



UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
ACADEMIA OAMENILOR DE ȘTIINȚA DIN ROMANIA



COMPETIȚIA DE PROIECTE DE CERCETARE A ACADEMIEI
OAMENILOR DE ȘTIINȚĂ DIN ROMÂNIA DESTINATĂ TINERILOR
CERCETĂTORI „AOȘR-TEAMS-III” EDIȚIA 2024-2025 –
„TRANSFORMAREA DIGITALĂ ÎN ȘTIINȚE”

*INVESTIGAREA PERFORMANȚELOR UNUI SISTEM DE POMPĂ DE
CĂLDURĂ CUPLATĂ LA SOL CU REGENERARE ÎN DIFERITE CONFIGURAȚII
ȘI MODURI DE FUNCȚIONARE*

RAPORT 3

Domeniul științific: ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Echipa:
As. dr. ing. Alexandru DORCA
drd. ing. Matei MIRZA

- 15 Iulie 2025 -



OBIECTIVE

Raport 1

Obiectivele specifice care stau la baza îndeplinirii obiectivului general propus a fi realizat prin intermediul proiectului sunt:

- **O1** - Analiza lucrărilor din literatură de specialitate ce au la bază regenerarea și stocarea energiei în sol, precum și studierea metodei diferențelor finite Crank-Nicolson necesare la rezolvarea modelului de transfer termic tranzitoriu.

Raport 2

- **O2** – Dezvoltarea și îmbunătățirea standului experimental realizat în cadrul tezei de doctorat prin suplimentarea cu un rezervor de acumulare a agentului termic și panouri PVT.

Raport 3

- **O3** - Elaborarea unui model de simulare numerică a transferului căldurii în schimbătorul din sol în regim tranzitoriu.

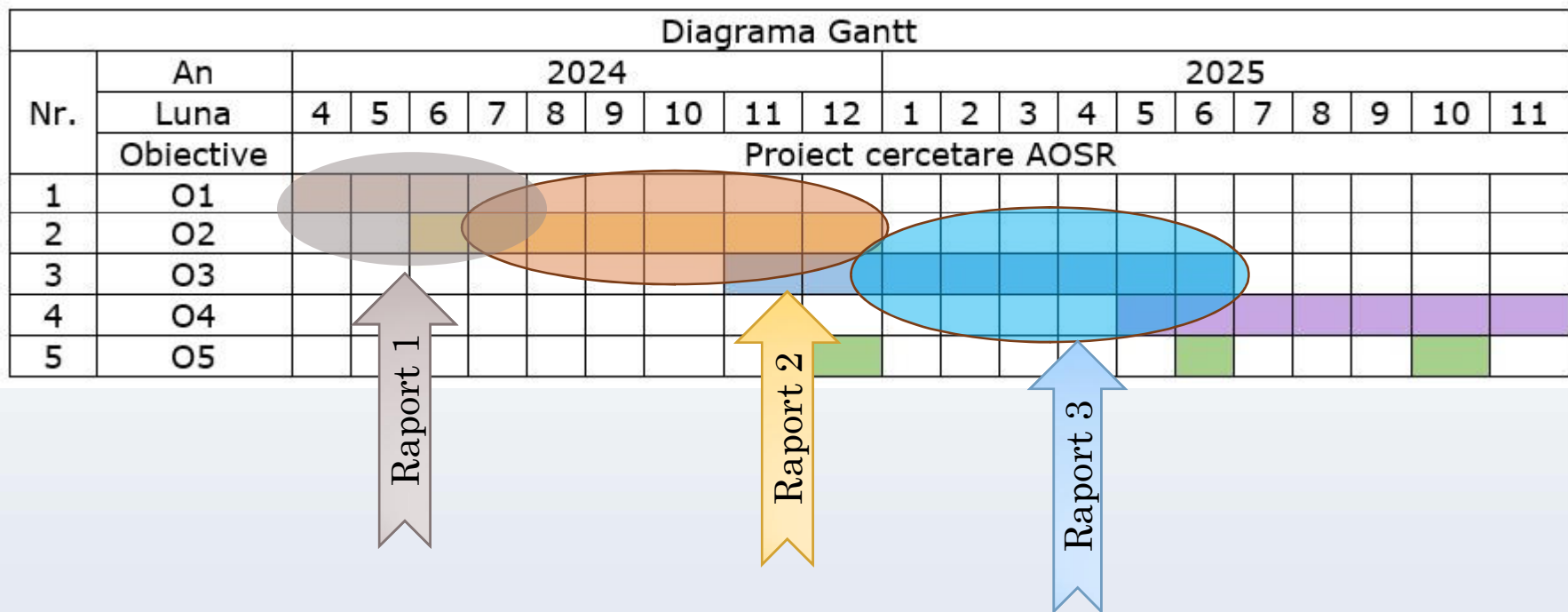
- **O4** – Analiza rezultatelor obținute prin testare experimentală și simulare numerică precum și a celor obținute cu modelul de transfer termic tranzitoriu în schimbătorul din sol.

