



Rezumat: **Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri**

Doctorand: ing. Marius Alexa

Conducător de doctorat: prof.univ.dr.ing. Nicolae Țăranu

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 2026

1. Context și justificarea cercetării:

Teza de doctorat abordează una dintre provocările majore ale tranziției energetice contemporane: optimizarea performanței sistemelor fotovoltaice prin valorificarea simultană a energiei electrice și termice. În contextul în care clădirile sunt responsabile pentru aproximativ 40% din consumul global de energie și în care Uniunea Europeană urmărește atingerea neutralității carbonice până în 2050, sistemele fotovoltaice termice (PVT) se conturează ca o soluție tehnologică avansată pentru implementarea conceptului de clădiri cu consum aproape zero.

Teza se înscrie în direcția actuală de cercetare privind creșterea eficienței energetice a clădirilor și valorificarea surselor regenerabile, în contextul tranziției energetice accelerate și al cerințelor impuse de politicile europene privind reducerea emisiilor de carbon. În acest cadru PVT reprezintă o soluție tehnologică avansată, capabilă să asigure conversia simultană a energiei solare în energie electrică și termică, contribuind la creșterea eficienței globale a sistemelor energetice integrate în clădiri.

Motivația cercetării pornește de la limitarea fundamentală a sistemelor fotovoltaice convenționale, și anume creșterea temperaturii de funcționare a celulelor fotovoltaice, fenomen care conduce la scăderea randamentului electric și la degradarea în timp a materialelor. În condiții reale de exploatare, doar o fracțiune din energia solară incidentă este convertită în energie electrică, în timp ce restul este transformat în căldură, ceea ce determină supraîncălzirea panoului și diminuarea performanței acestuia. În acest context, integrarea unui sistem de răcire și valorificarea energiei termice disipate devin esențiale pentru optimizarea funcționării.

Problema fundamentală pe care o adresează cercetarea derivă din faptul că panourile fotovoltaice convenționale convertesc 15-22% din energia solară incidentă în electricitate, restul de 78-85% fiind disipată sub formă de căldură. Această acumulare termică conduce la creșterea temperaturii celulelor fotovoltaice peste 60°C, afectând negativ randamentul electric cu aproximativ 0,4-0,5% pentru fiecare grad Celsius peste temperatura optimă de 25°C. Cercetarea propune o soluție integrată care transformă această problemă într-o oportunitate prin recuperare a căldurii disipate și utilizarea acesteia ca energie termică utilă.

2. Metodologia de cercetare și calculele analitice:

Teza propune o abordare integrată a sistemelor PVT, în care răcirea controlată cu apă nu este tratată exclusiv ca un mijloc de reducere a temperaturii, ci ca un proces complex de optimizare energetică. Ipoteza fundamentală a cercetării este că performanța globală a unui sistem PVT este determinată de corelarea între regimul termic al panoului, cantitatea de căldură extrasă, consumul energetic auxiliar și condițiile de integrare în clădire, și nu doar de scăderea temperaturii de funcționare. Această ipoteză este validată printr-o combinație de modelare teoretică, analiză numerică și studii experimentale.

Una dintre contribuțiile personale majore ale lucrării constă în dezvoltarea unui model teoretic și matematic original care descrie procesul de transfer termic în sistemele fotovoltaice termice răcite cu apă. Modelul propus stabilește relații funcționale între parametrii esențiali ai sistemului, respectiv debitul masic al agentului termic, temperatura apei și cantitatea de căldură extrasă. Prin această abordare, cercetarea oferă un cadru analitic riguros pentru evaluarea performanței sistemului și permite cuantificarea influenței fiecărui parametru asupra eficienței globale. Această contribuție depășește abordările descriptive din literatura de specialitate și oferă un instrument aplicabil în proiectarea și optimizarea sistemelor PVT.

Cercetarea s-a desfășurat prin combinarea analizei teoretice, modelării numerice și validării experimentale. Fundamentul matematic al studiului se bazează pe ecuația generalizată a transferului de căldură pentru sistemele tubulare, unde cantitatea de căldură extrasă este exprimată prin relația

$$Q_u = k_s \cdot S \cdot (T_{out} - T_{in});$$

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Coeficientul global de schimb de căldură integrează toate rezistențele termice ale sistemului, inclusiv convecția fluidului primar și secundar, conducția prin materialul țevii și rezistențele de contact.

Pe baza modelului teoretic dezvoltat, cercetarea continuă cu o etapă extinsă de analiză numerică, care reprezintă o altă contribuție semnificativă. Au fost realizate aproximativ 60 de scenarii de simulare, care au permis investigarea detaliată a comportării sistemului în funcție de variația parametrilor de funcționare. Simulările au avut în vedere influența debitului agentului termic, a temperaturii acestuia, precum și a condițiilor de operare asupra cantității de căldură recuperate și asupra randamentului electric. Prin analiza comparativă a rezultatelor, au fost identificate regimuri optime de funcționare, evidențiindu-se faptul că există un compromis între creșterea debitului, reducerea temperaturii panoului și consumul energetic al sistemului de pompare. Astfel, contribuția autorului constă în definirea unor criterii de optimizare bazate pe analiza numerică, care pot fi utilizate în proiectarea sistemelor reale.

3. Contribuții personale:

3.1. Modelul numeric al răcirii PVT

Pe baza modelului matematic dezvoltat pentru panoul fotovoltaic termic (PVT) s-a realizat o analiză numerică comparativă pentru 8 variante constructive, în scopul evaluării influenței principalilor parametri geometrici și funcționali asupra performanței termice și electrice a sistemului, obiectivul fiind acela de a identifica variantele cele mai eficiente pentru a fi introduse în simularea constructivă.

Analiza a fost realizată atât pentru validarea comportării teoretice a panoului, cât și ca etapă premergătoare unei simulări numerice detaliate cu ajutorul unui software specializat. Pentru a asigura comparabilitatea rezultatelor, intervalul orar de funcționare a fost menținut constant, respectiv 05:00–19:00, corespunzător unei zile tipice de vară, cu aport solar semnificativ.

Modul de definire a variantelor constructive analizate: cele 8 variante constructive rezultă din combinarea următorilor parametri:

- Ø țevă cupru utilizată pentru circuitul de răcire: 6 mm, 10 mm, 15 mm, 22 mm;
- temperatura apei la intrarea în panou:
 - o 10°C; sau 15°C;

Prin combinarea celor patru diametre cu cele două temperaturi de intrare, s-au obținut 8 configurații distincte, analizate în condiții identice de iradiere solară și regim de funcționare.

Ipoteze și parametri utilizați în analiza numerică

Pentru simplificarea analizei și menținerea caracterului comparativ, s-au adoptat următoarele ipoteze:

- regim de curgere staționar în interiorul țevelor;
- proprietăți termofizice constante ale apei;
- distribuție uniformă a fluxului solar pe suprafața panoului;
- contact termic ideal între stratul fotovoltaic și schimbătorul de căldură;
- pierderi termice către mediul ambiant modelate printr-un coeficient global de transfer termic.

Bilanțul energetic al panoului PVT a fost formulat pe baza:

- bilanțului termic al stratului fotovoltaic;
- transferului de căldură către agentul termic;
- influenței temperaturii celulei asupra randamentului electric.

Rezultatele analizei numerice evidențiază faptul că diametrul țevii de cupru are un impact major asupra bilanțului termic al sistemului PVT.

Diametrele mari (15–22 mm) permit:

- debite mai ridicate ale agentului termic;
- scăderea rezistențelor hidraulice;
- creșterea coeficientului de transfer termic convectiv intern.

În consecință, temperatura medie a panoului fotovoltaic este redusă mai eficient, ceea ce conduce

- creșterea cantității de energie termică extrasă;
- îmbunătățirea randamentului electric al celulelor fotovoltaice.

Diametrele mici (6–10 mm) limitează debitul de apă și pot genera pierderi de presiune semnificative, reducând capacitatea de răcire a sistemului.

Influența temperaturii apei la intrare: temperatura agentului termic la intrare reprezintă un parametru esențial în funcționarea panoului PVT. Analiza arată că:

- temperatura de intrare de 10°C oferă un potențial superior de răcire, conducând la:
 - o o temperatură mai scăzută a celulelor fotovoltaice;
 - o o creștere mai accentuată a randamentului electric;
 - o un flux termic mai mare transferat către agentul termic.

- temperatura de intrare de 15°C conduce la performanțe ușor inferioare din punct de vedere termic și electric, însă poate fi mai ușor de realizat în practică, în funcție de sursa de apă rece disponibilă.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Astfel, deși temperaturile mai joase sunt avantajoase din punct de vedere energetic, ele pot implica costuri suplimentare sau limitări tehnologice.

Analiza comparativă a celor opt variante constructive evidențiază existența unui compromis între performanța termică și costurile sistemului:

- diametrele mari asigură un transfer termic foarte bun, dar implică:

- o consum mai mare de material;
- o costuri ridicate;
- o spațiu de montaj mai mare.

- diametrele mici sunt mai economice, dar:

- o limitează capacitatea de răcire;
- o pot conduce la creșterea temperaturii panoului;
- o afectează negativ randamentul electric.

Pe baza rezultatelor obținute se pot trage câteva concluzii, astfel:

- variantele constructive intermediare, în special cele cu diametre de 10–15 mm și temperaturi de intrare moderate, se conturează ca soluții optime din punct de vedere tehnico-economic;

- acestea asigură un echilibru favorabil între:

- o cantitatea de căldură extrasă;
- o îmbunătățirea randamentului electric;
- o costurile totale ale sistemului.

Analiza teoretică realizată oferă astfel o bază solidă pentru etapa următoare, respectiv simularea numerică avansată și validarea experimentală a configurației optime a panoului PVT

Calculul cantității de căldură – acoperiș în 2 variante constructive ($\varnothing_{Cu} = 6\text{mm}, 15\text{mm}, 18\text{mm}, 22\text{mm}$)

Calculul cantității de căldură – date cunoscute:

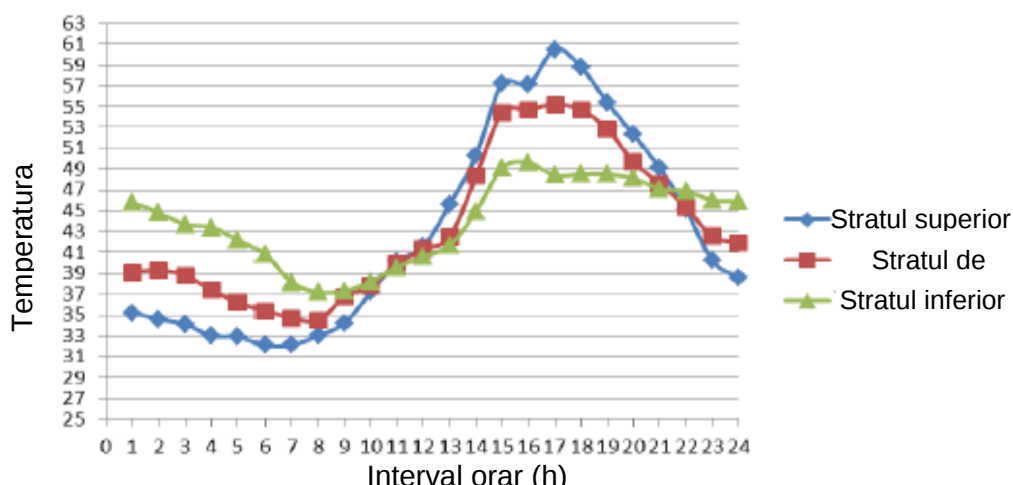


Figura 3.1. Influența intensității radiației solare asupra plăcii de beton M40 de 300 mm grosime

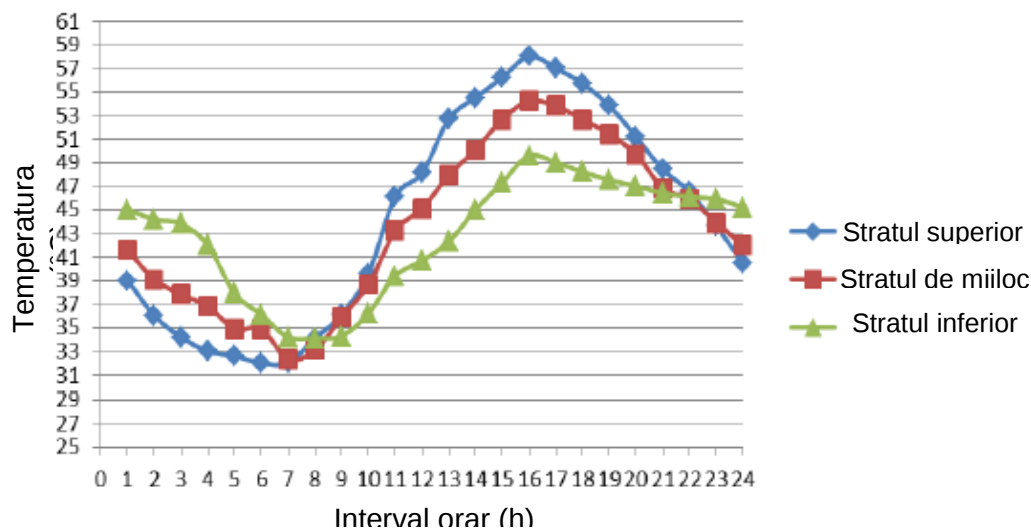


Figura 3.2. Influența intensității radiației solare asupra plăcii de beton M40 de 250 mm grosime

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

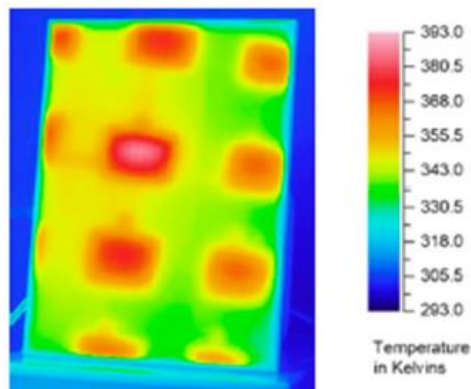


Figura 3.3. Influența intensității radiației solare asupra temperaturii PV

Pierdere de căldură este măsurată la temperatura sistemului și este cantitatea de aer deplasată de componentele sistemului minus cantitatea de căldură câștigată de sistem.

Cantitatea de aer deplasată de componentele sistemului este măsurată la temperatura sistemului și este cantitatea de aer deplasată pe oră.

Calcul analitic:

Cazul 1:

Ø țevă Cu = 6 [mm];

Lungime = 22 [m];

Debit masic = 0,05 [litri/sec] ($v = 1,77$ m/s);

Volum lichid = 0,00062 [mc] (0,62 l);

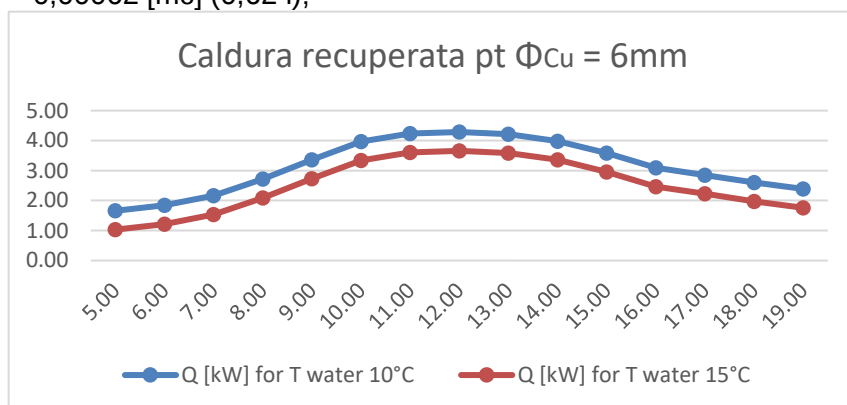


Figura 3.4. Cantitatea de căldură pentru un sistem de răcire Ø = 6 [mm] interval orar 05.00 – 19.00

Tabel 1. Datele de intrare / ieșire pentru sistem de răcire Cu Ø = 6 [mm]

Interval orar	T PV [°C]	Q [kWh] pentru T _{apă} 10°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 15°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 10°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 15°C
5,00	23,2	2,77	1,72	1.66	1.03
6,00	24,7	3,08	2,03	1.85	1.22
7,00	27,2	3,60	2,56	2.16	1.53
8,00	31,6	4,53	3,48	2.72	2.09
9,00	36,7	5,59	4,55	3.36	2.73
10,00	41,6	6,62	5,57	3.97	3.34
11,00	43,7	7,06	6,01	4.24	3.61
12,00	44,1	7,14	6,10	4.29	3.66
13,00	43,5	7,02	5,97	4.21	3.58
14,00	41,7	6,64	5,59	3.98	3.36
15,00	38,5	5,97	4,92	3.58	2.95
16,00	34,6	5,15	4,11	3.09	2.46
17,00	32,7	4,76	3,71	2.85	2.22
18,00	30,7	4,34	3,29	2.60	1.97
19,00	29	3,98	2,93	2.39	1.76
			TOTAL	46.95	37.52

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Volumul de apă din țeavă este foarte mic (0,62 l), ceea ce înseamnă că:

- răspuns rapid la variații (bun pentru control),
- dar și sensibilitate la supraîncălzire/local boiling dacă pierzi circulația sau ai puncte cu contact termic slab pe spatele panoului.

Cazul 2:

Ø țeavă Cu = 10 [mm];

Lungime = 22 [m];

Debit masic = 0,14 [kg/s] ($v = 1,79$ m/s);

Volum lichid = 0,00173 [mc] (1,73 l);

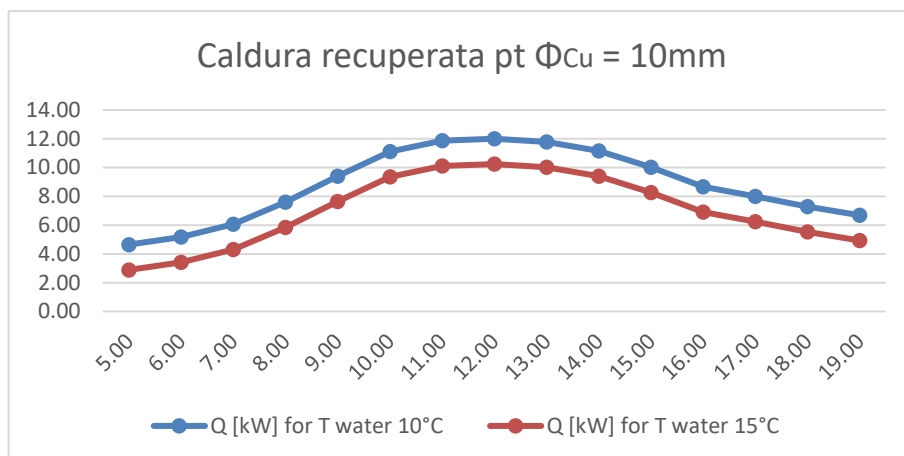


Figura 3.5. Cantitatea de căldură pentru un sistem de răcire Ø = 10 [mm] interval orar 05.00 – 19.00

Tabel 2. Datele de intrare / ieșire pentru sistem de răcire Cu Ø = 10 [mm]

Interval orar	T PV [°C]	Q [kWh] pentru T _{apă} 10°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 15°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 10°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 15°C
5.00	23.2	7.74	4.81	4.65	2.89
6.00	24.7	8.62	5.69	5.17	3.41
7.00	27.2	10.09	7.16	6.05	4.29
8.00	31.6	12.67	9.74	7.60	5.84
9.00	36.7	15.66	12.73	9.40	7.64
10.00	41.6	18.54	15.60	11.12	9.36
11.00	43.7	19.77	16.84	11.86	10.10
12.00	44.1	20.00	17.07	12.00	10.24
13.00	43.5	19.65	16.72	11.79	10.03
14.00	41.7	18.60	15.66	11.16	9.40
15.00	38.5	16.72	13.79	10.03	8.27
16.00	34.6	14.43	11.50	8.66	6.90
17.00	32.7	13.32	10.38	7.99	6.23
18.00	30.7	12.14	9.21	7.29	5.53
19.00	29	11.15	8.21	6.69	4.93
			TOTAL	131.46	105.06

Volumul de apă din țeavă este de 1,73 l, ceea ce înseamnă că:

- inerție termică mai mare decât la Ø6 mm (mai “stabil”);
- risc mai mic de vârfuri termice locale dacă ai transfer uniform;
- protecții la stagnare (pierdere debit / panou foarte fierbinte).

Cazul 3:

Ø țeavă Cu = 15 [mm];

Lungime = 22 [m];

Debit masic = 0,32 [litri/sec] ($v = 1,78$ m/s);

Volum lichid = 0,00389 [mc] (3,89 l);

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

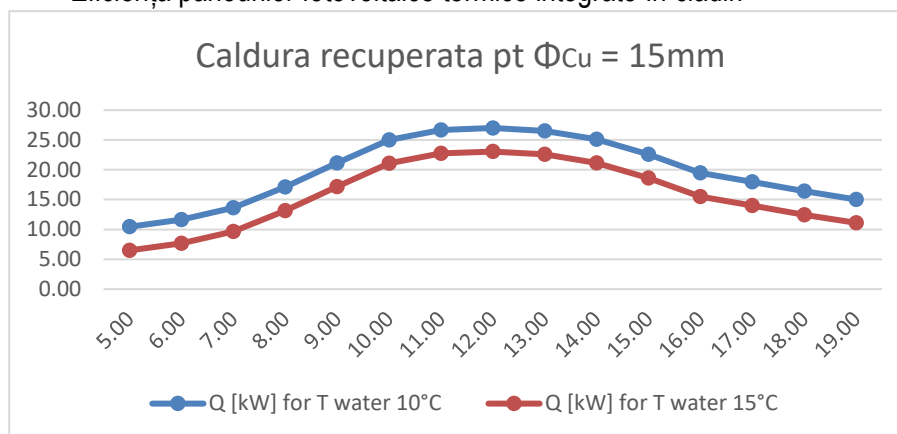


Figura 3.6. Cantitatea de căldură pentru un sistem de răcire $\Phi = 15$ [mm] interval orar 05.00 – 19.00

Tabel 3. Datele de intrare / ieșire pentru sistem de răcire Cu $\Phi = 15$ [mm]

Interval orar	T PV [°C]	Q [kWh] pentru $T_{ap\acute{a}} 10^{\circ}\text{C}$	Q [kWh] pentru $T_{ap\acute{a}} 15^{\circ}\text{C}$	Q [kWh] pentru $T_{ap\acute{a}} 10^{\circ}\text{C}$	Q [kWh] pentru $T_{ap\acute{a}} 15^{\circ}\text{C}$
5.00	23.2	17.42	10.82	10.45	6.49
6.00	24.7	19.40	12.80	11.64	7.68
7.00	27.2	22.70	16.10	13.62	9.66
8.00	31.6	28.51	21.91	17.11	13.15
9.00	36.7	35.24	28.64	21.14	17.18
10.00	41.6	41.71	35.11	25.02	21.06
11.00	43.7	44.48	37.88	26.69	22.73
12.00	44.1	45.01	38.41	27.00	23.04
13.00	43.5	44.21	37.62	26.53	22.57
14.00	41.7	41.84	35.24	25.10	21.14
15.00	38.5	37.62	31.02	22.57	18.61
16.00	34.6	32.47	25.87	19.48	15.52
17.00	32.7	29.96	23.36	17.98	14.02
18.00	30.7	27.32	20.72	16.39	12.43
19.00	29	25.08	18.48	15.05	11.09
			TOTAL	295.78	236.39

Volumul de apă crește la 3,89 l, ceea ce înseamnă:

- stabilitate termică mai bună (inerție mai mare, mai puține oscilații),
- toleranță mai bună la micro-întreruperi de control,
- gestionarea corect a stagnării (în special vara) prin control, disipare, sau stocare.

Cazul 4:

Φ țevă Cu = 22 [mm];

Lungime = 18 [m];

Debit masic = 0,68 [litri/sec] ($v = 1,79$ m/s);

Volum lichid = 0,00684 [mc] (6,84 l);

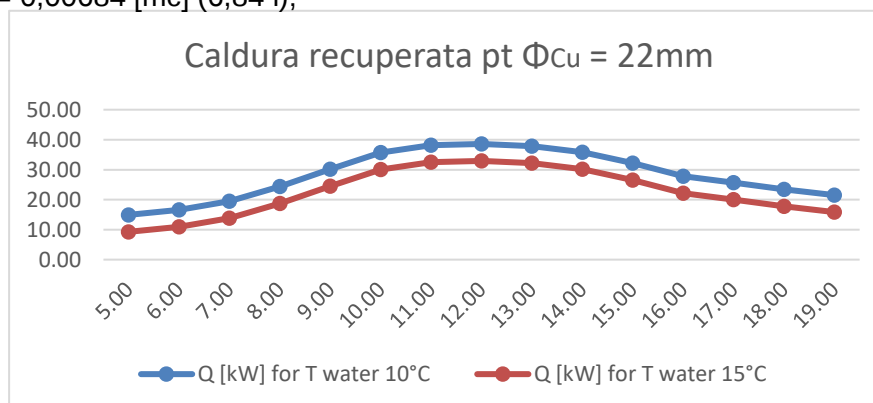


Figura 3.7. Cantitatea de căldură pentru un sistem de răcire $\Phi = 22$ [mm] interval orar 05.00 – 19.00

Tabel 4. Datele de intrare / ieșire pentru sistem de răcire Cu Ø = 22 [mm]

Interval orar	T PV [°C]	Q [kWh] pentru T _{apă} 10°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 15°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 10°C	Q [kWh] pentru T _{apă} 15°C
5.00	23.2	37.61	23.36	14.93	9.28
6.00	24.7	41.88	27.64	16.63	10.97
7.00	27.2	49.01	34.76	19.46	13.80
8.00	31.6	61.54	47.30	24.44	18.78
9.00	36.7	76.07	61.83	30.21	24.55
10.00	41.6	90.03	75.79	35.75	30.09
11.00	43.7	96.02	81.77	38.12	32.47
12.00	44.1	97.16	82.91	38.58	32.92
13.00	43.5	95.45	81.20	37.90	32.24
14.00	41.7	90.32	76.07	35.86	30.21
15.00	38.5	81.20	66.96	32.24	26.59
16.00	34.6	70.09	55.84	27.83	22.17
17.00	32.7	64.68	50.43	25.68	20.02
18.00	30.7	58.98	44.73	23.42	17.76
19.00	29	54.13	39.89	21.49	15.84
			TOTAL	422.54	337.69

Volumul din țevă = 6,84 l, ceea ce se transpune în:

- inerție termică și stabilitate mai bună,
- crește importanța managementului de stagnare și a capacității de stocare/consum: dacă nu ai unde duce energia, sistemul va atinge rapid limite termice.

