



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII
BUCUREȘTI

Școala Doctorală

Facultatea de Inginerie a Instalațiilor

Departamentul de Termotehnică și Echipamente Termice

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

Aspecte Energetice

privind Microclimatul în Spații Protejate

Aplicații la Camerele de Calusare și Aclimatizare

Doctorand: Ing. Ionel Lucian DUMITRESCU

Conducător științific:

Conf.univ.dr.habil.ing. Adrian-Gabriel GHIAUȘ

BUCUREȘTI

2020

CUPRINSUL REZUMATULUI

1. Introducere	4
2. Conținutul tezei de doctorat.....	4
3. Aspecte energetice specifice spațiilor protejate	5
4. Bilanț energetic în spații de cultură protejate	7
5. Parametrii termofizici specifici camerelor de calusare	8
6. Analiza experimentală al proceselor din camerele de calusare	8
7. Rezultate, discuții și interpretări	10
7.1. Valorile parametrilor mășurați în <i>prima etapă</i>	10
7.2. Valorile parametrilor mășurați în <i>a doua etapă</i>	11
8. Modelarea numerică a proceselor din camerele de calusare	12
8.1. Rezultate, discuții și interpretări	13
8.2. Validarea modelului numeric.....	15
9. Concluzii.....	15
10. Contribuții personale și valorificarea rezultatelor	16
Bibliografie selectivă.....	17

1. Introducere

În spațiile de cultură protejate specializate pentru producerea de răsaduri, valorile paranelor ce caracterizează microclimatul din aceste incinte trebuie respectate cu precizie deoarece plantele tinere sunt vulnerabile la fluctuațiile neprevăzute ale acestora. Monitorizarea și predicția variației factorilor de microclimat asigură garanția dezvoltării optime și cu o rată de supraviețuire ridicată a răsadurilor.

Prezentul studiu are ca obiectiv principal analiza variației factorilor de microclimat în camerele de calusare și aclimatizare a răsadurilor de legume altoite, în timpul derulării fazei tehnologice specifice. *Calusarea* este denumirea procesului de vindecare a zonei în care au fost secționare cele două componente ale plantei altoite, respectiv altoiului și portaltoiul. Principalii parametri ai microclimatului care influențează dezvoltarea răsadurilor sunt umiditatea relativă, temperatura, intensitatea radiației luminoase, viteza curenților de aer și nivelul concentrației de CO₂.

2. Conținutul tezei de doctorat

În prima parte a studiului sunt prezentate cele mai importante noțiuni referitoare la cultura în spații protejate în general, cât și noțiuni referitoare la întreg procesul de altoire a răsadurilor de legume. Apoi este prezentată evoluția și stadiul actual al cercetărilor orientate către analiza influenței factorilor de microclimat asupra procesului de vindecare a răsadurilor altoite, a ratei de supraviețuire și a dezvoltării ulterioare a acestora. În continuare sunt evidențiate principalele aspecte energetice specifice spațiilor protejate de cultură și a proceselor termotehnice ce au loc în aceste spații dar și în camerele de calusare în perioada de vindecare a răsadurilor altoite sau în perioada de aclimatizare a acestora înainte de replantării lor în câmpurile de cultură. De asemenea sunt prezentați principalii parametri termofizici specifici camerelor de calusare, respectiv temperatura, umiditatea relativă, intensitatea radiației luminoase și concentrația bioxidului de carbon. Apoi este prezentat protocolul de cercetare pentru măsurarea variației principalilor factori de microclimat într-un tunel experimental de calusare. Urmează analiza și interpretarea rezultatelor acestor măsurători, efectuate în timpul procesului de calusare a unor răsaduri altoite. Următoarea etapă a cercetării, prezentată în lucrare, este aceea în care a fost propus un model de modelare numerică a proceselor termotehnice ce se produc în camerele de calusare și aclimatizare. În continuare, datele obținute prin modelare numerică au fost comparate cu cele obținute în urma măsurărilor experimentale în scopul validării modelului numeric propus. Această analiză arată că modelul numeric propus este validat. În concluzii se arată că, cu ajutorul unui astfel de model, validat, în funcție de condițiile de mediu exterior, de tipul de cultivar și de tipul de incintă, se poate interveni în timp real pentru ajustarea factorilor de microclimat, reducându-se decizia factorului uman care poate fi adesea întârziată

sau chiar eronată. Totodată este arătat faptul că, cu un astfel de model se pun bazele proiectării și dezvoltării unor incinte multifuncționale automatizate, incinte ce pot fi folosite fie pentru vindecarea plantelor altoite, fie pentru aclimatizarea răsadurilor înainte de plantare în câmp sau sere, fără a se interveni la soluția constructivă a incintei. În ultima parte a tezei sunt prezentate activitățile de diseminare a rezultatelor parțiale obținute de-a lungul desfășurării cercetării doctorale.

3. Aspecte energetice specifice spațiilor protejate

După prezentarea aspectelor teoretice referitoare la altoirea răsadurilor de legume și a unui overview asupra cercetărilor întreprinse pe plan mondial în direcția analizei microclimatului din spații protejate, sunt prezentate câteva aspecte energetice specifice spațiilor protejate destinate culturii legumelor. Microclimatul din seră este rezultatul schimburilor de căldură și de masă între straturile de aer și suprafețe solide (pereți, acoperiș, structuri diverse, frunzele culturilor), între diferitele straturi de aer, între aerul din interiorul și exteriorul serei. Mecanismele acestor transferuri de masă și căldură sunt conducția, convecția și radiația (Pieters and Deltour, 1997). În Figura 1 sunt prezentate schematic fluxurile de masă și căldură ce au loc între diferitele suprafețe din sere.

