



**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 4

Domeniul științific: ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Echipa de implementare a proiectului:

Director: As. dr. ing. Alexandru DORCA

Membru: drd. ing. Matei MÎRZA

1. Obiective:

Obiectivul principal al proiectului vizează determinarea performanțelor energetice și de mediu ale unui sistem de pompă de căldură (PC) geotermică cu sondă verticală prin măsurări experimentale și simulări numerice și îmbunătățirea acestora prin stocarea energiei termice în sol și modelarea numerică a transferului de căldură tranzitoriu. S-a dezvoltat standul experimental folosit în cadrul tezei de doctorat, prin suplimentarea cu panouri solare fotovoltaice (PV), care să injecteze energie termică în sezonul cald pentru stocare și folosirea acestora în sezonul rece, precum și pentru producerea de electricitate care să compenseze consumul de energie electrică al PC și echipamentelor auxiliare.

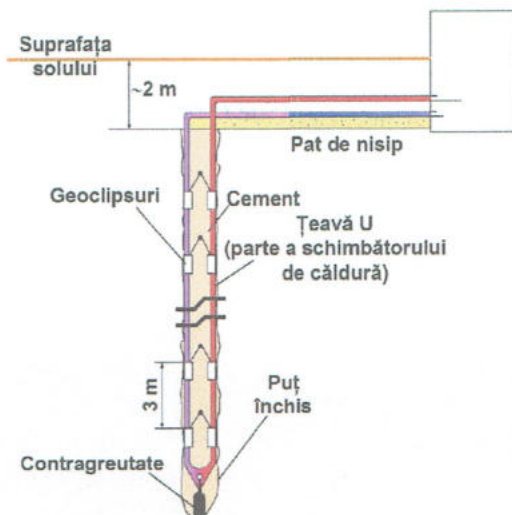


Fig. 1 Reprezentarea verticală a puțului forat

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.
- **O2** - Dezvoltarea și îmbunătățirea standului experimental realizat în cadrul tezei de doctorat prin suplimentarea cu un rezervor de acumulare a agentului termic și a panourilor PV.
- **O3** - Elaborarea unui model de simulare numerică a transferului de căldură 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 prezentată mai jos reprezintă o propunere a etapelor de implementare a proiectului până la finalizarea activităților.

		Diagrama Gantt																				
Nr.	An	2024												2025								
	Luna	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	Obiective	Proiect cercetare AOSR																				
1	O1																					
2	O2																					
3	O3																					
4	O4																					
5	O5																					

2. Metodologia, cu indicarea gradului de originalitate

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, are o pondere redusă datorită dimensiunii echipei și a duratei de implementare.
- 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.

3. Rezultatele cercetării finale

3.1 Explorarea performanțelor PCCS experimentale cu regenerare sezonieră pentru încălzire

3.1.1 Dezechilibrul termic al solului și regenerarea sezonieră a PCCS

Atunci când se utilizează un sistem PCCS pentru încălzirea (sau răcirea) unor clădiri, căldura este extrasă (sau furnizată) solului deoarece temperatura solului este mai mare decât temperatura aerului în perioadele de încălzire și mai mică în perioadele de răcire. Dacă cantitatea de căldură extrasă din pământ în perioada de încălzire nu este aceeași cu cantitatea de căldură injectată în pământ de PC în perioada de răcire, poate exista un dezechilibru termic al solului, care deteriorează performanța. Cantitatea de căldură extrasă din sol poate fi mai mare sau mai mică decât căldura injectată în sol, după cum sistemul PCCS este situat în regiuni domo-nate de încălzire sau, respectiv, de răcire.

Deci căldura se acumulează în sol în regiunile cu răcire dominantă, iar frigul se acumulează în sol în regiunile cu încălzire dominantă. Căldura sau frigul acumulate ca urmare a temperaturilor dezechilibrate ale solului au o influență substanțială asupra COP-ului PC.

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 (RDT), care este definit ca raportul dintre diferența de căldură extrasă din sol Q_{ext} și căldura injectată în sol Q_{inj} la valoarea maximă dintre cele două călduri:

$$RDT = \frac{Q_{ext} - Q_{inj}}{\max(Q_{ext}, Q_{inj})}$$

Cu cât RDT este mai mic, cu atât echilibrul termic al solului rezultat este mai bun, iar performanța poate fi păstrată constantă de-a lungul anilor.

Ceilalți factori care influențează dezechilibrul termic al solului includ caracteristicile solului, temperatura inițială a solului, conținutul de umiditate, materialul de umplere al forajului și distanța dintre puțurile forate.

Conceptul stocării sezoniere a energiei termice în sol urmărește stocarea căldurii vara pentru a o folosi în timpul iernii la încălzire, sau stocarea frigului iarna pentru a-l folosi în timpul verii pentru răcire.