- **O5** – Diseminarea rezultatelor în cadrul conferințelor și publicațiilor științifice de largă circulație internațională.



DIAGRAMA GANTT

Reprezintă o propunere a etapelor de implementare a proiectului până la finalizarea activităților





METODOLOGIA

În proiect vor fi desfășurate activități grupate în 4 pachete de lucru, care se vor realiza pe parcursul a 20 de luni:

- Managementul proiectului, realizat pe toată durata sa.
- Dezvoltarea standului experimental, care presupune proiectarea, construcția și testarea instalației.
- Realizarea măsurărilor, efectuarea simulărilor numerice ale performanțelor sistemului de PC cuplată la sol (PCCS) și validarea acestora, precum și dezvoltarea modelului matematic de transfer termic tranzitoriu în schimbător împreună cu validarea experimentală a acestuia.
- Stadiul final, colectarea rezultatelor, interpretarea și discutarea acestora și diseminarea prin conferințe și reviste cotate în baza de date Web of Science.

Raport 3

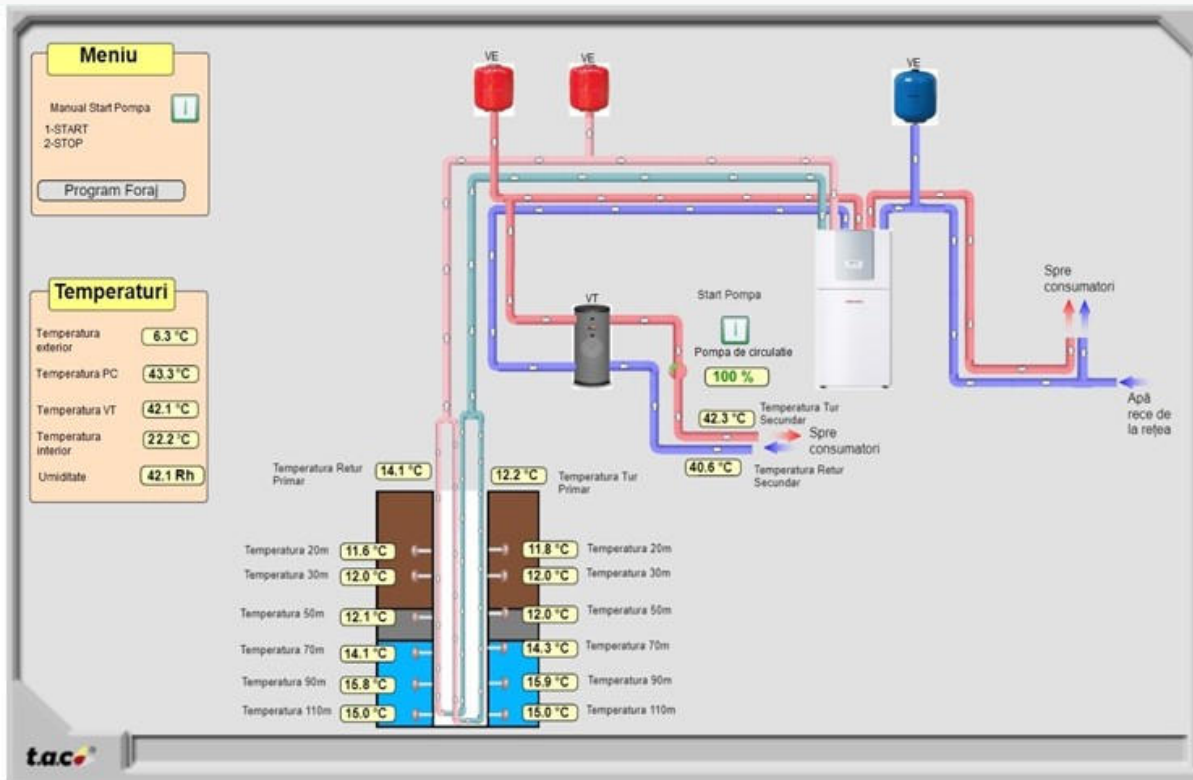


DEZVOLTAREA STANDULUI EXPERIMENTAL



Sistemul de achiziție a datelor

Platforma digitală folosită pentru vizualizarea măsurătorilor, care oferă informații utile pentru gestionarea și optimizarea eficienței energetice a clădirilor.