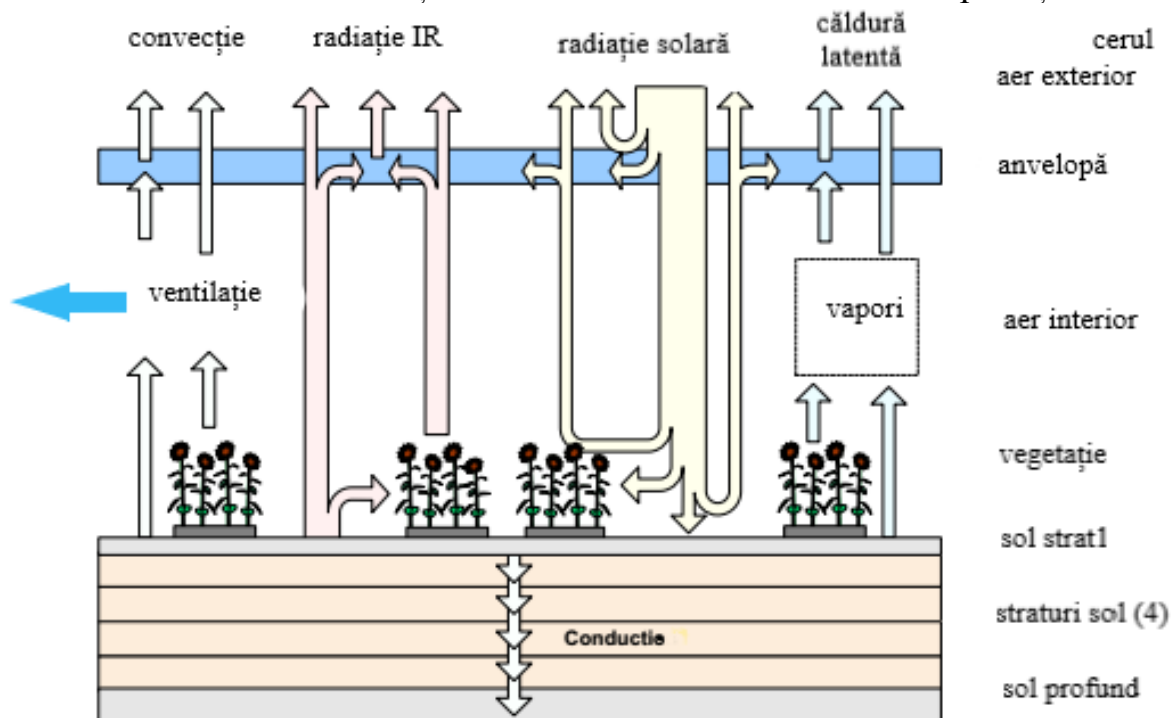


Fig. 1: Schimburile de căldură și masă ce se produc în sere

În analiza schimburilor energetice din sere se poate considera că există 7 straturi orizontale între care au loc aceste schimburi (vezi Figura 1). Deci microclimatul din seră este rezultatul schimburilor de căldură și de masă între aceste straturi. Interacțiunile dintre straturi includ transferuri de căldură prin

conducție, convecție, radiație solară și termică, precum și transferuri de masă prin căldură latentă. Schimburile de căldură ale aerului din incinta serei se produc prin convecție cu anvelopa serei, cu vegetația din seră, cu solul, cu sistemul de încălzire (dacă există) și prin schimbul cu aerul exterior prin difuzie și ventilație. Pentru o cultură, foarte importante sunt radiația solară, schimbul radiativ cu anvelopa, cu solul și cu instalațiile din seră, schimbul convectiv cu aerul din apropiere și schimbul de căldură latentă din timpul evapo-transpirației. Pentru sol, acumulările și pierderile de energie sunt prin absorbția radiației solare, schimbul radiativ cu anvelopa, cu cultura în sine și cu echipamentele din incinta serei, prin schimbul convectiv cu aerul din seră și prin schimbul conductiv cu straturile subterane ale solului. Ținând cont de complexitatea proceselor de transfer termic și de masă ce au loc în sere și solarii, analiza bilanțului energetic se poate face separat pentru sol, pentru cultură, pentru volumul aerului din interior și pentru anvelopă. În sere se întâlnesc două tipuri de suprafețe solide: pereții serei care sunt în general din folie de plastic și suprafața frunzelor culturii. În vecinătatea acestor suprafețe, fluxul de aer nu poate fi considerat ca având vâscozitate zero chiar dacă vitezele sunt apropiate de zero. Această vâscozitate generează un strat dinamic la zona de contact cu suprafețele solide, zonă în care impulsul este disipat prin frecare. Dacă există o diferență de temperatură între pereți sau frunze și aer, atunci se formează un strat limită termic care depinde esențial de stratul limită dinamic. În plus, dacă există o diferență de umiditate între pereți sau frunze și aerul din incintă, se formează un strat limită generat de această diferență de concentrație de vapori care se suprapune peste celelalte două straturi limită anterioare din imediata apropiere a peretelui sau a frunzelor. Definirea gradientilor de temperatură și de concentrație ajută la stabilirea cu exactitate a vitezei de transfer de căldură sau de masă între aer și frunze sau perete. Diferite formule de corelație sunt deduse din ecuațiile de curgere a fluidului, adaptate pentru a fi luate în considerare condițiile de strat limită, cu ajutorul diferitelor criterii adimensionale (Schlichting, 1955). Aceste criterii adimensionale, sunt definite cu ajutorul condițiilor caracteristice de curgere. Prin urmare, macro-modelul este încă valabil pentru determinarea bilanțului energetic și de masă al pereților și frunzelor în domeniul de interes. Aceste formule însă nu sunt valabile pentru întreaga cultură din cauza interacțiunii dintre diferite straturi de aer pe verticală. Astfel, în 1993 Schuepp (Schuepp, 1993) arată că relațiile pentru fluxul laminar la suprafața frunzelor este valabil în situația în care stratul limită devine turbulent pe partea frunzei orientată spre sol. În cazul modelului numeric elaborat în lucrarea de față, mișcarea curenților de aer și distribuția temperaturii, umidității relative și a concentrației de CO_2 , este generată strict de gradientul de densitate pe verticală datorat transferului termic prin convecție liberă, de la suprafața inferioară a camerei de calusare la aerul din interiorul camerei. Suprafața predominantă de captare a radiației solare este suprafața inferioară a incintei (cea cu tăvile alveolare cu răsaduri și cea liberă dintre tăvi) și s-a considerat că aceasta este singura suprafață de captare a radiației solare, pereții având ca condiție la

limită flux termic convectiv determinat pe baza diferențelor de temperatură dintre interior și exterior.

4. Bilanț energetic în spații de cultură protejate

Procesele termofizice ce au loc în spațiile protejate de cultură sunt într-un echilibru energetic cu mediul exterior și interior sereilor. Fernandez (Fernandez and Bailey, 1992) propune pentru bilanțul energetic din sere următoarea ecuație:

$$\dot{Q}_i + \dot{Q}_s = \dot{Q}_v + \dot{Q}_e + \dot{Q}_{anv} + \dot{Q}_{stoc} \quad (1)$$

unde $\dot{Q}_i$ este energia produsă de sistemul de încălzire suplimentară al serei, $\dot{Q}_s$ este energia radiației solare, $\dot{Q}_v$ este energia pierdută prin ventilație, $\dot{Q}_e$ este energia pierdută prin neetanșeități, $\dot{Q}_{anv}$ este energia pierdută prin transfer de căldură prin anvelopă iar $\dot{Q}_{stoc}$ este energia stocată în diversele elemente componente ale serei, toate exprimate în W. Hanan consideră că, cantitatea de energie solară utilizată în procesul de morfogeneză este minimă și poate fi neglijată în analiza bilanțului energetic (Hanan, 1998) și că majoritatea transferurilor de energie sunt legate de transformarea apei din stare lichidă în vapori și invers. O mare cantitate de energie este absorbită de sol pe care apoi o transmite către plante și către celelalte elemente din seră. Același lucru îl fac fiecare dintre celelalte elemente, respectiv plantele absorb energie pe care apoi o transferă prin radiații IR către sol și către elementele constructive, către anvelopă. Plantele mai pierd energie prin evapotranspirație. Aerul face schimb energetic cu toate elementele din seră iar anvelopa absoarbe o mare cantitate din energia solară, o parte o retransmite în atmosferă și o parte în interiorul serei.

Fluxurile energetice ale unei camere de calusare expusă radiației solare în interiorul unei sere sunt prezentate schematic în Figura 2 (Miles et al., 2016).