Regenerarea sezonieră a PCCS, definită ca reinjectarea căldurii în sol în timpul verii, oferă o posibilitate de creștere a potențialului geotermal. Vara, fluidul de lucru cald circulă prin SCS, transferând excesul de căldură în sol pentru stocare pe termen lung. În sezonul de iarnă, căldura stocată este recuperată prin circulația inversă a fluidului de lucru și utilizată pentru încălzirea spațiilor.

Pe ansamblul teritoriului României, încălzirea consumă mai multă energie decât răcirea din cauza climatului temperat continental, ceea ce conduce la concluzia că, pe durata unui an, trebuie introdusă mai multă energie în sol decât energia extrasă.

Cuplarea sistemelor PCCS cu colectoare solare a demonstrat că stabilește echilibrul termic între căldura extrasă și injectată în sol.

3.1.2 Descrierea instalației experimentale geotermo-solare

În această lucrare se preferă să se injecteze energia termică provenită de la o rezistență electrică a unui boiler electric, acționată cu electricitate produsă de 6 panouri solare fotovoltaice (PV), în SCS (sonda din sol) vertical al PCCS conectată la circuitul de încălzire al biroului experimental, înainte de a extrage căldura din puțul forat (Fig. 5.31). Aceasta permite PCCS să poată face față dezechilibrului termic al solului în cazul unei puteri de răcire mai mică în comparație cu puterea de încălzire, cu un SPF favorabil. S-a decis să se folosească panouri PV (deși sunt mai puțin eficiente decât colectoarele solare termice) deoarece produc energie electrică foarte utilă, și nu energie termică, ceea ce este relativ mai simplu de realizat.

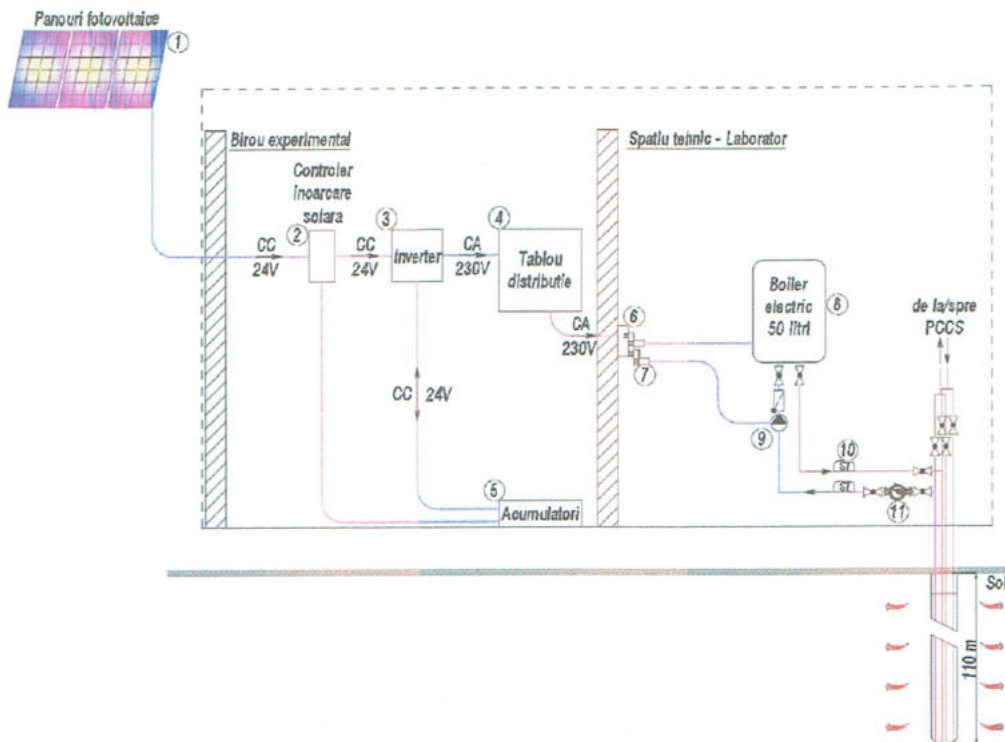


Fig. 2 Schema instalației de injecție a căldurii în sol

1-panouri PV; 2-controler încărcare baterii panouri PV; 3-inverter solar; 4-tablou distribuție; 5-acumulatori de energie electrică de la PV; 6-priză cu contor de electricitate; 7-priză programabilă; 8-boiler electric; 9-pompă de circulație apă-etilenglicol; 10-senzori de temperatură 11-contor de energie termică.

Căldura este transferată în sol printr-un flux conductiv prin intermediul unui schimbător de căldură într-un foraj cu diametrul de 180 mm și adâncimea de 110 m.

Prin SCS se pompează cu ajutorul unei pompe de circulație cu turație variabilă un fluid de transfer termic bazat pe o soluție apă-etilenglicol. Viteza de circulație prin SCS este mică pentru o descărcare cât mai eficientă. Pe tot traseul de conducte exterioare (dintre spațiul tehnic și SCS) acestea sunt izolate corespunzător pentru reducerea pierderilor de căldură.