3.2. Calculul cantității de căldură preluată de la un PVT

S-a aplicat modelul matematic prezentat în subcapitolul anterior pentru un PVT, în intervalul orar 05.00 – 19.00, în următoarele condiții:

- luna= iulie;
- lungimea totală a țevii de Cu = 18m;
- diametrul țevii de Cu = 22mm;
- căldura specifică a apei = $41869 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$;
- temperatura apei la intrarea în sistem = 10°C și 15°C;
- debitul masic= 0.015 litri/sec, 0.030 litri/sec și 0.060 litri/sec.

Pentru intervalul orar 05.00 – 19.00 s-a măsurat temperatura aerului, la intervale de 1 oră, s-a măsurat temperatura suprafeței de contact dintre PVT și terasă (beton M40) și temperatura de la suprafața PVT.

S-a luat în calcul temperatura maximă a apei la ieșirea din sistemul de răcire; pe parcursul unei ore, apa nu a avut o curgere continuă prin sistemul de răcire; curgerea nonliniară a avut rolul de a prelua căldura doar atunci când temperatura este maximă, nivelul de încălzire al suprafeței PVT este maximă.

Debit masic = 0,015 litri / sec (viteza apei în circuit = 0,04 m/sec), luna IULIE

Tabel 4.2: Cantitatea de căldură pentru un debit de 0,015 litri / sec

Ora [h]	T _{aer} IULIE [°C]	T _{beton M40} [°C]	T _{PV} [°C]	T _{ieșire apă} [°C]	Q [kWh] T _{apă} 10°C	Q [kWh] T _{apă} 15°C	Q [kWh] T _{apă} 20°C
5.00	23.0	24.0	24.0	23.50	0.00	0.00	0.00
6.00	24.0	24.0	24.0	24.00	0.00	0.00	0.00
7.00	25.0	27.0	26.0	25.50	0.78	0.53	0.28
8.00	26.0	29.0	30.0	28.00	0.90	0.65	0.40
9.00	27.0	31.0	35.0	31.00	1.05	0.80	0.55
10.00	28.0	35.0	41.0	34.50	1.23	0.98	0.73
11.00	29.5	38.5	46.5	38.00	1.41	1.16	0.90
12.00	31.0	42.0	56.0	43.50	1.68	1.43	1.18
13.00	32.0	45.0	59.0	45.50	1.78	1.53	1.28
14.00	30.0	46.0	62.0	46.00	1.81	1.56	1.31

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

15.00	29.0	49.0	64.0	46.50	1.83	1.58	1.33
16.00	28.0	46.0	63.0	45.50	1.78	1.53	1.28
17.00	26.5	42.5	55.5	41.00	1.56	1.31	1.05
18.00	25.0	38.0	46.0	35.50	1.28	1.03	0.78
19.00	24.0	33.0	41.0	32.50	1.13	0.88	0.63
TOTAL					18.23	14.97	11.70

Vol 0.00684 [mc] volum țeavă

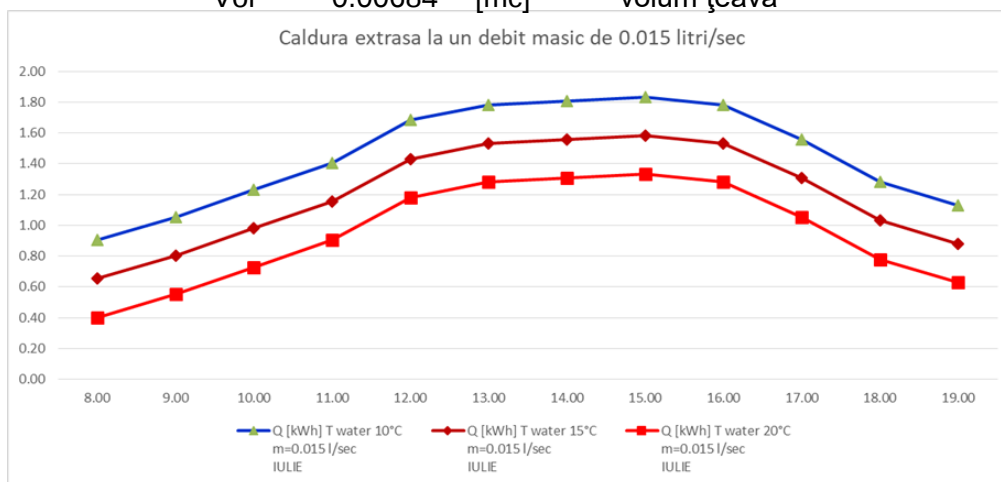


Figura 4.2: Evoluția cantității de căldură pentru un debit de 0,015 litri/sec

Dinamica termică zilnică a sistemului: interval 05:00–06:00 — regim cvasi-echilibrat:

$Q = 0$ pentru toate cazurile deoarece:

- temperatura PVT $\approx$ temperatura apei,
- fluxul termic util este practic nul.

Sistemul se află într-un regim de inerție termică, fără aport solar semnificativ.

Energia termică totală extrasă:

- $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C} \Rightarrow Q_{total} = 22.81 \text{ kWh}$;
- $T_{ap\grave{a}} = 15^{\circ}\text{C} \Rightarrow Q_{total} = 18.73 \text{ kWh}$ (scădere cu 18%);
- $T_{ap\grave{a}} = 20^{\circ}\text{C} \Rightarrow Q_{total} = 14.64 \text{ kWh}$ (scădere cu 36%).

Scăderea performanței la temperaturi mai mari ale apei se explică prin:

- reducerea fluxului convective;
- apropierea de echilibru termic;
- limitarea capacității de răcire a PVT.

Debit masic = 0,030 litri / sec (viteza apei în circuit = 0,08 m/sec), luna IULIE

Tabel 4.3: Cantitatea de căldură pentru un debit de 0,030 litri / sec

Ora [h]	T_{aer} IULIE [$^{\circ}\text{C}$]	T_{beton} M40 [$^{\circ}\text{C}$]	T_{PV} [$^{\circ}\text{C}$]	$T_{ieșire_ap\grave{a}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	Q [kWh] $T_{ap\grave{a}} 10^{\circ}\text{C}$	Q [kWh] $T_{ap\grave{a}} 15^{\circ}\text{C}$	Q [kWh] $T_{ap\grave{a}} 20^{\circ}\text{C}$
5.00	23.0	24.0	24.0	23.50	0.00	0.00	0.00
6.00	24.0	24.0	24.0	24.00	0.00	0.00	0.00
7.00	25.0	27.0	26.0	25.50	1.56	1.06	0.55
8.00	26.0	29.0	30.0	28.00	1.81	1.31	0.80
9.00	27.0	31.0	35.0	31.00	2.11	1.61	1.11
10.00	28.0	35.0	41.0	34.50	2.46	1.96	1.46
11.00	29.5	38.5	46.5	38.00	2.82	2.31	1.81
12.00	31.0	42.0	56.0	43.50	3.37	2.87	2.36
13.00	32.0	45.0	59.0	45.50	3.57	3.07	2.56
14.00	30.0	46.0	62.0	46.00	3.62	3.12	2.61
15.00	29.0	49.0	64.0	46.50	3.67	3.17	2.66
16.00	28.0	46.0	63.0	45.50	3.57	3.07	2.56
17.00	26.5	42.5	55.5	41.00	3.12	2.61	2.11
18.00	25.0	38.0	46.0	35.50	2.56	2.06	1.56
19.00	24.0	33.0	41.0	32.50	2.26	1.76	1.26
TOTAL					36.50	29.97	23.43

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

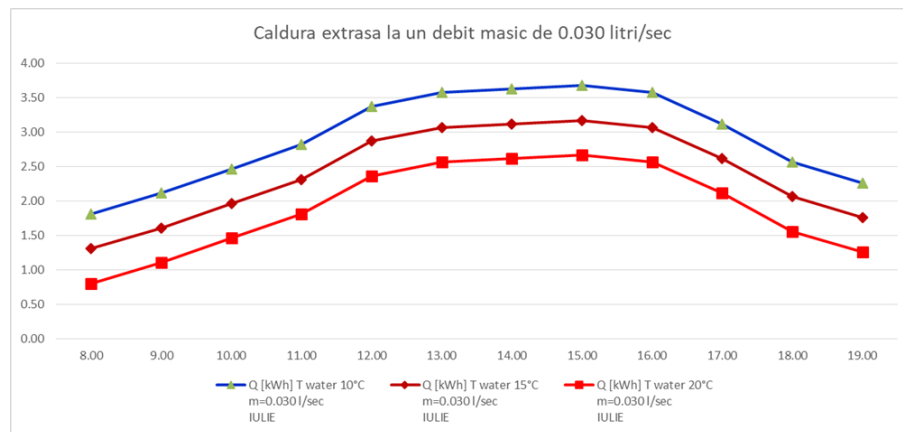


Figura 4.3: Evoluția cantității de căldură pentru un debit de 0,030 litri / sec

Sistemul este dominat de echilibru termic pasiv.

Energia termică totală extrasă:

- $T_{apă} = 10^{\circ}\text{C} \Rightarrow Q_{total} = 45.63 \text{ kWh}$;
- $T_{apă} = 15^{\circ}\text{C} \Rightarrow Q_{total} = 37.46 \text{ kWh}$ (scădere cu 18%);
- $T_{apă} = 20^{\circ}\text{C} \Rightarrow Q_{total} = 29.29 \text{ kWh}$ (scădere cu 36%).

Scăderea performanței la temperaturi mai mari ale apei se explică prin:

- reducerea fluxului convectiv;
- apropierea de echilibru termic și limitarea capacității de răcire a PVT.

Debit masic = 0,060 litri / sec (viteza apei în circuit = 0,16 m/sec), luna IULIE

Tabel 4.4: Cantitatea de căldură pentru un debit de 0,060 litri / sec

Ora [h]	T_{aer} IULIE [$^{\circ}\text{C}$]	T_{beton} M40 [$^{\circ}\text{C}$]	T_{PV} [$^{\circ}\text{C}$]	$T_{ieșire_apă}$ [$^{\circ}\text{C}$]	Q [kWh] $T_{apă} 10^{\circ}\text{C}$ m=0.060 Kg	Q [kWh] $T_{apă} 15^{\circ}\text{C}$ m=0.060 Kg	Q [kWh] $T_{apă} 20^{\circ}\text{C}$ m=0.060 Kg
5.00	23.0	24.0	24.0	23.50	0.00	0.00	0.00
6.00	24.0	24.0	24.0	24.00	0.00	0.00	0.00
7.00	25.0	27.0	26.0	25.50	3.12	2.11	1.11
8.00	26.0	29.0	30.0	28.00	3.62	2.61	1.61
9.00	27.0	31.0	34.0	30.50	4.12	3.12	2.11
10.00	28.0	35.0	40.0	34.00	4.83	3.82	2.82
11.00	29.5	38.5	45.5	37.50	5.53	4.53	3.52
12.00	31.0	42.0	54.0	42.50	6.54	5.53	4.53
13.00	32.0	45.0	57.0	44.50	6.94	5.93	4.93
14.00	30.0	46.0	60.0	45.00	7.04	6.03	5.03
15.00	29.0	49.0	61.0	45.00	7.04	6.03	5.03
16.00	28.0	46.0	60.0	44.00	6.84	5.83	4.83
17.00	26.5	42.5	51.5	39.00	5.83	4.83	3.82
18.00	25.0	38.0	43.0	34.00	4.83	3.82	2.82
19.00	24.0	33.0	36.0	30.00	4.02	3.02	2.01
TOTAL					70.29	57.22	44.15

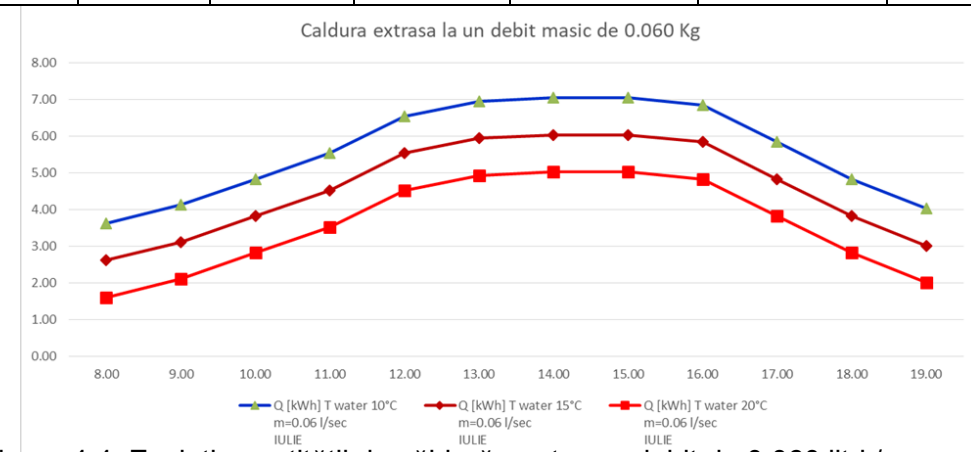


Figura 4.4: Evoluția cantității de căldură pentru un debit de 0,060 litri / sec

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Mai jos sunt prezentate rezultatele analizei comportării sistemului de răcire al PVT în diferite condiții, pentru cele 3 tipuri constructive ale unui acoperiș / terase.

S-a analizat cantitatea de căldură extrasă de la 1 PVT pe perioada de 5 luni – mai ÷ septembrie – pentru cele 2 valori ale temperaturii de intrare a apei în sistem (10°C și 15°C) și 5 valori ale debitului masic (0,015 litri/sec, 0,030 litri/sec, 0,060 litri/sec, 0,080 litri/sec, 0,10 litri/sec).

Pentru fiecare caz s-a calculat, cu ajutorul modelului matematic prezentat mai sus:

1. evoluția cantității de căldură extrasă de către sistemul de răcire, de la un PVT, pe intervalul orar 05.00 – 19.00, pentru fiecare perioadă lunară în parte;

2. media cantității de căldură extrasă într-o zi (în intervalul orar 08.00 – 19.00) din perioada mai ÷ septembrie.

4.5. Calculul teoretic al cantității de căldură preluată de la un PVT pentru perioada MAI-SEPTEMBRIE

Plecând de la calculul prezentat în subcapitolul precedent s-a realizat o analiză matematică pentru perioada mai-septembrie astfel încât datele obținute pe cale teoretică să fie comparate și ajustate cu rezultatele obținute pe cale experimentală.

Cazul 1.1. (beton M40, grosime 400mm):

$T_{\text{apă}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,015 litri/sec;

Tabel 4.5: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	8,32	14,81	18,23	16,24	11,73

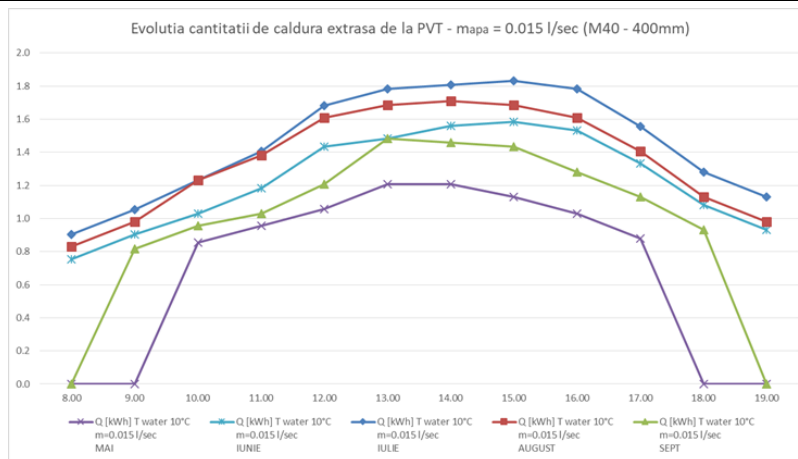


Figura 4.5: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,015 litri/sec

Cazul 1.2. (beton M40, grosime 400mm):

$T_{\text{apă}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,030 litri/sec;

Tabel 4.6: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	18,15	29,61	36,50	32,48	23,36

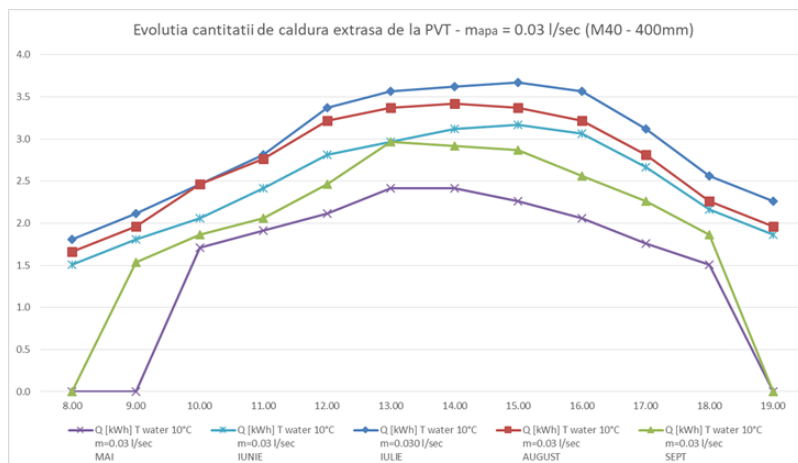


Figura 4.6: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,030 litri/sec

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Cazul 1.3. (beton M40, grosime 400mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,060 litri/sec;

Tabel 4.7: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	32,38	57,82	70,29	63,15	37,21

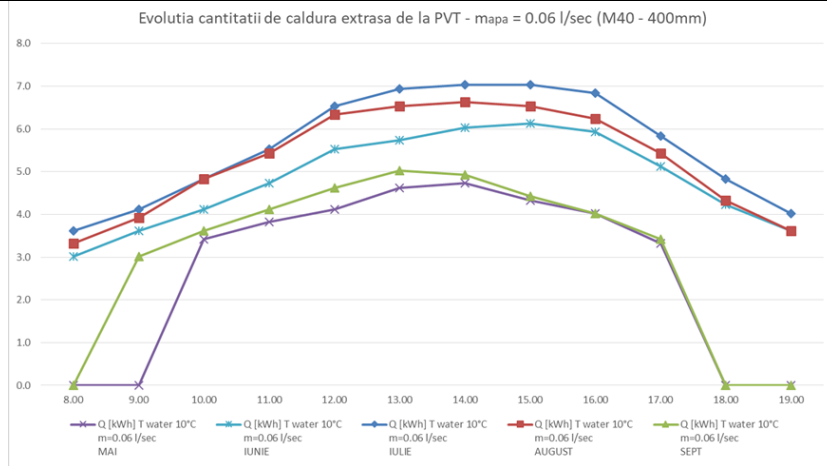


Figura 4.7: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,060 litri/sec

Cazul 1.4. (beton M40, grosime 400mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,080 litri/sec;

Tabel 4.8: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	43,17	75,22	91,31	82,19	53,10

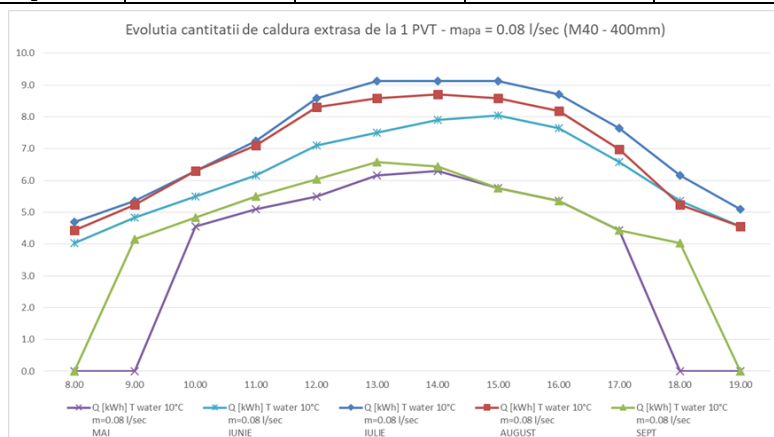


Figura 4.8: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,080 litri/sec

Cazul 1.5. (beton M40, grosime 400mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,10 litri/sec;

Tabel 4.9: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	52,96	79,11	111,79	102,74	66,37

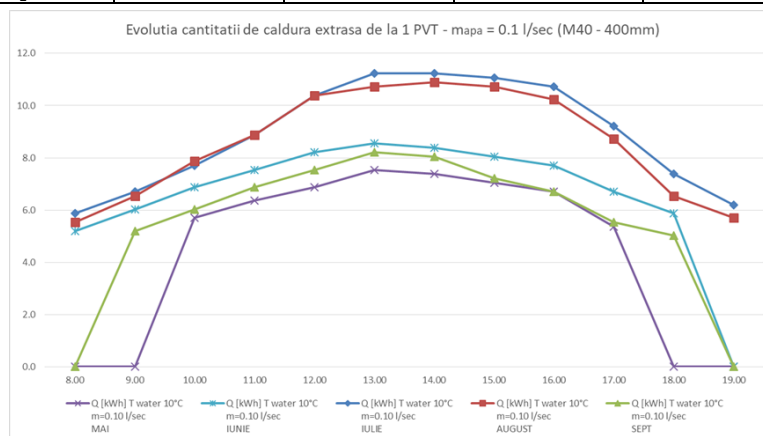


Figura 4.9. Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,10 litri/sec

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Cazul 2.1. (beton M40, grosime 250mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,015 litri/sec;

Tabel 4.10: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	8,47	14,96	18,38	16,37	10,36

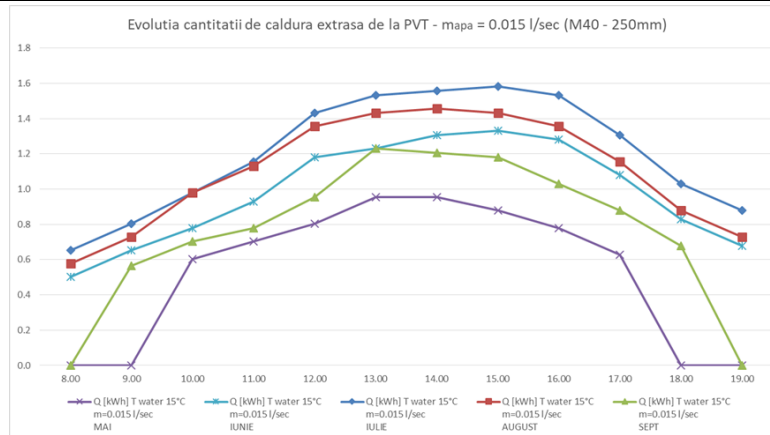


Figura 4.10. Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,015 litri/sec

Cazul 2.2. (beton M40, grosime 250mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,030 litri/sec;

Tabel 4.11: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	16,94	29,97	36,80	32,73	20,72

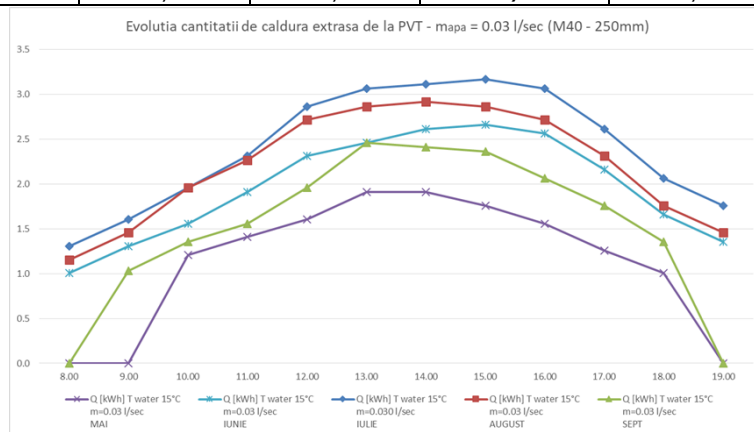


Figura 4.11: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,030 litri/sec

Cazul 2.3. (beton M40, grosime 250mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,060 litri/sec;

Tabel 4.12: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	32,88	58,53	71,40	63,86	40,73

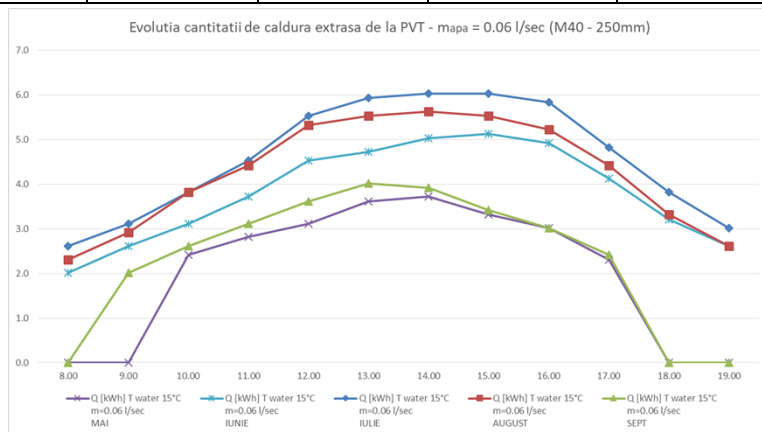


Figura 4.12: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,060 litri/sec

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Cazul 2.4. (beton M40, grosime 250mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,080 litri/sec;

Tabel 4.13: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	44,11	77,10	92,11	82,73	53,90

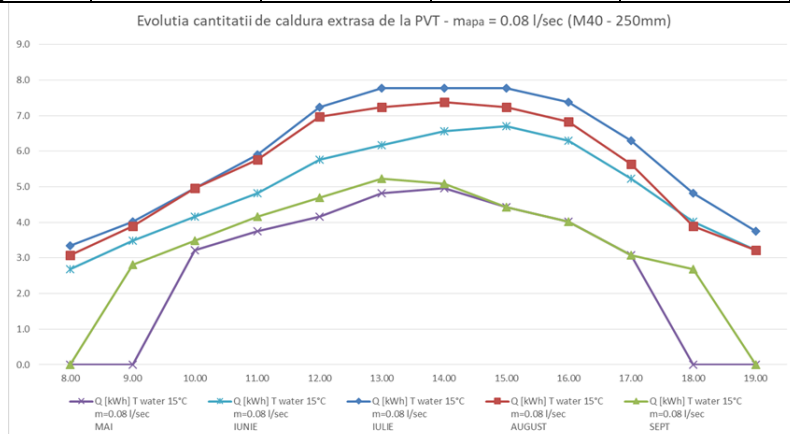


Figura 4.13: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,080 litri/sec

Cazul 2.5. (beton M40, grosime 250mm):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,10 litri/sec;

Tabel 4.14: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	59,83	80,78	112,79	103,41	67,21