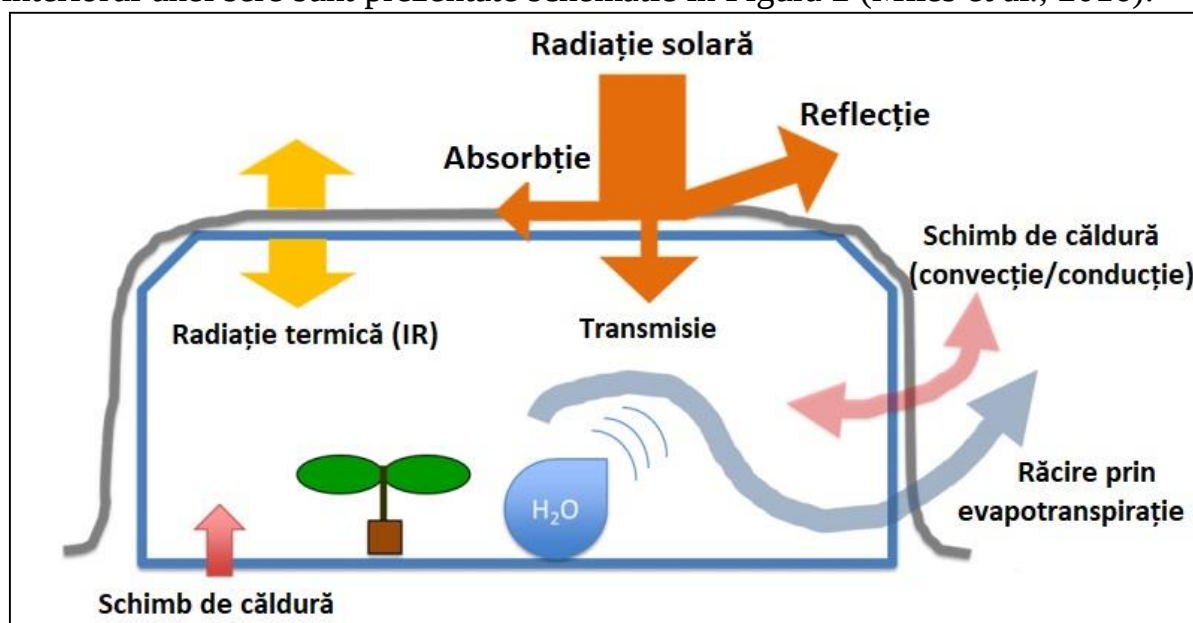


Fig. 2: Fluxuri energetice într-o cameră de calusare tip tunel, (Miles, 2016)

5. Parametrii termofizici specifici camerelor de calusare

Principalii factori ce caracterizează microclimatul din incintele de cultură protejate sunt: temperatura, umiditatea relativă, intensitatea radiației luminoase și concentrația de CO₂. Diferențele dintre valorile parametrilor ce definesc microclimatul din interiorul și exteriorul spațiilor protejate de cultură a legumelor sunt generate, în principal, de următoarele 4 elemente (Popovski, 1997): 1. *radiația solară*: principala componentă a acesteia este radiația UV care poate traversa anvelopa aproape fără nici o pierdere; această radiație se reflectă de plante și diversele echipamente din incinte și doar o parte din ele pot traversa înapoi anvelopa, restul rămânând în interiorul incintei determinând creșterea temperaturii; 2. *ventilația*: viteza aerului din spațiile protejate este mult mai mică decât cea din exteriorul acestora, fenomenul de transfer de căldură fiind diferit între cele două medii; 3. *densitatea plantelor*: influențează semnificativ umiditatea relativă și concentrația de CO₂ din incinte, procesul de transfer de masă fiind diferit în cele două medii; 4. *prezența unor sisteme de încălzire*: acestea pot modifica unele dintre caracteristicile energetice ale microclimatului din interiorul camerelor. Valorile recomandate pentru parametrii microclimatici în camerele de calusare sunt : temperaturile în perioada post altoire trebuie să aibă valori de 23°C/20°C (zi/noapte) sau 25°C/18°C (zi/noapte), valori ale temperaturilor de 30°C/15°C (zi/noapte) sunt considerate mari respectiv joase pentru procesul de calusare; este recomandat ca într-o incintă de calusare și aclimatizare concentrația; nivelurile de umiditate ideale se situează între 70% și 90% în perioada de calusare funcție de cultivar; intensitatea radiației luminoase trebuie să aibă o densitate a fluxului de fotoni fotosintetici activi (*PPFD*) este în intervalul 400 și 700 μmol/(m²·s); concentrația de CO₂ trebuie să depășească 900 ppm valoare la care inhibarea procesului de fotosinteză de către O₂ este anulată.

6. Analiza experimentală al proceselor din camerele de calusare

Pentru evaluarea diferiților parametri de microclimat în perioada de calusare a răsadurilor și pentru identificarea condițiilor optime de microclimat dar și a strategiilor de management a acestora, în perioada stagiului doctoral, s-au efectuat două etape de măsurători, prima etapă în perioada 13-19 mai 2018 iar a doua etapă în perioada 17-22 mai 2019, în incinta microserei de cercetare a Institutului HORTING, într-un tunel de calusare experimental format din mai multe tronsoane cu dimensiunile L=1,8 m, l= 1,5 m și h=1,0 m .

În prima etapă au fost efectuate măsurători în 4 tronsoane independente. În fiecare din cele 4 compartimente au fost așezate câte 9 paleți alveolari ce au câte 104 de locașuri pentru cuburile nutritive. În această etapă s-a optat pentru varierea densității plantelor în fiecare compartiment respectiv 347 răsaduri/m², 173 răsaduri/m², 83 răsaduri/m² și 37 răsaduri/m². Pe parcursul derulării experimentărilor s-au făcut măsurători ale principalilor factori de microclimat respectiv temperatura, umiditatea relativă, intensitatea radiației luminoase și

concentrația de CO₂, în exteriorul microserei, în interiorul microserei și în interiorul fiecărui tronson de calusare. Pentru măsurători s-au folosit următoarele aparate de măsură: pentru măsurarea umidității relative s-au utilizat USB-DataLoggers MicroLite; pentru măsurarea concentrației de CO₂ s-a folosit un analizor portabil Testo 535, măsurătorile făcându-se la 1 oră după răsăritul soarelui, la amiază (ora 13:00) și la 1 oră înainte de apusul soarelui; pentru măsurarea intensității radiației luminoase s-a utilizat un fotoradiometru model HD 2102.2 DataLogger + sonda LP 471 PAR; pentru măsurarea intensității radiației solare în exteriorul și în interiorul microserei s-a utilizat un aparat de măsură multifuncțional LM-8102

