

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE
ASACHI" DIN IAȘI**
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

Str. Prof.dr.doc. Dimitrie Mangeron, nr. 1, Iași, cod 700050

Tel: 0232278683, 0232254638, Tel/Fax: 0232233368

E-mail: decanat@ce.tuiasi.ro, Web: www.ci.tuiasi.ro



**CERCETĂRI NUMERICE ȘI EXPERIMENTALE
PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA EFICIENȚEI
ENERGETICE A SISTEMELOR SOLARE CU
PRODUCȚIE SIMULTANĂ DE ENERGIE ELECTRICĂ
ȘI TERMICĂ**

-REZUMAT-
-TEZĂ DE DOCTORAT-

Doctorand,
Ing. Marius BRĂNOAEA

Conducător de doctorat:
Prof. univ. dr. ing. Andrei BURLACU

- IAȘI, 2022-

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către _____

Vă facem cunoscut că, în ziua de 27.10.2022 la ora 9:00 în sala 0.1R, corpul R al Facultății de Construcții și Instalații, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

“ Cercetări numerice și experimentale pentru îmbunătățirea eficienței energetice a sistemelor solare cu producție simultană de energie electrică și termică”

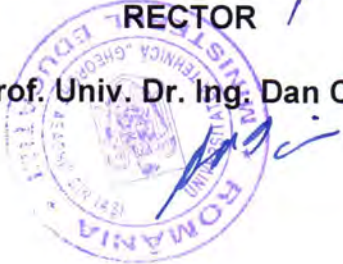
elaborate de domnul **Ing. Marius BRĂNOAEA** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|---|------------------------|
| 1. Mihai Petru, Conf. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | președinte |
| 2. Burlacu Andrei, Prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | conducător de doctorat |
| 3. Abid - David Chérifa, Prof. univ. dr. ing., Aix-Marseille Université - Franța | referent oficial |
| 4. Așchilean Ioan, Prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca | referent oficial |
| 5. Verdeș Marina, Conf. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | referent oficial |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR /
Prof. Univ. Dr. Ing. Dan Cașcaval



Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagiț

**CERCETĂRI NUMERICE ȘI EXPERIMENTALE
PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA EFICIENȚEI
ENERGETICE A SISTEMELOR SOLARE CU
PRODUȚIE SIMULTANĂ DE ENERGIE ELECTRICĂ
ȘI TERMICĂ**

Ing. Marius BRĂNOAEA

Domeniul Inginerie Civilă și Instalații

Președinte comisie doctorat:

Conf. univ. dr. ing. Petru Mihai

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Andrei Burlacu

Referenți oficiali:

Prof. univ. dr. ing. Chérifa Abid - David

Prof. univ. dr. ing. Ioan Așchilean

Conf. univ. dr. in Marina Verdeș

MULȚUMIRI

Această teză de doctorat a fost elaborată pe parcursul derulării studiilor universitare de doctorat în cadrul Școlii Doctorale a Facultății de Construcții și Instalații din Iași, în intervalul octombrie 2019 – Septembrie 2022. Stagiul doctoral a presupus activitate de cercetare desfășurată în cadrul laboratoarelor Facultății de Construcții și Instalații, unde am avut prilejul de a interacționa cu specialiști, care m-au îndrumat și mi-au oferit sprijin pe parcursul desfășurării lucrării de doctorat, și cărora doresc să le mulțumesc.

*Aș dori să adresez sincere mulțumiri, coordonatorului meu științific, domnului **Prof. univ. dr. ing. Andrei BURLACU**, un om cu calități umane și profesionale deosebite, pentru sfaturile, sprijinul moral, logistic, recomandările și întregul efort depus pe parcursul studiilor doctorale.*

*Îmi exprim gratitudinea față de membrii comisiei de îndrumare, și anume, doamnei **Conf. univ. dr. ing. Marina VERDEȘ**, domnului **Conf. univ. dr. ing. Vasilică CIOCAN** și domnului **Șef. lucr. dr. ing. Marius Costel BALAN** pentru sfaturile științifice valoroase, recomandările și pentru îndrumarea continuă de-a lungul întregului stagiul doctoral.*

*În egală măsură doresc să adresez mulțumiri întregul colectiv al Departamentului de Ingineria Instalațiilor al Facultății de Construcții și Instalații din Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași și Directorului de Departament, **Conf. univ. dr. ing. Marina VERDEȘ**, pentru o colaborare frumoasă, pentru încurajările și tot sprijinul acordat pe parcursul stagiului doctoral.*

Adresez, de asemenea, cele mai calde mulțumiri familiei, în mod deosebit soției, Georgiana Mădălina BRĂNOAEA, pentru răbdarea, înțelegerea și tot sprijinul acordat pe toată perioada studiilor mele din ultimii ani. Doresc să le mulțumesc în mod special părinților mei, Cristinel BRĂNOAEA și Doinița Gabriela BRĂNOAEA, care m-au înțeles și m-au susținut dar mai ales pentru contribuția lor esențială în formarea mea ca om. De asemenea doresc să adresez sincere mulțumiri întregii mele familii, pentru permanenta susținere.

În cele din urmă doresc să mulțumesc tuturor profesorilor care au contribuit de-a lungul timpului la formarea mea educațională și profesională.

Marius BRĂNOAEA

CUPRINS

	Pag: Teză	Pag: Rezumat
MULȚUMIRI.....	3	3
CUPRINS	4	4
LISTĂ DE FIGURI.....	8	-
LISTĂ DE TABELE.....	15	-
1. INTRODUCERE.....	16	7
1.1. Justificarea abordării temei.....	17	-
1.2. Importanța și actualitatea temei.....	18	8
1.3. Încadrarea temei în preocupările naționale și internaționale.....	20	9
1.4. Premisele și obiectivele cercetării	22	11
1.5. Structura tezei.....	23	-
2. Stadiul actual al cunoașterii privind sistemele fotovoltaice.....	25	12
2.1. Energia solară	25	12
2.1.1. Relația Soare-Pământ	26	-
2.2. Radiația solară	28	-
2.2.1. Calculul radiației solare directe	32	-
2.2.2. Calculul radiației solare difuze.....	35	-
2.2.3. Măsurarea radiației solare.....	36	-
2.3. Înclinarea optimă a panourilor solare	40	13
2.4. Valorificarea radiației solare	41	14
3. Sistemele fotovoltaice	42	15
3.1. Celula fotovoltaică de siliciu dopat tip P (Siliciu încărcat pozitiv dopat cu bor).....	43	-
3.2. Celula fotovoltaică de siliciu dopat tip N (Siliciu încărcat negativ dopat cu fosfor).....	44	-
3.3. Detaliile constructive ale panourilor fotovoltaice	45	16
3.4. Modelul Fotovoltaic	48	-
3.5. Parametrii de mediu care afectează eficiența panourilor.....	52	17
3.5.1. Efectul radianței solare	52	17
3.5.2. Efectul temperaturii	54	18
3.5.3. Efectul prafului / umbririi.....	56	20
3.5.4. Efectul umidității	58	21
3.5.5. Efectul vântului	60	23
3.6. Temperatura de funcționare a celulelor fotovoltaice.....	61	-
3.6.1. Temperatura de funcționare a celulelor fotovoltaice în cazul unui panou fotovoltaic-termic	62	-
3.7. Modelul termic al panourilor fotovoltaice.....	64	-
3.7.1. Modelul circuitului rezistiv-capacitiv (RC).....	64	-
3.8. Transferul de căldură prin convecție de la suprafața panoului fotovoltaic...66		-
3.8.1. Coeficientul de transfer termic prin convecție forțată	66	-

3.8.2. Coeficientul de transfer termic prin convecție liberă	67	-
3.9. Variația în eficiență a celulelor fotovoltaice.....	69	-
4. Principiile fundamentale ale panourilor Fotovoltaic-Termice	70	24
4.1. O comparație între panourile PVT și panourile fotovoltaice în combinație cu panourile solare.....	72	-
4.2. PVT răcite cu aer	74	-
4.3. Răcirea panourilor fotovoltaice folosind apă.....	77	-
4.3.1. Răcirea panourilor prin imersie în apă	77	-
4.3.2. Răcirea panourilor prin pulverizarea apei pe suprafața acestora.....	78	-
4.3.3. Panouri fotovoltaic-termice răcite cu apă.....	79	-
4.4. Panouri fotovoltaic-termice răcite cu nanofluide	81	-
4.4.1. Nanofluide de oxizi de metal.....	83	-
4.4.2. Nanofluide pe bază de carbon	84	-
4.5. PVT răcit cu ajutorul materialelor cu schimbare de fază (PCM)	85	-
4.5.1. Încapsularea materialelor cu schimbare de fază	87	-
4.6. PVT răcit cu tuburi termice	90	-
4.6.1. Tuburi termice - Generalități	90	-
4.6.2. Ecuațiile caracteristice proceselor fizice specifice tuburilor termice	93	-
4.6.3. Aplicații ale tubului termic	98	-
4.7. Eficiență termică a panourilor fotovoltaic termice	101	-
4.8. Avantajele și dezavantajele panourilor fotovoltaic termice	102	25
5. Cercetări experimentale.....	104	27
5.1. Obiective.....	104	27
5.2. Proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar.....	104	27
5.2.1. Alegerea și testarea corpului de iluminat destinat simulării solare	104	27
5.2.2. Proiectarea simulatorului solar	108	29
5.2.3. Execuția simulatorului solar	109	30
5.2.4. Testarea simulatorului solar.....	111	31
5.3. Soluții tehnice pentru realizarea Sistemului modular hibrid	116	-
5.4. Proiectarea panourilor fotovoltaic-termice hibride.....	120	32
5.4.1. Proiectarea și execuția cadrului de susținere	122	32
5.4.2. Modelul matematic al transferului de căldură corespunzător modulelor PVT.....	123	-
5.4.3. Proiectarea sistemelor de răcire ale panourilor fotovoltaic-termice	131	32
5.5. Execuția panourilor fotovoltaic-termice	143	41
5.6. Aparatura utilizată în decursul cercetării experimentale	148	45
5.7. Schema generală standului experimental	162	45
5.8. Testarea și verificarea panourilor fotovoltaic termice	164	47
5.8.1. Testarea și verificarea preliminară a panoului fotovoltaic	171	-
5.8.2. Testarea și verificarea panoului fotovoltaic.....	177	-
5.8.3. Testarea și verificarea panoului fotovoltaic-termic răcit pasiv folosind tuburi termice înguste.....	181	-
5.8.4. Testarea și verificarea panoului fotovoltaic-termic răcit pasiv folosind tuburi termice late.....	184	-

5.8.5. Testarea și verificarea panoului fotovoltaic-termic răcit cu serpentină	187	-
5.8.6. Testarea și verificarea panoului fotovoltaic-termic tip registru.....	196	-
5.8.7. Testarea și verificarea panoului fotovoltaic-termic răcit cu serpentine multiple.....	205	-
5.8.8. Testarea panoului fotovoltaic-termic Sunerg	214	-
5.8.9. Testarea panoului fotovoltaic-termic Pickcell.....	223	-
5.9. Analiza rezultatelor și discuții	232	52
6. Concluzii și contribuții originale.....	236	56
6.1. Concluzii generale	236	56
6.2. Contribuții originale	237	57
6.3. Valorificarea rezultatelor tezei de doctorat	238	58
6.4. Oportunități de continuare a cercetării	241	61
Bibliografie.....	242	62

1. INTRODUCERE

Creșterea continuă a cererii globale de energie este strâns legată de creșterea populației și de îmbunătățirea situațiilor economice și tehnologice în majoritatea părților lumii. Această cerere este satisfăcută în principal folosind cărbune, petrol și gaze, sau altfel cunoscute ca resurse de „combustibili fosili” [1].

Dintre cele trei resurse de „combustibili fosili”, cărbunele este cel mai mare producător de CO₂, în timp ce gazul natural este cel mai scăzut. În plus, combustibilii fosili sunt clasificați ca surse de energie neregenerabile, ceea ce înseamnă că se pot epuiza complet. Acest lucru se poate întâmpla dacă rata de consum a acestor resurse este mai mare decât rata de formare. Din cauza acestui fapt pot apărea fluctuații continue ale prețurilor combustibililor fosili și la creșterea gazelor cu efect de seră (GES) la nivelul stratului de ozon [2].

Au fost descoperite și integrate resurse energetice alternative pentru a genera energie. Sursele de energie regenerabile includ energia eoliană, hidroenergia, energia geotermală, energia solară fotovoltaică și termică, biomasa lichidă sau solidă, biogazul, energia mareelor și a undelor, precum și deșeurile anorganice sau organice.. Aceste resurse au fost binevenite pe scară largă, deoarece sunt mai puțin probabil să producă emisii și nu se vor epuiza. Consumul de energie din surse regenerabile a crescut continuu din anii 1950, ceea ce este motivat de necesitatea unei resurse alternative de energie și de reducerea amprentei de carbon, care este un obiectiv pentru multe țări care respectă tratatele globale UNFCCC, în principal „Protocolul de la Kyoto” și „Acordul de la Paris.” Conform raportului “Key World Energy Statistics 2021”, ponderea surselor regenerabile moderne din consumul total de energie finală în 2019 este estimată la aproximativ 14,1%, în timp ce combustibilii fosili formează aproximativ 80.9%, ceea ce este ilustrat în Figura 1.1. [3].

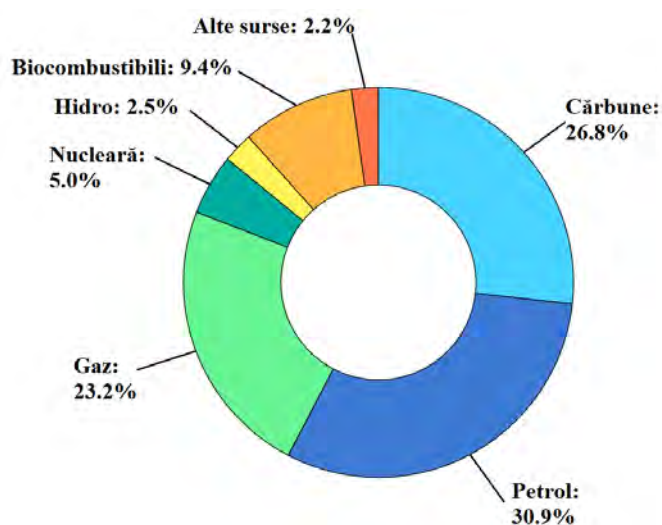


Figura 1.1. Ponderea globală a aprovizionării totale cu energie, după sursă, 2019

1.1. Importanța și actualitatea temei

În prezent, cererea mondială de energie este în creștere, măsurătorile făcute de Agenția Internațională pentru Energie evidențiază faptul că cererea globală de energie a crescut anual în ultimii 50 de ani, cu singurele excepții fiind criza financiară din 2008 și actuala criză sanitară COVID [4].

Cererea din ce în ce mai mare de energie în întreaga lume reprezintă unul dintre principalele motive pentru dezvoltarea instabilă și degradarea planetei noastre. Creșterea populației mondiale și creșterea accesibilității la energie pentru tot mai mulți oameni justifică creșterea cererii de energie. Exploatarea și consumul de combustibili fosili neregenerabili care au un impact mare asupra mediului sunt în prezent principala sursă de producere a energiei, dar dezavantajul major al acestora îl constituie emisiile de gaze cu efect de seră care reprezintă o mare amenințare pentru mediu [5,6].

În România, 29,3% din locuințe sunt în clădiri de apartamente, iar 68,3% din acestea sunt clădiri mari din panouri prefabricate, care au o eficiență termică scăzută. Aderarea la Uniunea Europeană obligă statul român prin Directiva 2009/28/EC ca până în 2020 procentul de energie produs din surse regenerabile să atingă pragul de 20%, procentul de emisii de CO₂ și gaze cu efect de seră să scadă cu 20%, și ca toate clădirile noi construite să tindă spre consum de energie aproape zero (nZEB – nearly zero energy building). Studiile au arătat că acest obiectiv nu va fi îndeplinit până la termenul propus și, prin urmare, anul țintă a fost stabilit pentru 2030, dar valorile reducerilor necesare au fost impuse la 27 % pentru procentul de energie produs din surse regenerabile și procentul de emisii de CO₂ și gaze cu efect de seră să scadă cu 40 % [7].

Pentru că energia a devenit unul dintre cei mai importanți factori în economie industrială care îi afectează foarte mult pe alții, o putem folosi ca o unitate de măsură. Din definiția sa, putem vedea cinci moduri de maximizare indicele de sustenabilitate a unui sistem:

1. crește eficiența energetică pentru a micșora energia consumată;
2. creșterea recoltării energiei;
3. reciclare sau reutilizare materialele pentru a valorifica resursele;
4. extinderea duratei de viață
5. să maximizeze utilizarea resurselor naturale regenerabile, ce aduce un impact pozitiv pentru mediu.

Dezvoltarea durabilă și economică a sectorului energetic în ultimii ani s-a axat pe energia regenerabilă. Aproape toate sursele de energie regenerabilă, cu excepția puterii geotermale și a mareelor, sunt legate direct sau indirect de insolația solară, chiar și biomasa este dependentă de lumina soarelui. Cea mai semnificativă caracteristică a energiei solare este potențialul său de a fi unul dintre

cei mai mari furnizori de energie durabilă din lume, fiind mai fiabil și are avantajul unei accesibilități simple, este gratuită, este disponibil în orice locație de pe glob și poate fi convertită directă în energie electrică folosind panouri fotovoltaice (PV) sau în energie termică folosind panouri solar-termice [8].

1.2. Încadrarea temei în preocupările naționale și internaționale

Comisia Europeană și-a publicat planul REPowerEU, care stabilește o strategie pentru eliminarea treptată a dependenței UE de importurile de energie din Rusia. Comisia a propus un obiectiv obligatoriu de economii de energie de 13% în bloc până în 2030, în creștere față de 9% așa cum a fost stabilit în propunerea anterioară de Directiva privind eficiența energetică. Comisia și-a stabilit, de asemenea, un obiectiv de 45% din mixul energetic al UE să provină din surse regenerabile până în 2030 – în creștere față de precedentul 40% [9].

Unul dintre obiectivele cheie ale Acordului de la Paris este combaterea climei schimbare, permițând țărilor să dezvolte strategii de reducere emisii de gaze cu efect de seră (GES) [10]. Guvernele la nivel global au stabilit obiective pentru furnizarea de energie prin surse regenerabile de energie (SRE) și limite stricte de emisie pentru utilizarea combustibililor fosili pentru a realiza acest lucru.

Înainte de Acordul de la Paris, au existat grade diferite de creștere a surselor regenerabile, dar aceasta s-a accelerat rapid pe măsură ce țările tranzitează la un sistem energetic cu emisii reduse de carbon. În multe țări, nivelul ridicat de energie electrică generată din surse regenerabile (RES-E) a modificat forma sistemului electric într-un mod fără precedent.

Ținta Comisiei vine cu un set de recomandări cu privire la modul de realizare a economiilor de energie, prezentate în comunicarea „Economii energie”. Acesta include sfaturi pentru cetățeni cu privire la reducerea consumului de energie în viața lor de zi cu zi. Acesta conține, de asemenea, o listă de „măsuri pe termen mediu și lung” care trebuie luate în considerare de Parlamentul European și de statele membre ca îmbunătățiri ale pachetului “Fit for 55”, cum ar fi includerea unor obligații naționale mai mari de economisire a energiei și extinderea standardelor minime de performanță energetică [11].

Multe țări europene au anunțat implementarea legii climatice „Fit for 55” care evidențiază reformele energetice îndrăznețe care se concentrează pe energia cu emisii scăzute de carbon, inclusiv interzicerea vânzării de mașini noi cu combustibili fosili (benzină și motorină) începând cu 2030 [12].

Comisia anunță că va stabili limite mai stricte de proiectare ecologică pentru încălzirea cu gaz și petrol. Anunțurile făcute de Comisia Europeană prevăd, de asemenea, că statele membre ale UE încetează să subvenționeze cazanele pe bază de combustibili fosili în clădiri începând din 2025, în

loc de 2027. Interzicerea vânzării de noi cazane pe combustibili fosili este o cerere a Coaliției de mediu pentru standarde (ECOS) [13].

Energia solară/fotovoltaică și eoliană au reprezentat fiecare aproximativ o treime din creșterea totală a producției de energie electrică din surse regenerabile în 2020, energia hidro reprezentând încă 25%, iar bioenergia restul. Prima scădere anuală a cererii de energie electrică de la criza financiară din 2008, combinată cu adăugări record de capacități de producție fotovoltaice și eoliene în 2020, a determinat ponderea surselor regenerabile în producția totală de energie electrică să crească cu două puncte procentuale. Ponderea surselor regenerabile în furnizarea globală de energie electrică a atins 28.6% în 2020, cel mai ridicat nivel înregistrat vreodată.

Cu toate acestea, creșterea capacității de producție de energie regenerabilă trebuie să se extindă în continuare cu aproape 12% anual în perioada 2021-2030 pentru a atinge nivelul net zero. În ciuda adăugărilor record de capacități din surse regenerabile, creșterea producției a fost încă semnificativ sub nivelul necesar în 2020. Va fi necesară o implementare mult mai rapidă a tuturor tehnologiilor regenerabile pentru a pune lumea pe drumul cel bun cu scenariul cu emisii nete zero până în 2050 [14].

În ultimul deceniu, pentru a răspunde preocupărilor cu privire la eficiența energetică, consumul de energie și construcția durabilă, interesul pentru sisteme hibride de tip fotovoltaic-termic (PVT) a crescut semnificativ, fapt evidențiat și prin creșterea numărului de publicații de articole științifice, așa cum este prezentat în Figura 1.2

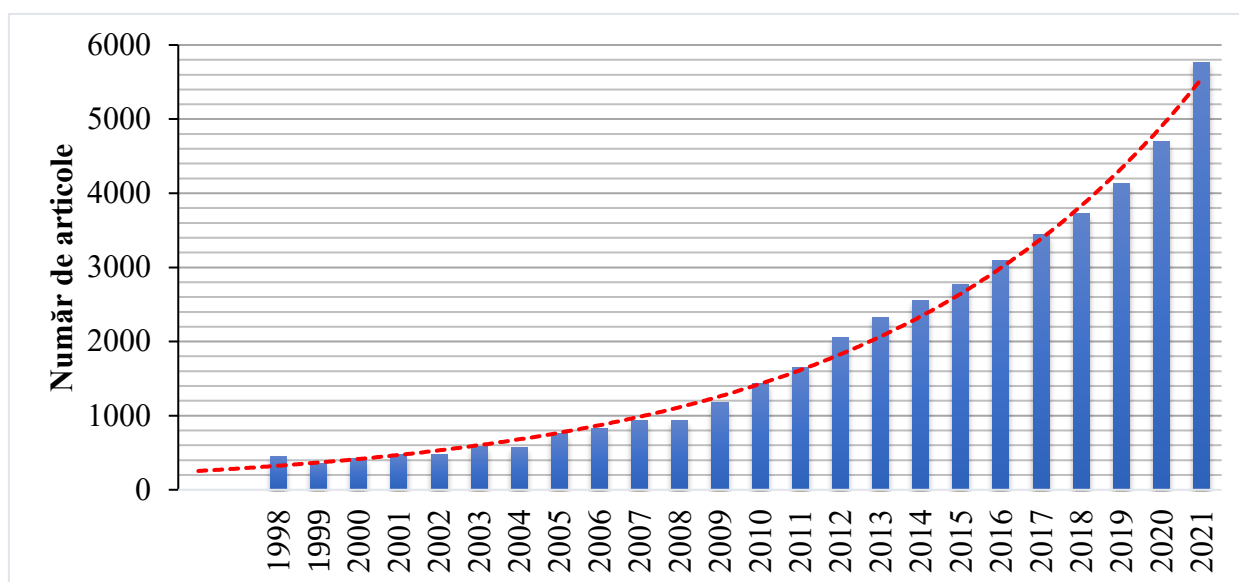


Figura 1.2. Articole științifice despre sisteme tip PVT publicate între 1998 și 2021

1.3. Premisele și obiectivele cercetării

Scopul principal al acestei lucrări este de a concepe multiple sisteme fotovoltaic termice hibride, de a le pune în operă și analiza performanța în raport cu panoul fotovoltaic clasic și cu două panouri fotovoltaic termice existente pe piață.

Pe parcursul desfășurării stagiului de cercetare se urmăresc **obiectivele tezei de doctorat:**

- Analiza literaturii de specialitate și **evidențierea caracteristicilor radiației solare și conversiei fotovoltaice.**
- Realizarea de studii de documentare referitoare la **stadiul actual al cunoașterii în domeniul panourilor fotovoltaic și fotovoltaic-termice**
- **Proiectarea și execuția unui simulator solar**, pentru a facilita testarea modulelor fotovoltaice în condiții de laborator
- **Testarea și validarea performanței simulatorului solar**
- **Proiectarea și execuția a multiple module fotovoltaic-termice hibride**, prin răcirea pasivă sau activă a panourilor fotovoltaice , folosind apă ca fluid de lucru
- **Testarea modulelor hibride originale cât și a modulelor din comerț** în condiții de laborator și înregistrarea parametrilor electrici și termici
- **Realizarea de simulări numerice pe modelele de panouri hibride** testate folosind platforma Autodesk CFD
- Prezentarea concluziilor obținute în urma etapei experimentale și a simulărilor numerice

Prezenta teză de doctorat are în vedere suplimentarea cunoașterii în domeniul panourilor fotovoltaic-termice prin analiza atât pe cale electronică prin simulări numerice cat și pe cale experimentală, a multiple variante constructive ale sistemului de răcire al panourilor fotovoltaice, toate având aceleași caracteristici inițiale și fiind supuse la aceleași condiții la limită.

