



Universitatea Tehnică
de Construcții București

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

Cercetări privind sistemele neconvenționale hibride de
alimentare cu energie termica a cladirilor

Teză de doctorat
REZUMAT

Conducător de doctorat

Prof. dr. ing. Iordache Florin

Student doctorand

Drd. ing. Dragne Horatiu

București 2021

CUPRINS

1.INTRODUCERE.....	5
1.1 Potențialul în exploatare al resurselor solare regenerabile.....	5
1.2 Potențialul în exploatare al echipamentelor de tip pompe de căldură.....	6
1.3 Descrierea sistemului studiat.....	6
2. MODELAREA MATEMATICĂ A FUNCȚIONĂRII SISTEMELOR NECONVENȚIONALE.....	8
2.1 Ecuații fundamentale.....	8
2.1.1 Bilanțuri termice specifice buclei solare.....	8
2.1.2 Bilanțuri termice specifice buclei pompei de căldură.....	8
2.1.3 Bilanțuri termice specifice consumatorului.....	10
2.2 Metode de evaluare a panourilor solare.....	10
2.2.1 Cerințe clădiri NZEB.....	10
2.2.2 Metodologia de calcul folosită pentru evaluarea energetică a panourilor solare.....	10
2.2.3 Ghid practic de folosire al metodei de calcul solar termic.....	11
2.3 Metode de evaluare a pompelor de căldură.....	12
2.4 Metodologia de calcul folosită pentru evaluarea economică a rentabilității sistemului.....	12
3. MODEL EXPERIMENTAL.....	13
3.1 Descrierea programului de cercetare experimentală.....	13
3.1.1 Aparată de măsură și echipamente electronice utilizate, prezentare caracteristici reprezentative ale acestora.....	14
3.1.2 - Detalierea condițiilor îndeplinite în cercetarea experimentală efectuată.....	15
3.2 Rezultatele experimentale.....	15
4. PROCEDURĂ DE EVALUARE A PERFORMANȚELOR CU APLICABILITATE PRACTICĂ.....	17
4.1 Construcția unei proceduri energetice cu aplicabilitate ușoară și practică de stabilire a factorilor intermediari din metodologia solară.....	17
4.1.1 Etape anterioare construcției procedurii energetice.....	17
4.1.2 Procedura energetică caracteristică României pentru panouri solare.....	18

4.1.3 Procedura energetică caracteristică României pentru pompe de căldură.....	21
4.2 Rezultatele obținute în urma aplicării procedurii energetice.....	22
4.2.1 Rezultatele procedurii energetice pentru panourilor solare	22
4.2.2 Rezultatele procedurii energetice pentru pompelor de căldură.....	22
5. PROCEDURA DE CALCUL ECONOMICĂ.....	25
5.1 Construcția procedurii economice.....	25
5.1.1 Etape anterioare construcției procedurii economice a sistemului.....	25
5.1.2 Procedura economică de calcul pentru panourile solare.....	26
5.1.3 Procedura economică de calcul pentru pompele de căldură.....	26
5.2 Rezultatele obținute aplicând procedura economică.....	27
5.2.1 Rezultatele obținute aplicând procedura economică pentru panourilor solare.....	27
5.2.2 Rezultatele obținute aplicând procedura economică pentru pompele de căldură.....	27
6. CONCLUZII, PERSPECTIVE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	28
6.1 Concluzii.....	28
6.2 Perspective și recomandări.....	29
6.3 Contribuții personale.....	29
Referințe selective.....	31

1. INTRODUCERE

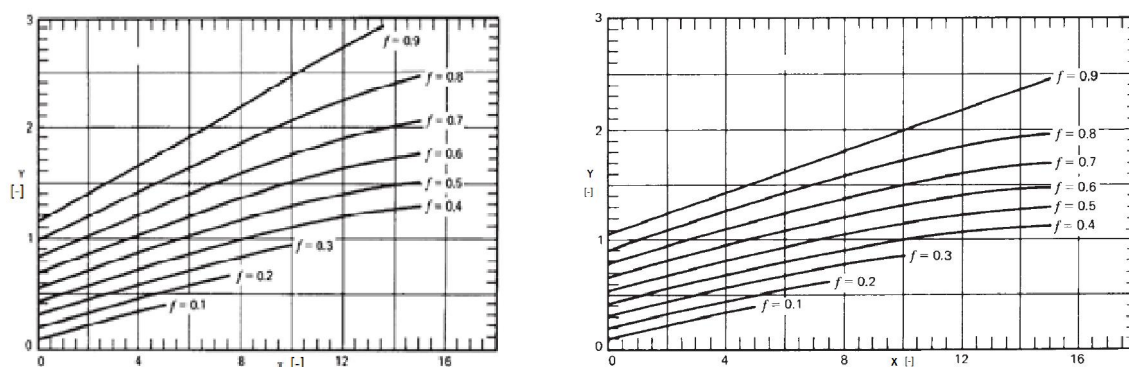
Arderea combustibililor fosili a fost principala sursă de producere a energiei mecanice, termice sau electrice în secolul XIX și secolul XX. Exploatarea la nivel planetar a acestor resurse a afectat mediul înconjurător și conduce la epuizarea resurselor în următoarele decenii. Conform [7], deteriorarea stratului de ozon și accentuarea efectului de seră prin producerea gazelor de seră rezultate din procesele de ardere a combustibililor fosili reprezintă principala problemă a secolului.

În acest sens, se încearcă să se găsească cele mai eficiente astfel de sisteme, care să înlocuiască într-un procent tot mai mare, resursele de energie bazate pe combustibili fosili [46].

1.1 Potențialul în exploatare al resurselor solare regenerabile

Utilizarea energiei solare pentru încălzirea spațiilor și prepararea apei calde menajere este în momentul de față o soluție din ce în ce mai des abordată pentru a realiza economie de energie provenită din resurse regenerabile [37]. În cadrul acestei teze, s-a urmărit stabilirea în mod experimental al performanțelor tehnice ale unui captator solar. Determinarea acestora cu un grad de încredere cât mai mare este un factor crucial în stabilirea performanțelor globale ale unui sistem [27] ce înglobează un astfel de echipament. În literatura de specialitate există mai multe variante prin care această performanță solară a fost determinată din punct de vedere teoretic, conform [13]. Majoritatea metodelor de determinare pentru toate tipurile de panouri solare (cu placă plană sau cu tuburi vidate) pot fi fundamentate pe baza relațiilor teoretice din [34]. Diferențele în privința eficienței diferitelor tipuri de panouri solare sunt notabile [19], dar și costul de fabricație al acestora variază foarte mult [40]. Aceasta este prezentată în literatura de specialitate prin diferite tipuri de ecuații, cele de gradul I având o acuratețe mai scăzută decât cele de gradul al doilea [12].

În [34] este prezentată metoda de calcul generală, aplicabilă clădirilor rezidențiale unde temperatura de livrare a energiei termice este de cel puțin 20 °C. Această metodă este denumită f-Chart. Pentru sisteme pe apă sau aer de încălzire este folosită diagrama din Figură 1, unde factorii sintetici X și Y au fost descriși anterior. Apoi, se poate determina raportul optim dintre capacitatea de stocare și capacitatea de transfer termic a schimbătorului de căldură și o scurtă analiză economică arătând variația suprafeței de captare față de gradul de acoperire energetică al panourilor solare.



Figură 1- a,b Metoda f-Chart pentru sisteme de încălzire pe apă(a) și aer(b)

1.2 Potențialul în exploatare al echipamentelor de tip pompe de căldură

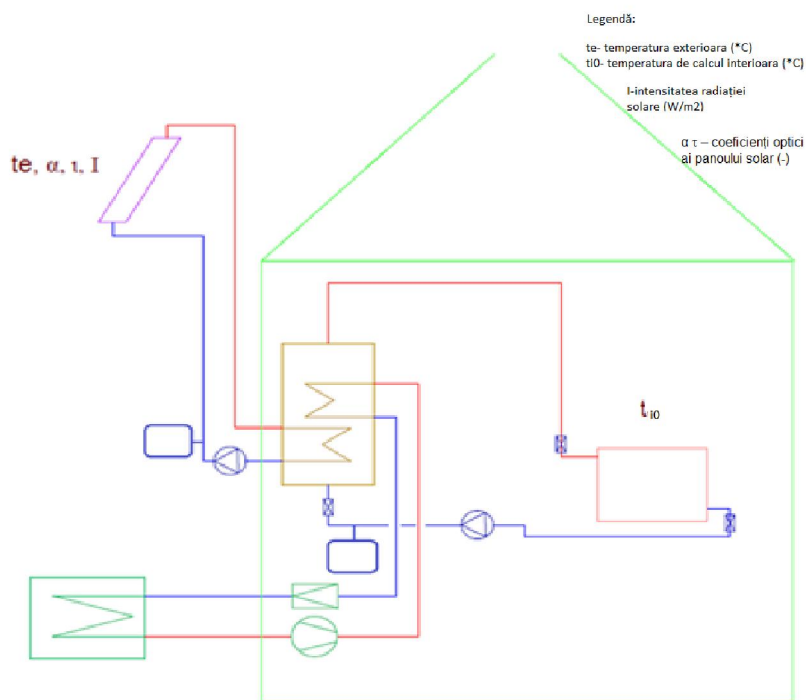
Pompa de căldură mai este o instalație termodinamică complexă prin care sensul natural al transmisiei căldurii poate fi inversat. Aceasta are minimum două surse externe: sursa rece, care preia căldura din exterior și o cedează prin intermediul schimbătorului de căldură-vaporizator și o sursă caldă, care preia căldura de la agentul de lucru în schimbătorul de căldură condensator și o cedează în exterior [18].

Utilizarea pompelor de căldură poate oferi în aceeași măsură o contribuție semnificativă la acoperirea cererii de căldură în clădiri rezidențiale, fiind o sursă de energie regenerabilă foarte versatilă și des întâlnită, prin urmare, este o sursă de energie adecvată pentru casele cu consum redus de energie și case pasive [37].

1.3 Descrierea sistemului studiat

Această teză de doctorat studiază o modalitate avansată de utilizare a unui sistem mixt ce utilizează panouri solare și pompe de căldură. Acest sistem neconventional de utilizare a energiei solare termice este folosit pentru încălzirea spațiilor unei clădiri și prepararea apei calde de consum. Din punct de vedere al schemei generale de funcționare, panourile solare introduc energia termică într-un sistem de acumulare al energiei termice reprezentat de un rezervor bine izolat termic. O pompă de căldură, introduce energia termică în același rezervor de acumulare, acesta fiind alimentat la sistemul de încălzire al unei locuințe.

Acest rezumat al tezei își propune evaluarea performanțelor energetice a unui astfel de sistem hibrid (figura 2) de utilizare a energiei solare și prezintă consecințele directe privind optimizarea a acestor sisteme tratând selectiv doar cazul de preparare al agentului termic pentru încălzire.



Figură 2- Schema generală a instalației cu factorii climatici

Obiectivul concret al tezei de doctorat, a fost de realizarea unor modalități cu caracter practic și ușor de înțeles și aplicat al capitolului de solar termic din cadrul Mc001/2021 [36], prin dezvoltarea și particularizarea relațiilor din cadrul acestui capitol al metodologiei energetice. Dat fiind că gradul de acoperire energetică anual al necesarului energetic termic este elementul căutat a fi evaluat, s-a studiat structura acestui parametru și s-a observat ca el, GAE depinde de o serie de parametri independenți, cunoscuți de utilizator cum ar fi : indicatorul energetic al potențialului climatic al localității din care face parte clădirea investigată (β_{REF}), modul de dimensionare al instalației de încălzire (t_{T0}/t_{R0}), tipul și numărul de captatori solari reflectat prin (k_c), respectiv prin raportul suprafeței de captare (H/S_c). Din acest motiv s-au clasificat cele 79 de localități menționate în SR-4839/2014 [44], în 5 clase diferite în funcție de β_{REF} , calculând β_{REF} pentru fiecare din cele 80 de localități. În acest fel, pentru fiecare din cele 5 clase, pentru valoarea medie a clasei pentru β_{REF} s-a particularizat expresia lui GAE. În continuare, pentru fiecare clasă, s-au obținut forme și mai particulare ale lui GAE pentru 3 variante de dimensionare a instalației de încălzire centralizată (t_{T0}/t_{R0}): 90/70 °C, 70/50 °C și 50/30 °C și în consecință, au apărut $5 \times 3 = 15$ forme particulare ale lui GAE în funcție de factorii climatici și tipul ales de încălzire, care însă mai depinde de 2 parametri independenți, care sunt k_c și H/S_c , după cum a fost explicat anterior. Pentru integrarea acestora, s-au folosit o serie de nomograme simple din care reiese GAE. Din acest punct, se propune ca alternativă trecerea și la o analiză economică care să țină seama atât de calitatea captatorilor solari (k_c) și de cantitatea de captatori solari (H/S_c). În cazul în care suprafața de captare este cunoscută, atunci se stabilește efectiv GAE iar dacă suprafața de captare urmează să fie stabilită atunci se poate trece la analiza economică pentru a se stabili suprafața de captare în funcție de costuri. Pentru utilizarea pompelor de căldură în tandem cu panourile solare termice, a fost calculat COP-ul și energia consumată de un sistem de pompe de căldură pentru asigurarea întregului necesar de energie termică doar din energii din resurse regenerabile. Analiza economică a fost complementată cu calculul economic al întregului sistem din panouri solare și pompe de căldură.

Pe lângă acest obiectiv, teza își propune ușurarea muncii proiectantului de sisteme regenerabile, integrând un ghid de folosire al metodologiei de calcul solar termic, nomograme de calcul din care reiese direct GAE, atât pentru sistemele de încălzire întâlnite în mod uzual, cât și pentru sistemele de preparare al apei calde.

Pentru atingerea acestor scopuri, au fost efectuate o serie de studii aprofundate utilizând bazele metodologiei de calcul solare, ce arată importanța evaluării tuturor parametrilor simpli din care este compus GAE. Studiul de pompe de căldură a condus la realizarea unor sisteme mixte de ansamblu pentru alimentarea cu energia termică al clădirilor rezidențiale.