Sistemul de achiziție de date:

- temperatura aerului interior și exterior
- temperatura punctului de roua
- temperatura de tur/retur pe circuitul secundar
- temperatura sursei de caldura
- temperatura solului pe întreaga adâncime a sondei verticale
- umiditatea relativa a aerului

Fig. Interfața sistemului de achiziție a datelor



DEZVOLTAREA STANDULUI EXPERIMENTAL



Sistemul de achiziție a datelor

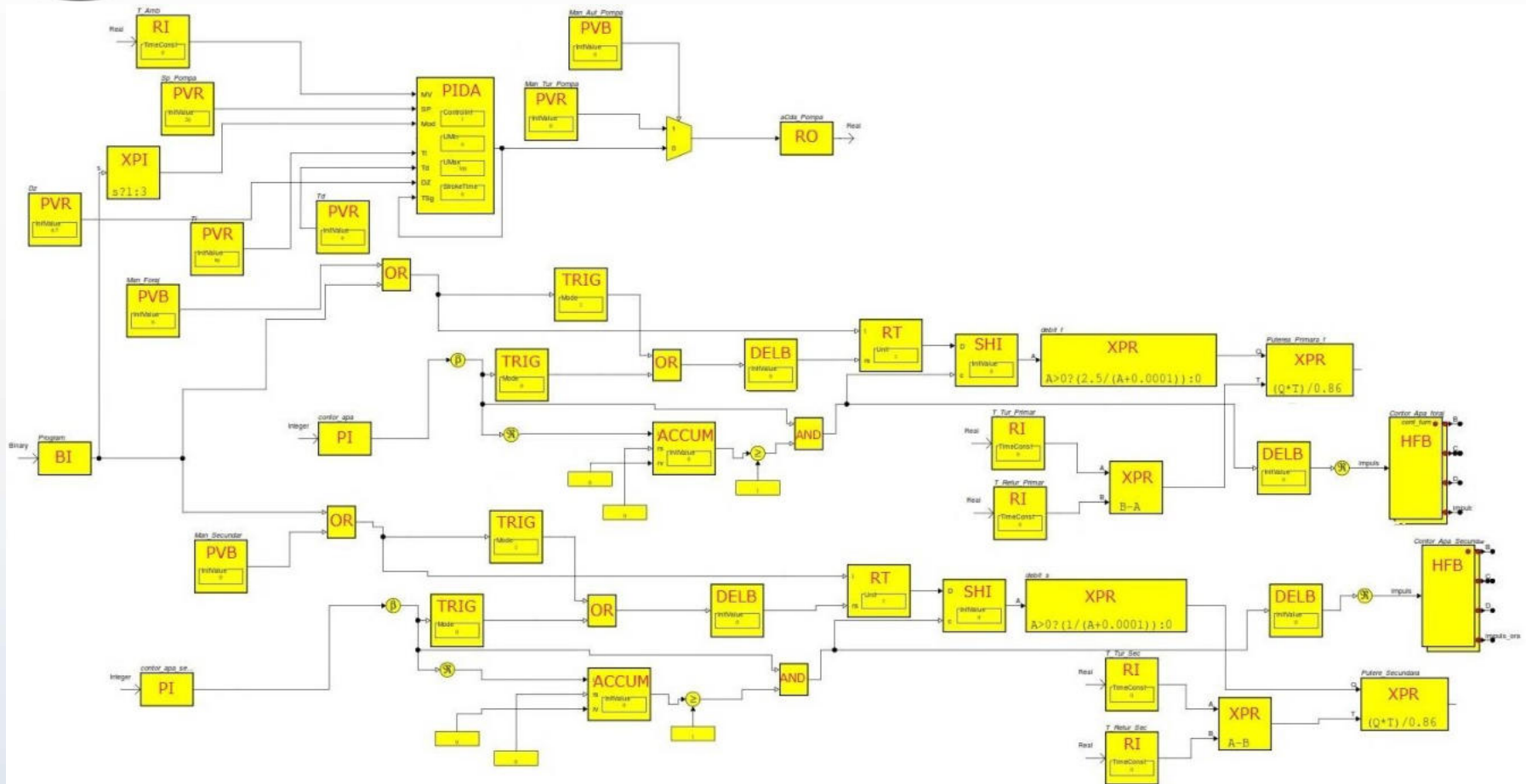


Fig. 5.14. Schema logică a automatizării



ELABORAREA MODELULUI MATEMATIC

Model de simulare numerica a transferului caldurii in SCS vertical in regim tranzitoriu

De ce este necesar modelul matematic?

✓ Simulează fenomene reale

- Transfer termic tridimensional în sol
- Integrează proprietăți fizice și condiții de operare

✓ Optimizare tehnică și energetică

- Alege dimensiuni și parametri optimi
- Reduce pierderile și crește eficiența sistemului

✓ Predicții pe termen lung

- Comportamentul sistemului după luni/ani
- Sustenabilitate și eficiență energetică

✓ Reduce costurile experimentale

- Evită testări fizice costisitoare
- Permite testarea virtuală a mai multor scenarii

✓ Sprijină luarea deciziilor

- Instrument util pentru proiectare, cercetare și exploatare
- Integrare ușoară în MATLAB și alte softuri