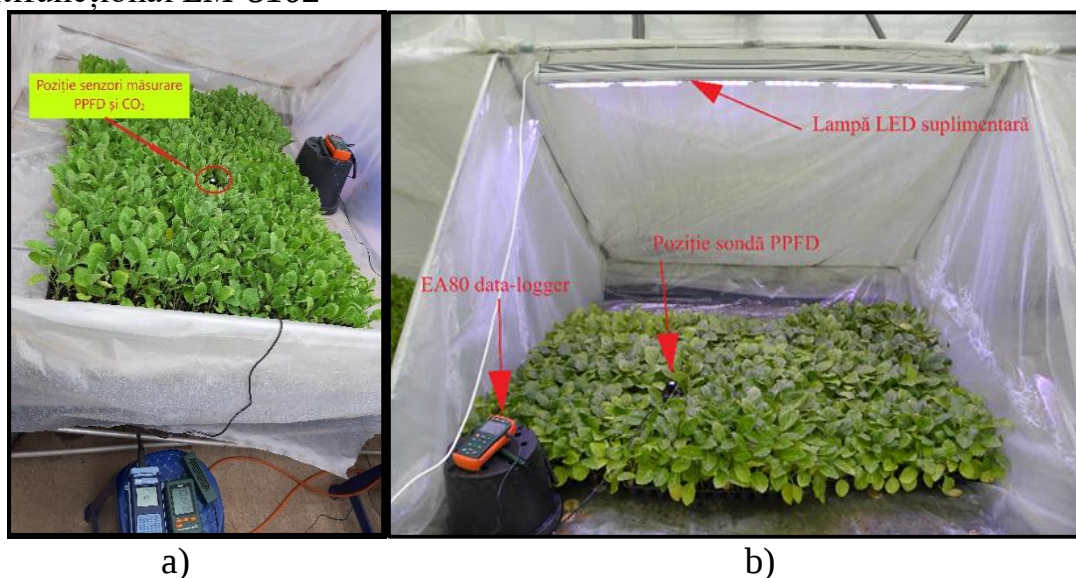


Fig. 3: poziționarea senzorilor: a) pt. prima etapă a măsurătorilor; b) pt. etapa a 2-a

În a doua etapă au fost efectuate măsurători experimentale în aceeași locație însă de data aceasta au fost folosite două tronsoane ale tunelului de calusare experimental. În fiecare compartiment au fost așezați paleți alveolari cu răsaduri densitatea acestora fiind de 347 plante/m². Diferența dintre cele două sesiuni de măsurători este că, în această etapă, în unul dintre tronsoane, în partea superioară a acestuia, a fost montat un element de iluminare suplimentară tip LED cu următoarele caracteristici: LED-uri albe ce emit un flux luminos de 4000 K, LED-uri albastre ce emit în lungimea de undă $\lambda = 460$ nm și LED-uri roșii cu $\lambda = 660$ nm. Lampa cu LED-uri pentru iluminare suplimentară a fost programată să funcționeze zilnic între 04:20 și 20:20, adică să se aprindă cu o oră înainte de răsăritul soarelui și să se stingă la circa o oră după apusul soarelui. Pentru măsurători s-au folosit următoarele aparate: data-loggers model EA80 pentru măsurarea concentrației de CO₂, a temperaturii și a umidității relative în cele două tronsoane; data-logger model SD800 pentru măsurarea concentrației de CO₂, a temperaturii și a umidității relative în microseră; data-logger model LP471 + sondă PAR-LP pentru măsurarea intensității radiației luminoase în interiorul tronsoanelor; stație meteo VantagePRO2 Plus cu care s-a măsurat temperatura, umiditatea relativă și intensitatea radiațiilor solare în afara serei.

7. Rezultate, discuții și interpretări

7.1. Valorile parametrilor măsurați în prima etapă au fost analizate și interpretate. Modul de variație a acestora ajută la stabilirea unor strategii de management a microclimatului în spațiile de calusare. Valorile temperaturii și umidității relative sunt prezentate grafic în Figura 4 și în Figura 5.

Se observă că temperaturile în cele 4 tronsoane cât și din interiorul microserii au aceeași alură cu variația temperaturii externe. Din punct de vedere al proceselor termodinamice acest lucru era de așteptat. Din punct de vedere al managementului factorilor de microclimat din microseră și din tunelurile de calusare, se observă inexistența unui sistem eficient de monitorizare și corecție a influenței condițiilor de microclimat din mediul extern asupra temperaturilor din tunelurile de calusare.

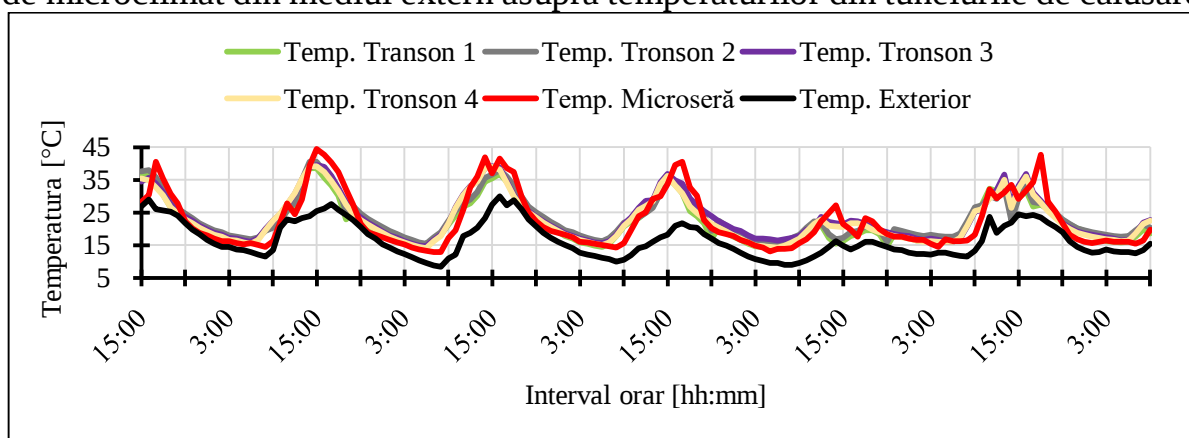


Fig. 4: Variația temperaturii în cele 4 tronsoane, în microseră și în exterior

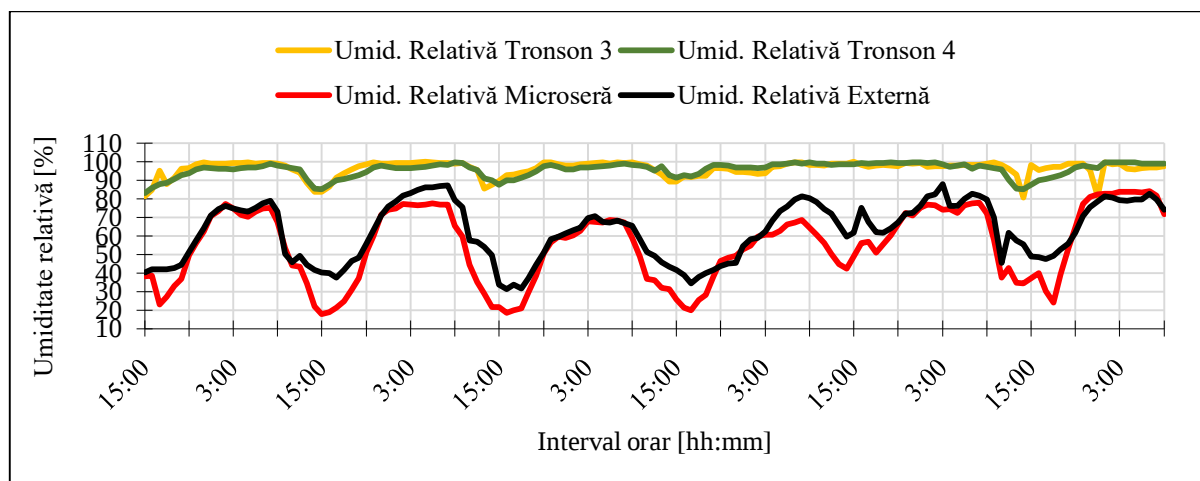


Fig. 5: Variația umidității relative în tronsoane, microseră și exterior

În Figura 6 se observă că variația temperaturii din microseră și din mediul extern nu influențează semnificativ umiditatea relativă din incintele de calusare. Variația umidității relative în incintele de calusare sunt datorate în special procesului de evapotranspirație ce are loc în timpul fotosintezei.