Această teză de doctorat cuprinde studiile a 3 rapoarte de cercetare ce au tratat o cercetare teoretică, o cercetare experimentală și un model de calcul pentru determinarea performanțelor sistemelor mixte ce folosesc panouri solare și pompe de căldură.

2. MODELAREA MATEMATICĂ A FUNCȚIONĂRII SISTEMELOR NECONVENȚIONALE

2.1 Ecuatii fundamentale

În cadrul acestui rezumat al tezei de doctorat care are ca scop utilizarea unui sistem experimental de panouri solare (împreună cu un sistem de pompe de caldură), se vor prezenta principalele relații de calcul al unui astfel de sistem, preluate din bibliografie, conform [18], [19] și [34].

Se alege pentru modelare, sistemul prezentat în Figura 2 .

2.1.1 Bilanțuri termice specifice buclei solare

Conform [13], relația care permite evaluarea randamentului captatorului este:

$$\eta = F_R \cdot (\alpha \cdot \tau) - F_R \cdot k_C \cdot \beta \quad (1)$$

Unde, β este factorul climatic ce se determină cu:

$$\beta = \frac{t_0 - t_e}{I} \quad (2)$$

Iar F_R este eficiența de captare al panoului solar, determinată cu:

$$F_R = \frac{a \cdot \rho \cdot c}{k_C} \cdot (1 - E) \quad (3)$$

E este caracteristica intrinsecă, constructiv-funcțională, a suprafeței de captare:

$$E = \exp\left(-\frac{F' \cdot k_C}{a \cdot \rho \cdot c}\right) \quad (4)$$

2.1.2 Bilanțuri termice specifice buclei pompei de căldură

Din studiile teoretic [24] și [25], rezultă că indicatorul central ce trebuie determinat pentru pompele de căldură este eficiența maximă a mașinii frigorifice, ε_{vpi} , toate eficiențele reieșind pe baza acesteia și a constantelor constructive ale pompei de căldură.

Pentru a determina ε_{vpi} , în cadrul sistemului ales, trebuie stabilite temperatura de vaporizare și cea de condensare:

$$T_{VP} = t_{VP} + 273,15 = \theta_{VP} - \Delta t_{VP} + 273,15 \quad (5)$$

$$T_{CD} = t_{CD} + 273,15 = \theta_{CD} - \Delta t_{CD} + 273,15 \quad (6)$$

Efectuând aceste calcule se obține o dependență ε_{vpiz} în raport cu temperaturile de condensare și de vaporizare (T_{CD} și T_{VP}) neliniară, ce are un grad de acuratețe mai

mic în determinarea curbei de valori. Din acest motiv, s-a optat pentru utilizarea unei metode mai precise, similare, ce exprimă ε_{vp} în funcție de ε_{vp}^C , eficiența Carnot a mașinii frigorifice, printr-o ecuație liniară. În acest caz, T_{CD} și T_{VP} rămân aceleași și se obțin ecuațiile de forma:

$$f = \frac{T_{CD}}{T_{VP}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{VP}^C = \frac{1}{f - 1} \quad (8)$$

Există posibilitatea de a utiliza corelația dintre ε_{vpiz} și ε_{vp}^C :

$$\varepsilon_{VPiz} = M^* \cdot \varepsilon_{VP}^C - N^* \quad (9)$$

În acest caz, eficiențele brute ale pompei de căldură devin:

$$\varepsilon_{VP} = \varepsilon_{VPiz} \cdot \eta_{iz} = (M^* \cdot \varepsilon_{VP}^C - N^*) \cdot \eta_{iz} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{CD} = 1 + \varepsilon_{VPiz} \cdot \eta_{iz} = 1 + (M^* \cdot \varepsilon_{VP}^C - N^*) \cdot \eta_{iz} \quad (11)$$

Eficiențele nete au forma finală:

$$EER = \varepsilon_{VP} \cdot \eta_{el} = \varepsilon_{VPiz} \cdot \eta_{iz} \cdot \eta_{el} = (M^* \cdot \varepsilon_{VP}^C - N^*) \cdot \eta_{iz} \cdot \eta_{el} \quad (12)$$

$$COP = \varepsilon_{CD} \cdot \eta_{el} = (1 + \varepsilon_{VPiz} \cdot \eta_{iz}) \cdot \eta_{el} = \left[1 + (M^* \cdot \varepsilon_{VP}^C - N^*) \cdot \eta_{iz} \right] \cdot \eta_{el} \quad (13)$$

Pentru cei mai utilizați agenți frigorifici (R410A, R134A, R407C, R507, R32), valorile aproximative ale coeficienților M^* și N^* sunt date în tabelul următor:

Tabel 1- Coeficienți M^* , N^* , agenți frigorifici

Agentul frigorific	M^*	N^*
R410A	0,958	1,5321
R134A	0,9812	1,2825
R407C	0,957	1,3453
R507	0,9642	1,8975
R32	0,9487	1,2586

Pentru determinarea EER și COP anual, trebuie să se stabilească ponderea procentuală a energiei lunare necesare ce este suplinită în totalitate de pompele de căldură cu formula:

$$Pond = \frac{E_{conslunar} \cdot (100 - G_{aet})}{E_{consanual}} = \frac{E_{conslunar} \cdot (100 - G_{aet})}{\sum E_{conslunar}} \quad (14)$$

Astfel, energia electrică consumată de pompa de căldură are forma:

$$E_{elPClunar} = \frac{E_{conslunar} \cdot (100 - G_{aet})}{COP_{lunar}} \quad (15)$$

$$\text{și } E_{elPCanual} = \sum E_{elPClunar} \quad (16)$$

2.1.3 Bilanțuri termice specifice consumatorului

Necesarul de căldură se stabilește prin calcul conform SR-1907-1:2014 [43]. Conform [14], [16], [17], bilanțul termic în regim staționar al clădirii și instalației de încălzire este următoarea:

$$Q = G \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{Tur} - t_{Ret}) = k_0 \cdot S \cdot (t_{ml} - t_i) = k_0 \cdot S \cdot \Delta t_{ml} \quad (17)$$

2.2 Metodologii de evaluare a panourilor solare

2.2.1 Cerințe clădiri NZEB

Denumirea de clădire NZEB (clădiri cu consum energetic aproape zero) a fost introdus în legislația europeană încă din 2010 [9]. Directiva privind performanța energetică a clădirilor a stabilit ca toate clădirile noi să respecte aceste cerințe din anul 2021. Pentru a se obține aceste consumuri foarte reduse trebuie luate următoarele măsuri:

- izolarea anvelopei clădirii trebuie să fie foarte bună, prin intermediul sistemelor de termoizolare avansate (polistiren de peste 20 cm), ferestre cu proprietăți de termoizolare foarte bune, reducerea punților termice;
- sisteme economice de iluminare, instalații de încălzire, ventilație, care să asigure o scădere semnificativă a consumului de energie pe metru pătrat ori an, utilizând echipamente cu un randament de funcționare ridicat;
- utilizarea unor sisteme de recuperare a căldurii;
- utilizarea de sisteme ce folosesc resurse regenerabile.

Pentru realizarea acestor cerințe, a fost realizată o metodologie de calcul energetică ce este îmbunătățită constant până la versiunea Mc001 din 2021 [36].

2.2.2 Metodologia de calcul folosită pentru evaluarea energetică

În cadrul acestei teze de doctorat, pentru determinările energetice a fost folosită metodologia de calcul solar termic pentru determinarea sistemelor solare elaborată în cadrul Metodologiei de evaluare a performanțelor energetice a clădirilor (Mc001 din 2021 [36], ce este o versiune revizuită a Mc001 din 2006 [35]), secțiunea referitoare la implementarea resurselor regenerabile de energie.

Datorită faptului că metoda este nouă și metoda de calcul include formule și termeni întâlniți doar în literatura de specialitate solară termică, s-a evidențiat

necesitatea elaborării unui ghid practic de utilizare al metodei. Acesta este prezentat în rândurile ce urmează (cu relațiile de calcul preluate din metodologie):

2.2.3 Ghid practic de folosire al metodei de calcul solar termic

Conform [36], cel mai important factor ce arată influența climatului, β_{REF} se determină cu formula:

$$\beta_{REF} = \frac{t_{i0} + t_e}{I \cdot f_s} \quad (18)$$

Unde I , este calculată utilizând intensitatea radiației solare orizontale la un anumit unghi specific de înclinare, detaliat în anexele MC001/2006 [35] și este multiplicată cu un factor f_s ce reprezintă orele de însorire.

Apoi, eficiența solară a panourilor solare poate fi calculată cu formula:

$$\eta_{BC} = F_R^{BC} \cdot [(\alpha \cdot \tau) - k_c \cdot F_{INC} \cdot \beta_{REF}] \quad (19)$$

Relația ce determină puterea de colectare a panourilor solare este:

$$P_{CP} = S_C \cdot I \cdot \eta_{BC} \cdot f_u \quad (20)$$

Și energia totală produsă de panourile solare în 24 de ore, pe un anumit număr (N) de zile este calculată cu formula:

$$E_{CP} = P_{CP} \cdot 24 \cdot N_{zl} \quad (21)$$

Puterea consumatorului este dată de relația:

$$P_{CONS} = H \cdot (t_{i0} - t_e) \quad (22)$$

Pentru analiza termică a cazului de încălzire, gradul de acoperire al instalației solare se poate determina pe fiecare lună cu formula:

$$G_{aet} = \frac{P_{cp}}{P_{cons}} \quad (23)$$

Eficiența sistemului de încălzire cu panouri solare poate fi determinată lunar cu formula:

$$RND = \frac{P_{cp}}{P_I} \quad (24)$$

Pentru a determina gradul de acoperire anual și eficiența anuală a sistemului, se va face media pentru fiecare lună de încălzire.

2.3 Metodologii de evaluare a pompelor de căldură

Pentru a evalua performanțele unei pompe de căldură inclusă într-un sistem solar, s-a ales varianta calculării eficienței efective a pompei de căldură prin intermediul eficienței izentropice ce reiese după calculul eficienței Carnot al mașinii frigorifice [25].

Pentru a simplifica sistemul, se poate considera că temperatura în rezervor este introdusă cu o anumită temperatură ce apoi este ridicată la temperatura de furnizare al agentului termic de către pompele de căldură.

Pentru a furniza energie termică doar din resurse regenerabile, pompa de căldură se dimensionează la cel mai mic grad de acoperire lunar oferit de panourile solare pentru ca sistemul să funcționeze cu energie termică provenită doar din resurse regenerabile. Acest lucru poate conduce la o supradimensionare a pompei de căldură dar se poate opta și pentru dimensionarea pentru luna martie și adăuga o sursă clasică suplimentară. Sursa clasică suplimentară trebuie prevăzută împreună cu un boiler trivalent, aceasta având serpentina în partea de sus a boilerului și funcționând doar în zilele cele mai friguroase ale anului. Aceasta nu este obligatorie, această teză de doctorat nu a studiat acest caz specific, deoarece s-a intenționat să se folosească sisteme de încălzire bazate exclusiv pe resurse regenerabile de energie.

2.4 Metodologia de calcul folosită pentru evaluarea economică a rentabilității sistemului

În cadrul normelor și metodologiilor existente sau în curs de propunere [35] și [36], există descris un calcul economic ce se adresează în ansamblu tuturor soluțiilor de îmbunătățire bazate pe resurse regenerabile. Acesta a fost adaptat la aplicație în cadrul acestui capitol.

Analiza economică a unei noi investiții solare pentru clădiri existente se realizează prin intermediul indicatorilor economici ai investiției. Dintre aceștia cei mai importanți sunt următorii:

- valoarea netă actualizată aferentă investiției suplimentare datorată aplicării unui proiect de reabilitare/modernizare energetică și economiei de energie rezultată prin aplicarea proiectului menționat, $\Delta VNA_{(m)}$ (lei) ;
- durata de recuperare a investiției suplimentare datorată aplicării unui proiect de reabilitare/modernizare energetică, N_R (ani), reprezentând timpul scurs din momentul realizării investiției în modernizarea energetică a unei clădiri și momentul în care valoarea acesteia este egalată de valoarea economiilor realizate prin implementarea măsurilor de modernizare energetică, adusă la momentul inițial al investiției;
- costul unității de energie economisită, e [lei/kWh], reprezentând raportul dintre valoarea investiției suplimentare datorată aplicării unui proiect de reabilitare/modernizare energetică și economiile de energie realizate prin implementarea acestuia pe durata de recuperare a investiției.

