

$$C_s V_s T'_2(t) = \frac{K_s A_s}{D_z} \left[(T_1(t) - T_2(t)) + (T_{BL}(t) - T_2(t)) \right], \quad \forall t \in \mathbb{R}_+, \quad (3.6)$$

unde: C_s [kJ/m³/°C] este capacitatea volumetrică de încălzire a solului, V_s [m³] este volumul solului, K_s [kJ/m/°C/h] este conductivitatea termală a solului, A_s [m²] este aria suprafeței solului. Se presupune că transferul de căldură se efectuează de la nivelul superior către cel inferior. Sistemul format din ecuațiile diferențiale (3.5) și (3.6), avînd necunoscutele T_1 și T_2 , la care se adaugă condițiile de mărginire T_{BU} și T_{BL} , poate fi rezolvat în cadrul mediului SIMULINK. Valorile tipice ale constantelor sunt următoarele: $C_s = 2000$ [kJ/m³/°C], iar $K_s = 5.5$ [kJ/m/°C/h]. De asemenea, temperatura de la nivelul solului variază sinusoidal în jurul unei valori predefinite (de exemplu, 10°C), cu o amplitudine de aproximativ 5°C și își atinge maximul între orele 13:00 și 14:00.

Modelul cu 3 straturi poate fi extins la modele cu un număr arbitrar de straturi. Numărul de ecuații de tipul (3.5)-(3.6) crește proporțional cu numărul de straturi. Evident, pe măsură ce straturile sunt situate la adîncimi mai mari, temperatura variază mai puțin.

Un model mai complex este cel în care se consideră că fenomenul de transfer al căldurii se petrece și pe direcție orizontală, nu doar verticală. Fiecare transfer de căldură este direct proporțional cu gradientul temperaturii și conductivitatea termală, dar invers proporțional cu distanța. În acest caz, solul este împărțit în blocuri paralelipipedice egale, ale căror centre de simetrie adiacente se situează la distanțele D_x pe orizontală, respectiv D_z pe verticală, ca în Figura 3.2.

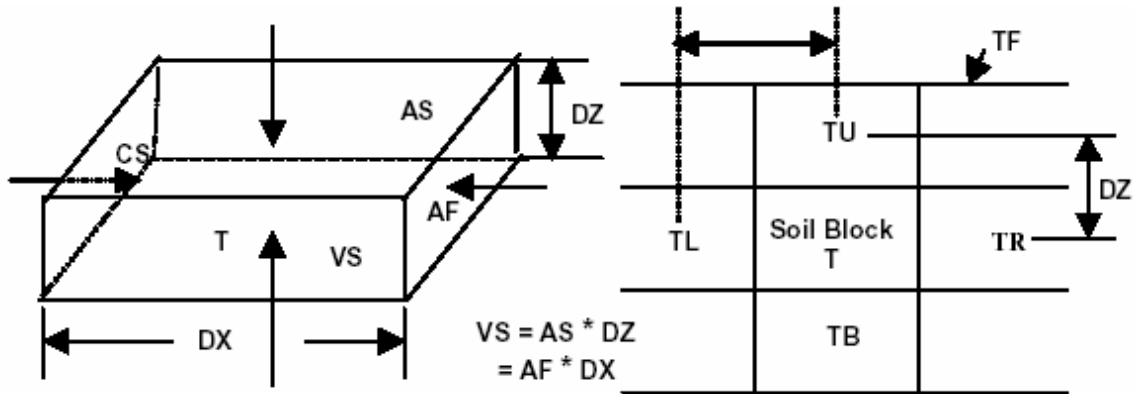


Figura 3.2. Schema modelului bidimensional de transfer al căldurii în sol.

Dacă este suficient de mic, se consideră că fiecare bloc are temperatură constantă, T . Aceasta este asociată centrului de simetrie și variația ei este limitată de 4 valori marginale, corespunzătoare blocurilor învecinate: T_U (în partea superioară), T_L (în partea inferioară), T_L (la stînga) și T_R (la dreapta).

Dinamica de modificare a temperaturii este explicitată de următoarea ecuație:

$$C_s V_s T'(t) = K_s \left\{ \frac{A_s}{D_z} \left[(T_U - T) + (T_B - T) \right] + \frac{A_F}{D_x} \left[(T_R - T) + (T_L - T) \right] \right\}, \quad \forall t \in \mathbb{R}_+, \quad (3.7)$$

unde, în plus, față de ecuațiile (3.5)-(3.6), A_F este aria suprafeței solului pentru fluxul orizontal de căldură. Așa cum arată figura, volumul blocului de sol, V_s se poate evalua

efectuînd oricare dintre produsele $A_S D_Z$ sau $A_F D_X$.

Pentru o zonă în care se studiază transferul de căldură la nivelul solului, modelul cel mai complex include un număr finit (dar destul de mare – de ordinul zecilor, cel puțin) de ecuații de tipul (3.7), care trebuie rezolvate, plecînd de la un set de condiții inițiale.

3.3. Transferul radiației solare

Radiația solară este unul dintre cei mai importanți factori de mediu care favorizează creșterea plantelor. Este binecunoscut faptul că nivelul radiației solare variază la nivelul suprafeței pămîntului în funcție de sezon, datorită relației planetare dintre Soare și Pămînt. Măsurile de acoperire a unei suprafețe pot îmbunătăți temperatura mediului astfel izolat, (în general, prin creștere în interiorul serei), însă nu pot intensifica nivelul radiației solare.

Parametrul care cuantifică nivelul de radiație este lungimea de undă asociată comportamentului ondulatoriu al fotonilor. Radiața a cărei lungime de undă are valori cuprinse între 400 și 700 nm (din spectrul vizibil) se numește *radiație activă fotosintetică*. Partea fotoreactivă a fotosintezei este considerată direct proporțională cu cantitatea de fotoni din lumina ce a fost absorbită de plante, exprimată prin curba de absorbție a clorofilei, pentru o concentrație nelimitată de CO_2 . Un mol de radiație luminoasă conține aproximativ $6.02 \cdot 10^{23}$ fotoni, iar fiecare foton are energia proporțională cu frecvența sa de oscilație. Rezultă că se poate evalua concentrația de energie corespunzătoare fotonilor cu aceeași lungime de undă. De exemplu, concentrația de energie a fotonilor care formează o rază de lumină verde (cu lungimea de undă de 500 nm) este de aproximativ $2.35 \cdot 10^5$ J/mol.

Există trei proprietăți ale acoperirilor artificiale ce au legătură cu radiația solară din mediul exterior: reflexivitatea, absorbția și transmisivitatea. Acestea sunt influențate direct de tipul de acoperire. De exemplu, în Figura 3.3 sunt prezentate variațiile transmisivității, în procente, în funcție de distribuția spectrală a luminii pentru filme construite din trei tipuri diferite de materiale: EVA (etilen-vinil-acetat – sau hîrtie cerată), PE (poli-etilenă) și PVC (policlorură de vinil).

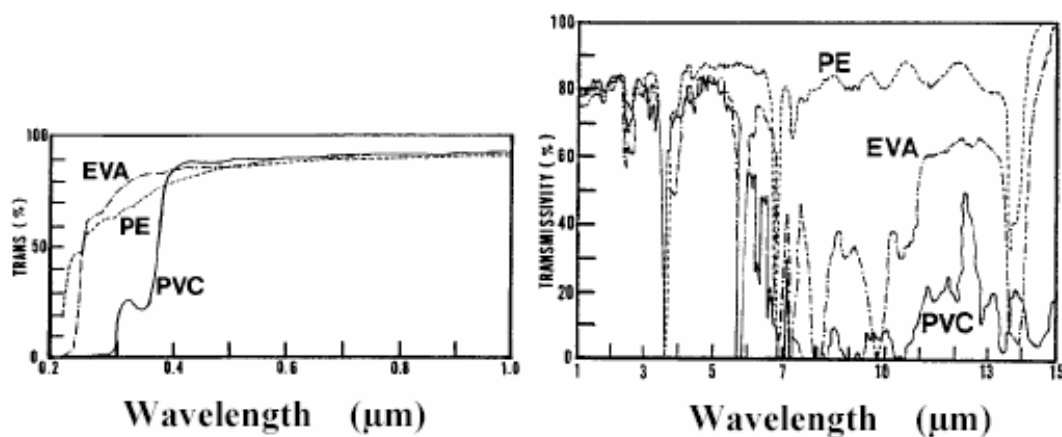


Figura 3.3. Distribuția spectrală a transmitivității pentru materialele EVA, PE și PVC.

Cele 3 materiale au transmitanțe destul de diferite în zona razelor infraroșii cu lungimi de undă inferioare valorii de 400 nm (graficele din stînga) și în zona razelor ultraviolete cu lungimi de undă superioare valorii 5000 nm (graficele din dreapta). Comportamentul față de spectrul luminos vizibil (care include și radiația activă fotosintetică) este aproximativ același, transmitanța fiind destul de înaltă (în jur de 90%). Însă influența asupra temperaturii serei se datorează în special transmitanței din zona spectrelor ultravioletoare. Astfel, în zona ultravioletoare, filmul pe bază de PVC este practic opac, cel pe bază de EVA este semi-opac, iar cel bază de PE este cel mai transparent. Aceasta înseamnă că

acoperirea cu PVC poate permite un control eficient al temperaturii, dar nu favorizează creșterea plantelor, în timp ce, pentru acoperirea PE, controlul temperaturii este mai dificil, deși aceasta favorizează creșterea plantelor. Acoperirea EVA conduce la un bun compromis între transmitanța radiației active fotosintetice și eficiența controlului temperaturii interne a serei. (Dezavantajul acestuia este constituit de prețul de fabricație, mai mare decât al celorlalte două materiale.)

Pe lângă distribuția spectrală a transmisivității, nu trebuie neglijate însă reflexivitatea și absorbția (de asemenea exprimate în procente). Relația dintre cele trei proprietăți este foarte simplă: suma lor este egală cu 100%. Fiecare dintre ele poate fi modelată prin ecuații adecvate, descrise în continuare.

În momentul în care lumina întâlnește un material transparent, sub unghiul de incidență θ_i , o parte din radiația solară directă este transmisă sub unghiul de refracție θ_r , o altă parte este reflectată (sub unghiul $\pi - \theta_i$) și o a treia parte este absorbită. O caracteristică a materialului transparent o constituie indicele de refracție:

$$\gamma = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r}. \quad (3.8)$$

Fracția de lumină absorbită de materialul transparent este evaluată cu ajutorul coeficientului de absorbție:

$$\alpha = \exp\left(-\frac{\xi \Delta z}{\cos \theta_r}\right), \quad (3.9)$$

unde: ξ [mm^{-1}] este coeficientul specific de extincție (de exemplu, $\xi = 0.0441 \text{ mm}^{-1}$ pentru sticlă), iar Δz este grosimea materialului. În fine, o ultimă variabilă care trebuie evaluată este fracțiunea de lumină reflectată:

$$\rho = \frac{1 \sin^2(\theta_i - \theta_r)}{2 \sin^2(\theta_i + \theta_r)} \left[1 + \frac{\cos^2(\theta_i + \theta_r)}{\cos^2(\theta_i - \theta_r)} \right]. \quad (3.10)$$

Folosind definițiile (3.9) și (3.10), se obțin expresiile celor 3 variabile care caracterizează fenomenul de transfer al radiației solare:

$$\text{TRAN} = \frac{\alpha(1 - \rho^2)}{1 - \alpha^2 \rho^2}. \quad (3.11)$$

$$\text{REFL} = \rho(1 + \alpha \text{TRAN}). \quad (3.12)$$

$$\text{ABSO} = 1 - \text{TRAN} - \text{REFL}. \quad (3.13)$$

Prin simularea expresiilor (3.11)-(3.13), corespunzător unui film de sticlă cu grosimea de 3 mm și indicele de refracție $\gamma = 1.526$, se obțin graficele din Figura 3.4, care exprimă variația celor 3 parametri în raport cu unghiul de incidență. Graficele arată că, în cazul sticlei (care reține ultravioletele), transmisivitatea și absorbția sunt practic opuse una alteia, în timp reflexivitatea este aproximativ constantă.

3.4. Modelarea variației de CO_2

Concentrația de CO_2 din aer este un alt factor important în creșterea sau îmbolnăvirea plantelor. În spațiu deschis, variația acestei concentrații are loc astfel: în zilele însorite,

datorită fotosintezei plantelor, nivelul de CO₂ este aproximativ constant, între 0.03% și 0.035%; în timpul nopții el crește către 0.04% sau 0.045%, chiar și în prezența plantelor. Nivelul de CO₂ este mult mai important în mediile acoperite, mai ales dacă materialul de acoperire este din plastic, întrucât schimbul de aer este restricționat de necesitatea creșterii temperaturii. În cadrul acestor medii, există două surse importante pentru fluxul de CO₂: solul și aerul.

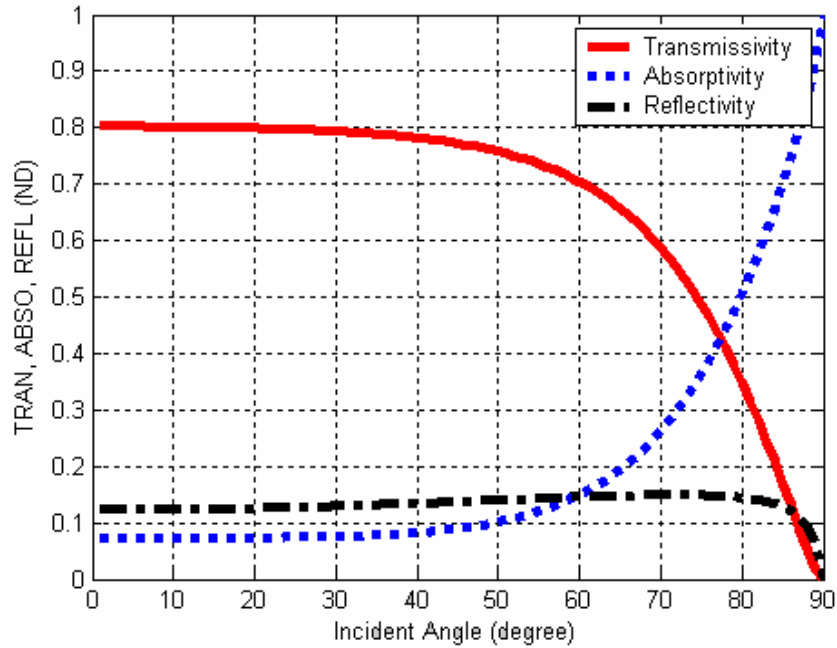


Figura 3.4. Variația transmitivității, absorbției și reflexivității în raport cu unghiul de incidență al razelor luminoase.

Pentru analiza efectului temperaturii la difuzia de CO₂ în cadrul solului, se folosesc de regulă modele neliniare. Fenomenul de difuzie este similar celui de transfer de căldură sau de vapori de apă în cadrul solului. În consecință, modelul de difuzie poate fi descris de ecuații similare lui (3.5) sau (3.6). Pentru aceasta, se consideră că solul a fost împărțit în 5 straturi (nu doar în 3, ca în paragraful 3.2), iar concentrația de CO₂ din fiecare strat este notată prin κ_i ($i \in \overline{1,5}$) și se măsoară în procente. Stratul superficial este asociat indicelui unitar, în timp ce indicele maxim ($i = 5$) se referă la stratul cel mai profund. Sistemul de ecuații care descrie fenomenul de difuzie a CO₂ în sol este următorul:

$$\begin{cases} \kappa'_1(t) = \frac{\delta_s}{D_z^2} [2(\kappa_U(t) - \kappa_1(t)) + (\kappa_2(t) - \kappa_1(t))] + \Gamma_1 \\ \kappa'_i(t) = \frac{\delta_s}{D_z^2} [(\kappa_{i-1}(t) - \kappa_i(t)) + (\kappa_{i+1}(t) - \kappa_i(t))] + \Gamma_i, \quad \forall i \in \overline{2,4}, \quad \forall t \in \mathbb{R}_+, \\ \kappa'_5(t) = \frac{\delta_s}{D_z^2} [(\kappa_4(t) - \kappa_5(t)) + (\kappa_L(t) - \kappa_5(t))] + \Gamma_5 \end{cases} \quad (3.14)$$

unde: δ_s [m²/h] este coeficientul de difuzie, D_z [m] este grosimea fiecărui strat de sol, iar Γ_i [h⁻¹] ($i = 5$) măsoară frecvența de producere a CO₂ pentru fiecare strat de sol. De asemenea, κ_U este concentrația (superficială) de CO₂ măsurată în aer, dar la nivelul solului, iar κ_L este concentrația din stratul cel mai profund de sol, după parcurgerea celor

5 straturi. De regulă, $\kappa_L = \kappa_5$. Sursa principală de producere a CO_2 o constituie micro-organismele. O parte din cantitatea de CO_2 produsă intră în reacții chimice împreună cu unele componente ale solului, dar o altă parte se difuzează. Cantitatea care se difuzează este exprimată prin:

$$\Gamma_i = \eta_i \Gamma_i^\mu, \quad \forall i \in \overline{1,5}, \quad (3.15)$$

unde η_i [%] ($i = 5$) este randamentul generării de CO_2 , iar Γ_i^μ [h^{-1}] ($i = 5$) este frecvența de producere a CO_2 de către microorganisme, pentru fiecare strat de sol.

Valorile tipice ale constantelor din ecuațiile (3.14) și (3.15) sunt următoarele: $\delta_s \in [0.002, 0.005]$ [m^2/h], $\eta_1 = \eta_2 = 0.1\%$, $\eta_3 = 0.07\%$, $\eta_4 = 0.05\%$, $\eta_5 = 0.03\%$. Experimentele au arătat că efectul temperaturii asupra generării de CO_2 este mult mai mare decât asupra coeficientului de difuzie δ_s , de aceea el a fost păstrat constant. Așa cum era de așteptat, randamentele de producere a gazului descresc odată cu adâncimea. Valorile precizate sunt determinate experimental pentru straturi de grosime $D_z = 0.1$ m. De asemenea, concentrația superficială κ_U variază sinusoidal în jurul valorii de 0.04% , cu o amplitudine de 0.01% . Maximul de concentrație se atinge la ora 6:00. Desigur, odată cu adâncimea, crește și atenuarea amplitudinii de variație a concentrației de CO_2 .