2. Stadiul actual al cunoașterii privind sistemele fotovoltaice

2.1. Energia solară

Energia solară este un termen care se referă la combinația dintre lumina radiantă și căldura radiantă de la Soare, care este valorificată folosind diferite tehnologii de conversie și transfer de energie, cum ar fi celula fotovoltaică și colectorul termic solar, etc. Principalul avantaj al acestei tehnologii este că sursa sa, Soarele, este nesfârșit și nu se poate epuiza. În plus, Soarele strălucește peste tot, ceea ce înseamnă că tehnologiile de energie solară sunt o opțiune viabilă pentru toată lumea. Elementul interesant pe care îl introduc aceste tehnologii este greutatea lor relativ ușoară și viabilitatea pentru instalarea rezidențială. Pur și simplu, nu toată lumea poate să instaleze sau să investească în hidroelectricitate, nici să folosească un sistem geotermal în curtea din spate și cu siguranță nu energia mareelor. Cu toate acestea, instalarea unei turbine eoliene este posibilă, dar limitările de dimensiune și greutate pot afecta capacitatea de instalare a consumatorului, împreună cu dezavantajul de a nu fi rentabil în locații cu viteză scăzută a vântului. Energia solară este o sursă de energie potrivită pentru utilizatorii rezidențiali, deoarece poate fi instalată pe acoperișuri, mutată și chiar configurată pentru diferite configurații. Cu toate acestea principalul dezavantaj este faptul că aceste tehnologii nu funcționează noaptea din cauza absenței iradierii solare [15].

De asemenea, este important de menționat că energia solară poate varia în ceea ce privește intensitatea sa de la un loc la altul. În general, energia solară este împărțită în două procese care sunt:

1. Conversia luminii vizibile în electricitate, care se numește efect fotoelectric.
2. Depozitarea și transferul componentei sale termice în scopul încălzirii, care este denumit proces solar termic.

Cea mai semnificativă caracteristică a energiei solare este potențialul său de a fi unul dintre cei mai mari furnizori de energie durabilă din lume, fiind mai fiabil și are avantajul unei accesibilități simple, este gratuită, este disponibil în orice locație de pe glob și are o conversie directă în energie electrică folosind panouri fotovoltaice (PV) sau în energie termică folosind panouri solar-termice [8].

Mai mult, tehnologiile de exploatare a energiei solare produc mai puține emisii și, în cazul panourilor fotovoltaice, acestea nu prezintă elemente mecanice în mișcare și nu produc zgomot. Pentru a înțelege în continuare efectul radiației solare, este important să se înțeleagă relația dinamică dintre Soare și Pământ.

2.2. Înclinarea optimă a panourilor solare

Ținând cont de ecuațiile de mai sus, folosind un software de calcul precum MATLAB se poate determina energia primită anual, sezonier și lunar. Acest lucru a fost realizat printr-un simplu calcul integral într-un interval de timp regulat egal cu 3 min, și aplicat pe o suprafață de panou de 1 m^2 alegând unghiuri de înclinare variind de la 0 la 90° cu pasul de 1° [16].

Acest lucru permite deducerea unghiului optim de înclinare a panoului solar care ar duce la producția maximă de energie pentru o anumită lună și pentru un an.

A fost dezvoltat un cod Matlab care calculează și reprezintă grafică energia solară a fiecărei luni în funcție de înclinația unui modul fotovoltaic. Media sezonieră a fost calculată prin găsirea valorii medii a unghiului de înclinare pentru fiecare sezon, iar implementarea acestuia necesită ca înclinarea colectorului să fie schimbată de patru ori într-un an. Iarna (Decembrie, Ianuarie și Februarie) înclinarea ar trebui să fie de 55° , primăvara (Martie, Aprilie și Mai) 19° , vara (Iunie, Iulie și August) 5° și toamna (Septembrie, Octombrie și Noiembrie) 42° [17].

Cifrele care arată energia solară primită pentru fiecare anotimp al anului, în funcție de unghiul de înclinare și orientare al panoului pentru orașul Khouribga sunt prezentate în Figura 2.1 [17].

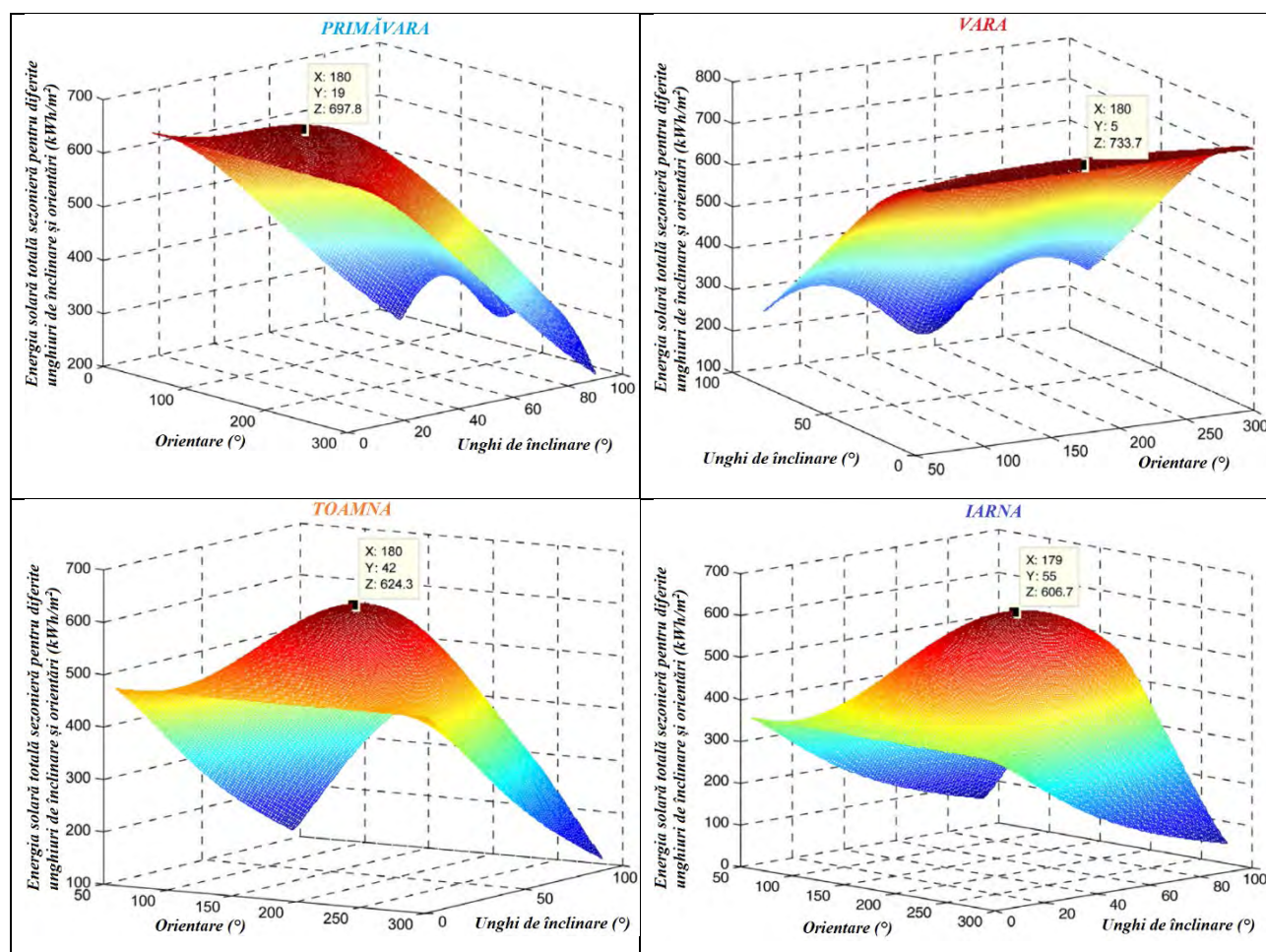


Figura 2.1. Energia solară totală sezonieră pentru diferite unghiuri de înclinare și orientări

2.3. Valorificarea radiației solare

Conversia energiei solare se poate valorifica printr-o familie de tehnologii care au o gamă largă de aplicații pentru servicii energetice: iluminat, încălzire, apă caldă pentru consum casnic și industrial, căldură solară de înaltă temperatură pentru producția de energie electrică sau pentru industrie, conversie fotovoltaică pentru producția de energie electrică sau producție de combustibili solari, de exemplu, hidrogen sau gaz sintetic (syngas) [18].

Mai multe tehnologii solare, cum ar fi producerea de apă caldă menajeră sau apă pentru încălzirea piscinei, sunt deja competitive și utilizate în localități în care oferă opțiunea cu cel mai mic cost. De asemenea guvernele multor țări au luat măsuri pentru a sprijini în mod activ energia solară, au fost realizate instalații de energie solară foarte mari, atât fotovoltaice, cât și tip CSP (Concentrated solar power), pe lângă proiecte de finanțare a unui număr mare de instalații fotovoltaice pe acoperiș.

Urmând oricare dintre tehnologiile solare, există necesitatea de a face față variabilității și naturii ciclice a Soarelui. O opțiune este de a stoca excesul de energie colectată până când este nevoie de aceasta.

Când este totalizată pe o perioadă de timp, cum ar fi un an, sau pe o zonă geografică mare, cum ar fi un continent, energia solară poate oferi servicii mult mai mari. Utilizarea ambelor concepte de timp și spațiu, împreună cu stocarea energiei, permite designerilor să producă sisteme solare mai eficiente.

Cu toate acestea, este nevoie de mult mai multă muncă pentru a capta întreaga valoare a contribuției energiei solare și numeroase studii pe acest subiect sunt făcute pe fiecare continent.

În cadrul acestei teze de doctorat, studiul energiei termice produse prin conversia termică a radiației solare s-a făcut considerând valorificarea acesteia împreună cu componenta electrică, sub formă de panouri fotovoltaic-termice hibride ci nu sub formă

3. Sistemele fotovoltaice

Sistemele fotovoltaice (PV) sunt formate din celule fotovoltaice care convertesc direct radiația solară în energie electrică.

Celula solară sau fotovoltaică este un dispozitiv semiconductor care transformă lumina solară în energie electrică. Această celulă este făcută din plachete de siliciu înalt purificat, care este dopată cu impurități, ceea ce duce la crearea abundenței de electroni/găuri în structura rețelei [19].

Semiconductorul de siliciu este considerat o joncțiune p-n. Are un strat de tip P și un strat de tip N.

Atunci când fotonii din radiația solară cad pe semiconductorul de siliciu, aceștia sunt absorbiți generând electroni liberi. Doparea cu diferite metale/nemetale a semiconductorului de siliciu intensifică generarea de sarcini electrice. Modul în care panourile fotovoltaice produc electricitate este prezentat în Figura 3.1 [20].

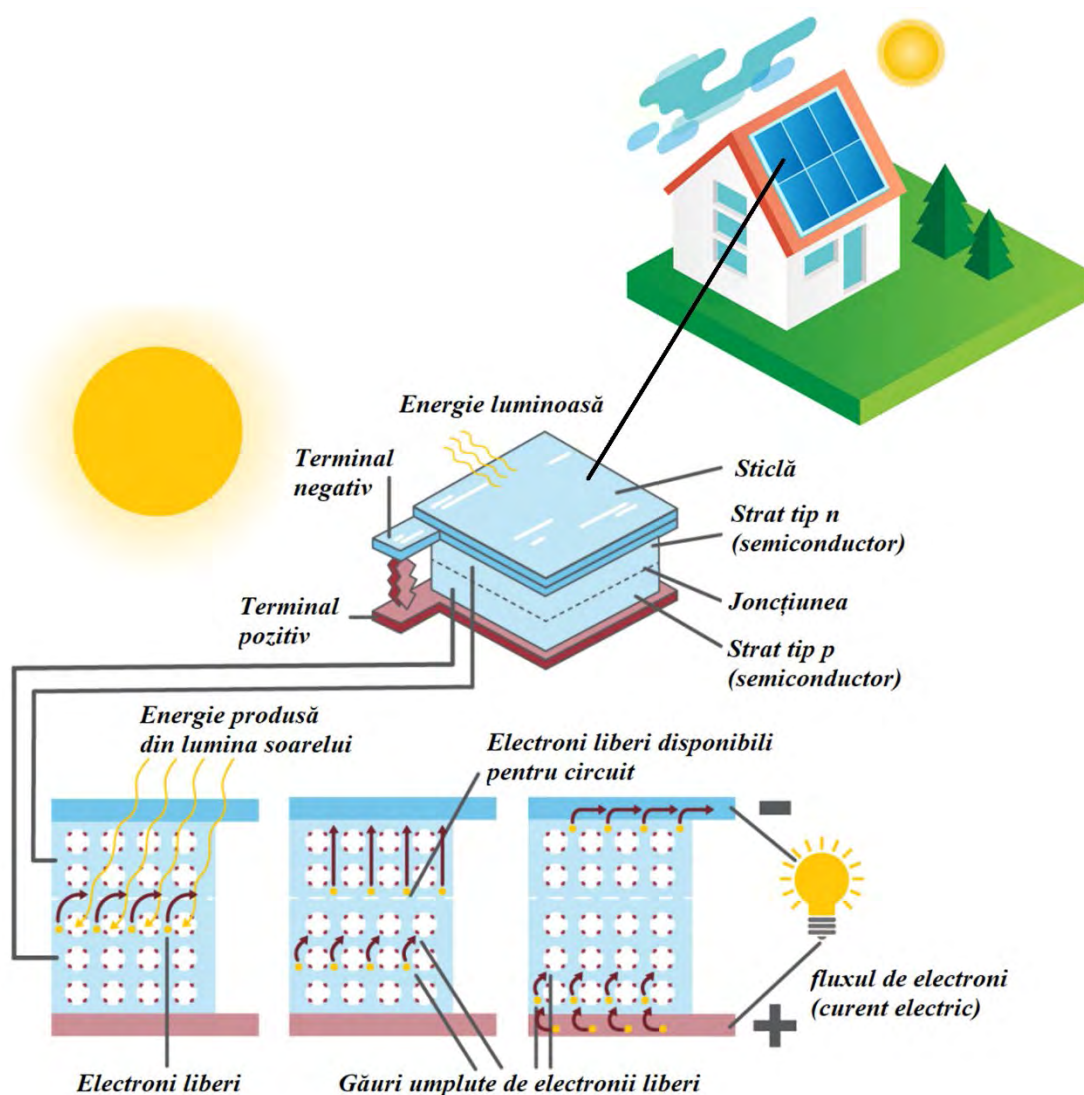


Figura 3.1. Producția fotovoltaică de curent electric

3.1. Detaliile constructive ale panourilor fotovoltaice

Panoul fotovoltaic este compus dintr-o varietate de straturi diferite în funcție de tehnologia fotovoltaică utilizată. Panoul fotovoltaic utilizat în această lucrare este un panou monocristalin pe bază de siliciu (Jinko Eagle PERC JKM315M-60-V).

Există șase straturi principale în acest panou fotovoltaic; învelișul din sticlă, un strat anti-reflexie (ARC), celule fotovoltaice, un strat de etilen acetat de vinil (EVA), un strat metalic posterior și un strat de tedlar din PVF (fluorura de polivinil). Aceste straturi sunt încorporate într-un cadru metalic, ale cărui efecte nu sunt incluse, deoarece suprafața sa redusă în raport cu suprafața panoului are un efect neglijabil asupra caracteristicilor termice ale panoului [21].

Straturile componente ale panourilor fotovoltaice sunt:

Învelișul din sticlă:

Stratul de sticlă al panoului fotovoltaic este realizat din sticlă călită, care a trecut printr-un proces rapid de încălzire și ulterior răcire pentru a-și spori rezistența. Sticla PV diferă din sticlă convențională. Sticla folosită pentru clădiri, de exemplu, are transmisie scăzută pentru a menține căldura și lumina în afara clădirii. Spre deosebire de sticla folosită în construcții, sticla folosită în panourile fotovoltaice este ultra-clară, cu o rată de transmisie ridicată și un conținut scăzut de fier pentru a extrage cât mai multă energie solară.

Strat anti-reflexie (ARC):

Siliciul poate reflecta până la 35% din radiațiile primite. Pentru a contracara acest lucru, se aplică un strat anti-reflexie (nitrură de siliciu), de obicei având grosimea de ordinul nanometrilor, care direcționează fotonii care intră prin sticlă în straturile inferioare ale celulelor.

Celule fotovoltaice (PV):

În panoul Jinko Eagle PERC JKM315M-60-V sunt utilizate plăci subțiri de siliciu monocristalin. Grosimea plăcilor monocristaline de siliciu ale celulelor de tip P utilizate în panourile fotovoltaice PERC (Passivated Emitter and Rear Contact – Emițător Pasiv și Contact Posterior) este de 170 mm [22]

Strat EVA:

Celulele fotovoltaice sunt încapsulate într-un strat de etilen acetat de vinil (EVA) pentru a fixa celulele fotovoltaice pe învelișul de sticlă și pe materialul de încapsulare din spate. De asemenea rolul acestui strat este de a oferi rezistență la umiditate și izolație electrică.

Contact metalic posterior:

Contactul metalic dintre celule se realizează pe partea din spate a celulelor fotovoltaice prin serigrafiera unei paste metalice, de obicei aluminiu, pe suprafața posterioară a acestora.

Strat de polimer Tedlar:

Stratul de polimer al panoului fotovoltaic este realizat din fluorură de polivinil (PVF). Acest strat este fotostabil și oferă izolație suplimentară și protecție împotriva umezelii pentru straturile fotovoltaice

Elementele componente ale unui panou fotovoltaic sunt evidențiate în Figura 3.2.

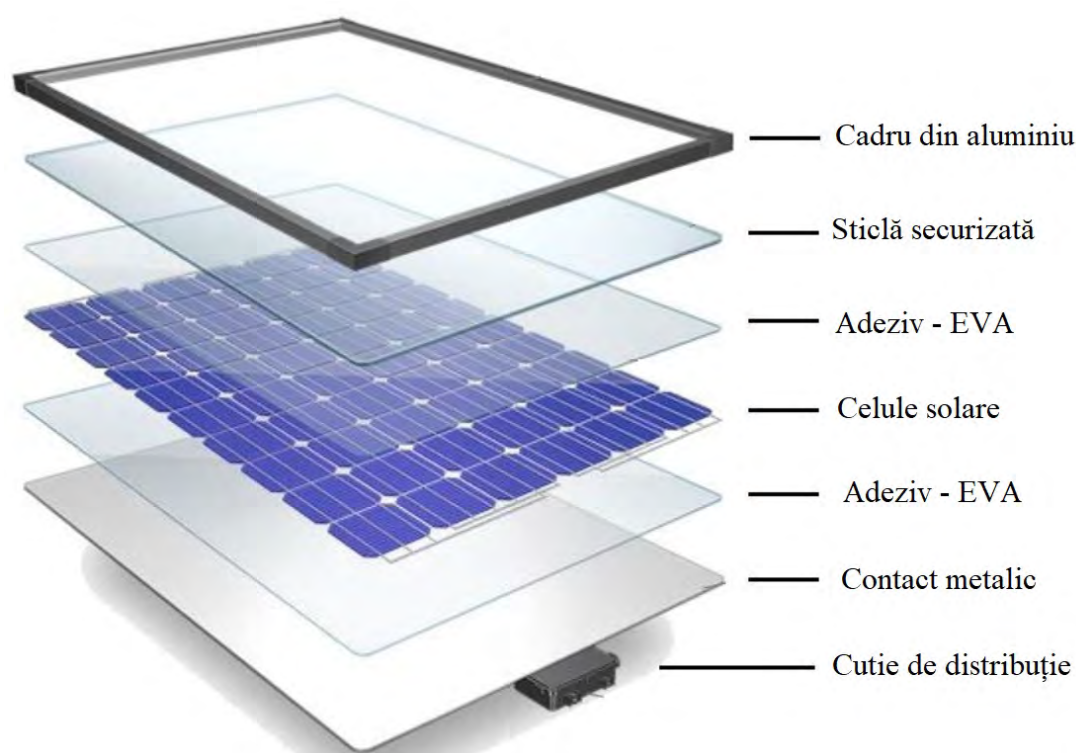


Figura 3.2. Elementele componente ale panourilor fotovoltaice

3.2. Parametrii de mediu care afectează eficiența panourilor

Celulele fotovoltaice sunt instalate în aer liber, precum și pentru sistemele PVT, făcându-le vulnerabile la condițiile meteorologice externe, care, la rândul lor, variază de la un loc la altul.

Există diferiți parametri de mediu care au un efect asupra panoului solar. De exemplu, lumina soarelui, mediul ambiant și temperatura celulelor, viteza vântului, umiditatea, umbrirea, praful, înălțimea instalării etc. Printre mai multe variabile, rolurile cheie le au într-adevăr iradierea solară și temperatura.

3.2.1. Efectul radianței solare

Deoarece intensitatea radiației solare se modifică în timp, performanța celulelor fotovoltaice se modifică în timp.

Efectele suprapunerii variabilelor atmosferice au fost studiate de Cano [23], care a investigat efectul acumulării de praf asupra mai multor seturi de module fotovoltaice cu unghiuri de înclinare

diferite de 0, 5, 10, 15, 20, 23, 30, 33 și 40°. Rezultatele acestui studiu indică faptul că radiația primită în fiecare unghi de înclinare variază în funcție de unghi și pierderea de energie din cauza poluării crește odată cu apropierea unghiului de înclinare din poziție orizontală, evidențiat în Figura 3.3 [24].

Mahleri [25] a construit un model matematic pentru a determina unghiul optim al celulelor fotovoltaice, care primesc cea mai mare cantitate de radiație solară într-o anumită perioadă. Cercetătorul a folosit date în acest scop pentru a măsura în continuare acuratețea modelului prezentat. În timpul studiului, cercetătorii au construit o bază de date care permite accesul la radiația solară globală medie a suprafețelor înclinate, unghiurilor de înclinare și orientări diferite în timpul perioadei de studiu. În acest studiu au fost propuse mai multe modele matematice pentru relația dintre unghiul de înclinare, media radiației globale și efectul suprafețelor înclinate asupra intensității acestei radiații. Modelele propuse au permis, de asemenea, achiziția valorilor unghiulare și ale direcției optime.

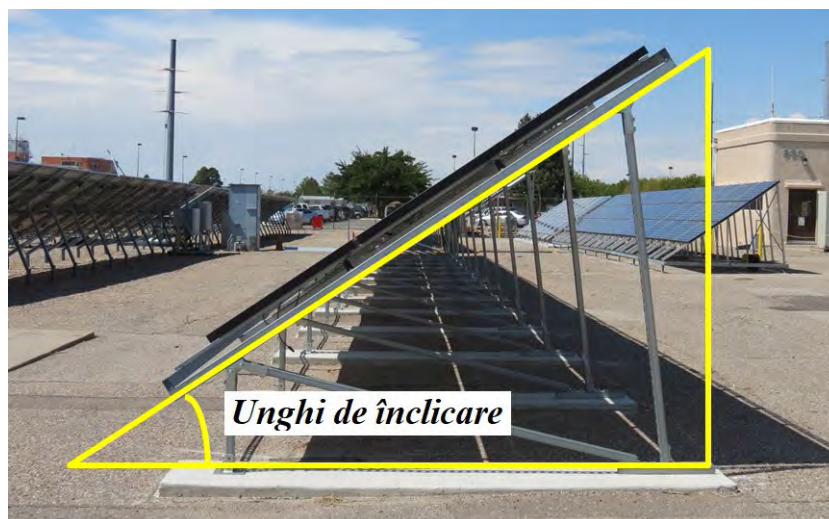


Figura 3.3. Unghiul de înclinare al panourilor fotovoltaice

Într-un studiu al lui Emmanuel [26], el a folosit un algoritm bazat pe un set de unghiuri de înclinare pentru simularea tuturor latitudinilor. Scopul acestui studiu este de a maximiza radiația solară globală către un panou unghiular prin calcularea unghiului ideal al panourilor fotovoltaice din clădiri și centrale fotovoltaice mari din sudul Italiei. În acest studiu, cercetătorii au luat radiația solară difuză pentru a determina tendința panourilor fotovoltaice de a maximiza radiația solară care cade pe celulă. În acest scop, au folosit date globale de radiație solară orizontală

3.2.2. Efectul temperaturii

Performanța sistemului fotovoltaic este influențată de factori meteorologici precum radiația solară, temperatura, indicele de masă a aerului și viteza vântului.

Fără un mijloc de răcire a panoului, temperaturile suprafeței acestuia în timpul funcționării sunt de obicei cu 40–50°C mai mari decât temperatura ambiantă. Prin urmare, atunci când panourile

sunt supuse celor mai înalte niveluri de energie solară, eficiența panourilor fotovoltaice convenționale este mult redusă. Acesta este adesea cazul în regiunile sudice ale Statelor Unite, unde temperaturile ambientale în timpul verii depășesc adesea 35°C, rezultând temperaturi la suprafața acoperișului care depășesc 60°C și temperaturile suprafeței panourilor de 80°C.

Se poate rezuma că eficiența celulelor fotovoltaice (PV) scade prin creșterea temperaturii acestora rezultată din intensitatea mare a radiației solare. Kern și Rissell [27] au fost primii care au propus sisteme fotovoltaice-termice (PVT). În astfel de sisteme, generarea de energie electrică este integrată cu extracția de căldură solară și utilizată în două moduri: primul este răcirea celulei fotovoltaice și al doilea este pentru a utiliza căldura extrasă în alte aplicații termice solare. Astfel, eficiența celulelor fotovoltaice poate fi îmbunătățită, la fel ca și utilizarea căldurii de la celule în aplicații de încălzire, cum ar fi încălzirea aerului în scopuri de confort, încălzirea apei în scopuri industriale casnice și uscarea produselor agricole și alte aplicații [28,29,30]

Curentul de scurtcircuit (I_{sc}) este afectat de cantitatea de fotoni absorbiți de materialul semiconductor și este astfel legat de intensitatea luminii [31]. Prin urmare, eficiența conversiei este destul de constantă, astfel încât puterea de ieșire este de obicei asociată cu iradiere, dar eficiența este redusă dacă temperatura celulei crește (Figura 3.4). Tensiunea în circuit deschis (V_{oc}) variază numai marginal cu intensitatea luminii [32].

