_{1,1} \cdot r_{1,1})}{1-\tau_{1,1}^2 \cdot r_{1,1} \cdot r_{1,2}};$
$I_{abs} = I_g \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 1,1};$	$I_{abs} = I^* \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 1,2};$
SISTEM 2 TIM – cu coeficienți diferiți de reflexie pe cele două fețe:	
rază incidentă exterior $\rightarrow$ interior	
$\rho_{SIST\ 2\ TIM,\ 1} = \rho_{TIM\ TOT\ 1,1} + \tau_{TIM\ TOT\ 1,1}^2 \cdot \frac{\rho_{TIM\ 2,1}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}};$	
$I_{refl\ SIST} = I_g \cdot \rho_{SIST\ 2\ TIM,\ 1};$	
- absorbit TIM 1	$I_{abs\ TIM\ 1} = I_g \cdot \left(\alpha_{TIM\ TOT\ 1,1} + \tau_{TIM\ TOT\ 1,1} \cdot \frac{\rho_{TIM\ 2,1}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 1,2} \right);$
- absorbit TIM 2	$I_{abs\ TIM\ 2} = I_g \cdot \frac{\tau_{TIM\ TOT\ 1,1}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 2,1};$
- absorbit SIST 2 TIM	$\alpha_{SIST\ 2\ TIM,\ 1} = \alpha_{TIM\ TOT\ 1,1} + \frac{\tau_{TIM\ TOT\ 1,1}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}} \cdot (\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 1,2} + \alpha_{TIM\ TOT\ 2,1});$
	$I_{abs\ SIST} = I_g \cdot \alpha_{SIST\ 2\ TIM,\ 1};$
$\tau_{SIST\ 2\ TIM,\ 1} = \frac{\tau_{TIM\ TOT\ 1,1} \cdot \tau_{TIM\ TOT\ 2,1}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}};$	
$I_{trans\ SIST\ 2\ TIM,1} = I_g \cdot \tau_{SIST\ 2\ TIM,\ 1};$	
SISTEM 2 TIM – cu coeficienți diferiți de reflexie pe cele două fețe:	
rază incidentă interior $\rightarrow$ exterior	
$\rho_{SIST\ 2\ TIM,\ 2} = \rho_{TIM\ TOT\ 2,2} + \tau_{TIM\ TOT\ 2,2}^2 \cdot \frac{\rho_{TIM\ 1,2}}{1-\rho_{TIM\ 1,2} \cdot \rho_{TIM\ 2,1}};$	
$I_{refl\ SIST\ 2\ TIM,\ 2} = I^* \cdot \rho_{SIST\ 2\ TIM,\ 2};$	
- absorbit TIM 1	$I_{abs\ TIM\ 1} = I^* \cdot \frac{\tau_{TIM\ TOT\ 2,2}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 1,2};$