Într-un spațiu închis (de exemplu, într-o seră), unde acoperirea este realizată prin folie de polietilenă, dar cu ventilație, există două surse de CO_2 : aerul ventilat din exterior către interior și micro-organismele din sol. Balanța globală a schimbului de CO_2 între exterior, interior și solul serei este exprimată de ecuația următoare:

$$V_{in} \kappa'_{in}(t) = V_{in} \eta_v (\kappa_{out}(t) - \kappa_{in}(t)) + A_s \delta_s v_{SH} (\kappa_s(t) - \kappa_{in}(t)) - \lambda A_p \eta_{ph}(t), \quad \forall t \in \mathbb{R}_+, \quad (3.16)$$

unde:

- κ_{in} , κ_{out} , κ_s (măsurate în procente) reprezintă concentrațiile de CO_2 în interiorul serei, exteriorul serei, respectiv la nivelul solului din seră,
- V_{in} [m^3] este volumul serei;
- η_v [h^{-1}] este rata de ventilație;
- A_s [m^2] este aria suprafeței solului din seră;
- δ_s [m^2/h] este coeficientul de difuzie;
- v_{SH} [m^{-1}] este numărul lui Sherwood;
- λ [m^3/mg] este coeficientul de conversie de la miligrame la metri cubi de CO_2 ;
- A_p [m^2] este aria totală a frunzelor plantelor din interiorul serei;
- η_{ph} [$\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$] este rata de fotosinteză.

Ecuațiile (3.14)-(3.16) reprezintă un model de complexitate acceptabilă a fenomenelor de transfer a CO_2 din cadrul unei sere. Dificultatea acestora este mai mult cauzată de existența unui număr destul de mare de parametri constanți (sau aproximativ constanți) care ar trebui identificați experimental.

3.5. Dezvoltarea teoretică a modelelor termice pentru climatul de seră

Pentru a construi și, totodată, a controla un sistem este nevoie de un model matematic, care să aproximeze modelul termic al spațiului considerat. În acest sens, au fost luate în considerare următoarele modele [GCS99] ale climatului de seră, acestea reprezentând ecuațiile dinamice ale temperaturii aerului în spațiu închis.

Ecuția dinamică a unei sere este următoarea:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_p V} [q_{\text{sist_incalzire}} + aSA_f] - \frac{\dot{V}}{V}(T - T_{\text{ext}}) - \frac{UA_s}{\rho C_p V}(T - T_{\text{ext}}) \quad (3.17)$$

iar ecuația dinamică a încălzirii sistemului de încălzire este următoarea:

$$\frac{dT}{dt} \equiv \frac{1}{\rho C_p V} [q_{\text{sist_incalzire}} + q_{\text{intern}}] - \frac{\dot{V}}{V}(T - T_{\text{ext}}) - \frac{UA_s}{\rho C_p V}(T - T_{\text{ext}}), \quad (3.18)$$

unde parametrii considerați sunt:

- A_f = suprafața podelei [m^2];
- A_s = suprafața totală a serei [m^2];
- a = eficiența sistemului de încălzire cu energie solară [0.28];
- C_p = căldura specifică a aerului [$\text{J/kg/}^\circ\text{C}$];
- $q_{\text{sist_incalzire}}$ = ieșirea sistemului de încălzire [W];
- q_{intern} = căldura provenită de la alte surse [W];
- S = radiația solară [W/m^2];
- T = temperatura interioară a aerului [$^\circ\text{C}$];
- T_{ext} = temperatura exterioară a aerului [$^\circ\text{C}$];
- U = coeficient de transfer caloric [$\text{W/m}^2/^\circ\text{C}$];
- V = volumul clădirii [m^3];
- \dot{V} = rata de ventilație volumetrică [m^3/s].

Ecuțiile (3.17) și (3.18) stau la baza proiectării întregului sistem de control, ale cărui diagrame bloc echivalente (de tip SIMULINK) sunt ilustrate în **Figurile 3.5 și 3.6**.

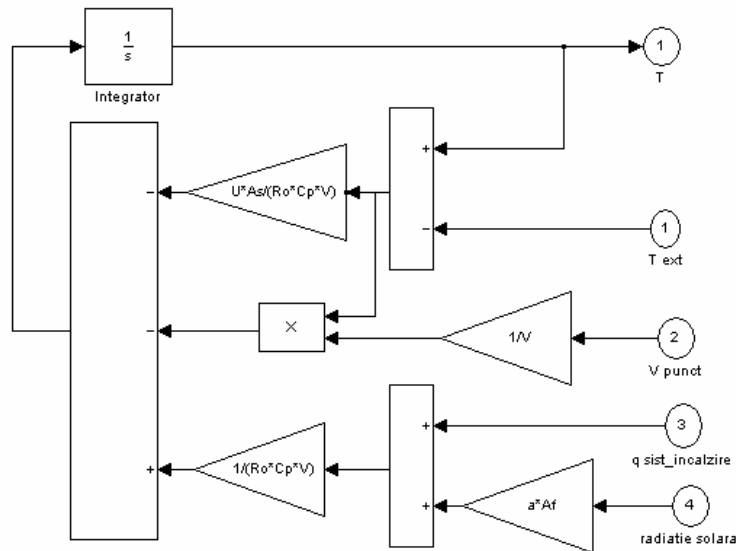


Figura 3.5. Modelul dinamic al unei sere.

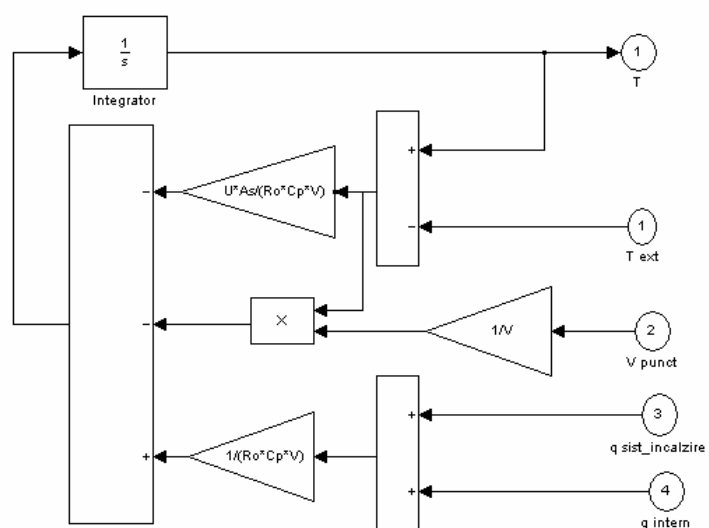


Figura 3.6. Modelul dinamic pentru încălzirea sistemului de încălzire a unei sere.

Aceste diagrame reprezintă sisteme cu intrări multiple și o singură ieșire, unde porturile de intrare-ieșire sunt etichetate numeric. Pentru o mai ușoară identificare, toate porturile sunt amplasate în partea dreaptă a diagramelor. Modelul dinamic al serei conține 4 intrări: temperatura exterioară, rata de ventilație, caldura suplimentară și radiația solară. Modelul dinamic al încăperii sistemului de încălzire are intrări și ieșiri similare, cu excepția radiației solare, care este înlocuită cu caldura provenită de la alte surse interne. Fiecare model construit este memorat într-un bloc ascuns, cum ar fi blocurile de temperatură exterioară și radiație solară. Valorile pentru toți parametrii modelelor sunt specificate în ferestrele de setare a parametrilor blocurilor grafice. Aceste modele pot fi folosite în cadrul altor modele de complexitate mai mare cu scopul de a contrui diverse sisteme de control.

3.6. Tipuri de modele ale climatului de seră

Modelele climatului de seră sunt esențiale pentru îmbunătățirea managementului mediului și creșterea eficienței controlului. În cele ce urmează, se vor descrie câteva tipuri de modele care pot fi utilizate pentru simularea și predicția mediului de seră. După cum s-a putut observa, acest studiu se concentrează asupra comportamentului dinamic al modelelor pentru temperatura interioară, umiditatea și concentrația de CO₂ din cadrul unei sere, precum și asupra domeniilor lor de aplicație. Modelele luate în discuție vor fi atât liniare, cât și neliniare, cu precădere modele fizice, modele de tip “cutie neagră” și modele de rețele neuronale [CuJB03]. Modelele sunt descrise ca funcții ale climatului exterior, ale acțiunilor de control realizate și ale proceselor de transpirație și fotosinteză ale plantelor.

Pentru a îmbunătăți managementul și controlul climatului de seră trebuie să se folosească o strategie de control adaptiv pentru a calcula semnalele de control utilizate în cadrul unei funcții de cost a performanței definite.

În câteva studii au fost publicate modele de simulare care descriu comportamentul dinamic al temperaturii aerului, al umidității și al concentrației de CO₂ din interiorul serelor. Aceste modele se bazează pe ecuații de flux de energie și masă [BoBa93], [BoGPA91] sau sunt derivate din identificarea sistemului folosind tehnici liniare și neliniare, precum algoritmul recursiv al celor mai mici pătrate sau rețele neurale, pentru a caracteriza modelele parametrice [CCR00], [CCM02].

3.6.1. Modele fizice

Modelele fizice descriu fluxul și transferul de masă generate de diferența dintre energia și masa mediului interior al unei sere și cele ale mediului exterior, sau de parametrii de control și intrările exogene de energie și masă, precum se observă în ecuațiile de mai jos [BBC94]:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_T} (q_{in,h} - q_{out,h} + p_h); \quad (3.19)$$

$$\frac{dc_m}{dt} = \frac{1}{V} (q_{in,m} - q_{out,m} + p_m). \quad (3.20)$$

Parametrii ecuațiilor (3.19) și (3.20) sunt următorii:

- T_i = temperatura aerului din interiorul serei;
- C_T = capacitatea termică;
- $q_{in,h}$, $q_{out,h}$ = fluxul intern, respectiv extern, de energie;
- p_h = puterea sursei de căldură (energia produsă în unitatea de timp);
- c_m = concentrația masei;
- $q_{in,m}$, $q_{out,m}$ = fluxul intern, respectiv extern, de masă;

- p_m = masa produsă în unitatea de timp;
- V = volumul serei.

În ecuațiile prezentate anterior, mecanismele de transport pentru conducție, convecție și radiație sunt implicite. De exemplu, fluxul de căldură dinspre interior spre exterior datorat ventilației, $q_{\text{vent,h}}$, fiind o componentă a parametrului $q_{\text{out,h}}$ din ecuația (3.19), este descris de următoarea ecuație:

$$q_{\text{vent,h}} = q_v \rho c_p (T_i - T_o). \quad (3.21)$$

Parametrii ecuației (3.21) sunt următorii:

- q_v = fluxul volumetric de energie transferată prin pereți;
- c_p = căldura specifică volumetrică;
- T_i = temperatura mediului interior;
- T_o = temperatura mediului exterior.

Dezavantajul acestei metode îl constituie dificultatea punerii în practică a acestor modele, deoarece ele folosesc un număr mare de parametri și variabile fizice. În plus, cînd sunt implementate propriu-zis, aceste metode pot oferi predicții corecte numai pentru o scurtă perioadă de timp, deoarece mediul de seră este variabil în timp.

3.6.2. Modele parametrice liniare de tip “cutie neagră”

Această metodă este bazată pe un experiment în care semnalele de intrare (\mathbf{u}) și cele de ieșire (\mathbf{y}) ale sistemului identificat în Figura 3.7 sunt înregistrate și analizate pentru a oferi un model. Această procedură este numită *identificarea sistemului* [LjL87], [SoSt89], [SCS05]. În acest caz, vectorul \mathbf{y} al semnalului de ieșire este construit prin măsurători ale temperaturii mediului interior (T_i) și ale umidității (Rh_i). Aceste modele sunt în strînsă corelație cu influențele externe ale condițiilor meteorologice și cu semnalele de control provenite de la echipamentele de execuție din cadrul serei.

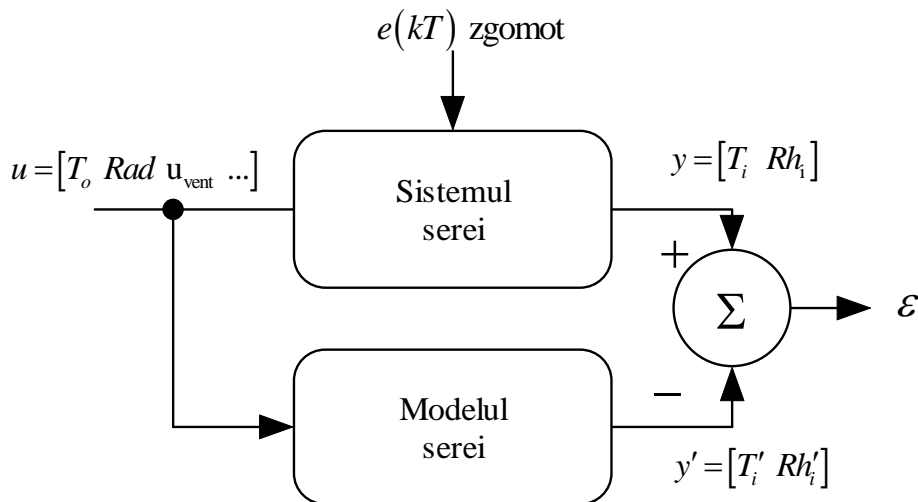


Figura 3.3. Reprezentarea sistemului și modelului de identificare ale serei.

În această figură, \mathbf{e} reprezintă un semnal de zgomot (de regulă, alb), \mathbf{y}' este ieșirea modelului, iar ε este eroarea de predicție. Intrările \mathbf{u} ale modelului sunt rezultate ale măsurătorilor temperaturii exterioare T_o , radiației solare Rad și semnalelor de control ale ventilatorului și sistemului de încălzire, $u_{\text{vent,h}}$ și $u_{\text{încălzire}}$.

Procedura de identificare a sistemului ar putea fi dezvoltată presupunând că mediul de seră poate fi descris ca un sistem liniar în jurul unui anumit punct de operare. În acest fel, modelele parametrice liniare de tip ARX pot fi folosite pentru a descrie dinamica climatului de seră [LJL87], [SCS05], [CCR97], [CCR00]. Ecuațiile de ordinul 2 ale modelului ARX de mai jos descriu dinamica temperaturii și umidității relative ale mediului de seră.

$$T_{is}(kT) = \frac{\begin{bmatrix} B_{1,t} & B_{2,t} & B_{3,t} & B_{4,t} \end{bmatrix}}{1 + a_{1,t}q^{-1} + a_{2,t}q^{-2}} \begin{bmatrix} T_i(kT) - T_o(kT) \\ Rad(kT) \\ (T_{conduce} - T_i)u_{încalzire}(kT) \\ (T_i - T_o)u_{vent}(kT) \end{bmatrix}, \quad \forall k \geq 2; \quad (3.22)$$

$$Rh_{is}(kT) = \frac{\begin{bmatrix} B_{1,h} & B_{2,h} & B_{3,h} & B_{4,h} \end{bmatrix}}{1 + a_{1,h}q^{-1} + a_{2,h}q^{-2}} \begin{bmatrix} (Rh_i - Rh_o)u_{vent}(kT) \\ T_i(kT) \\ Rh_i(kT) - Rh_o(kT) \\ (T_{conduce} - T_i)u_{încalzire}(kT) \end{bmatrix}, \quad \forall k \geq 2. \quad (3.23)$$

Parametrii ecuațiilor (3.22) și (3.23) de mai sus sunt următorii:

- $a_{1,t}, a_{2,t}, a_{1,h}, a_{2,h}$ = parametrii componentelor AR (*auto-regresive*) ale modelelor;
- $\{B_{i,\{t,h\}}\}_{i \in \overline{1,4}}$ = parametrii componentelor X (*de control exogen*) ale modelelor;
- q^{-1} = operatorul de întârziere cu un pas;
- T = perioada de eșantionare;
- T_o = temperatura exterioară;
- Rad = radiația solară;
- T_i = temperatura interioară a aerului;
- Rh_i, Rh_o = umiditatea interioară, respectiv exterioară a aerului;
- $T_{conduce}$ = temperatura conductelor de încălzire;
- u_{vent} = mărimea de intrare a ventilației;
- $u_{încalzire}$ = mărimea de intrare a sistemului de încălzire.

Totuși, simulările efectuate folosind a doua metodă pentru seturile de date care nu au fost folosite la calcularea parametrilor modelului sunt mai sensibile la erori, în comparație cu modelul fizice. Aceasta se datorează faptului că modelele de tip “cutie neagră” ARX sunt o simplificare majoră a întregului sistem. Astfel, parametrii sunt variabili în timp. De exemplu, procesul conversiei radiației solare în căldură variază în funcție de perioada zilei și a anului, deoarece mișcarea soarelui și prezența norilor variază în timp. Pentru a rezolva această problemă, algoritmi recursivi de estimare trebuie implementați pentru a calcula parametrii variabili în timp ai funcției de transfer din ecuațiile (3.22) și (3.23) [AsWi89]. Datorită faptului că parametrii variază lent în timp și semnalele nu au excitație pentru perioade lungi de timp, se poate folosi un estimator care actualizează informația doar în cazul în care sunt primite noi date spre utilizare. Estimatorul este reprezentat de un algoritm recursiv, se bazează pe Metoda Celor Mai Mici Pătrate și este descris de ecuațiile următoare [SGM88], [CCR00], [SCS05], exprimate pentru $k \geq 1$:

$$\Gamma(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}{v(k) + [1 - \alpha(k)v(k)]\boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}; \quad (3.24)$$

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{P}(k-1) - \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)}{(\mathbf{v}^{-1}(k) - \alpha(k))^{-1} + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}; \quad (3.25)$$

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + \boldsymbol{\Gamma}(k)[y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k-1)]. \quad (3.26)$$

Parametrii ecuațiilor de mai sus (variabili în timp discret) sunt următorii:

- $\boldsymbol{\theta}$ = vectorul parametrilor estimați ai modelului;
- $\boldsymbol{\Gamma}$ = vectorul câștig;
- \mathbf{P} = matricea de autocovarianță a erorii de estimare;
- $\boldsymbol{\varphi}$ = vectorul regresorilor (format din date măsurate);
- \mathbf{v} = scalar de ponderare a erorilor de predicție;
- α = scalar de corecție a matricii de autocovarianță.

De regulă, procedeul iterativ (3.24)-(3.26) este inițializat cu $\boldsymbol{\theta}(0)$ și $\mathbf{P}(0)$ alese în funcție de informațiile preliminare legate de cutia neagră.