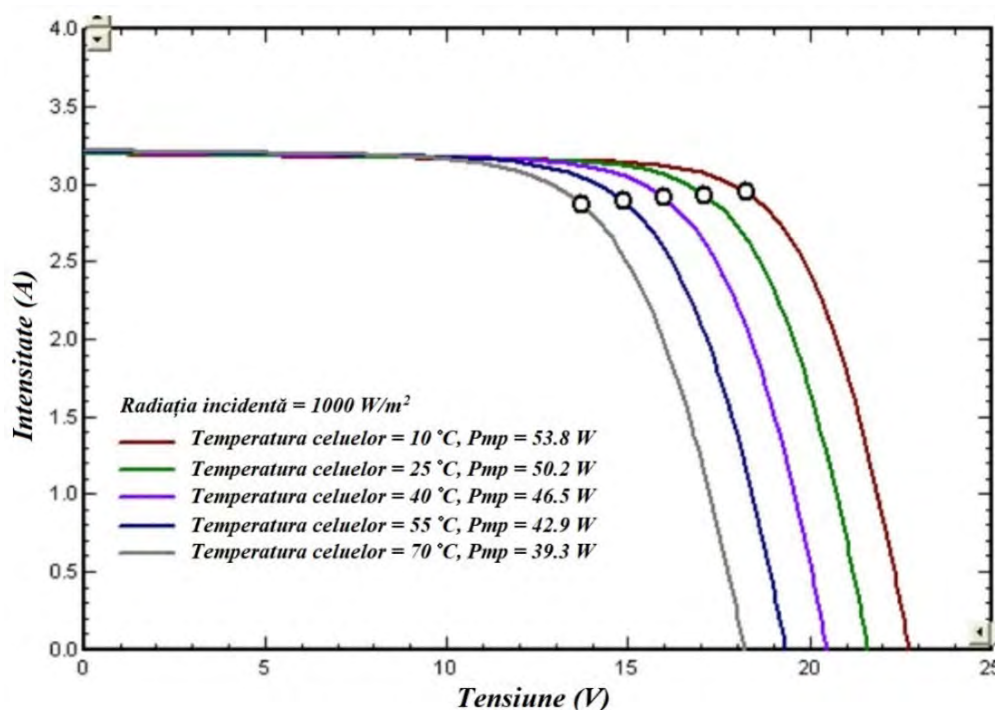


Figura 3.4. Variația eficienței celulei fotovoltaice în funcție de temperatura celulei

Eficiența actuală a majorității celulelor fotovoltaice comerciale este de obicei de aproximativ 17-18% [33]. Celulele fotovoltaice complexe au devenit mai accesibile și pot atinge o eficiență

maximă mai mare, eficiența teoretică maximă realizabilă într-o singură celulă de joncțiune p-n este de aproximativ 29.4% [34].

Temperatura de funcționare a celulelor fotovoltaice dintr-un panou fotovoltaic a fost studiată de mai mulți cercetători. În condiții normale, temperatura de funcționare a unei celule fotovoltaice este mai mare decât temperatura ambiantă. În analiza lor, cercetătorii au stabilit că temperatura celulelor fotovoltaice este dependentă de temperatura ambiantă și de radiația solară [35,36].

Multiple studii au arătat că eficiența electrică a celulei fotovoltaice de siliciu cristalin scade cu 0.4–0.5% odată cu creșterea temperaturii fotovoltaice cu 1°C [37,38].

3.2.3. Efectul prafului / umbririi

Creșterea temperaturii panoului fotovoltaic (PV) Nu se datorează numai mediului climatic (temperatura ambiantă), ci de asemenea, la problemele umbririi parțiale directe și indirecte; mai multe studii recente prezintă interes pentru cercetările noastre actuale [31,32].

Umbrirea modulului fotovoltaic poate fi cauzată de proiecția umbrei unui obiect instalat departe de panoul solar(exemplu: copac sau candelabru de iluminat etc.) sau cauzate de depunerea prafului, dacă acest strat este uniform pe tot panoul fotovoltaic, implica o reducere a temperaturii și a intensității radiației solare pe întreg panoul PV. De altfel, atunci când aceste fenomene apar parțial, se pot crea puncte fierbinți pe modul PV. Pierdere de putere datorată umbririi parțiale și a punctelor fierbinți poate fi mai mare de 70% [39].

Praful este caracterizat ca o formă pulverizată de particule mici de dimensiuni mai mici de 500 μm . Al doilea parametru de mediu este depunerea de praf, care depinde de distribuția sa pe modul PV (uniforma sau parțiala) mărimea și densitatea acestuia. Pierdere de eficiență depinde de masa exactă și dimensiunea depunerii de particule de praf pe suprafața modul PV. Depunerea particulelor pe suprafața PV este foarte puternică în climatul deșertului. Datorită particulelor de praf, producția fotovoltaică poate scădea cu aproape 40%.

În studiul lor Sheshpoli și colab. [40] au efectuat o investigație experimentală concepută pentru a urmări efectele acumulării de praf pe suprafața unui panou fotovoltaic. Această lucrare sa concentrat pe praful din apropierea fermei de pe panourile utilizate în agricultură. Au fost luate în considerare trei moduri: curat, prăfuit și noroi. Testele au fost efectuate pentru diferite moduri și rezultatele arată rolul important al acumulării de praf asupra eficienței panoului. Cea mai mare eficiență obținută pentru un panou curat, prăfuit și noroi a fost de 15.69%, 10.29% și, respectiv, 5.67%.

După cum se arată în Figura 3.5, pentru a evalua efectul prafului asupra eficienței panoului, au fost luate în considerare trei concentrații diferite pentru nivelul de prăfuire:

- (a) Panoul fotovoltaic curat
- (b) Panoul acoperit parțial cu praf.
- (c) Panou noroiOS și încetșosat din cauza prafului în combinație cu ploaie blândă.

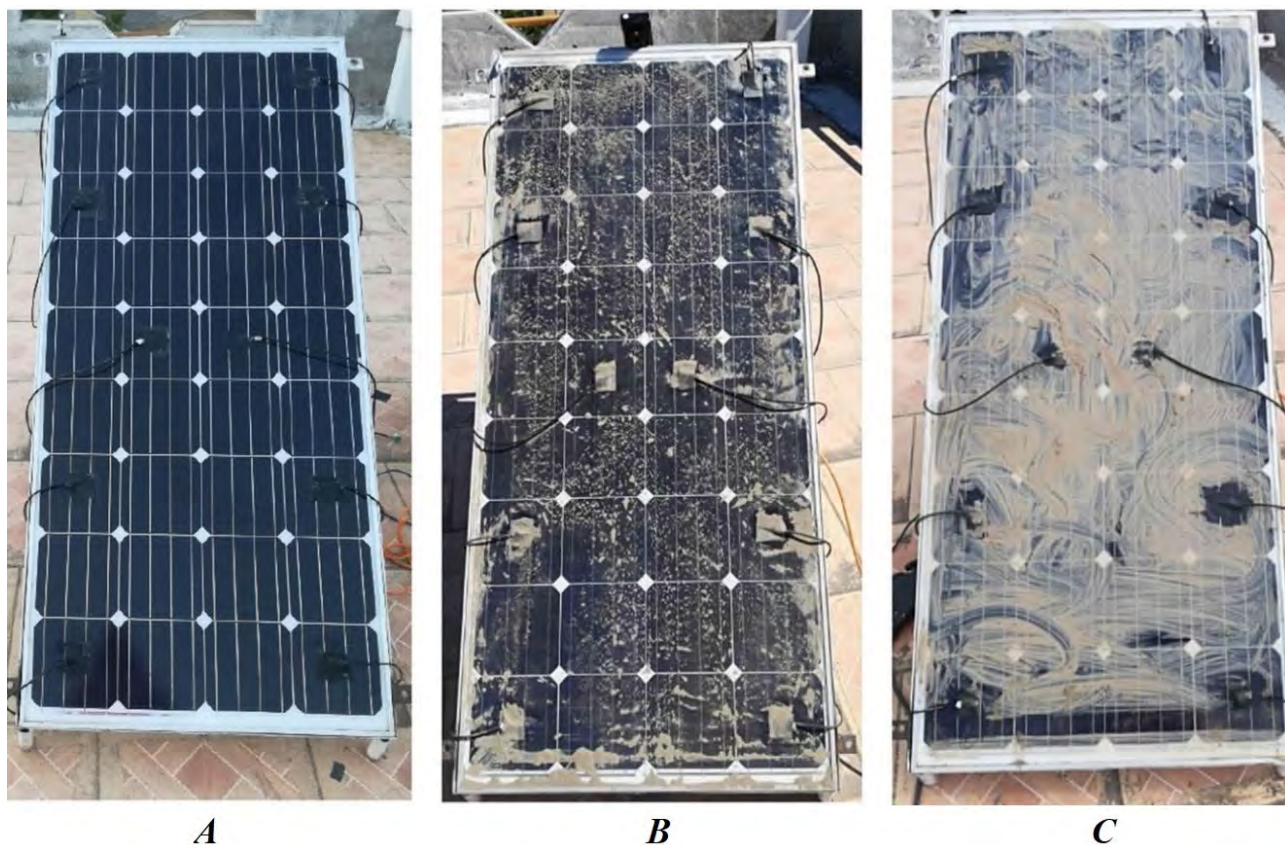


Figura 3.5. Depuneri de praf pe suprafața panourilor fotovoltaice

3.2.4. Efectul umidității

Apa provoacă efecte nocive grave asupra celulelor fotovoltaice, deoarece provoacă degradarea constituenților polimerici ai acestor celule, având ca rezultat scăderea eficienței acestora. De asemenea, accelerează procesele de coroziune atât pentru sticlă, îmbinările metalice, cât și pentru conductori metalici [41].

Vaporii de apă din aer determină umiditatea aerului, care este definită ca presiunea reală a vaporilor de apă din aer la presiunea vaporilor de apă saturați la aceeași temperatură, cercetătorii preferă să folosească termenul de umiditate relativă a aerului (RH). Vaporii de apă din aer (umiditatea aerului) se răspândesc în interiorul celulei fotovoltaice prin fisuri sau orificii de ventilație [42].

Umiditatea relativă a aerului depinde în întregime de temperatura aerului, iar această variație a factorului este cauza diferențelor de umiditate relativă [43].

Atunci când sistemele fotovoltaice funcționează în medii umede și calde, conținutul ridicat de umiditate din aer determină o scădere clară a performanței celulelor fotovoltaice. Modificările care

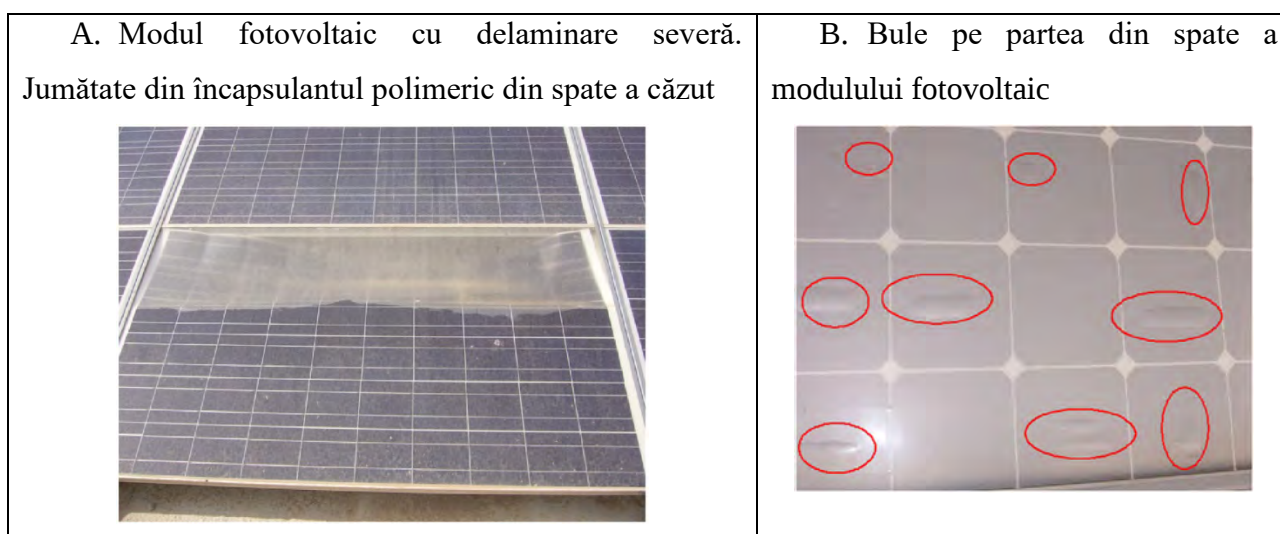
apar în interiorul celulelor fotovoltaice depind în întregime de modul în care se propaga umiditatea, care este un proces lent și lung [44].

Când umiditatea ajunge la polimer, umiditatea apoi ajunge la legăturile de interconectare ale celulelor solare și provoacă efectele sale bazate pe oxidare și slăbire, rezultând multe efecte adverse [45]. Exemple ale acestor efecte includ eroziunea îmbinărilor sudate, descărcarea fotoelectrică și creșterea numărului de căi de intrare [46]. Prin urmare, studierea efectului umidității relative asupra unităților fotovoltaice este necesară și obligatorie pentru cei care se ocupă de celule fotovoltaice pentru a reduce daunele acestora.

Un pericol important pe care umiditate îl produce pentru celulele fotovoltaice este formarea unei suprafețe vâscoasă care lucrează la aderența cu particulele de murdărie și praf și crește acumularea acestora. Cel mai important, facilitează aderența acestor molecule de suprafața celulei, formând un strat dificil de curățat.

Referințele [47,48] au trecut în revistă performanța modulelor fotovoltaice într-o atmosferă umedă și degradarea din cauza umidității relative ridicate. Cercetătorii au ajuns la concluzia că umiditatea ridicată a aerului a provocat eroziunea rețelei, rezultând o reducere semnificativă a conductibilității dintre emițător și rețea, care este principala cauză a deteriorării performanței celulelor fotovoltaice. În condiții de temperatură ridicată odată cu creșterea penetrării umidității și rezistența scăzută a aderenței, se produce o reducere semnificativă a eficienței celulelor.

Cercetătorii [49,50,51] au studiat efectul schimbării culorii celulei fotovoltaice din cauza coroziunii și degradării asupra performanței acesteia. Cercetătorii au explicat că procesul delaminării (în care se pierde aderența dintre celulele fotovoltaice și sticlă, sau pierderea aderenței dintre celule în sine și membrana polimerică) determină o creștere a reflexiei luminii mai degrabă decât absorbția și facilitează pătrunderea umidității în interiorul carcasi celulei ()



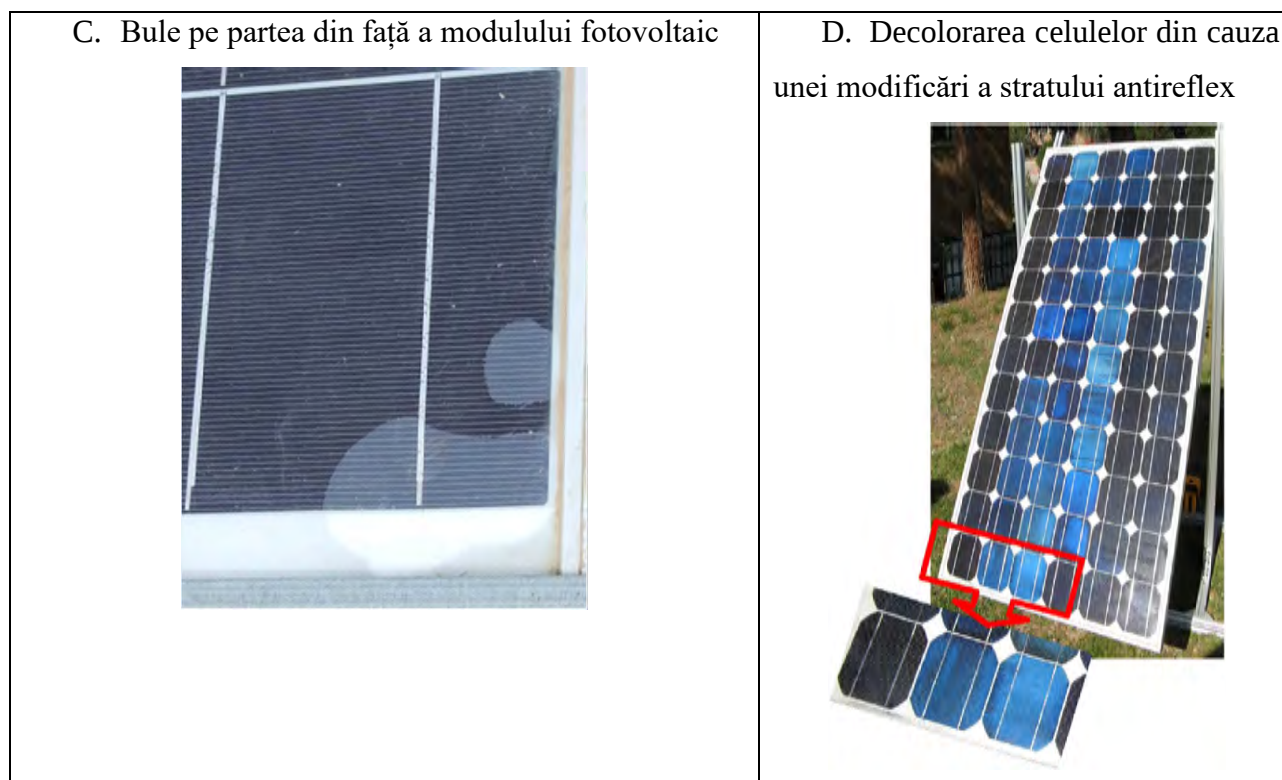


Figura 3.6. Degradarea panourilor ca efect al umidității

3.2.5. Efectul vântului

Vântul este o variabilă de mediu care are un efect direct asupra performanței celulelor fotovoltaice. Mișcarea vântului în jurul Pământului este cauzată de Soare (deși indirect), iar energia eoliană este utilizată ca tehnologie de generare a energiei electrice, una dintre cele mai bune tehnologii durabile și ecologice în producerea de energie electrică din întreaga lume [52].

Datorită instalării sistemelor de celule solare în atmosfera exterioară, acestea sunt cu siguranță expuse vântului. Efectul vitezei vântului asupra celulelor solare variază. Vântul are un efect pozitiv, deoarece funcționează pentru a elimina o parte din căldura carcasei celulei, ceea ce înseamnă răcirea normală a celulelor fotovoltaice pentru a le îmbunătăți performanța și productivitatea. Vânturile opuse suprafeței panoului solar pot provoca curățarea naturală și pot îndepărta o parte din praful acumulat pe suprafața panoului fotovoltaic, contribuind la îmbunătățirea productivității acestor panouri. Impactul negativ al vântului este că pune energie externă pe modulul solar, ceea ce determină necesitatea unor costuri suplimentare pentru a susține structura panourilor și, fără acestea, provoacă deteriorarea structurii de susținere a panourilor. Pe de altă parte, mișcarea rapidă a vântului provoacă ridicarea prafului și a murdăriei sus în aer și mutarea acestora în zone din vecinătate. Acest praf se va depune și se va acumula în cele din urmă pe suprafața panourilor solare, provocând o scădere bruscă a performanței acestor sisteme [53].

4. Principiile fundamentale ale panourilor Fotovoltaic-Termice

Modificarea temperaturii pe suprafața panoului este influențată de variabilele climatice externe, cum ar fi lumina soarelui, viteza vântului, umezeala, temperatura atmosferică și praful. Îmbunătățirea eficienței poate fi realizată prin reducerea temperaturii de funcționare a panourilor deoarece modificarea altor parametri ambientali este dificilă. De exemplu, în cazul panourilor fotovoltaice amplasate pe suprafețele vitrate din clădiri, care sunt suprafețe verticale și nedirecționale, radiația solară este un parametru incontrollabil. Pentru a face panourile fotovoltaice mai mult eficiente, evitând problema creșterii temperaturii, s-au efectuat o varietate de tehnici de răcire.

O strategie eficientă pentru îmbunătățirea eficienței electrice a unui panou fotovoltaic este prin atașarea unui sistem de recuperare a căldurii la unitatea fotovoltaică, deoarece prin absorbția căldurii excesive scade temperatura suprafeței celulei. Acest sistem hibrid este denumit sistem fotovoltaic-termic (PVT).

PVT este un colector hibrid care combină mecanismul de absorbție termică solară și module fotovoltaice. Colectorul urmărește să răcească modulul fotovoltaic prin mijloace de transfer de căldură, folosind simultan căldura sa pentru a produce energie termică. Figura 4.1 prezintă componentele unui colector PVT tipic cu un absorbant plat.

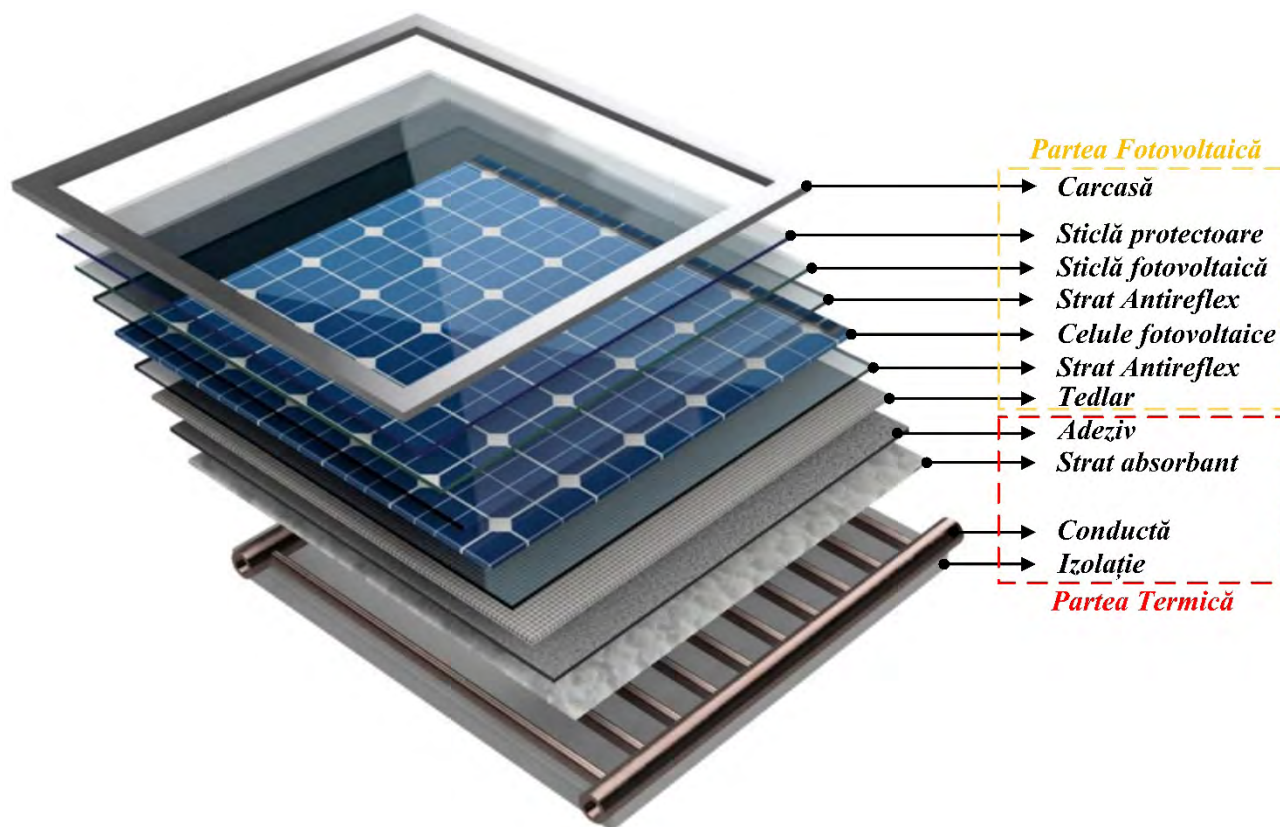


Figura 4.1. Structura unui panou fotovoltaic-termic

Modulele PVT hibride pot fi structurate astfel:

1. Modul fotovoltaic: orice tip de modul (policristalin, monocristalin, siliciu amorf etc.).

2. Absorbant termic: atașat la spatele modulului fotovoltaic, în general realizat dintr-un metal cu conductivitate termică ridicată, cum ar fi cupru, aluminiu, oțel galvanizat etc. Absorbantul se poate referi la tuburi sau plăci absorbante și tuburi prin care curgere un agent termic. În literatura de specialitate sunt utilizate diferite modele de absorbant, atât prin modificarea geometriei tubului [54], cât și prin configurarea secțiunii de curgere [55].

3. Racorduri de intrare și ieșire: țevile sau furtunurile, fie dure, fie flexibile, sunt conectate la racordurile de intrare și ieșire care reprezintă cele două capete ale tuburilor de curgere în care este transportat fluidul.

4. Izolație: plasată în partea inferioară și pe părțile laterale ale colectorului pentru a minimiza pierderile de căldură prin conducție și convecție. Acest lucru este foarte important pentru a maximiza randamentul termic, eficiența termică și eficiența generală panoului PVT

5. Carcasă: susține toate componentele colectorului, are în principal scopul de a proteja elementele modulului și pentru a asigura amplasarea corectă și funcționarea colectorului PVT.

Tipul de fluid de răcire joacă un rol fundamental în performanța PVT-urilor. Aerul, apa pură și agenții frigorifici sunt cele mai frecvente fluide de răcire care sunt utilizate în PVT [56].

4.1. Avantajele și dezavantajele panourilor fotovoltaic termice

Beneficiile majore ale sistemelor PVT sunt:

1. O utilizare mai largă a spectrului solar. Modulele fotovoltaice valorifică doar spectrul vizibil, în timp ce colectoarele solar-termice absorb și undele infraroșii. Utilizarea ambelor tehnologii solare în tandem poate duce la o utilizare mai eficientă a iradierii incidente.