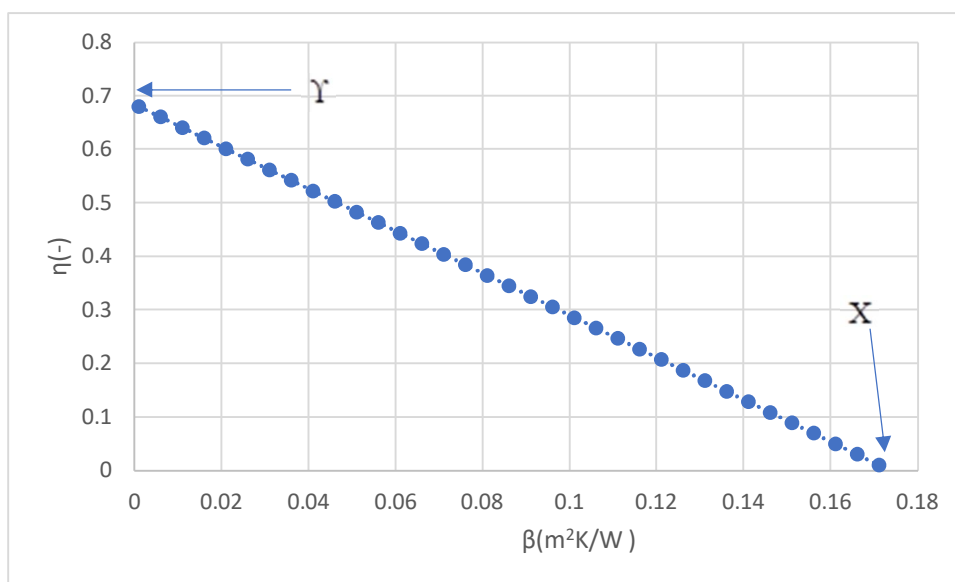
3. MODEL EXPERIMENTAL

3.1 Descrierea programului de cercetare experimentală

Având bazele teoretice de la capitolul 2 s-a urmărit studierea unor aspecte practice ce vor ajuta în completarea metodologiei de calcul solar termic. În cadrul tezei de doctorat, participând la un program național ce urmărea utilizarea unei instalații solare, am efectuat o cercetare prezentată în raportul de cercetare științifică numărul 2 ce a vizat două aspecte principale:

- Stabilirea unei expresii liniare a coeficientului global de transfer termic al captatorului solar, k_c prin forma pătratică a acestuia ce include variația temperaturii în timp pentru captoare instalate în regim de exploatare;
- Determinarea caracteristicii termice a captatorului solar (și coeficientul optic al panoului, σ_T) aflat în regim curent de exploatare raportat la caracteristica termică a captatorului solar de catalog (randamentul optic oferit de producător); determinarea ușoarei modificări a caracteristicii termice a captatorului solar aflat în regim curent de exploatare se datorează alterării coeficientului de transparență a elementului vitrat al captatorului solar.

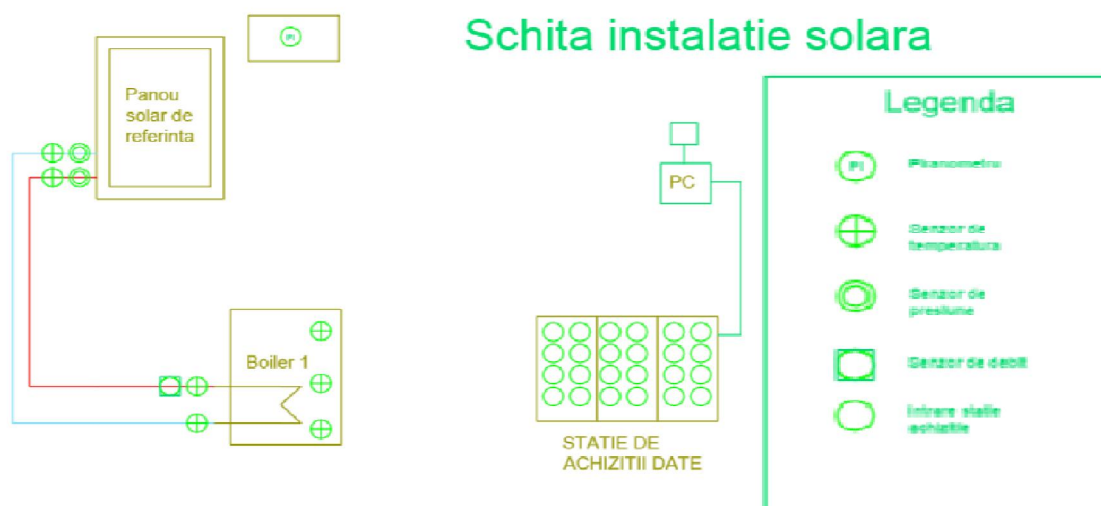
Pentru panoul utilizat a fost determinată următoarea caracteristică ce a reieșit în urma determinării k_c în funcție de β și apoi integrării coeficientului optic al panoului în ecuație, rezultând randamentul de funcționare al panoului solar:



Figură 3- Caracteristica randamentului captatorului solar în funcție de β

În [28] și [29] se fac diverse corecții ale randamentului captatorului și se explică dependența acestuia în funcție de debitul din colector, dar și de diverși agenți termici vehiculați prin acesta. Aceste lucrări au stat la baza desfășurării experimentelor la debite variabile.

Utilizând standul solar, în timpul experimentelor s-au înregistrat valori pentru toți senzorii prezentați în figura 4, cu un pas de timp de 5 minute pe o perioadă de 2 ani.



Figură 4– Schema de lucru a instalației solare

3.1.1 Aparate de măsură și echipamente electronice utilizate, prezentare caracteristici reprezentative ale acestora

Parametrii sistemului ce au fost mășurați în cadrul campaniei de experimentare sunt: temperatura, debitul din instalație, intensitatea radiației solare și presiunea din instalație.

Pentru măsurarea temperaturii în interiorul instalației au fost folosite 7 termocupluri tip K cu teacă imersate în fluidul vehiculat prin instalație. Acestea au fost inserate prin perforarea conductelor din cupru și punctul de racord a fost izolat termic. Inserarea termocuplurilor a fost efectuată la o distanță de 2 diametre față de alte piese de racord sau coliere de prindere, în conducta simplă din cupru, pentru a se evita formarea unor punți termice. Temperatura exterioară a fost măsurată cu un termocuplu tip K cu cap liber. Termocuplurile au fost prevăzute cu un cablu electric simplu izolat verde de dimensiuni variabile (de la 20 m până la 5 m, în funcție de caz) ce se termina cu o mufă de legătură la aparatul de achiziție a datelor.

Pentru măsurarea debitului în instalație au fost folosite debitmetre elicoidale cu DN 25 (FVA 915), ce măsoară de la 4 l/min la 100 l/min. Acestea funcționează la o temperatură maximă de 85 °C și la o presiune nominală de 10 bari. Acuratețea lor este de $\pm 5\%$. Acestea s-au conectat prin cabluri electrice izolate la sistemul de achiziție.

Pentru măsurarea intensității radiației solare în dreptul panoului solar a fost montat un piranometru sferic. Acesta măsoară intensitatea radiației solare de la 0 la 1500 W/m² în planul panoului cu un unghi de 180°. Acuratețea piranometrului este de $\pm 5\%$. Sticla piranometrului trebuie curățată periodic pentru a înregistra valorile corecte.

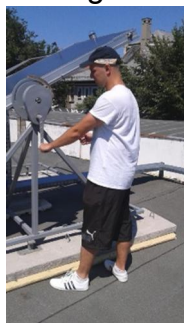
Pentru măsurarea presiunii din instalație au fost folosite atât manometre cu cadran pentru citirea rapidă și senzori de presiune imersați în fluidul vehiculat. Manometrul cu cadran montat în cadrul grupului de pompare măsoară presiunea de la 0 la 10 bari și citirea se face vizual, ajutând la reglajul efectuat în cadrul campaniei experimentale. Senzorul de presiune utilizat (FDA 602) măsoară presiunea de la 0 la 30 de bari în lichide cu temperatura între -10 și 80°C cu erori de până la $\pm 1,5\%$.

Parametrii sistemului ce au fost prelevați prin intermediul unui sistem de achiziții de date, în cadrul campaniei de experimentare, sunt: temperatura, debitul din instalație, intensitatea radiației solare și presiunea din instalație.

3.1.2 - Detalierea condițiilor îndeplinite în cercetarea experimentală efectuată

În cadrul programului experimental de colectare al datelor, s-au urmărit următoarele aspecte:

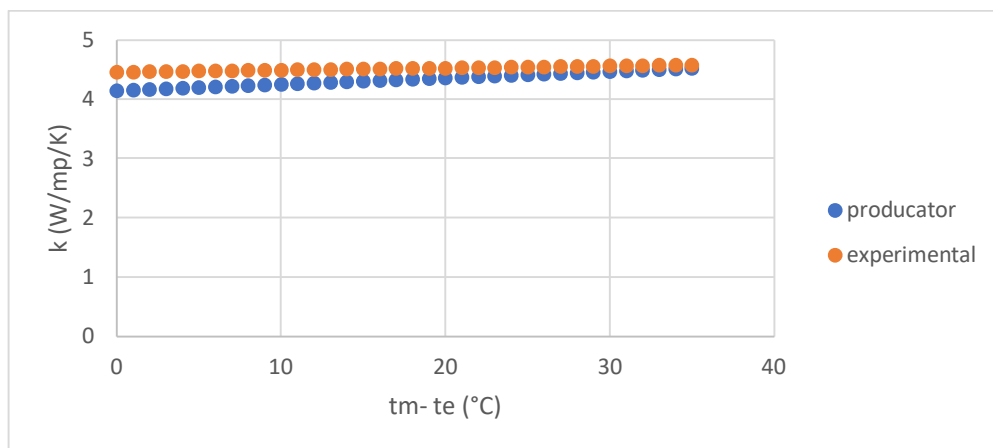
- Prelevarea datelor pe o perioadă de tranziție și o perioadă de vară;
- Setarea sistemului la diferite debite de funcționare și obținerea datelor;
- Prelevarea datelor în diferite regimuri de funcționare (încărcare, descărcare, mixt);
- Stabilirea unui program de măsurare și de prelevare a datelor;
- Prelucrarea datelor și obținerea bilanțului termic pe fiecare echipament;
- Setarea panoului la diferite unghiuri de înclinație.



Figură 5— Setarea panoului la un unghi cu orizontala

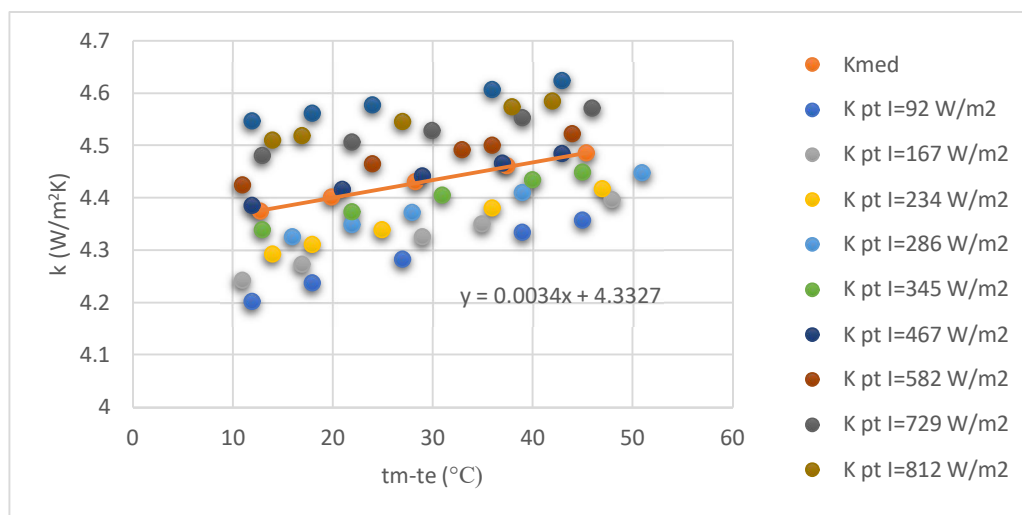
3.2 Rezultatele experimentale

În cadrul acestor experimentări, pe zilele de referință, cu o însoțire constantă pe toată perioada zilei, s-a dorit în primul rând exprimarea eficienței colectorului solar prin intermediul unei forme pătratice prezentate în capitolul anterior. Aceasta a fost comparată cu eficiența oferită de producător (Figură 6). Acest lucru a validat campania experimentală.



Figură 6— Grafic cu comparația caracteristicii termice a panoului solar

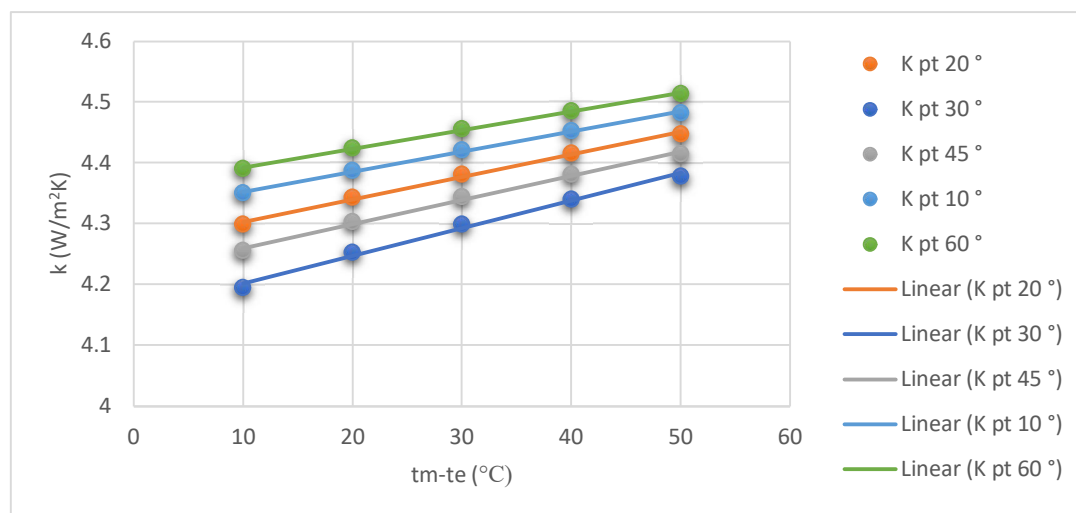
Pentru a determina această caracteristică a captatorului solar, în cadrul experimentărilor s-au măsurat: a , t_{tur} , t_{ret} , t_e și I și s-au aproximat în funcție de datele oferite de producător α , τ și F' . Astfel s-au determinat coeficienții k ai captatorului în funcție de $t_m - t_e$ (Figură 7) și β , prin doi coeficienți k_1 și k_2 .



Figură 7– Grafic cu k_c la diverse valori de I , conform experimentărilor

Producătorul panoului solar oferă valorile de $k_1 = 4,14$ și $k_2 = 0,0108$ pentru descrierea curbei eficienței panoului. În urma experimentărilor a fost construit un grafic cu această curbă pentru anumite valori medii orare obținute doar în zilele de referință. Astfel au fost obținute anumite valori medii ale lui I față de care au fost atribuite anumite valori medii ale lui k (format din k_1 și k_2). Astfel, s-au ajuns la valori de $k_1 = 4,3327$ și $k_2 = 0,0034$ pentru o înclinare a panoului de 30° și un debit maxim (peste $90 l/m^2h$). Aceste valori au determinat o performanță puțin mai mică decât cea dată de producător.