3.6.3. Modele parametrice neliniare de tip “cutie neagră”

Fenomenele neliniare pot fi modelate cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale (RNA) [DuHa96]. Acestea reproduc (cu o precizie limitată) câteva dintre proprietățile observate ale sistemului nervos biologic. Elementul cheie al RNA îl constituie structura sistemului de procesare a informației. Acest sistem este compus dintr-un număr mare de elemente de procesare puternic interconectate, care sunt asemenea neuronilor sistemului nervos și sunt legate între ele prin conexiuni ponderate, simulând funcționarea sinapselor.

Modelele neliniare autoregresive pot fi mai puternice decât modelele liniare, deoarece pot modela caracteristici fundamentale mai complexe ale datelor. Există un număr mare de topologii RNA, printre cele mai folosite fiind rețelele anticipative (de tip *feedforward*). În continuare, se va folosi o rețea de perceptroni multistrat cu funcția de activare *tanh* (tangentă hiperbolică). Acest tip de structuri s-au dovedit a fi aproximări cvasi-universale [HSWh89]. Aceasta înseamnă că aproape orice funcție vectorială \mathbf{f} (cu dimensiunea m) de variabilă vectorială \mathbf{u} (cu dimensiunea n) se poate aproxima cu o precizie controlată prin expresia:

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}) \cong \left[\sum_{j=1}^k v_{jl} \tau \left(\sum_{i=1}^n w_{ij} u_i - \theta_j \right) - \sigma_l \right]_{l \in \overline{1, m}}. \quad (3.27)$$

Parametrii aproximării (3.27) sunt următorii:

- τ = funcția *tanh*;
- k = numărul de straturi ascunse de neuroni (minimum unul);
- v_{jl}, w_{ij} – ponderi determinate adaptiv de funcția aproximată;
- θ_j, σ_l – deviații asumate.

Funcția neliniară \mathbf{f} este estimată pe baza eșantionării datelor, folosind tehnica de optimizare Lavenberg-Marquardt [MaD63], [DuHa96]. Rețelele neuronale prezintă totuși câteva neajunsuri majore:

1. Există funcții neliniare ce nu pot fi approximate (de exemplu, funcțiile lui Dirichlet, Hilbert, deRham, etc.).
2. În cazul utilizării unui număr mare de neuroni (pentru a asigura o precizie suficientă), este necesară achiziția un număr mare de date pentru reactualizarea ponderilor.
3. Probleme precum suprareglajul și extremele suboptimale ar putea să apară mai des decât în cazul liniar.

4. Metoda poate necesita un timp mare de calcul pentru antrenarea rețelei, care presupune învățarea prealabilă și adaptarea pe parcurs la comportamentul sistemului; aceasta ce conduce la restricții în ceea ce privește folosirea metodei în timp real.

3.7. Modele de creștere a plantelor în mediul de seră

3.7.1. Problema creșterii plantelor

Horticultorii, cercetătorii, ecologiștii și inginerii au la dispoziție o varietate de modele pentru abordarea problemei creșterii și dezvoltării plantelor. Tradițional, aceasta constă în asigurarea unui complex controlat de factori care influențează creșterea, astfel încât să se îndeplinească anumite criterii de performanțe. Printre performanțele dorite se pot menționa următoarele: familiarizarea plantei cu mediul de seră (*aclimatizarea*, în special în cazul plantelor exotice), asigurarea unei stări de sănătate normale a plantei și favorizarea unui ciclu normal de viață al plantei, independent de variațiile climatice din exteriorul serei. În subsidiar – și aceasta este problema abordată în cadrul proiectului – este uneori necesară construcția unui predictor cu ajutorul căruia să se poată prognoza maniera de creștere și, eventual, diferitele evenimente accidentale care au loc în viața plantei.

Modelele de creștere a plantelor se disting în funcție de: tipurile de culturi, modul de determinare (empiric sau procedural), tipul de climat în care evoluează plantele (exterior sau interior, temperat sau tropical, etc.), tipurile de submodele integrate în modelul de bază.

Majoritatea modelelor pentru culturi sunt bazate pe procese. În cadrul acestor modele, ratele de creștere și dezvoltare sunt derivate din principiile de bază ale fiziologiei plantelor, ale modului de încălzire și transferului de masă. Procesele tipice care au loc la nivelul unei plante sunt: *fotosinteza*, *respirația*, *creșterea* și *dezvoltarea*. Aceste procese sunt considerate diferențiat, în funcție de tipul de plantă luat în considerare și componenta de bază a acesteia – flori sau fructe.

Într-un model uzual de proces, plantele și mediul lor de creștere sunt considerate ca fiind volume de control, cu fluxuri de căldură și masă de intrare și de ieșire [BBC95]. Starea unui astfel de sistem este determinată de concentrațiile de căldură și masă, în care guvernează diferite fluxuri și procese fiziologice variate. La nivel celular, procesele fizice sunt aceleași pentru toate plantele. De aceea, în teorie, un singur model de proces poate modela orice tip de plantă, indiferent de mediu [BBC95]. În realitate însă, au loc interacțiuni complexe și neliniare între plante și mediul lor de creștere, predicția performanțelor de creștere a plantelor fiind, de multe ori, extrem de dificilă doar prin folosirea modelelor empirice simple [BBC95]. În plus, pentru fiecare cultură de plante există un scop economic diferit (fructe, flori, lemn, etc.) și, astfel, modelele proceselor trebuie să fie specifice culturii în cauză. Câteva dintre cele mai cunoscute modele generale de creștere (utilizate în special în spațiu deschis) sunt următoarele:

- modelul *TOMGRO* pentru roșii;
- modelul *Stockle-Riha* pentru arbori;
- modelul *HORTISIM* pentru culturi cu scop general.

Cu toate acestea, niciunul dintre modele menționate anterior nu poate fi folosit în mod particular, cu precizie foarte mare, pentru controlul sau predicția creșterii unui anumit tip de cultură într-o seră (de exemplu, în cadrul unei pepiniere de arbuști, de ciuperci comestibile sau de flori comerciale; pentru roșiile de seră, modelul *TOMGRO* funcționează însă cu destulă precizie). De aceea, în cazul plantelor de seră, cele 3 modele menționate mai sus au fost adaptate corespunzător, lor adăugându-li-se și modele specifice climatului de interior. De exemplu, o utilizare destul de largă o dovedesc modelele următoare:

- modelul *Bot* pentru climatul de seră [BoGPA83], ale cărui ecuații au fost utilizate pentru unele simulări ale transferului de căldură în cadrul serei;

- modelul *Stockle-Riha* pentru creșterea rapidă a arborilor [RiS04], care servește la simularea creșterii plantelor; modelul este integrat într-un produs software – GAPS – descris în manualul de utilizare [RiS04];
- modelul *HORTISIM* [GHC98], de asemenea integrat într-un produs software, care introduce chiar un limbaj de programare specific, numit *GUESS*; din acest motiv, modelul este cunoscut și sub numele de *GUESS*.

În aceeași secțiune, discuția va fi concentrată asupra analizei diferitelor modele de transfer de căldură în mediul de seră. Astfel, va fi utilizat un model cu 3 straturi, care poate fi utilizat în determinarea următoarelor variabile:

- fluxul de radiație din interiorul serei;
- influența transmisiei forțate de-a lungul suprafeței exterioare a materialului de separație (de exemplu, geam);
- convecția liberă de-a lungul suprafeței interioare a materialului de separație;
- convecția în mediul de seră, dominată de convecția stratului laminat și viteza relativ constantă a vântului.

Aceste variabile intră în componența ecuațiilor de echilibru energetic, în care nu poate fi folosită o conductanță constantă (înfrunzirea, condensarea sau radiația). Totodată, acestea au făcut obiectul unei analize numerice, cu scopul de a verifica validitatea ipotezei conductanței constante a boltei serei.

Modelul de creștere rapidă *Stockle-Riha* este un model de producție a biomasei pentru arbuști, fiind destinat mai degrabă uzului extern, în aer liber. Acest model constituie totuși punctul de plecare pentru modelul *GUESS* și ajută la dozarea corectă a energiilor într-o seră. Ecuațiile și procesele utilizate în modelul *Stockle-Riha* au fost adaptate pentru folosirea în spațiu închis (seră). Astfel, efectele climatului atmosferic vor fi ignorate, iar umiditatea solului va fi considerată relativ constantă.

Cele două modele se referă la creșterea plantelor și includ următoarele sub-modele:

- cel asociat boltei serei, care determină iradierea medie pentru frunzele aflate la diferite stadii de creștere;
- cel asociat fotosintezei, care folosește fie ecuații specifice pentru a determina rata de carbon asimilat de frunzele aflate în diferite stadii de creștere (de exemplu, ecuații de tip Farquhar);
- cel asociat respirației, care ajută la evaluarea cantității de scurgere de CO_2 din sinteza noilor țesuturi și a cantității menținute de cele vechi;
- cel asociat evaluării cantității de carbon rămase în țesuturi.

O modalitate de implementare a acestor modele este aceea de a nu mai utiliza limbaje bazate pe text, ci folosirea unor limbaje grafice, mult mai expresive și conviviale, precum LabVIEW sau SIMULINK.

3.7.2. Ecuații generale de transfer

Dezvoltarea unui model de creștere a plantelor pornește, în general, de la conceptele de bază asupra transferului de căldură și masă. Aceste concepte sunt exprimate prin ecuații care descriu transportul și procesele fiziologice din cadrul unei sere. Diversele procese care au loc în cadrul unei sere sunt modelate ținând cont de echilibrul masă-energie. Toate componentele sistemului sunt considerate ca fiind o colecție de *cutii negre*, care corespund căldurii (temperatura), masei (umiditatea, carbonul fixat pentru plante, CO_2) sau condițiilor climatice (vântul, presiunea, umiditatea). În interiorul acestor module, condițiile sistemului sunt descrise doar de către variabilele de stare, iar la exterior sunt modelate doar fluxurile de intrare și de ieșire.

Ecuațiile de conservare sunt utilizate pentru a modela rata de schimbare a stării sistemului. Astfel, în cazul unei sere, variabilele de stare sunt: temperatura, umiditatea,

radiația activă pentru fotosinteză și cantitatea (abundența) sau concentrația de CO₂. Pentru plante, variabilele de stare sunt: cantitatea de apă, temperatura, biomasa și concentrația internă de CO₂.

Ecuția generală care exprimă transportul unei cantități scalare Φ (căldură, masă, energie, etc.) într-o încăpere de volum determinat este următoarea:

$$CV \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \int_{C_s} \left\langle \nabla \Phi, \underbrace{\text{Pr}_n \mathbf{v}}_{\text{adectiv}} + \underbrace{\rho \mathbf{k}}_{\text{conductiv}} \right\rangle + \int_{C_v} Q_{net}, \quad (3.28)$$

unde:

- C este capacitanța, V este volumul încăperii, t este timpul;
- $\nabla \Phi$ este gradientul spațial al lui Φ (care înglobează derivatele parțiale în raport cu cele 3 axe din spațiul euclidian), privit ca o funcție de potențial al transferului;
- $\langle \cdot, \cdot \rangle$ este produsul scalar dintre doi vectori;
- \mathbf{v} este vectorul viteză de advecție;
- \mathbf{n} este vectorul unitate de-a lungul normalei la suprafață;
- Pr este operatorul de proiecție, \mathbf{k} este vectorul de conductivitate;
- ρ este densitatea mediului intern al încăperii;
- Q_{net} este o mărime care depinde atât de rata de producere a cantității Φ pe unitatea de volum de către o anumită sursă, cât și de capacitatea de absorbție a mediului încăperii;
- C_s și C_v sunt unități de suprafață, respectiv volum.

Factorul adectiv din ecuația (3.28) este obținut prin proiecția vitezei de advecție pe normala la suprafața de advecție, urmată de evaluarea produsului scalar dintre gradientul lui $\nabla \Phi$ și vectorul de proiecție rezultat.

Utilizînd echilibrul masă-energie, sistemul de ecuații diferențiale de ordinul II (3.28) (eliminarea integralelor conduce la derivate de ordin II) se poate reduce la un sistem de ecuații diferențiale de ordinul I, chiar dacă acestea sunt neliniare în timp. Astfel, o altă formă (simplificată) a ecuației (3.28) este următoarea:

$$CV \frac{\partial \Phi}{\partial t} = A (F_{int rare} - F_{ieșire}) + V (Q_{sursă} - Q_{efect}), \quad (3.29)$$

unde Φ este, de data acesta, o cantitate asociată stării sistemului încăperii, A este suprafața de flux (suprafață de control), F_* desemnează fluxul (de intrare sau de ieșire), iar Q_* este un termen intern de creare sau distrugere a entității care face obiectul transferului (căldură, energie, masă, etc.).

În particular, funcțiile potențiale considerate sunt următoarele: pentru moment – viteza, pentru căldură – temperatura, iar pentru masă – concentrația. În ceea ce privește doar căldura și masa, ecuația (3.28) devine liniară, iar pentru viteză se poate folosi ecuația neliniară Navier-Stokes. În cazul modelului GUESS, sunt luate în considerare doar masa și echilibrul energetic, complexitatea adăugată de moment fiind ignorată.

3.7.3. Modele ale transferului de căldură

Căldura este degajată de un obiect, la nivelul marginilor sale, prin fenomene de: *conducție* a unui fluid care se deplasează la suprafață, *advecție* a unui fluid care se deplasează prin obiectul respectiv, *radiație* a undelor electromagnetice.

Datorită conducției sau difuziei moleculare, căldura poate fi degajată prin pereții unui obiect. Acest proces se supune legii Fourier și poate fi modelat folosind legea lui Ohm, obținându-se astfel fluxul de căldură prin conducție $Q_{1 \rightarrow 2}$ [W], între două puncte cu temperaturile T_1 , respectiv T_2 (măsurate în grade Kelvin):

$$Q_{1 \rightarrow 2} = UA(T_1 - T_2), \quad (3.30)$$

unde U este o mărime de conversie de la unitatea de măsură a conductanței termice (exprimată în unități de măsură ale vitezei [m/s]) la unitatea de măsură a fluxului termic [W] (adică [J/s]). Ea se mai numește și *rezistență de convecție*. Astfel,

$$U = \rho C_p g_{\text{caldură}} [\text{W/m}^2/\text{K}], \quad (3.31)$$

unde ρ [kg/m³] este densitatea, C_p [J/kg/K] este căldura specifică a mediului de conducție, iar $g_{\text{caldură}}$ [m/s] este conductanța termică (exprimată în unități de măsură ale vitezei).

Advecția reprezintă transportul de căldură și masă a unui fluid ce se deplasează prin unitatea de volum. Acest flux de fluid, care atinge pereții unui obiect, conduce la un transfer de căldură proporțional cu produsul dintre componenta normală la suprafață a vitezei fluidului și gradientul de temperatură:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \langle \mathbf{v}, \mathbf{n} \rangle C_p A (T_1 - T_2), \quad (3.32)$$

unde C_p reprezintă capacitatea volumetrică de încălzire.

Rezistența marginilor unui obiect la difuzia de căldură este modelată cu ajutorul *numărului Nusselt*:

$$Nu = \frac{g_{\text{caldură}}}{kL}, \quad (3.33)$$

unde k reprezintă difuzia termică, iar L este lungimea totală a obiectului.

Există două forme de *convecție*:

- *forțată*, indusă de forțele de inerție și dependentă de numărul lui Reynolds:

$$Re = \frac{vl}{\nu_c} \cong 8.31434 [\text{J/mol}], \quad (3.34)$$

unde ν [m/s] este valoarea vitezei, l [m] este scala de lungime, iar ν_c [mol·s/kg] este vîscozitatea cinematică;

- *naturală*, indusă de forța ascendentă și dependentă de numărul lui Grashof:

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta T}{\nu_c^2} [\text{kg}^2 \text{m}^4 / \text{mol}^2 / \text{s}^4], \quad (3.35)$$

unde: $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ este expansivitatea termică, g este accelerația gravitațională.

(Pentru un gaz ideal, $\beta = \frac{1}{T}$ și $Gr = \frac{\beta g l^3 |T_s - T_a|}{\nu_c^2 T_a}$, unde T este temperatura fluidului,

iar T_s este temperatura suprafeței.)

Rezultatul final îl constituie faptul că rezistențele pentru convecție nu au proprietăți constante ca în cazul conducției, însă depind neliniar de gradientul de temperatură (în ceea ce privește convecția naturală ($\sim T^{1/4}$ sau $\sim T^{1/3}$)) sau de viteză (în ceea ce privește convecția forțată ($\sim \nu^{0.5}$ sau $\sim \nu^{0.8}$)).

În ceea ce privește radiația, schimbul de radiație urmărește legea lui Stefan. Astfel, radiația admisă de o suprafață este proporțională cu temperatura la puterea a 4-a. Din cauza acestui fapt, schimbul de radiație între două suprafețe nu se supune legii lui Ohm, de aceea trebuie exprimat diferit față de celelalte procese menționate:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \sigma \varepsilon_1 F_{1 \rightarrow 2} T_1^4; \quad Q_{2 \rightarrow 1} = \sigma \varepsilon_2 F_{2 \rightarrow 1} T_2^4; \quad Q_{net} = \sigma \varepsilon_{med} F_{med} (T_1^4 - T_2^4), \quad (3.36)$$

unde $\sigma \cong 5.66961 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{K}^4/\text{m}^2\text{]}$ este constanta Stefan-Boltzmann, ε_* reprezintă factorii de emisie, iar F_* reprezintă factorii de expunere.

Pentru o seră, transferul de căldură include toate modurile principale: conducție, convecție (naturală sau forțată) și radiație. Sursele de căldură pot fi: radiația solară (unde scurte), luminozitatea și condensarea. În [Figura 3.8](#), se observă modul în care au loc conducția și ventilația, în cadrul unei sere [\[AlBa94\]](#).