2. Designul structurii de susținere va fi unitar și, prin urmare, prețul poate fi redus pentru instalarea unității hibride, în comparație costul total al instalării a două sisteme individuale.

3. Spațiul total necesar de instalare este mai mic pentru PVT decât pentru fiecare sistem, PV și Solar-termic, individual.

4. Sistemele PVT măresc izolarea construcției și umbrirea suprafeței în timpul verii, ceea ce poate duce la reducerea sarcinii termice.

5. Se obține un impact vizual bun atunci când se utilizează un colector hibrid PVT cu o carcasă adecvată, acoperișul casei având un aspect uniform. Este posibil să nu fie aceeași situație în cazul în care se utilizează separat colectoare solar-termice și panouri fotovoltaice. Combinarea celor două permițând afișarea doar a stratului exterior (care este partea de sus a modulului fotovoltaic) pentru privitorii acoperișului clădirilor.

6. Durata de viață a modulului fotovoltaic este îmbunătățită în comparație cu un modul fotovoltaic convențional, având în vedere că suportă în mod continuu o creștere mai mică a temperaturii celulei și, prin urmare, condiții de funcționare mai bune. Pe perioade lungi, materialul își poate menține eficiența de referință mai bine decât modulele PV convenționale.

Dezavantajele sistemelor PVT includ:

1. Compromisul dintre creșterea eficienței electrice și reducerea eficienței optice, sau invers, nu poate fi eliminat. Pierderile de iradiere incidentă sunt inevitabile dacă un panou fotovoltaic este amplasat la partea superioară a unui colector solar-termic.

2. Deși în teorie folosirea acestor tipuri de panouri este mai bună din punct de vedere economic, având în vedere faptul că instalatorii nu au adoptat această tehnologie, este totuși costisitoare în comparație cu panourile PV și solar-termice. Procesele de instalare a panourilor PV, solar-termice plate sau tip termosifon sunt destul de înțelese și practicate în toată industria energiei solare. Nu același lucru se poate spune despre panourile PVT pentru multe țări.

3. Deși economisirea spațiului este un avantaj atunci când se utilizează unități PVT hibride, este de remarcat că greutatea PVT combinată este mai mare decât cea a sistemelor PVT și solare separate. Greutatea mai mare poate prezenta unele probleme în timpul instalării și unele limitări pentru clădirea specifică pe care urmează să fie instalată.

4. Deși generarea de energie este mai mare pentru PVT atunci când este comparată cu un sistem PV convențional, sistemele PV au avantajul lipsei părților mecanice în mișcare, și a zgomotului. Nu același lucru se poate spune despre PVT, având în vedere că în modul activ, sistemul trebuie să fie antrenat de o pompă.

5. Pentru modelele avansate care utilizează nanofluide, prețul de achiziție și amestecare a acestor fluide este încă destul de mare și nu sunt disponibile pe piață.

Capacitatea instalată a panourilor PVT este considerabil mică în comparație cu colectoarele solare termice și fotovoltaice separat, ceea ce este un rezultat direct al noutății acestora. Cu toate acestea, acestea câștigă avânt în UE și oferă un domeniu de cercetare activă.

Deși dezavantajele pot părea prea multe, este de remarcat că această tehnologie este încă destul de nouă, iar în acest moment (2022) sunt propuse multe modele noi de dezvoltare a acestui domeniu. Odată ce comercializarea la scară largă intră în vigoare, se preconizează că aceste sisteme vor fi mai rentabile și mai prietenoase pentru consumatori. Cercetarea în sistemele PVT are potențialul de a fi viitorul pieței solare.

5. Cercetări experimentale

5.1. Obiective

Pentru a efectua testarea performanței termice și electrice a colectoarelor PVT, a fost construită în laborator un stand de testare interioară constând dintr-un simulator solar.

Programul de cercetare experimentală a urmărit mai multe etape:

- Alegerea și testarea corpului de iluminat destinat simulării solare;
- Proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar;
- Proiectarea, construcția și testarea panourilor fotovoltaic-termice hibride

Principalul obiectiv al programului de cercetare experimentală este conceperea unor sisteme fotovoltaic-termice hibride cu eficiență ridicată.

5.2. Proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar

5.2.1. Alegerea și testarea corpului de iluminat destinat simulării solare

Corpul de iluminat utilizat în simularea intensității solare este o lampă fluorescentă cu vapori de mercur de înaltă presiune, model Ultra Vitalux, produs de compania OSRAM, având o putere nominală de 300 W și conform fișei tehnice oferite de producător este destinată pentru aplicații industriale precum simularea luminii solare, întărirea lipiciului, îmbătrânirea artificială a materialelor și expunerea straturilor fotorezistente sensibile la ultraviolete (UV) [57].

În vederea construirii simulatorului solar s-au luat în considerare niște cerințe minime pe care corpul de iluminat trebuie să le îndeplinească simultan:

- Emiterea unei radiații într-un spectru luminos convertibil fotovoltaic;
- Menținerea intensității luminoase constante pe parcursul unei perioade îndelungate de funcționare;
- Menținerea uniformității radiației pe parcursul unei perioade îndelungate de funcționare;
- Asigurarea posibilității de comandă și de manevră;

Într-o prima etapă s-a testat intensitatea radiației luminoase produse de o lampă, pentru această etapă s-a efectuat o serie de măsurători pe un contur de incidență circular. În acest scop s-au efectuat măsurători în mai multe puncte raportat la centrul lămpii, urmărind contururi circulare cu diametrul cuprins între 0 și 40 cm, conform Figura 5.1, și la diferite distanțe față de mijlocul suprafeței radiante a lămpii, de la 10 la 35 cm.

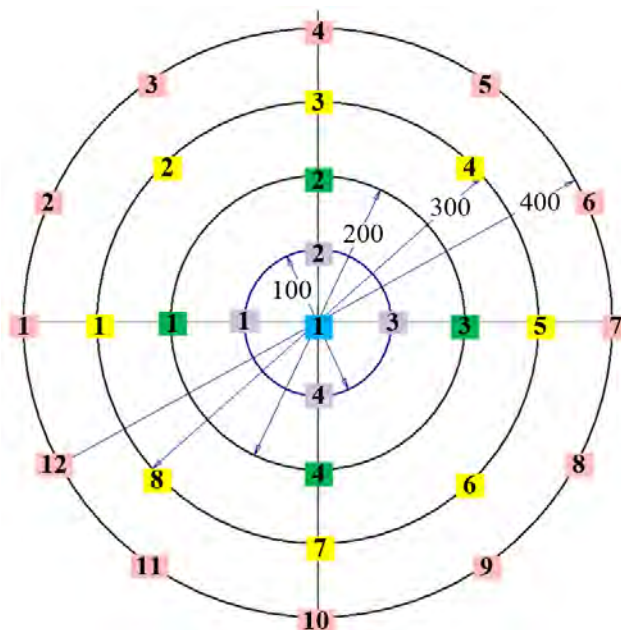


Figura 5.1. Reprezentarea grafică a punctelor de măsură a radiației produse de o lampă

În urma măsurătorilor s-a efectuat media aritmetică pentru valorile de pe fiecare contur ($C_1 = 0 \text{ cm} - C_5 = 40 \text{ cm}$) și în funcție de distanța planului de măsurare a valorilor fluxurilor emise de o singură lampă față de corpul de iluminat ($D_1 = 10 \text{ cm} - D_6 = 35 \text{ cm}$) s-a realizat tabelul și graficul aferent prezentat în Figura 5.2.

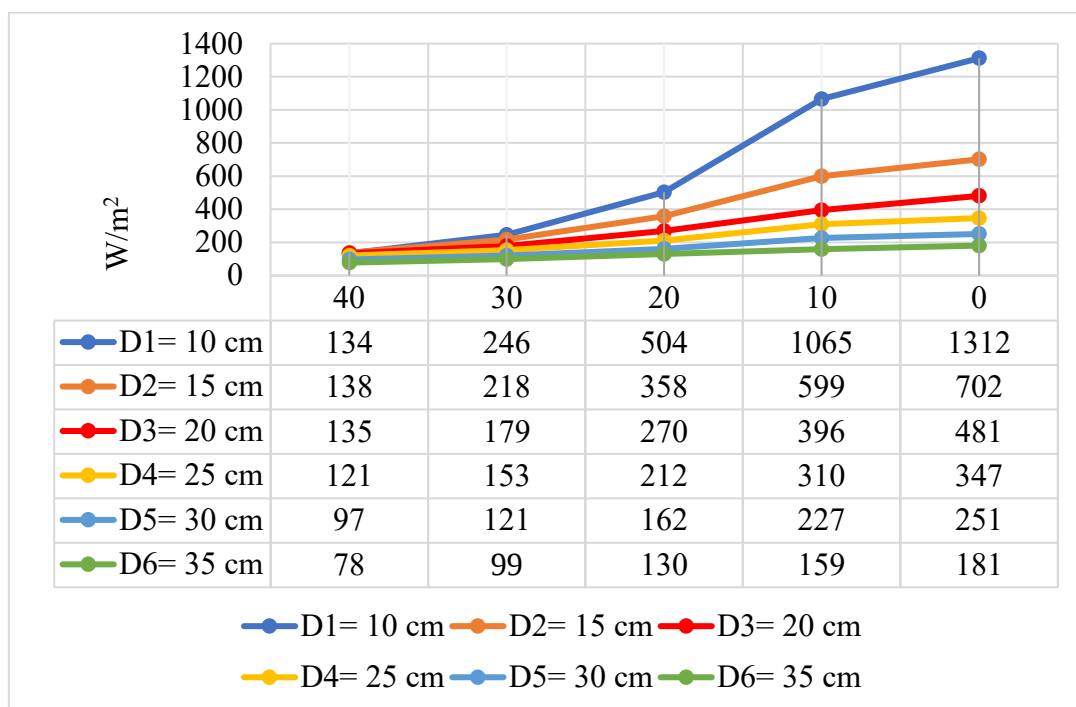


Figura 5.2. Fluxul luminos emis de o lampă

Ulterior utilizând aceste informații s-a proiectat simulatorul solar utilizat pentru efectuarea experimentelor.

5.2.2. Proiectarea simulatorului solar

Primul pas a fost stabilirea suprafeței necesare de acoperire a corpurilor de iluminat. Pentru acest proces s-a pornit de la dimensiunile unui panou fotovoltaic ce va fi utilizat în etapă experimentală a studiului. Proiectarea standului experimental s-a realizat prin modelarea 3D cu ajutorul programului Autodesk Inventor Profesional utilizând o licență educațională [58].

Panoul fotovoltaic are 1650 mm înălțime și 992 mm lățime conform datelor tehnice oferite de producător [59].

Simulatorul solar constă într-o carcasă dreptunghiulară din tablă cu grosimea de 1 mm, pe spatele căreia sunt amplasate 12 găuri cu diametrul de 40 mm, împărțite în 3 coloane, care servesc la montarea de dulii pentru a susține corpurile de iluminat. Carcasa are o înălțime de 1652 mm și o lățime de 1000 mm și este atașată de un cadru realizat din profiluri de oțel cu secțiune pătrată cu grosimea de 30x30 mm². Cadrul este așezat pe 4 roți cu diametru de 30 mm pentru a facilita manevrabilitatea simulatorului. Mai multe detalii constructive pot fi observate în Figura 5.3.

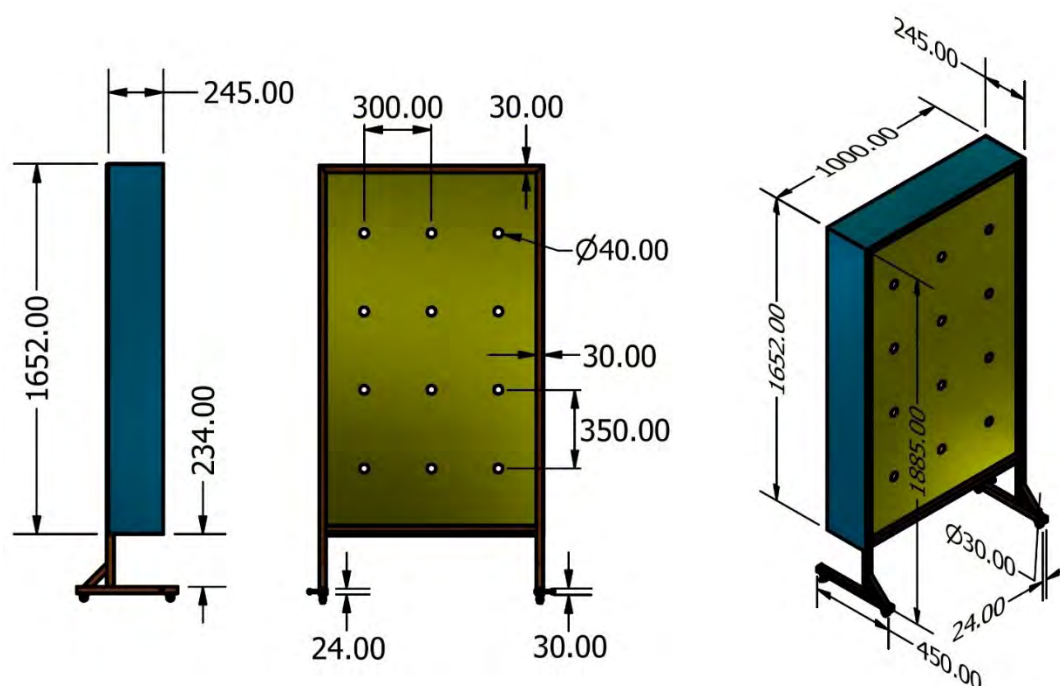


Figura 5.3. Detalii constructive pentru simulatorul solar

Cadrul simulatorului solar va transla de la un panou fotovoltaic la altul în funcție de parametrii fiecărui experiment cu ajutorul celor 4 roți. De asemenea acesta va fi apropiat sau îndepărtat de suprafața panoului fotovoltaic în funcție de necesarul de flux termic al fiecărui experiment.

În cele 12 găuri de pe spatele cutiei vor fi inserate 12 lămpi de tip 230V 300W E27 UV - Osram ULTRA VITALUX.

Următoarea etapă a constat în execuția simulatorului solar.

5.2.3. Execuția simulatorului solar

Prima etapă din procesul de execuție a constat în realizarea cadrului metalic realizat din profiluri de oțel cu secțiune pătrată cu grosimea de 30x30 mm², la partea inferioară, cadrul de susținere are 4 roți cu diametru de 30 mm. Pentru a preveni disiparea radiației UV în încăpere și a concentra lumina doar pe suprafața panoului, perimetral s-a construit o carcasă realizat din tablă de 245 mm lățime și 1 mm grosime. Ulterior cadrul simulatorului solar a fost vopsit în câmp electrostatic cu vopsea de culoare albă.

În Figura 5.4 sunt evidențiate etapele ulterioare din execuția simulatorului solar și în **Error! Reference source not found.** este evidențiată corespondența dintre modelul proiectat (**Error! Reference source not found.-a**) și simulatorul executat (**Error! Reference source not found.-b**) :

- Montarea duliilor model E27 pe șine metalice omega 3.5 x 100 cm [60]
- Montarea șinelor pe cadrul simulatorului solar
- Montarea echipamentelor electrice și realizarea conexiunilor electrice
- Amplasarea lămpilor în dulii



Figura 5.4. Execuția simulatorului solar

5.2.4. Testarea simulatorului solar

Pentru a facilita simularea solară în parametri optimi a fost necesară testarea simulatorului solar. În acest scop, s-a măsurat intensitatea radiației luminoase produsă de lămpi pe un plan de dimensiuni echivalente cu suprafața celulelor fotovoltaice, $1600 \times 960 \text{ mm}^2$, în 77 de puncte la distanță de 160 mm unul față de altul, Figura 5.5. Punctele de măsură a radiației produse de simulatorul solar. La fel ca și în cazul unei singure lămpi s-a măsurat intensitatea luminoasă și în funcție de distanța dintre simulatorul solar și planul punctelor de măsură.

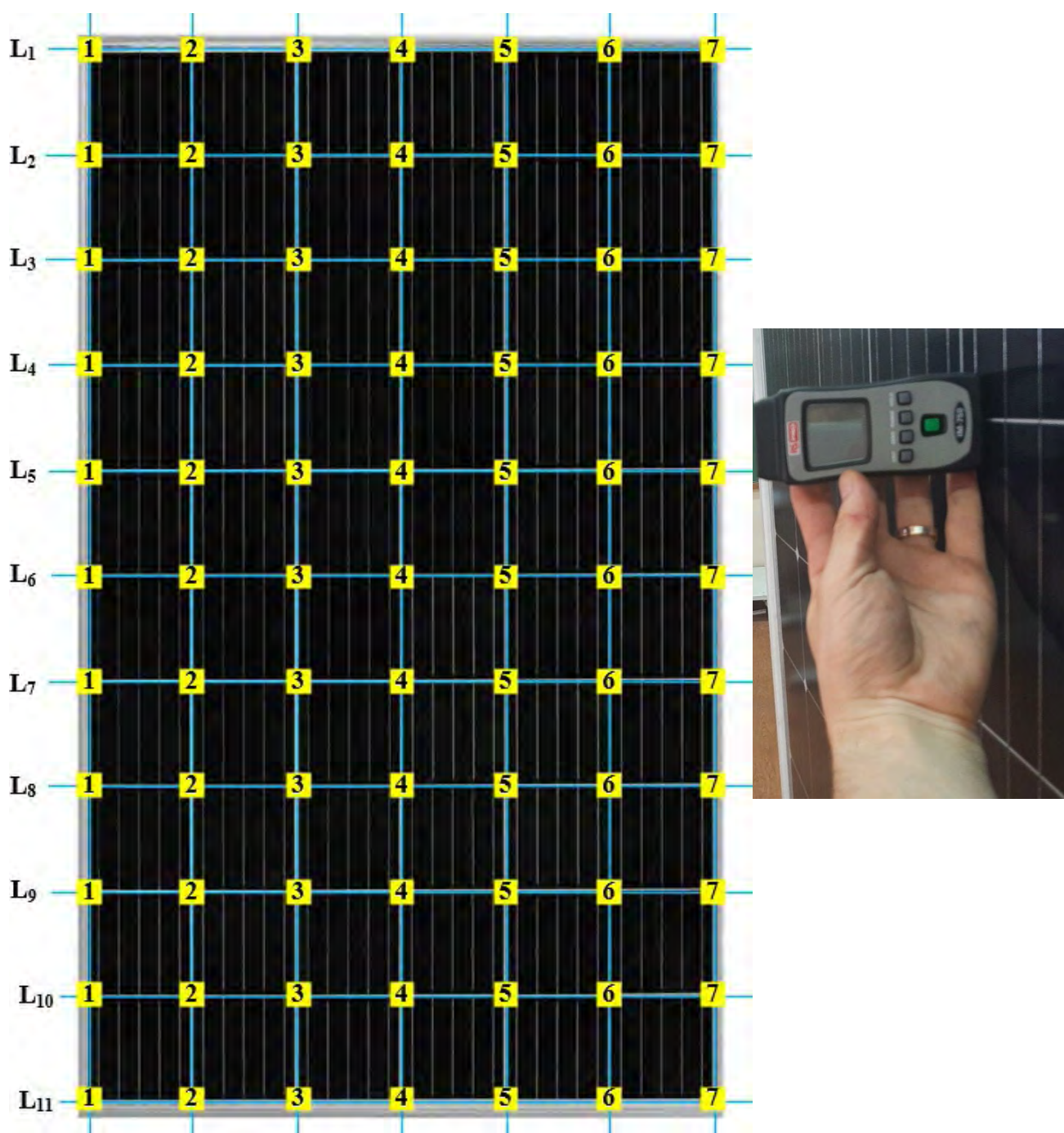


Figura 5.5. Punctele de măsură a radiației produse de simulatorul solar

În Tabelul 5.1, este evidențiată media aritmetică a valorilor înregistrate pentru radiația produsă de simulatorul solar în funcție de distanța dintre acesta și planul de măsură.

Tabelul 5.1. Valorile medii ale radiației produsă de simulatorul solar, în funcție de distanță

<i>d</i> (cm)	<i>G</i> (W/m ²)
10	427
20	400
30	353
40	302
50	255
60	245
80	201
100	167

5.3. Proiectarea panourilor fotovoltaic-termice hibride

5.3.1. Proiectarea și execuția cadrului de susținere

Pentru a simula funcționarea panourilor fotovoltaice este necesar ca panourile fotovoltaic termice să fie poziționate pe direcție verticală, astfel încât radiația luminoasă produsă de simulatorul solar să cadă incident pe suprafața panourilor.

Panourile fotovoltaice vor fi prinse de un cadru metalic realizat din profiluri de oțel cu secțiune pătrată de 30 mm × 30 mm. Cadrul are înălțimea de 1740 mm și lățimea de 1140 mm. De la baza cadrului până la nivelul roților barele verticale au lungimea de 240 mm rezultând astfel o înălțime totală de 1980 mm. Mai multe detalii constructive sunt prezentate în Figura 5.6.

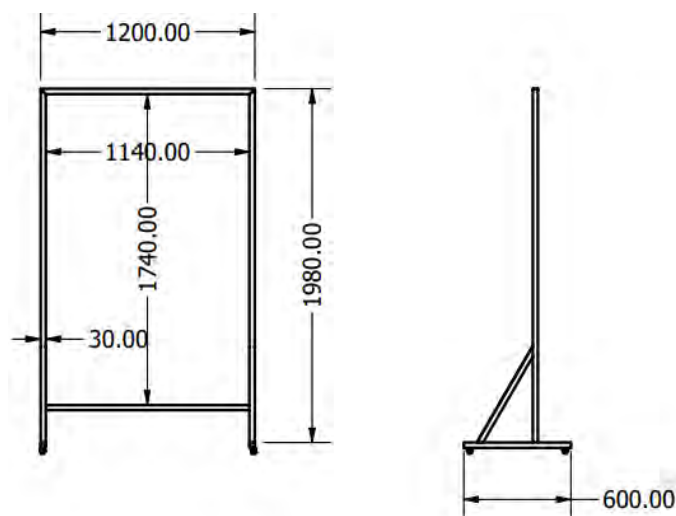


Figura 5.6. Cadru panou fotovoltaic

Pentru ușurință în transportare cadrul este echipat cu 4 roți cu diametrul de 30 mm. S-au realizat un număr de 8 cadre care vor susține toate tipurile de panouri fotovoltaice testate. La fel ca și în cazul simulatorului solar, cadrele au fost vopsite cu vopsea de culoare albă.

5.3.2. Proiectarea sistemelor de răcire ale panourilor fotovoltaic-termice

Pentru a putea face o analiză pertinentă în ceea ce privește cea mai bună variantă constructivă pentru sistemul de răcire, s-au luat în considerare trei design-uri pentru dispunerea conductelor în sistemul de răcire a panoului fotovoltaic. De asemenea s-au proiectat și două sisteme de răcire pasivă a panourilor fotovoltaice utilizând tuburi termice.

În prima fază a fost necesară modelarea fiecărei piese individuale în programul **Autodesk Inventor Professional**.

Panoul fotovoltaic-termic, prezentat în Figura 5.7 [61], este format din următoarele elemente:

1. Intrare agent de răcire, apă
2. Ieșire agent de răcire, apă
3. Carcasă oțel
4. Straturi suplimentare de protecție a celulelor fotovoltaice
5. Celule fotovoltaice
6. Sistem de recuperare a căldurii

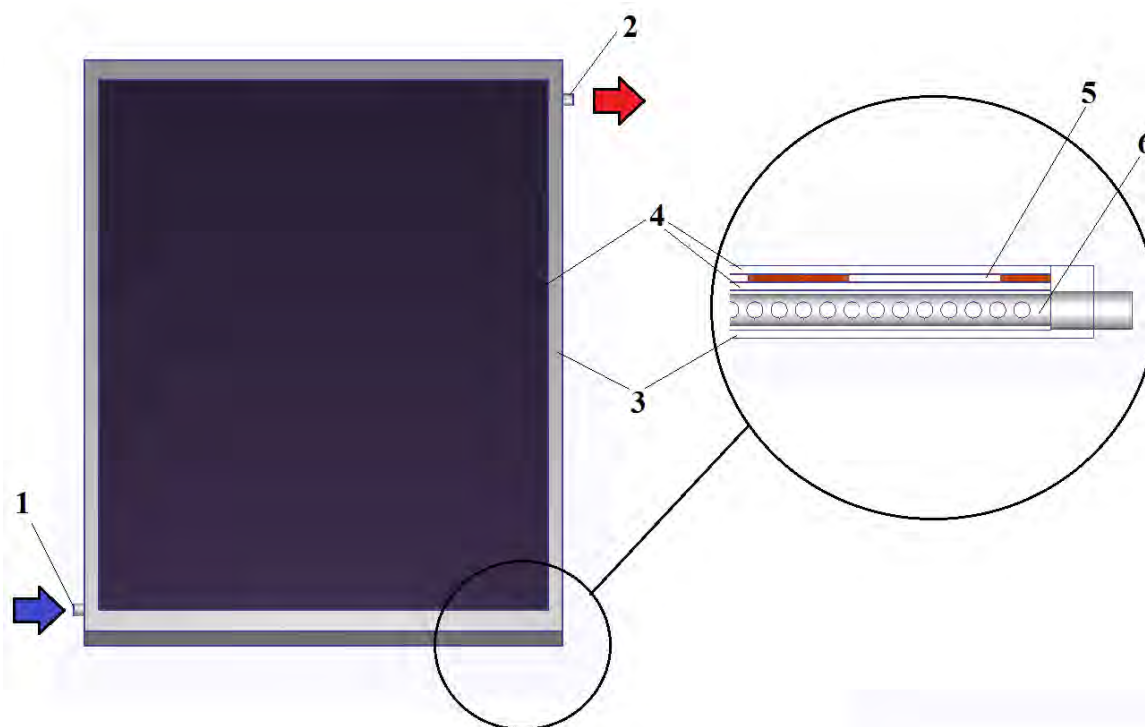


Figura 5.7. Elemente modelelor panourilor fotovoltaic-termice

5.3.2.1. Proiectarea panourilor fotovoltaic-termice

1. Panoul fotovoltaic termic tip registru

Prima variantă de sistem de răcire este un sistem de răcire cu tuburi verticale din cupru cu diametrul de 10mm, amplasate la 20mm distanță între ele, prin care curge apă dintr-un distribuitor amplasat la partea inferioară a panoului spre un colector amplasat la partea superioară, confecționate din țeava de cupru de 15mm în diametru, Figura 5.8.