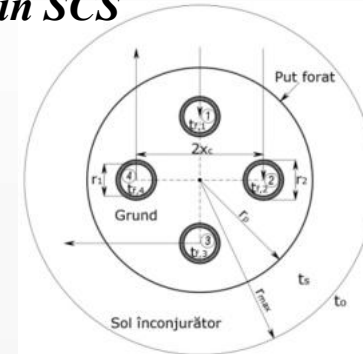


Fig. Parametrii geometrici ai puțului forat și configurația SCS cu tub U dublu

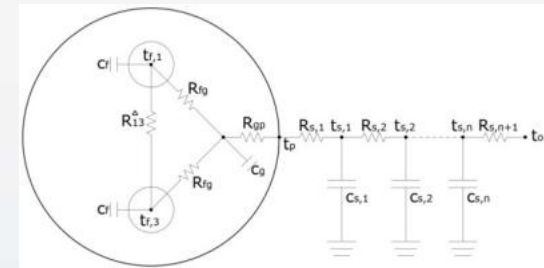


Fig. Analogia electrica a circuitului termic corespunzator sondei cu tub U simplu

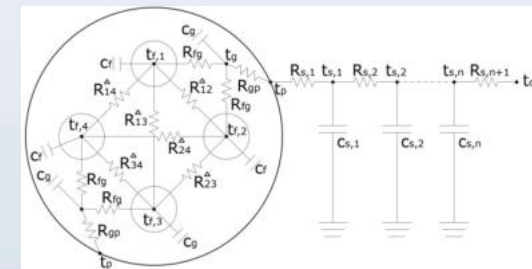


Fig. Analogia electrica a circuitului termic corespunzator sondei cu tub U dublu



ELABORAREA MODELULUI MATEMATIC



Model de simulare numerica a transferului caldurii in SCS vertical in regim tranzitoriu

Ipoteze simplificatoare pentru formularea modelului numeric:

- Proprietățile termice și fizice ale solului sunt constante.
- Grundul și solul din jurul forajului sunt omogene.
- Efectul debitului de apă subterana și rezistența de contact se neglijează.
- Temperatura solului neperturbat este presupusă constantă.
- Rezistența termică convectivă a fluidului și rezistențele de conducție ale grosimii peretelui tubului s-au considerat a fi egale în ambele tuburi U.

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{\Delta\tau}{2} \left(\frac{1}{M_f c_f R_{13}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{23}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{34}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{f9} / \Delta Z} + \frac{m_f}{M_f} \right) \right] t_{f3,j}^{j+1} - \frac{\Delta\tau \times m_f}{2M_f} t_{f3,j+1}^{j+1} \\ & = \left[1 - \frac{\Delta\tau}{2} \left(\frac{1}{M_f c_f R_{13}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{23}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{34}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{f9} / \Delta Z} + \frac{m_f}{M_f} \right) \right] t_{f3,j}^j + \frac{\Delta\tau \times m_f}{2M_f} t_{f3,j+1}^j \quad (3.28) \\ & + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{13}^\Delta / \Delta Z} t_{f1,j}^j + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{23}^\Delta / \Delta Z} t_{f2,j}^j + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{34}^\Delta / \Delta Z} t_{f4,j}^j + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{f9} / \Delta Z} t_{g,j}^j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\Delta\tau \times m_f}{2M_f} t_{f2,j-1}^{j+1} + \left[1 + \frac{\Delta\tau}{2} \left(\frac{1}{M_f c_f R_{12}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{23}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{24}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{f9} / \Delta Z} + \frac{m_f}{M_f} \right) \right] t_{f2,j}^{j+1} \\ & = \frac{\Delta\tau \times m_f}{2M_f} t_{f2,j-1}^j + \left[1 - \frac{\Delta\tau}{2} \left(\frac{1}{M_f c_f R_{12}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{23}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{24}^\Delta / \Delta Z} + \frac{1}{M_f c_f R_{f9} / \Delta Z} + \frac{m_f}{M_f} \right) \right] t_{f2,j}^j \quad (3.29) \\ & + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{12}^\Delta / \Delta Z} t_{f3,j}^j + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{23}^\Delta / \Delta Z} t_{f3,j}^j + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{24}^\Delta / \Delta Z} t_{f4,j}^j + \frac{\Delta\tau}{M_f c_f R_{f9} / \Delta Z} t_{g,j}^j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\Delta\tau}{2M_{s,k} c_s R_{s,k} / \Delta Z} t_{s,(l,k-1)}^{j+1} + \left[1 + \frac{\Delta\tau}{2} \left(\frac{1}{M_{s,k} c_s R_{s,k} / \Delta Z} + \frac{1}{M_{s,k} c_s R_{s,k+1} / \Delta Z} \right) \right] t_{s,(l,k)}^{j+1} \\ & - \frac{\Delta\tau}{2M_{s,k} c_s R_{s,k+1} / \Delta Z} t_{s,(l,k+1)}^{j+1} = \frac{\Delta\tau}{2M_{s,k} c_s R_{s,k} / \Delta Z} t_{s,(l,k-1)}^j \\ & + \left[1 - \frac{\Delta\tau}{2} \left(\frac{1}{M_{s,k} c_s R_{s,k} / \Delta Z} + \frac{1}{M_{s,k} c_s R_{s,k+1} / \Delta Z} \right) \right] t_{s,(l,k)}^j + \frac{\Delta\tau}{2M_{s,k} c_s R_{s,k+1} / \Delta Z} t_{s,(l,k+1)}^j \quad (3.32) \\ & (j = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