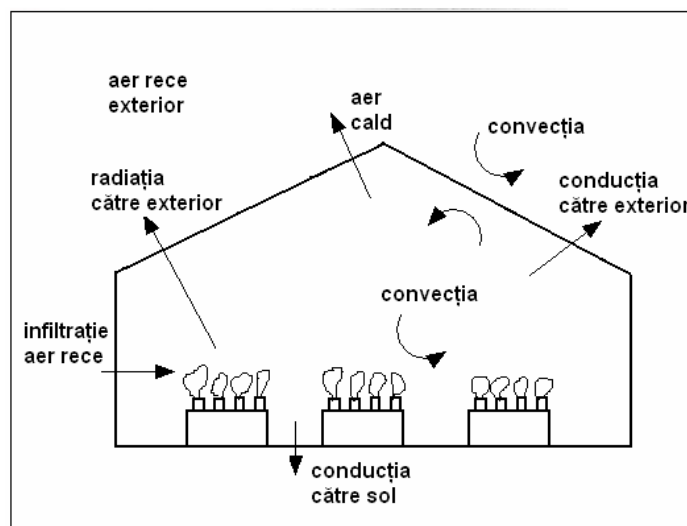


Figura 3.8. Schema transferului de căldură din sere.

Prin plafonul unei sere, o parte din radiația solară este reflectată, iar o altă parte este absorbită. Radiația absorbită este convertită în căldură (sensibilă sau latentă). Cu toate că ecuația Fresnel și ecuația radiației incidente pentru suprafețe înclinate pot fi utilizate pentru exprimarea unui model al transmisivității acoperișului serei, acest lucru conduce la o manieră foarte dificilă de modelare, din cauza complexității ridicate a acestora. De aceea, se pot folosi serii Taylor regresive pentru a obține formulele aplicate în modelul GUESS pentru calcularea transmisivității:

$$\tau_{total} = (1 - f_{dif}) \tau_b + f_{dif} \tau_d, \quad (3.37)$$

$$\tau_b(\alpha) = \tau_1 + \tau_2 \sin^{1-n}(\alpha) + \tau_3 \sin\left(\frac{2\beta}{\pi} \alpha\right), \quad (3.38)$$

unde:

- τ_{total} reprezintă transmisivitatea totală a geamului, formată din transmisivitatea directă τ_b și transmisivitatea difuză τ_d ;
- f_{dif} este fracția radiației difuze;
- α este unghiul de altitudine (declinație) solară;
- τ_1 este transmisivitatea directă la răsăritul soarelui;
- τ_2 se referă la modificarea transmisivității odată cu modificarea poziției soarelui;
- τ_3 ia în considerare influența gradului de înclinare a acoperișului asupra transmisivității;
- β este capacitatea de absorbție;
- n este exponentul de material.

Pentru modelul GUESS, în cazul acestor relații, se folosesc următoarele valori: $\tau_1 = 0.5$, $\tau_2 = 0.3$, $\tau_3 = 0.07$ și $n = 0.5$.

Un alt tip de transfer de căldură provenită de la radiația solară îl constituie emisiile termice ale corpurilor de culoare neagră. Suprafețele cu care sunt acoperite serele diferă din punctul de vedere al transmisivității și emit radiație termică la nivel asemănător unui corp negru, cu câteva excepții reprezentate de suprafața de polietilenă și cea de metal necolorat. Dacă se presupune că suprafețele interioare ale serei au aceeași temperatură cu aerul, atunci fluxurile radiative de unde lungi pot fi exprimate prin relațiile următoare (cu notațiile din ecuațiile (3.36)):

$$Q_{lw \text{ boltă}} = \sigma F_{\text{boltă}} \varepsilon_{\text{boltă}} (T_{\text{aer}}^4 - T_{\text{boltă}}^4), \quad (3.39)$$

$$Q_{lw \text{ cer}} = \sigma F_{\text{cer}} (1 - \varepsilon_{\text{boltă}}) (T_{\text{aer}}^4 - T_{\text{cer}}^4), \quad (3.40)$$

unde indicele lw provine de la termenul englezesc *long waves* (unde lungi). Temperatura aerului serei este T_{aer} , cea a separației cu exteriorul – $T_{\text{boltă}}$, iar cea exterioară – T_{cer} . Factorul de expunere, F_{cer} , dintre seră și cer este 1, același ca în cazul unui obiect complet închis. De asemenea, factorul de expunere dintre sol și acoperișul serei, $F_{\text{boltă}}$, are tot valoarea 1, deși în mod uzual valoarea este inferioară (aproximativ 0.8).

O altă exprimare a ecuațiilor (3.39) și (3.40) poate fi următoarea:

$$-Q_{lw} = (1 - \varepsilon_{\text{boltă}}) h_{r \text{ cer}} (T_{\text{aer}} - T_{\text{cer}}) + \varepsilon_{\text{boltă}} h_{r \text{ boltă}} (T_{\text{aer}} - T_{\text{sticlă}}), \quad (3.41)$$

unde $h_{r \text{ cer}}$ și $h_{r \text{ boltă}}$ reprezintă coeficienți de dilatare binomială. În mod normal, aceștia se obțin din ecuațiile (3.36), prin împărțirea la diferența de temperatură dintre cele două medii. De regulă, însă coeficienții de dilatare binomială sunt tabelati în diferite cataloage.

Conducția reprezintă o modalitate de transfer de căldură între mediul de seră și exterior. Conducția are loc între planșeul serei și sol, precum și între aerul interior și aerul exterior serei. Fluxul conductiv de căldură se poate exprima ca mai jos (conform ecuației (3.30)):

$$Q_{\text{cond}} = UA_{\text{boltă}} (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}) + UA_{\text{planșeu}} (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}), \quad (3.42)$$

unde T_{in} și T_{ext} sunt temperaturile din interiorul, respectiv exteriorul serei. Pentru diferite tipuri de materiale, valorile în $[W/m^2/K]$ rezistenței de convecție U pot fi: 8.8 – în cazul unui singur strat de sticlă; 7.9 – în cazul a două straturi de sticlă, etc. Termenul care se referă la planșeul serei are o importanță mărită, pentru că include efectele conducției statice și dinamice a căldurii. În modelul GUESS se folosește, în acest caz, un model cu pierdere de contur.

$$Q_{\text{contur}} = U_{\text{contur}} P_{\text{planșeu}} L_{\text{contur}} (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}), \quad (3.43)$$

unde $P_{\text{planșeu}}$ este perimetrul planșeului, iar L_{contur} este lățimea conturului acestuia. Coeficientul pierderii de contur este o funcție dependentă de adâncimea fundației și de capacitățile solului și planșeului. În acest sens, proceduri detaliate de calcul pot fi găsite în [ASH01]. Modelul conducției se folosește pentru reprezentarea transferurilor de căldură și masă în cadrul modelului GUESS. Valorile rezistențelor liniare se presupun a fi constante, iar rezistențele neliniare sunt funcții simple de temperatură.

În ceea ce privește convecția, majoritatea rezistențelor de convecție se întâlnesc la culturile de seră de-a lungul pereților interiori și exteriori ai plafonului serei. Convecția de-a lungul peretelui exterior este exprimată ca o convecție forțată: $R^{-1} \sim w^{0.8}$ sau $R^{-1} \sim w$, unde w este viteza vântului [BoGPA83], [KuK89]. Convecția de-a lungul peretelui interior

este exprimată ca una naturală: $R^{-1} \sim (T_{sticlă} - T_{interior})^{1/3}$. Convecția la nivelul culturii este exprimată ca o convecție mixtă, forțată și naturală, avînd expresia $R^{-1} \sim \Delta T^{1/4}$.

3.7.4. Modelul factorului de expunere

Factorul de expunere a obiectului B prin obiectul A este o fracție a fluxului total emis de obiectul B și absorbit de obiectul A . Factorul de expunere de la o suprafață gri la alta reprezintă raportul dintre proiecția suprafeței care transmite pe suprafața receptoare și totalul suprafeței receptoare. În cazul în care sunt luate în considerare doar două obiecte, raportul factorilor de expunere îl constituie doar suprafețele proiectate.

$$\frac{F_{1 \rightarrow 2}}{F_{2 \rightarrow 1}} = \frac{A_2}{A_1}. \quad (3.44)$$

De cele mai multe ori, determinarea factorilor de expunere necesită un calcul laborios. Pentru câteva geometrii simple există soluții analitice, care pot fi găsite în literatura de specialitate, de exemplu în [MoUn90], [AILD90], [ASH01].

3.7.5. Modelului gradului de emisie

Gradul de emisie reprezintă raportul dintre fluxul unui obiect obișnuit și un corp idealizat de culoare neagră. El are următoarea expresie:

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{corp_negru}}, \text{ unde } Q_{corp_negru} = \sigma T^4, \quad (3.45)$$

iar $\sigma \cong 5.66961 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{K}^4/\text{m}^2]$ este constanta Stefan-Boltzmann.

Pentru două sau mai multe suprafețe care schimbă între ele radiație, emisia totală sau medie poate fi exprimată astfel:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1. \quad (3.46)$$

3.7.6. Modele de radiație

Pentru diferențe mici de temperatură, similare celor întâlnite în cele mai multe sisteme de mediu, transferul de radiație poate fi aproximat cu un proces liniar conductiv. Împărțind ecuațiile (3.36) la diferența de temperatură, se obțin 3 *coeficienți de dilatare binomială*, din care se elimină termenii de ordin mare:

$$h_{r \ 1 \leftrightarrow 2} \approx 4\sigma F_* \varepsilon_* T_{bază}^3, \text{ unde } T_{bază} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (3.47)$$

Utilizarea temperaturii medii dintre cele două suprafețe considerate ($T_{bază}$) în ecuația (3.40) conduce la o acuratețe de $\pm 5\%$, pentru condiții obișnuite de mediu. Acest proces se supune legilor lui Ohm, întrucît Q este acum o funcție liniară explicită de diferența de temperatură $\Delta T/R$. Mărimea R este constantă pentru orice valoare a temperaturii de bază. Rezistența radiației poate fi pusă în serie sau paralel ca rezistență conductivă sau convectivă, iar valoarea lui h_r se poate determina din cataloage, în locul rezolvării individuale a ecuației fiecărui flux.

Radiația poate fi împărțită în două părți: difuză și directă. Radiația directă este unidirecțională și prezintă efect de umbră. Pe de altă parte, radiația difuză este distribuită aleator, nu prezintă efect de umbră și nici preferință direcțională.

Datorită naturii direcționale, absorbția radiației directe este caracterizată de o dependență unghiulară mare. Radiația solară și lumina artificială presupun producerea unei difuzii mixte și a radiației directe. Se presupune că radiația termică a suprafețelor este difuză. Fluxul radiației directe absorbite de o suprafață neagră este calculat folosind legea lui Lambert Cosine [MoUn90]:

$$Q = I\alpha(\phi)\cos(\phi), \quad (3.48)$$

unde I este fluxul direct total, α reprezintă absorbția, iar ϕ este unghiul de incidență.

Pentru suprafețe difuze, precum materialele biologice, transmisivitatea, capacitatea de reflectare și absorbția sunt independente de unghiul de incidență. Pentru suprafețe lucioase, precum metalul, sticla sau lichidul, acestea sunt dependente de valori mari ale unghiului de incidență. În situația în care o suprafață lucioasă este luminată de radiația difuză izotropică (toate unghiurile de incidență sunt egale), proprietățile radiației sunt unghiular independente. Acest lucru este reprezentat prin legea lui Kirchhoff, care exprimă relația dintre transmisivitate, capacitatea de reflectare, absorbție și emisie:

$$\begin{cases} \tau + \rho + \beta = 1 \\ \varepsilon = \alpha \end{cases}. \quad (3.49)$$

Pentru majoritatea materialelor lucioase obișnuite, transmisivitatea și capacitatea de reflecție pot fi calculate folosind legea lui Fresnel [BoGPA83], însă seria Fourier sau legea puterii trigonometrice sunt, în cele mai multe cazuri, suficient de precise. Ecuația de mai jos exprimă valorile transmisivității sticlei [ASH01]:

$$\tau(\alpha) = \tau_{\perp} \cos^{1/n}(\phi), \quad (3.50)$$

unde α este deviația unghiulară, τ_{\perp} este transmisivitatea normală, iar n este un exponent material, care, în cazul sticlei, ia valoarea 2.

Datorită diferențelor de transmisie, este important să se distingă între radiațiile solare difuză și directă. În modelul GUESS, radiația solară difuză este considerată izotropică și independentă de altitudinea solară. Situația cea mai favorabilă este cea în care fluxurile radiațiilor directă și difuză sunt măsurate separat. De cele mai multe ori, doar radiația solară globală este disponibilă și aceasta trebuie separată în cele două componenete ale sale (difuză și directă). Cantitatea de radiație difuză disponibilă depinde de vizibilitatea din atmosferă. Datorită faptului că acest lucru nu poate fi prognozat, se folosește o variabilă reprezentativă numită *indice de claritate* k_t , ce reprezintă raportul dintre radiația solară globală la nivelul solului și radiația solară din atmosferă:

$$k_t = \frac{Solar_{global, teren}}{Solar_{ET}}. \quad (3.51)$$

Numitorul $Solar_{ET}$ din raportul (3.51) se referă la radiația atmosferică asupra unei suprafețe plane. În modelul GUESS, această mărime este calculată folosind formule unghiulare standard [MoUn90], considerînd constanta solară cu valoarea de 1360 Wm^2 . Folosind ecuația (3.51), fracția radiației difuze este determinată folosind relația de mai jos:

$$f_{difuz} = 0.9511 - 0.1604k_t + 4.388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.3364k_t^4. \quad (3.52)$$

Se presupune că în materiale precum lichidele sau gazele, emisia, reflecția, dispersia și absorbția sunt procese de ordinul 1 și de aceea se supun legii exponențiale a lui Beer:

$$I = I_0 e^{-kl}, \quad (3.53)$$

unde k este coeficientul de atenuare, iar l este lungimea distanței parcurse.

Înlocuind I_0 cu emisia corpurilor negre ideale, se poate obține capacitatea de emisie efectivă a unui corp gri de grosime L , la temperatura T .

Pentru radiația difuză se poate aplica legea lui Beer în vederea determinării capacității de transmisie și a unghiului azimut. Rezultatul este integrat peste domeniul vizual, pentru a obține cantitatea totală de radiație difuză transmisă.

$$\tau_{difuz} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \tau(\varphi, \theta) \sin(\varphi) \cos(\theta) d\varphi d\theta, \quad (3.54)$$

unde τ este capacitatea de transmisie difuză, φ este unghiul de azimut, iar θ este unghiul de înclinație.

În sensul cel mai strict, legea lui Beer se aplică numai pentru materiale uniform-continue, însă, prin calcule statistice, se poate folosi pentru determinarea directă a atenuării razelor în materiale eterogene precum culturile de arbuști. Dacă o suprafață de arie A cultivată cu arbuști este compusă din N frunze opace, dispuse aleator, care formează o suprafață de arie F_N , proiectate în direcția razelor, atunci probabilitatea transmisiei de lumină se calculează simplu prin:

$$\tau = \left(1 - \frac{F_N}{A}\right)^N. \quad (3.55)$$

Cu cât frunzele sunt mai mici, cu atât transmisia de lumină aproximează statistic mai bine un proces Poisson și, astfel, se obține următoarea analogie a legii lui Beer:

$$\tau = e^{-LAI}. \quad (3.56)$$

Pentru frunze transparente, cu coeficient de absorbție α , se folosește legea de variație:

$$\tau = e^{-\sqrt{\alpha} LAI}. \quad (3.57)$$

În ecuația (3.57), termenul cu radical provine din teoria Kubelka-Munk a reflecțiilor infinite [MoUn90], iar LAI este fluxul luminos (fotosintetic). Formulele de mai sus au derivat inițial din analiza frunzelor dispuse orizontal, dar pot fi extinse cu ușurință pentru dispunerea tridimensională a frunzelor, folosind coeficientul de atenuare $K(\Psi)$ (unde Ψ este unghiul zenit), ce reprezintă porțiunea din suprafața frunzei pe care se proiectează raza de lumină:

$$\tau = e^{-\sqrt{\alpha} LAI} K(\Psi). \quad (3.58)$$

Pentru radiația directă cu frunze distribuite sferic, coeficientul de atenuare este:

$$K(\Psi) = \frac{1}{2\cos(\Psi)}. \quad (3.59)$$

Pentru frunze nedispuse sferic, se poate folosi formula lui Campbell:

$$K(\Psi) = \frac{\sqrt{x^2 + \operatorname{tg}^2 \Psi}}{x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}}, \quad (3.60)$$

unde x este parametrul eliptic al boltei serei, cu valorile: 0 pentru dispunere verticală, 1 pentru dispunere sferică și ∞ pentru dispunere orizontală.

Capacitatea boltei serei de transmisie a radiației difuze se calculează folosind ecuațiile (3.54), (3.58) și (3.60).

Termenul folosit la echilibrul termic pentru pierderi, în cazul oricărei construcții, este pierderea radiației de unde lungi către cer. La fel ca în cazul radiației difuze, emisiile de

unde lungi sunt rareori disponibile în seturile de date meteorologice, putând fi modelate totuși din temperatura aerului, umiditate și gradul de acoperire a cerului.

În timp ce legea lui Beer poate fi folosită pentru a calcula emisiile atmosferice de unde lungi, legea lui Boltzmann este dificil de implementat. Pentru a folosi această lege, trebuie să se construiască o suprafață artificială care, asemenea unui corp negru, emite același nivel de radiație ca și atmosfera. Una dintre cele mai cunoscute astfel de corelații este cea implementată în modelul GUESS și dezvoltată de Brutsaert în 1975. Aceasta folosește presiunea vaporilor P_{aer} [kPa] și temperatura aerului T_{aer} [K]:

$$\varepsilon_{cer} = 1.72 \left(\frac{VP_{aer}}{T_{aer}} \right)^{1/7}. \quad (3.61)$$

Astfel, capacitatea de emisie a cerului senin este reglată corespunzător în cazul unui plafon de nori. Datorită faptului că datele plafonului de nori nu sunt întotdeauna disponibile, se folosește o relație care implică existența indexului de claritate [SuBr93]:

$$\varepsilon_{cer} = 1.02 \varepsilon_{cer_senin} k_t^{0.0227}. \quad (3.62)$$

În final se obține temperatura plafonului de nori ca fiind:

$$T_{cer} = \varepsilon_{cer}^{1/4} T_{aer}. \quad (3.63)$$

Utilizând legea lui Wien, radiația mediului într-o seră poate fi subdivizată în unde scurte și unde lungi. Mai mult decât atât, undele scurte pot fi împărțite, la rândul lor, în radiație activă fotosintetică (RAF), de bandă 400-700 nm, care se folosește pentru fotosinteză, și radiație în infraroșu (RIR), de bandă 700-5000 nm, care este absorbită precum căldura. Pentru lumina naturală, acestea pot fi considerate ca fiind 50% din energia totală, pentru fiecare bandă în parte – RAF și RIR. De obicei, fluxul RAF se măsoară în unități molare, $\mu\text{Einstein}$ [$\mu\text{moli}/\text{m}^2/\text{s}$].