- absorbit TIM 2	$I_{abs\ TIM\ 2} = I^* \cdot \left(\alpha_{TIM\ TOT\ 2,2} + \tau_{TIM\ TOT\ 2,2} \cdot \frac{\rho_{TIM\ 1,2}}{1-\rho_{TIM\ 1,2} \cdot \rho_{TIM\ 2,1}} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 2,1} \right);$
- absorbit SIST 2 TIM	$\alpha_{SIST\ 2\ TIM,\ 2} = \alpha_{TIM\ TOT\ 2,2} + \frac{\tau_{TIM\ TOT\ 2,2}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}} \cdot (\rho_{TIM\ 1,2} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ 2,1} + \alpha_{TIM\ TOT\ 1,2});$
	$I_{abs\ SIST} = I^* \cdot \alpha_{SIST\ 2\ TIM,\ 2};$
$\tau_{SIST\ 2\ TIM,\ 2} = \frac{\tau_{TIM\ TOT\ 2,2} \cdot \tau_{TIM\ TOT\ 1,2}}{1-\rho_{TIM\ 2,1} \cdot \rho_{TIM\ 1,2}};$	
$I_{trans\ SIST\ 2\ TIM,2} = I^* \cdot \tau_{SIST\ 2\ TIM,\ 2};$	
GENERALIZARE $\rightarrow$ SISTEM n TIM – cu coeficienți diferiți de reflexie pe cele două fețe	
rază incidentă exterior $\rightarrow$ interior	
$\rho_{SIST\ n\ TIM,1} = \rho_{SIST\ n-1\ TIM,1} + \tau_{SIST\ n-1\ TIM,\ 1}^2 \cdot \frac{\rho_{TIM\ n,1}}{1-\rho_{TIM\ n,1} \cdot \rho_{SIST\ n-1\ TIM,\ 2}};$	
$I_{refl\ SIST} = I_g \cdot \rho_{SIST\ n\ TIM,\ 1};$	
- absorbit SIST n-1 TIM	$I_{abs\ SIST\ n-1\ TIM} = I_g \cdot \left(\alpha_{SIST\ n-1\ TIM,1} + \frac{\tau_{SIST\ n-1\ TIM,\ 1}}{1-\rho_{TIM\ n,1} \cdot \rho_{SIST\ n-1\ TIM,\ 2}} \cdot \rho_{TIM\ n,1} \cdot \alpha_{SIST\ n-1\ TIM,2} \right);$
- absorbit TIM n	$I_{abs\ TIM\ n} = I_g \cdot \alpha_{TIM\ n\ (SIST\ n\ TIM),1} = I_g \cdot \frac{\tau_{SIST\ n-1\ TIM,\ 1}}{1-\rho_{TIM\ n,1} \cdot \rho_{SIST\ n-1\ TIM,2}} \cdot \alpha_{TIM\ TOT\ n,1};$
- absorbit SIST n TIM	$\alpha_{SIST\ n\ TIM,\ 1} = \alpha_{SIST\ n-1\ TIM,1} + \frac{\tau_{SIST\ n-1\ TIM,\ 1}}{1-\rho_{TIM\ n,1} \cdot \rho_{SIST\ n-1\ TIM,\ 2}} \cdot (\rho_{TIM\ n,1} \cdot \alpha_{SIST\ n-1\ TIM,2} + \alpha_{TIM\ TOT\ n,1});$
	$I_{abs\ SIST\ n\ TIM} = I_g \cdot \alpha_{SIST\ n\ TIM,1};$
$\tau_{SIST\ n\ TIM,\ 1} = \frac{\tau_{SIST\ n-1\ TIM,\ 1} \cdot \tau_{TIM\ TOT\ n,1}}{1-\rho_{TIM\ n,1} \cdot \rho_{SIST\ n-1\ TIM,2}};$	
$I_{trans\ SIST\ n\ TIM,1} = I_g \cdot \tau_{SIST\ n\ TIM,\ 1};$	