Similar, ecuațiile Crank-Nicolson pentru nodul de fluid din tubul de retur și nodul de grund sunt date de relațiile:

Transferul de caldura în afara puțului variaza în direcție axială și radială:

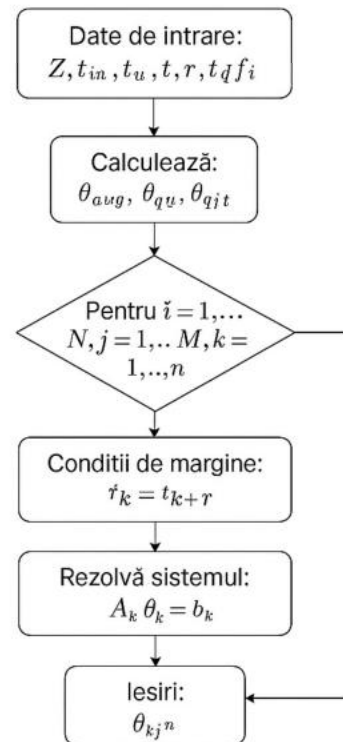


ELABORAREA MODELULUI MATEMATIC

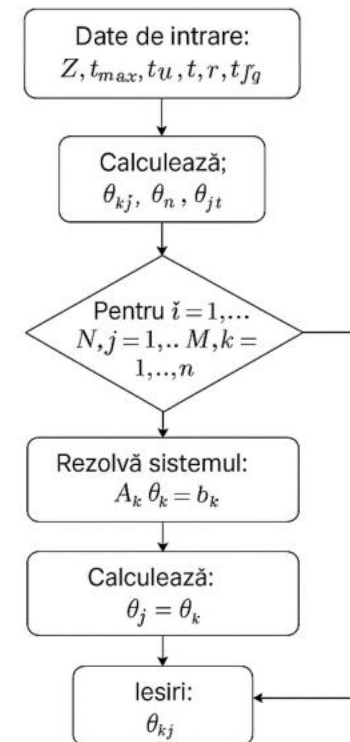


În figura sunt ilustrate două scheme logice care descriu procesul de simulare numerică a injectării și extracției căldurii bazat pe tub U simplu. Aceste modele sunt implementate în MATLAB și urmăresc evoluția temperaturii în timp și spațiu, printr-o abordare discretizată pe trei dimensiuni: radială, axială și temporală.

Schema logică injectarea căldurii



Schema logică extracția căldurii





REZULTATELE CERCETARII

Explorarea performanțelor PCCS experimentale cu regenerare sezonieră pentru încălzire

Măsurătorile experimentale au fost efectuate pentru două configurații ale SCS:
(1) – SCS cu tub U dublu; (2) – SCS cu tub U simplu.

încălzire:

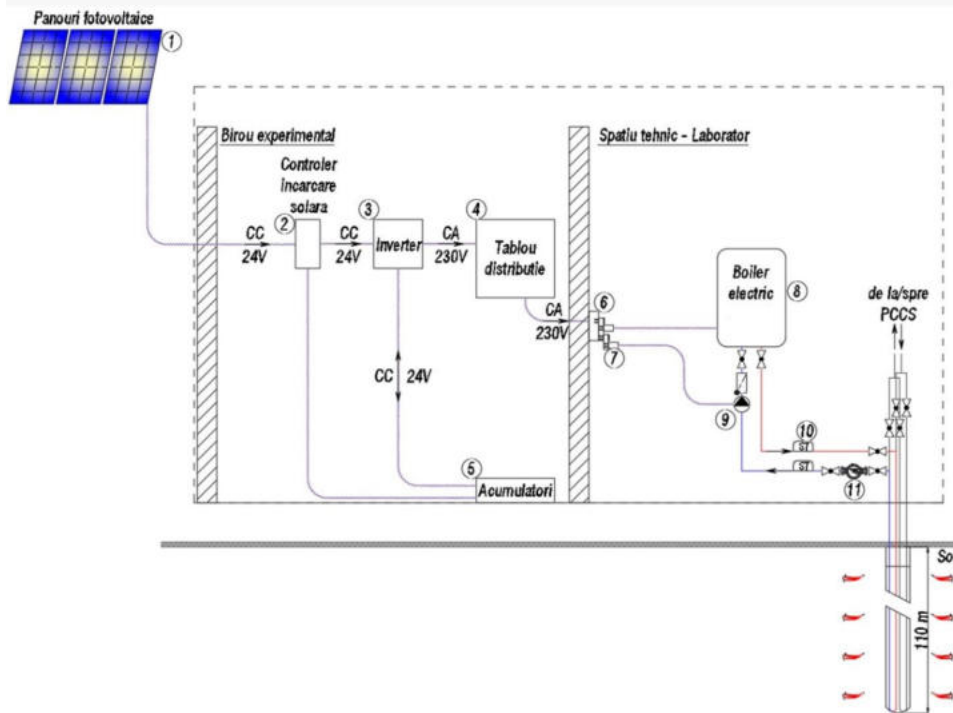
- durata: 1 luna pentru fiecare din cele două configurații.
- t_i setata = 22 °C,
- t_e a variat între -4 și 3°C.