3.7.7. Modelul gradului de umiditate

Există trei modalități de exprimare a conținutului de vaporii din aer:

- umiditatea relativă rh (raportul dintre presiunea de vaporii curentă și presiunea de vaporii saturată) este folosită pentru caracterizarea climatului;
- raportul de umiditate e (raportul dintre masa vaporilor de apă și masa de aer uscat) este foarte utilizat în diverse aplicații;
- deficitul presiunii de vaporii (diferența dintre saturație și presiunea de vaporii curentă) este folosit în cadrul problemelor de flux potențial de conducere precum evaporarea sau condensarea.

Definiția umidității relative este următoarea:

$$rh = \frac{VP}{VP_{sat}}, \quad (3.64)$$

unde VP este presiunea curentă de vaporii, iar VP_{sat} se referă la presiunea de vaporii în stare de saturație.

Raportul de umiditate se poate defini astfel:

$$e = \frac{\rho_{vaporii}}{\rho_{aer}} = \frac{29}{18} \frac{VP}{P_{atm}}, \quad (3.65)$$

unde P_{atm} este presiunea atmosferică, iar:

$$\rho_{vapori} = \frac{VP}{Re_{H_2O}T} \quad \& \quad \rho_{aer} = \frac{P_{atm}}{Re_{aer}T} \quad (3.66)$$

sunt numerele de kilomoli ale vaporilor, respectiv apei.

Presiunea de vapor saturată pentru un lichid poate fi determinată folosind relația Clasius-Clapeyron. Cu toate acestea, pentru vaporii de apă la temperatura de 20-100°C, o corelație mai exactă este oferită de catalogul ASHRAE [ASH01], care este folosit și în cazul modelului GUESS. Datorită neliniarităților exponențiale ale ecuației ce exprimă presiunea de vapor saturată, se folosește o interpolare liniară pentru determinarea valorilor intermediare. În anul 1983, Hyland și Wexler au propus următoarea expresie a presiunii de vapor la saturație în funcție de temperatură:

$$VP_{sat}(T) = \frac{1}{1000} \exp \left(-\frac{5800}{T} + 1.391 - 48.64T + 4.176E - 5T^2 - 1.445E^2 - 8T^3 + 6.546 \ln(T) \right), \quad (3.67)$$

unde E este o constantă.

Entalpia masei pentru aerul umed reprezintă suma dintre componentele latente și cele sensibile:

$$H = \lambda e + C_p T, \quad (3.68)$$

unde C_p este căldura specifică pentru presiune constantă, λ este căldura latentă pentru evaporare, iar e reprezintă raportul de umiditate definit în (3.65). Trebuie precizat că masa de aer este mult mai mare decât masa de vapor, astfel că e are valori relativ mici.

Pentru un proces adiabatic, scăderea temperaturii este proporțională cu creșterea raportului de umiditate. Temperatura va continua să scadă cât timp presiunea vaporilor este sub limita de saturație. Limita minimă de temperatură poartă numele de *temperatură de rădăcină umedă* și reprezintă singura proprietate a temperaturii și umidității aerului. Temperatura de rădăcină umedă poate fi determinată folosind următoarea ecuație:

$$rh_{aer} \cdot VP_{sat}(T_{aer}) - VP_{sat}(T_{bulb_umed}) = \gamma P_{atm} (T - T_{bulb_umed}), \quad (3.69)$$

unde γ este constanta psihometrică, iar presiunea atmosferică (P_{atm}) este exprimată în Pascali. Valoarea constantei psihometrice variază parțial cu temperatura. În modelul GUESS aceasta este stabilită la $6,64E - 4K^{-1}$.

Ca și în cazul presiunii saturate de vapor, în locul evaluărilor directe sunt folosite metode de căutare pentru aflarea temperaturii de rădăcină umedă și valoarea echivalentă pentru umiditatea absolută. În cazul unui proces adiabatic, rata adaosului de căldură este proporțională cu modificarea raportului de umiditate. Pentru o suprafață umedă luminată de o sursă de radiație constantă, se poate presupune că suprafața este la saturație și că suma schimbului de căldură sensibil și latent este egală cu radiația netă:

$$\lambda E + C = R_{net}. \quad (3.70)$$

Fluxurile de căldură sensibilă și latentă sunt definite ca mai jos:

$$C = \rho C_p \frac{T_0 - T_{aer}}{r_H}, \quad (3.71)$$

$$\lambda E = \rho C_p \frac{VP_{sat}(T_0) - VP_{aer}}{\gamma r_H}, \quad (3.72)$$

unde T_{aer} este temperatura aerului, T_{aer} este temperatura necunoscută a suprafeței, iar r_H este rezistența la difuzia umidității.

Liniazând termenul de căldură latentă:

$$\frac{VP_{sat}(T_{aer}) + \frac{VP_{sat}(T_{aer})}{dT}(T_0 - T_{aer}) - VP_{aer}}{\gamma r_H}, \quad (3.73)$$

calculînd diferența de temperatură:

$$T_{aer} - T_0 = \frac{r_H}{\rho C_P} (R_{net} - \lambda E), \quad (3.74)$$

și considerînd o rezistență adițională pentru transferul de vapori, se obține în cele din urmă ecuația Penman-Monteith, folosită pentru calculul transpirației plantelor:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot R_{net}}{\Delta + \gamma} + \frac{\rho C_P [VP_{sat}(T_{aer}) - VP_{aer}]}{r_H (\Delta + \gamma)} = \gamma^* \left[1 + \frac{r_{c,vapori}}{r_{a,căldură}} \right], \quad (3.75)$$

în care $\Delta = \frac{VP_{sat}}{dT}(T_{aer})$ este panta curbei de vapori saturați, γ^* este constanta psihometrică înmulțită cu presiunea atmosferică, $r_{a,căldură}$ este rezistența aerodinamică la transferul de căldură, iar $r_{c,vapori}$ este rezistența boltei la transferul de vapori. Radiația netă ce cade pe suprafață (R_{net}) se poate determina din ecuația echilibrului de radiație:

$$R_{net} = \alpha I - F_{boltă} \varepsilon_{boltă} (T_0^4 - T_{boltă}^4) - F_{cer} (1 - \varepsilon_{boltă}) (T_0^4 - T_{cer}^4). \quad (3.76)$$

Cu toate acestea, dezavantajul folosirii echilibrului de radiație pentru calcularea mărimii R_{net} este acela că sunt necesare cunoștințe despre temperatura de suprafață. Totodată, trebuie implementate și proceduri iterative de căutare pentru determinarea temperaturii de suprafață. Motivul pentru care este folosită ecuația Penman-Monteith (3.75) îl constituie determinarea expresiei explicite pentru fluxul de vapori. Se poate presupune, în schimb, că R_{net} este o radiație izotermică, adică egală cu radiația absorbită de suprafață, în cazul expunerii sale la temperatura respectivă. În emisia de radiații, diferența dintre temperatura aerului și temperatura unei suprafețe este calculată prin transformarea rezistenței radiative, $b_r(T_{aer})$, în $r_{a,căldură}$. Pentru suprafețe acoperite, mărimea b_r este, de multe ori, ignorată, întrucît acest lucru poate conduce la estimări mai bune în cazul evapo-transpirației.

Ecuația Penman-Monteith (3.75) poate fi folosită pentru estimarea fenomenului de evaporare în cazul unei suprafețe umede, precum lacuri sau suprafețe cultivate. În mediul de seră, putem presupune că aerul și apa sunt în echilibru, iar fluxul este condus prin radiație, în sens contrar deficitului presiunii de vapori. Ecuația Penman-Monteith se poate exprima atunci sub următoarea formă:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot R_{net}}{\Delta + \gamma^*}. \quad (3.77)$$

3.7.8. Modele de advecție (ventilație și infiltrație)

Advecția căldurii de-a lungul pereților serei poate fi considerată ca o sumă de două procese: ventilația și infiltrația. Acestea diferă între ele din punctul de vedere al

controlabilității, necesarului de energie și răspunsului la schimbările de presiune. Căldura degajată de un fluid este exprimată astfel:

$$Q = C_p \dot{V} \Delta T, \quad (3.78)$$

unde C_p este căldura specifică pentru presiune constantă, iar \dot{V} este viteza volumetrică (egală, în general, cu produsul dintre gradul de porozitate, suprafață și viteza medie).

Pentru o valoare precizată a temperaturii, advecția totală pentru pierderile de căldură se calculează pe baza fluxului de căldură care străbate un orificiu, reprezentat de viteza volumetrică. În acest caz,

$$\dot{V} = A_{\text{orificiu}} C_d \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^n, \quad (3.79)$$

unde: A_{orificiu} este suprafața orificiului, C_d este coeficientul de trecere (0.6 pentru orificii subțiri), Δp reprezintă căderea de presiune, ρ este densitatea, iar exponentul n poate lua diferite valori (0.67 pentru fisuri; 0.5 pentru orificii).

Procesul de ventilație necesită folosirea de energie deoarece poate fi controlat mecanic cu ajutorul unor ventilatoare sau poate fi indus în mod natural utilizând presiunea vântului sau gradientii de densitate. Viteza de ventilație este proporțională cu rădăcina pătrată a căderii de presiune.

Infiltrația este o consecință necontrolată și involuntară a materialelor și metodelor de construcție ale unei sere. Infiltrația este întotdeauna indusă de forțe naturale și nu necesită folosirea de energie. În general, ea este stabilită la o valoare constantă. Dacă este necesară o precizie de modelare mai mare, atunci rata locată de infiltrație poate fi evaluată astfel:

$$Inf = 100 \left(\frac{P_w}{P_{\text{atm}}} + \frac{\Delta \rho}{\rho_{\text{med}}} \right)^{2/3} [\%], \quad (3.80)$$

unde P_w este presiunea creată din cauza vântului, P_{atm} este presiunea atmosferică, $\Delta \rho$ este variația locală de densitate, iar ρ_{med} este densitatea medie a aerului din seră. În general primul termen al sumei din (3.80) este determinant și poate fi evaluat experimental. De regulă, contribuția celui de-al doilea termen este neglijată.

Tabelul 3.1 prezintă valorile recomandate ale vitezei vântului (în metri pe oră) pentru evaluarea ratelor de infiltrație ale mai multor tipuri de construcții [BBC95].

Tabelul 3.1. Valori tipice ale vitezei de infiltrație a aerului pentru diferite tipuri de sere.

Sistemul de construcție al serei	Viteza de infiltrație a aerului [m/h]
Construcție nouă, sticlă sau fibră de sticlă	0.75 – 1.5
Construcție nouă, strat dublu de plastic	0.5 – 1.0
Construcție veche, sticlă, bine întreținută	1 – 2
Construcție veche, sticlă, neîntreținută	2 – 4

Deoarece ventilația mecanică este produsă cu ajutorul ventilatoarelor, acest lucru implică un consum de energie. Puterea necesară deplasării masei de aer de către ventilator este dată de relația:

$$P = \eta \Delta p \dot{V}, \quad (3.81)$$

unde η reprezintă eficiența (randamentul) ventilatorului.

În modelul GUESS, când temperatura depășește valoarea de referință, ventilatorul este pornit, iar când temperatura scade sub valoarea de referință, ventilatorul este oprit. Astfel, comportamentul dinamic la un semnal de tip treaptă este reprezentat de caracteristica unui filtru trece-jos de ordinul 1 (ca în ecuațiile (3.82) de mai jos, exprimate în termeni de Transformată Laplace), în care F este ieșirea, G este intrarea, iar $1/\tau$ este constanta de timp:

$$\frac{F(s)}{G(s)} = \frac{\tau}{\tau + s}; \quad F(s) = \begin{cases} G(s) & , |sG(s)| < k_{rotire} \\ \frac{k_{rotire}}{s^2} & , |sG(s)| \geq k_{rotire} \end{cases}. \quad (3.82)$$

Presiunea vântului, care generează ventilația naturală, P_w , poate fi determinată folosind ecuația lui Bernoulli:

$$P_w = \frac{1}{2} K_p \rho w^2, \quad (3.83)$$

adică este proporțională cu pătratul vitezei acestuia (w) și cu densitatea ρ . În ecuația (3.83), K_p reprezintă coeficientul de presiune și este egal cu raportul dintre presiunea dinamică totală a vântului și presiunea înregistrată de traductorul montat în seră. Pentru a calcula viteza vântului se poate folosi următoarea relație:

$$\frac{w}{w_{ref}} = \left(\frac{h_w}{h_{ref}} \right)^a, \quad (3.84)$$

unde h_w este umiditatea produsă prin ventilația naturală, h_{ref} este umiditatea de referință, iar w_{ref} este viteza de referință a vântului de ventilație naturală (o medie evaluată experimental). Exponentul a variază în funcție de starea vremii, avînd valori cuprinse între 0.14 (la suprafața unei întinderi de apă sau gheață) și 0.4 (în zone urbane); pentru zonele rurale, exponentul a este între 0.2 și 0.3.

Pentru mișcările de aer de-a lungul pereților, coeficientul de presiune K_p poate fi calculat astfel:

$$K_p = 0.6 \cdot \ln \left[1.248 - 0.703 \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) - 1.175 \sin^2 \phi + 0.131 \sin^3(2\phi) + \right. \\ \left. + 0.769 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + 0.07 \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) + 0.717 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \right], \quad (3.85)$$

unde ϕ este unghiul mediu de incidență a curenților de aer cu pereții.

Adesea, pentru realizarea ventilației naturale se contruiesc ferestre care pot fi deschise în funcție de necesități. Ferestrele deschise pot fi considerate orificii, în acest caz fiind valabilă relația (3.79). Pentru fereastra numărul n , ecuația (3.79) revine la:

$$w_n = C_d \sqrt{\frac{\Delta p_n}{\rho}}, \quad (3.86)$$

unde Δp_n este diferența dintre presiunea exterioară a vântului și presiunea acestuia din interiorul serei. Aceasta din urmă depinde de viteza vântului de interior ca în ecuația (3.83):

$$P_{w,n} = \frac{1}{2} K_{p,n} \rho w_n^2. \quad (3.87)$$

Coeficientul de presiune $K_{p,n}$ poate fi determinat experimental (deși destul de dificil) sau, dacă sunt deschise cel puțin două ferestre, se utilizează condiția ca suma contribuțiilor tuturor ferestrelor să fie nulă:

$$\sum_{n=1}^N \rho w_n A_n = 0, \quad (3.88)$$

unde $N \geq 2$ este numărul total al ferestrelor deschise, iar A_n este aria ferestrei deschise numărul $n \in \overline{1, N}$.

Dacă se consideră deschise două ferestre care au aceeași suprafață A , atunci viteza volumetrică a ventilației naturale și cantitatea de căldură schimbată prin acest procedeu se pot evalua folosind următoarele ecuații [AILD90]:

$$\begin{cases} \dot{V}_{vent_naturală} = Aw \sqrt{\frac{(K_{p,1} - K_{p,2})^2}{|K_{p,1} - K_{p,2}|}} = Aw \sqrt{|K_{p,1} - K_{p,2}|} \\ Q_{vent_naturală} = \rho C_P (T_{int} - T_{ext}) \dot{V}_{vent_naturală} \end{cases} \quad (3.89)$$

Viteza vântului, w , se poate evalua la fel pentru ambele ferestre, considerînd media aritmetică a celor doi coeficienți de presiune.

3.7.9. Modele de evaporo-transpirație și condensare

Acești parametri reprezintă inter-schimbarea dintre căldura sensibilă și căldura latentă. Sursele principale de evaporare într-o seră sunt: răcirea prin evaporare, transpirația plantelor și evaporarea apei din sol.

Transpirația plantelor și evaporarea apei din sol pot fi modelate cu ajutorul ecuației Penman-Monteith (3.75), care prezintă două rezistențe la fluxul de vapor: rezistență aerodinamică și rezistența plantelor. Pornind de la transpirația plantelor la nivelul frunzelor și pînă la transpirația totală calculată pe o suprafață, se poate folosi o funcție de scalare, deoarece valorile radiației sunt măsurate la nivel de suprafață, deși transpirația are loc la nivel de frunză. În pofida faptului că ecuația Penman-Monteith este derivată pentru condiții meteorologice în aer liber, unde fenomenele sunt mult mai intense și rezistența aerodinamică mai mică, această ecuație poate fi folosită cu succes și în mediul de seră.

Într-o seră, turbulențele meteorologice sunt complet reduse, atenția fiind în acest caz concentrată asupra rezistenței aerodinamice. Pe de altă parte, viteza de deplasare a aerului este relativ constantă, importante fiind modalitățile de transfer de căldură, precum și convecția naturală și forțată.

Pentru cele mai multe culturi de seră, evaporarea apei din sol este modelată folosind ecuația Penman-Monteith avînd R_{net} egală cu suma valorilor radiațiilor neinterceptate sau emise de către plante, rezistența plantelor fiind stabilită la valoarea nulă. Apa din sol se evaporă la suprafața acestuia, de aceea trebuie luate în considerare corecțiile asupra umidității relative și ponderea masei la suprafață. În cazul în care se folosește un strat îngust de pământ pentru culturile din seră, aceste corecții pot fi eliminate [BoGPA83].

În modelul GUESS, încărcătura latentă datorată evapo-transpirației solului și plantelor, reprezentată de fluxurile de căldură și vapor, se poate exprima prin relațiile următoare:

$$Q_{ET} = -A_{planșeu} \eta_{utilizare} \lambda E = -\frac{\Delta \cdot R_{net}}{\Delta + \gamma^*}; \quad (3.90)$$

$$\dot{H}_{ET} = -A_{planșeu} \eta_{utilizare} E. \quad (3.91)$$

Indicele ET provine de la evaporo-transpirație. Atît fluxul de căldură Q_{ET} , cît și cel de vapori \dot{H}_{ET} sunt proporționale cu produsul dintre aria planșeului $A_{planșeu}$ și randamentul de utilizare $\eta_{utilizare}$ a efectelor evaporo-transpirației pentru reglarea parametrilor serei (temperatură, umiditate, etc.). De asemenea, ecuația Penman-Monteith a fost utilizată în varianta (3.77).