Activitatea 1.12 se desfășoară pe parcursul anului 2025 și în anul 2026. Pe durata anului 2025 s-a elaborat aparatul matematic și programe/rutine MATLAB pentru modelarea elementelor vitrate – luminoare și/sau ferestre cu configurațiile descrise în tab. 1.12.1, reprezentând 40 % din totalul activității științifice.

NOTAȚII					
A	coeficient absorbție radiație, [-];	i	entalpie, [J/kg, kJ/kg];		
A	arie integrală;	I	intensitate radiație solară, [W/m ²]		
a	difuzivitate termică, [m ² /s];	IAQ	calitatea aerului interior, Indoor Air Quality;		
a ₁	factor corecție în funcție de starea atmosferei, [-];	IR	radiație infraroșie;		
a ₂	factor corecție în funcție altitudine, [-];	k	coeficient global de transfer termic, [W];		
a.c.c.	apă caldă de consum;	l	căldura latentă, [J/kg, kJ/kg];		
Ad	suprafața DuBois [m ²]	l	lungime, [m];		
AM	coeficientul masei de aer, Air Mass;	m	Coeficient de acumulare a fluxului radiant, [-];		
BB	corp absolut negru, Black Body;	M _{a,um}	masa totală a aerului umed, [kg];		
BIPVT	sistem termic fotovoltaic integrat în clădiri, Building Integrated Photovoltaic Thermal System	$\dot{m}$	debit masic, [kg/s];		
BR	baterie de răcire;	met	nivelul de activitate metabolică a ocupanților, [met];		
c	coeficient conversie putere electrică în flux termic, [-]	MPPT	Maximum Power Point Tracker;		
c ₁ c ₂	coeficient de calitate și ecranare a ferestrei, [-];	PCM	materiale cu schimbare de fază, Phase Change Material;		
c ₃	raportul dintre aria geamului și aria ferestrei, [-];	PM	probă martor;		
c, c _p	căldură specifică, [J/kg·K];	REC	recuperator din plăci plane;		
CdTe	telură de cadmiu;	RQ	coeficientul de respirație, [%]		
CFD	modelare cu element finit, Computational Fluid Dynamics;	Pr	criteriul Prandtl, [-];		
Co	constanta de radiație a corpului absolut negru, [W/m ² ·K ⁴];	PV	sticlă fotovoltaică;		
CO _{2,i/e}	cantitatea de CO ₂ introdusă (i)/ieșită (e), din încăpere [ppm];	Q	cantitate de căldură, [J, kJ];		
CP	clasă precizie;	$\dot{Q}$	flux termic, [W];		
CTA	centrală de tratare a aerului;	$\dot{q}$			
D	diametru, [m, mm];	S	suprafață, [m ²];		
DL	datalogger;	t, T	temperatură, [°C], [K];		
DSC	calorimetru Differential Scanning Calorimetry;	THM	calorimetru Temperature History Method;		
EV	electroventil;	TMY	anul climatic standard, Typical Meteorological Year;		
g	acelerația gravitațională, [m/s ²];	V	volum, [m ³];		
Gp	degajarea de CO ₂ per persoană, [g/h];	VCV	ventiloconvector;		
GN	glob negru;	$\dot{V}$	debit volumic, [m ³ /s, m ³ /h];		
Gr	criteriul Grasshoff, [-];	x	axa absciselor;		
HVAC	încălzire, ventilare climatizare/condiționare aer - Heating, Ventilation and Air Conditioning;	x	conținut umiditate, [kg vap/kg aer uscat];		
NOTAȚII LITERE GRECEȘTI					
α	coeficient transfer termic, [W/m ² ·K];	θ	unghiul de incidență a razelor solare, [°, rad];		
β	coeficient dilatare volumică, [K ⁻¹];	λ	coeficient conductibilitate termică, [W/m·K];		
γ_t	unghi înclinare, [°, rad];	λ	lungime de undă, [nm];		
δ	grosime, [m];	ν	vâscozitate cinematică, [m ² /s];		
ε	emisivitate, [-];	ρ	densitate, [kg/m ³];		
ε	raport termo-umiditate, [kJ/kg vap];	τ	timp, [s, h], moment;		
η	randament termic, [-, %];	$\Delta\tau$	interval timp, [s, h];		
η	coeficient de amortizare a oscilațiilor, [-];	ϕ	umiditate relativă, [%];		
INDICI					
a	aer, ambiant;	FE	ferestre;	met	metabolism;
ap	aer proaspăt;	f.l	fază lichidă;	R	radiație;
apa	apă răcire;	fin	final;	s	însorit;
aer	aer;	gl	global;	sol	solidificare;
as	aspirat;	int	interior;	st	strat;
b	barometric;	il	iluminat;	St	sticlă;
C	convecție;	in	inițial;	Top	topire;
cer	cer;	inv	învecinat;	u	util;
CH	chiller;	N	plan normal;	um	umed;
CON	construcție;	N	noapte;	us	uscat;
dif	difuz;	p	persoană;	ut	utilaje;
DIR	direct;	PE	pereți/planșee exterioare;	tub	
e	exterior;	PI	pereți/planșee interioare;	vap	vapori apă;
el	electric;	r	punct rouă;	Z	Zi;
ech	echivalent;	ref	referință;	'	intrare;
ef	efectiv	max	maxim;	"	ieșire;
ev	aer evacuat;	med	mediu;		