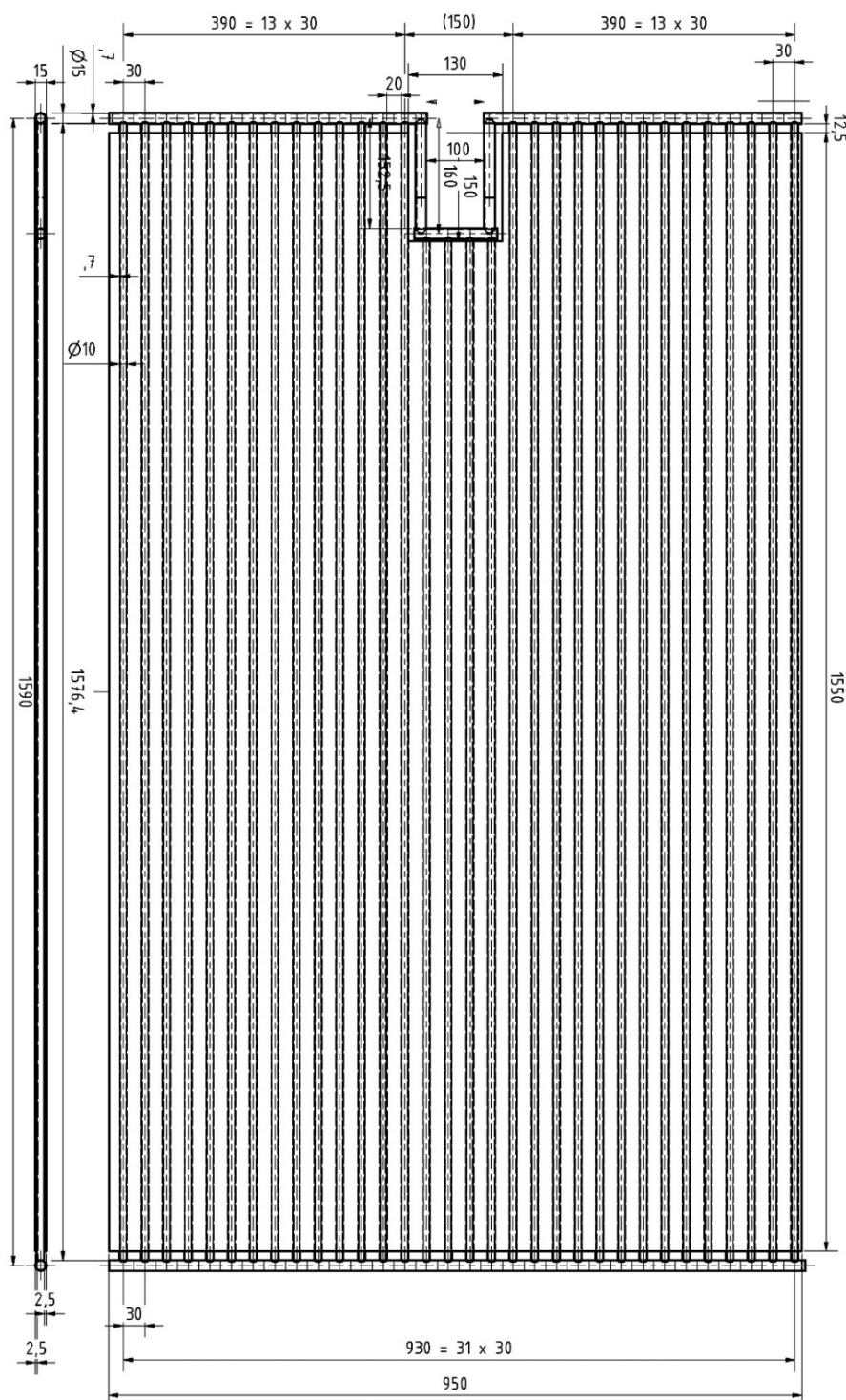


Figura 5.8. Detalii constructive ale sistemului de răcire tip registru

2. Proiectarea panoului fotovoltaic termic tip serpentină

A doua variantă de sistem de răcire este un sistem de răcire în care agentul termic de răcire va tranzita placa printr-o serpentină confecționată din țevă de cupru cu diametrul de 10 mm, raza de curbura fiind 30mm. Detaliile constructive ale acestei variante sunt prezentate în Figura 5.9.

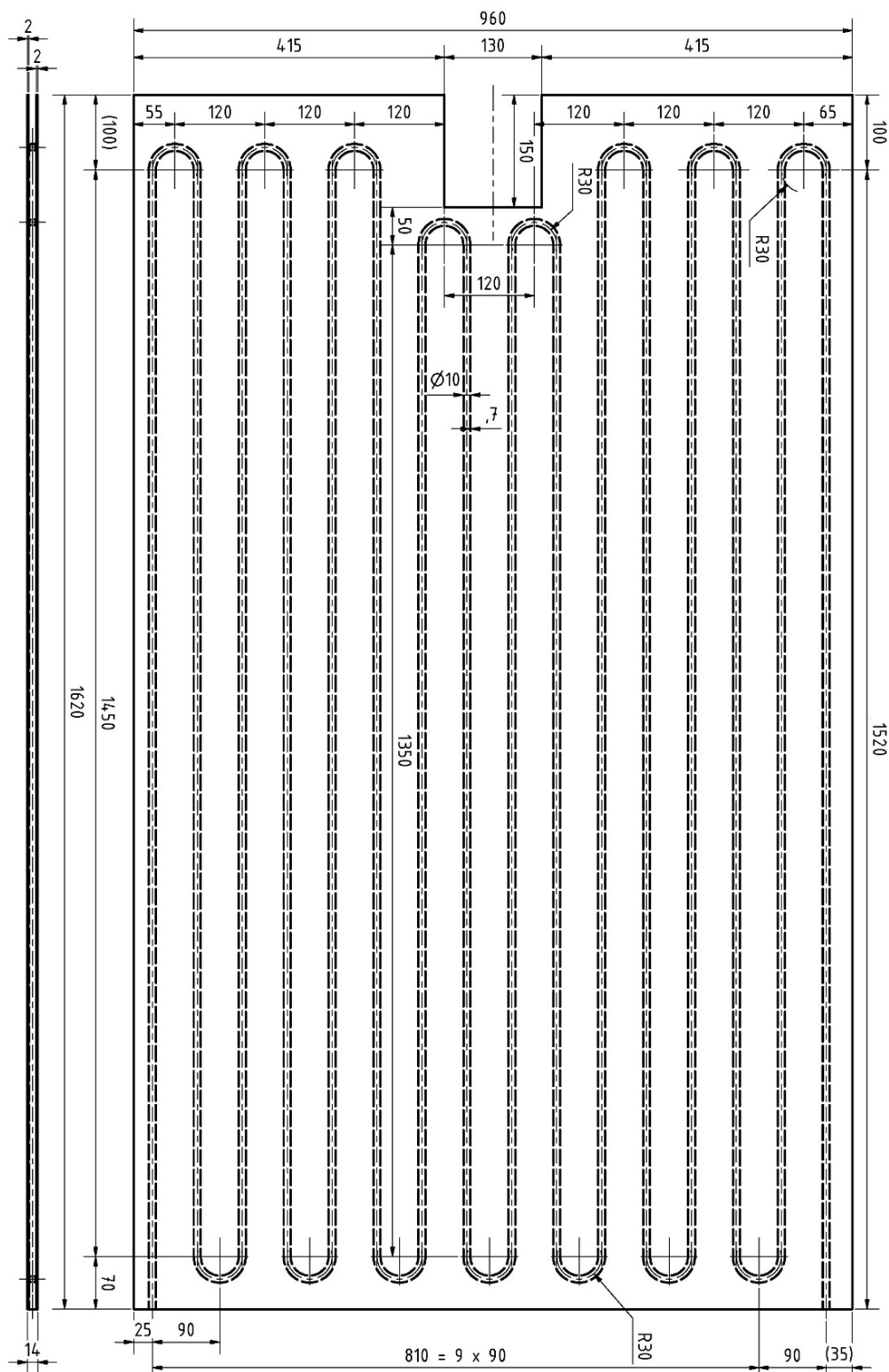


Figura 5.9. Detalii constructive ale sistemului de răcire tip serpentină

3. Proiectarea panoului fotovoltaic termic tip serpentine multiple

A treia variantă de sistem de răcire este un sistem de răcire în care agentul termic de răcire curge de la un distribuitor din țeava de cupru cu diametrul de 15mm, prin 10 serpentine confecționate din țeavă de cupru cu diametrul de 10 mm având raza de curbă de 30mm, spre un colector din țeava de cupru de 15mm. Detaliile constructive ale acestei variante sunt prezentate în Figura 5.10.

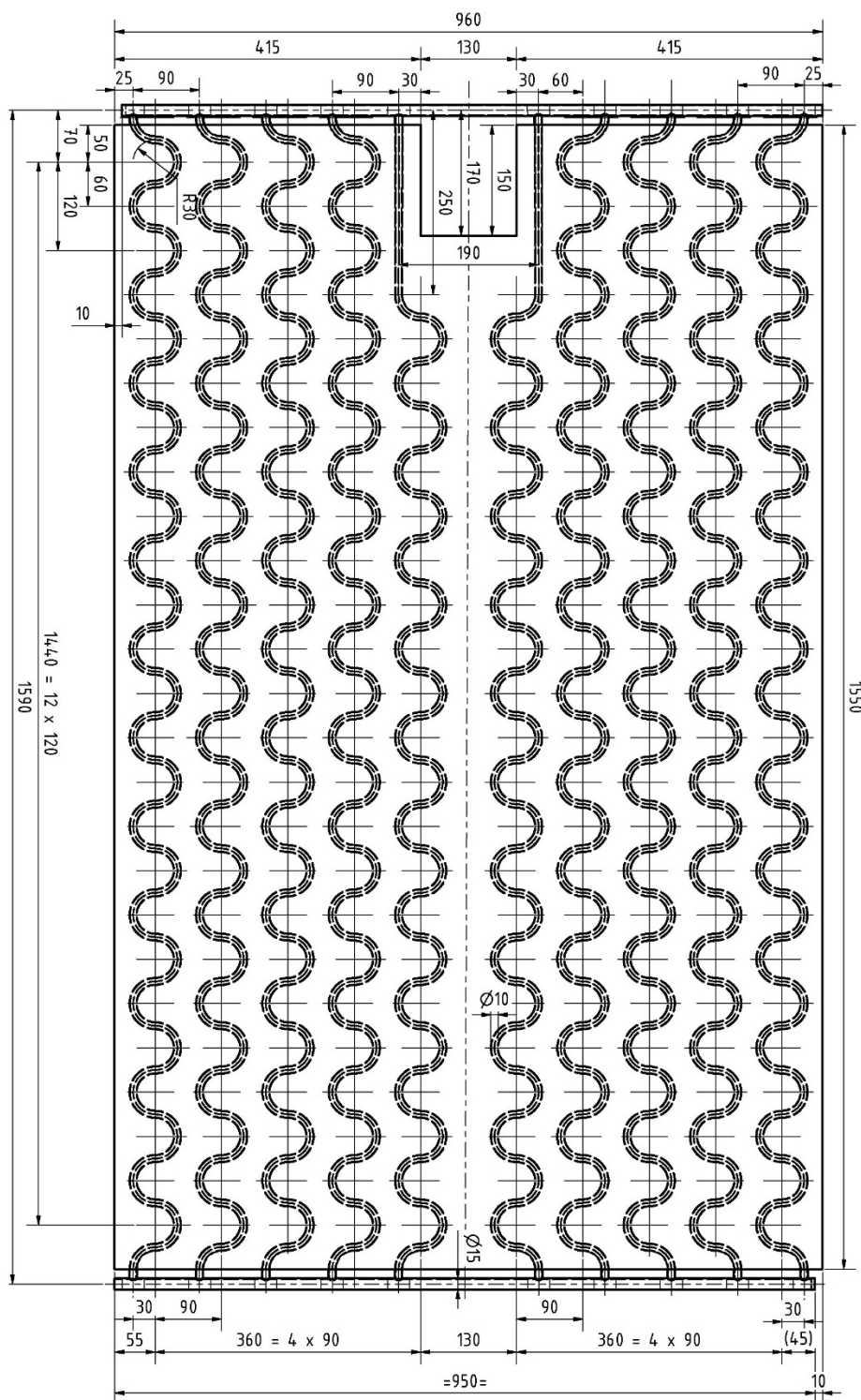


Figura 5.10. Detalii constructive ale sistemului de răcire tip serpentine multiple

4. Panouri fotovoltaice răcite cu tuburi termice

Pentru a îmbunătăți eficiența termică a panourilor fotovoltaice s-a considerat utilizarea tehnologiei tuburilor termice deoarece acestea prezintă proprietăți termice ridicate și puține dezavantaje.

În acest scop s-a pornit de la alegerea a două tuburi termice care prezintă caracteristici favorabile, atât din punct de vedere a parametrilor constructivi cât și din punct de vedere a eficienței transferului de căldură.

Tuburile termice utilizate pentru extragerea căldurii de pe suprafața panoului fotovoltaic sunt de 2 tipuri, tuburi termice late cu secțiune dreptunghiulară și tuburi termice înguste cu secțiune ovală cu laturile plate.

a) Proiectarea panoului fotovoltaic răcit cu tuburi termice înguste

Tuburile termice înguste sunt produse de Advanced Thermal Solutions Inc., sunt realizate din cupru și folosesc ca fluid de lucru apă distilată [62].

În aceasta variantă de sistem de răcire a panourilor fotovoltaice s-au considerat dimensiunile panoului fotovoltaic și a tuburilor termice înguste pentru a proiecta placa de transfer termic în care se vor integra tuburile termice.

Pe suprafața plăcii sunt amplasate 63 (7×9) tuburi termice la distanțe egale unul față de celălalt, la 55 mm pe verticală și 106 mm pe direcție orizontală. Pornind de la dimensiunile tubului termic din fisa producătorului și verificând corespondența dintre datele tehnice și realitate s-a modelat tubul termic îngust cu o înclinare de 45° și având lungimea evaporatorului de 70mm pentru a maximiza eficiența acestuia, Figura 5.11.

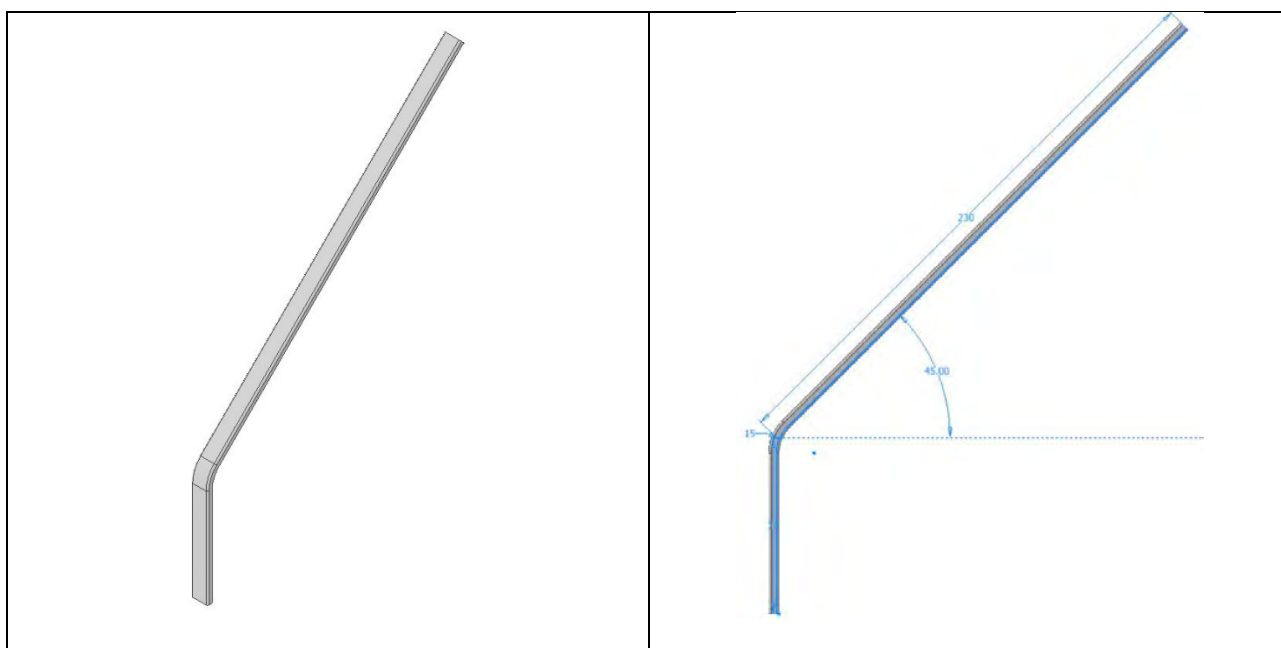


Figura 5.11. Modelul tubului termic îngust îndoit la 45°

Pentru amplasarea unui tub pe placă a fost necesară proiectarea a două orificii de secțiune dreptunghiulară, primul dintre acestea având 70 mm înălțime, 14 mm lățime și o adâncime de 6 mm, acesta servind la menținerea tubului pe poziție și un al doilea orificiu de 35 mm înălțime, 14 mm lățime și o adâncime de 10 mm, servind la străpungerea plăcii de către tubul termic. Detaliile constructive ale acestei plăci sunt evidențiate în Figura 5.12.

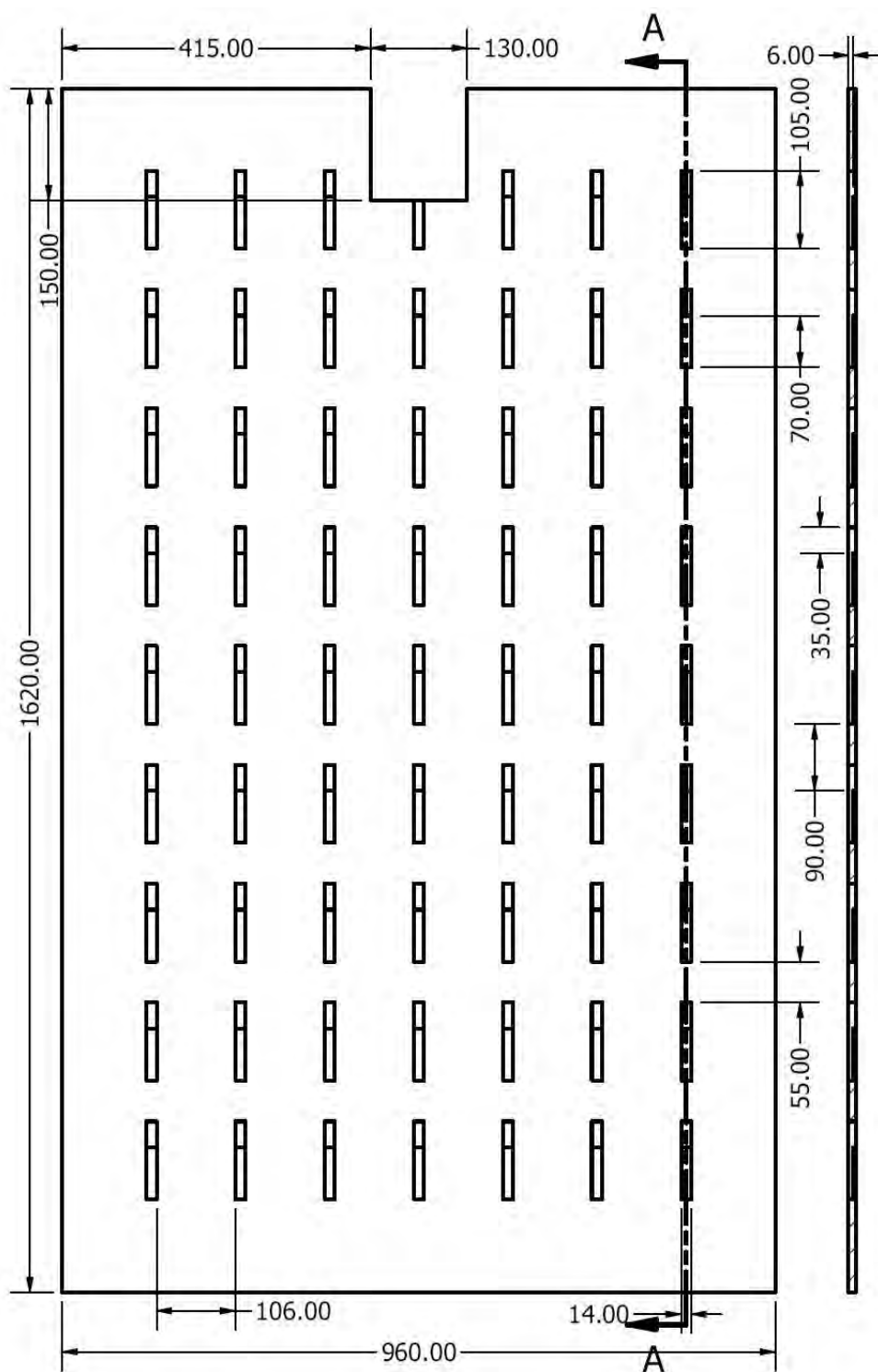


Figura 5.12. Detalii constructive ale plăcii de transfer termic pentru tuburile termice înguste

b) Proiectarea panoului fotovoltaic răcit cu tuburi termice late

Tuburile **termice late** sunt produse de AMEC THERMASOL, sunt realizate din aluminiu și folosesc acetonă ca agent termic [63]. Aceste tuburi termice au fost luate în considerare deoarece datorită formei lor constructive, au o suprafață de contact cu panoul fotovoltaic mai mare.

În cazul tuburilor termice late, la fel ca și în cazul cu placa pentru tuburile termice înguste, s-a pornit de la o placă de aluminiu de 1620 mm înălțime, 960 mm lățime, 10 mm grosime și la partea superioară s-a decupat un dreptunghi de 150 mm $\times$ 130 mm. Pe suprafața plăcii sunt amplasate 40 (5×8) tuburi termice la 80 mm pe verticală și 108 mm pe direcție orizontală. Similar ca și în cazul tuburilor termice înguste, s-a proiectat un tub termic lat îndoit la 45° , cu lungimea evaporatorului de 50 mm, Figura 5.13

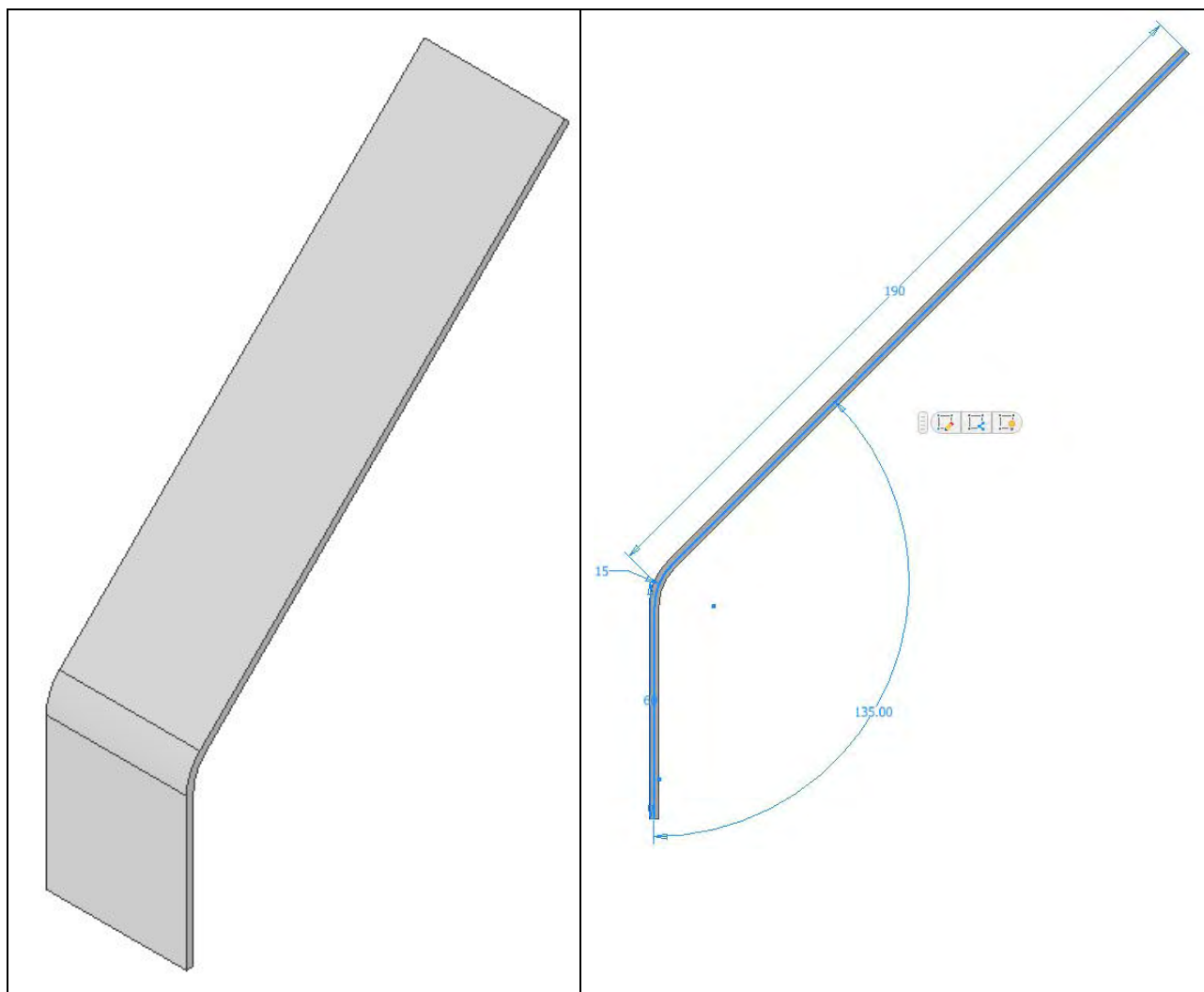


Figura 5.13. Modelul tubului termic lat îndoit la 45°

Considerând dimensiunile tuburilor, orificiul de fixare pe placă are 60 mm înălțime, 52 mm lățime și o adâncime de 4 mm, iar străpungerea plăcii se realizează printr-o secțiune de 40 mm înălțime și 52 mm lățime conform Figura 5.14.