Așa cum arată relația (3.76), radiația izotermică netă poate fi folosită în locul radiației nete pentru a elimina calculul temperaturii de suprafață. În acest caz, radiația izotermică netă este calculată ca sumă a fluxurilor de unde scurte și unde lungi, ținând cont și de temperatura aerului:

$$R_{net} = \alpha I + h_{r,boltă} \varepsilon_{boltă} (T_{boltă}^4 - T_0^4) + h_{r,cer} (1 - \varepsilon_{boltă}) (T_{cer}^4 - T_0^4). \quad (3.92)$$

În interiorul unei sere, dispozitivele de răcire prin evaporare sunt utilizate pentru a reduce temperatura atunci când ventilația nu poate asigura creșterea optimă a plantelor. Cele mai multe metode de răcire prin evaporare pot fi modelate la fel ca procesele adiabactice. În modelul GUESS se folosesc dispozitive de producere a aburului, ca metodă de răcire prin evaporare. Aceste dispozitive răcesc și, totodată, umidifică aerul din interiorul serei. Procesul de producere a aburului este modelat asemănător transferului de masă dintre abur și aer. În acest caz, conductanța reprezintă produsul dintre conductivitatea vaporilor din stratul marginal și suprafața totală a zonei de ceață. Pentru determinarea fluxurilor de vapori și căldură, în ceea ce privește modelul sistemului de producere a aburului, se folosește legea lui Ohm astfel:

$$\dot{e} = k A_{net} [VP_{sat}(T_{abur}) - VP_{aer}], \quad (3.93)$$

unde temperatura aburului (T_{abur}) depinde atît de temperatura aerului din seră, cît și de umiditatea acestuia.

Fenomenul de condensare se realizează într-o manieră similară fenomenului de aburire, viteza de depunere fiind controlată de diferența dintre presiunea curentă de vapori și presiunea saturată de vapori de la nivelul pereților interiori ai serei. Temperatura de la nivelul pereților depinde atît de temperatura interioară, cît și de cea exterioară. În [BBC95], se presupune că temperatura medie a pereților reprezintă 2/3 din valoarea temperaturii exterioare și 1/3 din valoarea celei interioare. În general, temperatura plafonului se poate determina ca o medie ponderată a temperaturilor interioară și exterioară:

$$T_{plafon} = \frac{r_{conv,ext} + r_{cond,plafon}}{r_{conv,int} + r_{cond,plafon} + r_{conv,ext}} T_{int} + \frac{r_{conv,int}}{r_{conv,int} + r_{cond,plafon} + r_{conv,ext}} T_{ext}. \quad (3.94)$$

În estimarea (3.94), $r_{*,*}$ este rezistența la transfer prin diferite fenomene (convecție ($conv$) sau condensare ($cond$)), la nivelul diferitelor medii (interior (int), exterior (ext) sau plafon ($plafon$)). Se observă că în evaluarea ponderii temperaturii interioare contribuie 2 din cei 3 termeni rezistivi, în timp ce ponderea asociată temperaturii exterioare se evaluează doar cu ajutorul termenului rămas. Cu toate acestea, ponderea temperaturii interioare poate fi dublă față de cea a temperaturii exterioare, potrivit presupunerii din [BBC95].

Conductanța transferului de vapori de la nivelul pereților reprezintă o cauză a convecției naturale. Datorită suprafeței mari pe care o au pereții serei, convecția devine mai accentuată, iar relația care modelează conductanța este următoarea:

$$g_{cond} = 1.64E - 3\Delta T^{1/3}. \quad (3.95)$$

Ecuția (3.95) se obține din condițiile standard $T_{int} = 22^\circ\text{C}$ și $P_{atm} = 101\text{ kPa}$. Pentru a motiva creșterea convecției naturale cauzată de fluxul de masă și diferența de densitate, temperatura virtuală \tilde{T} este definită astfel, în funcție de temperatura reală T :

$$\tilde{T} = \frac{T}{1 - 0.379 \frac{VP}{P_{atm}}}. \quad (3.96)$$

Considerînd că ecuația (3.94) exprimă fluxul de căldură dintre interiorul și exteriorul peretelui de sticlă și luînd în calcul ecuațiile (3.95)-(3.96), expresiile pentru fluxul de apă și câștigul de căldură, în cazul condensării, sunt următoarele:

$$\left[\begin{aligned} \dot{e}_{cond} &= k_{cond} A_{plafon} \underbrace{\left(VP_{in} - VP_{sat}(T_{plafon}) \right)}_{\text{condensare}} \\ \dot{q}_{cond} &= \lambda \underbrace{\frac{r_{conv,ext} + r_{cond,plafon}}{r_{conv,in} + r_{cond,plafon} + r_{conv,ext}}}_{\text{cîștigul de căldură din condensare}} \cdot \dot{e}_{cond} \end{aligned} \right. \quad (3.97)$$

Pentru calculul temperaturii pereților este necesară relația ce exprimă echilibrul de energie între temperatura exterioară și cea interioară serei. În acest scop, se folosește funcția liniară propusă de Stanghellini în [BBC95] (o versiune simplificată a relației (3.94), de fapt):

$$T_{plafon} = \frac{2}{3}T_{ext} + \frac{1}{3}T_{int}. \quad (3.98)$$

3.7.10. Modele ale dispozitivelor de încălzire

Toate dispozitivele de încălzire folosite în cadrul modelului GUESS sunt considerate cu fluxuri constante pe fiecare treaptă de încălzire. Dacă se alege un dispozitiv cu 3 trepte de încălzire, atunci cantitatea de căldură pentru fiecare treaptă în parte este exprimată ca o fracțiune din căldura totală rezultată. Pentru a modela răspunsul dinamic la o intrare de tip treaptă, se folosește același model ca la dispozitivele de ventilare.

Necesarul de energie pentru dispozitivele de încălzire este format din: puterea necesară ventilatoarelor pentru a dirija forțat aerul și combustibilul ars pentru a produce căldura necesară. În cazul în care se folosește un sistem de încălzire bazat pe boiler cu gaz, o parte din cantitatea nearsă de gaz se reîntoarce în seră pentru a servi ca sursă de CO_2 . Căldura produsă pe unitatea de gaz arsă este modelată astfel:

$$h_{combustie} = LHV + \lambda\mu \cdot \left[\frac{36}{16}\mu^{-1} - e_{sat}(T_{tot}) \right] - (1 - \kappa)C_{p,aer}T_{tot}, \quad (3.99)$$

unde κ este concentrația de CO_2 returnată în seră, LHV este valoarea pragului minim de căldură, μ este raportul dintre cantitățile de aer și combustibil, $36/16$ este raportul de masă dintre vaporii de apă și gazul ars, $C_{p,aer}$ este căldura specifică a aerului pentru presiune constantă, iar T_{tot} este temperatura totală.

Pentru simplificarea calculelor, în modelul GUESS se folosesc două proceduri: comasarea dinamică și modelarea de echilibru static.

Conform rezultatelor din [BoGPA83], în cele mai multe sere, solul prezintă constante de timp mai mari decât aerul. În particular, se poate folosi un model static pentru temperatura frunzelor, cu scopul de a determina ratele de fotosinteză [RiS04]. Comasarea reprezintă o procedură de simplificare, caz în care se consideră că mai multe obiecte au aceeași temperatură, respectiv temperatura aerului. Această procedură se poate folosi cu succes pentru modelarea climatului serei. Astfel, în modelul GUESS, temperaturile diferitelor niveluri ale serei (planșeu, sol, etc.) pot fi *comasate* pentru a calcula o temperatură medie, care va fi atribuită aerului. În acest caz, modelul transferului de căldură considerat în GUESS este reprezentat în ecuația următoare:

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{\rho_{aer} V_{seră} C_{P,GH} \frac{dT_{int}}{dt}}^{\text{înmagazinat}} = \\
 & \underbrace{\alpha_{SW} \tau_{sticlă} I + Q_{disp_încălzire}}_{\text{dobândit}} + \underbrace{\frac{r_{conv,ext} + r_{cond,plafon}}{r_{conv,in} + r_{cond,plafon} + r_{conv,ext}} \lambda k_{cond} A_{plafon} (VP_{int} - VP_{sat}(T_{plafon}))}_{\text{condensare}} - \\
 & \underbrace{-h_{r,cer}(1 - \varepsilon_{plafon})(T_{int} - T_{cer}) - 0.8\varepsilon_{plafon} h_{r,plafon}(T_{int} - T_{plafon})}_{\text{pierdut unde lungi}} - \underbrace{A_{planșeu} \eta_{utiliz} \frac{\Delta \cdot R_{net}}{\Delta + \gamma^*}}_{\text{evapo-transpirație}} - \\
 & - \underbrace{\left[\frac{1}{r_{conv,in} + r_{cond,plafon} + r_{conv,ext}} A_{plafon} + U_{contur} P_{planșeu} L_{contur} \right] (T_{int} - T_{ext})}_{\text{pierdut conducție}} - \\
 & - \underbrace{\lambda k A_{net} (VP_{int}(T_{abur}) - VP_{aer})}_{\text{pierdut umidificatoare}} - \underbrace{\rho C_{P,aer} \dot{V}_{inf} (T_{int} - T_{ext}) - \rho C_{P,aer} \dot{V}_{vent} (T_{int} - T_{ext})}_{\text{pierdut advecție}},
 \end{aligned}
 \tag{3.100}$$

unde e_{sat} se referă la raportul umidității la saturație, dintre masa de vapori [kg] și masa de aer [kg].

În pofida complexității sale, modelul descris mai sus nu este în formă finală, deoarece temperatura T_{plafon} este necunoscută. Pentru aceasta este nevoie de un model separat, care poate fi static sau dinamic. Datorită radiației și convecției naturale, se folosește un model static neliniar, care implică soluționarea printr-o metodă de optimizare (de exemplu, metoda Newton-Raphson). Modelul dinamic este mai rapid pentru soluții individuale, nu necesită iterații, însă necesită un timp mai îndelungat pentru a deveni stabil. Metoda cea mai simplă, folosită și în modelul GUESS, este aceea de a combina conducția, convecția și conductanțele radiative ale plafonului serei într-o conductanță universală a plafonului.

Singurul mare dezavantaj al acestei metode îl constituie faptul că se ignoră efectele curentului de aer exterior și condițiile atmosferice în ceea ce privește ratele de transfer de căldură de la nivelul pereților serei. Astfel, pentru măsurători pe termen lung și studii de conservare a energie, conductanța universală este adecvată, însă pentru modele dinamice pe termen scurt, cu schimbări ale condițiilor atmosferice, apar erori semnificative.

3.7.11. Modele ale transferului de masă

Transferul de masă este similar transferului de căldură, putând fi descris folosind aceleași procese. Astfel, radiația poate fi ignorată, iar numărul lui Lewis poate fi utilizat pentru a converti mărimile din forma de căldură în forma de masă. Echilibrul de masă

poate fi îndeplinit pentru fiecare mărime de interes în parte. Pentru orice proces chimic care transformă o substanță în alta și orice proces fizic ce transformă un aspect al unei substanțe în altul, termenii sursei de reacție trebuie specificați. Deoarece multe dintre aceste procese se obțin prin degajare sau absorbție de căldură, iar reacțiile sunt puternic dependente de căldură, acești termeni pot fi incluși cu succes în transferul combinat de căldură și masă.

Transferul de masă în lichide sau medii poroase se realizează prin difuzie. Difuzia este un proces Ohmic, în care rata de transfer este proporțională cu gradientul de potențial. Conductanța pentru difuzie reprezintă raportul dintre capacitatea de difuzie D și scala de lungime l :

$$g = \frac{D}{l}. \quad (3.101)$$

Deoarece potențialul pentru transferul de masă este reprezentat de concentrație, apare necesară efectuarea conversiei dintre conductanța de tip viteză g (măsurată în [m/s]) și cea de tip molar g_{molar} (măsurată în [mol/m²/s]), aceasta fiind exprimată în 1991 de către H. Jones:

$$g_{molar} = g \frac{P}{ReT}, \quad (3.102)$$

unde P [kPa] este presiunea, Re este constanta lui Reynolds (din (3.34)), iar T [K] este temperatura. În condiții standard ($P = 101$ kPa și $T = 298$ K (adică 25°C)), ecuația (3.102) devine:

$$g_{molar} = 40.3 \cdot g. \quad (3.103)$$

Pentru a realiza conversia între conductanțele transferului de căldură și transferului de masă, se folosește numărul lui Lewis, Le . Există mai multe exprimări ale acestui număr, folosite în modelul GUESS (în funcție de maniera în care se realizează transferul de masă):

$$\left[\begin{array}{l} \frac{g_{masă}}{g_{căldură}} = Le \quad (\text{difuzie moleculară}) \\ \frac{g_{masă}}{g_{căldură}} = Le^{3/4} \quad (\text{convecție naturală}) \\ \frac{g_{masă}}{g_{căldură}} = Le^{2/3} \quad (\text{convecție forțată}) \\ \frac{g_{masă}}{g_{căldură}} = Le^{2/3} \quad (\text{convecție turbulentă}) \\ \frac{g_{masă}}{g_{căldură}} = Le^0 \quad (\text{turbulența unui curs de apă}) \end{array} \right. \quad (3.104)$$

În cadrul unei sere, climatul este influențat de două variabile importante participante la fenomene de transfer de masă: cantitatea de CO₂ și umiditatea (cantitatea de vapori de apă). Pentru simplificare, se pot ignora radiația și conducția. Astfel, pentru transferul de masă în cadrul unei sere, se iau în considerare doar procesele de ventilație și infiltrație.

Echilibrul de masă pentru umiditatea dintr-o seră poate fi exprimat de următoarea ecuație unificatoare (în care participă termeni ai modelelor descrise anterior):

$$\begin{aligned} \rho_{aer} V_{seră} \frac{de_{in}}{dt} = & -\dot{V}_{inf} \rho_{aer} (H_{int} - H_{ext}) - \dot{V}_{vent} \rho_{aer} (H_{int} - H_{ext}) + \underbrace{\frac{1}{\lambda} A_{planșeu} \eta_{utiliz} \frac{\Delta \cdot R_{net}}{\Delta + \gamma^*}}_{\text{evapo-transpirație}} - \\ & - \underbrace{k_{cond} A_{plafon} (VP_{in} - VP_{sat}(T_{plafon}))}_{\text{condensare}} + \underbrace{k A_{net} (VP_{sat}(T_{abur}) - VP_{aer})}_{\text{umidificatoare}} + \\ & - \underbrace{\kappa \mu e_{sat}(T_{tot}) \frac{Q_{căldură}}{h_{combustie}}}_{\text{combustie}}. \end{aligned} \quad (3.103)$$

Similar, echilibrul de masă pentru CO₂ poate fi scris astfel:

$$\begin{aligned} \rho_{aer} V_{seră} \frac{1000}{29} \frac{d\kappa_{CO_2int}}{dt} = & -\rho_{aer} \frac{1000}{29} (\dot{V}_{inf} + \dot{V}_{vent}) (\kappa_{CO_2int} - \kappa_{CO_2ext}) + \\ & + \dot{F}_{fotosinteză} - \dot{F}_{respirație} + \underbrace{\kappa v \frac{1000}{MW_{combustibil}} \frac{Q_{căldură}}{h_{combustie}}}_{\text{combustie}}, \end{aligned} \quad (3.104)$$

unde v reprezintă numărul de moli de carbon.

Pentru a determina echilibrul de masă de CO₂, trebuie avute în vedere fluxurile fiziologice $F_{fotosinteză}$ și $F_{respirație}$, care pot fi calculate pe baza unui model de proces de creștere a plantelor. De asemenea, se remarcă faptul că echilibrul de masă pentru CO₂ este exprimat în unități molare ale concentrației, în timp ce modelele de fotosinteză sunt exprimate în unități molare de lumină și CO₂.

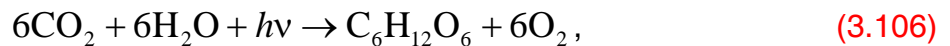
3.7.12. Modele ale procesului de creștere a plantelor

Un model complet pentru seră nu trebuie să descrie doar sistemul de control al climatului serei, ci și procesul de creștere a plantelor. Viteza de creștere a plantelor se referă la achiziția de biomasă. În termeni simplificați aceasta reprezintă echilibrul de masă al carbonului. Carbonul este achiziționat din atmosferă prin fotosinteză și transformat în carbohidrați. O parte dintre acești carbohidrați sunt returnați în atmosferă prin respirație, iar ceea ce rămâne se folosește la sintetizarea noii biomase. Ecuația care descrie sintetic acest proces este următoarea:

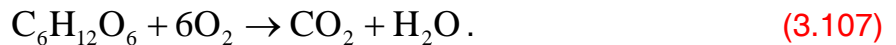
$$\frac{dM}{dt} = C(P - R), \quad (3.105)$$

unde M reprezintă echilibrul de biomasă, P este fotosinteza, iar C este conversia din CO₂ în biomasă.

Reacția chimică pentru fotosinteză are următoarea exprimare:



în timp ce respirația este rezultatul următoarei reacții chimice:



Fotosinteza este un proces mult mai complex decât sugerează reacția (3.106). Fixarea cantității de CO₂ și conversia în carbohidrați nu reprezintă doar o singură reacție, ci o serie de etape constituite în așa-numitul *ciclu Calvin*, modelat de Farquhar și dePury în 1997 [FadPu97], ca în schema ilustrată de Figura 3.9.