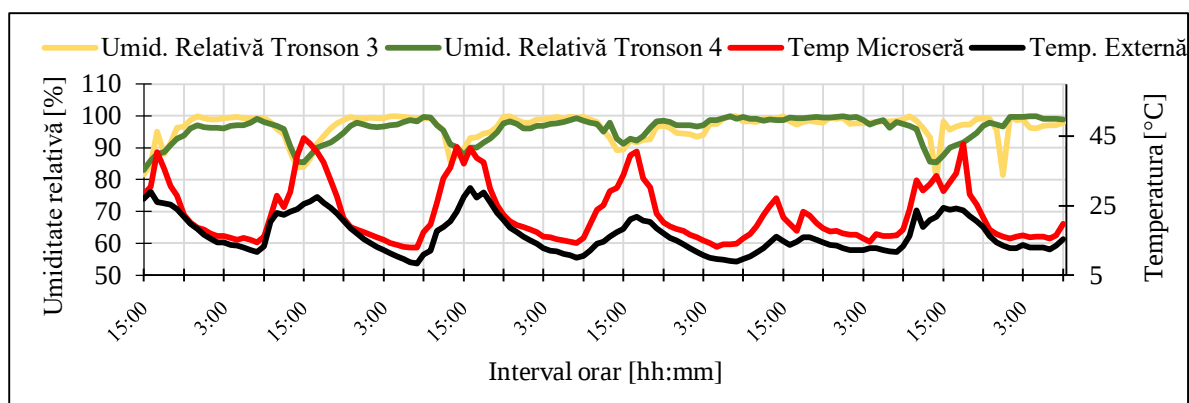


Fig. 6: Variația umidității relative în tronsoanele 3 și 4, a temperaturii din microseră și a temperaturii externe

Intensitatea radiației luminoase influențează în mod direct procesul de fotosinteză și deci are influență asupra concentrației de CO_2 . În Figura 7 se observă că în zilele însorite când valoarea intensității radiației luminoase (PPFD) în tronson este crescută, activitatea fotosintetică era foarte intensă respectiv valoarea concentrației de CO_2 este scăzută.

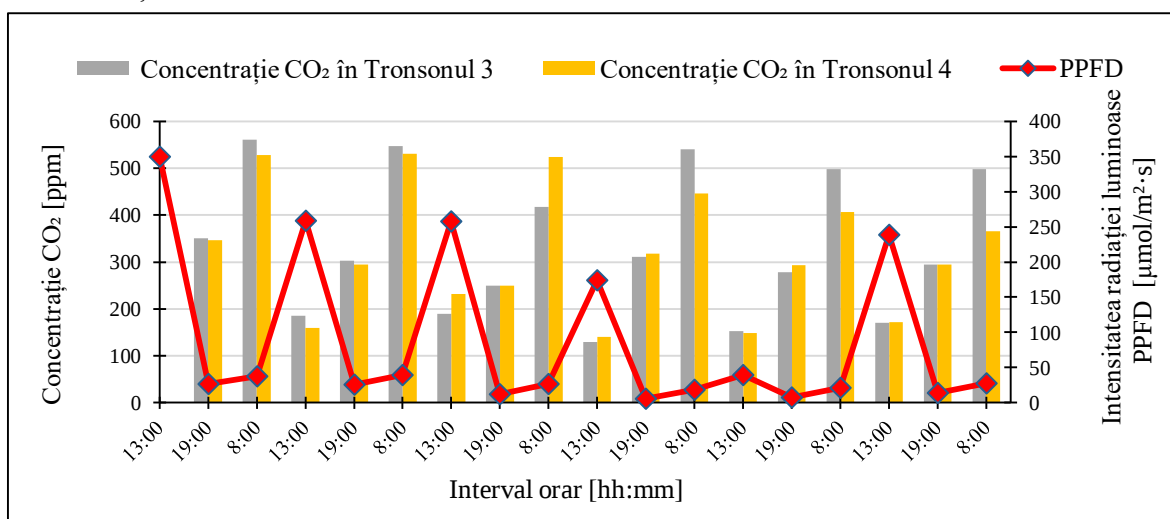


Fig. 7: Variația concentrației de CO_2 și a intensității radiației luminoase

7.2. Valorile parametrilor măsurați în a doua etapă au fost de asemenea analizate și interpretate. În urma acestei analize se constată că procesele termotehnice care se dezvoltă în tunelul de calusare generează o variație dinamică a parametrilor microclimatului. Acești parametri interacționează între ei și sunt influențați de procesele biologice ce au loc în răsaduri în perioada de calusare, procese biologice care la rândul lor influențează dinamica proceselor termotehnice din incintele de calusare. În mod evident, temperatura crește pe măsură ce intensitatea radiațiilor luminoase crește. Chiar dacă, căldura generată de lampa LED este mică, se observă o creștere a temperaturii în secțiunea suplimentară iluminată. Însă această diferență de temperatură între cele 2 secțiuni este influențată mai mult de valoare temperaturi din microseră decât de temperatura

emisă de lampa suplimentară. Se mai poate observa că la valori mai mari ale intensității radiației luminoase, concentrația de CO_2 scade ca urmare a creșterii intensității procesului de fotosinteză, proces care este un „consumator” de CO_2 . În Figura 8 se vede cum umiditatea relativă este influențată de creșterea intensității radiației luminoase. Cu cât valoarea intensității luminii crește, se generează o creștere a intensității procesului de fotosinteză. Iar un proces de fotosinteză intens se materializează printr-un proces de evapotranspirație ridicat și astfel se generează o creștere a umidității relative în camera de calusare. Această creștere apare până când umiditatea relativă ajunge aproape de saturație, iar procesul de evapotranspirația stagnează și tinde a înceta.