REZULTATELE CERCETARII

Explorarea performanțelor PCCS experimentale cu regenerare sezonieră pentru încălzire

Se injectează energia termică provenită de la un boiler electric, alimentat electric de 6 la PV, în SCS vertical al PCCS, înainte de a extrage căldura din puțul forat.



Căldura este transferată în sol printr-un SCS într-un foraj cu diametrul de 180 mm și adâncimea de 110 m.

Sistemul de producere a fluidului termic pentru injecție:

- un boiler electric
- o rezistență electrică de 1500 W la 230 V
- un sistem de 6 panouri PV înseriate cu puterea totală de 1,5 kW, orientate către Sud cu o înclinație de 35°.

Fig. Schema instalației de injecție a căldurii în sol.



REZULTATELE CERCETARII

Explorarea performanțelor PCCS experimentale cu regenerare sezonieră pentru încălzire

Cantitatea extrasă poate fi mai mare sau mai mică decât caldura injectată în sol, după cum sistemul PCCS este situat în regiuni dominate de încălzire sau răcire.

Dezechilibrul termic al solului în PCCS poate apărea pe termen scurt sau lung de funcționare, în funcție de mai mulți factori. Pentru măsurarea factorului de dezechilibru termic al solului se utilizează în mod obișnuit raportul de dezechilibru termic

Raportul de dezechilibru termic:

$$RDT = \frac{Q_{ext} - Q_{inj}}{\max(Q_{ext}, Q_{inj})} < \text{cu at\^at echilibrul termic al solului rezultat este mai bun}$$

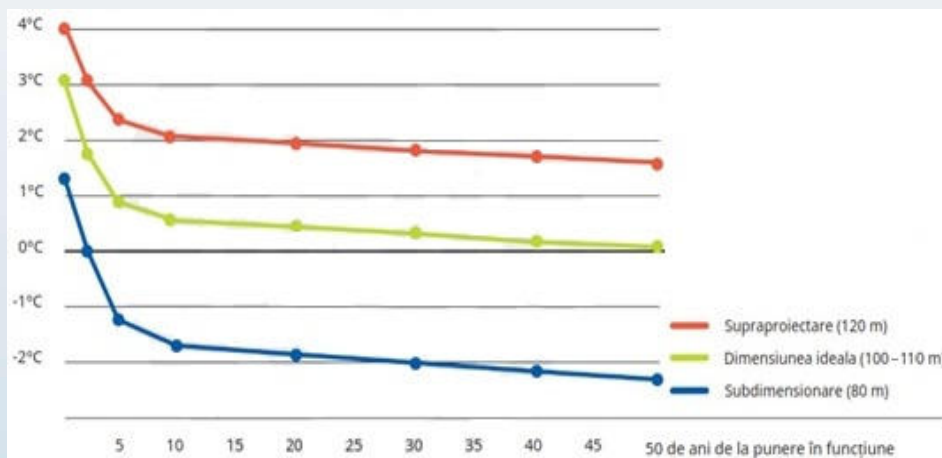


Fig. Evoluția temperaturilor din forajele geotermale cu sonde



REZULTATELE CERCETARII

Explorarea performanțelor PCCS experimentale cu regenerare sezonieră pentru încălzire

Fluidul termic injectat a fost introdus la 32°C, consumând 1129,7 kWh energie electrica de PV și s-a injectat în sol 1694,5 kWh energie termica în sezonul de vara