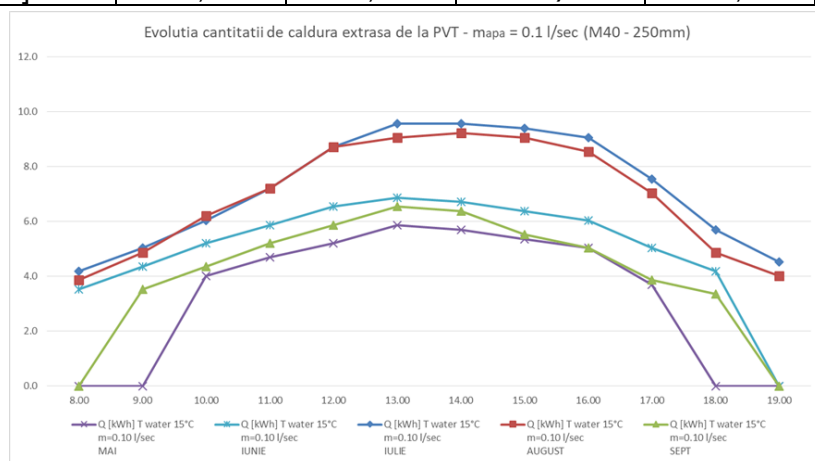


Figura 4.14: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,10 litri/sec

Cazul 3.1. (acoperiș din țiglă metalică):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,015 litri/sec;

Tabel 4.15: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	8,50	15,23	18,69	17,15	10,61

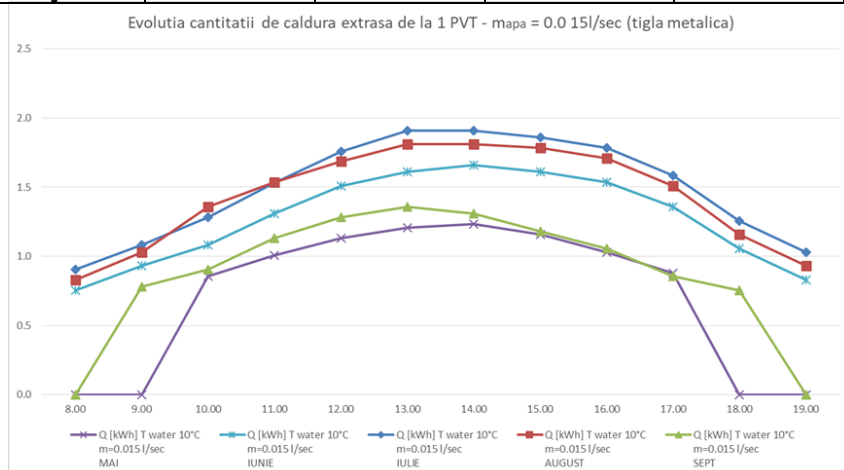


Figura 4.15: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,015 litri/sec

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Cazul 3.2. (acoperiș din țiglă metalică):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,030 litri/sec;

Tabel 4.16: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI – SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	17,15	30,42	37,46	34,29	21,22

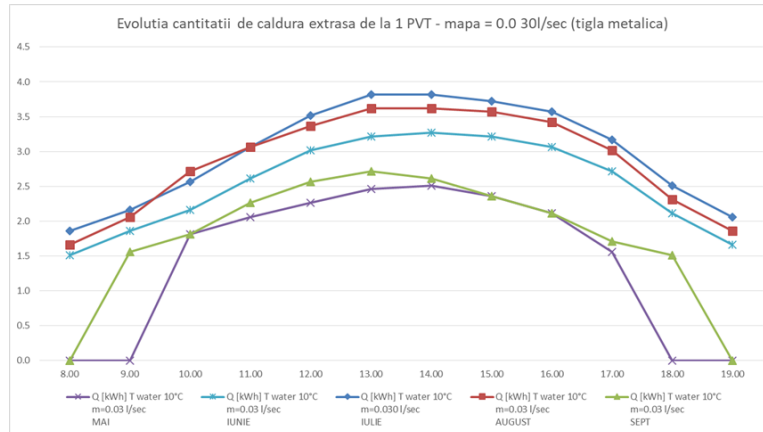


Figura 4.16: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,030 litri/sec

Cazul 3.3. (acoperiș din țiglă metalică):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,060 litri/sec;

Tabel 4.17: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	36,50	60,44	73,91	64,16	42,54

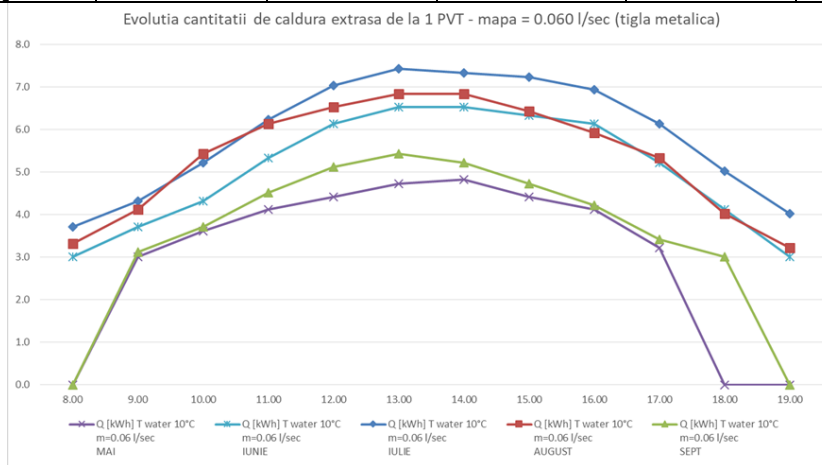


Figura 4.17: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,060 litri/sec

Cazul 3.4. (acoperiș din țiglă metalică):

$T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,080 litri/sec;

Tabel 4.18: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	48,27	80,18	95,73	84,74	56,58

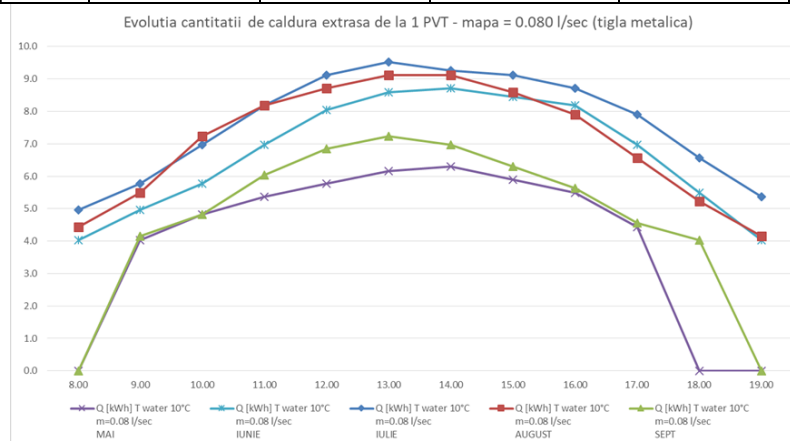


Figura 4.18: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,080 litri/sec

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Cazul 3.5. (acoperiș din țiglă metalică):

$T_{\text{apă}} = 10^{\circ}\text{C}$; debit = 0,10 litri/sec;

Tabel 4.19: Cantitatea totală de căldură pentru perioada MAI - SEPTEMBRIE

Luna	Mai	Iunie	Iulie	August	Septembrie
Q_{total} [kWh]	60,67	97,88	119,83	105,92	70,73

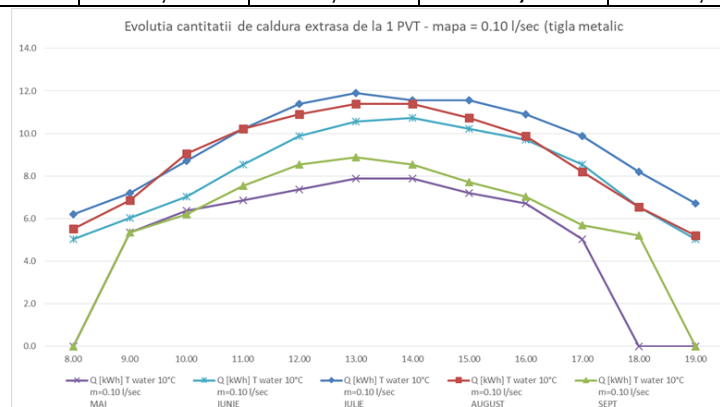


Figura 4.19: Evoluția cantității de căldură pentru debit = 0,10 litri/sec

4.6. Sinteza privind evoluția temperaturii PVT și a cantității de căldură extrase în perioada MAI-SEPTEMBRIE

Rezultatele privind cantitatea de căldură extrasă de la un PVT – lunar (30 sau 31 de zile calendaristice), pentru fiecare caz în parte, pe fiecare variantă constructivă al unui acoperiș sau terasă (M40 cu grosimea de 400mm, M40 cu grosimea de 250 mm, țiglă metalică), sunt prezentate mai jos, centralizat, pentru o analiză comparativă a raportului economic – financiar.

Cazul 1: luna MAI – 1 zi calendaristică (interval orar 08.00 – 19.00) – 1 PVT

Valori debit apă = 0.015 ÷ 0.10 litri / sec

Tabel 4.20: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna MAI

Debit apă / Tip acoperiș / terasă	MAI - 0.015	MAI - 0.03	MAI - 0.06	MAI - 0.08	MAI - 0.10
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 400mm	8.32	18.15	32.38	43.17	52.96
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 400mm	6.31	13.63	24.34	32.45	39.55
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 400mm	4.30	9.10	16.29	21.72	26.15
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 250mm	8.47	16.94	32.88	44.11	59.83
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 250mm	6.46	12.92	24.84	33.39	44.75
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 250mm	4.45	8.90	16.79	22.66	29.67
Q [kWh] pt Tapa = 10°C tigla metalica	8.50	17.15	36.50	48.27	60.67
Q [kWh] pt Tapa = 15°C tigla metalica	6.49	13.12	27.45	36.20	45.59
Q [kWh] pt Tapa = 20°C tigla metalica	4.47	9.10	18.40	24.13	30.50

Valorile Q [kWh] reprezintă energia termică totală extrasă într-o zi, pentru un singur PVT, în intervalul zilnic 08:00–19:00.

Ele integrează:

- transferul convectiv apă–schimbător,
- acumularea termică a suportului (beton sau tablă),

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

- profilul termic zilnic al mediului
- variabilele dominante sunt:
 - debitul apei;
 - temperatura apei la intrare;
 - capacitatea de acumulare și cedare termică a acoperișului.

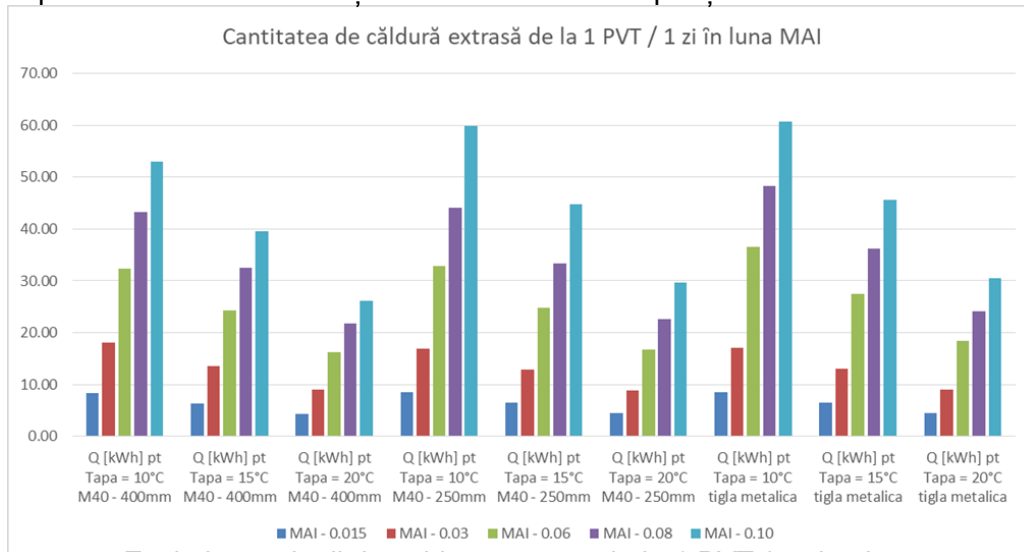


Figura 4.20: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT / 1 zi în luna MAI

Pentru toate variantele constructive se observă o creștere aproape liniară a energiei extrase direct proporțional cu debitul, dar cu randament marginal descrescător. De exemplu pentru o terasă din beton M40, 400mm, cu $T_{in_apă} = 10^{\circ}\text{C}$:

Tabel 4.21: Q extrasă pt M40, 400mm, $T_{in_apă} = 10^{\circ}\text{C}$

Nr. crt.	Debit apă [l/sec]	Q extrasă [kWh]	Creștere [%]
1	0.015 → 0.030	8.32 → 18.15	105%
2	0.030 → 0.060	18.15 → 32.38	94%
3	0.060 → 0.10	32.38 → 52.96	63%

De aici se poate deduce faptul că:

- la debite mici sistemul este limitat de transportul termic,
 - la debite mari limitarea devine energetică (direct proporțională cu căldura existentă de extras).
- Aceeași tendință apare pentru toate materialele și temperaturile de intrare

Tabel 4.22: Influența temperaturii apei la intrarea în sistemul de răcire (debit de 0.060 l/s)

Nr. crt.	Material	Q _{extrasă} ($T_{apă} = 10^{\circ}\text{C}$)	Q _{extrasă} ($T_{apă} = 15^{\circ}\text{C}$)	Diferență [%]
1	Beton M40, 400mm	32.38 [kWh]	24.34 [kWh]	-23%
2	Beton M40, 250mm	32.88 [kWh]	24.84 [kWh]	-23%
3	Țiglă metalică	36.50 [kWh]	27.45 [kWh]	-21.5%

Scăderea gradientului termic reduce aproape proporțional cantitatea de căldură extrasă; această consistență indică un regim dominat de diferența de temperatură, nu de geometria acoperișului / terasei.

Cazul 2: luna Iunie – 1 zi calendaristică (interval orar 08.00 – 19.00) – 1 PVT

Tabel 4.23: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna Iunie

Debit apă / Tip acoperiș / terasă	IUN - 0.015	IUN - 0.03	IUN - 0.06	IUN - 0.08	IUN - 0.10
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 400mm	14.81	29.61	57.82	75.22	79.11
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 400mm	11.79	23.58	45.75	59.13	60.67

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 400mm	8.77	17.55	33.69	43.04	42.24
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 250mm	14.96	29.97	58.53	77.10	80.78
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 250mm	11.94	23.93	46.46	61.01	62.35
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 250mm	8.92	17.90	34.39	44.92	43.91
Q [kWh] pt Tapa = 10°C tigla metalica	15.23	30.42	60.44	80.18	97.88
Q [kWh] pt Tapa = 15°C tigla metalica	12.22	24.39	48.37	64.09	77.77
Q [kWh] pt Tapa = 20°C tigla metalica	12.19	18.35	36.30	48.00	57.65

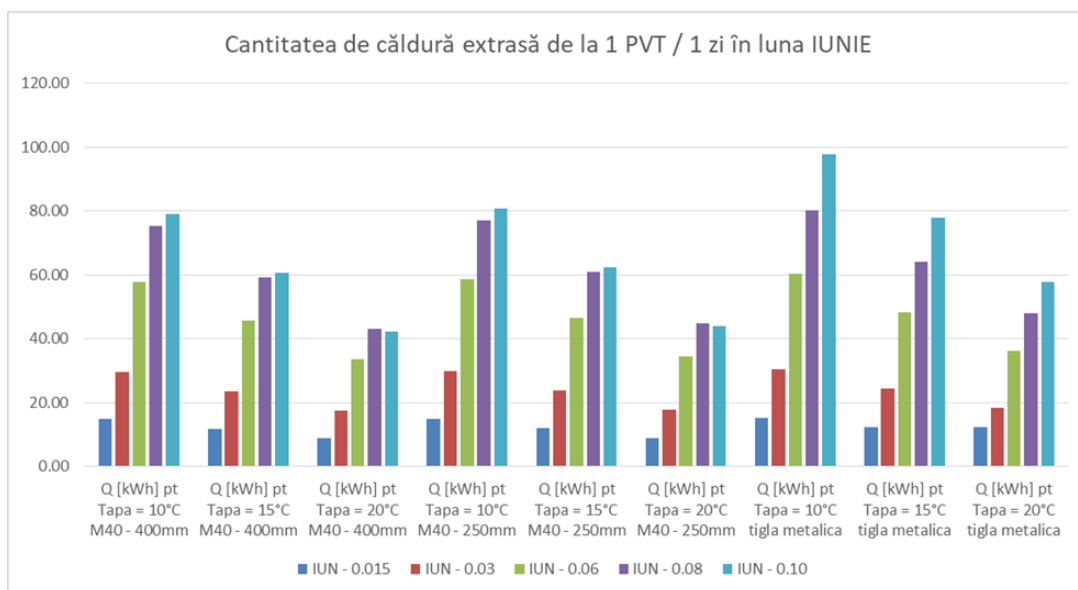


Figura 4.21: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT / 1 zi în luna IUNIE

În iunie:

- radiația solară este mai mare decât în mai;
 - durata de expunere eficientă este mai mare și temperaturile medii sunt mai ridicate.
- Consecința direct: toate valorile energetice sunt semnificativ mai mari decât în luna mai.
- Pentru toate variantele constructive se observă:
- creștere puternică de la debitul de 0.015 l/s la 0.060 l/s;
 - tendință de plafonare între 0.08 l/s și 0.10 l/s.

Tabel 4.24: Q extrasă pt M40, 400mm, $T_{in, apă} = 10^{\circ}C$

Nr. crt.	Debit apă [l/sec]	Q extrasă [kWh]
1	0.015	14.81
2	0.030	29.61
3	0.060	57.82
4	0.080	75.22
5	0.10	79.11

De aici se poate deduce faptul că:

- pentru debitele de 0.015 l/s, 0.030 l/s, 0.06 l/s și 0.08 l/s creșterea cantității de căldură extrasă este semnificativă;
- pentru debitul de 0.10 l/s creșterea este aproape nulă, ceea ce înseamnă că nu se justifică un debit foarte mare al apei în sistemul de răcire.

Aceeași tendință apare pentru toate materialele și temperaturile de intrare

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Tabel 4.25: Influența temperaturii apei la intrarea în sistemul de răcire (debit de 0.060 l/s)

Nr. crt.	Material	$Q_{\text{extrasă}}$ ($T_{\text{apă}} = 10^{\circ}\text{C}$)	$Q_{\text{extrasă}}$ ($T_{\text{apă}} = 15^{\circ}\text{C}$)	Diferență [%]
1	Beton M40, 400mm	57.82 [kWh]	45.75 [kWh]	-19%
2	Beton M40, 250mm	58.53 [kWh]	46.46 [kWh]	-19%
3	Țiglă metalică	60.44 [kWh]	48.37 [kWh]	-18%

Creșterea temperaturii apei la intrare reduce energia extrasă cu ~18–20%; procentul este puțin mai mic decât în luna mai (~23%), deoarece în iunie temperatura PVT este mai ridicată și gradientul rămâne suficient de mare chiar și pentru 15°C.

Cazul 3: luna IULIE – 1 zi calendaristică (interval orar 08.00 – 19.00) – 1 PVT

Tabel 4.26: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna IULIE

Debit apă / Tip acoperiș / terasă	IUL - 0.015	IUL - 0.03	IUL - 0.06	IUL - 0.08	IUL - 0.10
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 400mm	18.23	36.50	70.29	91.31	111.79
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 400mm	14.97	29.97	57.22	73.88	90.00
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 400mm	11.70	23.43	44.15	56.45	68.21
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 250mm	18.38	36.80	71.40	92.11	112.79
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 250mm	15.12	30.27	58.32	74.68	91.01
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 250mm	11.85	23.73	45.25	57.25	69.22
Q [kWh] pt Tapa = 10°C tigla metalica	18.69	37.46	73.91	95.73	119.83
Q [kWh] pt Tapa = 15°C tigla metalica	15.42	30.92	60.84	78.30	98.05
Q [kWh] pt Tapa = 20°C tigla metalica	12.16	24.39	47.77	60.87	76.26

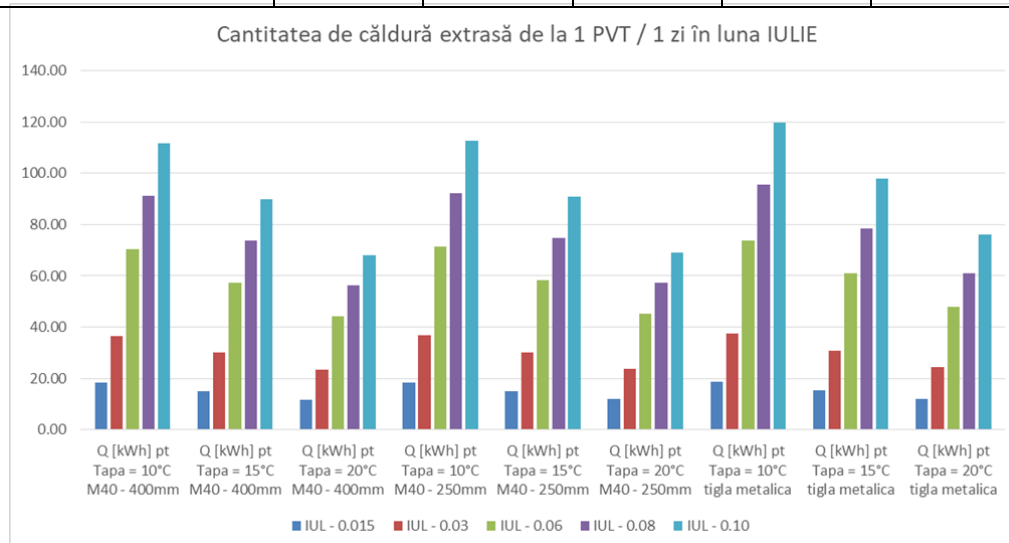


Figura 4.22: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT în luna IULIE

În iulie:

- temperaturile ambientale sunt maxime;
- radiația solară este ridicată;
- temperaturile suprafeței PVT sunt mai mari decât în iunie.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

În consecință luna iulie produce cele mai mari valori energetice dintre lunile analizate.

Pentru toate variantele constructive se observă o creștere aproape liniară a energiei extrase direct proporțional cu debitul, dar cu randament marginal descrescător. De exemplu pentru o terasă din beton M40, 400mm, cu $T_{in_apă} = 10^{\circ}\text{C}$:

Tabel 4.27: Q extrasă pt M40, 400mm, $T_{in_apă} = 10^{\circ}\text{C}$

Nr. crt.	Debit apă [l/sec]	Q extrasă [kWh]	Creștere [%]
1	0.015 → 0.030	18.23 → 36.50	98%
2	0.030 → 0.060	36.50 → 70.29	92%
3	0.060 → 0.080	70.29 → 91.31	22%
4	0.080 → 0.10	91.31 → 111.79	22%

De aici se poate deduce faptul că:

- până la 0.06 l/s sistemul este clar limitat hidraulic (aproape dublare la fiecare pas);
- după 0.06 l/s, creșterea devine moderată;
- în iulie nu apare plafonarea pronunțată din iunie, dar există încă potențial energetic suplimentar la 0.10 l/s;

În luna iulie, datorită nivelului termic ridicat, sistemul nu este încă saturat energetic la un debit al apei de 0.08 l/s.

Tabel 4.28: Influența temperaturii apei la intrarea în sistemul de răcire (debit de 0.060 l/s)

Nr. crt.	Material	Q extrasă ($T_{apă} = 10^{\circ}\text{C}$)	Q extrasă ($T_{apă} = 15^{\circ}\text{C}$)	Diferență [%]
1	Beton M40, 400mm	70.29 [kWh]	57.22 [kWh]	-17%
2	Beton M40, 250mm	71.40 [kWh]	58.32 [kWh]	-17%
3	Țiglă metalică	73.91 [kWh]	60.84 [kWh]	-16%

Diferența este mai mică decât în mai (~23%) și ușor sub iunie (~19%) deoarece în luna iulie temperatura PVT este foarte ridicată, iar gradientul termic rămâne suficient de mare chiar și pentru $T_{apă}$ la 15°C .

Cazul 4: luna AUGUST – 1 zi calendaristică (interval orar 08.00 – 19.00) – 1 PVT

Tabel 4.29: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna AUGUST

Debit apă / Tip acoperiș / terasă	AUG - 0.015	AUG - 0.03	AUG - 0.06	AUG - 0.08	AUG - 0.10
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 400mm	16.24	32.48	63.15	82.19	102.74
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 400mm	13.22	26.45	51.08	66.10	82.63
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 400mm	10.21	20.41	39.02	50.01	62.51
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 250mm	16.37	32.73	63.86	82.73	103.41
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 250mm	13.35	26.70	51.79	66.64	83.30
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 250mm	10.33	20.67	39.72	50.55	63.19
Q [kWh] pt Tapa = 10°C tigla metalica	17.15	34.29	64.16	84.74	105.92
Q [kWh] pt Tapa = 15°C tigla metalica	14.13	28.26	52.09	68.65	85.81
Q [kWh] pt Tapa = 20°C tigla metalica	11.11	22.22	40.02	52.56	65.70

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

În august:

- radiația solară rămâne ridicată;
- temperaturile ambientale sunt ușor sub cele din iulie;
- durata zilei începe să scadă ușor.

În consecință valorile energetice sunt ușor mai mici decât în iulie, dar încă ridicate comparativ cu mai și iunie.

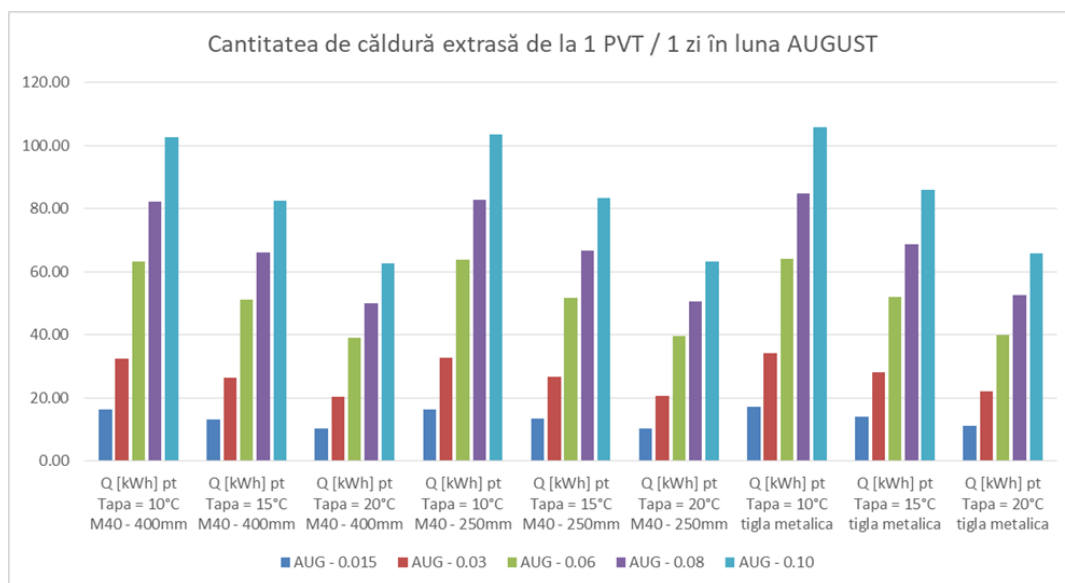


Figura 4.23. Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna AUGUST

Tabel 4.30: Q extrasă pt M40, 400mm, $T_{in, apă} = 10^{\circ}C$

Nr. crt.	Debit apă [l/sec]	Q extrasă [kWh]	Creștere [%]
1	0.015 → 0.030	16.24 → 32.48	99%
2	0.030 → 0.060	32.48 → 63.15	94%
3	0.060 → 0.080	63.15 → 82.19	20%
4	0.080 → 0.10	82.19 → 102.74	25%

De aici se poate deduce faptul că:

- până la 0.06 l/s sistemul este limitat hidraulic (creșteri aproape proporționale).
 - după 0.06 l/s apare o diminuare a randamentului marginal.
 - spre deosebire de luna iunie, creșterea de la 0.08 l/s la 0.10 l/s rămâne relevantă energetic.
- În august, sistemul nu este complet saturat energetic la 0.08 l/s, dar randamentul marginal scade.