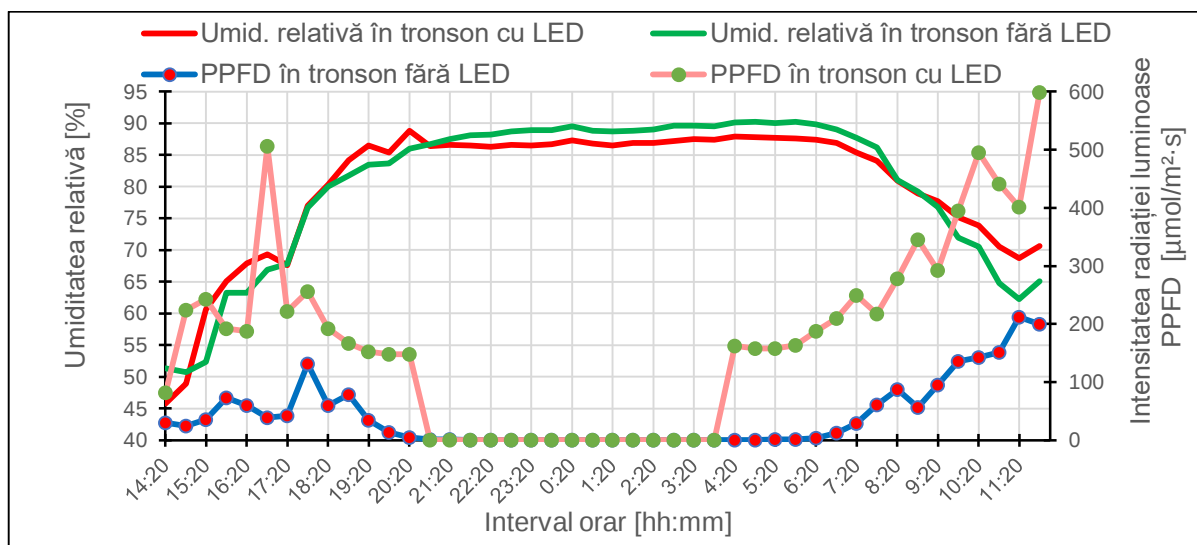


Fig. 8 : Influența intensității radiației luminoase asupra umidității relative

8. Modelarea numerică a proceselor din camerele de calusare

Datorită complexității fenomenelor ce se desfășoară în camerele de calusare, cantitatea de informații necesară pentru cuantificarea integrală a variabilelor factorilor de microclimat depinde atât de intensitatea proceselor termofizice ce se dezvoltă cât și de nivelul de precizie al instrumentelor de măsură utilizate. Dar o abordare analitică a sistemului de ecuații diferențiale ce descriu aceste procese este foarte dificilă. Simularea numerică a acestor fenomene termofizice poate duce la dezvoltarea unui model predictiv al variației acestora, versatil, care să poată fi utilizat în orice condiție climaterică externă, în orice moment al anului și în orice locație geografică. De asemenea tehnicile de modelare numerică pot oferi un mijloc eficient de cuantificare precisă a variabilelor climatice din camerele de calusare. Pentru modelarea numerică a proceselor termotehnice ce se dezvoltă în incintele de calusare s-a optat pentru folosirea pachetului de programe COMSOL Multiphysics. Modulul de transfer de căldură al acestui program, folosit pentru modelarea proceselor ce au loc în camerele de calusare, suportă toate mecanismele fundamentale de transfer de căldură, incluzând transferul de căldură

prin conducție, convecție și radiație (atât radiația între două suprafețe, cât și între o suprafață și mediul ambiant). Investigația numerică a fost făcută pentru un singur tronson de calusare. Pentru a rezolva ecuațiile diferențiale prin metoda elementului finit, domeniul analizat a fost împărțit într-o rețea de elemente de dimensiuni mici. Astfel, prin iterații succesive, valorile parametrilor microclimatului cum sunt temperatura, presiunea, vectori de viteză etc., pot fi determinate. Profitând de dubla simetrie a geometriei tunelului de calusare, pentru a ușura calculul, s-a ales rezolvarea ecuațiilor pentru un sfert din domeniul real, având două limite ca planuri de simetrie. Cele două planuri de simetrie (longitudinale și transversale) au fost considerate nu numai din punct de vedere al geometriei, ci și în rezolvarea ecuațiilor, ca fiind condiții de delimitare. În vederea realizării simulării numerice, ecuațiile de transfer s-au rezolvat strict în domeniul fluid (aer) astfel că geometria reprezintă partea "goală" a incintei, fără pereți sau plante, acestea fiind granițe ale domeniului. S-a optat pentru rezolvarea ecuațiilor de transfer termic și de transfer de impuls (mișcare a curenților de aer). Mișcarea curenților de aer și distribuția temperaturii, umidității relative și a concentrației de CO_2 , este generată strict de gradientul de densitate pe verticală datorat transferului termic prin convecție liberă, de la suprafața inferioară a incintei de calusare, la aerul din interiorul incintei. Suprafața predominantă de captare a radiației solare este suprafața inferioară a incintei (cea cu tăvile alveolare cu răsaduri și cea liberă dintre tăvi) și s-a considerat a fi singura suprafață de captare a radiației solare, pereții având ca și condiție la limită flux termic convectiv determinat pe baza diferențelor de temperatură dintre interior și exterior. Valorile temperaturii exterioare incintei precum și ale fluxului termic la nivelul părții inferioare a incintei de calusare, măsurate în timpul determinărilor experimentale, au fost considerate ca fiind condiții la limită în regim nestaționar, în simularea numerică.

8.1. Rezultate, discuții și interpretări

În urma simulării, valorile vitezei maxime este de circa 0,12 m/s și se manifestă cu precădere în centrul camerei de calusare. În apropierea peretelui vertical și a celui oblic al camerei de calusare se observă că există o zonă în care viteza are o valoare foarte mică, același lucru observându-se și în apropierea tăvilor alveolare cu răsaduri. În Figura 9 sunt reprezentate liniile de curent rezultate în urma simulării.

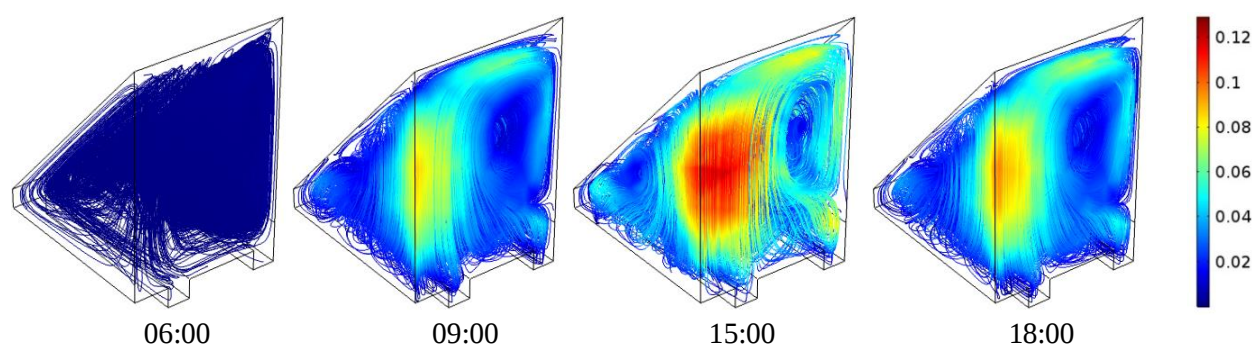


Fig. 9: Liniile de curent

Aici se disting mult mai clar zonele din imediata apropiere a pereților unde vitezele sunt mici în comparație cu cele din zona centrală a tunelului de calusare. Faptul că liniile de curent au o densitate mai mare în zona de centru a tunelului, conduce la concluzia că ceilalți parametri ai microclimatului din incintă, respectiv concentrația de CO_2 , temperatura și umiditatea relativă, nu au valori egale în întreg volumul de aer din tunelul de calusare. În consecință se impun soluții pentru a uniformiza valorile factorilor de microclimat în întreg volumul tunelului. În figura 10 sunt prezentate câmpurile de temperaturi rezultate în urma simulării făcute, având aceleași date de intrare ca în cazul simulării variației câmpurilor de viteze ale aerului din incinta tunelului. Se observă că în zonele din apropierea tăvițelor alveolare, zonă în care viteza curenților de aer nu este foarte intensă, temperatura este mai mare, acest lucru având un impact negativ asupra procesului de calusare și de dezvoltare a răsadurilor, mai ales că temperatura maximă calculată a fost de $43,8^\circ\text{C}$.