Schimbătorul de căldura cu solului este o sonda geotermală verticală (Fig.3) amplasată în curtea Facultății de Construcții și presupune importante interacțiuni termice între zona de sol ce conține schimbătorul de căldură și zonele vecine în care există clădiri. Forajul existent, fișa de execuție și senzorii de temperatură ajută la desfășurarea proiectului de cercetare.

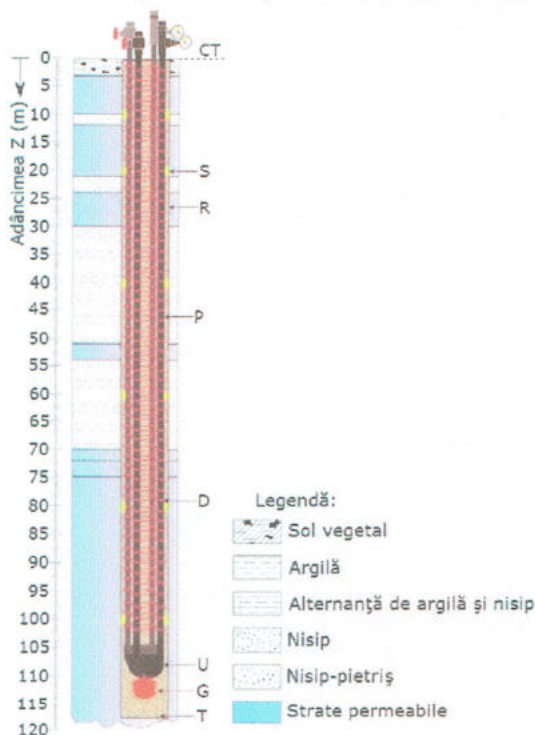


Fig. 3 Fișa de execuție a puțului forat existent
CT-cotă teren; S-senzori de temperatură; R-pietriș;
P-sondă verticală; D-distanțieri; U-piesă de racordare a
sondei în formă de U; G-greutatea sondei; T-talpa
forajului

Sistemul de achiziție a datelor

Platforma digitală EcoStruxure Building Operation, folosită pentru vizualizarea măsurătorilor, un sistem BMS, care oferă informații utile pentru gestionarea și optimizarea eficienței energetice a clădirilor.

Sistemul de achiziție de date al PCCS consta din:

- temperatura aerului interior și exterior
- temperatura punctului de roua
- temperatura de tur/retur pe circuitul secundar
- temperatura sursei de caldura (temperatura la intrarea și ieșirea din sonda verticală)
- temperatura solului pe întreaga adâncime a sondei verticale
- umiditatea relativă a aerului
- parametrii de funcționare principali ai componentelor sistemului.