Tabel 4.31: Influența temperaturii apei la intrarea în sistemul de răcire (debit de 0.060 l/s)

Nr. crt.	Material	$Q_{extrasă}$ ($T_{apă} = 10^{\circ}C$)	$Q_{extrasă}$ ($T_{apă} = 15^{\circ}C$)	Diferență [%]
1	Beton M40, 400mm	63.15 [kWh]	51.08 [kWh]	-17%
2	Beton M40, 250mm	63.86 [kWh]	51.79 [kWh]	-17%
3	Țiglă metalică	64.16 [kWh]	52.09 [kWh]	-16%

Diferența este mai mică decât în mai (~23%) și ușor sub iunie (~19%) deoarece în luna iulie temperatura PVT este foarte ridicată, iar gradientul termic rămâne suficient de mare chiar și pentru $T_{apă}$ la $15^{\circ}C$.

Cazul 5: luna SEPTEMBRIE – 1 zi calendaristică (interval orar 08.00 – 19.00) – 1 PVT

Tabel 4.32: Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna SEPTEMBRIE

Debit apă / Tip acoperiș / terasă	SEPT - 0.015	SEPT - 0.03	SEPT - 0.06	SEPT - 0.08	SEPT - 0.10
Q [kWh] pt Tapa = $10^{\circ}C$ M40 - 400mm	11.73	23.36	37.21	53.10	66.37

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 400mm	9.21	18.33	28.16	39.69	49.61
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 400mm	6.70	13.30	19.11	26.28	32.85
Q [kWh] pt Tapa = 10°C M40 - 250mm	10.36	20.72	40.73	53.90	67.21
Q [kWh] pt Tapa = 15°C M40 - 250mm	7.84	15.69	30.67	40.49	50.45
Q [kWh] pt Tapa = 20°C M40 - 250mm	5.33	10.66	20.61	27.08	33.69
Q [kWh] pt Tapa = 10°C tigla metalica	10.61	21.22	42.54	56.58	70.73
Q [kWh] pt Tapa = 15°C tigla metalica	8.10	16.19	32.48	43.17	53.97
Q [kWh] pt Tapa = 20°C tigla metalica	5.58	11.16	22.42	29.77	37.21

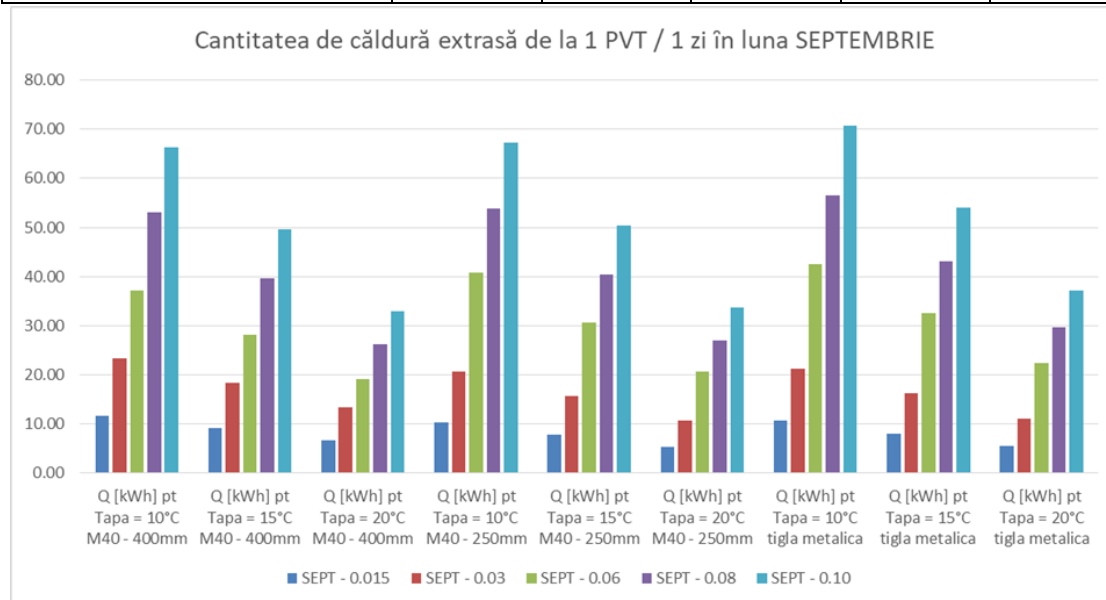


Figura 4.24. Evoluția cantității de căldură extrasă de la 1 PVT pentru luna SEPTEMBRIE

În septembrie:

- radiația solară este în scădere;
- durata zilei este mai scurtă;
- temperaturile ambientale sunt mai reduse.

În consecință valorile energetice scad semnificativ față de lunile de vară (iulie – august).

Tabel 4.33: Q extrasă pt M40, 400mm, $T_{in\text{ apă}} = 10^{\circ}\text{C}$ – comportament global

Nr. crt.	Debit apă [l/sec]	Q extrasă [kWh]	Creștere [%]
1	0.015 → 0.030	11.73 → 23.36	99%
2	0.030 → 0.060	23.36 → 37.21	98%
3	0.060 → 0.080	37.21 → 53.10	31%
4	0.080 → 0.10	53.10 → 66.37	25%

Interpretare tehnică:

- până la 0.06 l/s comportamentul este aproape liniar (regim limitat hidraulic);
- după 0.06 l/s creșterea rămâne semnificativ procentual (25–31%) mai pronunțată decât în luna iunie;
- sistemul nu este saturat energetic la 0.08 l/s.

În luna septembrie, datorită nivelului termic mai redus, debitul mai mare continuă să aducă beneficii vizibile

Tabel 4.34: Influența temperaturii apei la intrarea în sistemul de răcire (debit de 0.060 l/s)

Nr. crt.	Material	$Q_{\text{extrasă}}$ ($T_{\text{apă}} = 10^{\circ}\text{C}$)	$Q_{\text{extrasă}}$ ($T_{\text{apă}} = 15^{\circ}\text{C}$)	Diferență [%]
1	Beton M40, 400mm	37.21 [kWh]	28.16 [kWh]	-22%
2	Beton M40, 250mm	40.73 [kWh]	30.67 [kWh]	-22%
3	Țiglă metalică	42.54 [kWh]	32.48 [kWh]	-21%

3.3. Simularea cantității de căldură recuperate de la PVT

SOLIDWORKS® Flow Simulation este un modul de CFD (Computational Fluid Dynamics) integrat în SOLIDWORKS, folosit în simularea curgerii fluidelor (gaze/lichide), transferul de căldură și forțele generate de fluide asupra pieselor, direct pe geometria CAD. Este gândit pentru analize “what-if” rapide și pentru optimizare parametrică în context de proiectare.

Produsul este livrat ca parte a ecosistemului Dassault Systèmes – SOLIDWORKS, iar ca fundament tehnic SOLIDWORKS a publicat documentație de bază numerică în care autorii sunt din Mentor Graphics Corporation, Mechanical Analysis Division, ceea ce indică faptul că tehnologia CFD “embedded” (Computational Fluid Dynamics) asociată Flow Simulation are o filiație puternică în zona Mentor Graphics.

Destinația principală a fost să ofere CFD + termic “concurrent” (integrat în CAD) pentru proiectanți/ingineri care vor:

- să evalueze rapid impactul modificărilor de geometrie asupra curgerii și temperaturilor,
- să reducă timpul consumat cu pregătirea geometriei/mesh față de CFD-ul „clasic” separat de CAD.

De asemenea este un modul avansat de analiză fluidodinamică computațională (CFD - Computational Fluid Dynamics), integrat în SolidWorks, care permite inginerilor să efectueze simulări parametrice ale curgerilor de fluide.

Principalele caracteristici ale SolidWorks Flow Simulation:

- Analiza curgerilor interne și externe
- Simularea transferului de căldură prin convecție, conducție și radiație
- Modelarea interacțiunii fluid-structură
- Definirea proprietăților termofizice ale materialelor
- Utilizarea condițiilor de frontieră realiste
- Postprocesare avansată cu vizualizare a liniilor de curent, distribuției vitezelor și temperaturilor.

Soft-ul a fost utilizat cu succes în simularea sistemului de răcire cu țevi de cupru lipite pe spatele panoului fotovoltaic termic. Acest sistem preia căldura de la panou și o transferă către un lichid de răcire, crescând astfel eficiența panoului și recuperând energia termică pentru alte aplicații.

În practică SOLIDWORKS® Flow Simulation se utilizează pentru:

- curgere internă: pierderi de presiune, debit, distribuție de viteză (galerii, canale, duze, schimbătoare);
- curgere externă: aerodinamică/ventilație în jurul corpurilor, efecte de vânt, recirculări.
- transfer de căldură conjugat (CHT): rezolvă simultan conducție în solide și convecție în fluide și poate include radiație (în funcție de setări/module);
- fenomenologie utilă:
 - o gravitație / flotabilitate (convecție naturală);
 - o suprafețe/ piese în rotație sau mișcare (ventilatoare, rotoare);
 - o free-surface (interfață lichid-gaz în anumite scenarii);
 - o instrumente dedicate tip HVAC pentru fenomene de ventilație și radiație (în pachetele care includ acest modul).

Aplicații tipice (în special pe fluide + termic)

- schimbătoare de căldură, radiatoare, “cold plate”-uri;
- răcire electronică (carcase, disipatoare, flux de aer);
- HVAC / ventilație (încăperi, canale, difuzoare);
- pierderi de presiune și echilibrare hidraulică în trasee interne (manifolds, distribuții);
- aplicații termice variate (exemple publicate de SOLIDWORKS includ și sisteme solare, în contextul analizei de temperatură/transfer termic).

Soft-ul utilizat pentru simularea curgerii fluidului prin sistemul de răcire este licențiat și folosit în instituții de învățământ și de cercetare acreditate, cum ar fi: Academia Forțelor Aeriene „Henri Coandă” din Brașov, Centrul de Cercetare și Inovare pentru Forțele Navale din Constanța.

În Academia Forțelor Aeriene cu ajutorul soft-ului se fac studii cu privire la comportarea deplasării aripii de avion sau rachetă antiaeriană, respectiv elicea de elicopter în mediul aer, forțele care acționează asupra aripii, influența curenților turbionari, încălzirea componentelor mobile etc.

În Centrul de Cercetare și Inovare se studiază comportarea elementelor mobile ale navelor / rachetelor / submarinelor în apă, presiunea, temperatura, viteza lichidului; de asemenea se fac studii cu privire la degradarea și apariția uzurii, în timp, a mijloacelor mobile.

Problema identificării corespondenței dintre datele de intrare (temperatura apei de intrare, debitul masic, perioada de timp analizată) și datele de ieșire ale sistemului (temperatura apei la ieșire, realizarea echilibrului termic) s-a rezolvat prin modelarea numerică a curgerii lichidului de răcire (apa) la cele 2 temperaturi de intrare (10°C și 15°C) și 3 valori ale debitului masic, prin sistemul de răcire (țeavă de cupru $\varnothing 22$ mm).

Obiectivul principal al simulării îl reprezintă verificarea, confirmarea și eventual ajustarea valorilor rezultate ca urmare a modelării numerice, astfel încât analiza, din punct de vedere economic, să fie cât mai corectă și realistă.

Metoda folosirii în simularea unui panou fotovoltaic termic (PV-T) răcit cu apă:

Definirea obiectivelor:

- $T_{\max}$ a celulelor sau a stratului PVT (indicator direct pentru randament și fiabilitate);
- $T_{\text{in}} / T_{\text{out}}$ apă și ΔT ;
- puterea termică extrasă;
- uniformitatea temperaturii (hot-spots).

Identificarea geometriei de modelat (simulat) - niveluri de fidelitate:

- Nivel A (rapid): o „placă echivalentă” + canal(e) de apă simplificate; bun pentru comparații de concept;

- Nivel B (recomandat): straturi solide reprezentative (sticlă/EVA/celulă/backsheet sau placă metalică) + serpentină/harp realist;

- Nivel C (detaliat): incluzi adezivi, rugozități, zone de contact, distribuții de colector/redistribuitoare.

Fizica de setat în proiect - fluide și regim

- fluid: apă;

- regim: turbulent în canale, ceea ce presupune verificarea cu Reynolds (în funcție de diametre/debite);

Sursa termică - soarele:

a) Heat Flux impus pe fața expusă:

b) Volumetric heat generation într-un strat subțire (celule/EVA), dacă se face o simulare mai realist, cu disiparea energiei.

Pierderi către ambient:

- Convecție externă: se modelează evoluția parametrilor aerului din jur (curgere externă);

- Radiație: Flow Simulation poate trata radiația (în setările/ modulele disponibile) și este relevantă pentru bilanțul termic în aer liber.

Condiții la limită pentru circuitul de apă:

- inlet: debit masic sau volumic și temperatură (ex. din boiler/puffer).

- outlet: presiune sau condiție de “opening”.

Rezultate care se urmăresc pentru optimizarea deciziei de proiectare:

- harta temperaturilor pe stratul PV: hot-spots, gradient transversal;

- sensibilități: iradianță, vânt, temperatură ambient, debit.

În domeniul PVT Flow Simulation oferă următoarele:

- tratarea într-un singur calcul curgerea apei + încălzirea ei + conducția prin panou (CHT) și să obținerea valorii $T_{\text{celulă}}$ și performanța termică/hidraulică.

- posibilitatea de a face “what-if” rapid pe geometrie (pas canale, grosimi, materiale) fiind integrat în CAD.

Desfășurarea simulării în SolidWorks Flow Simulation:

- au fost definite condițiile inițiale: temperatura ambiantă, debitul de lichid, proprietățile termofizice ale lichidului de răcire.

- a fost modelată conductivitatea termică prin stabilirea parametrilor de transfer termic între panou și țevi;

- s-a realizat o analiză a distribuției temperaturilor, s-au identificat puncte fierbinți și optimizarea fluxului pentru maximizarea răcirii PVT;

- s-a urmărit realizarea optimizării designului și compararea diferitelor configurații ale țevilor pentru o eficiență maximă.

Pe modelul 3D constructiv prezentat mai jos s-au rulat toate simulările, în condițiile prezentate mai sus, modelul simulat reprezentând replica virtuală a modelului real (fig. 3.8.).

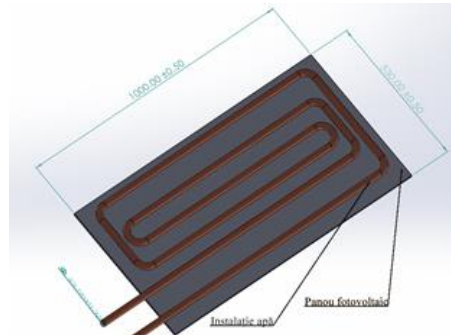
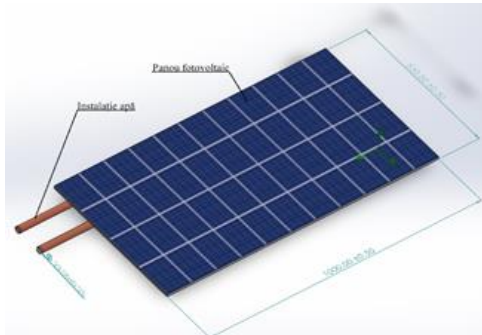


Figura 3.8. Panoul fotovoltaic termic studiat Figura 3.9. Modelul 3D constructiv studiat

1. Ipoteze lucru pentru simulare și datele de intrare

În cadrul simulării numerice s-au avut în vedere o serie de ipoteze simplificatoare după cum urmează:

- s-a considerat, din motive de simetrie pentru simularea numerică a unei secțiuni dintr-un panou fotovoltaic, o secțiune cu dimensiunile de 1 m x 0.53m (1/3 din dimensiunea unui PVT real) și instalația de răcire din cupru, alcătuită din țevă de cupru cu Ø 22 mm, așa cum este prezentat în figura nr. 3.9.;
- pentru realizarea transferului de căldură s-au considerat temperaturi ale sistemului de răcire în gama 40°C la 60°C, temperaturi considerate ca și echilibru termic între temperatura reală a panoului fotovoltaic și mediul ambiant;

- modelarea s-a realizat pe un model nestaționar, cu curgere continuă a lichidului de răcire, astfel încât procesul de încălzire a apei să țină cont de creșterea continuă a temperaturii și ajustarea, în timp real, a temperaturii finale a lichidului de răcire.

S-au simulat 60 de modele/ situații în care se urmărește temperatura de ieșire a apei, cu scopul de a analiza care este situația cea mai favorabilă din punct de vedere al fenomenului studiat și al necesităților pentru modelul experimental, pentru următoarele date de intrare:

- temperatura considerată pentru țevă de cupru, după realizarea echilibrului termic dintre PVT - mediul ambiant - țevă de Cu: 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C – 5 valori;
- debitul de apă la intrarea în instalația de răcire: 0.15 litri/sec, 0.30 litri/sec, 0,60 litri/sec, 0,80 litri/sec, 1,00 litri/sec și 1.5 litri/sec – 6 valori;
- temperatura apei la intrarea în instalație: 10°C, 15°C – 2 valori

2. Rezultate obținute

Din punct de vedere calitativ distribuțiile de presiune, viteză, temperatură în instalația de cupru considerată sunt prezentate în figurile nr. 3.10., fig. nr. 3.11. și fig. nr. 3.12.

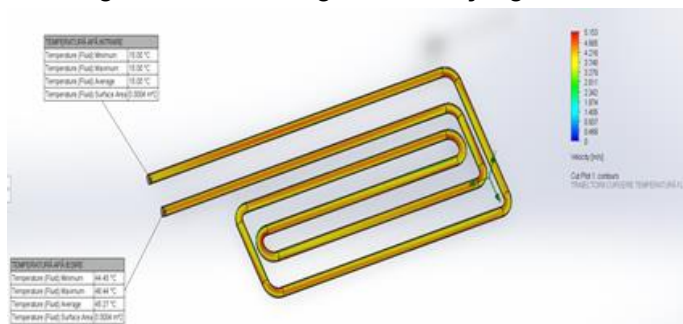


Figura 3.10. Contururi $V_{apă}$ în instalație pentru $T_{apă\ in} = 15^\circ\text{C}$, $T_{inst} = 60^\circ\text{C}$, debit = 1.5 litri/sec

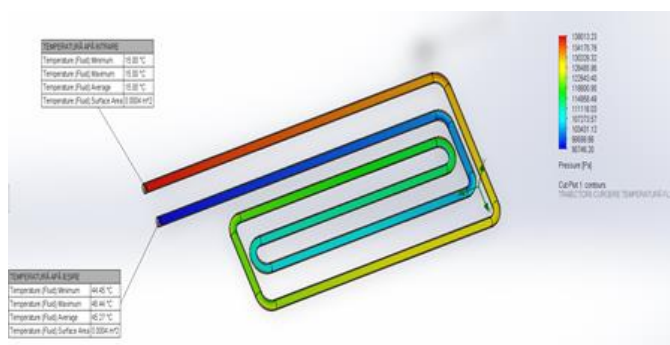


Figura 3.11. Contururi $P_{apă}$ în instalație pentru $T_{apă\ in} = 15^\circ\text{C}$, $T_{inst} = 60^\circ\text{C}$, debit = 1.5 litri/sec

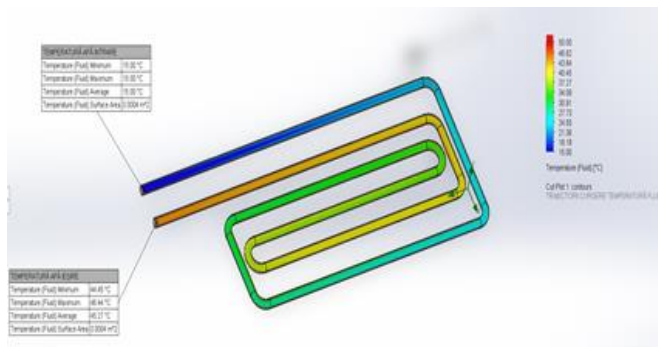


Figura 3.12. Contururi $T_{ap\grave{a}}$ în instalație pentru

$T_{ap\grave{a} \text{ in}} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{inst} = 60^{\circ}\text{C}$, debit = 1.5 litri/sec

T_{inst} reprezintă temperatura de operare a instalației de răcire după ce s-a realizat echilibrul termic dintre mediul ambiant (spațiul dintre PVT și terasă / acoperiș) și PVT.

Cu ajutorul soft-ului prezentat mai sus s-au realizat 60 de cicluri de simulare, în regim nestaționar, pentru analiza creșterii temperaturii apei și influența parametrilor de intrare asupra modului de realizare al echilibrului termic, cu următoarele valori de intrare:

- 6 valori ale debitului masic (0.15 litri/sec, 0.30 litri/sec, 0,60 litri/sec, 0,80 litri/sec, 1,00 litri/sec și 1.5 litri/sec);
- 5 valori ale temperaturii mediului ambiant (60°C , 55°C , 50°C , 45°C , 40°C)
- 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în circuit (10°C , 15°C).

3.6. Analiza cantității de căldură recuperate pentru debit constant

Caz. 1.1: Analiza valorilor temperaturii apei la ieșirea din instalația de răcire pentru cele 5 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalația de răcire (după realizarea echilibrului termic dintre PVT, mediul ambiant și țeava de Cu):

- valoarea debitului masic = 0.15 litri/sec
- cele 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalație (10°C și 15°C)

Tabel 5. temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,15 \text{ [l/sec]}$

Parametru	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
Debit intrare apă rece [l/s]	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$T_{intrare \text{ apă rece } [^{\circ}\text{C}]}$	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
$T_{instalație [^{\circ}\text{C}]}$	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
$T_{min \text{ ieșire } [^{\circ}\text{C}]}$	30.3	34.6	38.7	42.7	46.6	32.6	36.3	40.1	43.9	47.8
$T_{max \text{ ieșire } [^{\circ}\text{C}]}$	31.6	35.6	39.9	44.1	48.2	33.4	37.3	41.3	45.4	49.6
$T_{medie \text{ ieșire } [^{\circ}\text{C}]}$	30.8	35.0	39.3	43.3	47.3	32.9	36.7	40.6	44.5	48.6

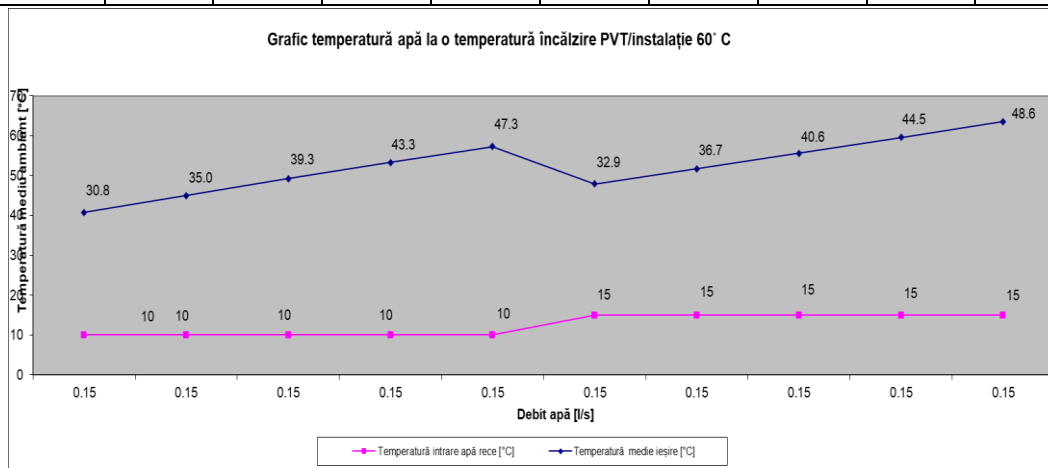


Figura 3.13. Grafic comparativ temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,15 \text{ [l/sec]}$

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Interpretarea datelor de ieșire:

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$ creșterea temperaturii panoului determină creșterea aproape liniară a temperaturii la ieșire; diferența mare de temperatură dintre panou și apa de la intrarea în sistemul de răcire (ΔT până la 37°C) indică un transfer termic intens și căldura extrasă crește semnificativ, odată cu creșterea temperaturii PVT.

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 15^{\circ}\text{C}$ puterea extrasă este mai mică decât în cazul $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$, iar diferența de aproximativ 1.5–2.5 kW față de cazul 1 se datorează gradientului termic mai redus.