În cazul utilizării unor orientări diferite ale panoului față de suprafața orizontală (de 10° , 20° , 30° , 45° și 60°) valorile obținute pentru k au fost cele mai bune la unghiul de 30° (Figură 8).



Figură 8– Grafic cu coeficientul global de transfer de căldură pentru diferite orientări

4. PROCEDURĂ ENERGETICĂ CU APLICABILITATE PRACTICĂ

4.1 Construcția unei proceduri energetice cu aplicabilitate ușoară și practică de stabilire a factorilor intermediari din metodologia solară

Din capitolul 2 și studiul experimental de la capitolul 3, s-a ajuns la concluzia că se poate obține o formă simplificată de determinare al calculului solar din metodologia Mc001/2021 [36]. Pentru a se ajunge la această procedură simplificată a fost necesar să se folosească formulele din metodologie pentru studii de caz ce au vizat analiza comportamentului fiecărui termen din formulele prezentate la capitolul 2.

4.1.1 Etape anterioare construcției procedurii energetice

Astfel, pentru a se ajunge la varianta optimă de construcție a modelului de calcul simplu și eficient, ce îmbunătățește informațiile din metodologie [36], în 2019 au fost efectuate diferite cercetări intermediare.

Astfel a fost considerat un consumator, reprezentând 80 de apartamente ce formează o clădire rezidențială. Pentru calculul H al acestui imobil s-a efectuat următorul scenariu (cu ipoteze de calcul):

- Fiecare apartament gazduiește în medie 2,5 persoane;
- Fiecare persoană are un consum de 72 l de apă caldă pe zi;
- Rezultă un consum mediu de 180 l/ zi pentru fiecare apartament;
- Ceea ce determină un $H_{acm} = 689 \text{ W/K}$ pentru tot imobilul;
- $H_{inc} = 16000 \text{ W/K}$ s-a determinat estimând un necesar termic de încălzire; pentru fiecare apartament corespunzător unui $Q = 7000 \text{ W}$.

Pentru această instalație de încălzire a fost prevăzut un sistem de schimb de căldură pentru circuitul primar al panourilor solare cu boiler . Acesta e caracterizat de un $k_s = 600 \text{ W/m}^2\text{K}$ și a fost introdus volumul de acumulare sub forma unui raport, la suprafața de captare, $V_a = V/S_C = 50 \text{ l/m}^2$.

Pentru a se obține rezultate concludente la nivel de țară, s-au ales 79 de orașe pentru care s-au efectuat calculele lunare/ anuale. Datorită faptului că în România nu exista decât o bază de date restrânsă pentru valorile climatice de temperaturi și intensități ale radiației solare, a fost necesar să se construiască o bază de date. Acestea au fost determinate cu relațiile de calcul (25) și (26).

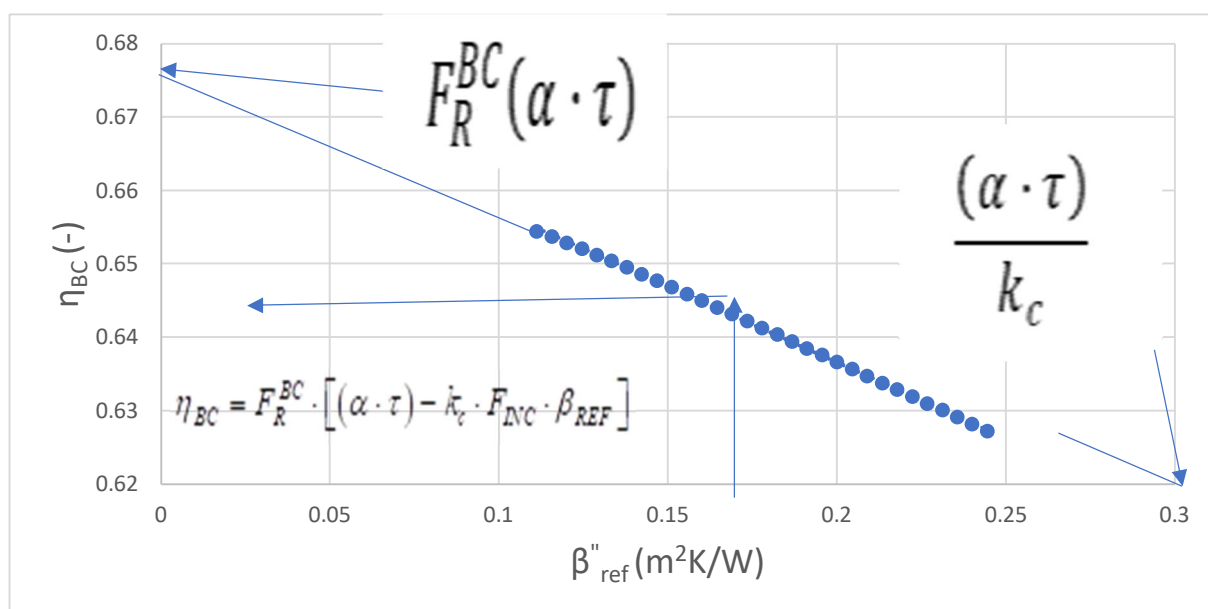
$$t_0 = \frac{\frac{1}{d_1} \cdot t_1 + \frac{1}{d_2} \cdot t_2 + \frac{1}{d_3} \cdot t_3}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (25)$$

$$I_0 = \frac{\frac{1}{d_1} \cdot I_1 + \frac{1}{d_2} \cdot I_2 + \frac{1}{d_3} \cdot I_3}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (26)$$

Orașele României

Chiar

- 100 000-150 000 loc.
- 150 000-200 000 loc.
- 200 000-300 000 loc.
- 300 000-500 000 loc.
- 500 000-1 000 000 loc.
- 1 000 000-1 500 000 loc.
- 1 500 000-2 000 000 loc.
- 2 000 000-3 000 000 loc.
- 3 000 000-4 000 000 loc.
- 4 000 000-5 000 000 loc.
- 5 000 000-6 000 000 loc.
- 6 000 000-7 000 000 loc.
- 7 000 000-8 000 000 loc.
- 8 000 000-9 000 000 loc.
- 9 000 000-10 000 000 loc.
- 10 000 000-11 000 000 loc.
- 11 000 000-12 000 000 loc.
- 12 000 000-13 000 000 loc.
- 13 000 000-14 000 000 loc.
- 14 000 000-15 000 000 loc.
- 15 000 000-16 000 000 loc.
- 16 000 000-17 000 000 loc.
- 17 000 000-18 000 000 loc.
- 18 000 000-19 000 000 loc.
- 19 000 000-20 000 000 loc.
- 20 000 000-21 000 000 loc.
- 21 000 000-22 000 000 loc.
- 22 000 000-23 000 000 loc.
- 23 000 000-24 000 000 loc.
- 24 000 000-25 000 000 loc.
- 25 000 000-26 000 000 loc.
- 26 000 000-27 000 000 loc.
- 27 000 000-28 000 000 loc.
- 28 000 000-29 000 000 loc.
- 29 000 000-30 000 000 loc.
- 30 000 000-31 000 000 loc.
- 31 000 000-32 000 000 loc.
- 32 000 000-33 000 000 loc.
- 33 000 000-34 000 000 loc.
- 34 000 000-35 000 000 loc.
- 35 000 000-36 000 000 loc.
- 36 000 000-37 000 000 loc.
- 37 000 000-38 000 000 loc.
- 38 000 000-39 000 000 loc.
- 39 000 000-40 000 000 loc.
- 40 000 000-41 000 000 loc.
- 41 000 000-42 000 000 loc.
- 42 000 000-43 000 000 loc.
- 43 000 000-44 000 000 loc.
- 44 000 000-45 000 000 loc.
- 45 000 000-46 000 000 loc.
- 46 000 000-47 000 000 loc.
- 47 000 000-48 000 000 loc.
- 48 000 000-49 000 000 loc.
- 49 000 000-50 000 000 loc.
- 50 000 000-51 000 000 loc.
- 51 000 000-52 000 000 loc.
- 52 000 000-53 000 000 loc.
- 53 000 000-54 000 000 loc.
- 54 000 000-55 000 000 loc.
- 55 000 000-56 000 000 loc.
- 56 000 000-57 000 000 loc.
- 57 000 000-58 000 000 loc.
- 58 000 000-59 000 000 loc.
- 59 000 000-60 000 000 loc.
- 60 000 000-61 000 000 loc.
- 61 000 000-62 000 000 loc.
- 62 000 000-63 000 000 loc.
- 63 000 000-64 000 000 loc.
- 64 000 000-65 000 000 loc.
- 65 000 000-66 000 000 loc.
- 66 000 000-67 000 000 loc.
- 67 000 000-68 000 000 loc.
- 68 000 000-69 000 000 loc.
- 69 000 000-70 000 000 loc.
- 70 000 000-71 000 000 loc.
- 71 000 000-72 000 000 loc.
- 72 000 000-73 000 000 loc.
- 73 000 000-74 000 000 loc.
- 74 000 000-75 000 000 loc.
- 75 000 000-76 000 000 loc.
- 76 000 000-77 000 000 loc.
- 77 000 000-78 000 000 loc.
- 78 000 000-79 000 000 loc.
- 79 000 000-80 000 000 loc.
- 80 000 000-81 000 000 loc.
- 81 000 000-82 000 000 loc.
- 82 000 000-83 000 000 loc.
- 83 000 000-84 000 000 loc.
- 84 000 000-85 000 000 loc.
- 85 000 000-86 000 000 loc.
- 86 000 000-87 000 000 loc.
- 87 000 000-88 000 000 loc.
- 88 000 000-89 000 000 loc.
- 89 000 000-90 000 000 loc.
- 90 000 000-91 000 000 loc.
- 91 000 000-92 000 000 loc.
- 92 000 000-93 000 000 loc.
- 93 000 000-94 000 000 loc.
- 94 000 000-95 000 000 loc.
- 95 000 000-96 000 000 loc.
- 96 000 000-97 000 000 loc.
- 97 000 000-98 000 000 loc.
- 98 000 000-99 000 000 loc.
- 99 000 000-100 000 000 loc.
- 100 000 000-101 000 000 loc.
- 101 000 000-102 000 000 loc.
- 102 000 000-103 000 000 loc.
- 103 000 000-104 000 000 loc.
- 104 000 000-105 000 000 loc.
- 105 000 000-106 000 000 loc.
- 106 000 000-107 000 000 loc.
- 107 000 000-108 000 000 loc.
- 108 000 000-109 000 000 loc.
- 109 000 000-110 000 000 loc.
- 110 000 000-111 000 000 loc.
- 111 000 000-112 000 000 loc.
- 112 000 000-113 000 000 loc.
- 113 000 000-114 000 000 loc.
- 114 000 000-115 000 000 loc.
- 115 000 000-116 000 000 loc.
- 116 000 000-117 000 000 loc.
- 117 000 000-118 000 000 loc.
- 118 000 000-119 000 000 loc.
- 119 000 000-120 000 000 loc.
- 120 000 000-121 000 000 loc.
- 121 000 000-122 000 000 loc.
- 122 000 000-123 000 000 loc.
- 123 000 000-124 000 000 loc.
- 124 000 000-125 000 000 loc.
- 125 000 000-126 000 000 loc.
- 126 000 000-127 000 000 loc.
- 127 000 000-128 000 000 loc.
- 128 000 000-129 000 000 loc.
- 129 000 000-130 000 000 loc.
- 130 000 000-131 000 000 loc.
- 131 000 000-132 000 000 loc.
- 132 000 000-133 000 000 loc.
- 133 000 000-134 000 000 loc.
- 134 000 000-135 000 000 loc.
- 135 000 000-136 000 000 loc.
-

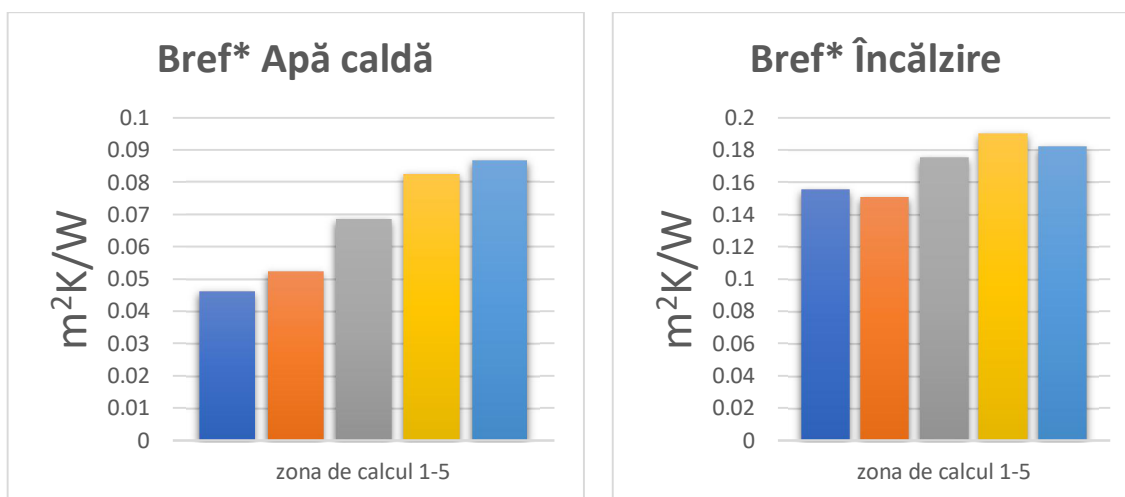


Această formă de reprezentare a caracteristicii sistemului solar utilizând pașii din metodologie, din Figura 10 are o formă asemănătoare cu a captatorului solar, întreg sistemul are un randament similar cu cel al captatorului solar. Diagrama din figura 10 se aseamănă cu reprezentarea caracteristicii termice a captatorului la capitolul experimental (Figura 3), reușind să reprezinte eficiența captatorului în funcție de datele climatice. Acest lucru are o deosebită importanță deoarece prin acest grafic se poate calcula RND și G_{AET} în funcție de temperatura exterioară și intensitatea medie a radiației termice, ce prin studiul anterior se observă că sunt cei doi parametri ce influențează calculul solar conform metodologiei folosite.