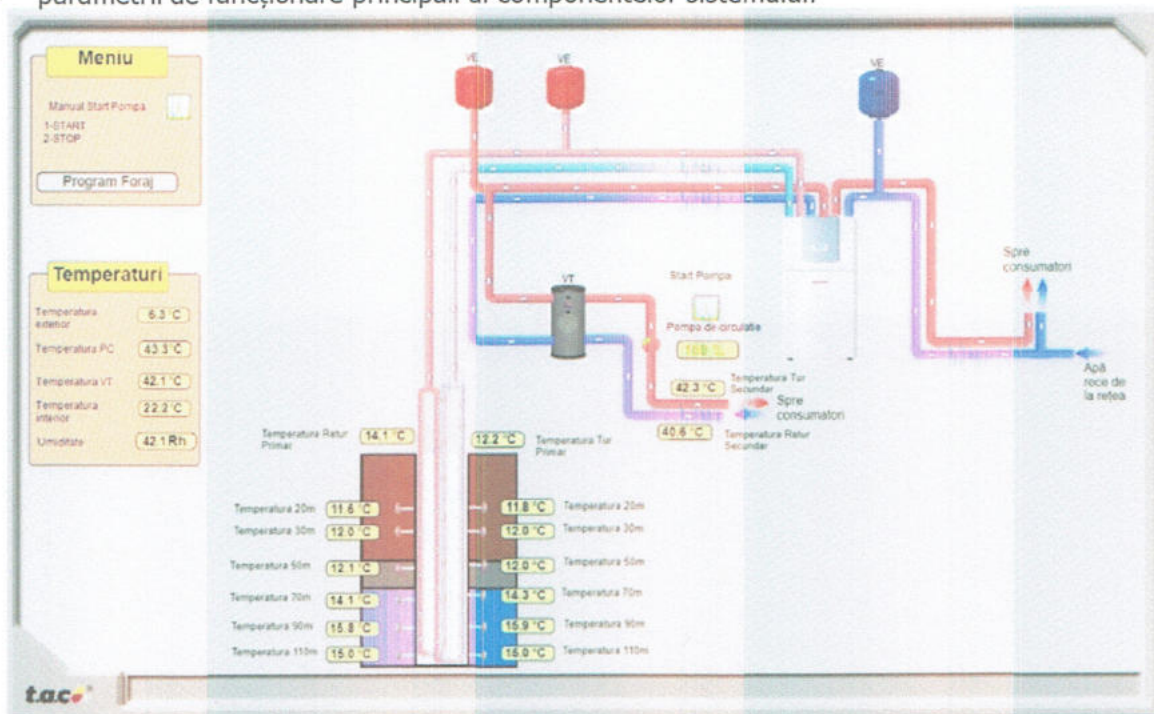


Fig. 4 Interfața sistemului de achiziție a datelor

Sistemul de producere a fluidului termic pentru injecția căldurii este compus dintr-un boiler electric cu capacitatea de 50 l, care încorporează o rezistență electrică de 1500 W la 230 V, alimentată de la un sistem de 6 panouri PV înseriate cu puterea totală de 1,5 kW, orientate către Sud cu o înclinare de 35°, ce transformă radiațiile luminoase ale soarelui, cu o anumită eficiență, în electricitate sub formă de curent continuu (CC).

Sistemul PV are în componență: panouri PV, controler încărcare solară, inverter, tablou de distribuție, acumulatori și circuit electric. Inverterul are rolul de a transforma energia produsă sub formă de CC de către panourile PV, în energie utilizabilă consumatorului, sub formă de curent alternativ (CA) la 230 V. Tabloul electric este utilizat pentru distribuția fiabilă a energiei electrice către consumatori. Acumulatorii stochează energia produsă de panourile PV pentru a fi folosită atunci când este necesar. Circuitul electric are rolul de cablare dintre panourile PV și inverter, dintre inverter și acumulatori și dintre tabloul electric și consumatori.

Pentru contorizarea electricității s-a folosit o priză cu contor de energie electrică, iar pentru determinarea cantității de căldură injectată în sol s-a montat un contor de energie termică. Ținând seama că volumul de fluid termic este mic și rezistența electrică nu poate încălzi instant întreg volumul de fluid, s-a montat o priză programabilă, care permite pompei de circulație să fie activă 30 de minute pe parcursul unei ore.

Sistemul este adaptabil la aproape orice tip de sol, fiind astfel printre cele mai cunoscute sisteme de stocare a energiei termice.

Folosind sistemul de injecție descris anterior s-a încălzit fluidul termic la 32 °C, consumând 1129,7 kWh energie electrică produsă de sistemul PV și s-a injectat în sol 1694,5 kWh energie termică în sezonul de vară, pe perioada a două luni.

3.1.3 Rezultatele experimentale

Pentru a determina performanțele (COP_{sist} și M_{CO_2}) sistemului PCCS cu regenerare sezonieră conectat la circuitul de încălzire, prin pardosea radiantă, al biroului experimental, s-au efectuat

măsurători comparative atât înainte cât și după injecția căldurii în sol pe o perioadă de câte o săptămână atât pentru configurația SCS cu tub U dublu cât și simplu.

Temperatura aerului interior a fost de 22 °C, iar temperatura aerului exterior a variat între -4,0 și 3 °C. Valorile medii lunare ale temperaturii aerului exterior în cele două perioade au fost aproape egale.

În Fig. 5 și 6 se ilustrează evoluția în timp a temperaturii aerului exterior (t_e) și a fluidului de lucru (t_f) înainte și după injecția căldurii în sol.

În Tabelul 1 se prezintă o sinteză a valorilor medii ale temperaturilor (t_i , t_e , t_f), energiei termice utile (E_t), consumului de electricitate (E_{el}), COP-ului sistemului (COP_{sist}), și emisiei de CO₂ (M_{CO_2}).

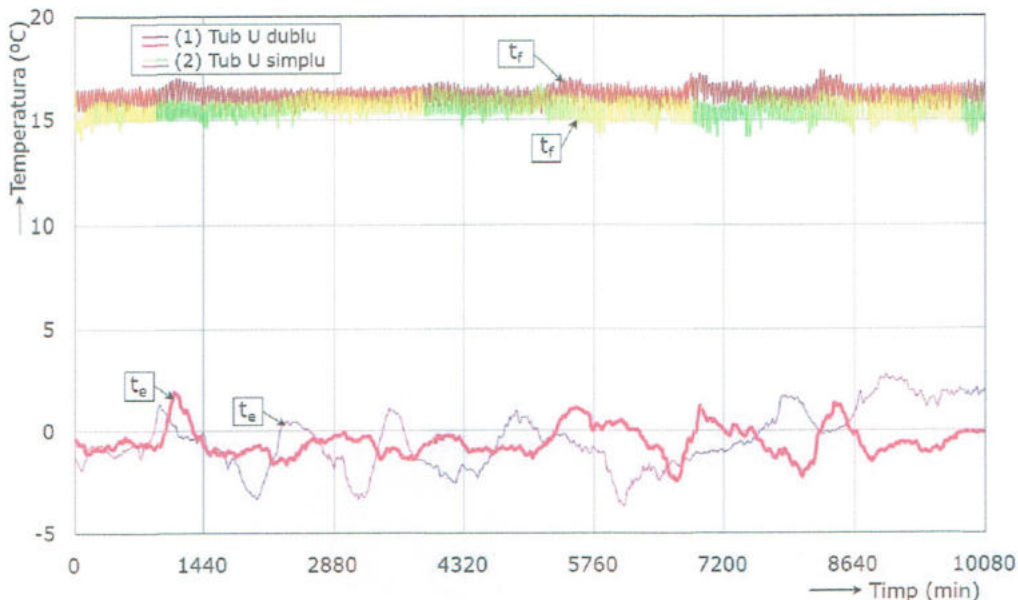


Fig. 5 Variația temperaturii aerului exterior și a fluidului de lucru înainte de injecția căldurii