Caz. 1.2: Analiza valorilor temperaturii apei la ieșirea din instalația de răcire pentru cele 5 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalația de răcire (după realizarea echilibrului termic dintre PVT, mediul ambiant și țeava de Cu):

- valoarea debitului masic = 0.30 litri/sec

- cele 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalație (10°C și 15°C)

Tabel 6. temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,30 \text{ [l/sec]}$

Parametru	Model 11	Model 12	Model 13	Model 14	Model 15	Model 16	Model 17	Model 18	Model 19	Model 20
Debit intrare apă rece [l/s]	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
T intrare apă rece [$^{\circ}\text{C}$]	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
T instalație [$^{\circ}\text{C}$]	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
T min ieșire [$^{\circ}\text{C}$]	30.0	34.3	38.4	42.3	46.2	32.4	36.1	39.8	43.6	47.5
Tmax ieșire [$^{\circ}\text{C}$]	31.4	35.3	39.6	43.8	47.9	33.2	37.1	41.1	45.1	49.2
T medie ieșire [$^{\circ}\text{C}$]	30.5	34.7	38.9	42.9	46.9	32.8	36.5	40.3	44.2	48.2

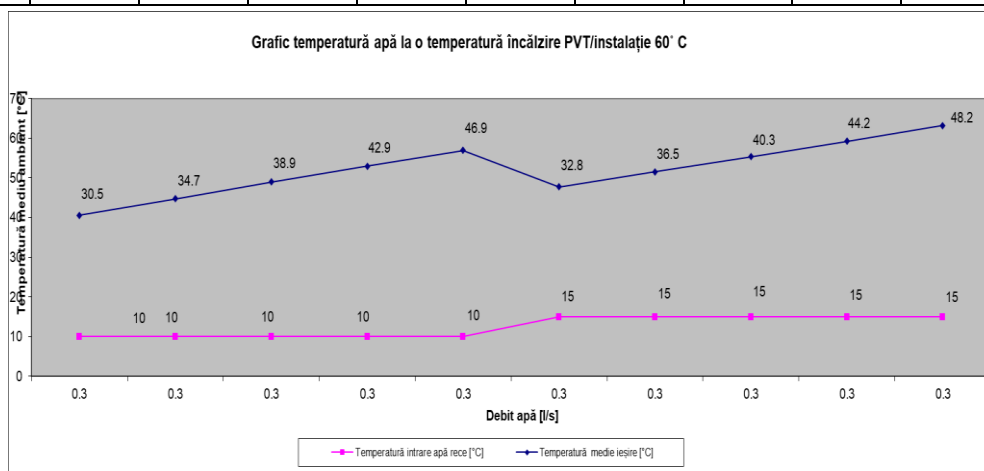


Figura 3.14. Grafic comparativ temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,30 \text{ [l/sec]}$

Interpretarea datelor de ieșire:

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$ creșterea temperaturii panoului determină creșterea aproape liniară a temperaturii la ieșire, dar mai intense față de cazul 1.1; datorită debitului dublu, puterea termică extrasă este aproximativ dublă față de cazul anterior iar temperaturile de ieșire sunt ușor mai mici decât în cazul debitului de 0,15 l/s, ceea ce indică o răcire mai intensă a panoului

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 15^{\circ}\text{C}$ puterea extrasă este mai mică decât în cazul $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$, iar diferența este de aproximativ 3kW – 5kW, în funcție de temperatura panoului.

Caz. 1.3: Analiza valorilor temperaturii apei la ieșirea din instalația de răcire pentru cele 5 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalația de răcire (după realizarea echilibrului termic dintre PVT, mediul ambiant și țeava de Cu):

- valoarea debitului masic = 0.60 litri/sec

- cele 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalație (10°C și 15°C)

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri
Tabel 7. temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,60$ [l/sec]

Parametru	Model 21	Model 22	Model 23	Model 24	Model 25	Model 26	Model 27	Model 28	Model 29	Model 30
Debit intrare apă rece [l/s]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
T intrare apă rece [°C]	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
T instalație [°C]	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
T min ieșire [°C]	29.5	33.8	37.8	41.7	45.5	32.1	35.6	39.2	43.0	46.7
Tmax ieșire [°C]	30.9	34.8	39.0	43.1	47.2	32.8	36.7	40.5	44.5	48.5
T medie ieșire [°C]	30.0	34.2	38.3	42.3	46.2	32.4	36.1	39.8	43.6	47.5

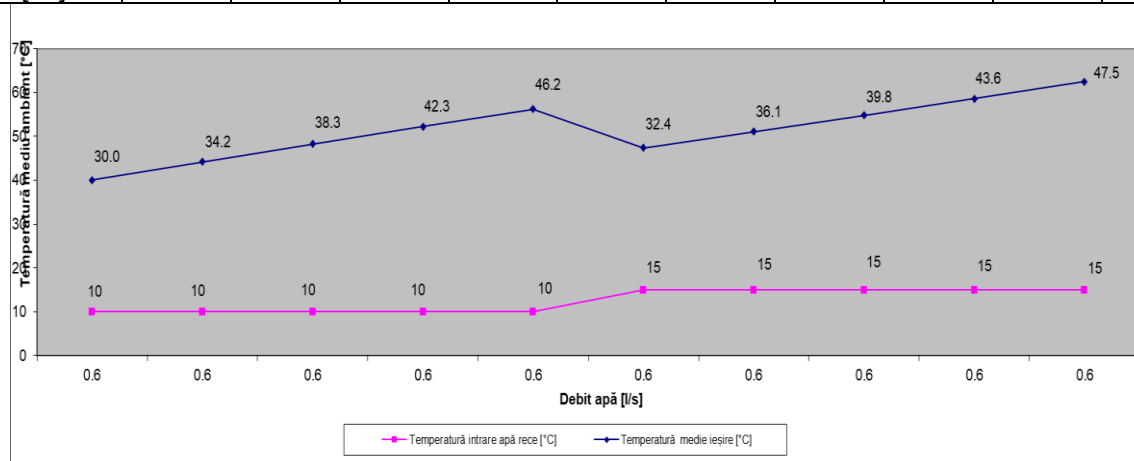


Figura 3.15. Grafic comparativ temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,60$ [l/sec]

Interpretarea datelor de ieșire:

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$ temperaturile medii la ieșire sunt ușor mai mici decât la debitele 0,15 l/sec și 0,30 l/sec (pentru aceleași temperaturi ale instalației), ceea ce indică o răcire mai intensă a panoului, o creștere a temperaturii panoului care determină o creștere aproape liniară a temperaturii la ieșire și a puterii termice extrase și creșterea debitului duce la o creștere semnificativă a puterii termice totale, deoarece $\dot{Q}$ este proporțională cu $\dot{m}$.

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 15^{\circ}\text{C}$ puterea extrasă este mai mică decât în cazul $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$, iar diferența este de aproximativ 6 kW – 10 kW, variind direct proporțional cu temperatura instalației..

Caz. 1.4: Analiza valorilor temperaturii apei la ieșirea din instalația de răcire pentru cele 5 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalația de răcire (după realizarea echilibrului termic dintre PVT, mediul ambiant și țeava de Cu):

- valoarea debitului masic = 0.80 litri/sec
- cele 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalație (10°C și 15°C)

Tabel 7. temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 0,80$ [l/sec]

Parametru	Model 21	Model 22	Model 23	Model 24	Model 25	Model 26	Model 27	Model 28	Model 29	Model 30
Debit intrare apă rece [l/s]	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
T intrare apă rece [°C]	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
T instalație [°C]	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
T min ieșire [°C]	29.2	33.4	37.3	41.1	44.8	31.8	35.3	38.8	42.4	46.1
Tmax ieșire [°C]	30.6	34.5	38.6	42.6	46.6	32.6	36.3	40.1	44.0	48.0
T medie ieșire [°C]	29.7	33.9	37.9	41.7	45.6	32.1	35.7	39.3	43.1	46.9

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

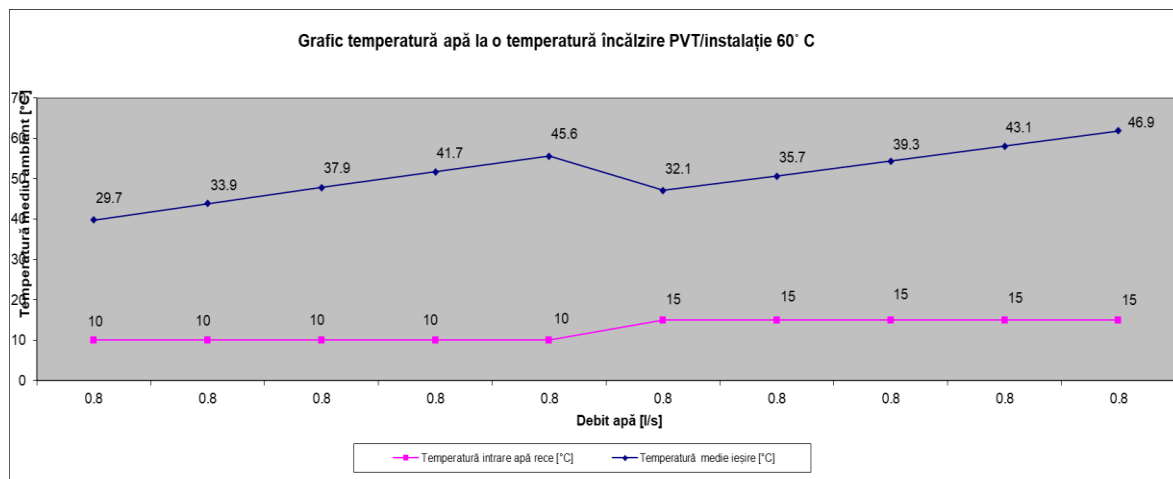


Figura 3.16. Grafic comparativ temperatură ieșire apă pentru $Q_{apă} = 0,80$ [l/sec]

Interpretarea datelor de ieșire:

Pentru $T_{apă} = 10^{\circ}\text{C}$ temperaturile medii la ieșire sunt ușor mai mici față de cazul 0,60 l/sec, ceea ce sugerează o menținere mai bună a gradientului termic și o răcire mai intensă a panoului, deoarece $\dot{Q}$ este proporțională cu $\dot{m}$.

Pentru $T_{apă} = 15^{\circ}\text{C}$ puterea extrasă este mai mică decât în cazul $T_{apă} = 10^{\circ}\text{C}$, iar diferența este de aproximativ 9 kW – 12 kW, crescând o dată cu temperatura instalației.

Caz. 1.5: Analiza valorilor temperaturii apei la ieșirea din instalația de răcire pentru cele 5 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalația de răcire (după realizarea echilibrului termic dintre PVT, mediul ambiant și țeava de Cu):

- valoarea debitului masic = 1.00 litri/sec
- cele 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalație (10°C și 15°C)

Tabel 8. temperatură ieșire apă pentru $Q_{apă} = 1,00$ [l/sec]

Parametru	Model 31	Model 32	Model 33	Model 34	Model 35	Model 36	Model 37	Model 38	Model 39	Model 40
Debit intrare apă rece [l/s]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T intrare apă rece [°C]	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
T instalație [°C]	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
T min ieșire [°C]	28.9	33.0	36.9	40.5	44.2	31.5	34.9	38.3	41.9	45.5
Tmax ieșire [°C]	30.3	34.1	38.1	42.1	46.0	32.3	36.0	39.7	43.5	47.4
T medie ieșire [°C]	29.5	33.5	37.4	41.2	44.9	31.8	35.3	38.9	42.5	46.3

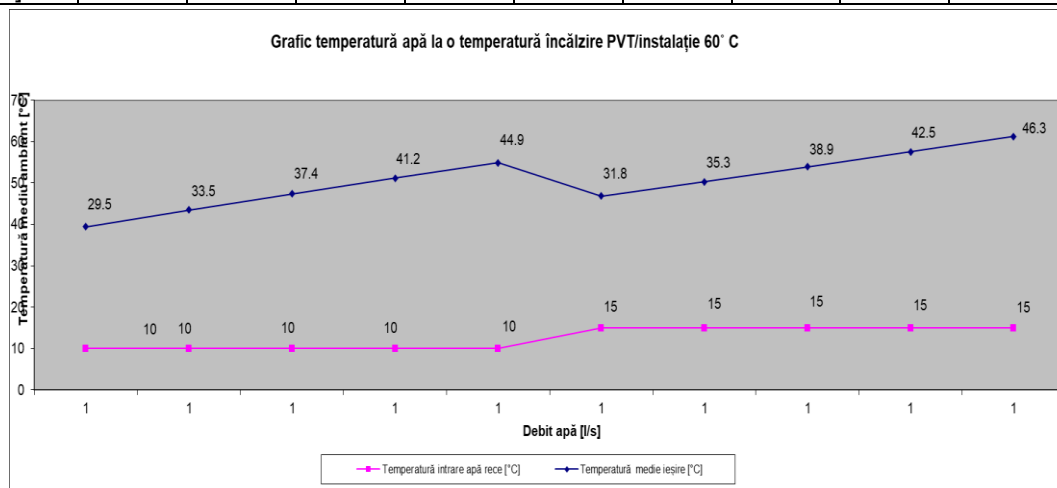


Figura 3.17. Grafic comparativ temperatură ieșire apă pentru $Q_{apă} = 1,00$ [l/sec]

Caz. 1.6: Analiza valorilor temperaturii apei la ieșirea din instalația de răcire pentru cele 5 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalația de răcire (după realizarea echilibrului termic dintre PVT, mediul ambiant și țeava de Cu):

- valoarea debitului masic = 1.50 litri/sec
- cele 2 valori ale temperaturii apei la intrarea în instalație (10°C și 15°C)

Tabel 9. temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 1,50$ [l/sec]

Parametru	Model 41	Model 42	Model 43	Model 44	Model 45	Model 46	Model 47	Model 48	Model 49	Model 50
Debit intrare apă rece [l/s]	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
T intrare apă rece [°C]	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
T instalație [°C]	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
T min ieșire [°C]	28.2	32.3	36.0	39.6	43.1	31.0	34.2	37.5	40.9	44.5
Tmax ieșire [°C]	29.7	33.4	37.3	41.1	45.0	31.8	35.4	39.0	42.7	46.4
T medie ieșire [°C]	28.8	32.8	36.6	40.3	43.9	31.3	34.7	38.1	41.7	45.3

Interpretarea datelor de ieșire:

Pentru $T_{ap\grave{a}} = 10^{\circ}\text{C}$ temperaturile medii la ieșire sunt mai mici decât pentru debite mai mici (0,80–1,00 l/s), ceea ce indică o răcire și mai intensă a panoului; creșterea temperaturii instalației determină creșterea temperaturii la ieșire și a puterii termice extrase într-un trend aproape linear; puterea termică extrasă crește masiv datorită debitului ridicat, în pofida scăderii ușoare a ΔT .

Ca și în seturile anterioare, $T_{ap\grave{a}} = 15^{\circ}\text{C}$ reduce puterea extrasă față de intrarea la 10°C , din cauza gradientului termic redus; diferența dintre cele două cazuri este de ordinul 16 kW – 23 kW.

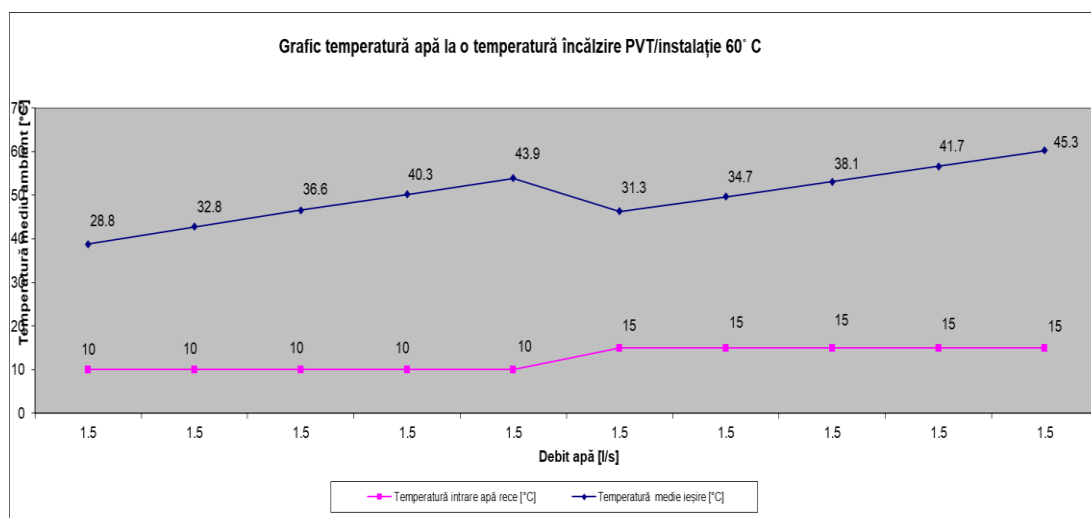


Figura 3.18. Grafic comparativ temperatură ieșire apă pentru $Q_{ap\grave{a}} = 1,50$ [l/sec]

3.4. Realizarea standului experimental pentru studiul răcirii PVT, culegerea datelor și interpretarea rezultatelor

Parametrii de Instalare și Configurare:

Unghiul de înclinare al PVT: unghiul de înclinare al panourilor fotovoltaice termice este vital pentru a maximiza cantitatea de radiație solară absorbită. Un unghi optim pentru producția de energie, care coincide cu unghiul de incidență perpendiculară a razelor solare (90°), va duce la o încălzire mai intensă și la o absorbție maximă de energie termică. Compromisul dintre producția de energie și controlul temperaturii este o considerație cheie în proiectare.

Locul de montaj (materialul acoperișului): materialul de sub panou influențează modul în care acesta se încălzește și se răcește [120].

- Terasă din beton: acest material are o capacitate termică ridicată, acumulând căldură pe parcursul zilei și radiind-o înapoi spre panou, inerția termică fiind mare. Acest fenomen reduce eficiența

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri
răcirii naturale a panoului deoarece suprafața de sub PVT are o temperatură ridicată și un timp mare de răcire.

- Acoperiș din țiglă metalică: metalul are o inerție mult mai mică decât betonul, în sensul în care încălzirea și cedarea de căldură se face într-un interval scurt de timp. În zilele însorite, un acoperiș metalic fierbinte poate transfera căldură prin convecție și radiație, contribuind la creșterea temperaturii panoului, dar și răcirea se face repede în lipsa incidenței solare [120].

Impactul temperaturii asupra producției de energie:

În sistemele fotovoltaice termice temperatura are un impact direct și negativ asupra eficienței producției de energie electrică. Acest fenomen este o consecință a fizicii materialelor semiconductoare din care sunt fabricate celulele solare. În mod specific, eficiența unui PVT scade pe măsură ce temperatura suprafeței acestuia crește peste valoarea optimă de 25°C, cunoscută sub numele de Standard Test Conditions (STC: iradiația solară = 1000 W/m², temperatura celulei = 25°C, spectrul solar = Air Mass 1.5).

Mecanismul de scădere a eficienței producției de energie electrică:

În momentul în care suprafața PVT se încălzește, proprietățile electronice ale materialului semiconductor (siliciul) se modifică. Creșterea temperaturii induce o agitație termică sporită în rețeaua cristalină de siliciu. Această agitație are două efecte principale:

- creșterea ratei de recombinare: electronii excitați de fotoni, care ar trebui să circule liber pentru a genera curent electric, intră mai ușor în coliziune cu golurile electronice din material. Acest proces de recombinare face ca purtătorii de sarcină să se anihileze reciproc înainte de a putea fi captați de contactele metalice ale celulei. Cu cât temperatura este mai mare, cu atât rata de recombinare crește, reducând numărul de electroni disponibili pentru a forma curent.

- scăderea tensiunii în circuit deschis (Voc): tensiunea în circuit deschis (Voc) este tensiunea maximă pe care o poate genera o celulă solară. Valoarea acesteia este puternic influențată de temperatură. Pe măsură ce temperatura crește, Voc scade, iar cum puterea electrică (P) este produsul dintre tensiune (V) și curent (I) (adică $P=V \times I$), o scădere a tensiunii duce direct la o scădere a puterii totale generate de panou.

Răcirea cu apă a panourilor fotovoltaice termice (PVT) este o metodă esențială pentru a menține temperatura de operare la un nivel optim, maximizând astfel atât producția de energie electrică, cât și recuperarea de energie termică. Sistemul de răcire, care constă dintr-un circuit de țevă de cupru cu diametrul interior de 22mm, fixat pe spatele panoului, funcționează ca un schimbător de căldură. Eficiența acestui proces depinde direct de debitul de masă al apei, adică de cantitatea de apă care circulă prin sistem pe unitatea de timp.

Alegerea debitului de masă depinde de obiectivele sistemului: maximizarea producției de energie electrică (debit mare) sau maximizarea producției de energie termică (debit mic). O strategie eficientă ar implica un control inteligent al debitului, care să ajusteze fluxul de apă în funcție de cerințele de moment (ex. debit mare în zilele cu insolație maximă pentru a proteja panoul și a optimiza producția electrică, urmat de un debit mic pentru a acumula apă caldă în perioadele de cerere termică).

Modul de curgere a apei este o decizie strategică în proiectarea, execuția și operarea unui sistem PVT. Curgerea continuă este preferabilă atunci când prioritatea este maximizarea producției electrice; pentru a menține temperatura suprafeței unui PVT la o valoare maximă de 25°C, temperatură la care producția de energie electrică este maximă, curgerea va fi continuă, indiferent de temperatura apei la ieșire.

Curgerea non-continuă este ideală pentru a maximiza recuperarea energiei termice. Dacă obiectivul îl reprezintă o cantitate de energie termică mare, soluția o reprezintă stagnarea apei sub suprafața PVT cât mai mult timp, astfel încât transferul de căldură să fie maxim. Un sistem hibrid, care combină cele două moduri de operare poate reprezenta soluția optimă pentru a echilibra ambele obiective

Standul experimental este format dintr-un panou fotovoltaic, sistemul de răcire cu apă și senzorii destinați culegerii și interpretării datelor.

Panoul fotovoltaic pe care s-au făcut măsurătorile este un panou monocristalin, cu puterea de 320W, tensiunea maximă de 35,19V și cu o valoare a intensității curentului de scurtcircuit de 9,83A (conform fișei tehnice a panoului fotovoltaic monocristalin de 320W).

Dimensiunile panoului:

- lungime = 1755 mm
- lățime = 1038 mm;
- greutate netă = 22,5 kg.

Sistemul de răcire cu apă este compus din țevă de cupru cu diametru de 22mm prin care circulă apă curentă.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Scopul pentru care a fost construit acest stand experimental este dat de studierea comportării panoului, astfel:

- îmbunătățirea eficienței panoului fotovoltaic: panourile fotovoltaice își reduc eficiența pe măsură ce temperatura lor crește. Răcirea activă cu apă poate menține temperatura panoului la un nivel optim, ceea ce contribuie la îmbunătățirea performanței generale a acestuia;

- validarea conceptului de răcire termică: testarea unui sistem de răcire bazat pe țevi de cupru permite validarea teoretică a modelelor care sugerează că extragerea căldurii de pe spatele panoului duce la un randament energetic mai bun;

- obținerea de date experimentale: acest stand este util pentru colectarea datelor privind fluxul de căldură, temperatura panoului, eficiența electrică a panoului în condiții de temperatură controlată și variabilă, precum și modul în care aceste variabile sunt influențate de debitul și temperatura apei de răcire.

Obiectivele programului experimental: determinarea eficienței termice și electrice a panoului:

- eficiența electrică: monitorizarea impactului temperaturii asupra producției de energie electrică. Se urmărește menținerea temperaturii optime a panoului pentru a maximiza conversia radiației solare în energie electrică;

- eficiența termică: măsurarea căldurii extrase de apa de răcire pentru a evalua eficiența sistemului de răcire. Se urmărește cuantificarea exactă a energiei termice eliminate din panou și cum variază aceasta în funcție de debitul de apă;

Evaluarea efectului temperaturii apei și al debitului asupra performanței panoului:

- se investighează modul în care modificările temperaturii apei de răcire (10°C în acest caz) și diferite debite influențează transferul de căldură și eficiența panoului.

Scopul este de a găsi combinația optimă de temperatură și debit pentru a maximiza randamentul energetic global.

Studierea comportamentului panoului în condiții reale de mediu:

- experimentul are ca obiectiv testarea sistemului în diverse condiții de radiație solară (de exemplu, în diferite ore ale zilei), pentru a observa fluctuațiile de temperatură și impactul acestora asupra performanței panoului și a sistemului de răcire.

Optimizarea designului sistemului de răcire:

- optimizarea designului sistemului de răcire pe baza datelor colectate și ajustarea - plasarea acestora pe spatele panoului, pentru a obține un transfer de căldură cât mai eficient;

- ajustarea distanței dintre țevi, grosimea lor și chiar înlocuirea materialului în cazul în care se găsesc alternative mai eficiente din punct de vedere termic.

Integrarea funcționalității de cogenerare:

- pe lângă producerea de electricitate, căldura extrasă de sistemul de răcire poate fi folosită pentru alte aplicații, precum încălzirea apei pentru uz casnic sau industrial, transformând astfel panoul fotovoltaic într-un sistem de panou fotovoltaic termic (PVT).

În concluzie, standul experimental are ca scop principal investigarea eficienței termice și electrice a unui panou fotovoltaic termic atunci când este răcit activ, pentru a îmbunătăți performanțele acestuia. De asemenea, permite explorarea potențialului de cogenerare și oferă date valoroase pentru dezvoltarea unor sisteme mai eficiente de răcire a panourilor fotovoltaice, ceea ce poate contribui la creșterea durabilității și performanței lor pe termen lung.

Proiectarea și dimensionarea standului experimental

Captarea căldurii: panourile fotovoltaice convertesc radiația solară în energie electrică, dar o mare parte din energie este transformată în căldură. Acest lucru poate duce la supraîncălzirea panoului, ceea ce scade eficiența de conversie a energiei solare în electricitate. Sistemul de răcire are scopul de a extrage această căldură și de a menține temperatura panoului cât mai scăzută posibil.

Răcirea cu ajutorul apei: sistemul de răcire din țevă de cupru cu diametrul interior de 22 mm este lipit pe spatele panoului, în contact direct cu suprafața acestuia. Apa rece, cu o temperatură de 10°C la intrare, circulă prin sistemul de răcire și preia căldura de la panoul fotovoltaic prin conducție termică. Cuprul este un material cu o conductivitate termică foarte bună, ceea ce îl face ideal pentru acest tip de aplicații.

Componente și funcționare:

Țevă de cupru: segmentele din țevă de cupru cu $\varnothing=22$ mm sunt poziționate strategic pe spatele panoului, în serpentină, acoperind cât mai mult din suprafața acestuia și asigurând un contact cât mai mare. Cu cât suprafața de contact dintre sistemul de răcire și panou este mai mare, cu atât va fi mai eficient transferul de căldură și realizarea echilibrului termic.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Transferul termic: apa rece curge prin tuburi și, datorită diferenței de temperatură dintre apa de 10°C și panoul fotovoltaic supraîncălzit, căldura se transferă de la panou la apă. Temperatura apei crește treptat pe măsură ce aceasta preia căldura de la panou.

Circulația apei: sistemul este conectat la un circuit de circulare a apei. Apa care a preluat căldura de la panou este evacuată din tuburi și trimisă către un sistem de răcire extern (de exemplu, un radiator sau un rezervor de apă cu schimbător de căldură) unde este răcită din nou și reintrodusă în sistem. Acest lucru asigură un flux continuu de apă rece, apă care are rolul de a asigura răcirea continuă a panoului.

Controlul temperaturii: sistemul poate avea senzori de temperatură care monitorizează atât temperatura panoului, cât și a apei. Dacă temperatura apei crește prea mult, aceasta poate fi redirecționată către un sistem de răcire mai eficient, pentru a menține fluxul de apă la o temperatură optimă.

Avantaje ale sistemului:

Creșterea eficienței panoului fotovoltaic: menținerea unei temperaturi mai scăzute a panoului crește eficiența conversiei energiei solare în energie electrică.

Posibilitatea utilizării apei încălzite: apa care se încălzește în urma procesului poate fi reutilizată pentru alte scopuri (de exemplu, pentru preîncălzirea apei menajere).

Longevitatea panoului: răcirea activă ajută la prelungirea duratei de viață a panourilor, deoarece temperaturile ridicate pot degrada componentele în timp.