În figura 11, se observă că valoarea randamentului de captare este subunitară. Acest lucru se datorează faptului că acesta este determinat de doi factori subunitari, F_R^{BC} și randamentul optic ($\alpha\tau$). După cum se poate observa în această figură, valoarea maximă pe care o poate atinge η_{BC} este dată de produsul dintre F_R^{BC} și randamentul optic al panoului solar. Și această caracteristică de funcționare a sistemului de panouri solare a fost observată și discutată în capitolul de cercetări experimentale, de unde a fost observat faptul că acest η_{BC} maxim teoretic este aproape imposibil de atins în condiții de exploatare.

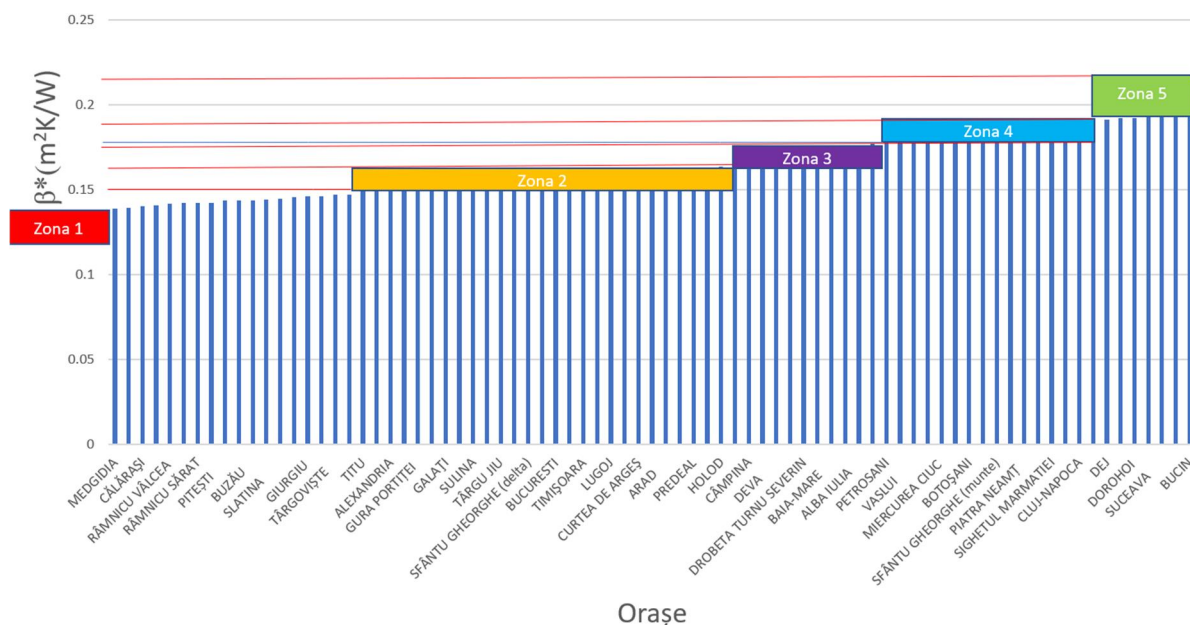
La fel cum a fost urmat exemplul din [14] la partea experimentală și s-au stabilit intersecțiile cu axele, în figura 10, se observă că pentru determinarea acestora, trebuie să se determine F_R^{bc} , k_c și $\alpha\tau$. Această diagramă centrală de calcul arată principalii factori ce trebuie determinați, pe lângă aceștia enumerați fiind și F_{inc} ce se poate observa din formula η_{BC} . Pentru aceasta, trebuie să se stabilească T_{tur0} , T_{ret0} și suprafața de captare.

Datorită faptului că zonele de calcul climatice au fost concepute pentru calculele de climatizare și iau în considerare doar temperatura exterioară de calcul, indicatorul β_{REF} este mult mai cuprinzător pentru aplicațiile solare. Pentru determinarea acestor zone de calcul, au fost folosite toate cele 79 de localități pentru care au fost făcute determinările precedente. Dacă se calculează atât β_{REF}^* pentru cele 79 de orașe și se folosesc zonele climatice pentru încălzire, se obțin:



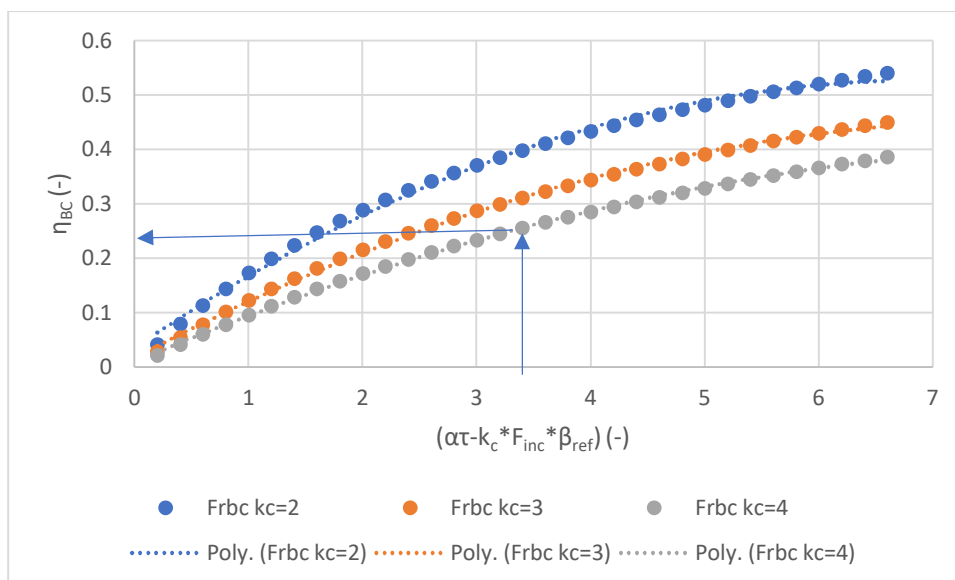
Figură 11 a,b- Prezentarea factorului β_{REF}^* pentru fiecare zona climatică "clasică"

Pentru a ușura calculele, există posibilitatea alegerii unui β_{REF}^* mediu zonal sau se poate citi de pe grafic valoarea specifică a acestuia pentru localitatea cea mai apropiată de obiectivul ales. Această valoare va fi introdusă ulterior în nomograme. Astfel, se determină indicatorul climatic β_{ref}^* introducând orașul în figura:



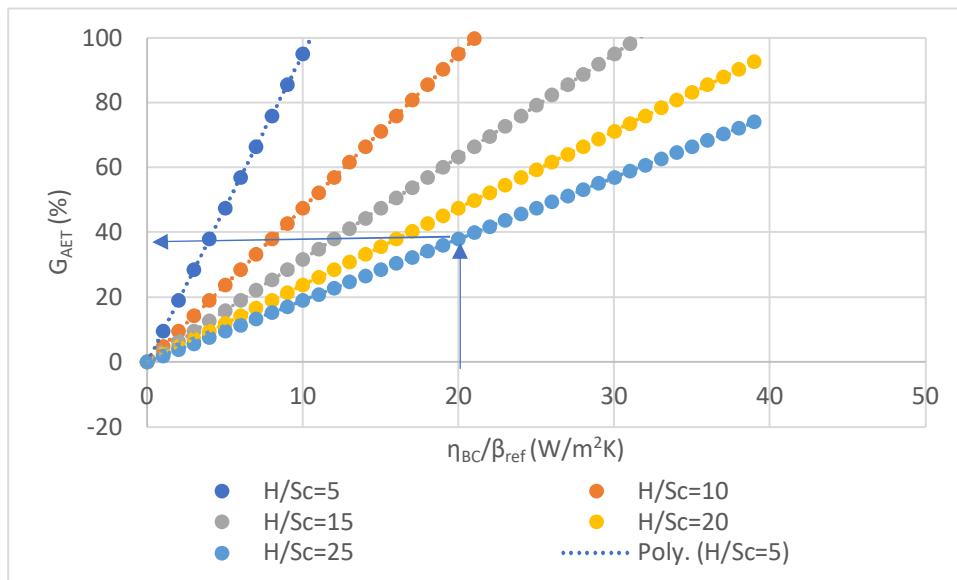
Figură 12- β_{ref}^* anual pentru zonele de calcul caz încălzire

Se poate calcula randamentul de captare al panourilor solare, alegând tipul de panou folosit, atât pentru cazul de încălzire prezentat în figura 13:



Figură 13- Diagramă de calcul pentru η_{BC} încălzire

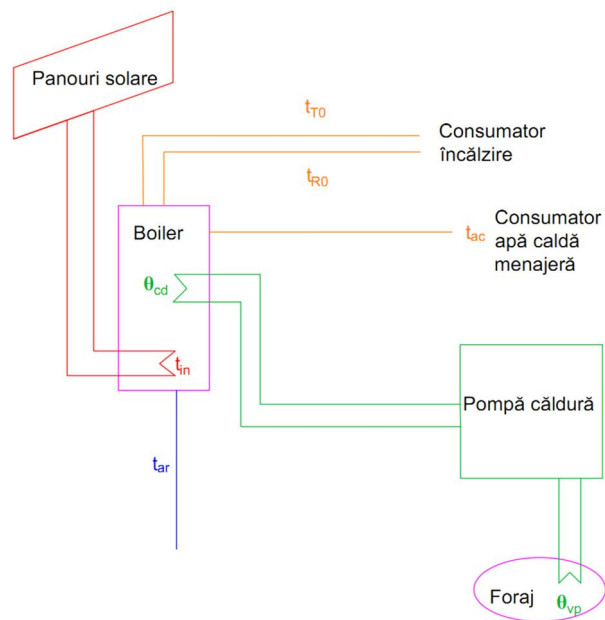
Apoi se calculează G_{aet} pentru cazul de încălzire, în funcție de raportul H/S_c ales (după alegerea factorului de utilizare) și intrând în figura 14 cu valoarea raportului η_{BC}/β_{inc} cunoscută din nomogramele prezentate în teză:



Figură 14- Diagramă de calcul pentru G_{aet}

4.1.3 Procedura energetică caracteristică României pentru pompe de căldură

Consumurile de energie lunare pentru situația de încălzire și preparare a apei calde menajere sunt suplinite de un al doilea sistem de pompe de căldură ce produce energie termică pentru a satisface nevoile consumatorului. Acesta folosește o pompă de căldură cu compresie mecanică ce utilizează agentul frigorific R410A. Pompa de căldură are condensatorul în rezervor și vaporizatorul într-un puț forat. În cadrul tezei, pompa de căldură este caracterizată de un consum de energie electrică și un COP lunar pentru sezonul rece. Aceasta a fost dimensionată pentru cea mai defavorabilă lună de calcul.



Figură 15- Schema de calcul a pompelor de căldură

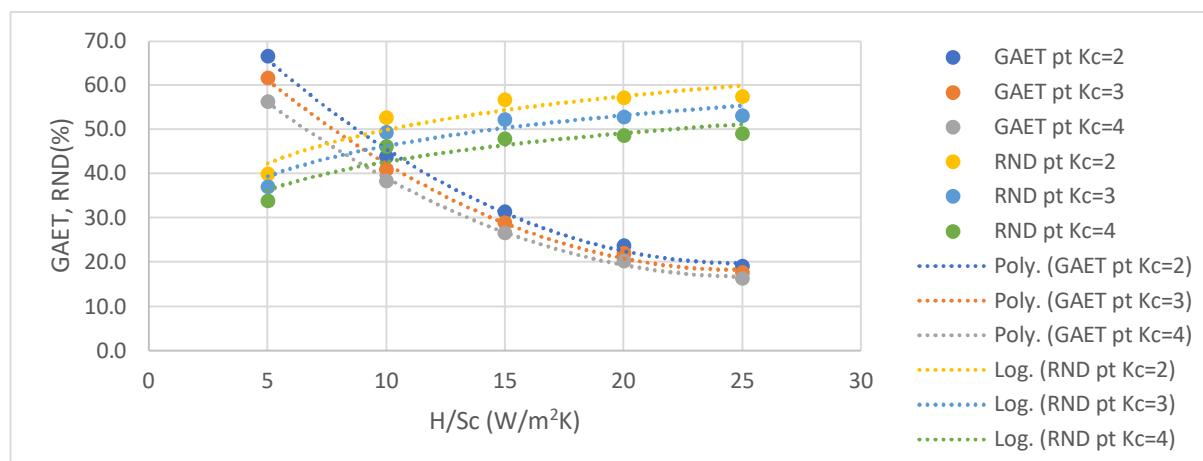
Pentru a calcula acești termeni trebuie stabilit ciclul carnot, din care rezultă eficiența izentropică și apoi rezultă eficiența efectivă. Totul pornește de la valorile de temperatură ale mediului cald (temperatura din puț) și rece (temperatura din rezervorul de acumulare). Astfel temperatura mediului rece (în care se dorește să se introducă căldura) determină temperatura de condensare. Integrând echipamentul (pompele de căldură) în cadrul sistemului folosit până acum, panourile solare reușesc să încălzească apa din rezervorul de acumulare până la o anumită temperatură ce poate fi estimată folosind gradul de acoperire termică. Pentru calculul acestei temperaturi interioare a rezervorului, în cazul de încălzire, t_{in} , este folosită formula:

$$t_{in} = t_{R0} + (t_{T0} - t_{R0}) \cdot (G_{aet}/100) \quad (27)$$

4.2 Rezultatele obținute în urma aplicării procedurii energetice

4.2.1 Rezultatele procedurii energetice pentru panourilor solare

Pentru completarea analizei în funcție de randamentul de captare la nivel de țară, urmează a fi determinată influența asupra indicatorului de performanță energetică cel mai important pentru panouri solare, gradul de acoperire energetică (G_{AET}), a variației celor doi parametri analizați anterior, tipul de captatori solari și mărimea suprafeței de captare. Acest studiu a fost realizat pentru fiecare dintre cele cinci zone de calcul solare caracteristice României, de exemplu pentru zona 1, pentru cazul de furnizare de agent termic pentru încălzire la temperaturile 50/30 °C:



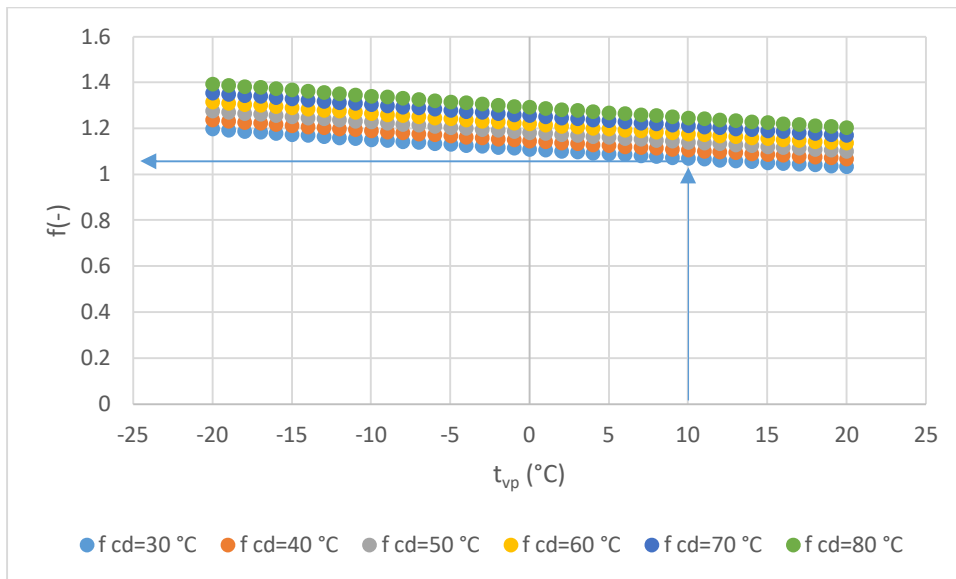
Figură 16- Gradul de acoperire și randamentul de captare pentru încălzire, zona 1 solară

4.2.2 Rezultatele procedurii de calcul energetice pentru pompele de căldură

Folosind o pompă de căldură apă-apă ce extrage căldura dintr-un puț forat la adâncimea pânzei freatice, se folosește ca ipoteză simplificatoare $t_{vp} = 10$ °C, fiind aproximativ constant pe tot anul. Temperatura de condensare, este media dintre temperatura de tur și temperatura din rezervor ce a fost calculată anterior.

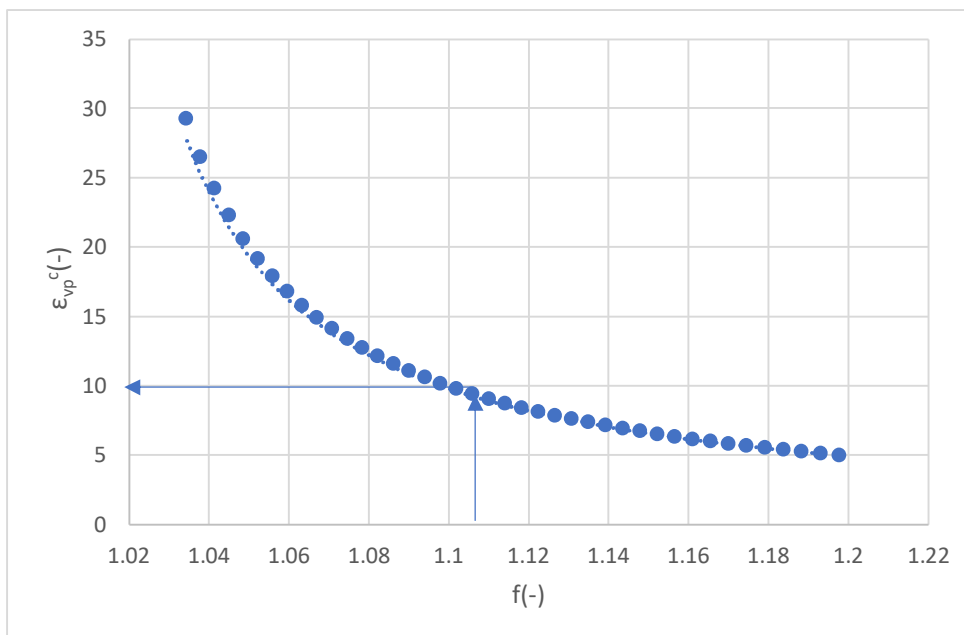
În acest caz, utilizând modalitatea de calcul descrisă în capitolul 4.1.3, se poate determina un domeniu de valori pentru raportul $f = T_{CD} / T_{VP}$ utilizând pompele de căldură pentru cel mai favorabil caz (panouri solare cu $k_c=2$, $H/S_c=5$ și $t_{tur}/t_{ret}=50/30$ °C

pentru zona 1 de calcul solară) și cel mai defavorabil caz (panouri solare cu $k_c=4$, $H/S_c=25$ și $t_{tur}/t_{ret}=90/70$ °C pentru zona 5 de calcul solară), celelalte valori posibile fiind plasate în acest domeniu, respectiv, 1,11...1,16. Astfel, se poate calcula f în funcție de t_{cd} și t_{vp} , după ce se face transformarea acestora în K:



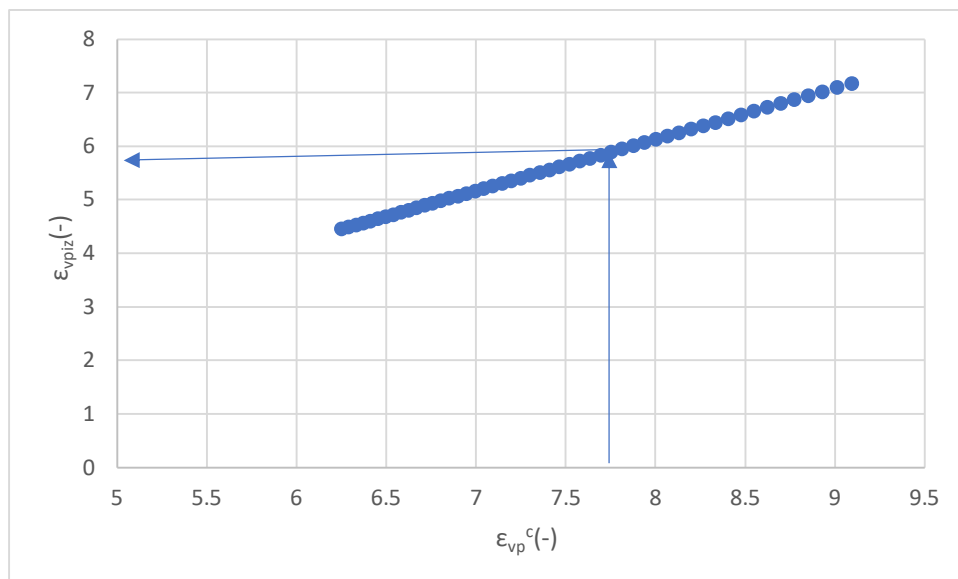
Figură 17- Eficiența izotropică (ε_{vpi}) în funcție de f

Astfel, se poate arăta variația eficienței izentropice $\varepsilon_{vpiz} = M^* \cdot \varepsilon_{vp}^c - N^*$ în funcție de $\varepsilon_{vp}^c = \frac{1}{f-1}$ (figura 19) ce depinde de acest factor f pe domeniul de valori stabilit (figura 18):



Figură 18- Eficiența carnot ε_{vp}^c în funcție de f

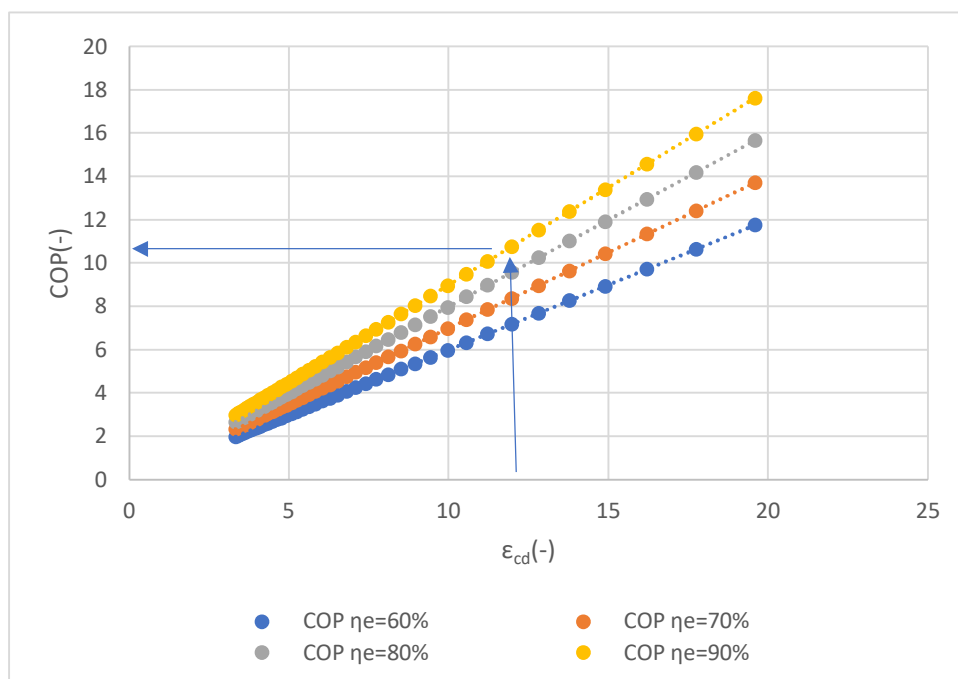
Din figura 19, folosind coeficienții M^* și N^* din tabel 1, rezultă eficiența izentropică în funcție de eficiența carnot:



Figură 19- Eficiența izentropică (ϵ_{vpi}) în funcție de ϵ_{vp}^c

Se observă că eficiența izentropică crește odată cu eficiența Carnot a mașinii frigorifice, fiind direct proporțională cu aceasta și cu COP-ul pompei de căldură.

Pentru a se calcula COP-ului pompei de căldură, în funcție de eficiența de condensare obținută, a fost realizat graficul din figura 20:



Figură 20- COP în funcție de ϵ_{cd}

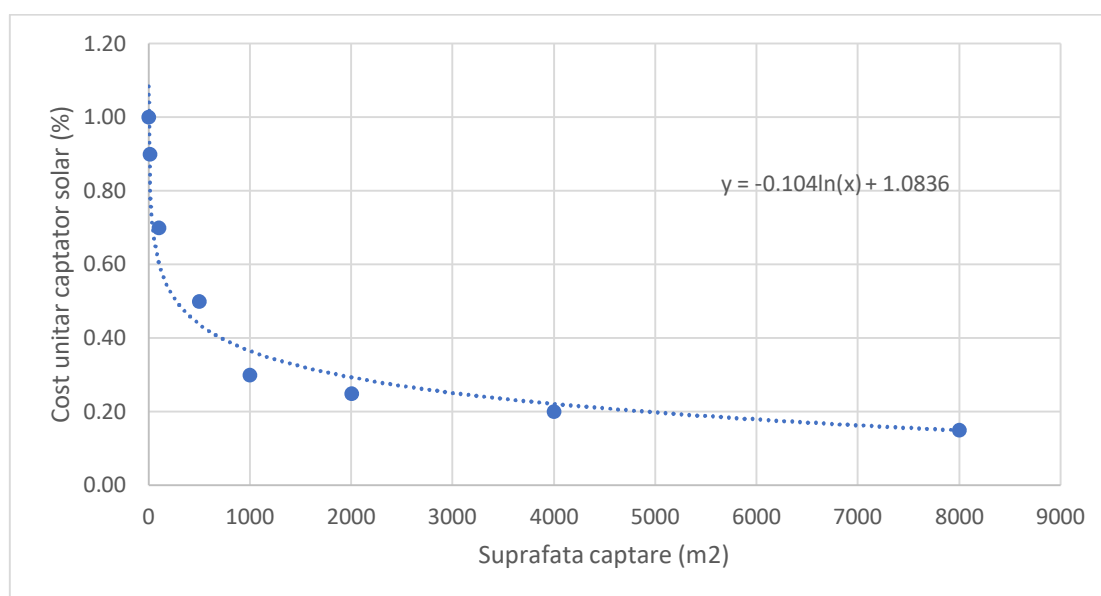
5. PROCEDURA ECONOMICĂ DE CALCUL

5.1 Construcția procedurii economice

Pentru a se justifica investiția în acest sistem ce folosește energii din resurse regenerabile, a fost realizată o analiză economică adaptată la cazurile energetice obținute în capitolul 4, bazată pe unele din formulele din metodologia de calcul MC001.

5.1.1 Etape anterioare de pregătire a construcției procedurii economice

În anul 2019, în cadrul tezei de doctorat, a fost realizat un calcul economic ce a aproximat un cost investițional inițial ce depinde neliniar de suprafața de captare. Datorită faptului că prețul per bucată al unui panou solar depinde de numărul de panouri achizitionate, situația reală este simulată printr-o reducere de preț în funcție de suprafața de captare prezentată în Figură 21.