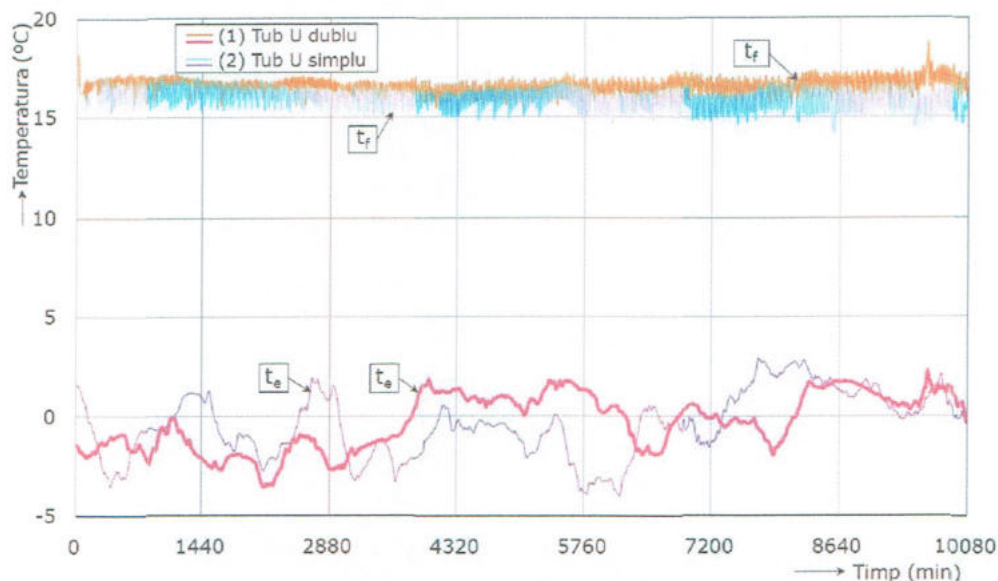


Fig. 6 Variația temperaturii aerului exterior și a fluidului de lucru după injecția căldurii

Din rezultatele experimentale se constată, pe de o parte, o creștere a COP_{sist} în configurația SCS cu tub U dublu față de cea cu tub U simplu de la 4.63 la 4.84 înainte de injecția căldurii (4.5%) și de la 4.79 la 5.16 după injecția căldurii (7.7%). În plus, se obține și o reducere a emisiei de CO₂ în configurația SCS cu tub U dublu față de cea cu tub U simplu de la 3,44 kg la 3,30 kg înainte de injecția căldurii (4,2%) și de la 3,40 kg la 3,18 kg după injecția căldurii (6,9%). Deci, performanțele PCCS cu SCS în configurație cu tub U dublu sunt superioare față de cele în configurație cu tub U simplu.

Tabelul 1 Performanțele sistemului PCCS la încălzire înainte și după injecția căldurii în sol

Configurația SCS	t_i (°C)	t_e (°C)	t_f (°C)	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

Pe de altă parte, temperatura medie a fluidului de lucru crește cu aproximativ 2,4%, iar performanțele sistemului PCCS se îmbunătățesc în cazul folosirii injecției de căldură sezonieră atât în configurația SCS cu tub U simplu cât și dublu. Astfel, valorile coeficientului de performanță (COP_{sist}) egale cu 4,79 (tub U simplu) și 5,16 (tub U dublu) sunt mai mari cu 3,5% și respectiv 6,6% față de valorile corespunzătoare obținute fără injecție de căldură. De asemenea, valorile emisiei de CO_2 de 3,40 kg (tub U simplu) și 3,18 kg (tub U dublu) sunt mai mici cu 1,2% și respectiv 3,8% față de valorile corespunzătoare obținute fără injecție de căldură.

Pentru $Q_{inj} = 1694,5$ kWh și $Q_{ext} = 1790,4$ kWh, pe baza relației s-a obținut valoarea 0,054 pentru raportul RDT, care arată că echilibrul termic al solului este suficient de bun, iar performanța poate fi păstrată aproximativ constantă.

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

3.2.1 Componentele sistemului hibrid

În sistemul hibrid PCCS-PV/T panourile PV/T sunt utilizate ca sursă suplimentară de căldură cu SCS. Configurația sistemului PCCS-PV/T utilizat la simularea numerică cu programul Polysun este ilustrată în Fig. 7.