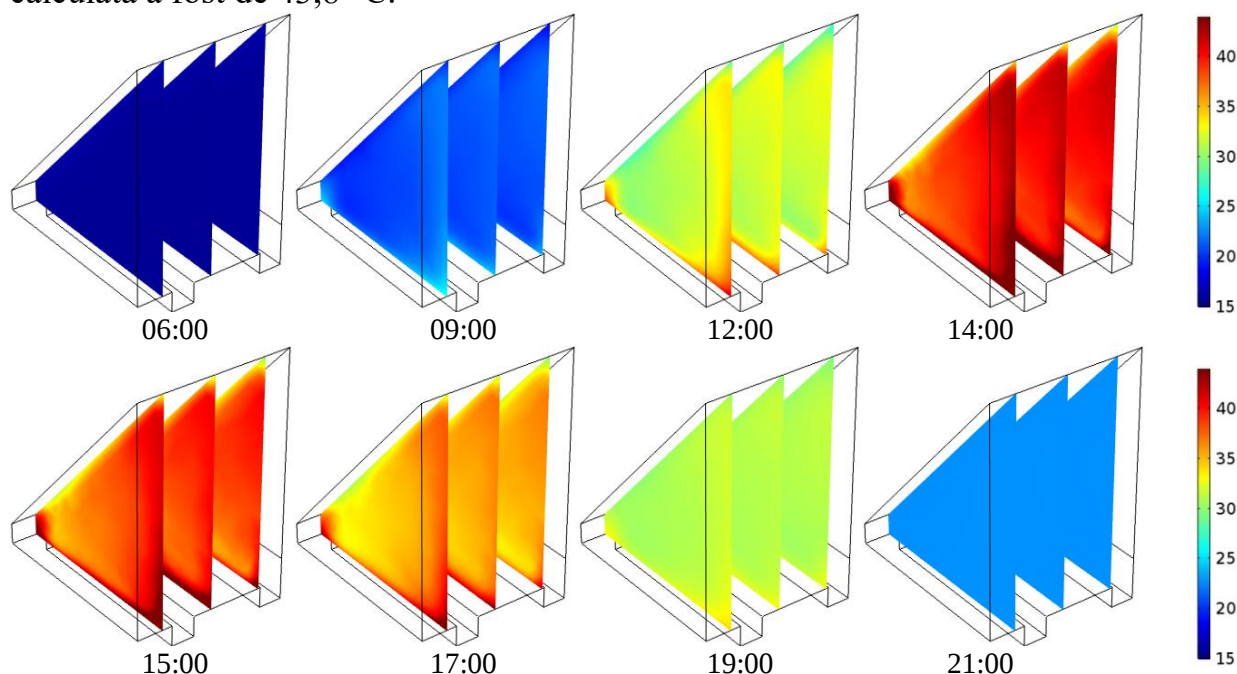


Fig. 10: Câmpul de temperaturi, în $^\circ\text{C}$, pentru diferite momente

În Figura 11 sunt prezentate valorile calculate ale variației concentrației de CO_2 în aceleași premise de simulare stabilite pentru determinarea variației vitezei curenților de aer și a temperaturii. Se observă că și în cazul temperaturii, deoarece viteza curenților de aer are valori scăzute, concentrația de CO_2 variază cu o distribuție inegală în incinta tunelului. Aceste distribuții inegale ale concentrației de CO_2 ca și valorile ridicate ale temperaturii nu reprezintă condiții optime pentru perioada de calusare a răsadurilor altoite. Pentru o rată de supraviețuire de 95%-100%, este absolut necesar să existe aceleași condiții de microclimat în întregul volum al tunelului de calusare și în special în zona tăvițelor alveolare.

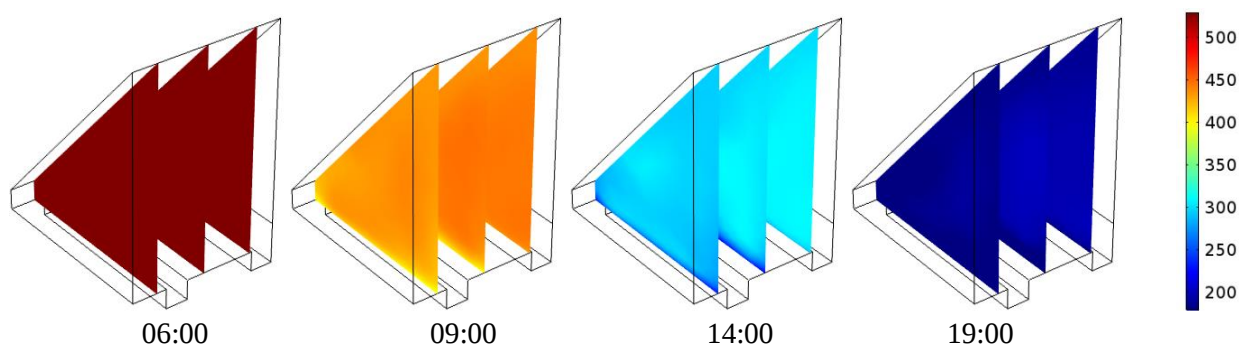


Fig.11: Câmpul de concentrații de CO₂ în ppm, planuri verticale, pentru diferite momente

8.2. Validarea modelului numeric

Pentru a vedea dacă modelul numeric propus este corect, valorile măsurate au fost comparate, pentru aceeași poziție în care au fost amplasați senzorii aparatelor de măsură, respectiv chiar deasupra tăvilor alveolare cu răsaduri, cu valorile calculate ale parametrilor. În acest caz au fost comparate valorile temperaturii, ale umidității relative și ale concentrației de CO₂. Reprezentările grafice ale acestor valori sunt prezentate în Figura 12.