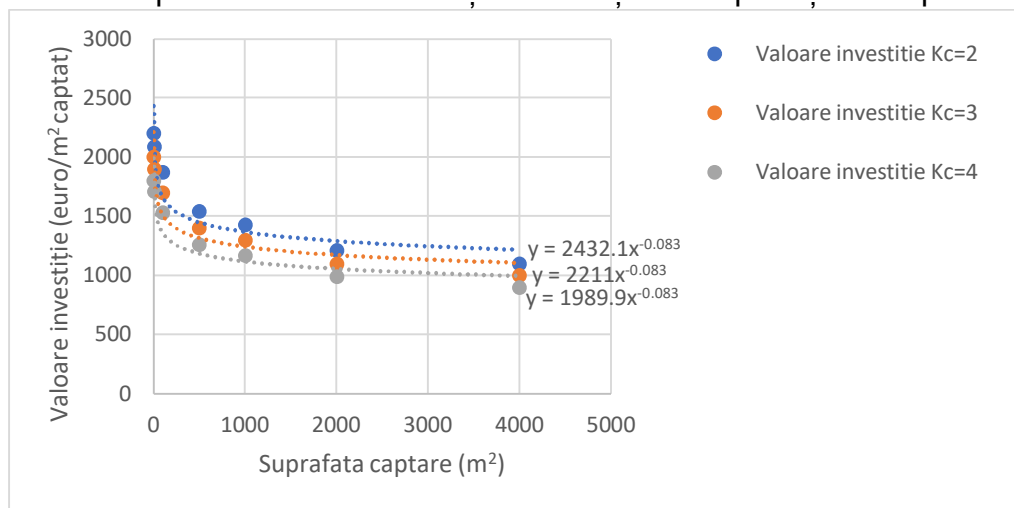


Figură 21- Dependenta prețului unitar al unui panou solar de numărul de panouri achiziționate

Costurile inițiale de investiție per bucată de la care s-au plecat pentru cele trei tipuri de panouri corespunzătoare $k_c = 2, 3$ și 4 au fost următoarele: 3000, 2000 și 1500 de euro (corespunzătoare achiziției unui singur produs). Acestea cuprind atât costul panoului solar, cât și manopera de montaj pentru panou (ce este fixă, reprezentând 800 de euro pentru fiecare panou și inclusă în suma totală prezentată anterior). Prețurile alese sunt prețuri medii alese pentru piața din România la momentul inițierii studiului. Durata estimată de viață a instalației solare este de 20 de ani. Costurile de mentenanță și întreținere au fost neglijate în acest calcul, fiind nesemnificative în raport cu valoarea investiției. Acest cost investițional s-a actualizat cu rata inflației de 7 % și rata creșterii energiei termice de 7 %. Astfel s-a obținut Valoarea Netă Actualizată a investiției. Pentru a calcula prețul per MWh s-a folosit ultimul plan de tarificare al RADET. S-a efectuat transformarea în euro la cursul BNR și astfel s-a obținut un preț de 126 euro pentru 1 MWh. Acest tarif a fost înmulțit cu valoarea anuală de energie utilizabilă, produsă de sistemul solar și s-a obținut valoarea anuală a economiei de căldură.

5.1.2 Procedura economică de calcul pentru panourile solare

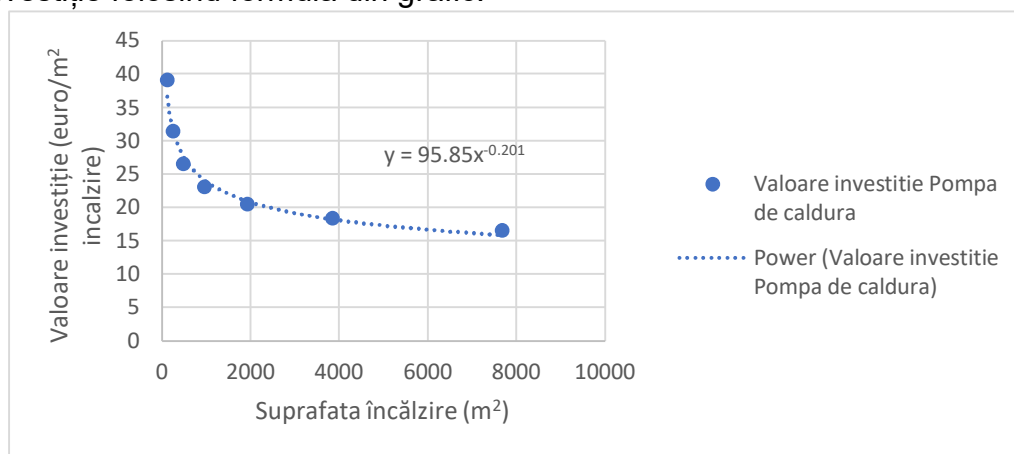
Modelul de calcul a fost îmbunătățit și actualizat cu tarifele de energie și prețurile din anul 2021 (deoarece în 2021 s-au înregistrat reduceri pe piața panourilor solare). Astfel coeficientul de reducere inclus în Figură 21 a fost integrat în ecuația corespunzătoare fiecărui tip de captator solar (cu un k_c de 2,3 și 4) rezultând graficul economic ce exprimă valoarea investiției în funcție de suprafața de captare:



Figură 22- Reducerea valorii de investiție odată cu creșterea suprafeței de captare achiziționate

5.1.3 Procedura economică de calcul pentru pompele de căldură

La construcția modelului pentru calculul economic al pompelor de căldură a fost determinat costul de investiție pentru pompele de căldură urmând graficul economic al pompelor de căldură cu foraj vertical ales (Figură 23). Acest cost a inclus costul pompei de căldură, al forajului geotermal, al serpentinei suplimentare pentru rezervorul de apă și al racordurilor suplimentare din camera tehnică. Astfel a fost determinat acest cost de investiție folosind formula din grafic:

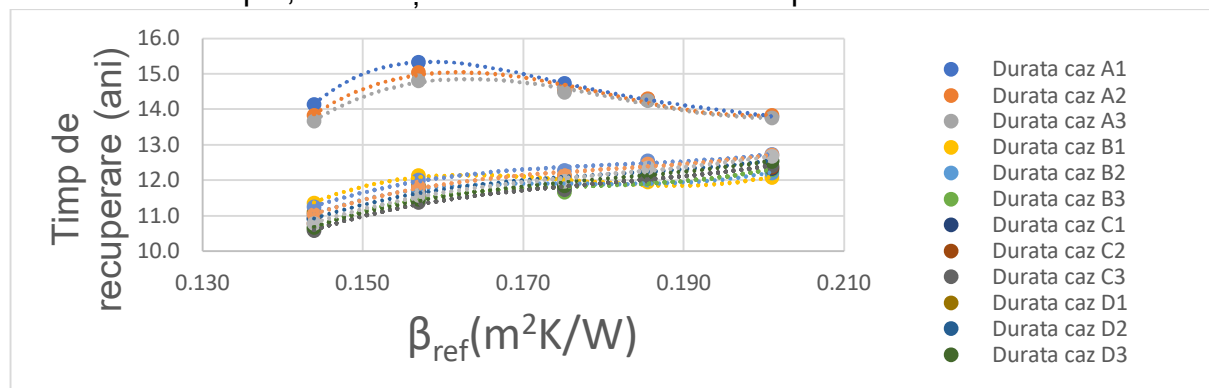


Figură 23- Reducerea valorii de investiție odată cu creșterea suprafeței de încălzire asigurată de PC

5.2 Rezultatele obținute aplicând procedura economică

5.2.1 Rezultatele obținute aplicând procedura economică pentru panourile solare

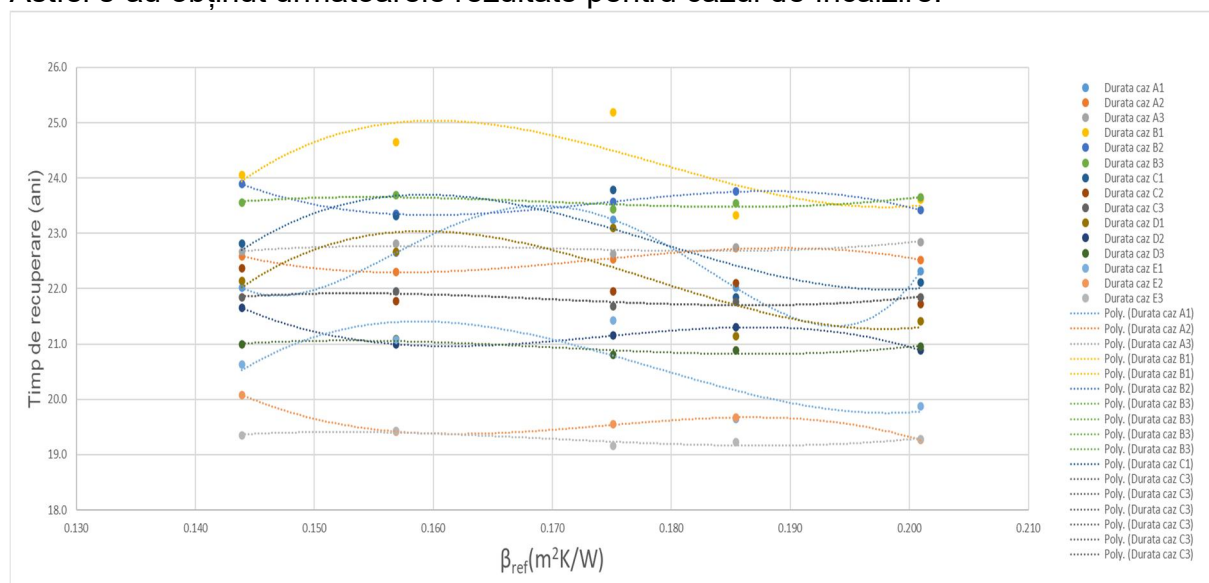
Folosind modelul economic descris la capitolul 5.1, au fost calculate mai multe cazuri pentru a reprezenta cea mai bună variantă de investiție exclusiv în panouri solare. De exemplu, s-au obținut următoarele rezultate pentru cazul de încălzire:



Figură 24- Grafic economic cu durata de recuperare a panourilor solare, caz de încălzire la $t_{To}/t_{Ro}=50/30\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.2.2 Rezultatele obținute aplicând procedura economică pentru pompele de căldură

Datorită faptului că o parte din energie este produsă de panourile solare și o parte de pompele de căldură, prin cazurile alese s-a dorit să se evidențieze ce procente corespunzătoare fiecărei instalații sunt mai bune pentru a se prepara agentul termic. Astfel s-au obținut următoarele rezultate pentru cazul de încălzire:



Figură 25- Grafic economic cu durata de recuperare a instalației complete, caz de încălzire la $t_{To}/t_{Ro}=50/30\text{ }^{\circ}\text{C}$

6. CONCLUZII, PERSPECTIVE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1 Concluzii

În cadrul tezei de doctorat, au fost integrate cercetările obținute în urma rapoartelor de cercetare ce au avut ca scop: studii documentare pe tematica aleasă, studii experimentale și teoretice pentru îndeplinirea scopului tezei, de a realiza un caracter practic și ușor de înțeles al metodologiei solare termice și de a adapta sistemul astfel încât ca acesta să includă pompele de căldură.

În studiul experimental, s-a prezentat o diferență a randamentului de captare în funcție de sistemul pe care este integrat (consumator), de către producător. Această caracteristică de funcționare diferă datorită regimului de funcționare al pompei panoului și al cărei influență este descrisă anterior. Având în vedere că panoul solar a fost testat în condiții reale, cu o mentenanță regulată, dar care a permis studierea unor condiții reale de utilizare ce a condus la reducerea factorilor optici, utilizând un agent termic anti-îngheț și un program de pornire și oprire a pompelor, colectorul solar a avut performanțe mai scăzute decât cele obținute de producător în condiții ideale (de laborator). Experimentările efectuate și-au îndeplinit obiectivul de a testa un panou solar în condiții reale de test. S-au determinat caracteristicile termice pentru captatorul solar, s-a observat o stratificare a temperaturilor în boiler și s-a simulat un consum reprezentat de o pompă de căldură prin care s-a efectuat descărcarea sarcinii termice și s-a observat modul de funcționare al acesteia.

Rezultatele identice obținute în urma cercetării validează noua metodă de calcul în cazul folosirii unor principii identice de calcul (același I mediu lunar), având ca avantaj simplificarea metodei existente. Prin modificarea intensității medii orare de calcul se generează noi posibilități de evaluare a randamentului orar real al instalațiilor solare. Astfel, se poate observa că deși randamentul orar real al instalației crește pe durata anului, randamentul orar al sistemului ce include nevoile de încălzire ale consumatorului scade datorită limitării energiei termice orare necesare. Aceste concluzii conferă o nouă viziune în ceea ce privește felul în care sunt tratate sistemele solare și sugerează anumite modificări ce trebuie făcute în dimensionarea sistemelor solare. Astfel, datorită unui aport termic considerabil mai mare pe o anumită perioadă a zilei, se concluzionează că aceste sisteme funcționează mult mai bine în cazul stocării suplimentare a acestei energii (rezervor de acumulare mai mare) sau prin introducerea unor temperaturi de reglaj mai mari (prin intermediul unor automatizări) în timpul acestui regim de încărcare solară.

În cadrul studiului energetic se concluzionează că pot exista configurații solare ce generează o economie de energie termică necesară încălzirii clădirilor rezidențiale de aproximativ 30-40% la nivel național în cazul instalării cu ușurință a acestor sisteme în majoritatea locuințelor. Această valoare este una considerabilă și poate conduce la o mai mare independență energetică a României. Pentru prepararea apei calde, sistemele de panouri solare pot asigura în întregime necesarul de energie termică, fiind mai eficiente și având condiții mai puțin restrictive decât în cazul încălzirii.

6.2 Perspective și recomandări

Randamentul acestor sisteme poate fi îmbunătățit prin unități de control ce fac o previziune a consumurilor și utilizează inteligent ciclurile de descărcare și încărcare ale rezervorului de acumulare.

Performanțele colectorului solar au fost puțin mai slabe decât cele date de producător și datorită faptului că azimutul panoului a avut o valoare diferită de 0. Se recomandă să se respecte orientarea dată de producător în fișele tehnice, dar în condiții reale aceasta nu poate aproape niciodată fi perfectă, față de punctele cardinale.