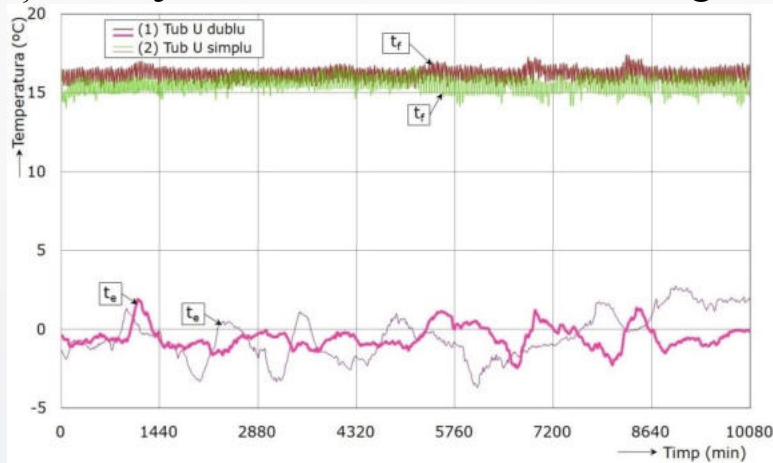


Fig. Variația temperaturii aerului exterior și a fluidului de lucru înainte de injecția caldurii

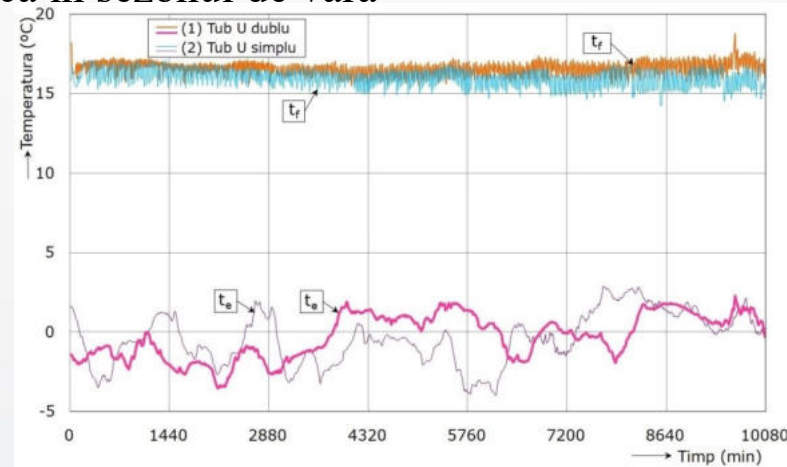


Fig. Variația temperaturii aerului exterior și a fluidului de lucru după injecția caldurii

Tabelul 5.8 Performanțele sistemului PCCS la încălzire înainte și după injecția căldurii în sol

Configurația SCS	t_i (oC)	t_e (oC)	t_f (oC)	E_t (kWh)	E_{el} (kWh)	COP_{sist} (-)	M_{CO_2} (kg)
Înainte de injecția căldurii							
(1) Tub U dublu	22,28	-0,52	16,21	53,49	11,04	4,84	3,30
(2) Tub U simplu	22,25	-0,47	15,56	53,28	11,51	4,63	3,44
După injecția căldurii							
(1) Tub U dublu	22,32	-0,27	16,60	54,86	10,63	5,16	3,18
(2) Tub U simplu	22,26	-0,42	15,93	54,41	11,37	4,79	3,40

Pentru $Q_{inj} = 1694,5$ kWh și $Q_{ext} = 1790,4$ kWh, s-a obținut valoarea 0,054 pentru raportul RDT, care arata ca echilibrul termic al solului este suficient de bun, iar performanța poate fi pastrata aproximativ constanta.



REZULTATELE CERCETARII

Simularea numerică a performanțelor PCCS fără și cu regenerare continuă prin panouri PV/T pentru încălzire și ACC utilizând programul Polysun

Panourile fotovoltaice-termice (PV/T) combină un colector solar termic și un modul fotovoltaic într-o singură componentă, generând simultan energie electrică și căldură.

Rezultatele unui studiu teoretic comparativ și a unor investigații experimentale privind performanțele unui sistem hibrid PCCS-PV/T cu regenerare prin PV/T și ale unui sistem convențional PCCS, integrate în sistemul de încălzire și producere a ACC atât pentru biroul experimental cât și pentru o clădire unifamilială.

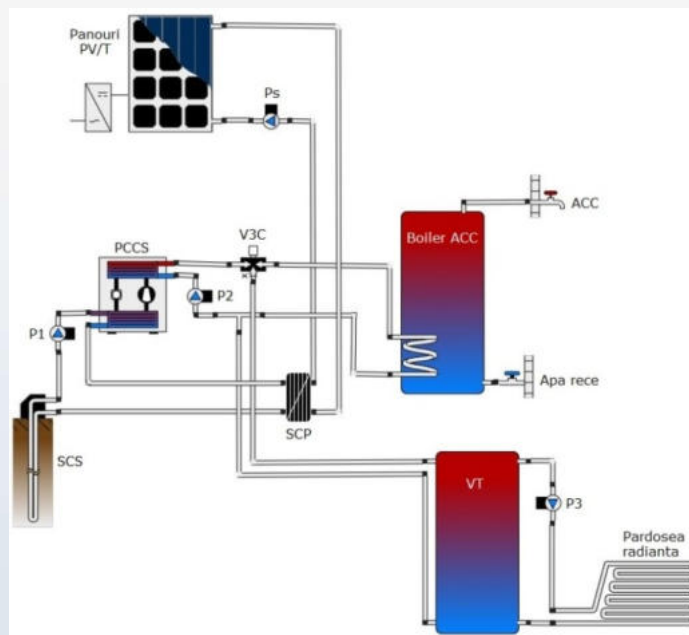


Fig. Configurația sistemului hibrid PCCS-PV/T pentru simularea cu programul Polysun