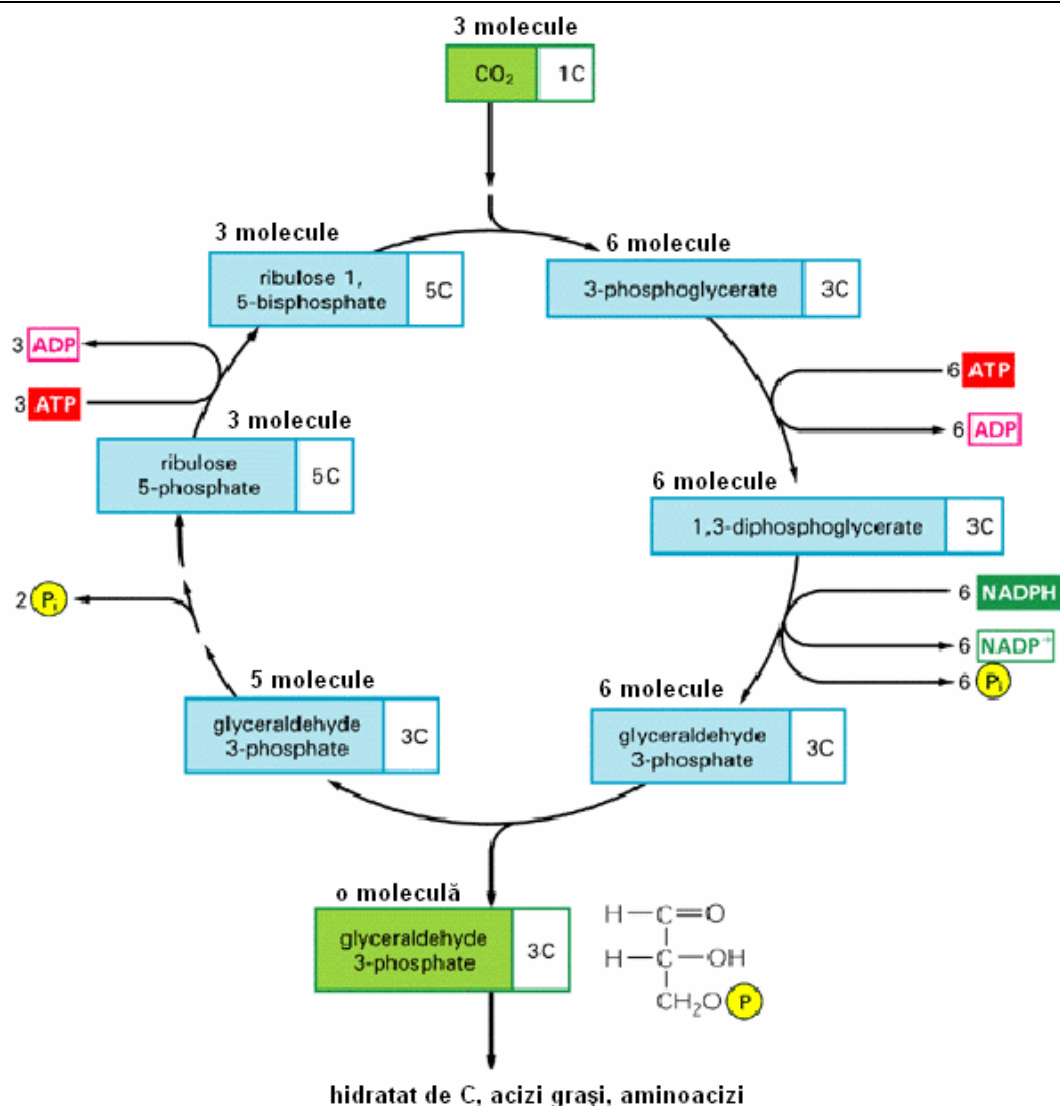


Figura 3.9. Diagrama ciclului Calvin (modelul Farquhar).

În modelul Farquhar, o parte din viteza de oxigenare (fotorespirație) este scăzută din viteza de carboxilare pentru a produce rata de fotosinteză. Astfel, se presupune că fotosinteza se supune legii de limitare a factorilor, în care un proces lent domină viteza de reacție. De aceea, există două procese care pot limita fotosinteza: transportul de electroni pentru generarea de enzimă *Rubisco* (RuBP) și fixarea de CO₂ împreună cu RuBP. Fiecare proces se desfășoară cu o anumită viteză: v_{te} pentru transportul de electroni și v_{fc} pentru fixarea de CO₂. Ecuațiile de bază (simplificate) ale modelului lui Farquhar sunt următoarele:

$$\begin{cases} v_P = v_C - v_O / 2 \\ v_{P,net} = v_P - v_R \end{cases}, \quad (3.108)$$

unde v_C este viteza de carboxilare, v_O este viteza de oxigenare, v_P reprezintă viteza de fotosinteză, $v_{P,net}$ este viteza de fotosinteză netă, iar v_R este viteza de respirație a frunzei. Ele funcționează corect numai dacă $v_C \neq v_O / 2$.

Evident, reacția de fotosinteză se desfășoară atât timp cât este prezent oxigenul. Dacă $v_C = v_O / 2$, este utilizată o altă ecuație pentru a calcula viteza de fotosinteză din expresia lui $v_{P,net}$:

$$v_P = \left(1 - \frac{\Gamma}{\kappa_i}\right) \min\{v_{te}, v_{fC}\}, \quad (3.109)$$

unde Γ este un factor de compensare a CO_2 , iar κ_i este concentrația internă de CO_2 .

Funcția neliniară de minimizare din modelul Farquhar (3.109) poate fi exprimată în trei moduri: o hiperbolă rectangulară, un răspuns Blackman discontinuu sau o hiperbolă neregulară. Hiperbola rectangulară traversează în mod gradual și lin regimurile tranzitorii, fiind folosită în *cinetica Michaelis-Menten* [MaBr80]:

$$v_P = \left(1 - \frac{\Gamma}{\kappa_i}\right) \frac{v_{te} + v_{fC}}{v_{te} v_{fC}}. \quad (3.110)$$

Tranzițiile răspunsului Blackman aproximează foarte bine comportamentul fotosintetic:

$$v_P = \left(1 - \frac{\Gamma}{\kappa_i}\right) \frac{v_c + v_j - |v_c - v_j|}{2}. \quad (3.111)$$

Cel de-al treilea reprezintă un model hibrid între curbele Michaelis-Menten și Blackman. Viteza este proporțională cu soluția minimă a unei ecuații de gradul 2:

$$\theta x^2 - (v_{te} + v_{fC})x + v_{te} v_{fC} = 0, \quad (3.112)$$

unde $\theta \in [0,1]$ este un parametru ce indică exactitatea tranziției. Soluția analitică a ecuației (3.112) este imediată și ea conduce la:

$$v_P = \left(1 - \frac{\Gamma}{\kappa_i}\right) \frac{v_{te} + v_{fC} - \sqrt{(v_{te} + v_{fC})^2 - 4\theta v_{te} v_{fC}}}{2\theta}. \quad (3.113)$$

În situația în care nivelele de RuBP sunt ridicate, rata de fotosinteză este determinată de cantitatea de CO_2 prezentă în cloroplast. Atunci când concentrația de CO_2 este limitată, viteza de fixare a acestuia se exprimă astfel:

$$v_{fC} = \frac{\kappa_{\text{RuBP}} \kappa_i}{\kappa_i + K_C \left(1 + \frac{\kappa_O}{K_O}\right)}, \quad (3.114)$$

unde κ_{RuBP} este concentrația de RuBP prezentă în sistem, κ_O este concentrația de oxigen, iar K_O și K_C sunt parametrii cinetici Rubisco.

Absorbția fotonilor de către clorofilă cauzează eliberarea de electroni în cloroplast. Energia generată de fluxul electronic constituie o sursă de putere pentru sinteza de ATP și NADPH, ce reprezintă o materie primă pentru regenerarea RuBP. Astfel, un model pentru transportul electronilor cauzat de lumină poate fi utilizat pentru a modela fotosinteza limitată de RuBP.

În mod obișnuit, transportul electronilor prezintă o cinetică liniară la lumină scăzută, adică fluxul de electroni J este rezultat prin atenuarea radiației incidente I cu factorul α , numit *deficiență cuantică*:

$$J = \alpha I. \quad (3.115)$$

În mod normal, $\alpha = 0.25$. De asemenea, fluxul de electroni este limitat la o valoare maximă J_{\max} , chiar dacă radiația incidentă crește (i.e. în condiții de luminozitate ridicată).

Tranziția are, în acest caz, o dinamică mai rapidă decât a unei hiperbole rectangulare. De aceea, se poate utiliza ecuația (3.112) în scopul modelării tranziției. În modelul GUESS se folosește un alt tip de curbă de saturație, sugerat de [HaTe91]:

$$J = \frac{\alpha I}{\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha I}{J_{\max}}\right)^2}}. \quad (3.116)$$

Pentru fiecare moleculă de CO₂ fixată sunt necesari, teoretic, 4 electroni, însă, din cauza reacției opuse de oxigenare, raportul dintre numărul de electroni și numărul de molecule de CO₂ este, de obicei, mai mare. Următoarea funcție este utilizată pentru a corecta efectul oxigenării și pentru a face conversia de la transportul de electroni la fixare de CO₂:

$$v_C = v_{fe} = J \left(\frac{\kappa_i - \Gamma}{4\kappa_i + 8\Gamma} \right), \quad (3.117)$$

Un alt fenomen important este *respirația la întuneric*. Acesta se referă la menținerea respirației frunzei în timpul fotosintezei. Ca o regulă generală, frunzele mai groase și mai bogate în proteine tind să prezinte valori mai mari ale lui vitezei v_R . Datorită efectului său direct asupra concentrației interne de CO₂, respirația la întuneric este combinată, adesea, cu fotosinteza pentru a rezulta $v_{P,net}$. Pentru o frunză dată, variația acestei viteze poate fi modelată ca o funcție de temperatură [WWSK97], plecînd de la o viteză inițială $v_{R,0}$:

$$v_R = v_{R,0} \exp \left(\frac{H_a}{ReT_{ref}} - \frac{H_a}{ReT} \right), \quad (3.118)$$

unde H_a este energia de activare, Re este constanta lui Reynolds, iar T_{ref} este temperatura de referință (între 22°C și 25°C).

Valorile maxime ale fluxului de electroni (J_{\max}) și concentrației de RuBP ($\kappa_{\text{RuBP},\max}$) prezintă de asemenea variații semnificative cu temperatura. Ca majoritatea reacțiilor biologice, se obține un răspuns în formă de clopot Gaussian, cu o regiune optimă relativ plană, o creștere exponențială la temperaturi scăzute și o descreștere exponențială la temperaturi înalte. Următoarea funcție este utilizată în [LeR95] pentru a modela răspunsul în temperatură atât pentru J_{\max} și pentru $\kappa_{\text{RuBP},\max}$:

$$f(T) = f(T_{ref}) \frac{\exp \left(\frac{H_a}{ReT_{ref}} - \frac{H_a}{ReT} \right)}{1 + \exp \left(\frac{S \cdot T - H_d}{ReT} \right)}, \quad (3.119)$$

unde H_a și H_d sunt energiile de activare, respectiv dezactivare, iar S reprezintă schimbul de entropie pentru reacție. Trebuie precizat faptul că, în acest caz, temperatura se exprimă în grade Kelvin.

Tot de temperatură depind și parametrii K_O și K_C din ecuația (3.114). Deoarece K_O și K_C sunt proprietăți ale enzimei Rubisco, ele arată un răspuns de tip curbă Arrhenius. Variația lor este descrisă tot de ecuația (3.118) [BaD04].

De asemenea, factorul de compensare Γ din ecuațiile (3.109) și (3.117) variază cu temperatura, însă răspunsul pe care-l determină este mult prea complicat, depinzând de asemenea atât de vitezele v_C și v_O , cât și de solubilitatea diferențială a CO_2 și O_2 . Deoarece nu pot fi folosite expresii analitice simple precum (3.118) sau (3.119), în modelul GUESS se utilizează regresia polinomială sugerată de Leuning în 1995 [LeR95]:

$$\Gamma(T) = \gamma_0 \left[1 + \gamma_1 (T - T_{ref}) + \gamma_2 (T - T_{ref})^2 \right], \quad (3.120)$$

unde γ_0 , γ_1 și γ_2 sunt constante de regresie.

Plantele care cresc în culturile de seră diferă între ele în ceea ce privește morfologia frunzelor. Astfel, unele plante pot fi ținute la soare, iar altele trebuie adăpostite la umbră. Diferența între frunzele celor două tipuri de plante este una radiometrică, în sensul că se folosește un singur set de valori pentru J_{\max} , $\kappa_{\text{RuBP},\max}$ și $v_{R,0}$. Aceasta denotă faptul că se pot forma două clase de plante, al căror fluxuri fotosintetice (LAI) se însumează:

$$LAI_{\text{total}} = LAI_{\text{soare}} + LAI_{\text{umbră}}. \quad (3.121)$$

În urma acestei diferențieri, se poate calcula radiația incidentă medie, care, împreună cu modelul Farquhar, determină fluxul fotosintetic pentru fiecare clasă în parte. Mai mult decât atât, dacă se multiplică acest flux cu aria totală a frunzelor, $LAI \cdot A_f$, se obține câștigul net de carbon pentru cultura respectivă [CaNo98], [FadPu97].

Radiația incidentă medie, pentru frunze care acceptă lumina directă a soarelui, se calculează folosind relația:

$$Q_{\text{soare}} = Q_{\text{direct},0} K_{bl}(\theta) + \bar{Q}_{\text{difuz}} + \bar{Q}_{\text{risipit}}, \quad (3.122)$$

unde K_{bl} este coeficientul de distrugere pentru frunzele negre (*black leaves*). Pentru frunze care necesită umbră, această radiație se calculează mai simplu:

$$Q_{\text{umbră}} = \bar{Q}_{\text{difuz}} + \bar{Q}_{\text{risipit}}. \quad (3.123)$$

Pentru a obține radiația difuză medie în cazul unei frunze, se integrează legea lui Beer pe întreaga cultură, după care se împarte la LAI_{total} :

$$\bar{Q}_{\text{difuz}} = \frac{Q_{od} \left[1 - \exp(-\sqrt{a} K_{\text{difuz}} LAI_{\text{total}}) \right]}{\sqrt{a} K_{\text{difuz}} LAI_{\text{total}}}. \quad (3.124)$$

3.7.13. Modelul de respirație a plantelor

Respirația plantelor reprezintă conversia carbohidraților în energie și CO_2 , fiind un proces opus fotosintezei. Respirația joacă un rol important la încărcarea mediului de seră cu CO_2 . Respirația plantelor poate fi modelată prin separarea în două procese: respirația de creștere și respirația de întreținere.

Respirația de creștere constă în eliberarea de CO_2 în timpul sintezei noilor țesuturi. Viteza acestei reacții nu depinde de temperatură, fiind o componentă constantă a asimilării nete (diferența dintre viteza netă de fotosinteză și suma tuturor vitezelor din reacțiile de întreținere succesive). De obicei, ea este fixată la valoarea 0.25.

Respirația de întreținere constă în eliberarea de CO_2 datorată activității metabolice. Acest tip de respirație este un răspuns exponențial al temperaturii, care, datorită naturii sale complexe, este determinat cu ajutorul unei funcții Q_{10} , ce reprezintă procentul de creștere a respirației pentru o creștere a temperaturii cu 10°C :

$$v_{R,i}(T) = v_{R,ref} Q_{10}^{\frac{T-T_{ref}}{10}} \quad (3.125)$$

Vitezele de respirație tind să difere în funcție de tipul și vârstele țesuturilor, astfel că fiecare țesut trebuie să fie modelat separat. În modelul GUESS, țesutul este împărțit în trei categorii: frunză, tulpină și rădăcină. Așadar,

$$v_{R,i} = v_{R,frunză} + v_{R,tulpină} + v_{R,rădăcină} \quad (3.126)$$

Deoarece respirația frunzei a fost deja descrisă de relația (3.118), în modelul Farquhar, este nevoie doar de funcția Q_{10} în exprimarea respirației pentru tulpină și rădăcină.

Folosind aceste concepte, se poate descrie transferul de carbon, care se utilizează ulterior în estimarea vitezei de creștere:

$$\frac{dM_{total}}{dt} = \kappa_C \left(A_{cultură} v_{P,net} - M_{rădăcină} v_{R,rădăcină} - M_{tulpină} v_{R,tulpină} \right) (1 - v_{R,creștere}), \quad (3.127)$$

unde M_* reprezintă biomasa (totală, a rădăcinii sau a tulpinii), κ_C este conținutul de carbon, $A_{cultură}$ este aria totală a frunzelor întregii culturi, iar $v_{R,creștere}$ este viteza de respirație în timpul creșterii.

Transferul de biomasă nu este considerat a fi într-o formă închisă, nedeterminabilă. Astfel, un simplu transfer de masă nu spune nimic despre cum este alocat țesutul pentru cele trei componente ale plantei. Mai mult decât atât, cantitatea totală de carbon fixat are un interes scăzut pentru cultivatorul de plante. Dar, în cazul pepinierelor de arbuști, indici precum înălțimea și diametrul tulpinei pot fi folosiți pentru a determina creșterea plantelor.

Luând ca exemplu culturile de tomate, alocarea poate fi realizată frunză cu frunză sau fruct cu fruct, în timp ce, la culturile de arbuști, utilizarea acestei metode devine foarte complicată [RiS04]. De aceea, în acest caz, se folosesc relațiile dintre biomasă și dimensiunea plantelor.

Dimensiunile unei frunze variază în cadrul unei culturi, astfel încât masa totală a frunzei este proporțională cu suprafața de cultură [RGLB03]:

$$M_{cultură} = SLAI * LAI * A_f \quad (3.128)$$

Cu toate acestea, fără a cunoaște ce cantitate de biomasă este folosită, spre exemplu, pentru tulpină, nu se poate exprima o ecuație diferențială pentru cultura respectivă și, deci, nu se poate exprima ecuația completă a transferului de biomasă.

Este evident faptul că plantele alocă biomasă pentru rădăcină, aceasta fiind un element de echilibru funcțional, deoarece apa și nutrienții necesari ajung la plantă prin intermediul rădăcinii. Relația care descrie echilibrul funcțional al creșterii rădăcinii este următoarea:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{v_{R,rădăcină} v_{ET}}{\psi_{sol} - \psi_{plantă}} = A_{rădăcină} \\ dM_{rădăcină} \sim \frac{1}{d(\psi_{plantă} - \psi_{sol})} \end{array} \right], \quad (3.129)$$

unde: v_{ET} reprezintă viteza de evapo-transpirație, $A_{rădăcină}$ reprezintă aria secțiunii rădăcinii de la încheietura cu tulpina, iar ψ_* descrie potențialul de apă la nivelul solului sau al plantei.