Circuitul solar constituit dintr-un câmp de panouri PV/T tip FT225C5 orientate spre Sud cu un unghi de înclinare de 30° și o pompă de circulație solară (Ps) cu debitul de 143–954 l/h, conține un amestec fluid de propilen cu concentrația de 33,3%.

Pompa de căldură WPC 05-cool, cu compresor ermetic de tip scroll, cuplată la sol printr-un SCS vertical lung de 110 m, cu tub U dublu, care se poate transforma în tub U simplu prin sectorizare cu ajutorul robinetelor de închidere, având diametrul de 32 mm este potrivită pentru combinația în serie cu panouri PV/T și este acționată cu energie solară PV. SCS străbate un strat de argilă adânc de 50 m și altul de pietriș umed de 60 m.

Pompele de circulație P1 a sursei de căldură, de tip Wilo-TOP-S 30/7, P2 a circuitului vas tampon-ACC, de tip Wilo-TOP-S 25/5 și P3 a circuitului de încălzire, de tip Wilo-STAR-RS 25/6, au debitele 2330–2414 l/h, 2067 l/h și, respectiv 500 l/h.

Vana deviatoare cu 3 căi (V3C) transferă energia termică din condensatorul pompei de căldură la traseul de încălzire și cu prioritate în boilerul de ACC.

Schimbătorul de căldură cu plăci (SCP), cu capacitatea de transfer termic de 5000 W/K, transferă energia termică produsă de panourile PV/T la fluidul de lucru din SCS, care apoi o injectează în sol. Astfel, din energia termică necesară E_t (ex-trasă din sol) o parte $E_{t,pv}$ este produsă de panourile PV/T și injectată în sol, iar altă parte $E_{t,sol}$ este produsă direct de sol.

Sistemul de încălzire este de joasă temperatură, prin pardosea radiantă cu temperaturi nominale tur/retur de 41/36 °C. Boilerul de ACC are un volum de 150 l, va-sul tampon (VT) un volum de 100 l, iar temperatura ACC este de 45 °C.

Datele meteorologice pentru Timișoara, ale cărei latitudine și longitudine sunt 45°45' N și respectiv 21°15' E, s-au extras din baza de date Meteororm [182], astfel: temperatura medie a aerului exterior 11,5 °C, iradiația globală anuală 1298 kWh/m², iradiația difuză anuală 618 kWh/m².

Pentru a analiza performanța a diferite sisteme de PCCS prin simulare și monitorizare se utilizează factorii de performanță sezonieri FPS_{PC} , FPS_{sist} și FPS_{PC-PV} explițiți în ecuațiile (3.35), (3.36) și respectiv (3.40).

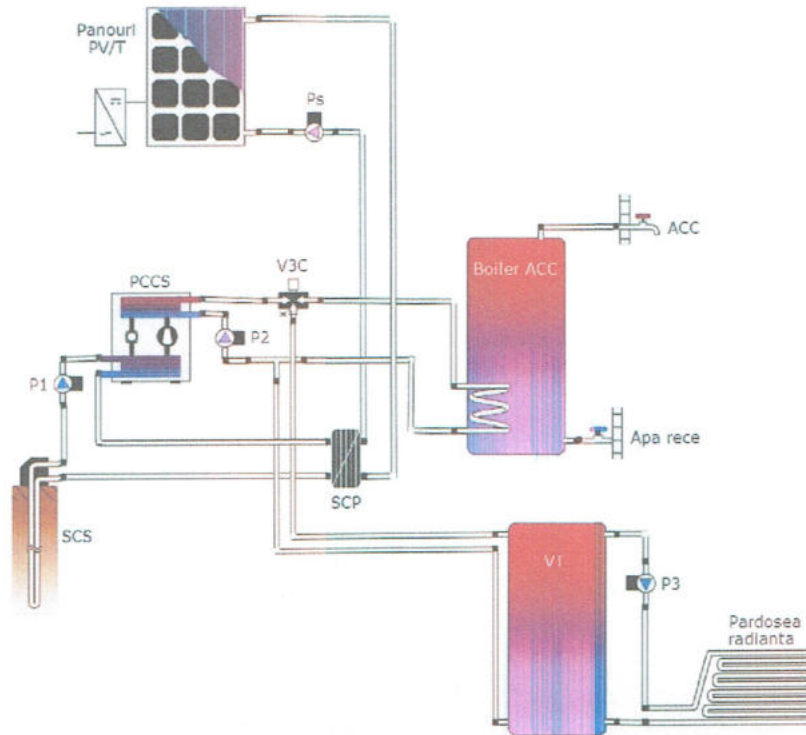


Fig. 7 Configurația sistemului hibrid PCCS-PV/T pentru simularea cu programul Polysun

3.2.2 Simularea pentru biroul experimental

Suprafața încălzită a biroului experimental (Fig. 4.1) este de 21,8 m², iar necesarul de energie termică de 2,6 kWh/(m²an) pentru încălzire și de 7 kWh/(m²an) pentru producerea ACC. 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.