REZULTATELE CERCETARII

Simularea numerică a performanțelor PCCS fără și cu regenerare continuă prin panouri PV/T pentru încălzire și ACC utilizând programul Polysun

Date intrare:

- suprafața încălzită = 21,8 m²
- necesarul de energie termică încălzire = 2,6 kWh/(m²an)
- necesarul de energie termică ACC = 7 kWh/(m²an)
- Temperatura setată a aerului interior este de 22 °C.
- Circuitul solar cuprinde 3 panouri PV/T cu suprafața de 4,8 m² și puterea nominală totală de 0,68 kW.

Performanțele PCCS interconectate cu panouri PV/T obținute prin simulare și monitorizare în modul de încălzire-ACC

Valoare	E_t (kWh)	$E_{el,pv}$ (kWh)	E_{pc} (kWh)	FPS _{pc} (-)	Reducerea emisiei de CO ₂ (kg)
Simulată	209	54	49	4,26	14,65
Măsurată	214	57	50	4,28	14,95
Eroarea relativă e_r (%)	2,4	5,6	2,0	0,5	2,0

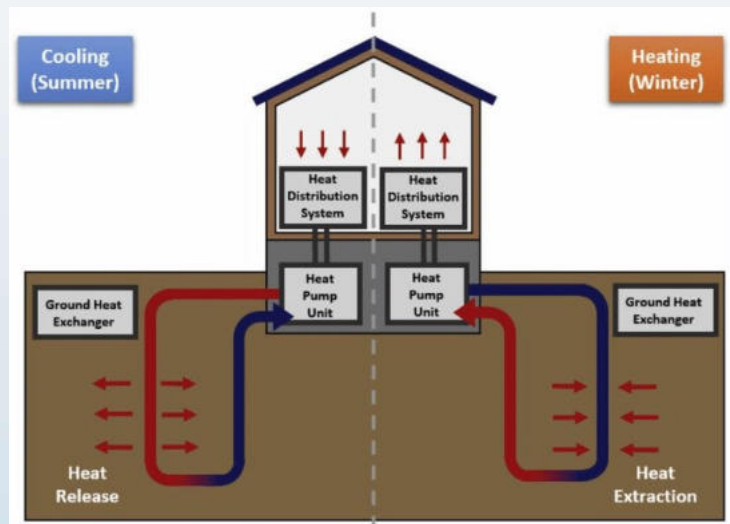
Pentru fracțiunea energiei regenerabile (FER) s-a obținut valoarea 0,42, unde $E_{PC} = 49$ kWh, $E_p = 73$ kWh și $E_{aux} = 6$ kWh sunt consumurile de electricitate ale PC, pompelor de circulație și respectiv utilizatorilor auxiliari. Deci, 42% din consumul total de electricitate al sistemului provine de la panourile PV/T.

Rezultatele arată că valorile simulate cu programul Polysun sunt mai mici doar cu 0,5–5,6% față de cele măsurate, astfel încât modelul de simulare numerică este validat experimental.



CONCLUZIE

- ✓ Din rezultatele experimentale se constată o creștere a temperaturii medii a fluidului de lucru cu 2,4% și o îmbunătățire a performanțelor sistemului de încălzire al biroului conectat la PCCS cu regenerare prin injectarea căldurii în sol în sezonul de vară (în configurația SCS cu tub U simplu COP_{sist} mai mare cu 3,5% și emisia de CO_2 mai mică cu 1,2%, iar în configurația SCS cu tub U dublu COP_{sist} mai mare cu 6,6% și emisia de CO_2 mai mică cu 3,8).
- ✓ După injectia căldurii în sol se înregistrează și cea mai mare creștere a COP_{sist} pentru configurația SCS cu tub U dublu față de cea cu tub U simplu, de 7,7%, precum și cea mai mare reducere a emisiei de CO_2 de 6,9%. Raportul $RDT = 0,054$ arată că echilibrul termic al solului este suficient de bun, iar performanța poate fi păstrată aproximativ constantă.
- ✓ S-a urmărit reducerea emisiilor de CO_2 în configurația cu tub U dublu față de cea cu tub U simplu înainte de injectia căldurii și după injectia căldurii.
- ✓ Consumul de energie electrică al PC și al pompelor de circulație poate fi acoperit cu electricitate regenerabilă generată de panourile PVT.





UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
ACADEMIA OAMENILOR DE ȘTIINȚA DIN ROMANIA



VA MULTUMESC PENTRU ATENȚIE !