Rezumat executiv al activităților realizate, perioada etapa 1:	Grad realizare
Activitatea 1.1: Proiectare și optimizare CFD a luminatorului experimental BIPVT; Participanți: UTCN (coordonator) și INTELTERM CONSULTING S.R.L. (partener)	100%
Activitatea 1.2: Proiectarea simulatorului solar; Participanți: UTCN (coordonator) și INTELTERM CONSULTING S.R.L. (partener)	100%
Activitatea 1.3: Proiectarea calorimetrului THM; Participanți: UTCN (coordonator) și INTELTERM CONSULTING S.R.L. (partener)	100%
Activitatea 1.4: Criterii selecție PCM bazate pe datele climatice; Participanți: UTCN (coordonator)	100%
Activitatea 1.5: Definirea exigențelor IAQ și metodologia de proiectare HVAC; Participanți: UTCN (coordonator)	100%
Activitatea 1.6: Execuția și testarea calorimetrului THM; Participanți: UTCN (coordonator) și INTELTERM CONSULTING S.R.L. (partener)	100%
Activitatea 1.7: Execuția standului experimental demonstrativ - luminator BIPVT; Participanți: UTCN (coordonator) și INTELTERM CONSULTING S.R.L. (partener)	100%
Activitatea 1.8: Execuția și testarea simulatorului solar; Participanți: UTCN (coordonator) și INTELTERM CONSULTING S.R.L. (partener)	100%
Activitatea 1.9: Măsurători calorimetrice DSC; Participanți: UTCN (coordonator)	100%
Activitatea 1.10: Măsurători calorimetrice THM; Participanți: UTCN (coordonator)	100%
Activitatea 1.11: Elaborare software MATLAB pentru simularea comportamentului termic al clădirii dotate cu sistem HVAC; Participanți: UTCN (coordonator)	100%
Activitatea 1.12: Elaborare program de simulare MATLAB pentru luminatorul BIPVT; Participanți: UTCN (coordonator)	40%*

*Activitatea 1.12 are ca durată etapa 1 (2025) și etapa 2 (2026). Până în prezent s-au realizat 40 % din livrabile conform estimări inițiale de derulare a proiectului.

Livrabile perioada etapa 1:	Grad realizare
WP1: 1. Proiect tehnic luminator BIPVT (1 buc); 2. Proiect tehnic simulator solar (1 buc); 3. Proiect tehnic THM (1 buc)	WP 1 → 3 buc/100%
WP2: 1. Hardware stand demo. luminator BIPVT (1 buc); 2. Hardware stand simulator solar (1 buc); 3. Hardware stand THM (1 buc)	WP 2 → 3 buc/100%
WP3: 1. Software și raport selecție PCM (1 buc); 2. Raport măsurători DSC (1 buc); 3. Raport măsurători THM (1 buc)	WP 3 → 3 buc/100%
WP4: 1. Raport exigențe IAQ și scheme tratare aer (1 buc); 2. Software simulare sistem HVAC (1 buc) 3. Software simulare luminator BIPVT (realizat 40%)	WP 4 → 2 buc/100%

Publicații:	
Articol WOS cu factor de impact: R. Calotă; O. Pop; C. Croitoru; F. Bode; C. Berville; E. Ovadiuc, Performance analysis of solar collectors with nano-enhanced phase change materials during transitional periods between cold and warm seasons in the continental temperate climates, Journal of Energy Storage, 114 (2025) 115659. doi:10.1016/j.est.2025.115659	1 buc
Articol acceptat la conferința internațională: 2026 12th International Conference on Environment and Renewable Energy February 28-March 2, 2026 Nha Trang, Vietnam, lucrare: CFD modeling of a semi-transparent PV-PCM façade window with embedded water cooling , autori: Florin Bode, Octavian Pop	1 buc

Referințe

Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. și Dewitt D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition ed., John Wiley & Sons, United States of America, ISBN 13 978-0470-50197-9, 2011.

Dong Li, Yangyang Wu, Changyu Liu, Guojun Zhang și Müslüm Arıcı, Numerical investigation of thermal and optical performance of window units filled with nanoparticle enhanced PCM, International Journal of Heat and Mass Transfer, 125 (2018) 1321-1332. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.152

Kuehn T.H., Ramsey J.W. și Threlkeld J.L., Thermal Environmental Engineering, Third Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, ISBN 0-13-917220-3, 1998.

Tang H., Yu J., Geng Y., Wang Z., Liu X., Huang Z. și Lin B., Unlocking ventilation flexibility of large airport terminals through an optimal CO₂-based demand-controlled ventilation strategy, Building and Environment 244 (2023) 110808, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110808>

Zhang Yinping, Jiang Yi și Jiang Yi, A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 201-205.