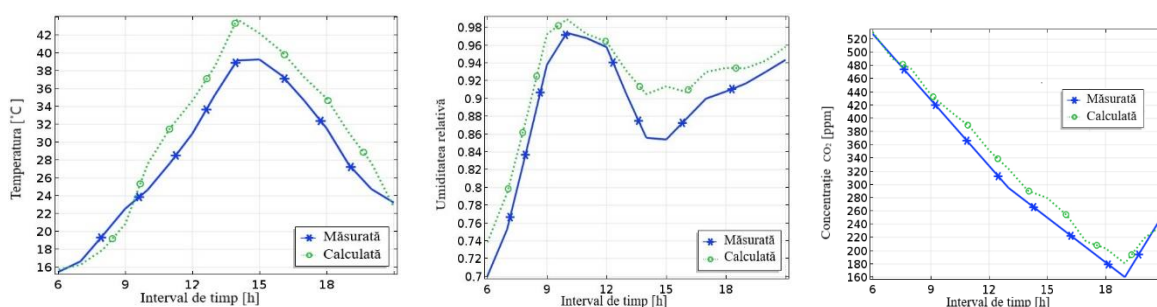


Fig. 12 : Variația temperaturii, a umidității relative și a concentrației de CO₂ în domeniul de calcul

Se observă că valorile calculate au aceeași tendință de variație cu cea a valorilor măsurate. Eroarea medie pătratică calculată pentru validarea temperaturii este de 2,84 °C, eroarea pătratică medie calculată a umidității relative este de 3,1% și eroarea pătratică medie calculată pentru concentrația de CO₂ este de 18,98 ppm. În consecință valorile erorilor pătratice medii calculate pentru variația factorilor de microclimat în tunelul de calusare validează modelul numeric propus.

9. Concluzii

Etapele tehnologice pentru obținerea răsadurilor altoite fiind relativ scurte, fluctuațiile factorilor de microclimat pot avea efecte importante asupra calității și cantității producției. Din acest motiv, utilizarea unor spații în care se pot obține condiții speciale de microclimat în perioada de calusarea este o metodă recomandată. Avantajele utilizării unui mediu artificial sunt, în principal, predictibilitatea indicatorilor de producție și standardizarea calității răsadurilor,

ca urmare a constanței și uniformității condițiilor de microclimat din acest tip de incinte. Modelul numeric de predicție a evoluției microclimatului în camerele de calusare propus în cercetarea aceasta fost validat deci soluția propusă este corectă. De asemenea model numeric propus poate fi folosit pentru o serie de activități cum sunt managementul condițiilor de microclimat din incintele de calusare, evaluarea performanțelor unor incinte deja existente sau proiectarea unor camere de calusare în care managementul factorilor de microclimat să se facă în timp real, fără intervenția factorului uman.

Deoarece producerea răsadurilor altoite în România a căpătat o amploare deosebită, iar perioada de producere a acestora, respectiv lunile martie, aprilie și mai, este un interval în care se înregistrează fluctuații mari ale factorilor de climat natural exterior, cercetările acestui studiu au dorit a se concretiza în obținerea unui model numeric de predicție a parametrilor proceselor termodinamice ce se desfășoară în camerele de calusare, atât în funcție de condițiile de mediu extern cât și în funcție de interacțiunea plantelor cu factorii de mediu interni. Acest model doar face analiza variației parametrilor microclimatului, dar nu poate preciza valorile optime ale acestuia în orice moment pe parcursul zilei. Pentru a îmbunătăți aceste predicții, modelul trebuie testat pentru mai multe condiții de mediu. Totodată în cercetările viitoare trebuie luate în considerare interacțiunea plantelor cu factorii de microclimat deoarece fiecare cultivar are rate diferite de fotosinteză care interacționează în mod diferit cu microclimatul din camera de calusare. În consecință sunt multe date de care trebuie să se țină cont în procesul de evaluare și a predicție cu exactitate climatul intern din camerele de calusare și aclimatizare. Monitorizarea în timp real a informațiilor privind morfogeneza plantelor și variațiile factorilor de microclimat, trebuie să ofere informații care să conducă la o minimă perturbare a dezvoltării plantelor și a condițiilor de mediu interne. În acest sens trebuiesc dezvoltate cercetări interdisciplinare pentru a implementa un model biologic de creștere a plantelor în funcție de parametrii de mediu, astfel încât să fie posibil să se stabilească în timp real cea mai bună politică de control și de predicție a valorilor parametrilor de microclimat din camerele de calusare și aclimatizare. Optimizarea parametrilor constructivi și funcționali ai incintelor de calusare și aclimatizare implică dezvoltarea unor cercetări interdisciplinare din domeniul horticola, al ingineriei tehnice, al tehnologiei informatice, etc..

10. Contribuții personale și valorificarea rezultatelor

Prin studiul documentar de la începutul stagiului doctoral, studiu care a constatat în analiza a peste 150 de articole de specialitate din țară și străinătate, s-a putut face un overview al stadiului actual al cercetărilor. Totodată acest studiu documentar a constituit baza fundamentării direcțiilor în care au fost conduse cercetările teoretice și experimentale ulterioare, prezentate în această lucrare. Un alt rezultat foarte important al cercetării documentare este acela că, atât pe plan național cât și pe plan internațional, până în prezent, nu au mai fost desfășurate cercetări pentru

analiza proceselor termotehnice ce se desfășoară în camere de calusare, acest aspect conferind un caracter de strictă originalitate prezentei lucrări.

Un alt aspect de originalitate al acestei teze este analiza concomitentă a variației celor mai importanți factori de microclimat din camerele de calusare/aclimatizare, respectiv temperatura, umiditatea relativă, intensitatea radiației luminoase și concentrația de bioxid de carbon. Apoi, pe baza măsurărilor experimentale efectuate am propus un modelul numeric de calcul a evoluției factorilor de microclimat. Acest model numeric poate fi considerat de asemenea ca fiind o premieră în domeniu. Până în prezent toate cercetările efectuate în această direcție au fost orientate către analiza microclimatului în spații protejate de cultură, considerându-se apriori că procesele termofizice ce se desfășoară în incintele de calusare și aclimatizare sunt identice cu cele din sere

Pe parcursul derulării etapelor acestui studiu doctoral, am făcut periodic diseminări ale rezultatelor parțiale obținute, prin participarea la diverse manifestări științifice naționale și internaționale cum sunt: *International Congress on Food Technology 18-19 March, Athens – Greece*; *8th International Conference on Energy and Environment CIEM 2017 - UPB Bucharest / 19 - 20 October 2017*; *IX International Symposium on Soil and Substrate Disinfestation (SD 2018), Heraklion, Crete, 9-13 September 2018*; *1st Conference of the UTCB Doctoral School, Bucharest, Romania, din October 26, 2018*; *Greensys 2019 - International Symposium on Advanced Technologies and Management for Innovative Greenhouses, 16th – 20th June 2019, Angers, France*; *2nd Conference of the UTCB Doctoral School, Bucharest, Romania, October 25, 2019*

Bibliografie selectivă

Fernandez, J., and Bailey, B. (1992). Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology* 58, 229–245.

Hanan, J. (1998). Radiation p. 91–166. *Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture*. CRC Press Inc. Boca Raton FL.

Miles, C.A., Kreider, P., Johnson, S.J., and Roozen, J. (2016). Vegetable grafting: the healing chamber.

Pieters, J.G., and Deltour, J.M. (1997). Performances of Greenhouses with the Presence of Condensation on Cladding Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 68, 125–137.

Popovski, K. (1997). Greenhouse climate factors. *GHC Bulletin*.

Schlichting, H. (1955). Boundary Layer Theory J. Kestin, 102–121.

Schuepp, P. (1993). Tansley review No. 59. Leaf boundary layers. *New Phytologist* 477–507.