Programul Polysun a fost utilizat la simularea energiei termice necesare satisfacerii cerințelor de încălzire și ACC pentru biroul experimental și energiei electrice generate de panourile PV/T, care compensează energia electrică utilizată de PC.

PCCS experimentală cu tub U dublu al SCS în cooperare cu cele 6 panouri PV, pentru a compensa consumul de electricitate al acestora și interconectată la sistemul de încălzire și producere a ACC pentru biroul experimental, s-a utilizat de asemenea la testarea pe perioada de 30 de zile a performanței energetice și ecologice a sistemului.

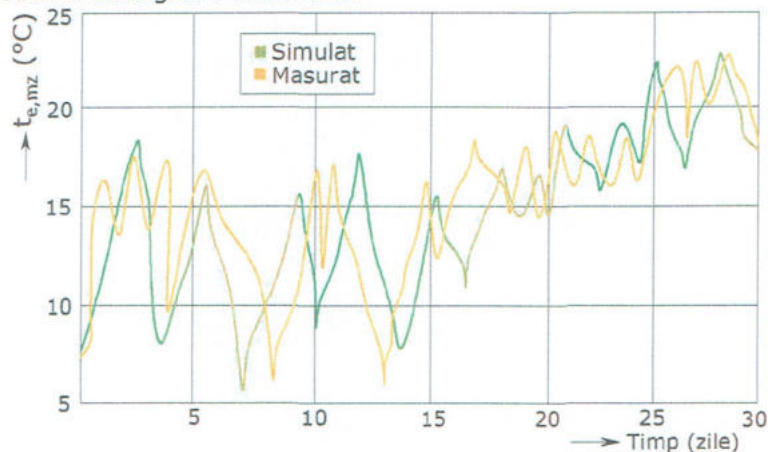


Fig. 8 Variația temperaturii maxime zilnice a aerului exterior

În Fig. 8 se ilustrează variația temperaturii maxime zilnice a aerului exterior ($t_{e,mz}$) simulate și măsurate, constatându-se o bună concordanță între acestea. Temperatura fluidului de lucru rezultată la intrarea în SCS cu tub U dublu este de 15,1 °C. În Tabelul 2 sunt sintetizate principalele rezultate simulate cu programul Polysun alături de valorile obținute prin măsurători experimentale.

Tabelul 2 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

Rezultatele arată că valorile simulate cu programul Polysun precum energia termică utilă (E_t), energia electrică produsă de panourile PV/T ($E_{el,pv}$), energia electrică consumată de PC (E_{PC}), factorul de performanță sezonier al PC (FPS_{PC}) și reducerea emisiei de CO_2 sunt mai mici doar cu 0,5–5,6% față de cele măsurate, astfel încât modelul de simulare numerică este validat experimental.

Pentru fracțiunea energiei regenerabile (FER) s-a obținut din relația (3.30) 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.

4. Concluzii:

1. Injectarea în sol, folosind energia fotovoltaică, a condus la o creștere medie a temperaturii fluidului t_f cu $\sim 2.4\%$, ceea ce s-a reflectat direct într-o creștere a COP-ului sistemului.
2. Tubul U dublu prezintă cea mai bună evoluție: COPsist crește de la 4.84 la 5.16 (+6.6%).
3. Tubul U dublu duce la o reducere mai mare a consumului electric și a emisiilor CO_2 : -3.8% CO_2 pentru U dublu vs -1.2% pentru U simplu.
4. Dezechilibru termic foarte mic \rightarrow sistemul este sustenabil multi-anual și nu necesită supra-dimensionare a sondelor.
5. Deși temperatura aerului exterior variază puternic între $-4^\circ C$ și $+3^\circ C$, temperatura fluidului din sondă (t_f) rămâne extrem de stabilă ($15-17.5^\circ C$). Acest lucru confirmă inerția termică ridicată a solului și eficiența regenerării sezoniere.
6. Combinarea PCCS cu regenerarea solului alimentată cu energie fotovoltaică oferă:
 - eficiență energetică crescută,
 - reducerea consumului electric anual,
 - scădere demonstrată a emisiilor CO_2 ,
 - stabilitate multi-anuală a temperaturii subsolului.
7. Consumul de energie electrică al PC și al pompelor de circulație poate fi acoperit cu electricitate regenerabilă generată de panourile PVT.