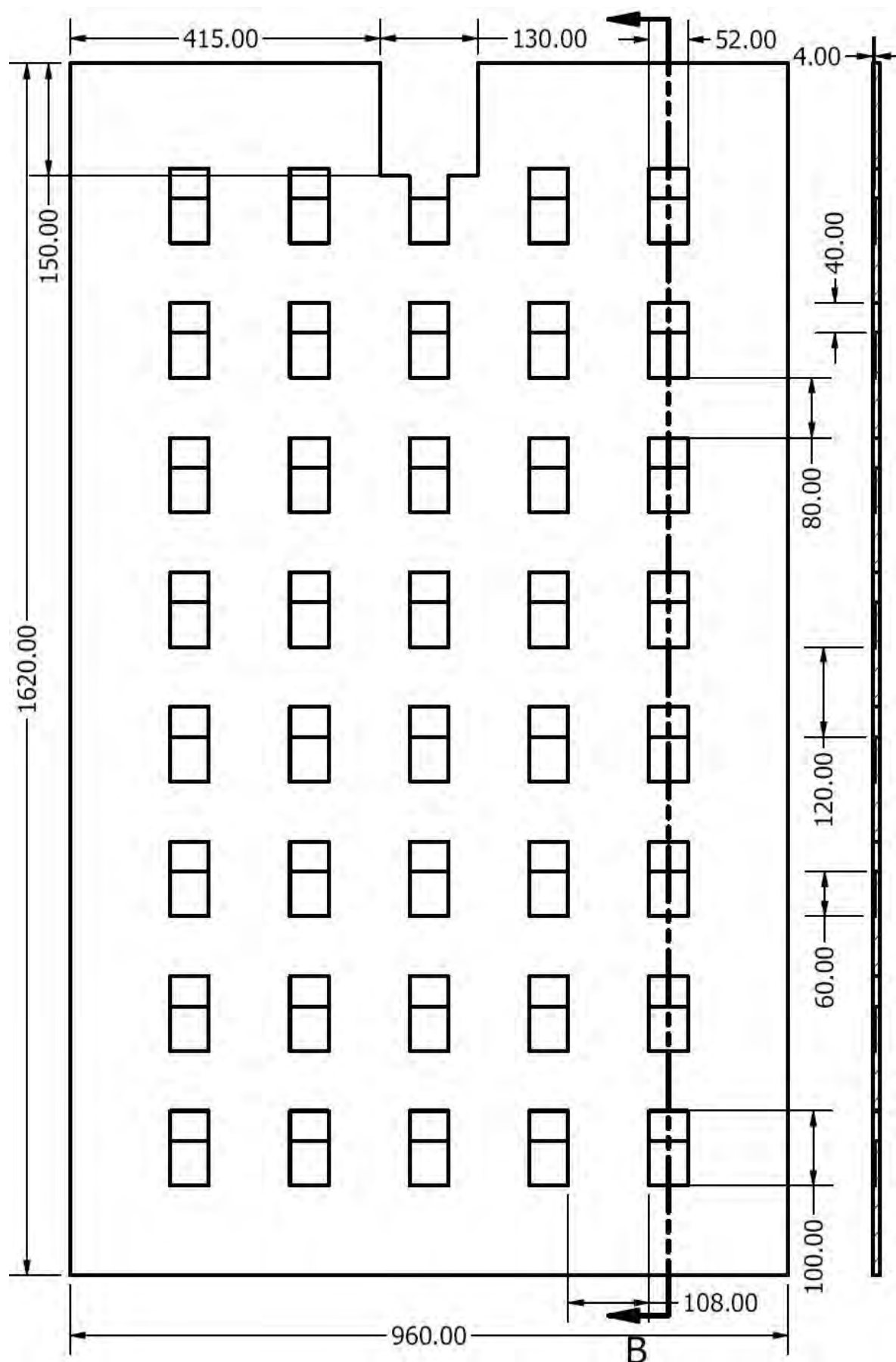


Figura 5.14. Detalii constructive ale plăcii de transfer termic pentru tuburile termice late

5.4. Execuția panourilor fotovoltaic-termice

Procesul de execuție a panourilor fotovoltaice s-a desfășurat etapizat:

1. Prima etapă a constat în execuția plăcilor de recuperare a căldurii:

- * Realizarea orificiilor de amplasare a tuburilor termice în plăcile de aluminiu utilizând un echipament de debitare cu laser cu o precizie de ± 0.2 mm
- ◆ dimensionarea și realizarea distribuitorilor și colectoarelor, Figura 5.15



Figura 5.15. Execuția distribuitorilor și colectoarelor

- ◆ execuția serpentinelor și a conductelor verticale, Figura 5.16



Figura 5.16. Execuția serpentinelor

- ◆ sudarea serpentinelor și a tuburilor verticale pe distribuitoare/colectoare, Figura 5.17

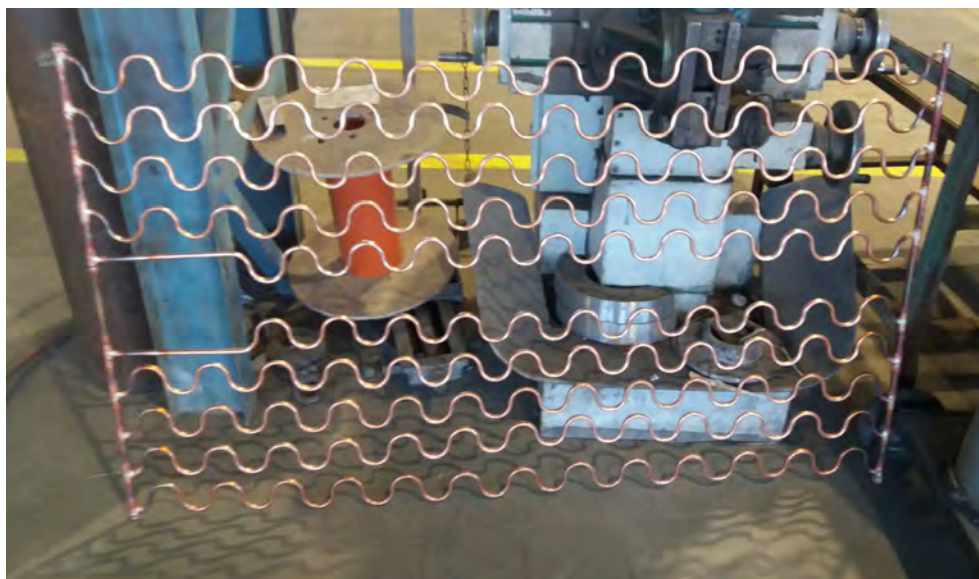


Figura 5.17. Sudarea serpentinelor de distribuitor/colector

- ◆ sudarea unei fâșii de tablă de cupru perimetral pe conturul exterior al sistemului de recuperare a căldurii, astfel încât în spațiul creat să poată fi integrat un material cu schimbare de fază sau un ulei cu conductivitate termică ridicată, ce ar servi la o îmbunătățire a transferului termic în studii viitoare, o secțiune printr-unul din modelele proiectate este evidențiată în Figura 5.18



Figura 5.18. O secțiune printr-un modelul

2. Pregătirea plăcilor de recuperare a căldurii pentru montaj:

- Amplasarea plăcilor recuperatoare de căldura pe bancul de lucru
- Curățarea suprafețelor plăcilor de recuperare a căldurii de mizerie și impurități, Figura 5.19



Figura 5.19. Curățarea suprafețelor plăcilor

- * Curățarea suprafețelor tuburilor termice de mizerie și impurități
- * Îndoirea tuburilor termice la 45° , Figura 5.20

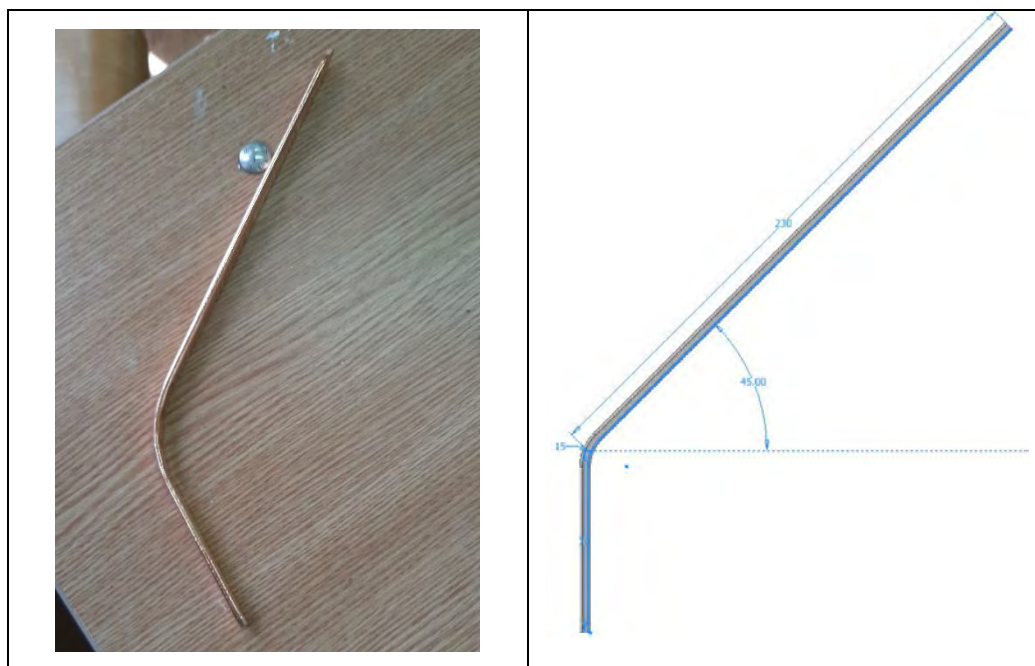


Figura 5.20. Îndoirea tuburilor termice la 45°

- * Ungerea suprafețelor în care sunt amplasate tuburile termice cu pastă termoconductoare
- * Montarea tuburilor termice pe poziție, Figura 5.21

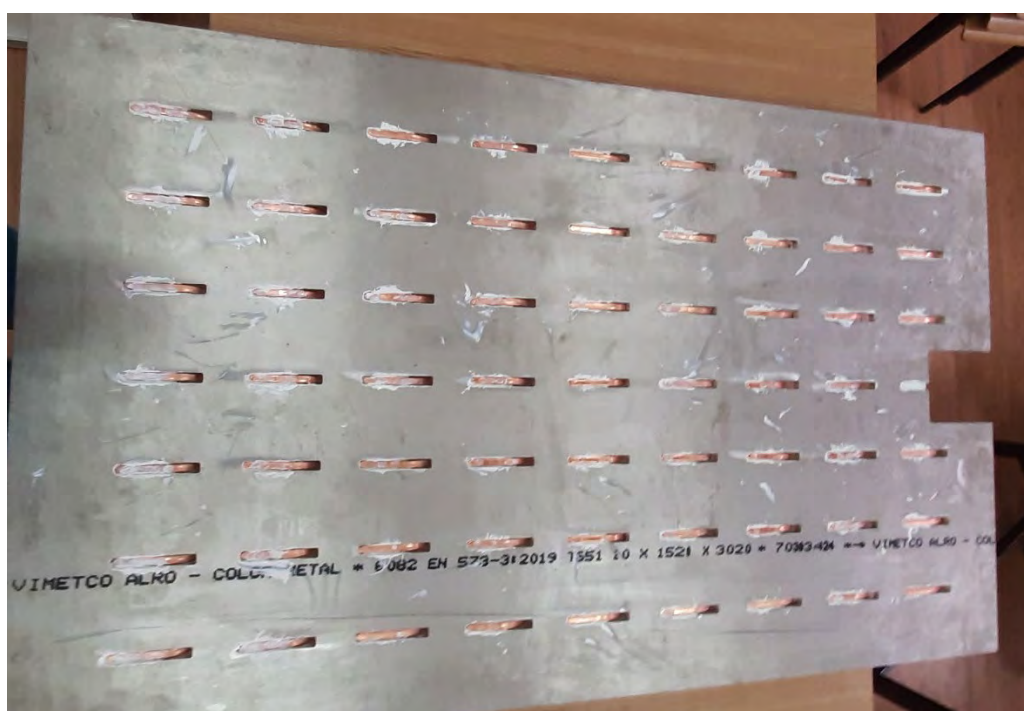


Figura 5.21. Montarea tuburilor termice pe poziție

- Montarea senzorilor de temperatură pe plăcile de recuperare a căldurii, Figura 5.22

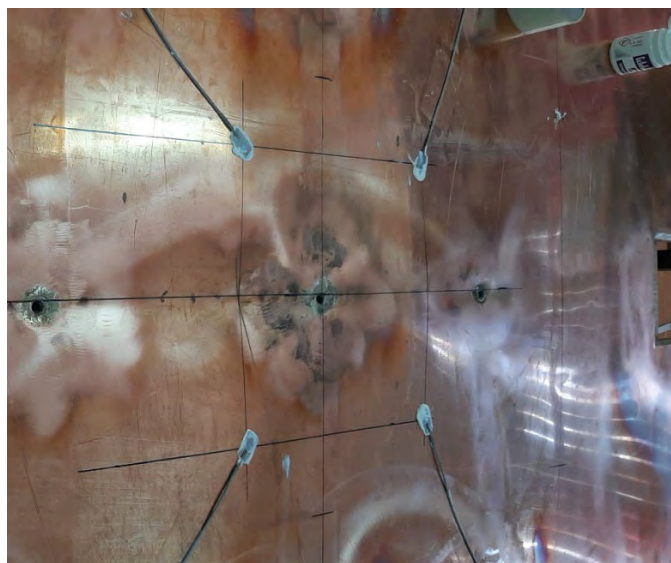


Figura 5.22. Montarea senzorilor de temperatură

- Ungerea suprafețelor de contact dintre plăcile de recuperare a căldurii și panourile fotovoltaice cu pastă termoconductoare pentru a etanșa toate imperfecțiunile și a favoriza transferul termic

3. Așezarea și fixarea panourilor fotovoltaice de plăcile de recuperare a căldurii, Figura 5.23



Figura 5.23. Fixarea panourilor fotovoltaice de plăcile de recuperare a căldurii

4. Fixarea modulelor hibride de cadrele de susținere utilizând tije metalice

5. Montarea fittingurilor de conexiune la intrarea/ieșirea din distribuitor/colector

6. Ridicarea modulelor în poziție orizontală pentru a fi testate

Pentru că în funcție de tipul de sistem de răcire al panourilor fotovoltaice au fost necesari pași suplimentari, pentru o urmărire mai ușoară a proceselor necesare pentru fiecare tip de sistem de răcire, ele au fost notate astfel:

- * Pași suplimentari necesari în cazul sistemelor de răcire pasivă cu tuburi termice
- ◆ Pași suplimentari necesari în cazul sistemelor de răcire cu lichid, în toate configurațiile constructive

5.5. Aparatura utilizată în decursul cercetării experimentale

Pe parcursul desfășurării etapei experimentale s-au folosit o serie de echipamente și aparate de măsură pentru a determina, înregistra, urmări și controla diverși parametri:

1. *Aparatura de măsurare și înregistrare a temperaturii:*

- Termometru electronic cu 12 canale Lutron BTM4208SD
- Sondă de temperatură, termocuplu tip k, pentru măsurarea temperaturii de suprafață
- Sondă de temperatură, termocuplu tip k, pentru măsurarea temperaturii de imersiune

2. *Debitmetru pentru instalații solare reglabil TacoSetter Inline 130*

3. *Contor de energie termică ACTARIS CF 55*

4. *Grup de pompare pentru instalații solare ER-SG-HE*

5. *Vas de expansiune vertical Ferroli VEF 12*

6. *Boiler termoelectric cu o serpentină ELDOM WV08039SR*

7. *Controller Solar MPPT XTRA2210N-XDS2*

8. *Invertor off-grid undă sinusoidală pură*

9. *Acumulator solar VRLA Ultracell 200Ah*

10. *Epever eLOG-01 Logger*

5.6. Schema generală standului experimental

Următorul pas după achiziționarea aparaturii, execuția plăcilor de răcire și asamblarea panourilor fotovoltaic termice necesare desfășurării etapei experimentale, etapa precursoră execuției instalațiilor electrice și termice aferente sistemelor fotovoltaic-termice fost conceperea schemei generale.

Schema generală a sistemelor electrice și termice a fost realizată folosind software-ul Microsoft Visio, pornind de la panoul fotovoltaic, la care s-au adăugat elementele sistemului fotovoltaic de producție a energiei electrice împreună cu echipamentele de măsură și placă recuperatoare de căldură proiectată în programul **Autodesk Inventor Professional** împreună cu echipamentele adiacente funcționării sistemului termic și înregistrării parametrilor experimentali.

Schema completă a standului experimental este evidențiată în Figura 5.24.

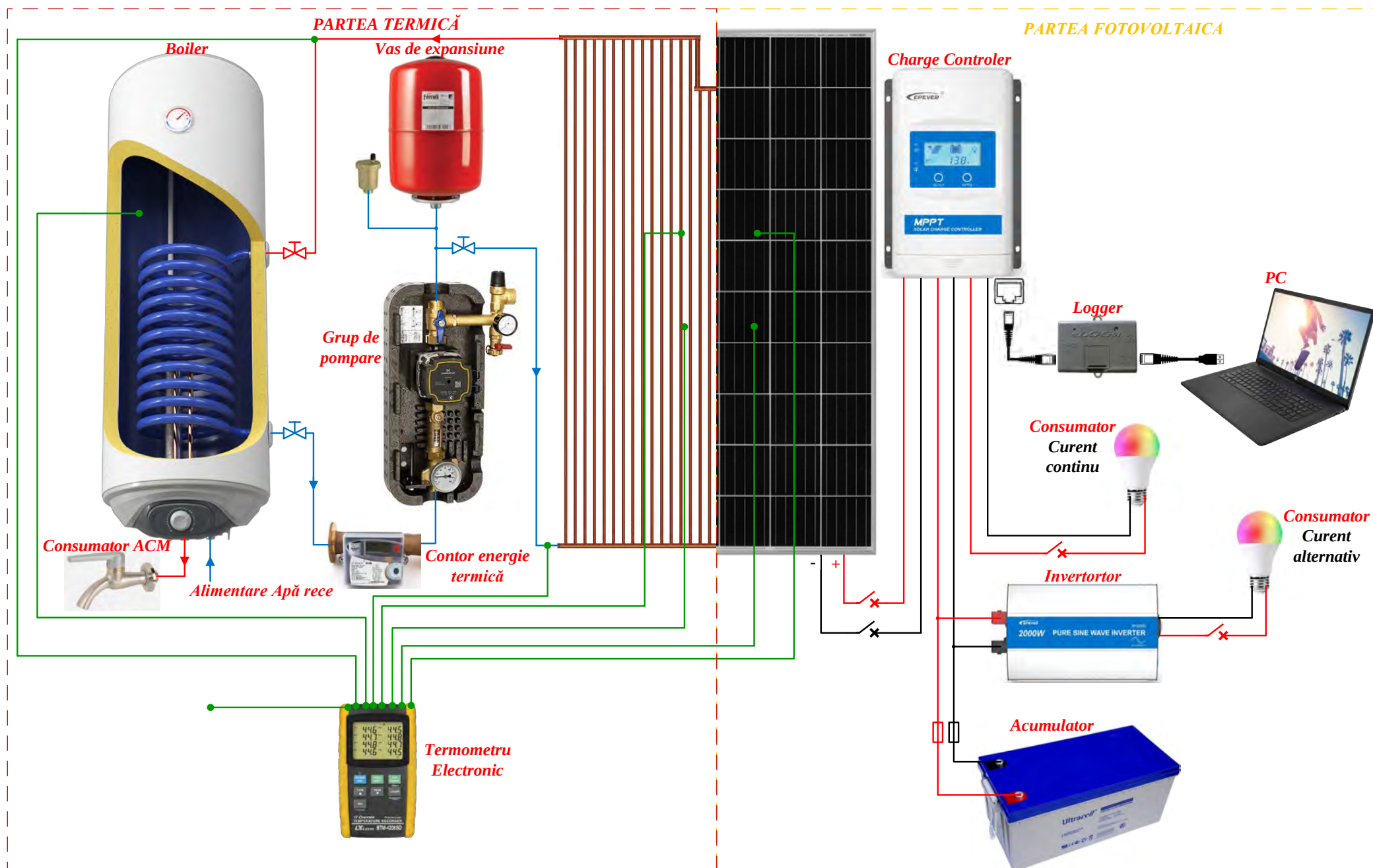


Figura 5.24. Schema generală a standului experimental

5.7. Testarea și verificarea panourilor fotovoltaic termice

Testarea panourilor fotovoltaic-termice hibride constată în experimente de laborator folosind simulatorul solar proiectat anterior pe post de soare artificial.

Ținând cont de măsurătorile radiațiilor produse de simulatorul solar pentru fiecare distanță propusă în subcapitolul 5.2.4. Testarea simulatorului solar, s-a ales un număr de 3 distanțele diferite dintre simulatorul solar și panourile hibride, respectiv $D_1 = 20$ cm, $D_2 = 30$ cm și $D_3 = 40$ cm.

S-a optat pentru utilizarea acestui set de distanțe în urma unor teste inițiale de probă, ce au relevat următoarele observații:

- Deși din punct de vedere a mediei intensităților luminoase produse de către corpurile de iluminat amplasate la o distanță de 10 cm față de modul părea promițătoare, variația substanțială în gradientul de radiație luminoasă are un efect advers asupra producției globale de energie electric. Din cauza efectelor umbririi/ apariției “punctelor fierbinți” pe suprafața panoului și a neuniformității fasciculului luminos pe suprafața panoului reduce eficiența celulelor și conduce la scăderii duratei de viață a modulului, fapt evidențiat în studiul de caz din subcapitolul 3.2. Parametrii de mediu care afectează eficiența panourilor.
- În cazul distanțelor cuprinse între 50 cm și 100 cm s-a constatat faptul că o proporție substanțială din intensitatea luminoasă poate fi atribuită luminii produse de corpurile de iluminat sau luminii pătrunse prin suprafețele vitrate ale încăperii (valorile radiației luminoase măsurate în interiorul unei încăperi în multiple perioade ale anului pot atinge 20W/m^2 [64]), ceea ce s-ar traduce într-o marjă de eroare substanțială funcție de momentul testării modulelor. Marja de eroare a intensității luminoase folosită este de $\pm 3\%$

În ceea ce privește debitul de fluid utilizat, literatura de specialitate indică valori recomandate pentru debitul panourilor solare și fotovoltaic-termice cuprinse între 0.25 l/ min și 2 l/min pentru fiecare metru pătrat de panou [65,66,67,68]. În cazul panoului fotovoltaic utilizat pentru construcția modulelor hibride, acesta este format din 60 de celule de 156×156 mm dispuse pe 10 rânduri și 6 coloane, are o suprafață de $(10 \times 0.156) \times (6 \times 0.156) = 1.560 \times 0.936 = 1.46 \text{ m}^2$ rezultă un debit recomandat cuprins între 0.365 l/min și 2.92 l/min.

Astfel pentru fiecare tip de panou fotovoltaic-termic s-au luat în considerare 3 valori pentru intensitatea radiației luminoase prin modificarea distanței între simulatorul solar și modul, iar în cazul panourilor ce folosesc apa ca sursă de răcire, s-au luat în considerare 3 valori pentru debitul agentului de răcire cuprinse între 0.5 și 2.5 l/min.

O lista completă a scenariilor testate este prezentate în Tabelul 5.2.

Tabelul 5.2. Scenariile testate în cadrul etapei experimentale

Nr. scen	Denumire scenariu	Parametri de intrare variabili			Parametri de ieșire
1	Încălzirea panoului fotovoltaic	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
			40 cm	302 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
2	Răcirea cu distribuitor-colector tip registru	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
		Debitul agentului de răcire		0.5 l/min	Temperatura agentului termic la intrarea și ieșirea din sistemul de răcire [°C]
				1.5 l/min	
3	Răcirea cu distribuitor-colector tip serpentine multiple	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
		Debitul agentului de răcire		0.5 l/min	Temperatura agentului termic la intrarea și ieșirea din sistemul de răcire [°C]
				1.5 l/min	
4	Răcirea cu serpentină	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
		Debitul agentului de răcire		0.5 l/min	Temperatura agentului termic la intrarea și ieșirea din sistemul de răcire [°C]
				1.5 l/min	
5	Răcire pasivă folosind tuburi termice înguste	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
6	Răcire pasivă folosind tuburi termice late	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
7	Testarea panoului hibrid Sunerg	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]
			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
		Debitul agentului de răcire		0.5 l/min	Temperatura agentului termic la intrarea și ieșirea din sistemul de răcire [°C]
				1.5 l/min	
8	Testarea panoului hibrid Pikcell	Intensitatea radiației solare	20 cm	400 W/m ²	Temperatura medie a panoului fotovoltaic [°C]
			30 cm	353 W/m ²	Intensitatea curentului electric [A]

			40 cm	302 W/m ²	Tensiunea electrică [V]
		Debitul agentului de răcire		0.5 l/min	Temperatura agentului termic la intrarea și ieșirea din sistemul de răcire [°C]
				1.5 l/min	
				2.5 l/min	

Rezultatele obținute pe cale experimentală au fost validate prin intermediul simulărilor numerice tip CFD (Computational Fluid Dynamics) deoarece scopul simulărilor a fost atât măsurarea parametrilor electrici cât și termici ai sistemelor proiectate.