Factori de luat în considerare:

- debit și temperatură: debitul apei se reglează și se monitorizează temperatura acesteia în vederea optimizării răcirii; dacă viteza de curgere a apei este prea mică, prin timpul lung petrecut în sistemul de răcire crește foarte mult temperatura, iar eficiența de răcire scade;

- izolația termică: un strat de izolație termică pe spatele sistemului de răcire poate preveni pierderea căldurii spre mediu și poate îmbunătăți transferul de căldură către apă;

- costuri: adăugarea unui astfel de sistem de răcire poate crește costurile inițiale, dar beneficiile pe termen lung în creșterea eficienței pot compensa aceste costuri.

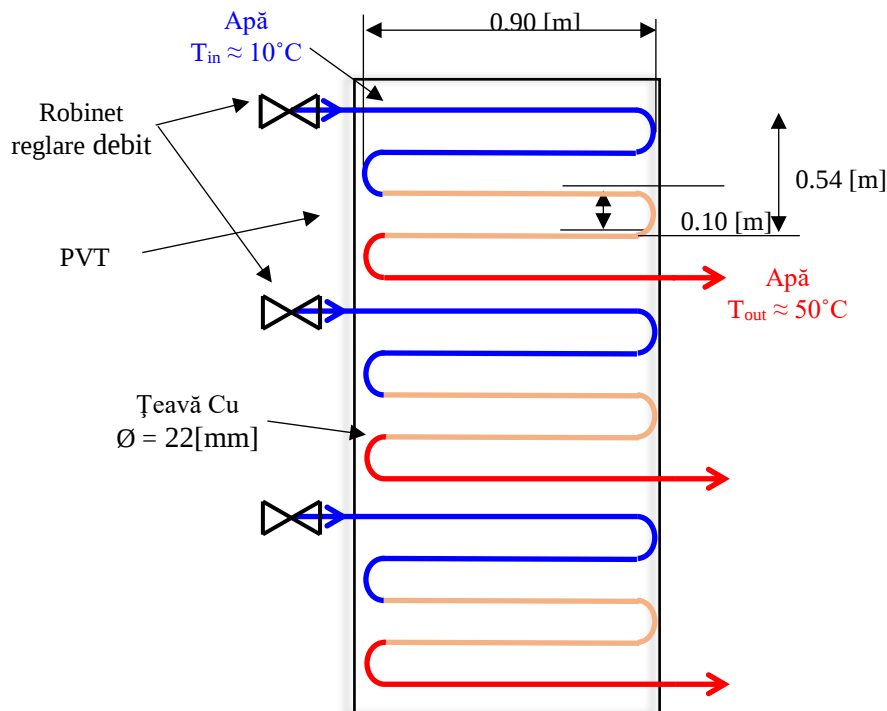


Figura 5.1. Stand experimental – schema de principiu al sistemului de răcire PVT

Cantitatea de energie electrică și termică, produsă de panourile fotovoltaice termice, este direct proporțională cu soluția tehnică adoptată pentru sistemul de răcire, cantitatea de apă recirculată și viteza apei. Aceste valori de intrare conduc la dimensionarea sistemului de pompare, al cărui necesar de energie electrică nu trebuie să depășească energia recuperată prin răcirea PVT. De asemenea, prea multă apă duce la creșterea greutateii PVT, respectiv la creșterea presiunii asupra panourilor fotovoltaice.

Acesta este unul dintre motivele pentru care diametrul țevelor nu trebuie să depășească valoarea de 22 mm , iar panourile fotovoltaice au fost împărțite în 3 zone de răcire.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Pentru ca întregul sistem să fie eficient și producția maximă de energie electrică și termică, răcirea cu apă trebuie făcută cu ajutorul unei pompe, cu intrarea apei reci în partea superioară sau inferioară a PVT, în funcție de înclinarea panoului.

Cantitatea de căldură extrasă din PVT va fi utilizată pentru preîncălzirea apei calde menajere, încălzirea spațiilor clădirii sau alte nevoi interne, așa cum este prezentat în această lucrare.

Eficiența sistemului de răcire prin dimensionarea corectă a volumului de apă, debitul, lungimea și secțiunea conductelor și dimensiunea pompei este un factor important în dezvoltarea sistemului de răcire. Prin urmare, raportul dintre cantitatea de căldură extrasă și transferată schimbătorului de căldură și energia consumată trebuie să fie pozitiv.

Răcirea cu apă a panourilor fotovoltaice termice are 2 avantaje majore:

- crește producția de energie electrică prin aducerea parametrilor PVT la parametri nominali de funcționare, în special la temperatura de lucru de 25 °C;
- căldura recuperată de sistemul de răcire este transportată, prin utilizarea apei și a sistemului de conducte din Cu.

În plus față de varianta constructivă, viteza apei prin circuit și masa totală de lichid care trebuie să fie în contact direct cu suprafața de răcit au fost luate în considerare la momentul t_0 .

Din analiza teoretică a rezultat faptul că varianta optimă este dată de tipul constructiv prezentat în figura 5.1: împărțirea suprafeței panoului fotovoltaic în 3 zone și răcirea individuală a fiecărei zone, cu ajutorul unui sistem din țevi de Cu, de 22 mm diametru, de formă sinusoidală.

În această variantă constructivă se va folosi o țevă de Cu cu diametrul interior de 22 mm, lungime de 18m. Volumul total de apă din sistemul de răcire este de 6,84 litri, iar debitul va fi ajustat pornind de la 0,015 litri/sec, până la 0,10 litri/sec, valori pentru care nu există riscul apariției trepidațiilor mecanice în sistemul de răcire al PVT, nu există riscul apariției de tensiuni suplimentare sau a fenomenului cunoscut ca "lovitură de berbec".

De asemenea, pentru eficiența răcirii PVT dar și pentru o variantă constructivă eficientă din punct de vedere tehnic și economic, intrarea apei se face pe o parte a panoului iar ieșirea apei preîncălzite se face pe partea cealaltă a panoului.

Serpentina, din punct de vedere funcțional, este formată din țevă circulară cu distanța de 0,10 m între trasee, iar fittingurile cotului sunt la 90°, de tip interior – exterior, cu grosimea de 1 mm, îmbinate prin lipitură la cald.

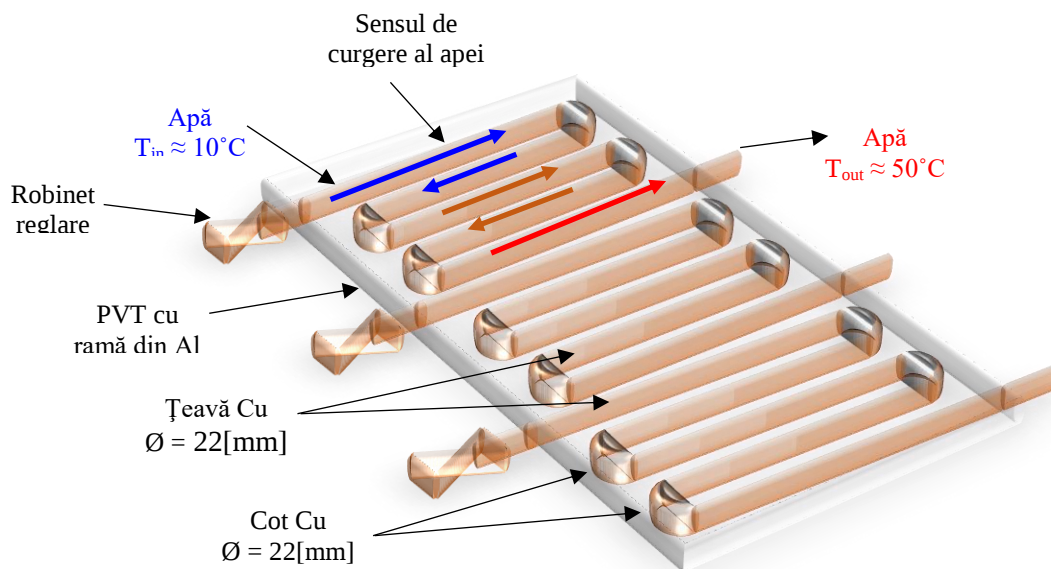


Figura 5.2. Stand experimental – vedere de ansamblu al PVT

Sistemul de răcire al PVT a fost fixat pe spatele panoului (figura 5.2.), de marginile acestuia, astfel încât, din punct de vedere constructiv pierderile de material să fie minime și cu costuri reduse. Sistemul de fixare direct pe marginile panoului nu mai necesită elemente de fixare suplimentare; un alt avantaj al prinderii direct de margini îl reprezintă posibilitatea mutării / translatării panoului fotovoltaic cu tot cu sistemul de răcire încorporat și fixarea acestuia pe noua poziție.

Sensul de curgere al apei prin sistemul de răcire este de sus în jos, curgerea făcându-se astfel în mod natural, consumul de energie al pompei fiind minim.

Realizarea standului experimental pentru un panou fotovoltaic termic răcit cu apă, utilizând un sistem de răcire format din conducte de cupru, cu diametrul de 22mm, s-a făcut în mai multe etape, astfel:

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

1. Proiectarea și dimensionarea generală a standului experimental:

Panoul fotovoltaic a fost montat într-o structură solidă pentru a simula condițiile reale de funcționare. Sistemul de răcire cu apă este format dintr-o rețea de țevi de cupru (22mm diametru interior, 18m lungime), care este în contact cu partea din spate a panoului fotovoltaic pentru a extrage căldura generată. S-au montat robineti pentru reglarea debitului care permit controlul fluxului de apă și ajustarea ratei de răcire în funcție de necesitățile experimentale.

Pompa de apă a fost înlocuită cu sistemul rețelei de distribuție a apei curente menajere, scopul experimentului fiind culegerea și analiza de date privind temperatura apei la ieșire, modul de răcire al PVT, zonele care sunt acoperite de către sistemul de răcire și cantitatea de căldură extrasă de la panou.

2. Materiale necesare:

Panou fotovoltaic: a fost identificat un panou de mici dimensiuni pentru teste inițiale cu puterea de 320 W. Țeava de cupru are diametrul de 22 mm și lungimea totală de 18 m. Aceasta a fost modelată în formă de serpentină, montată pe spatele panoului și împărțită în 3 secțiuni distincte. Robinetii de reglare au fost poziționați pe cele 3 intrări ale sistemului de răcire pentru a permite reglarea debitului de apă, sau pentru a opri circulația apei.

Senzorii pentru culegerea datelor și pentru măsurarea temperaturilor au fost montați pe suprafața panoului fotovoltaic, pe spate și intrarea / ieșirea din sistemul de răcire; de asemenea se vor măsura și alți parametri relevanți.

3. Construcția standului experimental:

Montarea panoului fotovoltaic: panoul s-a poziționat pe o structură solidă din metal, fixat cu șuruburi de prindere, într-o poziție care să permită expunerea la soare, simulând condiții reale – o înclinație de aproximativ 35°. Instalarea sistemului de răcire: țeava de cupru a fost poziționată pe spatele panoului fotovoltaic, în contact direct cu acesta. Soluția optimă a fost execuția unei serpentine de țeavă pe întreaga suprafață a panoului pentru a asigura un contact bun și o distribuție uniformă a răcirii. S-au montat robineti pe țeava de cupru pentru reglarea debitului masic al apei; aceștia au rolul de a permite modificarea debitului de apă și astfel reglarea ratei de răcire.

Sistemul de circulație a apei: sistemul de țevi a fost conectat la sistemul de alimentare cu apă curentă a rețelei publice, asigurând astfel cantitatea și presiunea optimă. Apa va fi pompată prin țeava de cupru, extrăgând căldura din panou și deversată către sistemul pluvial al terasei.

Instrumentație: senzori de temperatură și debit instalați pentru a măsura eficiența răcirii. Temperatura panoului fotovoltaic și a apei la intrare și ieșire va fi monitorizată.

4. Considerații tehnice

Eficiența răcirii: scopul răcirii panoului fotovoltaic este de a reduce temperatura acestuia și astfel de a îmbunătăți eficiența conversiei energiei solare în electricitate. Monitorizarea temperaturii și a puterii generate înainte și după aplicarea sistemului de răcire a oferit o imagine clară asupra impactului răcirii.

Debit ajustabil: prin intermediul robinetilor și al debitmetrului s-a ajustat fluxul de apă pentru a experimenta cu diferite rate de răcire și a identifica cea mai eficientă soluție, data fiind directă proporționalitate dintre debitul de apă și cantitatea de căldură extrasă.

5. Analiză și interpretare a datelor

După ce standul a fost pus în funcțiune, s-au putut efectua teste în diferite condiții de iradiere solară și temperaturi exterioare. Datele obținute au fost prelucrate în vederea evaluării eficienței sistemului de răcire și a impactului asupra performanței panoului fotovoltaic.

Standul experimental a facilitat înțelegerea modului în care răcirea activă cu apă poate îmbunătăți performanța panourilor fotovoltaice termice, permițând reglarea condițiilor de testare pentru obținerea celor mai bune rezultate și eficientizarea întregului sistem.

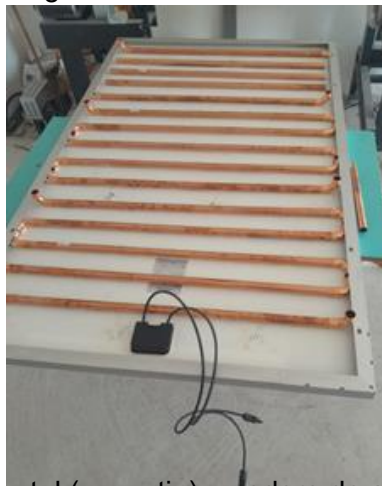


Figura 5.4. Stand experimental (execuție) – vedere de ansamblu al PVT

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Așa cum se observă în figura 5.4, îmbinările dintre țeava de Cu și coturile din Cu s-au executat prin lipire la cald, pentru o foarte bună etanșare a sistemului. De asemenea, metoda lipirii la cald a întregului sistem de răcire asigură un grad înalt de rigiditate a acestuia, transformând sistemul într-un singur modul.

Principalul avantaj al acestei soluții constructive îl reprezintă stabilitatea întregului complex, indiferent de viteza (debitul) apei prin țeava de Cu; de asemenea rigiditatea sistemului are rolul de a atenua eventualele „lovituri de berbec” sau eventualele trepidații generate de curgerea nonliniară a apei.



Figura 5.5. Stand experimental (execuție) – vedere de ansamblu al PVT



Figura 5.6. Fixarea sistemului de răcire

Sistemul de răcire din țeavă de cupru a fost astfel proiectat și executat încât să nu fie necesar un sistem de prindere suplimentar. Așa cum este prezentat în figura 5.6 lungimea segmentului principal de țeavă a fost calculată astfel încât serpentinele sistemului și coturile din cupru fie așezate sub rama din aluminiu a panoului fotovoltaic. Prin sudarea țevelor din cupru întregul sistem se rigidizează și rezultă o priză fixă, fără deplasări accidentale.

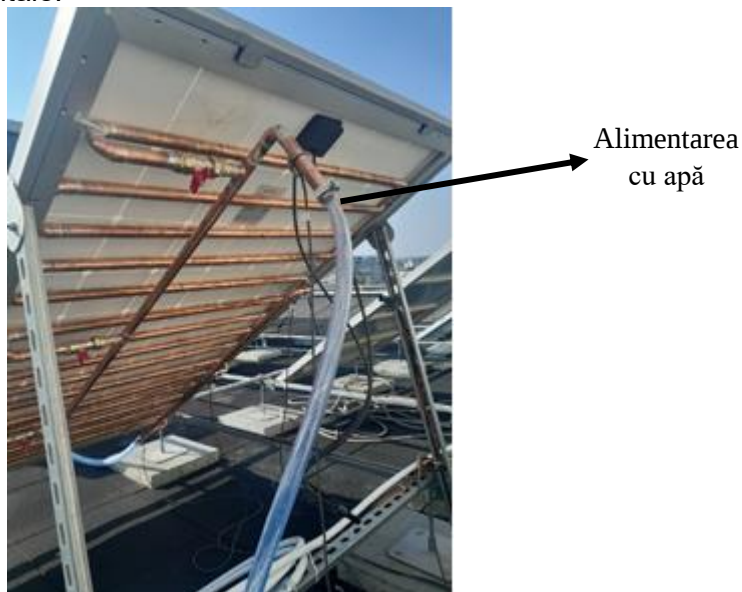


Figura 5.7. Standul experimental pe poziție – vedere din spate

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Pe poziția de lucru sistemul de răcire a fost cuplat la alimentarea cu apă curentă prin spatele panoului, astfel încât distanța dintre panou și sistemul de țevi de cupru să fie cât mai mică. Micșorând distanța dintre PV și sistemul de răcire se realizează un ansamblu care poate fi instalat pe orice suprafață acoperiș, terasă etc), asigurându-se spațiul necesar dintre sistemul de fixare și PVT.

Un alt rol al modului de amplasare al sistemului de răcire îl are monitorizarea comportării schimbului de căldură dintre PV și sistemul de răcire în mediul înconjurător, mediu care are o temperatură proprie (apropiată de temperatura PVT și cu care realizează schimb de căldură) și care influențează cantitatea de căldură cedată de către PV sistemului de răcire.

De asemenea, pentru o culegere eficientă a datelor și pentru a crește acuratețea interpretării acestora, pe fiecare segment al sistemului de răcire (din cele 3 care compun sistemul) s-a montat câte un robinet, cu rol de reglare al debitului sau chiar oprirea curgerii lichidului de răcire pe un segment anume.

În mod real, în cazul unui sistem real și integrat într-un PVT, lichidul de răcire poate fi înlocuit cu antigel (cu protecție împotriva înghețului) iar circulația lichidului va fi asigurată de către o pompă de circulație de mică putere.

Monitorizarea comportării panoului fotovoltaic, al sistemului de răcire și transferul căldurii de la PV la sistemul de răcire se face prin intermediul senzorilor de temperatură montați pe țeava de cupru.

Așa cum este prezentat în figura 5.8. s-au montat 4 senzori termici pe componentele sistemului de răcire, astfel:

- un senzor pe țeava principală de alimentare cu apă rece, cu rol de monitorizare a temperaturii apei la intrarea în instalație;
- un senzor pe țeava principală de evacuare a apei încălzite, după ce a preluat debitul de la toate cele 3 secțiuni, cu rol de monitorizare a evoluției cantității de căldură extrasă de la PVT, dar și evoluția temperaturii apei la ieșire.



Figura 5.8. Sistemul de senzori

O dată cu realizarea schimbului de căldură dintre suprafața PV și sistemul de răcire, în regim nestaționar, temperatura apei la ieșirea din sistem începe să scadă treptat, direct proporțional cu cantitatea de căldură preluată de la PV, iar senzorul are exact rolul de a monitoriza această evoluție a temperaturii.

- câte un senzor la ieșirea de pe primele 2 segmente ale sistemului de răcire pentru monitorizarea evoluției temperaturii apei la ieșirea din segment.

Acești 2 senzori au rolul de a monitoriza evoluția încălzirii PVT pe secțiuni, dar și pentru studii viitoare: comportamentul întregului ansamblu dacă răcim întregul PVT, 1/3 din PVT sau 2/3 din PVT și modul în care sunt influențate zonele adiacente.



Figura 5.9. Standul experimental pe poziție – vedere din față

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Sistemul de răcire fixat pe spatele panoului și legăturile realizate la alimentare și evacuare tot prin spatele panoului permit expunerea la soare a întregii suprafețe a PVT, fără interferențe și fără a afecta procedura de prindere de sistemul de fixare (fig. 5.9).

De asemenea întregul sistem fixat prin spatele panoului oferă posibilitatea conectării sistemelor de răcire între ele, realizându-se, în felul acesta, un sistem complex format din panouri fotovoltaice, sistemul de țevi de cupru, pompa de circulație, schimbătorul de căldură sau rezervor de păstrare a apei preîncălzite și lichidul de răcire (apa).

Valori extrase experimental prelucrarea și interpretarea rezultatelor

În perioada mai – septembrie 2025 s-au făcut măsurători și analize privind evoluția cantității de căldură extrasă de către sistemul de răcire de la PV. Pentru întreaga perioadă s-au cules date cu privire la încălzirea PVT.

Valori extrase: **luna AUGUST – ziua 1** (cantitate de energie termică extrasă $Q_{\text{total}} = 15.3 \text{ kWh}$)

Tabel 5.1: Evoluția temperaturii apei la ieșirea din sistemul de răcire (ziua 1) ($T_{\text{apă_IN}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Ora [h]	$T_{\text{beton}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{PV}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{apă_OUT}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{PV}} \text{ după răcire } [^{\circ}\text{C}]$
08.00	17	17	18	17
09.00	17	20	19	20
10.00	18	24	19	24
11.00	22	38	22.4	32
12.00	28	51	27.6	38
13.00	32	55	29.6	39
14.00	39	57	30.4	39.5
15.00	44	60	31.6	40
16.00	47	56.5	30	40
17.00	46	56	31	39.5
18.00	45	55	29.6	38.5
19.00	45	55	29.2	38

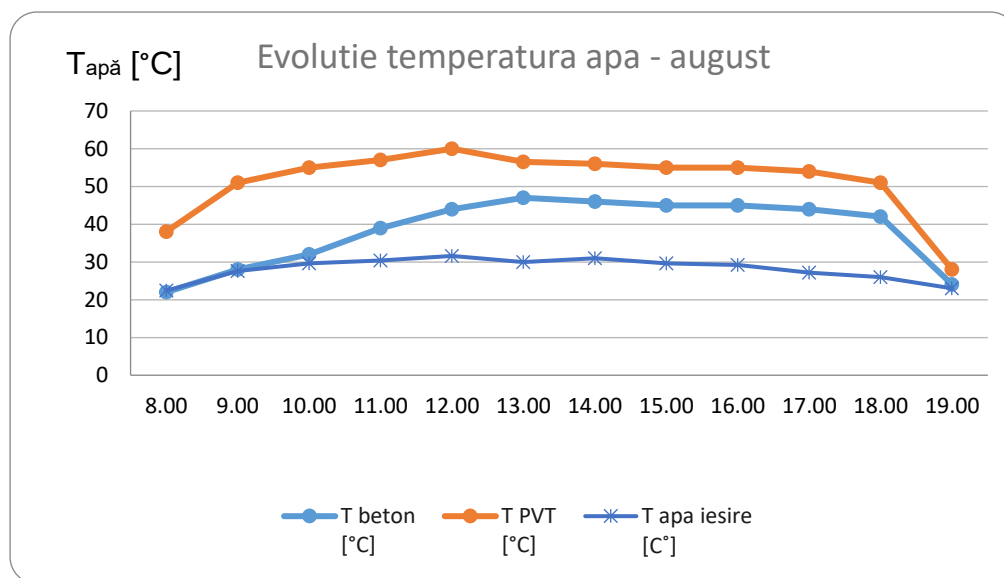


Figura 5.12: Evoluția temperaturii apei la ieșirea din sistemul de răcire (ziua 1)

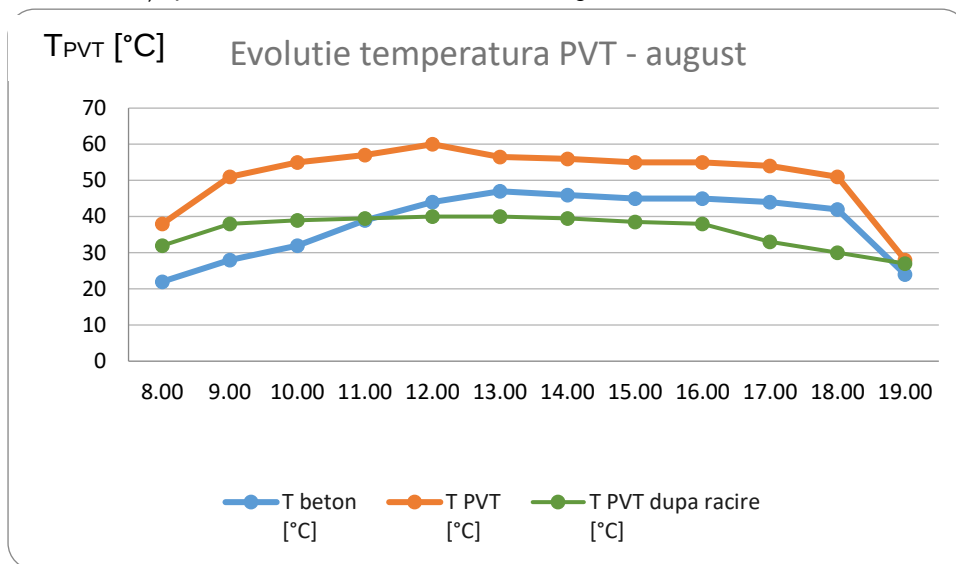


Figura 5.13: Evoluția temperaturii PVT (ziua 1)

Luna AUGUST – ziua 2 (cantitate de energie termică extrasă $Q_{total} = 15.7$ kWh) ($T_{apă_IN} = 15$ C°)

Tabel 5.2: Temperatura PVT, după răcire, în intervalul orar 11.00 – 15.00

Nr. crt.	Ora	T_{PVT} [°C]	T_{PVT} după răcire [°C]	Reducere [°C]
1	11.00	38°C	32°C	-6°C
2	12.00	51°C	38°C	-13°C
3	13.00	55°C	39°C	-16°C
4	14.00	57°C	39.5°C	-17.5°C
5	15.00	60°C	40°C	-20°C

Din punct de vedere al performanței electrice, reducerea temperaturii de la 60°C la 40°C conduce la scăderea penalizării termice de la aproximativ 14% la 6 %. Rezultă un câștig estimat de 7%–8% în producția electrică în intervalele de maximă iradiere. Acest beneficiu este dublat de recuperarea energiei termice sub forma apei încălzite la 30°C–32°C, utilizabilă pentru preîncălzire în aplicații de apă caldă menajeră sau ca sursă pentru sisteme cu temperatură joasă.

Evaluare tehnică:

- lungimea sistemului de răcire de 18 m este adecvată pentru un contact termic eficient;
- valoarea debitului de 0.015 l/s este corect dimensionat pentru un regim staționar;
- sistemul este stabil și nu prezintă supraîncălzire hidraulică.