Valoarea optimă a înclinației panoului poate fi diferită de cea obținută de 30° în funcție de perioada de utilizare a anului. Se recomandă utilizarea unor valori a acestui unghi variabile pe tot parcursul anului. Acest lucru se poate realiza prin accesul la panou și integrarea unui suport ce permite acest lucru. Valorile de 45° sunt recomandate pe perioada de tranziție, și cele de 60 ° pentru perioada de iarnă. Suportul mobil presupune o investiție minimă ce are ca rezultat o îmbunătățire considerabilă, de peste 10-20% a performanțelor captatorului (așa cum reiese din studiul experimental).

6.3 Contribuții personale

În cadrul tezei de doctorat a fost realizată o metodă energetică și economică cu un caracter practic și ușor de înțeles aplicat metodologiei existente de solar termic din MC 001/2021 ce dezvoltă și particularizează relațiile de calcul din această metodologie. Prin studiile experimentale, s-a stabilit o expresie liniară a coeficientului global de transfer termic al captatorului solar, k_c și s-a observat ușoara alterare a caracteristicii termice a captatorului solar aflat în regim curent de exploatare, găsind cauza acesteia în alterarea coeficientului de transparență a elementului vitrat. Aceasta a condus la introducerea unei reduceri de 5% la valoarea randamentului optic declarat de producător pentru o acuratețe mai mare a calculelor din MC 001/2021. În urma experimentelor, a fost determinată caracteristica de funcționare a panoului solar și a fost comparată cu caracteristica de funcționare a sistemului, conform metodologiei, găsindu-se legătura dintre acestea.

Teza de doctorat a identificat setul de parametri ce trebuie controlați pentru obținerea unor rezultate energetice ce exprimă performanța captatoarelor solare în ceea ce privește încălzirea locuințelor și prepararea apei calde menajere. Aceștia sunt:

- k_c – coeficientul global de transfer termic al captatoarelor solare, W/m^2K ;
- $H/(k_c S_c)$ - raportul adimensional dintre transmitanța clădirii și indicatorii suprafeței de captare;
- T_{tur}/T_{retur} sau T_{ac} - temperaturile de reglaj termic, °C.

S-a arătat influența variației acestor indicatori de performanță pentru panourile solare și s-au determinat valorile optime pentru aceștia, corespunzător României pe baza cărora s-au efectuat determinările. S-au variat și temperaturile de reglaj termic,

raportul de acoperire solar (H/S_c) și tipul de captator solar (k_c), astfel încât studiile să conducă la generarea datelor necesare pentru realizarea unei hărți solare pentru țara noastră. A fost determinat un indicator climatic solar de calcul (β_{ref}) și optimizat (β_{ref}^*) pentru determinarea energetică și economică a sistemelor ce au în componență panouri solare și s-au introdus noi zone climatice solare de calcul. Aceste zone climatice solare au contribuit la introducerea unei noi metode de calcul grafică cu ușurință practică foarte mare, putându-se aproxima performanța solară doar evaluând graficul corespunzător zonei climatice solare în care este inclusă localitatea.

S-au simplificat formulele de calcul din metodologia energetică existentă și s-au obținut noi formule simplificate de calcul pentru cele mai întâlnite cazuri de sisteme din România ce au în componență panouri solare și pompe de căldură, proiectanții obținând direct gradele de acoperire solare, randamentele de captare, energia electrică a pompei de căldură.

S-a introdus o procedură nouă de calcul adițională calcului din solar din MC001/2021, folosind diagrame de calcul și obținând cu un grad mare de precizie gradul de acoperire solară și randamentul instalației solare. Această metodă poate fi folosită pentru orice configurație de calcul, iar pentru calculul pompelor de căldură au fost introduse anumite cazuri specifice ce ajută alegerea unei configurații solare și de pompe de căldură, făcând toate calculele energetice în doar câteva secunde. Metoda grafo-analitică pentru panouri solare, este foarte ușor de utilizat, se intră cu o anumită valoare în fiecare grafic, obținându-se o valoare pentru graficul următor, astfel, ajungându-se la rezultatul final ce constă în G_{aet} . În acest fel, a fost ușurată considerabil munca de proiectare și determinare rapidă a fezabilității energetice a acestor sisteme.

Prin introducerea graficelor de calcul din cadrul procedurii suplimentare energetice, s-a creat posibilitatea de a alege direct tipul de panou solar și de pompă de căldură folosit, prin compararea cu alte posibilități ce duc la obținerea altor rezultate energetice. Pentru pompele de căldură, s-a conceput o metoda grafo-analitică în care se intră cu o valoare într-o serie de grafice, ajungându-se din pas în pas la rezultatul final, ce constă în aflarea COP-ului pompei de căldură și apoi la determinarea energiei electrice consumate de pompa de căldură.

A fost concepută o procedură specifică de calcul economică, particularizată pentru panouri solare și pompe de căldură, având fundamentele în MC001/2021, dar abordând specific aceste sisteme și ușurând realizarea calculelor prin introducerea de noi formule și prin introducerea posibilității obținerii rezultatelor doar din formă grafică. S-a arătat eficiența economică a unui sistem ce folosește exclusiv energii regenerabile și s-au arătat posibilitățile de optimizare a acestuia, alegând inteligent raportul de producție dintre panouri solare și pompe de căldură. S-au întocmit nomograme economice ce indică cel mai bun raport panouri solare/ pompe de căldură. S-a efectuat o analiză economică ce completează analiza energetică la nivel de țară și indică timpii de recuperare ai investiției și costul specific pentru majoritatea orașelor din România, aflate în toate regiunile țării ce poate fi folosită pentru aprecierea rentabilității a acestor sisteme. Această analiză oferă direct posibilitatea dezvoltatorilor să aleagă un caz prestabilit și să obțină o estimare a recuperării investiției.

Referințe selective

- [1] Andrića, A. Pinaa, P. Ferrãoa, J. Fournierb., B. Lacarrièrec, O. Le Correc - Air-conditioning in residential buildings through absorption systems powered by solar collectors- function for a long-term district heat demand forecast, *Energy Procedia* 126:147-154, 2017
- [2] Babak Dehghan B - Performance assessment of ground source heat pump system integrated with micro gas turbine: Waste heat recovery, *Energy Conversion and Management* 152(2017):328-341, 2015
- [3] C.R. Lloyd, A.S.D. Kerr -Performance of commercially available solar and heat pump water heaters, *Energy Policy* 36(10):3807-3813, 2008
- [4] Caleb Rockenbaugh, Jesse Dean -High Performance Flat Plate Solar Thermal Collector Evaluation, 10.13140/RG.2.1.4966.6808, USA, 2016
- [5] Carsen J. Banister, Michael R. Collins -Development and performance of a dual tank solar-assisted heat pump system, *Applied Energy*, Volum 149, Pag. 125-132, 2015
- [6] Carsen J. Banister, William R. Wagar, Michael R. Collins -Validation of a single tank, multi-mode solar-assisted heat pump TRNSYS model, *Energy Procedia* Volum 48, Pag. 499-504, 2014
- [7] Călin Sebarchievici -Teza de doctorat: Optimizarea instalațiilor termice din clădiri în scopul reducerii consumului energetic și a emisiilor de CO₂ utilizând pompa de căldură cuplată la sol, 2013
- [8] D.B. Jania, Manish Mishrab, Pradeep Kumar Sahooc -A critical review on application of solar energy as renewable regeneration heat source in solid desiccant – vapor compression hybrid cooling system, *Journal of Building Engineering*, Volum 18, Pag. 107-124, 2018
- [9] Directiva europeana EU-28
- [10] Ehsan Khorasaninejad, Hassan Hajabdollahi -Thermo-economic and environmental optimization of solar assisted heat pump by using multi-objective particle swam algorithm, *Energy* Volume 72, Pag. 680-690, 2014
- [11] Evangelos Bellos, Christos Tzivanidis, - A Realistic Approach of the Maximum Work Extraction from Solar Thermal Collectors, Atena, Grecia, 2018
- [12] Federico Bava, Simon Furbo -Correction of collector efficiency depending on fluid type, flow rate and collector tilt, IEA-SHC TECH SHEET 45.A.1
- [13] Florin Iordache -Analiza energetică privind dimensionarea și evaluarea performanțelor energetice ale instalațiilor utilizând captatoare solare termice, *Revista română de inginerie civilă*, volumul 10, nr. 4, 2019

- [14] Florin Iordache- Modelarea funcționării echipamentelor și sistemelor termice aferente clădirilor, MatrixRom, 2021
- [15] Florin Iordache -Aspecte privind optimizarea constructiv-funcțională a unui sistem de pompe de căldură cu compresie (cu sursă de rezervă) pentru încălzirea unei clădiri rezidențiale sau prepararea apei calde de consum, Revista română de inginerie civilă, volumul 10, nr. 2, 2019
- [16] Florin Iordache -Aspecte termo-energetice în domeniul clădirilor și sistemelor de alimentare cu căldură al acestora, ed. MatrixRom, 2015
- [17] Florin Iordache, Bogdan Caracaleanu- Comportamentul dinamic al echipamentelor și sistemelor termice, Culegere de probleme rezolvate, ed. MatrixRom
- [18] Florin Iordache -Comportamentul dinamic al echipamentelor și sistemelor termice, ed. MatrixRom, 2008
- [19] Florin Iordache -Echipamente și sisteme termice, metode de evaluare energetică și funcțională, ed. MatrixRom 2017
- [20] Florin Iordache -Optimizarea sistemelor de utilizarea a energiei solare pentru încălzirea spațiilor și prepararea apei calde de consum în clădiri, Sisteme de utilizare a surselor regenerabile. Metode de evaluare energetică și dimensionare, 15-25, Matrixrom, București, 2018
- [21] Florin Iordache -Sisteme de utilizare a energiei solare termice pentru clădiri. Performanțe energetice, AIIR Brasov, 2018
- [22] Florin Iordache -Sisteme de utilizare a surselor regenerabile. Metode de evaluare energetică și dimensionare, Matrixrom, Romania, 2018
- [23] Florin Iordache -Utilizarea energiei solare pentru încălzirea spațiilor și prepararea apei calde de consum. Evaluarea performanțelor energetice, Sisteme de utilizare a surselor regenerabile. Metode de evaluare energetică și dimensionare, 1-14, Matrixrom, București, 2018
- [24] Florin Iordache, Alexandru Drăghici -Procedura de evaluare a indicatorilor de performanță pentru mașini sau pompe de căldură, Revista română de inginerie civilă, volumul 10, nr. 4, 2019
- [25] Florin Iordache, Alexandru Drăghici, Mugurel Tălpigă -Comportamentul termic dinamic al unei pompe de căldură funcționând între 2 rezervoare de acumulare, Revista română de inginerie civilă, volumul 10, nr. 4, 2019
- [26] Florin Iordache, Florin Băltărețu -Modelarea și simularea proceselor dinamice de transfer termic, ed. MatrixRom, 2002
- [27] Florin Iordache, **Horațiu Dragne** -Dynamic thermal modeling for a system that uses a compression heat pump, CLIMA 2016, 3, 87, 2016
- [28] Florin Iordache, **Horațiu Dragne** -Influența negativă a dezechilibrării hidraulice în câmpurile de captatoare solare asupra performanțelor energetice, AIIR Brasov, 2015

- [29] Florin Iordache, **Horațiu Dragne** -The negative influence of the hydraulic imbalance to the system performance in solar panels., Revista română de inginerie civilă 7(3): 187-198, 2016
- [30] Florin Iordache, Vlad Iordache -Captatoare solare plane cu absorbție. Randamente de captare-, ed. MatrixRom
- [31] **Horațiu Dragne**, Florin Iordache -Review of an innovative thermal and economic model of a thermal solar source, UTCB, 2019
- [32] **Horațiu Dragne** -Determinarea gradelor de acoperire ale instalațiilor solare pentru litoralul românesc, Lucrările Conferinței de Cercetare în Construcții, Economia Construcțiilor, Urbanism, Amenajarea Teritoriului: 191-196, 2019
- [33] **Horațiu Dragne**, Florin Iordache - Analiza energetică privind dimensionarea și evaluarea performanțelor energetice ale instalațiilor ce utilizează captatoare solare termice în România, Lucrările Conferinței de Cercetare în Construcții, Economia Construcțiilor, Urbanism, Amenajarea Teritoriului, 2020
- [34] John A. Duffie, William A. Beckman -Solar Engineering of Thermal Processes, 4th edition, Wiley and sons, 2013
- [35] MC 001/2006- Metodologie de Calcul privind performanța energetică
- [36] MC 001/2021- Metodologiei de calcul privind performanța energetică revizuită
- [37] Mihai Teodor -Teza de doctorat: Soluții de utilizare a surselor regenerabile pentru reducerea consumului de energie în clădiri, 2011
- [38] Muhammad Waseem Ahmada, Mahroo Eftekharia, Thomas Steffenb, Abdulhameed Mambo Danjumaa -Investigating the performance of a combined solar system with heat pump for houses, 2013
- [39] Natalia Burchiu, V. Burchiu, V. Dragan, I. Gheorghiu - Energiile regenerabile și utilizarea acestor, Atlas Press, 2012
- [40] Răzvan Mihai Zeghici -Teza de doctorat: Contribuții privind implementarea surselor neconvenționale în sistemele de alimentare cu energie a clădirilor și evaluarea performanțelor energetice, 2013
- [41] Saoussen Khalfallaoui, Dominique Seguin, Moulay Ahmed Abdelghani-Idrissi - Étude d'un système solaire thermique :Effet de l'orientation des panneaux solaires, Université de Rouen, Lucrare 62
- [42] Soteris Kalogirou -Solar energy engineering: processes and systems, Oxford, Marea Britanie, 2013
- [43] SR 1907-1:2014
- [44] SR 4839/2014- Instalații de încălzire, Numărul anual de grade-zile
- [45] SR EN 15316 / 6-6 - Performanța energetică a clădirilor - Metoda de calcul a performanței energetice a sistemului și a eficienței sistemului - Partea 6-6: Explicarea și justificarea EN 15316-4-3 Modulul M3-8-3 M8-8-3