Primul pas în simularea sistemelor a fost modelarea și asamblarea componentelor Figura 5.25.

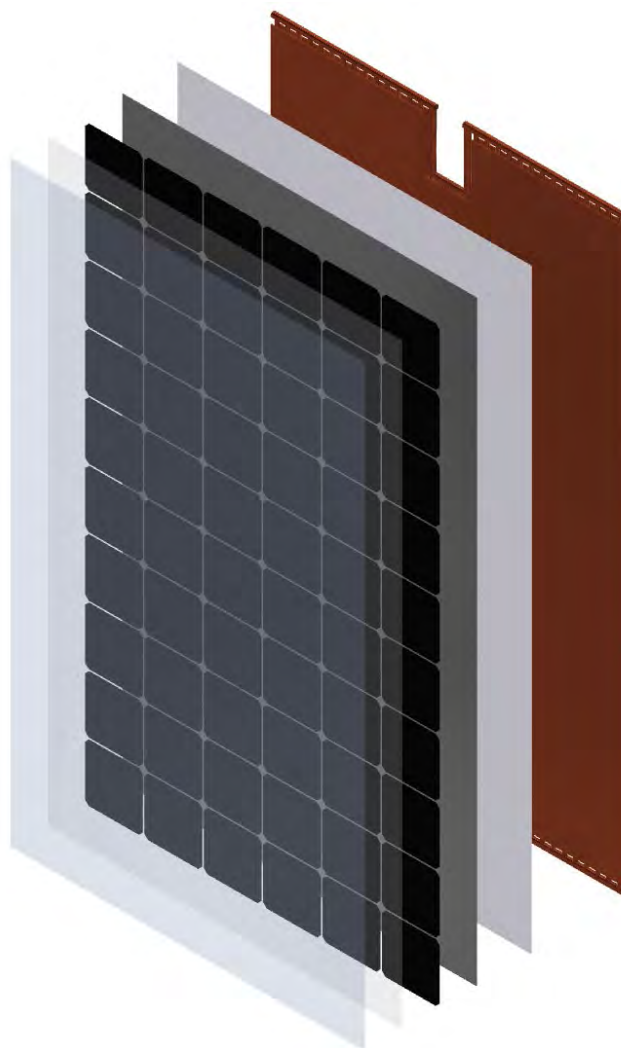


Figura 5.25. Asamblarea componentelor modulului fotovoltaic termic

Următoarea etapă din cadrul procesului de simulare constă în inițializarea modelelor proiectate în programul de simulare numerică și ulterior atribuirea materialelor pentru toate elementele componente ale fiecărui scenariu în parte.

Următoarea etapă constă în impunerea condițiilor la limită, astfel inițial, pentru prima runda de simulări s-au considerat următorii parametri de intrare:

- Intensitatea radiației solare: 400/350/300/250/200 [W/m²] corespunzătoare radiației solare produse de simulatorul solar
- Temperatura aperi utilizate pentru răcirea panoului fotovoltaic: 12 [°C]
- Debitul agentului de răcire: 0.5/1.5/2.5 [l/min]
- Temperatura ambientală: 25 [°C]

Pentru o mai bună vizualizare a funcționării fiecărui sistem de răcire în parte: în Figura 5.26.a este evidențiat sistemul de răcire cu serpentină, în Figura 5.26.b este evidențiat sistemul de răcire cu distribuitor-colector tip registru și în Figura 5.26.c este evidențiat sistemul de răcire cu distribuitor-colector tip serpentină.

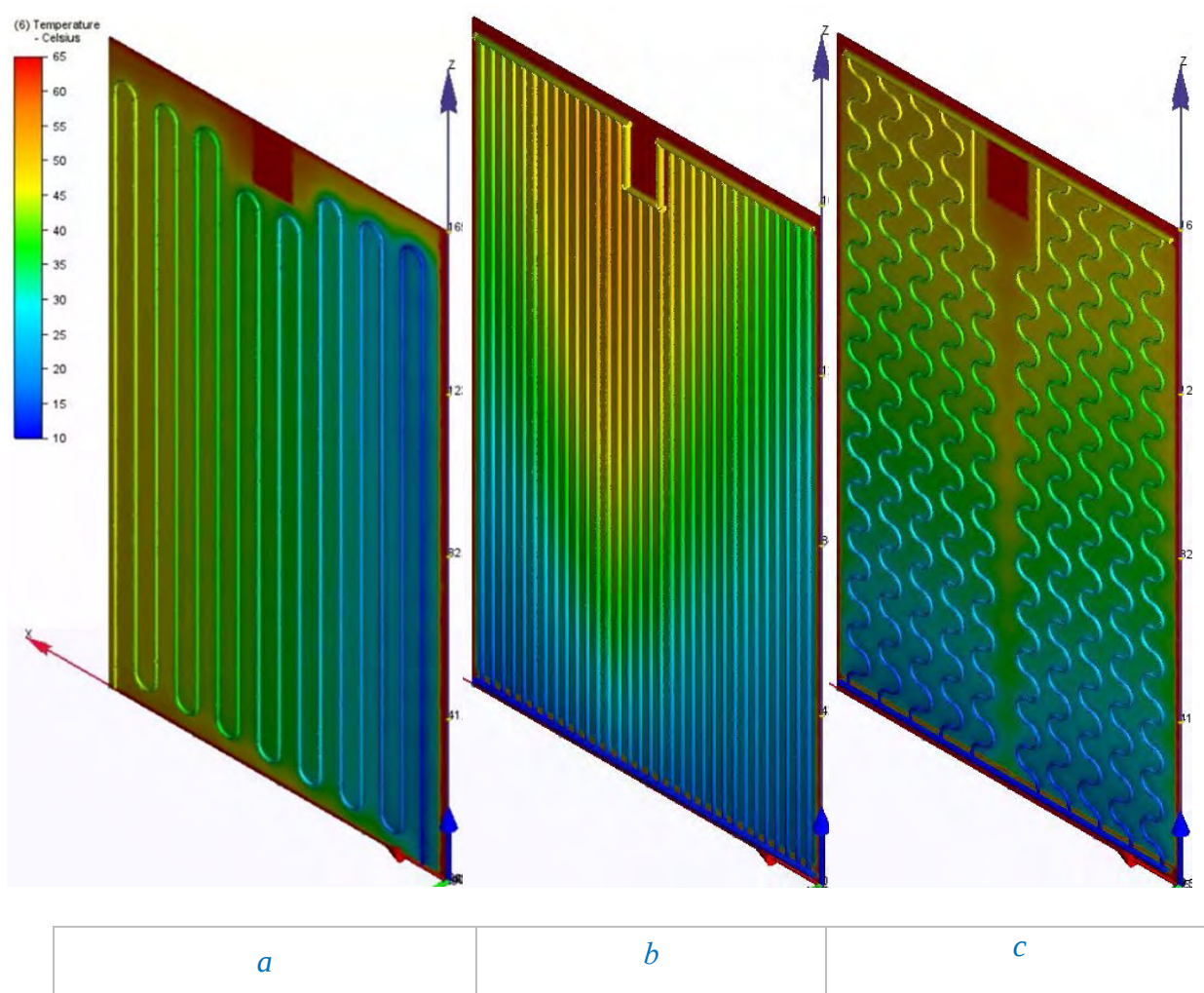


Figura 5.26. Reprezentarea sistemelor de răcire cu fluid in timpul funcționării

În urma rulării simulărilor numerice pentru fiecare scenariu în parte, s-a urmărit înregistrarea temperaturilor celulelor fotovoltaice, temperaturii apei pentru a putea ulterior determina eficiența producerii de energie electrică și termică.

Pentru fiecare caz în parte, s-au făcut următoarele operațiuni:

- Amplasarea simulatorului solar la distanța corespunzătoare scenariului testat

- Setarea debitului de apă la valoarea corespunzătoare scenariului testat
- Pornirea termometrului electronic
- Pornirea simulatorului solar și a programului de înregistrare a controlerului solar
- Colectarea și prelucrarea datelor

Figura 5.27 evidențiază faptul că reprezentarea sub formă tabelară conține 4 elemente principale:

1. Imagine ce evidențiază sistemul fotovoltaic termic la sfârșitul ciclului de testare. Captura a fost realizată folosind o camera cu termoviziune portabilă FLIR 435-0012-03.
2. O reprezentare grafică a evoluției temperaturii pe parcursul unui scenariu din cadrul studiului experimental, fiecare grafic fiind generat pornind de la rezultatele măsurate cu termometrul electronic, marca Lutron modelul BTM-4208SD
3. Reprezentarea grafică a parametrilor electrici (tensiunea, intensitatea curentului și puterea) aferente producției de electricitate pe parcursul unui scenariu
4. O imagine ce evidențiază atât gradientul de temperaturi aferent simulării numerice a scenariului analizat cât și expunerea temperaturii medii a celulelor fotovoltaice în urma simulării.

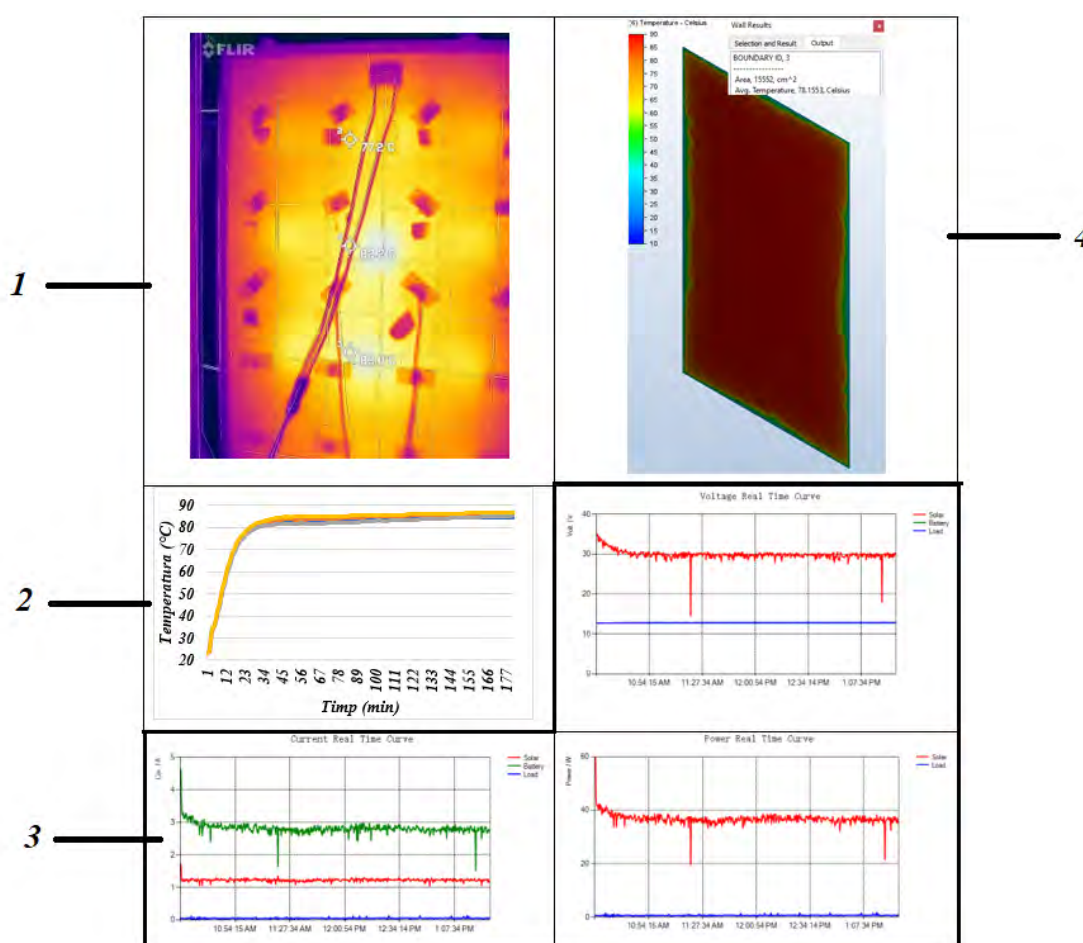


Figura 5.27. Diseminarea și structurarea rezultatelor sub formă tabelară

5.8. Analiza rezultatelor și discuții

Pentru o mai bună vizualizare a rezultatelor și pentru a le centraliza s-a optat așezarea acestora sub formă tabelară, Tabelul 5.3.

Tabelul 5.3. Centralizarea rezultatelor

		Parametri de intrare		Temperatura celulelor fotovoltaice		Temperatura apei încălzite	Tretur	Temp apă boiler	Eficiența Electrică	Eficiența Termică	Eficiența
				[°C]		[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]
				Experiment	Simulare	Experiment					
1	Încălzirea panoului fotovoltaic - 1h	20 cm		67.69	67.72	-	-	-	17.62	0.00	17.62
2		30 cm		63.03	63.54	-	-	-	17.96	0.00	17.96
3		40 cm		59.51	59.33	-	-	-	18.21	0.00	18.21
4		50 cm		54.58	54.79	-	-	-	18.56	0.00	18.56
5		60 cm		51.7	51.82	-	-	-	18.76	0.00	18.76
6	Încălzirea panoului fotovoltaic - 3h	20 cm		77.1	78.16	-	-	-	16.95	0.00	16.95
7		30 cm		71.5	71.8	-	-	-	17.35	0.00	17.35
8		40 cm		67.8	67.73	-	-	-	17.62	0.00	17.62
9	Răcire pasivă folosind tuburi termice înguste	20 cm		57.98	58	-	-	-	18.32	0.00	18.32
10		30 cm		56.9	57	-	-	-	18.39	0.00	18.39
11		40 cm		55.3	55.04	-	-	-	18.51	0.00	18.51
12	Răcire pasivă folosind tuburi termice late	20 cm		59.5	60.04	-	-	-	18.21	0.00	18.21
13		30 cm		54.73	54.79	-	-	-	18.55	0.00	18.55
14		40 cm		53.83	53.69	-	-	-	18.61	0.00	18.61
15	Răcirea cu serpentină	20 cm	0.5 l/min	47.85	47.8	45.9	34	37.5	19.04	62.84	81.87
16		30 cm	0.5 l/min	46	45.99	43.9	34.4	36.3	19.17	62.69	81.86
17		40 cm	0.5 l/min	43.1	43.51	42.2	38.7	38.1	19.10	78.35	97.46
18		20 cm	1.5 l/min	46.78	46.72	42.1	40	37.9	19.11	66.84	85.95
19		30 cm	1.5 l/min	46.2	46.15	43	39.5	38.9	19.15	72.14	91.29
20		40 cm	1.5 l/min	42.55	42.65	41.3	35.5	36.1	19.07	71.40	90.46
21		20 cm	2.5 l/min	46.3	46	41.5	40.2	39	19.15	72.24	91.39

22		30 cm	2.5 l/min	45.1	45	43.4	41	39.7	19.23	78.49	97.72
23		40 cm	2.5 l/min	42.33	42.11	40.4	38.7	37.8	19.05	79.71	98.76
24	Răcirea cu distribuitor-colector tip registru	20 cm	0.5 l/min	48.45	48.15	47.1	38	37.8	18.99	62.57	81.56
25		30 cm	0.5 l/min	43.35	43.35	43.3	33.7	34.4	19.12	61.67	80.79
26		40 cm	0.5 l/min	42.3	42.16	43	34.3	35.8	19.05	70.85	89.90
27		20 cm	1.5 l/min	46.08	46.31	41.5	37.8	37	19.16	65.18	84.35
28		30 cm	1.5 l/min	43.4	43.53	40.3	37.2	36.4	19.13	70.09	89.21
29		40 cm	1.5 l/min	40.9	40.78	38.8	36.1	35.4	18.95	73.68	92.63
30		20 cm	2.5 l/min	45.75	45.82	39.4	37.8	36.2	19.19	62.91	82.10
31		30 cm	2.5 l/min	43.1	43	39.9	38.1	37	19.10	73.59	92.70
32		40 cm	2.5 l/min	40.45	40.16	38.8	37.1	36.9	18.92	82.64	101.56
33	Răcirea cu distribuitor-colector tip serpentine multiple	20 cm	0.5 l/min	59.68	59.75	45.5	33.1	35.5	18.19	39.06	57.26
34		30 cm	0.5 l/min	53.85	53.58	42.1	32.2	34.1	18.61	41.65	60.26
35		40 cm	0.5 l/min	50.38	50.11	41.9	32.9	34.6	18.86	48.06	66.91
36		20 cm	1.5 l/min	57.43	57.8	40.4	37.1	36.6	18.36	44.35	62.70
37		30 cm	1.5 l/min	52.45	52.58	38.7	35.7	34.9	18.71	45.92	64.63
38		40 cm	1.5 l/min	50.55	50.17	39.2	36.4	35.6	18.84	51.06	69.91
39		20 cm	2.5 l/min	55.88	55.8	40.3	38.6	37.5	18.47	48.77	67.24
40		30 cm	2.5 l/min	52.75	52.7	38.3	36.7	35.5	18.69	47.33	66.02
41		40 cm	2.5 l/min	48.9	49.03	38.5	37.1	36.4	18.96	56.75	75.71
42	Testarea panoului hibrid Sunerg	20 cm	0.5 l/min	50.6	-	46.1	34.2	35.7	18.08	51.31	69.39
43		30 cm	0.5 l/min	51.73	-	46	35.2	36.2	18.00	51.06	69.05
44		40 cm	0.5 l/min	51.9	-	47.4	35.2	37.8	17.99	55.80	73.78
45		20 cm	1.5 l/min	50.6	-	42.8	38	37.2	18.08	56.21	74.29
46		30 cm	1.5 l/min	51.08	-	42.9	38.1	36.4	18.05	52.77	70.81
47		40 cm	1.5 l/min	51.25	-	42.8	38.5	37.1	18.03	54.72	72.75
48		20 cm	2.5 l/min	49.1	-	40.4	37.9	36.4	18.19	56.36	74.55
49		30 cm	2.5 l/min	51.43	-	42.4	40	38.5	18.02	58.86	76.88
50		40 cm	2.5 l/min	51.9	-	42.6	39.5	38.5	17.99	57.99	75.98
51		20 cm	0.5 l/min	65.8	-	52.6	47.7	51	17.07	67.69	84.76
52		30 cm	0.5 l/min	63.25	-	51.3	41.6	47.8	17.26	64.28	81.54

53	Testarea panoului hibrid Pikcell	40 cm	0.5 l/min	59.8	-	57.5	42.3	46.3	17.51	66.08	83.59
54		20 cm	1.5 l/min	70.23	-	59	53.7	53.2	16.75	66.10	82.85
55		30 cm	1.5 l/min	65.2	-	56.3	52	51.1	17.12	68.81	85.92
56		40 cm	1.5 l/min	58.75	-	52.8	49.1	47.9	17.59	72.00	89.59
57		20 cm	2.5 l/min	71.2	-	58.2	55	53.6	16.68	65.63	82.31
58		30 cm	2.5 l/min	63.05	-	54	51.1	49.2	17.27	67.83	85.10
59		40 cm	2.5 l/min	55.4	-	50.4	47.8	46.3	17.83	74.29	92.12

Cercetările experimentale și simulările numerice efectuate asupra panourilor fotovoltaice relevă faptul că în timpul funcționării panourile se pot încălzi excesiv, fapt ce are un efect advers substanțial asupra eficienței de producție a energiei electrice, confirmând dezideratul inițial.

Răcirea pasivă folosind tuburi termice înguste atât pe cale experimentală cât și pe calea simulărilor numerice determină o reducere substanțială a temperaturii medii a celulelor fotovoltaice cu valori cuprinse între 12 și 20 °C, acest lucru fiind realizat într-un mod pasiv, în condiții de laborator, unde factori externi cum ar fi vântul, care ar fi sporit transferul de căldură, nu au fost prezenți. Prin aplicarea tuburilor termice pe partea posterioară a panoului, eficiența electrică a celulelor a fost îmbunătățită cu valori cuprinse între 4.5% și 7.1%.

Răcirea pasivă folosind tuburi termice late atât pe cale experimentală cât și pe calea simulărilor numerice determină o reducere substanțială a temperaturii medii a celulelor fotovoltaice cu valori cuprinse între 14 și 18 °C, acest lucru fiind realizat într-un mod pasiv, în condiții de laborator, unde factori externi cum ar fi vântul, care ar fi sporit transferul de căldură, nu au fost prezenți. Prin aplicarea tuburilor termice pe partea posterioară a panoului, eficiența electrică a celulelor a fost îmbunătățită cu valori cuprinse între 5.2% și 6.6%.

Tuburile termice late s-au dovedit a fi mai eficiente în disiparea căldurii fapt datorat suprafeței mai mari de schimb de căldură și structurii acestora, având secțiuni dreptunghiulară în comparație cu secțiunea aproape ovală a tuburilor înguste, aderența la suprafața panoului sau la suprafața plăcii recuperatoare de căldură fiind substanțial îmbunătățită. De asemenea variațiile mai mici între valorile minime și maxime cât și rezultatele experimentale împreună cu imaginile realizate cu ajutorul camerei cu termoviziune relevă o mai bună distribuție și uniformitate a temperaturii pe panou, fapt ce contribuie și la reducerea uzurii în timp a modului.

Răcirea cu serpentină atât pe cale experimentală cât și pe calea simulărilor numerice determină o reducere substanțială a temperaturii medii a celulelor fotovoltaice cu valori cuprinse între 24 și 31 °C. Prin răcire eficiența electrică a celulelor a fost îmbunătățită cu valori cuprinse între 7.4% și 11.5%, de asemenea prin intermediul sistemului de răcire/recuperare a căldurii, temperatura apei din boiler după 3 ore de funcționare atinge valori

cuprinse între 36 și 39.8 °C, ceea ce se traduce într-o eficiență termică a sistemului cuprinsă între 62% și 80%. Distribuția temperaturii pe suprafața panoului relevă faptul că temperatura este mai ridicată pe partea alimentării cu agentul de răcire, diferențele de temperatură fiind ridicate între intrarea și ieșirea agentului de răcire.

Răcirea cu distribuitor-colector tip registru atât pe cale experimentală cât și pe calea simulărilor numerice determină o reducere substanțială a temperaturii medii a celulelor fotovoltaice cu valori cuprinse între 25.5 și 31.4 °C. Prin răcire eficiența electrică a celulelor a fost îmbunătățită cu valori cuprinse între 6.8% și 11.6%, de asemenea prin intermediul sistemului de răcire/recuperare a căldurii, temperatura apei din boiler după 3 ore de funcționare atinge valori cuprinse între 35.4 și 38 °C, ceea ce se traduce într-o eficiență termică a sistemului cuprinsă între 62.5% și 82.7%. În termeni de gradient al temperaturii, se poate observa faptul că distribuitorul și colectorul joacă un rol substanțial în reducerea diferențelor mari între diferite părți ale panoului fapt ce contribuie și la reducerea uzurii în timp a modulului și previne degradarea prematură a acestuia.

Răcirea cu distribuitor-colector tip serpentine multiple atât pe cale experimentală cât și pe calea simulărilor numerice determină o reducere substanțială a temperaturii medii a celulelor fotovoltaice cu valori cuprinse între 17.4 și 21.3 °C. Prin răcire eficiența electrică a celulelor a fost îmbunătățită cu valori cuprinse între 6.4% și 7.9%, de asemenea prin intermediul sistemului de răcire/recuperare a căldurii, temperatura apei din boiler după 3 ore de funcționare atinge valori cuprinse între 34.1 și 37.5 °C, ceea ce se traduce într-o eficiență termică a sistemului cuprinsă între 39% și 56.8%. În ceea ce privește distribuția termică pe suprafața panoului, distribuția este mai uniformă în acest caz prin comparație cu cazul serpentinei singure, însă rezultatele indică temperaturi mai mari ale celulelor, ceea ce se traduce în necesitatea unui debit mai mare de agent termic pentru a învinge rezistențele hidraulice, rezultând într-un consum mai mare de energie electrică al pompei comparativ cu sistemele precedente.

Cercetările experimentale relevă faptul că eficiența panourilor fotovoltaice este substanțial îmbunătățită prin răcire.

Sistemele cu tuburi termice reușesc să reducă temperatura de funcționare a panourilor fotovoltaice prin convecție liberă în aer cu mai mult de 15 °C, acest fapt în condiții minime de circulație a aerului, în condiții reale de funcționare aceste rezultate sunt substanțial îmbunătățite.

Dintre cele 3 sisteme de răcire cu fluid, cel mai eficient din punct de vedere a performanțelor energetice cât și termice s-a dovedit a fi sistemul de răcire tip registru, eficiența maximă totală a acestuia în unele cazuri fiind peste 90%, depășind performanțele sistemelor din comerț.

Temperatura apei rezultate în urma răcirii cu aceste tipuri de sisteme s-a dovedit a fi mai mică decât temperatura apei produsă de sistemele folosite drept standard de comparație deoarece acele sisteme sunt izolate și etanșate profesional, în timp ce sistemele testate au fost fără izolație.

6. Concluzii și contribuții originale

6.1. Concluzii generale

Originalitatea acestui studiu este dată de utilizarea atât a tuburilor termice cât și a sistemelor de răcire pe baza de fluid pentru îmbunătățirea sistemelor care produc simultan sau separat energie electrică și / sau apă caldă, prin răcirea unui panou fotovoltaic cu ajutorul tuburilor termice cât și prin intermediul unei placi cu serpentina sau tip registru, care utilizează căldură în exces pentru încălzirea de apă, astfel producând apă caldă. Prin răcirea panoului fotovoltaic, performanța acestuia este de asemenea îmbunătățită.