5. Contributii originale ale lucrării:

1. Implementarea unui sistem geotermo-solar real (PCCS + regenerare + PV/T), cu monitorizare completă și două sonde comparate: U simplu vs U dublu.
2. Dezvoltarea unui model numeric avansat (Crank-Nicolson 3D) pentru transferul termic în sonda geotermală și simularea proceselor de injectare/extracție.
3. Validare experimentală riguroasă a modelului, cu abateri foarte mici: E_t 2.4%, E_{PC} 2.0%, FPS_{PC} 0.5%, CO_2 2.0%.
4. Demonstrarea impactului energetic și ecologic: creșterea COP până la +6.6%, reducerea emisiilor CO_2 cu până la -6.9% și un $RDT = 0.054$ care confirmă echilibrul termic multi-anual al solului.
5. Demonstrarea scalabilității sistemului

6. Directii viitoare de cercetare:

1. Extinderea perioadelor de regenerare sezonieră și optimizarea algoritmului de control pentru injecția termică pe baza datelor în timp real (t_f , t_e , energie PV).
2. Integrarea unui sistem PV/T de putere mai mare și evaluarea funcționării PCCS în regim complet autonom energetic.
3. Dezvoltarea unui model numeric multi-anual care să includă degradarea termică a solului, umiditatea și variațiile hidro-geologice.
4. Testarea unor noi configurații de sonde (dublu U optimizat, coaxial, surfactanți în fluid) pentru creșterea schimbului termic și reducerea adâncimii forajelor.
5. Implementarea unui sistem inteligent de control predictiv (model-based control) pentru maximizarea COP și minimizarea consumului electric/ CO_2 .

7. Bibliografie

- [1] Sârbu I, Dorca A. Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. *International Journal of Energy Research* 2019;43(1):29-64.
- [2] Sârbu I, Sebarchievici C, Dorca A. Simulation of ground thermo-physical capacity for a vertical closed-loop ground-coupled heat pump system. *Energy Sources and Clean Technologies, Proceedings of 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 27 June-06 July, 2017*, pp. 557-565.
- [3] Sârbu I., Dorca A., "Experimentally investigating and numerically simulating the performances of various low-temperature hydronic heating/cooling systems connected to a vertical closed-loop ground-coupled heat pump", *Energy and Buildings*, 2023, vol. 300, 1 December 2023, no. 113661
- [4] Sârbu I, Sebarchievici C. *Ground-source heat pumps: Fundamentals, experiments and applications*. Elsevier, Oxford, UK, 2016.
- [5] Sârbu I, Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump system for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings* 2014;70(2):441-454.
- [6] Conti P, Testi D, Grassi W. Revised heat transfer modeling of double-U vertical ground-couple heat exchangers, *Applied Thermal Engineering* 2016;106:1257-1267.
- [7] Wu W, You T, Wang B, Shi W, Li X. Simulation of a combined heating, cooling and domestic hot water system based on ground source absorption heat pump, *Applied Energy* 2014;126:113-122.
- [8] Trillat-Berdal V, Souyri B, Achard G. Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, *Applied Thermal Engineering* 2007;27(10):1750-1755.
- [9] Si Q, Okumiya M, Zhang X. Performance evaluation and optimization of a novel solar-ground source heat pump system, *Energy and Buildings* 2014;70:237-245.
- [10] Kjellsson E, Hellström G, Perers B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings, *Energy* 2010;35(6): 2667-2673.
- [11] Metz PD. The use of ground-coupled tanks in solar-assisted heat-pump systems. *ASME Transactions, Journal of Solar Energy Engineering* 1982;104(4):366-372.
- [12] Javed S, Spitler J. Calculation of borehole thermal resistance, In: *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, Rees (Ed.), Woodhead Publishing, Cambridge, 2016.
- [13] Ec. New energy technologies, innovation and clean coal: Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) heating/cooling fuel deployment 2016 European Commission Brussels, Belgium.
- [14] IEA. *World Energy Outlook Paris 2020* International Energy Agency France 2020.
- [15] EP. *European Parliament Resolution of 15, on the European Green Deal (2019/2956(RSP))*, Strasbourg January 2020 European Parliament France 2020.
- [16] *Geogr Kyoto protocol to the United Nations framework conservation on climate change 1997* New York, USA *Global Environmental Change Report*.
- [17] Ec. *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings* Official Journal of the European Communities 2003.
- [18] B. Dehghan, A. Sisman, M. Aydin, Parametric investigation of helical ground heat exchangers for heat pump applications, *Energy and Buildings* 127 (2016) 999-1007.
- [19] R. Xiang, X.-R. Kong, Y. Deng, L. Li, W.-S. Gong, S.-J. Cao, Experimental and numerical study on the thermal performance of ground source heat pump with a set of designed buried pipes, *Applied Thermal Engineering* 114 (2017) 110-117.
- [20] M. Zhang, G. Gong, L. Zeng, Investigation for a novel optimization design method of ground source heat pump based on hydraulic characteristics of buried pipe network, *Applied Thermal Engineering* 182 (2021) 116069.
- [21] R.A. Beier, Transient heat transfer in a U-tube borehole heat exchanger, *Applied Thermal Engineering* 62 (2014) 256-266.
- [22] H. Biglarian, M. Abbaspour, M.H. Saidi, A numerical model for transient simulation of borehole heat exchangers, *Renewable Energy* 104 (2017) 224-237.
- [23] E.D. Kerme, A.S. Fung, Comprehensive simulation based thermal performance comparison between single and double U-tube borehole heat exchanger and sensitivity analysis, *Energy and Buildings* 241 (2021) 110876.