Tabel 5.3: Evoluția temperaturii apei la ieșirea din sistemul de răcire (ziua 2) ($T_{apă_IN} = 16$ C°)

Ora [h]	T_{beton} [C°]	T_{PV} [C°]	$T_{apă_OUT}$ [C°]	T_{PV} după răcire [C°]
08.00	18	18	18	17
09.00	17	20	19	20
10.00	18	24	19	24
11.00	22	38	22	32
12.00	28	51	26.8	37
13.00	32	56	31	38
14.00	40	58	31.5	39
15.00	45	61	32	39.5
16.00	47	57	31	39
17.00	50	57	31	39
18.00	51	56.5	30.4	38
19.00	51	55	29.7	37

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

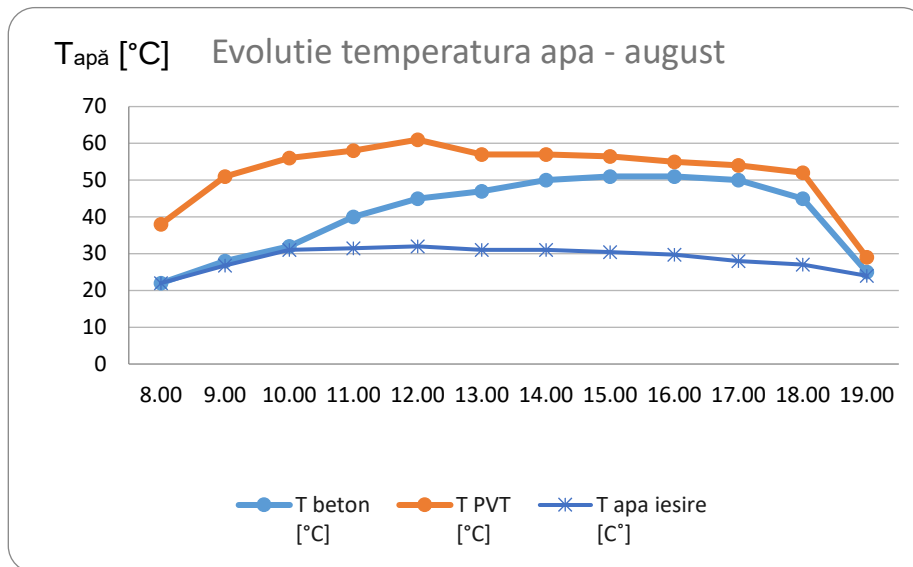


Figura 5.14: Evoluția temperaturii apei la ieșirea din sistemul de răcire (ziua 2)

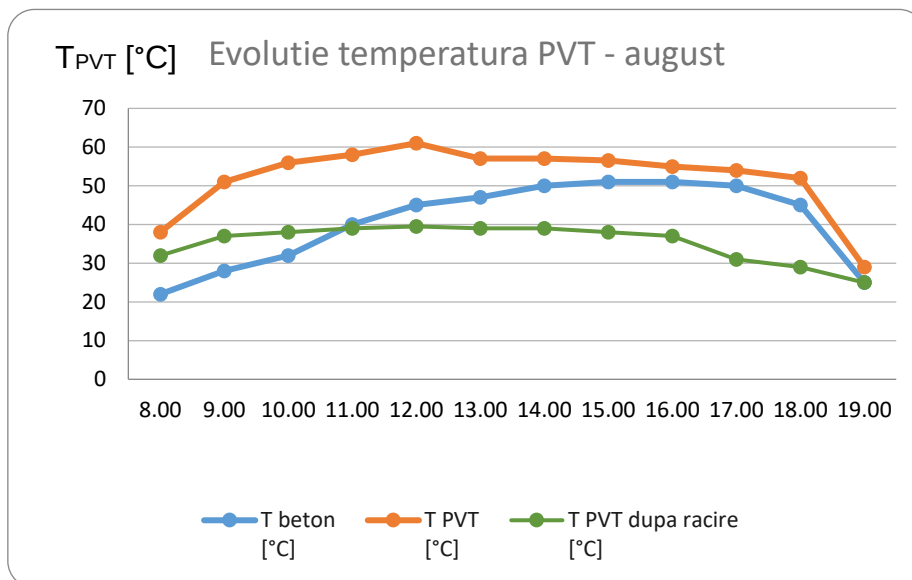


Figura 5.15: Evoluția temperaturii PVT (ziua 2)

Luna SEPTEMBRIE – ziua 1 (cantitate de energie termică extrasă $Q_{total} = 11.1 \text{ Wh}$) ($T_{apă_IN}=15 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Tabel 5.5: Evoluția temperaturii apei la ieșirea din sistemul de răcire

Ora [h]	T _{beton} [°C]	T _{PV} [°C]	T _{apă_OUT} [°C]	T _{PV după răcire} [°C]
08.00	17	17	16	16
09.00	19	20	16	16
10.00	22	24	18	20
11.00	25	28	21.6	25.8
12.00	29	34	23.4	29.4
13.00	33	39	28.2	33.4
14.00	37	45	33	36
15.00	39	52	36.2	40.2
16.00	41	55	35	42
17.00	42	53	34.2	39
18.00	40	48	32.2	35.8
19.00	38	43	28.8	31.5

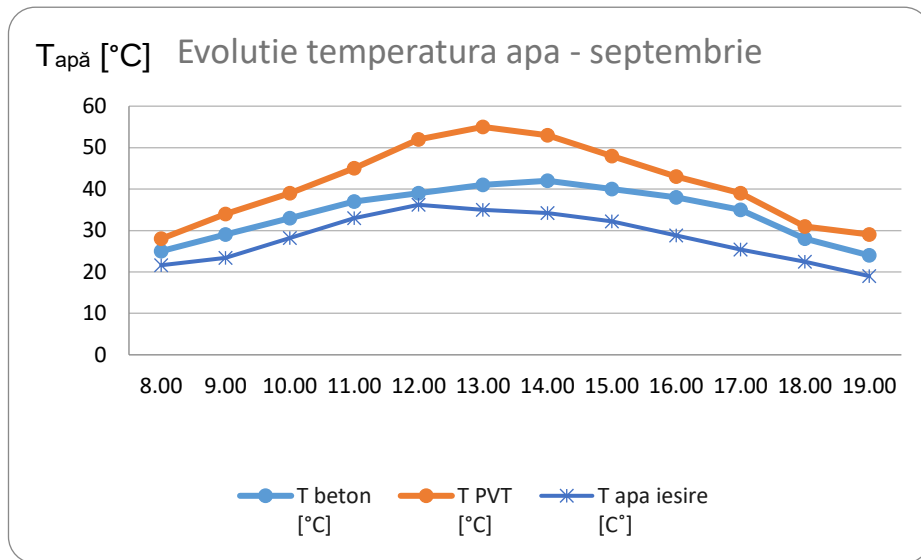


Figura 5.16: Evoluția temperaturii apei la ieșirea din sistemul de răcire (ziua 1)

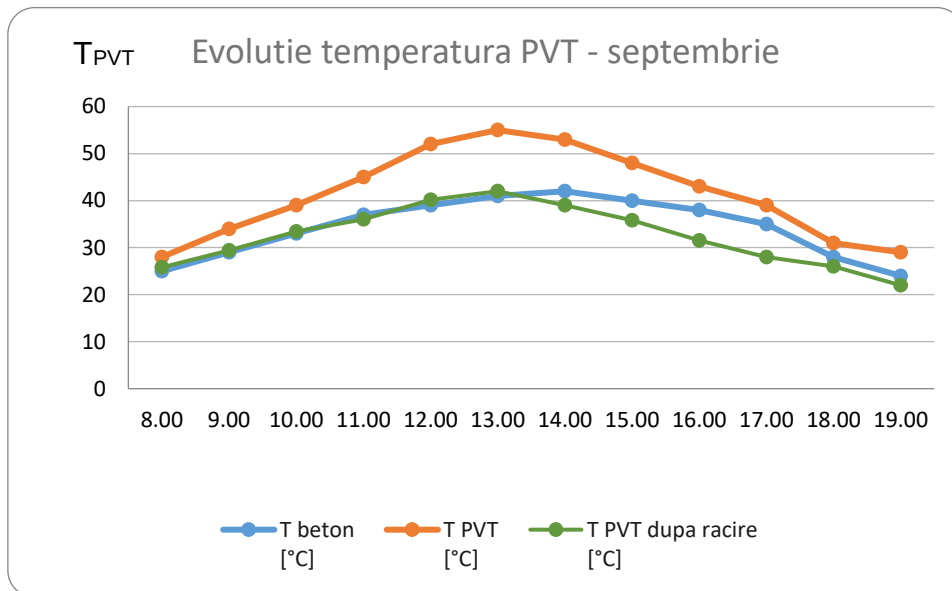


Figura 5.17: Evoluția temperaturii PVT (ziua 1)



Figura 5.18: T_{PVT} înainte de răcire



Figura 5.19: T_{PVT} după de răcire



Figura 5.20: $T_{ap\grave{a}}$ la ieșirea din sistemul de răcire

3.6. Realizarea unui soft dedicat pentru studiul răcirii PVT

Contribuția software reprezentată de aplicația Cool-PVT constituie una dintre realizările principale ale cercetării. Aplicația a fost dezvoltată integral în Microsoft Visual Studio utilizând limbajul C#, fiind concepută ca un instrument complet de proiectare și analiză a sistemelor fotovoltaice și fotovoltaice termice.

Software-ul integrează trei module principale: primul modul permite dimensionarea electrică completă a sistemelor fotovoltaice, calculând numărul necesar de panouri, configurația optimă a șirurilor, dimensionarea invertorilor și a cablurilor, precum și secțiunile conductoarelor; al doilea modul realizează analiza economică pe o perioadă de 20 de ani, luând în considerare rata inflației, evoluția prețurilor la energie și programele de finanțare guvernamentale precum "Casa Verde"; al treilea modul, dedicat răcirii PVT, reprezintă nucleul inovator al aplicației.

O altă funcție a soft-ului o reprezintă calculul economic privind amortizarea investiției, după o analiză care ia în calcul toate datele de intrare (locatie, orientare PV, unghi de înclinare etc) și datele de ieșire (producția medie de energie a panourilor fotovoltaice și a sistemului fotovoltaic), pe o perioadă de 20 de ani.

Pagina de start a soft-ului este împărțită în 3 secțiuni, pe module și beneficiarul este îndrumat cu privire la pașii pe care trebuie să îi parcurgă în vederea obținerii de informații cât mai corecte, conform figurii 6.1. Pașii pe care trebuie să-i parcurgă utilizatorul sunt doar cu caracter informativ; în cazul în care utilizatorul aplicației nu intervine asupra unor date de intrare predefinite, soft-ul îl avertizează asupra neparcurgerii algoritmului în totalitate, dar asta nu înseamnă că datele de ieșire sunt eronate.

Acestea sunt calculate și puse la dispoziția utilizatorului în funcție de datele de intrare, atât cele predefinite de către aplicație, asupra cărora utilizatorul nu a intervenit, cât și funcție de datele modificate / introduse de către beneficiar.

În secțiunea 1 se găsește principala cheie de dimensionare a sistemului fotovoltaic (necesarul de energie) și logo-ul soft-ului CoolPV.

Datele de intrare: necesarul de energie poate fi calculat accesând una din cele 3 opțiuni:

1. consumul de energie estimat (kWh/lună);
2. numărul receptoarelor electrice pe care îi deține beneficiarul
3. puterea instalată/solicitată (kWp)

În vederea înregistrării valorii consumului de energie estimat sau puterea instalată/solicitată este de ajuns să se bifeze opțiunea dorită (bifarea radio-button-ului corespunzător opțiunii alese), se introduce o valoare numerică în text-box-ul atașat opțiunii și se validează valoarea prin apăsarea butonului OK.

Utilizatorul poate completa text-box-ul *Consum de energie estimat* cu valoarea totală a energiei, de pe factura de energie, sau o medie a consumului pe parcursul unui an de zile. Aceste date au rolul de a dimensiona cât mai eficient sistemul fotovoltaic, astfel încât să fie un raport cât mai bun între investiție și perioada de amortizare a investiției.

În secțiunea 2 utilizatorul va completa toate text-box-urile conform denumirii și conform cerințelor, completarea fiind validată prin schimbarea culorii numărului pasului/cerinței din roșu în verde, așa cum este prezentat în figura 6.2.

La pasul 7 programul recomandă o valoare a puterii minime a invertorului, dar decizia privind valoarea finală a puterii invertorului aparține utilizatorului, în funcție de nevoile sale și în funcție de proiectul sistemului fotovoltaic.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Dimensionare sistem fotovoltaic

Licenta soft Salva date Citire date Electric Racire PV/T Ajutor Autori

Dimensionare sistem fotovoltaic (CoolPV PRO)

1 Consum de energie estimat 1000 [kWh/luna] OK media facturilor dumneavoastră

2 Receptoare electrice

3 Putere instalata (solicitata)

Introduceti datele de proiectare: Completati si validati prin apasarea butonului OK

Nume beneficiar: []

Nume proiectant: []

Judet: [IASI] 2 Regiunea NE

Modalitatea de dimensionare: VARA VARA

Orientare panouri: SUD

Unghi inclinare fata de orizontala: 35° Inclinare optima =

Model panou fotovoltaic: PV1 policristalin 280

Validare date OK

7 Tip retea: Monofazat

8 Denumire inverter: Inverter 1.0 WLAN

Numar invertore: 1 [buc]

Putere inverter: [kW]

Verificare inverter: []

Consum energie lunar 1000 [kWh/luna]

Putere instalata [kWp] [kVA]

9 Editati datele economice - preturi [RON]:

Panou fotovoltaic: [RON]

Contor inteligent: [RON]

Inverter: [RON] ☐ Mentenanta inverter

Manopera: [RON]

Transport: [RON]

Materiale: [RON] ☐ Dosar prosumator

Sistem montaj: [RON] ☐ Priza pamant existenta

Pret kWh: [RON]

Inflatie: [%] recomandat 9.6% conform INS

10 Investitie totala: [RON]

dn care TVA (21%): [RON]

Calculator

Tip panou: []

Putere panou: []

Lungime panou: [m]

Latime panou: [m]

Suprafata panou: [mp]

Suprafata necesara: [mp]

Productie medie panouri fotovoltaice: [kWh / luna]

Productie medie sistem fotovoltaic: [kWh / luna]

Analiza financiara - amortizare [RON] - inflatie medie ponderata = 4.14% (conform INS)

Anul: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Racire PV

IESIRE

Copyright 2026 © Marius ALEXA, Valeriu-Sebastian HUDISTEANU, TUIASI, RO

Figura 6.1. Interfață soft Cool-PVT - Stabilirea necesarului de energie

După ce utilizatorul a introdus toate datele care reprezintă cel mai fidel condițiile proprii și modalitatea de dimensionare a sistemului fotovoltaic (calculul necesarului de energie electrică în funcție de gradul de independență energetică), acesta trebuie să valideze aceste date, ceea ce va duce la următorul pas din algoritmul de dimensionare. Validarea se face apăsând click-stânga butonul OK, amplasat imediat sub text-box-ul *Validare date* (figura 6.2).

După validarea datelor prin apăsarea butonului OK (în prealabil se recomandă revederea informațiilor introduse în câmpurile dedicate), se vor popula câmpurile tip text-box din SECȚIUNEA 3 cu date care țin strict de caracteristicile tehnice ale panourile fotovoltaice.

Dimensionare sistem fotovoltaic

Licenta soft Salva date Citire date Electric Racire PV/T Ajutor Autori

Dimensionare sistem fotovoltaic (CoolPV PRO)

1 Consum de energie estimat 1000 [kWh/luna] OK media facturilor dumneavoastră

2 Receptoare electrice

3 Putere instalata (solicitata)

Introduceti datele de proiectare: Completati si validati prin apasarea butonului OK

Nume beneficiar: TUIASI

Nume proiectant: TUIASI

Judet: Iasi 2 Regiunea NE

Modalitatea de dimensionare: ANUAL ANUAL

Orientare panouri: SUD

Unghi inclinare fata de orizontala: 35° Inclinare optima = 35°

Model panou fotovoltaic: PV5 monocristalin 310

Validare date OK

7 Tip retea: Trifazat

8 Denumire inverter: Inverter 10.0 WLAN

Numar invertore: 1 [buc]

Putere inverter: 10.0 [kW]

Verificare inverter: Mariti puterea sau numarul invertorilor

Consum energie lunar 1000 [kWh/luna]

Putere instalata 11.47 [kWp] 12.47 [kVA]

9 Editati datele economice - preturi [RON]:

Panou fotovoltaic: 930 [RON]

Contor inteligent: 700 [RON]

Inverter: 9000 [RON] ☐ Mentenanta inverter

Manopera: 5000 [RON]

Transport: 800 [RON]

Materiale: 2100 [RON] ☐ Dosar prosumator

Sistem montaj: 2500 [RON] ☐ Priza pamant existenta

Pret kWh: 1.1 [RON]

Inflatie: 9.9 [%] recomandat 9.6% conform INS

10 Investitie totala: [RON]

dn care TVA (21%): [RON]

Calculator

Tip panou: Monocristalin

Putere panou: 310

Lungime panou: 1.640 [m]

Latime panou: 0.992 [m]

Suprafata panou: 1.63 [mp]

Suprafata necesara: 60.19 [mp]

Productie medie panouri fotovoltaice: [kWh / luna]

Productie medie sistem fotovoltaic: [kWh / luna]

Analiza financiara - amortizare [RON] - inflatie medie ponderata = 4.14% (conform INS)

Anul: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Racire PV

IESIRE

Copyright 2026 © Marius ALEXA, Valeriu-Sebastian HUDISTEANU, TUIASI, RO

Figura 6.2. Dimensionarea sistemului fotovoltaic – soft Cool-PV1

Dimensionare sistem fotovoltaic

Licenta soft Salva date Citire date Electric Racire PV/T Ajutor Autori

Dimensionare sistem fotovoltaic (CoolPV PRO)

1 Consum de energie estimat 1000 [kWh/luna] OK media facturilor dumneavoastră

2 Receptoare electrice

3 Putere instalata (solicitata)

Introduceti datele de proiectare: Completati si validati prin apasarea butonului OK

Nume beneficiar: TUIASI

Nume proiectant: TUIASI

Judet: Iasi 2 Regiunea NE

Modalitatea de dimensionare: ANUAL ANUAL

Orientare panouri: SUD

Unghi inclinare fata de orizontala: 35° Inclinare optima = 35°

Model panou fotovoltaic: PV5 monocristalin 310

Validare date OK

7 Tip retea: Trifazat

8 Denumire inverter: Inverter 10.0 WLAN

Numar invertore: 1 [buc]

Putere inverter: 10.0 [kW]

Verificare inverter: OK

Consum energie lunar 1000 [kWh/luna]

Putere instalata 11.47 [kWp] 12.47 [kVA]

9 Editati datele economice - preturi [RON]:

Panou fotovoltaic: 930 [RON]

Contor inteligent: 700 [RON]

Inverter: 9000 [RON] ☐ Mentenanta inverter

Manopera: 5000 [RON]

Transport: 1147 [RON]

Materiale: 2100 [RON] ☐ Dosar prosumator

Sistem montaj: 2500 [RON] ☐ Priza pamant existenta

Pret kWh: 1.1 [RON]

Inflatie: 9.9 [%] recomandat 9.6% conform INS

10 Investitie totala: 13939 [RON]

dn care TVA (21%): 13939 [RON]

Calculator

Tip panou: Monocristalin

Putere panou: 310

Lungime panou: 1.640 [m]

Latime panou: 0.992 [m]

Suprafata panou: 1.63 [mp]

Suprafata necesara: 60.19 [mp]

Productie medie panouri fotovoltaice: [kWh / luna]

Productie medie sistem fotovoltaic: [kWh / luna]

Analiza financiara - amortizare [RON] - inflatie medie ponderata = 4.14% (conform INS)

Anul: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Racire PV

IESIRE

Copyright 2026 © Marius ALEXA, Valeriu-Sebastian HUDISTEANU, TUIASI, RO

Figura 6.3. Dimensionarea sistemului fotovoltaic – soft Cool-PVT

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Câmpul *Tip panou* se va popula cu tipul panoului fotovoltaic (monocristalin, policristalin, amorf, hibrid), această caracteristică fiind citită din documentația tehnică a producătorului.

Câmpul *Putere panou* se va popula cu puterea acestuia, dată în [Wp].

Câmpurile *Lungime panou* și *Latime panou* se vor popula cu dimensiunile unui singur panou fotovoltaic, preluate din documentația tehnică a producătorului și sunt date în [m].

Valoarea din câmpul *Suprafața panou* este dată de produsul din lungime (L_{PV}) și lățime (l_{PV}), în [mp], după formula:

$$S_{PV} = L_{PV} \cdot l_{PV} \text{ [mp];}$$

Câmpul *Eficiența conversie* se populează cu valoarea randamentului panoului fotovoltaic, așa cum mai este cunoscut în literatura de specialitate, iar valoarea randamentului este preluată din documentația tehnică a producătorului.

Randamentul panoului fotovoltaic are și el, la rândul său, un rol esențial în determinarea cantității de energie electrică produsă, în final, de întregul sistem fotovoltaic.

Nr. necesar panouri in sistem: calculul producției de energie electrică se face după valoarea energiei electrice produse de 1 mp de panou fotovoltaic, dar în relație directă cu intensitatea radiației solare dintr-o anumită zonă.

P. instalata totala reprezintă puterea tuturor panourilor fotovoltaice, în kW și este dată de suma puterii instalate a tuturor panourilor fotovoltaice:

$$P_{i \text{ total}} = \sum_{i=1}^n P_{PV i} ;$$

Suprafața necesară reprezintă suprafața minim disponibilă pentru instalarea tuturor panourilor fotovoltaice.

Începând cu anul 1992, indicii mediu al prețurilor unui anumit an se determină ca medie aritmetică simplă a indicilor lunari din acel an, calculați față de aceeași bază (octombrie 1990=100).

Rata anuală a inflației se calculează scăzând 100 din indicii anual al prețurilor de consum, așa cum este prezentat pe site-ul Institutului Național de Statistică (INS).

După activarea checkbox-ului asimilat datelor economice, se pot introduce valorile numerice ale materialelor, manoperei etc, inclusiv prețul de vânzare al unui kWh. Calculul, perioada de recuperare și nivelul de recuperare al investiției se face în funcție de valorile numerice introduse aici.

Dimensionarea electrică a unui sistem fotovoltaic cu ajutorul Cool-PVT

În pagina principală a aplicației numerice se introduce același sistem fotovoltaic, cu aceleași caracteristici tehnice, astfel încât să poată fi comparate datele de ieșire obținute cu ajutorul modelului matematic de la subcapitolul 6.2 să poată fi comparate cu datele de ieșire obținute cu ajutorul aplicației.

Datele tehnice ale sistemului fotovoltaic au fost introduse în aplicație așa cum este prezentat în figura 6.4.

Figura 6.4. Sistemul fotovoltaic cu $P_i = 150\text{kWp}$

După introducerea datelor sistemului fotovoltaic, pentru a identifica soluția de maximă eficiență în ceea ce privește împărțirea panourilor fotovoltaice pe șiruri, se accesează modulul dedicat dimensionării electrice a sistemului fotovoltaic prin apăsarea butonului „Electric”, din bara de meniu, după ce s-a dimensionat întregul sistem fotovoltaic, așa cum este prezentat în figura 6.5.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Dimensionare sistem fotovoltaic (CoolPV PRO)

1 ☐ Consum de energie estimat
☐ Recepție electrică
☒ Putere instalată (solicitată) 149.5 [kWp]

Introducere date de proiectare: Completat și validat prin apăsarea butonului OK

2 Nume beneficiar: TUIASI
 Nume proiectant: TUIASI
 Județ: Iasi
 3 Tip rețea: Trifazat
 P min inverter: 180 [kW]
 4 Denumire inverter: Inverter 100.0 M WLAN
 5 Numar invertor: 1 [buc]
 6 Putere inverter: 100.0 [kW]
 7 Verificare inverter: OK
 8 Consum energie lunar: 9.9 [kWh/luna]
 9 Putere instalată: 150 [kWp] 163.8 [kVA]
 10 Editati datele economice - preturi [RON]:
 Panou fotovoltaic: 1500 [RON]
 Contor inteligent: 700 [RON]
 Inverter: 28000 [RON]
 Manopera: 45000 [RON]
 Transport: 15000 [RON]
 Materiale: 35000 [RON]
 Sistem montaj: 15000 [RON]
 Pret kWh: 1.1 [RON]
 Inflație: 9.9 [%]
 Investiție totală: 149588 [RON]
 din care TVA (21%): 149588 [RON]

Tip panou: Monocristalin
 Putere panou: 500
 Lungime panou: 2.108 [m]
 Latime panou: 1.048 [m]
 Suprafata panou: 2.21 [mp]
 Model panou fotovoltaic: PV C14 500
 P instalata totala: 150 [kWp]
 Suprafata necesara: 662.76 [mp]

Tip panou: Monocristalin
 Putere panou: 500
 Lungime panou: 2.108 [m]
 Latime panou: 1.048 [m]
 Suprafata panou: 2.21 [mp]
 Model panou fotovoltaic: PV C14 500
 P instalata totala: 150 [kWp]
 Suprafata necesara: 662.76 [mp]

Produsie medie panouri fotovoltaice:

	Ian	Feb	Mar	Apr	May	Iun	Iul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	
Produsie medie panouri fotovoltaice	6552.3	11212	11573	15396	20019	24128	23527	23615	17987	14642	6788.2	4653.5	183469.7

Produsie medie sistem fotovoltaic:

	Ian	Feb	Mar	Apr	May	Iun	Iul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	
Produsie medie sistem fotovoltaic	6054.5	10360	10694	17913	18498	22295	21739	21821	16420	12975	6253.8	4299.3	160968.9

Analiza financiara - amortizare [RON] - inflație medie ponderata = 4.14% (conform INS)

Anul	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		

Copyright 2020 © Marius ALEXA, Valeriu-Sebastian HUDISTEANU, TUIASI, RO

Figura 6.5. Accesarea modului dimensionare *Electric*

După accesarea butonului „*Electric*” se deschide fereastra dedicată dimensionării electrice, așa cum este prezentat în figura 6.6, cu următoarele date de intrare preluate din fereastra dimensionării sistemului fotovoltaic:

- valoarea puterii instalate a sistemului fotovoltaic (P_i);
- numărul de panouri fotovoltaice din sistem ($N_r PV$);
- valoarea puterii maxime a sistemului dimensionat (P_{max}).

În continuare sunt prezentate valorile dimensionării electrice a sistemului fotovoltaic, pe cele 3 cazuri prezentate mai sus.

Dimensionarea sistemului pentru CAZ 1:

- 6 șiruri de PV și 25 PV pe un șir.

Dimensionarea electrica a sistemului fotovoltaic

Puterea instalata P_i = 150 [kWp]
 Numar PV = 300 [buc]
 Puterea maxima P_{max} = 150 [kW]
 Alegeți schema de conexiuni:
 Numar siruri de PV (N_s) = 6 [buc]
 Numar PV in serie (N_{ps}) = 25 [buc]

Calculator

Calculul generatorului fotovoltaic:

Tensiunea maxima (V max DC) = 1399.1 [V]
 Tensiunea minima (V min DC) = 926.8 [V]
 I maxim de intrare (I max DC) = 73.3 [A]

Dimensionarea invertorului:

Putere max recomandata >= 150 [Wp]
 Tensiune de intrare MAX >= 1399.1 [V]
 Tensiune de intrare min <= 926.8 [V]
 Curentul de intrare MAX >= 73.3 [A]

Dimensionarea conductorilor PV-inverter:

Tensiunea max generata de un sir pv (U pv) = 791.3 [V]
 Cadere tensiune acceptabila pe cablu (ΔU) = 4.6 [V]
 Curent continuu max prin conductor (I nom) = 18.67 [A]
 Curent calcul sectiune conductor (I calc) = 56.6 [A]
 Sectiunea minima a conductorului (S cond) = 6 [mm²]

Dimensionarea conductorilor inverter-consumatori:

I calc = 0.22 [A]
 S cond = 4 [mm²]

IESIRE

Figura 6.6. Dimensionarea electrică a sistemului fotovoltaic – CAZ 1
 Dimensionarea sistemului pentru CAZ 2:

- 5 șiruri de PV și 30 PV pe un șir.