Acesta este procedeu inovator care crește performanța energetică a panourilor fotovoltaice cât și contribuie la reducerea costurilor energetice pentru prepararea de apă caldă, totodată îmbunătățind performanța energetică a clădirilor din care fac parte.

Acest studiu contribuie la reducerea consumului de energie a instalațiilor de încălzire prin producerea sursei de energie utilizată pentru încălzire într-un mod eficient, utilizarea căldurii în exces de la panoul fotovoltaic pentru producerea de apă caldă și încălzirea peretelui clădirii pe care este amplasat ce are ca efect direct reducerea consumului de energie.

Prin designul modular fiecare dintre aceste sisteme poate fi aplicat pe multiple panouri fotovoltaice de dimensiuni similare sau poate fi adaptat cu ușurință pentru panouri cu alte dimensiuni.

De asemenea prin designul modular aceste sisteme pot fi aplicate cu ușurință în clădiri noi, prin amplasarea pe acoperiș sau terasă, dar de asemenea pot fi integrate în elementele portante ale clădirii în faza de construcție drept panouri fotovoltaice termice integrate în clădire (BIPVT- “building integrated photovoltaic termic”).

Aplicabilitatea acestor module nu este limitată doar la clădirile noi ci se extinde și la clădirile construite, aceste sisteme putând fi amplasate pe acoperiș/terasă precum panourile fotovoltaice sau solar-termice, numai ca principalul avantaj al panourilor care produc simultan energie electrică și apă caldă este faptul că pe aceeași unitate de suprafață disponibilă aportul energetic este crescut deoarece un singur modul produce simultan atât energie electrică cât și termică.

Aceste module hibride cu producție simultană de energie electrică și termică, prin eficientizarea producției electrice și stocarea energiei termice recuperate, contribuie la satisfacerea standardului european nearly Zero Energy Building (nZEB) și în combinație cu utilizarea materialelor puțin poluante și izolației adecvate contribuie la atingerea standardului zero carbon building (ZCB), standard ce presupune nu numai ca 100% din energie să provină din surse proprii regenerabile, ci construcția să fie un producător de energie astfel încât să contrabalanseze emisiile de carbon și energia folosită pentru producția materiilor prime ce intră în componența construcției.

Caracterul modular al componentelor sistemelor de răcire se traduce în posibilitatea de omologare rapidă și intrarea rapidă în producție a sistemelor de concepție originală, aceste sisteme de răcire putând fi aplicate pe diferite tipuri de panouri fotovoltaice.

6.2. Contribuții originale

În urma cercetărilor efectuate în cadrul programului de studii doctorale se pot evidenția o serie de contribuții cu caracter de originalitate după cum urmează :

1. Analiza literaturii de specialitate și evidențierea caracteristicilor radiației solare și conversiei fotovoltaice;
2. Realizarea de studii de documentare referitoare la stadiul actual al cunoașterii în domeniul panourilor fotovoltaic și fotovoltaic-termice;
3. Evidențierea ecuațiilor caracteristice producției fotovoltaice, a ecuațiilor caracteristice modelului termic al panourilor fotovoltaice și a modelului matematic al transferului de căldură corespunzător modulelor fotovoltaic-termice
4. Conceperea, proiectarea și execuția unui simulator solar, pentru a facilita testarea prezentelor module fotovoltaice în condiții de laborator, simulator ce poate fi utilizat în multiple aplicații viitoare atât pentru module fotovoltaice cât și pentru alte aplicații în care este necesară reproducerea spectrului luminos solar;
5. Testarea și validarea performanței simulatorului solar prin măsurarea radiației incidente și a temperaturii de operare și estimarea distribuției acestora pe suprafața panourilor fotovoltaice, la diferite distanțe dintre panou și simulatorul solar;
6. Proiectarea și execuția a 5 module solare de concepție originală, cu producție simultană de energie electrică și termică, prin răcirea pasivă a panourilor fotovoltaice prin intermediul tuburilor termice sau în mod activ folosind apă ca fluid de lucru;
7. O analiză comparativă a efectelor radiației și temperaturii asupra panourilor fotovoltaice monocristaline, modulelor hibride originale cât și a modulelor fotovoltaic-termice din comerț în condiții de laborator;
8. Conceperea și efectuarea de simulări numerice pentru validarea rezultatelor experimentale pe modelele de panouri hibride propuse folosind platforma Autodesk CFD;

6.3. Valorificarea rezultatelor tezei de doctorat

Parcursul programului de studii doctorale în cadrul Școlii Doctorale a Facultății de Construcții și Instalații a fost fundamentată de dorința de a mă dezvolta personal și a-mi spori cunoștințele în domeniul energiilor regenerabile, în special energia solară, aplicațiile acestora în producerea de energie electrică și termică și dezvoltarea domeniului prin conceperea unui modul hibrid care să producă simultan electricitate și energie termică.

Programul de studii doctorale a avut ca rezultat dotarea laboratorului de instalații de încălzire din cadrul Facultății de Construcții și Instalații cu un simulator solar pentru simularea parametrilor solari în condiții de laborator și cu un stand experimental pentru testarea eficienței energetice a sistemelor solare cu producție simultană de energie electrică și termică, compus din un panou fotovoltaic-termic utilizat ca panou de referință, 2 panouri fotovoltaice răcite pasiv folosind tuburi termice, 3 module fotovoltaic-termice hibride de concepție originală ce folosesc apa ca fluid de lucru și 2 module fotovoltaic-termice comerciale.

Cercetările efectuate pe parcursul studiilor doctorale au fost diseminate prin:

- Publicarea unui număr de 13 lucrări științifice:
 - 1 articol publicat la revista "Materials" cu factor de impact 3.748 clasată în zona roșie;
 - 1 articol publicat la revista "Applied Sciences" cu factor de impact 2.838 clasată în zona galbenă;
 - 1 articole științifice publicate în volumele unor reviste indexate ISI Web of Science;
 - 5 articole publicate în reviste B+ incluse în baze de date internaționale;
 - 5 articole publicate în volumele conferințelor naționale și internaționale neindexate;
- 3 articole în curs de publicare la reviste ISI Web of Science cu factor de impact din cadrul MDPI;

Articole științifice publicate în volumele unor reviste indexate ISI Web of Science:

1. **Marius Brănoaea**, Burlacu Andrei, Marina Verdeș, Marius Costel Balan, Robert Ștefan Vizitiu, "Enhancing the Energy Efficiency of Photovoltaic Cells Through Water Cooling," *The 15th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, vol. 386, pp. 603-615, Octombrie 2021.

2. Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Cherifa Abid, Marina Verdes, Marius Costel Balan, **Marius Brănoaea**, "Experimental and Numerical Study of Thermal Performance of an Innovative Waste Heat Recovery System," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, p. 11542, Decembrie 2021. (*IF* = **2.838**)
3. Gavril Sosoi, Cherifa Abid, Marinela Barbuță, Andrei Burlacu, Marius Costel Balan, **Marius Brănoaea**, Robert Ștefan Vizitiu, Fabrice Rigollet "Experimental Investigation on Mechanical and Thermal Properties of Concrete Using Waste Materials as an Aggregate Substitution," *Materials*, vol. 15, no. 5, p. 1728, Februarie 2022. (*IF* = **3.748**)
4. Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Chérifa Abid , Marina Verdes, Marius Costel Balan, Stefanica Eliza Vizitiu și **Marius Brănoaea** "Experimental research of an innovative 2-stage heat recovery-storage system" - În curs de publicare, MDPI
5. Andrei Burlacu, Gavril Sosoi, Chérifa Abid, Marinela Barbuta, Marina Verdes, Robert Ștefan Vizitiu și **Marius Brănoaea**, "Innovative passive and environmentally friendly system for improving the energy performance of buildings" - În curs de publicare, MDPI
6. **Marius Brănoaea**, Burlacu Andrei, Chérifa Abid, Marina Verdeș, Marius Costel Balan, Robert Ștefan Vizitiu, "Experimental and Numerical analysis on multiple designs for passive and active photovoltaic-thermal (PVT) modules" - În curs de publicare, MDPI

Lucrări publicate în reviste B+ incluse în baze de date internaționale:

7. **Marius Brănoaea**, Andrei Burlacu, Vasiliță Ciocan, Marina Verdeș, Robert Ștefan Vizitiu, "Numerical investigation of a novel heat pipe radiant floor heating system with integrated phase change materials," *The 14th International Conference on Interdisciplinarity in Engineering—INTER-ENG 2020*, vol. 63, p. 10, Decembrie 2020.
8. Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Chérifa Abid – David, Alexandru Șerban, Marina Verdeș, Vasiliță Ciocan, **Marius Brănoaea**, "Experimental investigation on the optimum filling ratio of heat pipes used for heat recovery systems," *Proceedings Of International Conference Building Services And Energy Efficiency*, p. 154-161, Decembrie 2020.
9. **Marius Brănoaea**, Andrei Burlacu, Vasiliță Ciocan, Marina Verdeș, Robert Ștefan Vizitiu, "Heat transfer analysis of a phase change material integrated floor heating

system," *51th International HVAC&R Congress and Exhibition*, vol. 51, pp. 145-152, Decembrie 2020.

10. **Marius Brănoaea**, Andrei Burlacu, "A review on the energy performance and efficiency of radiant floor heating systems with integrated phase change materials," *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, vol. 67, pp. 81-91, Martie 2021.
11. **Marius Brănoaea**, Andrei Burlacu, Marina Verdeș, Vasilica Ciocan, Marius Costel Balan, Robert Ștefan Vizitiu, "Hybrid photovoltaic-thermic system with enhanced cell energy efficiency," *CLIMA 2022 The 14th REHVA HVAC World Congress*, Mai 2022.

Lucrări publicate în volume ale conferințelor naționale și internaționale:

12. Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Marius **Brănoaea**, "Heat transfer analysis of a dual modular heat recovery system," *50th International HVAC&R Congress and Exhibition*, vol. 50, no. 1, pp. 213-217, 4-6 Decembrie 2019.
13. **Marius Brănoaea**, Andrei Burlacu, Robert Ștefan Vizitiu, "Răcirea panourilor fotovoltaice pentru îmbunătățirea eficienței energetice," *Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională Instalații Pentru Construcții Și Economia De Energie Ediția a-XXXIa*, 1-2 Iunie 2021.
14. Robert-Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Ștefănica-Eliza Vizitiu, **Marius Brănoaea**, "Analiza comparativă a unor materiale cu schimbare de fază folosite într-un recuperator de căldură," *Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională Instalații Pentru Construcții Și Economia De Energie Ediția a-XXXIa*, 1-2 Iunie 2021.
15. **Marius Brănoaea**, Burlacu Andrei, Marina Verdeș, Vasilică Ciocan, Marius Costel Balan, Robert Ștefan Vizitiu, Ștefănica Eliza Vizitiu, "Sisteme fotovoltaic-termice hibride cu eficiență energetică ridicată", *Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională Instalații Pentru Construcții Și Economia De Energie Ediția a-XXXIa*, 7-8 Iulie 2022.
16. Ștefănica-Eliza Vizitiu, Robert-Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, **Marius Brănoaea**, Marina Verdeș, Vasilică Ciocan, Marius-Costel Balan, "Analiza eficienței unui recuperator de căldură cu tuburi termice de tip apă-aer prin simulare numerică", *Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională Instalații Pentru Construcții Și Economia De Energie Ediția a-XXXIa*, 7-8 Iulie 2022.

Proiecte:

17. Membru cercetător din echipa de cercetare pentru contractul NR. 440PED / 02.11.2020 PN-III-P2-2.1-PED-2019-3112 “SISTEM MODULAR SOLAR HIBRID PENTRU ÎNCĂLZIREA CLĂDIRILOR CU PRODUCERE SIMULTANĂ DE ENERGIE ELECTRICĂ ȘI APĂ CALDĂ DE CONSUM”
18. Membru cercetător Grant intern pentru Finanțare de bază - Finanțarea cercetării științifice universitare - Granturi interne - PUBLICATII - Proiect pentru susținerea capacității de publicare Nr. GI/P32/2021 înregistrat TUIASI Nr. 21079/16.07.2021, valoare 45.000 lei, durata 5,5 luni, 01.07.2021-15.12.2021, Director Grant Intern : Asist.dr.ing. Florin-Emilian Țurcanu

Elaborare cărți/capitole cărți:

19. Realizare desene și tehoredactare: Liliana Bejan, “Elemente de mecanică teoretică”, Iași: Editura Performantica, 2021, ISBN 978-606-685-826-7

6.4. Oportunități de continuare a cercetării

Sistemele modulare hibride au fost special concepute pentru a putea fi îmbunătățite utilizând tehnologii noi și moderne ce încă sunt la stadiul de teste de laborator, în acest scop s-a conceput un orificiu în care sa poată fi turnat material cu schimbare de fază sau materiale de stocare termică avansate.

Integrarea materialelor cu schimbare de fază în aceste sisteme ar îmbunătăți eficiență termică a modulelor hibride. Pentru a facilita integrarea ulterioară de materiale cu schimbare de fază în structura recuperatoarelor de căldură, acestea au fost special concepute și executate, având pe lângă placa de transfer de căldura de pe partea panoului fotovoltaic o placă pe partea posterioară tubulaturii de răcire, aceste plăci fiind închise pe laterale și în partea inferioară pentru a putea susține un material cu schimbare de fază.

Este necesară investigarea ulterioară a materialului nano-PCM pentru sistemele PVT. Luarea în considerare a tipului de PCM, a materialului carcasi, a numărului de cicluri de încălzire și răcire și a fluidului purtător împreună cu investigarea perioadei de încărcare și descărcare

Un alt posibil subiect de interes ar fi testarea unor modele cu suprafața absorbantă compusă din orificii cu structură dreptunghiulară sau trapezoidală pentru a spori suprafața de contact dintre panoul fotovoltaic și placa absorbantă de căldură.

Folosirea de fluide avansate de răcire cum ar fi nanofluidele cu oxizi metalici.

Bibliografie parțială

- [1] D. Charles Keeling, "Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone," *Tellus*, vol. 25, no. 2, pp. 174-198, 1973.
- [2] Daniel A. Lashof, "Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming," *Nature*, vol. 344, pp. 529-531, Aprilie 1990.
- [3] IEA. (2022, Ianuarie) IEA Key World Energy Statistics 2021. [Online]. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply>
- [4] IEA (2021), Global Energy Review 2021. [Online]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>
- [5] Ergin Akalpler and Musa Esuwa Shingil, "Statistical reasoning the link between energy demand, CO2 emissions and growth: Evidence from China," *Procedia Computer Science*, vol. 120, pp. 182-188, 2017.
- [6] Panagiotis Fotis, Sotiris Karkalakos, and Dimitrios Asteriou, "The relationship between energy demand and real GDP growth rate: The role of price asymmetries and spatial externalities within 34 countries across the globe," *Energy Economics*, vol. 66, pp. 69-84, 2017.
- [7] Faustino Patiño Cambeiro, Julia Armesto, Guillermo Bastos, Juan Ignacio Prieto López, and Faustino Patiño Barbeito, "Economic appraisal of energy efficiency renovations in tertiary buildings," *Sustainable Cities and Society*, vol. 47, p. 101503, 2019.
- [8] Helen Kopnina, "Energy Policy in the European Union: Renewable Energy and the Risks of Subversion," in *Governance and Security Issues of the European Union*..M.C. Asser Press, The Hague, 2016, pp. 167-184.
- [9] European Commission. (2022, Mai) European Commission. [Online]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131
- [10] United Nations Climate Change. (2021, Iulie) Paris Agreement. [Online]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [11] European Commission. (2022, Mai) Factsheet on Energy Savings. [Online]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_22_3137
- [12] Comisia Europeană. (2022, Ianuarie) Comisia Europeană. [Online]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/ro/qanda_21_3525
- [13] ECOS. (2022, Mai) Environmental Coalition on Standards (ECOS). [Online]. <https://ecostandard.org/publications/five-years-left-how-ecodesign-and-energy-labelling-can-decarbonise-heating/>
- [14] IEA. (2022, Ianuarie) IEA Renewable Power. [Online]. <https://www.iea.org/reports/renewable-power>
- [15] L. Lakatos, G. Hevessy, and J. Kovács, "Advantages and disadvantages of solar energy and wind-power," *World Futures*, vol. 67, no. 6, pp. 395-408, August 2011.
- [16] Mohammad Jamil Ahmad and G. N. Tiwari, "Optimization of Tilt Angle for Solar Collector to Receive Maximum Radiation," *The Open Renewable Energy Journal*, vol. 2, pp. 19-24, Februarie 2009.
- [17] Mohamed Nfaoui and Khalil El-Hami, "Extracting the maximum energy from solar panels," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 536-545, Noiembrie 2018.
- [18] Ottmar Edenhofer et al., "Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation," Cambridge University, Cambridge, Special Report of the Intergovernmental ISBN 978-1-107-02340-6, Iunie 2021. [Online]. <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>

- [19] Kiran Ranabhat et al., "An introduction to solar cell technology," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 14, no. 4, pp. 481-491, Ianuarie 2016.
- [20] Brij Encapsulants. (2022, Iunie) BrijEncapsulants. [Online]. <http://www.brijencapsulants.com/2020/12/28/six-main-components-solar-panel/>
- [21] Cătălin-George Popovici, Sebastian Valeriu Hudisteanu, Theodor Dorin Mateescu, and Nelu-Cristian Chereches, "Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled Heat Sinks," *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 425 – 432, Ianuarie 2016.
- [22] VDMA Photovoltaic Equipment, "International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2019, Eleventh Edition," VDMA, Frankfurt, 2020.
- [23] Jose Cano, Jim Joseph John, Sai Tatapudi, and GovindaSamy TamizhMani, "Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling," *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp. 3174-3176, Iunie 2014.
- [24] PVPMC. (2021, Iulie) PV Performance Modeling Collaborative. [Online]. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/array-orientation/fixed-tilt/>
- [25] E.D. Mehleri, P.L. Zervas, H. Sarimveis, J.A. Palyvos, and N.C. Markatos, "Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2468-2475, Noiembrie 2010.
- [26] Emanuele Calabrò, "The Disagreement between Anisotropic-Isotropic Diffuse Solar Radiation Models as a Function of Solar Declination: Computing the Optimum Tilt Angle of Solar Panels in the Area of Southern-Italy," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 253-259, Ianuarie 2012.
- [27] E. C. Kern, Jr. and M. C. Russell, "Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems," in *IEEE photovoltaic specialists conference*, Washington, DC, 1978.
- [28] M.J.M. Jong and H.A. Zondag, "System studies on combined PV thermal panels," in *9th International Conference on Solar Energy in High Latitudes. Northsun 2001*, Leiden, The Netherlands, 2001, p. 12.
- [29] P. Barnwal and G.N. Tiwari, "Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study," *Solar Energy*, vol. 82, no. 12, pp. 1131-1144, December 2008.
- [30] Jinyi Guo, Simao Lin, Jose I. Bilbao, Stephen D. White, and Alistair B. Sproul, "A review of photovoltaic thermal (PV/T) heat utilisation with low temperature desiccant cooling and dehumidification," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 1-14, Ianuarie 2017.
- [31] Wei Luo et al., "Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review," *Energy & Environmental Science*, no. 10, pp. 43-68, 2017.
- [32] Bhalechandra V. Chikate and Y. A. Sadawarte, "The Factors Affecting the Performance of Solar Cell," *International Journal of Computer Applications*, no. 1, pp. 975-8887, 2015.
- [33] M. F. Abdullah et al., "Research and development efforts on texturization to reduce the optical losses at front surface of silicon solar cell," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 380-398, 2016.
- [34] A. Richter, M. Hermle, and W. Glunz, "Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, pp. 1184-1191, 2013.
- [35] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, 2009.

- [36] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 23-29, 2009.
- [37] Diego Torres Lobera and Seppo Valkealahti, "Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 183-194, Iulie 2013.
- [38] E. Zambolin and Davide Del Col, "Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions," *Solar Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1382-1396, August 2010.
- [39] Ricardo Conceição et al., "Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal," *Solar Energy*, vol. 160, no. 15, pp. 94-102, 2018.
- [40] Amirhossein Zabihi Sheshpoli, Omid Jahanian, and Kamyar Nikzadfar, "An experimental investigation on the effects of dust accumulation on a photovoltaic panel efficiency utilized near agricultural land," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 89, Ianuarie 2021.
- [41] Michael Koehl, Markus Heck, and Stefan Wiesmeier, "Modelling of conditions for accelerated lifetime testing of Humidity impact on PV-modules based on monitoring of climatic data," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 99, pp. 282-291, Aprilie 2012.
- [42] Michael D. Kempe, "Modeling of rates of moisture ingress into photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 16, pp. 2720-2738, Octombrie 2006.
- [43] Ali H.A. Al-Waeli et al., "Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study," *Energy Conversion and Management*, vol. 151, pp. 693-708, Noiembrie 2017.
- [44] A. Hunter Fanney et al., "Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 152-159, Mai 2006.
- [45] K. Morita, T. Inoue, H. Kato, I. Tsuda, and Y. Hishikawa, "Degradation factor analysis of crystalline-Si PV modules through long-term field exposure test," in *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003*, 2003, pp. 1948-1951.
- [46] Neelkanth G. Dhere and Nachiket R. Raravikar, "Adhesional shear strength and surface analysis of a PV module deployed in harsh coastal climate," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, no. 1-4, pp. 363-367, Martie 2001.
- [47] R. Laronde, A. Charki, and D. Bigaud, "Lifetime Estimation of a Photovoltaic Module Subjected to Corrosion Due to Damp Heat Testing," *Journal of Solar Engineering*, vol. 135, no. 2, p. 21010, Noiembrie 2012.
- [48] C. Peike et al., "Origin of damp-heat induced cell degradation," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 116, pp. 49-54, Septembrie 2013.
- [49] Manuel Vazquez and Ignacio Rey-Stolle, "Photovoltaic module reliability based on field degradation studies," *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, vol. 16, no. 5, pp. 419 - 433, August 2008.
- [50] M.A. Munoz, M.C. Alonso-García, Nieves Vela, and F. Chenlo, "Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions," *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2264-2274, Septembrie 2011.
- [51] Ababacar Ndiaye et al., "Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review," *Solar Energy*, vol. 96, pp. 140-151, Octombrie 2013.
- [52] Tanima Bhattacharya, Ajoy Kumar Chakraborty, and Kaushik Pal, "Effects of Ambient Temperature and Wind Speed on Performance of Monocrystalline Solar Photovoltaic Module in Tripura, India," *Journal of Solar Energy*, vol. 3, p. 5, Septembrie 2014.

- [53] William C. Hinds and Yifang Zhu, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999.
- [54] R. Daghigh, M.H. Ruslan, and K. Sopian, "Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 4156-4170, Iulie 2011.
- [55] Ahmad Fudholi et al., "Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 641-651, Februarie 2014.
- [56] Ali Salari, Amin Taheri, Amin Farzanehnia, Mohammad Passandideh-fard, and Mohammad Sardarabadi, "An updated review of the performance of nanofluid-based photovoltaic thermal systems from energy, exergy, economic, and environmental (4E) approaches," *Journal of Cleaner Production*, p. 124318, 2020.
- [57] (2021, Iulie) OSram site oficial. [Online]. https://www.osram.com/ecat/ULTRA-VITALUX%20UV-A-UV-A-Ultraviolet%20lamps-Industry-Specialty%20Lighting/com/en/GPS01_1028569/ZMP_60829/
- [58] (2020, Ianuarie) Autodesk. [Online]. <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&filters=individual>
- [59] (2020, Ianuarie) Jinko. [Online]. <http://jinkosolar.com.au/wp-content/uploads/2021/12/Eagle-JKM315M-60-A2-EN.pdf>
- [60] (2021, Iulie) Sina metalica. [Online]. <https://www.dedeman.ro/bacau2/sina-pentru-tablou-adeleq-omega-02-435-metal-galvanizat-3-5-x-100-cm/p/1019739>
- [61] Marius Brănoaea, Burlacu Andrei, Marina Verdeș, Marius Costel Balan, and Robert Ștefan Vizitiu, "Enhancing the Energy Efficiency of Photovoltaic Cells Through Water Cooling," *The 15th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, vol. 386, pp. 603-615, Octombrie 2021.
- [62] (2021, Iulie) Mouser. [Online]. <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Advanced-Thermal-Solutions/ATS-HP-F8L300S21W-404?qs=w%2Fv1CP2dgqplsMkb%252Bhz%2F8Q%3D%3D>
- [63] (2021, Iulie) tub termic lat. [Online]. https://ro.farnell.com/amec-thermasol/mhp-2550a-250a/heat-pipe-ultra-flat-2-5tx250l/dp/2290489?mckv=BqxUYyhe_dc%7Cpcrid%7C526130261496%7C&CMP=KNC-GRO-GEN-SHOPPING-Whoop-7-June-2021&gross_price=true#anchorTechnicalDOCS
- [64] Georgia Apostolou, Angèle Reinders, and Martin Verwaal, "Comparison of the indoor performance of 12 commercial PV products by a simple model," *Energy Science & Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 69-85, Ianuarie 2016.
- [65] Francisco Plaza Gomariz, José Manuel Cejudo López, and Fernando Domínguez Muñoz, "An analysis of low flow for solar thermal system for water heating," *Solar Energy*, vol. 179, p. Februarie, 2019 179.
- [66] Nirendra Lal Shrestha et al., "Thermal and hydraulic investigation of large-scale solar collector field," *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 605-614, Septembrie 2018.
- [67] Sakhr M. Sultan, C. P. Tso, and Ervina Efsan, "The effect of mass flow rate and solar radiation on the photovoltaic efficiency of a glazed water based PVT," *AIP Conference Proceedings 2030*, pp. 020309-1 -020309-6, Noiembrie 2018.
- [68] Firebird. (2021, Noiembrie) Firebird. [Online]. <https://firebird.uk.com/wp-content/uploads/2016/06/Guide-to-Solar-Thermal-Systems-Brochure-2012.pdf>