Dimensionarea electrica a sistemului fotovoltaic

Puterea instalata P_i = 150 [kWp]
 Numar PV = 300 [buc]
 Puterea maxima P_{max} = 150 [kW]
 Alegeți schema de conexiuni:
 Numar siruri de PV (N_s) = 5 [buc]
 Numar PV in serie (N_{ps}) = 30 [buc]

Calculator

Calculul generatorului fotovoltaic:

Tensiunea maxima (V max DC) = 1678.9 [V]
 Tensiunea minima (V min DC) = 1112.2 [V]
 I maxim de intrare (I max DC) = 61.1 [A]

Dimensionarea invertorului:

Putere max recomandata >= 150 [Wp]
 Tensiune de intrare MAX >= 1678.9 [V]
 Tensiune de intrare min <= 1112.2 [V]
 Curentul de intrare MAX >= 61.1 [A]

Dimensionarea conductorilor PV-inverter:

Tensiunea max generata de un sir pv (U pv) = 949.5 [V]
 Cadere tensiune acceptabila pe cablu (ΔU) = 4.6 [V]
 Curent continuu max prin conductor (I nom) = 18.67 [A]
 Curent calcul sectiune conductor (I calc) = 56.6 [A]
 Sectiunea minima a conductorului (S cond) = 6 [mm²]

Dimensionarea conductorilor inverter-consumatori:

I calc = 0.22 [A]
 S cond = 4 [mm²]

IESIRE

Figura 6.7. Dimensionarea electrică a sistemului fotovoltaic – CAZ 2

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri
Dimensionarea sistemului pentru CAZ 3:
- 3 șiruri de PV și 50 PV pe un șir.

Figura 6.8. Dimensionarea electrică a sistemului fotovoltaic – CAZ 3

La apăsarea butonului „Calculator”, aplicația grafică calculează, după pașii prezentați în secțiunea calcul numeric, valorile specifice generatorului fotovoltaic, dimensionarea inverterului și a conductorilor. Rezultatele obținute cu ajutorul aplicației Cool-PVT sunt comparabile cu rezultatele obținute prin calcul analitic.

Analizând rezultatele obținute atât prin calcul numeric, cât și cu ajutorul aplicației Cool-PVT, soluția de maximă eficiență este dată de așezarea panourilor fotovoltaice pe 6 rânduri, câte 25 bucăți pe rând, în felul acesta având intrare pe toate canalele MPPT ale inverterului (inverterul are 6 MPPT), eliminând riscul de incendii și maximizând producția.

În cadrul aplicației informatice Cool-PVT s-a introdus un modul destinat răcirii panourilor fotovoltaice, principalul atribut al acestui modul reprezentând strict cantitatea de căldură extrasă de la un sistem fotovoltaic. În felul acesta s-a creat posibilitatea analizării capacității de cogenerare a panourilor fotovoltaice termice și studiul eficienței acestora.

Cogenerarea sistemului este dată de către răcirea panourilor fotovoltaice care, pe lângă creșterea eficienței electrice înregistrează și o creștere a energiei termice, reprezentată de energia calorică recuperată, care poate fi utilizată pentru diferite funcțiuni ale clădirii: preîncălzirea apei calde menajere, încălzirea apei din piscină sau pentru tratamente termale în clădirile spitalicești.

Pentru accesarea modului destinat răcirii PVT se apasă „Răcire PV/T” din meniul aplicației, așa cum este prezentat în figură.

Figura 6.9. Accesarea modului *Răcire PVT*

Pe pagina principală a aplicației, în secțiunea 2, la punctul 10, în vederea efectuării analizei tehnico-economice a întregului sistem au fost introduse 2 checkbox-uri cu rol de eficientizare și maximizare a producției electrice dar și a diminuării investiției financiare.

Așa cum se poate observa în figura 6.10, cele 2 checkbox sunt împărțite:

1. Casa verde
2. Răcirea PV

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Figura 6.10. Accesarea modulului *Racire PV/T*

Opțiunea nr. 1 (checkbox *Casa verde*) face un calcul economic al întregului sistem fotovoltaic ținând cont de aportul financiar acordat beneficiarului prin intermediul programului național „Casa verde”, în cazul în care acest program se aplică și care este aportul – valoarea actualizată.

Opțiunea nr. 2 (checkbox *Racirea PV*) are rolul de a face o analiză matematică a producției de energie electrică ținând cont de răcirea sistemului fotovoltaic și creșterea randamentului panourilor fotovoltaice, pornind de la principala condiție: reglarea și menținerea temperaturii de lucru a PVT la valoarea de 25°C.

După apăsarea butonului „*Răcire PV/T*” se deschide o fereastră dedicată „*Optimizarea eficienței PV prin metoda racirii*”, cu 6 butoane tip radio și șase metode de răcire a panourilor fotovoltaice, fiecare tip de răcire fiind exemplificat printr-un desen grafic (Figura 6.12).

În modulul soft destinat răcirii PVT s-au introdus 6 metode de răcire, popularea tabelor cu date și valori necesare efectuării de calcule privind răcirea PVT și calculul cantității de căldură extrasă de la întregul sistem fotovoltaic, ținând cont de elementele constructive ale sistemului introduse în prima parte a aplicației: putere instalată, număr de panouri fotovoltaice, tipul de panou, suprafața constructivă și tipul de material pe care este montat sistemul, diametrul țevii de cupru care compune sistemul de răcire, temperatura apei la intrarea în sistemul de răcire etc.

Pentru primele 5 metode de răcire a PVT s-au introdus date și s-a creat modelul matematic, prin calcul analitic, cu privire la creșterea eficienței electrice a întregului sistem fotovoltaic termic.

De exemplu în figura 6.12 s-a selectat butonul tip radio „*Racire cu aer – disipator de caldura orizontala*”, iar în partea dreaptă a ferestrei de dialog a fost activat desenul grafic explicativ cu privire la metoda răcirii.

Așa cum se poate observa și pe figură, metoda prezintă, pe scurt, tipul constructiv al răcirii cu aer cu disipator de căldură și câteva explicații date prin intermediul legendei.

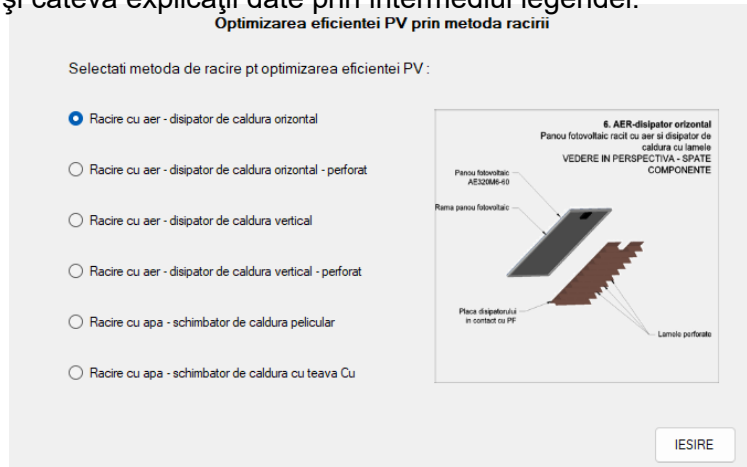


Figura 6.12. Metoda răcirii cu aer – disipator de căldură orizontal

Analiza numerică privind cantitatea de energie electrică produsă de un sistem fotovoltaic se face ținând cont de creșterea eficienței PV prin răcirea acestora.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Pentru primele 5 metode de răcire a unui sistem fotovoltaic se aplică un coeficient de creștere a eficienței energetice, determinat prin calcul analitic, conform literaturii de specialitate, dar fără a se face o analiză a cantității de căldură extrasă prin intermediul sistemului de răcire.

În figura 6.13 este prezentată metoda „Răcire cu aer – schimbator de căldură orizontal - perforat”, inițiată la apăsarea butonului radio anexat metodei. Schema grafică deschisă în partea dreaptă a ecranului prezintă tipul constructiv al PVT și o legendă, la modul schematic, cu privire la funcționarea sistemului.

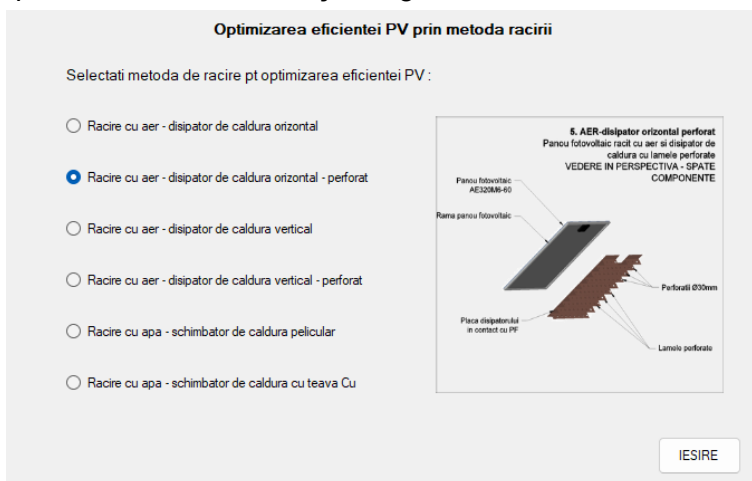


Figura 6.13. Metoda răcirii cu aer – disipator de căldură orizontal - perforat

La apăsarea butonului 3 (Răcire cu aer – disipator de căldură vertical) se activează metoda nr 3 de răcire activă cu aer, iar schema grafică ce se activează în dreapta ferestrei prezintă, în mod grafic, modul de funcționare a metodei.

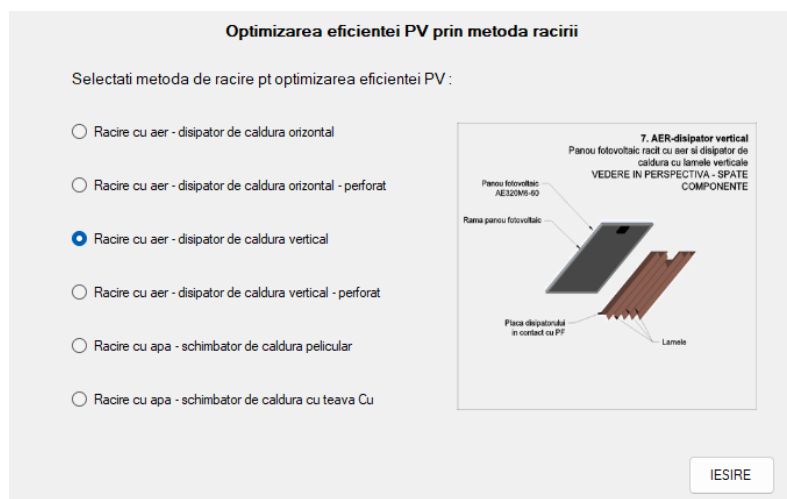


Figura 6.14. Metoda răcirii cu aer – disipator de căldură vertical

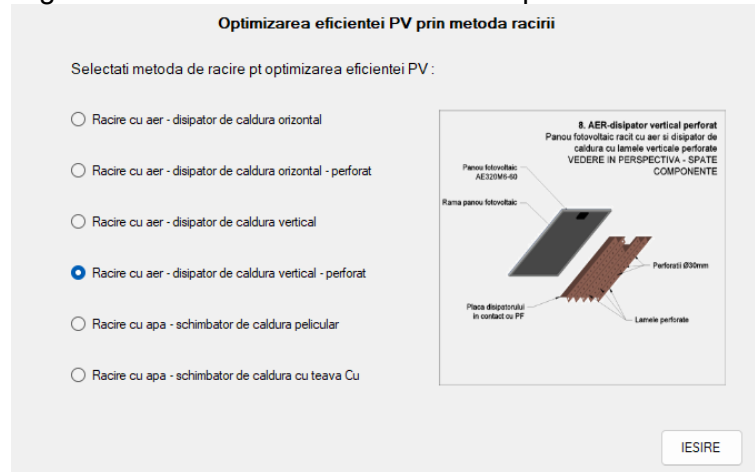


Figura 6.15. Metoda răcirii cu aer – disipator de căldură vertical – perforat

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

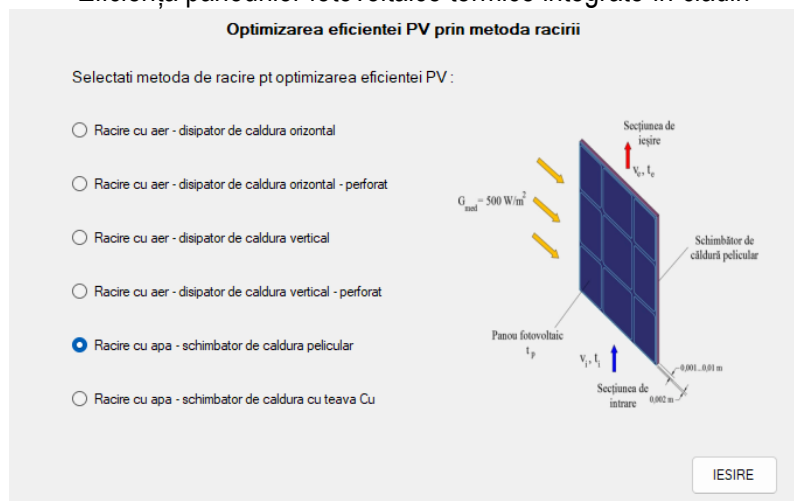


Figura 6.16. Metoda răcirii cu apă – schimbător de căldură pelicular

În figura 6.14 și 6.15 sunt prezentate cele 2 metode de răcire a unui sistem fotovoltaic cu ajutorul unui disipator de căldură vertical – perforat sau răcirea activă cu apă, prin schimbător de căldură pelicular.

La fel ca și în celelalte metode de răcire prezentate mai sus, schema grafică care se activează în partea dreaptă are rolul de exemplificare a metodei, iar calculul eficienței producției de energie electrică se face prin aplicarea coeficientului de creștere a eficienței, conform modelului matematic introdus în codul sursă.

În cadrul studiilor s-a realizat o analiză a productivității de energie electrică, atât pentru un sistem fotovoltaic care nu beneficiază de răcire pasivă sau activă (răcirea cu aer sau apă), cât și în cazul răcirii, al aceluiași sistem PVT, cu aer / apă.

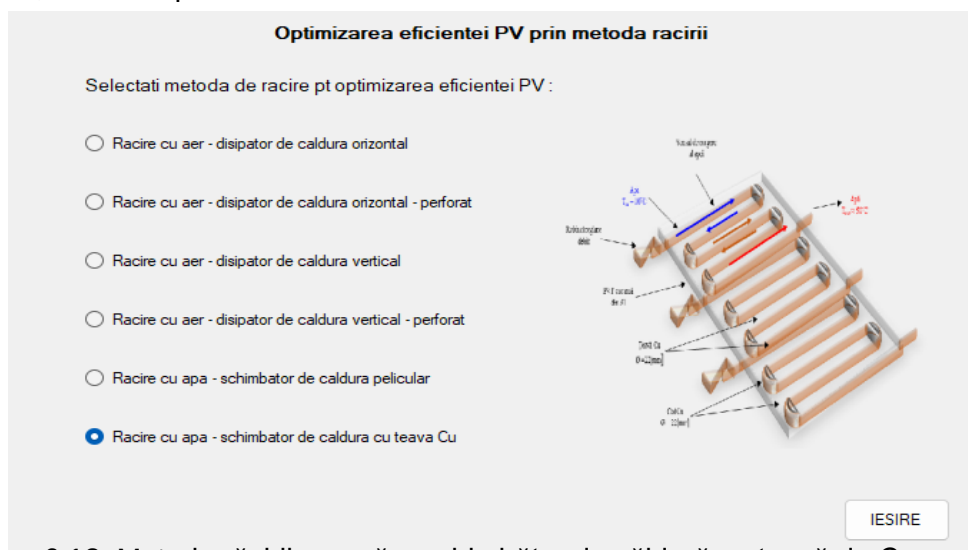


Figura 6.18. Metoda răcirii cu apă – schimbător de căldură cu țeavă de Cu

Pentru PVT „răcit cu apă cu schimbător de căldură cu țeavă de Cu”, a 6-a metodă de răcire activă, s-au introdus toate datele și rezultatele obținute pe cale experimentală, dar și cele obținute pe cale analitică, prin corelarea cu cele obținute pe cale experimentală.

Așa cum se observă în figura 6.18, metoda grafică este exemplificată prin prezentarea modelului constructiv, în partea dreaptă a ferestrei, diferența față de celelalte 5 metode fiind aceea că se face o analiză matematică atât a cantității de energie electrică generată de sistem, cât și o analiză a cantității de căldură extrasă prin intermediul sistemului de răcire.

Calculul producției energiei electrice, separat pe cele 2 componente (producția panourilor fotovoltaice și producția sistemului fotovoltaic) s-a făcut în 2 moduri:

1. în primul caz s-a luat în calcul modul real de producție a energiei electrice, cu scăderea în timp a randamentului panourilor fotovoltaice, conform documentației tehnice a producătorului.

2. în cazul al 2-lea s-a luat în calcul modul ideal de producție, adică nu s-a ținut cont de scăderea, în timp, a randamentului panourilor fotovoltaice (fără degradarea în timp a celulelor fotovoltaice).

După cum se poate observa cea mai eficientă metodă pentru răcirea PVT o reprezintă răcirea cu apă; de asemenea eficiența PVT, din punct de vedere al producerii de energie electrică, este maximă.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

Un alt modul al softului îl reprezintă calculul cantității de căldură care se poate recupera prin răcirea PVT, utilizând diferite metode constructive ale sistemului de răcire.

Analiza eficienței pentru un PVT răcit cu apă, cu ajutorul Cool-PVT

Spre deosebire de cele 5 metode de răcire a PVT implementate în soft, calculul cantității de căldură extrasă și creșterea eficienței electrice efectuându-se după modelul matematic iar rezultatele sunt generate în baza analizei numerice, metoda a 6-a (răcirea PVT cu apă printr-un sistem de țevi de cupru) beneficiază de datele obținute pe cale analitică, dar verificate și validate pe cale experimentală.

Producția de energie electrică, în special creșterea eficienței acesteia prin răcirea PVT și cantitatea de căldură extrasă de la sistemul de răcire au fost introduse valoric, pentru fiecare perioadă caldă a anului (mai - septembrie), pentru fiecare diametru al țevii de cupru care compune sistemul de răcire și în funcție de temperatura apei la intrarea în sistem.

Racirea panourilor fotovoltaice termice

Puterea instalata P_i = 150 [kWp]
Numar PV = 300 [buc]
Puterea maxima P_{max} = 150 [kW]

Date tehnice / constructive PV/T:

Tip suprafata instalare PV/T: Beton

Diametru teava Cu : 22 [mm]
Debit apa pt racire : 0.030 [litri/sec]
Temperatura apa pt racire : 10 [°C]

Calculator

Cantitatea de caldura extrasa de la 1 PVT:

Ian	Feb	Mar	Apr	May	Iun	Iul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec

[kW / luna]

Cantitatea de caldura extrasa de la sistemul PVT:

Ian	Feb	Mar	Apr	May	Iun	Iul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec

[kW / luna] ANUL 1

Figura 6.19. Condițiile inițiale tehnice ale sistemului de răcire

Așa cum este prezentat în figura 6.19, după ce se apasă butonul „Racire PV/T” de pe interfața principală, se deschide fereastra de dialog „Racirea panourilor fotovoltaice termice”, împărțită în 3 secțiuni:

1. În secțiunea 1 sunt importate, automat, datele sistemului fotovoltaic dimensionat în interfața principală, în funcție de nevoile beneficiarului și varianta constructivă de maximă eficiență.

În cele 3 textbox-uri sunt importate: valoarea puterii instalate, numărul panourilor fotovoltaice și puterea maxim instalată a sistemului. Aceste date inițiale reprezintă și datele de intrare pentru calculul cantității de căldură preluată de la sistemul fotovoltaic, prin intermediul sistemului de răcire.

2. A 2-a secțiune a aplicației este destinată utilizatorului pentru alegerea condițiilor inițiale a sistemului de răcire (suprafața pe care este amplasat sistemul PV, diametrul țevii de Cu al sistemului de răcire, debitul de apă și temperatura apei la intrarea în sistem), așa cum se prezintă în figura 6.19.

2.1. tipul suprafeței pe care se instalează sistemul fotovoltaic:

În funcție de tipul constructiv al terasei sau acoperișului unei clădiri (beton sau tablă) se calculează nivelul de încălzire al materialului, se ia în calcul încălzirea mediului ambiant în care este amplasat sistemul fotovoltaic și de aici rezultă influența asupra panourilor fotovoltaice – căldura absorbită de către acesta prin radiație și convecție.

2.2. diametru țevii de cupru al sistemului de răcire:

În listbox-ul dedicat diametrului țevii de cupru sunt predefinite 3 valori: 15mm, 18mm și 22mm. Pentru fiecare valoare s-a făcut o analiză matematică și proceduri de simulare și măsurare a valorilor temperaturii apei la ieșirea din sistem, iar datele obținute au fost introduse în codul sursă al softului.

2.3. debitul apei pentru răcire:

În acest listbox au fost introduse cele 5 valori ale debitului de apă pentru care s-a făcut calculul matematic, astfel: 0.015 litri/sec, 0.030 litri/sec, 0.060 litri/sec, 0.080 litri/sec și 0.10 litri/sec. Debitul influențează atât temperatura finală a apei, cât și gradul de răcire al panoului.

Conform normativelor în vigoare privind circulația apei în sisteme de încălzire și sanitare, o valoare superioară debitului de 0.10 litri/secundă conduce la viteze mari în rețea și automat la apariția de trepidații mecanice și pericol de cedare al materialului.

2.4. temperatura apei pentru răcire:

În această secțiune au fost introduse cele 4 valori ale temperaturii apei la intrarea în sistemul de răcire: 5°C, 10°C, 15°C și 20°C, temperaturi care se pot întâlni pe timpul sezonului cald.

Diferența de temperatură dintre cea la intrarea în sistemul de răcire și temperatura apei la ieșirea din sistem reprezintă un factor esențial în calculul cantității de căldură extrasă.

Eficiența panourilor fotovoltaice termice integrate în clădiri

După apăsarea butonului „Calculator”, aplicația generează automat rezultatele (datele de ieșire), calculând cantitatea de căldură extrasă de la 1 PVT, dar și cantitatea de căldură extrasă de la întregul sistem, pe parcursul unui an calendaristic, așa cum este reprezentat în figura 6.20.

Racirea panourilor fotovoltaice termice

Puterea instalata P_i = [kWp]
Numar PV = [buc]
Puterea maxima P_{max} = [kW]

Date tehnice / constructive PVT:

Tip suprafata instalare PVT:

Diametru teava Cu : [mm]
Debit apa pt racire : [ltri/sec]
Temperatura apa pt racire : [°C]

Calculator

Cantitatea de caldura extrasa de la 1 PVT:

Ian	Feb	Mar	Apr	May	Iun	Iul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
0	0	0	0	19.2	37.2	46	41.1	32.3	0	0	0

[kW / luna]

Cantitatea de caldura extrasa de la sistemul PVT:

Ian	Feb	Mar	Apr	May	Iun	Iul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
0	0	0	0	125	234	299	267	203	0	0	0

[kW / luna]

ANUL 1

IESIRE

Figura 6.20. Calculul cantității de căldură

4. Rezultate și impact:

Cercetarea demonstrează că implementarea unui sistem optimizat de răcire cu apă pentru PVT conduce la beneficii energetice substanțiale. Reducerea temperaturii de funcționare cu 15-20°C se traduce într-o creștere a producției electrice de 7-10%, în timp ce energia termică recuperată poate atinge 95 kWh pe lună pentru un singur panou în condițiile de vară. Pentru un sistem fotovoltaic tipic de 100 kWp, energia termică totală anuală recuperabilă se ridică la aproximativ 1.670 kWh, având o valoare economică de 25-55 lei pe zi în funcție de sursa de energie pe care o înlocuiește.

Contribuția la dezvoltarea energiei verzi se materializează prin demonstrarea faptului că aceeași suprafață de acoperiș poate produce simultan energie electrică și termică cu o eficiență globală de 40-50%, față de doar 18-22% în cazul panourilor fotovoltaice convenționale. Această dublare a eficienței de utilizare a spațiului disponibil este esențială pentru integrarea sistemelor energetice regenerabile în mediul urban densificat.

Din perspectiva securității energetice naționale, rezultatele cercetării evidențiază potențialul sistemelor PVT de a contribui la reducerea dependenței de importurile de gaze naturale pentru încălzire. Energia termică recuperată poate înlocui o parte din combustibilii fosili utilizați pentru prepararea apei calde menajere și încălzirea spațiilor, contribuind astfel la obiectivele strategice de diversificare a surselor energetice.

Perspectivile de continuare a cercetării vizează extinderea analizei către sistemele hibride PVT cuplate cu pompe de căldură și sisteme de stocare termică sezonieră. De asemenea, integrarea tehnologiilor de inteligență artificială în controlul sistemelor de răcire poate conduce la optimizarea dinamică a parametrilor de funcționare în raport cu condițiile meteorologice și cerința energetică a clădirii. Software-ul Cool-PVT poate fi dezvoltat ca platformă de management energetic integrat, capabilă să optimizeze automat funcționarea sistemelor PVT în cadrul microrețelelor energetice locale

Această cercetare contribuie la consolidarea poziției României în domeniul tehnologiilor energetice avansate și oferă instrumentele științifice și practice necesare pentru accelerarea adoptării sistemelor fotovoltaice termice în sectorul construcțiilor, sprijinind astfel tranziția către un sistem energetic sustenabil și descentralizat.

În concluzie, teza aduce contribuții originale semnificative în domeniul sistemelor fotovoltaice termice, atât din punct de vedere teoretic, cât și experimental și aplicativ. Dezvoltarea unui model matematic propriu, realizarea unui studiu numeric extins bazat pe un număr mare de simulări, construirea și utilizarea unui stand experimental pentru validare și implementarea rezultatelor într-un soft dedicat reprezintă elemente care conferă lucrării un caracter integrat și un grad ridicat de originalitate. Cercetarea demonstrează că sistemele PVT reprezintă o soluție viabilă pentru creșterea eficienței energetice a clădirilor și oferă instrumente concrete pentru proiectarea și optimizarea acestora.