În seră, pentru plantațiile de arbuști bine irigate și fertilizate, distribuția rădăcinilor este considerată constantă, astfel că modelul de echilibru funcțional poate fi ignorat. În modelul GUESS, se consideră o distribuție constantă a rădăcinilor de 16%.

$$\frac{dM_{rădăcină}}{dM_{total}} \in [0.15, 0.25]. \quad (3.130)$$

Teoria lui Shinozaki constituie o bază pentru majoritatea modelelor de morfologie ale culturilor de arbuști, aceasta reprezentând așa-numitul *model tub*. Numele de *tub* derivă din considerentul că fiecare tulpină poate fi văzută ca un tub continuu, ce pleacă de la rădăcină și ajunge la nivelul frunzelor. Considerînd constantă proporția dintre materialul lemnos și frunze (C_{tub}), în conformitate cu modelul tub, aria suprafeței de bază ocupate de plante ($A_{bază}$) este proporțională cu aria suprafeței de cultură ($A_{cultură}$):

$$A_{bază} = C_{tub} \cdot A_{cultură}. \quad (3.131)$$

De asemenea, există o relație între mulțimea totală a tulpinilor și suprafața de bază, precum și între mulțimea tulpinilor și diametrul de bază. De fapt aceste variabile depind de produsul D^2h , unde D este diametrul de bază, iar h este înălțimea medie a tulpinilor. Cît timp există variații între tipurile de specii de plante, pe clase de vîrstă, proporția medie între masă și logaritmul ariei suprafeței de bază este de $2/3$, iar între masă și D^2h , ea este unitară [PaJ80]. Mai precis:

$$M_{tulpină} = k A_{bază}^{3/2}, \text{ unde } A_{bază} = \frac{\pi}{4} D^2, \quad (3.132)$$

iar k [kg/m^3] este o constantă de proporționalitate.

Folosind ecuațiile (3.128), (3.131) și (3.132), prin substituție și particularizare în cazul tulpinelor, obținem:

$$M_{tulpină} = k \left[C_{tub} \left(\frac{M_{cultură}}{SLA} \right) \right]^{3/2}. \quad (3.133)$$

Prin derivarea ambilor termeni ai ecuației (3.133), se obține:

$$\frac{dM_{tulpină}}{dM_{cultură}} = \frac{3k}{2} \left(\frac{C_{tub}}{SLA} \right)^{3/2} \sqrt{M_{cultură}}. \quad (3.134)$$

Relația dintre mulțimea tulpinilor și D^2h este următoarea:

$$M_{tulpină} = \rho D^2 h, \quad (3.135)$$

unde ρ reprezintă densitatea lemnoasă.

Din ecuațiile (3.132) și (3.135) se poate determina constanta de proporționalitate:

$$k = \frac{8\rho h}{D\sqrt{\pi^3}}. \quad (3.136)$$

3.7.14. Modele ale transferului de CO_2 și conductanței stomatice

În modelul Farquhar, rata de fotosinteză este dependentă de concentrația de CO_2 existentă în seră. Pentru a determina concentrația de CO_2 (notată prin κ), se ține seama de transferul de masă de la nivelul frunzei:

$$C_{frunză} \frac{d\kappa}{dt} = \left(\frac{1}{g_{stomatic}} + \frac{1}{g_{aerodinamic}} \right)^{-1} (\kappa_e - \kappa_i) - v_{P,net}, \quad (3.137)$$

unde κ_e și κ_i sunt concentrații de CO_2 de tip externă, respectiv intern, $C_{\text{frunză}}$ $[\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}]$ este capacitanța frunzei, iar g_{stomatic} și $g_{\text{aerodinamic}}$ (exprimate în $[\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}]$) reprezintă conductanța stomatică, respectiv aerodinamică.

Pentru a descrie comportamentul stomatic, au fost aplicate diverse metode provenind din teoria controlului. Modelele de control stomatic sunt descrise în forme variate, dar cea mai folosită este cea descrisă de Jarvis [BoGPA83]:

$$g_{\text{stomatic}} = g_{\text{inchis}} + g_{\text{deschis}} f_1(\alpha_1) f_2(\alpha_2) \dots, \quad (3.138)$$

unde g_{deschis} reprezintă conductanța stomatică când stomata este complet deschisă, g_{inchis} este conductanța stomatică când stomata este complet închisă, iar $\{f_n(\alpha_n)\}_{n \geq 1}$ sunt semnale de control cu valori între 0 și 1, ce reprezintă răspunsul stomatic la schimbările de lumină, umiditate, temperatură, etc.

Un model simplu și robust al conductanței stomatice este cel descris de Ball-Woodrow-Berry în [BWB87]. Acesta este un model cu reacție, care constă în optimizarea consumului de apă, respectînd proporția dintre cantitatea de carbon folosită și cantitatea de apă obținută prin transpirație. În modelul GUESS se folosește o variantă modificată a modelului Ball-Woodrow-Berry, care include și alți termeni, referitori la umiditatea solului.

$$g_{\text{stomatic}} = \min \left\{ g_{\text{inchis}} + M_f \frac{rh_f v_{P,net}}{\kappa_f} \frac{\psi_{sol} - \psi_{WP}}{\psi_{FC} - \psi_{WP}}, g_{\text{deschis}} \right\}, \quad (3.139)$$

unde: M_f este masa frunzei, rh_f este umiditatea relativă medie a frunzei, κ_f este concentrația de carbon din frunză, ψ_* sunt potențiale de apă din diferite părți ale plantei și la nivelul solului.

3.7.15. Modelul transferului de energie

Datorită faptului că, în mediul de seră, temperatura are o curbă exponențială, iar diferitele părți ale plantei nu pot avea aceeași temperatură, pot apărea erori dacă aceasta se consideră constantă. De aceea, este necesar ca valorile de temperatură să fie cel puțin grupate în două clase: $T_{\text{rădăcină}} = T_{\text{sol}}$ și $T_{\text{trunchi}} = T_{\text{frunză}} = T_{\text{cultură}}$.

În modelul GUESS, pentru temperatura plantelor se folosește formula descrisă de de Campbell și Norman [CaNo98]:

$$T_{\text{frunză}} = \frac{(1 - \varepsilon_{\text{plafon}}) h_{r,cer} T_{cer} + \varepsilon_{\text{plafon}} h_{r,plafon} T_{plafon} + g_{\text{aerodinamic}} T_{int} + \tau_{\text{plafon}} I_{SW} + \lambda E}{(1 - \varepsilon_{\text{plafon}}) h_{r,cer} + \varepsilon_{\text{plafon}} h_{r,plafon} + g_{\text{aerodinamic}}}, \quad (3.140)$$

cu notațiile introduse în paragrafele precedente.

Ecuția (3.140) poate fi mult simplificată dacă se presupune că $T_{\text{sol}} = T_{\text{cultură}}$, ținînd cont de faptul că, de exemplu, la conifere, absorția și reflexia luminii sunt procese similare, iar umiditatea la nivelul plantelor este aceeași.

4. Concluzii

Raportul de cercetare prezentat cu ocazia finalizării primei etape a proiectului intitulat ***Sistem de monitorizare ecologică bazat pe analiza timp-frecvență-scală a semnalelor*** și-a propus (și, probabil, cel puțin în parte a reușit) să dezvăluie corelațiile existente între unii parametri de mediu, relevând totodată diversitatea acestora.

Cele două mari clase de modele abordate (în spațiu deschis și în spațiu închis – sere) au fost constituite în special în urma unor demersuri experimentale. Cu toate acestea, legile de bază ale fizicii și chimiei au fost utilizate din plin, în vederea exprimării unor corelații destul de complexe, a căror deducere experimentală este, dacă nu imposibilă, cel puțin extrem de dificilă. Multe dintre exprimările analitice rezultate vor fi utile în construcția unui predictor de stare bazat pe modelarea Markov și filtrarea Kalman-Bucy. Acesta constituie, de altfel unul dintre obiectivele majore ale proiectului. Un alt obiectiv se referă la construcția de predictor numerici, folosind tehnici moderne de prelucrare de semnal. Aceștia sunt utili în cazul existenței unor seturi de date de mediu aparent necorelate, în vederea extragerii corelațiilor intime și predicției de fenomene.

Este de așteptat, în primul rând, ca informația din acest raport de cercetare să fie exploatată în etapele viitoare ale proiectului. În al doilea rând, sunt prevăzute câteva propuneri de publicații desprinse din conținutul raportului. În fine o a treia utilitate o constituie finalizarea tezei de doctorat a primului autor, care va putea include multe dintre informațiile raportului în cadrul lucrării sale de dizertație.

Bibliografie

- [AILD90] Albright L.D. – *Environment Control for Animals and Plants*, American Society of Agricultural Engineers Publishers, St. Joseph (MI), USA, 1990.
- [AlBa94] Aldrich R.A., Bartok J.W.Jr. – *Greenhouse Engineering*, Proceedings of the 3-rd Edition of Ithaca Natural Resource, Agriculture and Engineering Service (NRAES), 1994.
- [AmRo82] Ambrose R.B., Roesch S.E. – *Dynamic Estuary Model Performance*, Journal of Environment Engineering, Div. ASCE No. 108, 1982.
- [ASH01] ASHRAE – *Handbook of Fundamentals*, SI Editions – a publication made by American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, USA, Vol. 1, 2001.
- [AsWi89] Aström K.J., Wittenmark B. – *Adaptive Control*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
- [BCC92] Bacci E., Cerejeira M., Caggi C., Chemello G., Calamari D. – *Chlorinated Dioxins: Volatilization from Soils and Bioconcentration in Plant Leaves*, Bulletin of Environment Contamination Toxic, No. 48, pp. 401-408, 1992.
- [BWB87] Ball J.T., Woodrow I.E., Berry J.A. – *A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions*, Proceedings of 7th International Congress on Progress in Photosynthetic Research, Vol. 4, 1987.
- [BBC94] Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H.N.J. – *Greenhouse Climate Control*, Wageningen Personal Publishers, Wageningen, Germany, 1994.
- [BBC95] Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H.N.J., Van De Brakk T. – *Greenhouse Climate Control: an Integrated Approach*, Wageningen Personal Publishers, Wageningen, Germany, 1995.
- [BaD04] Baldocchi D. – *Lecture 10: Leaf Photosynthesis & Respiration*, Student Textbook: *Advanced Topics in Biometeorology*, ESPM 228, Dept. of Environmental Science, University of California, Berkeley, USA, April 2004. (<http://nature.berkeley.edu/biometlab/espm228/>)
- [BoGPA83] Bot G.P.A. – *Greenhouse Climate: From Physical Processes to a Dynamic Model*, Final project dissertation at University of Wageningen, Germany, 1983.
- [BoGPA91] Bot G.P.A. – *Physical Modeling of Greenhouse Climate*, Proceedings of the IFAC ISHS Workshop, pp. 7-12, 1991.
- [BoBa93] Boulard T., Baille A. – *A Simple Greenhouse Climate Control Model Incorporating Effects on Ventilation and Evaporative Cooling*, Agricultural and Forest Meteorology, No. 65, pp. 145-157, 1993.
- [CaNo98] Campbell G.S., Norman J.M. – *An Introduction to Environmental Biophysics* (second edition), Springer Verlag, New York, USA, 1998.
- [CSHC98] Chronopoulou-Sereli A., Haidouti C., Chronopoulos J., Massas, I. – *Microclimatic Conditions and Levels of Pollution in Public Squares in Athens, Greece*, Toxicology Environment Chemistry, pp. 1-9, 1998.
- [CCM02] Coelho J.P., Cunha B., de Moura Oliveira P.B. – *Solar Radiation Prediction Methods Applied to Improve Greenhouse Climate Control*, World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, pp. 154-161, March 13-15, 2002.
- [CWW97] Cohen Y., Winer A.M., de Water R.V., Pan F., Vohra R., Zhou L., Hernandez L. – *Development of Predicted Capabilities for Intermedia Transfer Factors for Toxic Air Pollutants*, Research Report, University of California, Los Angeles, USA, 1997.

- [CuJB03] Cuhna J.B. – *Greenhouse Climate Model*, EFITA Conference, Debrecen, Hungary, 2003.
- [CCR97] Cunha J.B., Couto C., Ruano A.E.B. – *Real-time Parameter Estimation of Dynamic Temperature Models for Greenhouse Environmental Control*, Control Engineering Practice, Vol. 5, No. 10, pp. 1473-1481, 1997.
- [CCR00] Cunha J.B., Couto C., Ruano A.E. B. – *A Greenhouse Climate Multivariable Predictive Controller*, Acta Horticulturae, ISHS No. 534, pp. 269-276, 2000.
- [CWR99] Cui J., Watanabe T., Ryu Y., Akashi Y., Nishiyama N. – *Numerical Simulation on Simultaneous Control Process of Indoor Air Temperature and Humidity*. Proceedings of BS Conference, September 1999.
(<http://www.ibpsa.org/proceedings/bs99/papers/PB-06.pdf>)
- [DuHa96] Dumitrescu D., Hariton C. – *Rețele neuronale – Teorie și aplicații*, Editura TEORA, București, România, 1996.
- [FadPu97] Farquhar G.D., dePury D.G.G. – *Simple Scaling of Photosynthesis From Leaves to Canopies Without the Errors of Big Leaf Models*, Plant, Cell and Environment, No. 20, pp. 537-557, 1997.
- [GCS99] Gates R.S., Chao K., Sigrimis N. – *Fuzzy Control Simulation of Plant and Animal Environments*, ASAE Meeting Presentation, paper no. 993136, Toronto, Canada, 1999.
- [GHC98] Gijzen H., Heuvelink E., Challa H., Marcelis L.F.M., Dayan E., Cohen S., Fuchs M. – *HORTISIM: A Model For Greenhouse Crops And Greenhouse Climate*, Acta Horticulturae, No. 456, pp. 431-450, 1998.
- [HaTe91] Harley P.C., Tenhunen J.D. – *Modeling the Photosynthetic Response of C3 Leaves to Environmental Factors*, Modeling Crop Photosynthesis – From Biochemistry to Canopy, a publication of Crop Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 17-39, 1991.
- [HSWh89] Hornik K., Stinichcombe M., White H. – *Multi-layer Feedforward Networks are Universal Aproximators*, Neural Networks No. 2, pp. 359-366, 1989.
- [IPCC96] Intergovernmental Panel on Climate Change – *The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.
- [IoV85] Ionescu V. – *Teoria Sistemelor. Sisteme Liniare.*, Editura Didactică și Pedagogică, București, România, 1985.
- [KuK89] Kurata K. – *Simulation of Inside Air Temperature, Humidity and Crop Temperature in an Energy Conserving Greenhouse*, Acta Horticulturae, No. 245, pp. 339-345, 1989.
- [LeR95] Leuning R. – *A Critical Appraisal of a Combined Stomatal-Photosynthetic Model for C3 Plants*, Plant, Cell, and Environment, No. 18, pp. 339-357, 1995.
- [LjL87] Ljung L. – *System Identification – Theory for the User*, Prentice-Hall, New Jersey, 1987. (Second edition released in 1999.)
- [MaD63] Marquardt D. – *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*, SIAM Journal of Applied Mathematics, No. 11, pp. 164-168, 1963.
- [MaBr80] Marshall B., Biscoe P.V. – *A Model for C3 Leaves Describing the Dependence of Net Photosynthesis on Irradiance*, Journal of Experimental Botany, Vol. 31, No. 120, pp. 29-39, 1980.
- [MaWJ92] Maunder W.J. – *Dictionary of Global Climate Change*, UCL Press Ltd., 1992.
- [MoUn90] Monteith J. L., Unsworth M. – *Principles of Environmental Physics* (second edition), Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 1990.
- [NiC04] Nitu C. – *Microwave Methods for System Modeling in Ecology*, Proceedings of International Conference on World Energy Systems, Oradea, Romania, May 2004.

- [NiKr06] Nitu C., Krapivin V.F. – *Computer Simulation of Acid Rains*, Proceedings of International Conference DAS-06, Suceava, Romania, May 2006.
- [NKB00a] Nitu C., Krapivin V.F., Bruno A. – *Modelarea proceselor în ecologie*, Editura PRINTECH, București, România, 2000.
- [NKB00b] Nitu C., Krapivin V.F., Bruno A. – *Tehnici inteligente în ecologie*, Editura PRINTECH, București, România, 2000.
- [NKP04] Nitu C., Krapivin V.F., Pruteanu E. – *Ecoinformatică – Sisteme inteligente în ecologie*, Editura Magic Print, Onești, România, 2004.
- [PaJ80] Parde J. – *Forest Biomass*, Forestry Abstracts, No. 41, pp. 343-62, 1980.
- [PMJ99] Park C.B., Miller R.D., Xia J. – *Multi-channel Analysis of Surface Waves*, Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp. 800–808, May-June 1999.
- [PMF94] Paterson S., Mackay D., McFarlane C. – *A Model of Organic Uptake by Plants from Soil and the Atmosphere*, Environment Science Technology, No. 28, pp. 2259-2266, 1994.
- [PrLi] Prenger J., Ling P. – *Greenhouse Condensation Control Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD)*, Research report, Ohio State University, USA. (<http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0804.html>)
- [RiS04] Riha S. – *Win GAPS 1.1. User Manual.*, Dept. of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, NY, USA, 2004. (<http://environment.eas.cornell.edu/WinGapsMan.v1.1.pdf>)
- [RGLB03] Ripullone F., Grassi G., Lauteri M., Borghetti M. – *Photosynthesis-Nitrogen Relationships: Interpretation of Different Patterns Between Pseudotsuga Menziesii and Populus x Euroamericana*, Tree Physiology, No. 23, pp. 137-144, 2003.
- [SGM88] Salgado M.E., Graham C.G., Middleton R.H. – *Modified Least Squares Algorithm Incorporating Exponential Resetting and Forgetting*, International Journal on Control, No. 21, pp. 477-491, 1988.
- [ScWa95] Schwartz S. E., Warneck P. – *Units for Use in Atmospheric Chemistry*, Pure & Applied Chemistry, No. 67, pp. 1377-1406, 1995.
- [SiHa94] Simonich S.L., Hites R.A. – *Vegetation-Atmosphere Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, Environment Science Technology, No. 28, pp. 939-943, 1994.
- [SoSt89] Söderström T., Stoica P. – *System Identification*, Prentice Hall, London, 1989.
- [StWT00] Sturges W. T. et al. – *A Potent Greenhouse Gas Identified in the Atmosphere: SF₅CF₃*, Science, Vol. 289. No. 5479, pp. 611–613, July 2000.
- [SuBr93] Sugita M., Brutsaert W. – *Cloud Effect in the Estimation of Instantaneous Downward Longwave Radiation*, Water Resources Research Journal, Vol. 29, No. 3, pp. 599-605, 1993.
- [SCS05] Ștefănoiu D., Culiță J., Stoica P. – *Fundamentele modelării și identificării sistemelor*, Editura Printech, București, România, 2005.
- [StSt07] Ștefănoiu D., Stănășilă O. – *Matematică și Prelucrare de Semnal – Analiză timp-frecvență-scală cu undine*, Editura Printech, București, România, 2007.
- [SSP07] Ștefănoiu D., Stănășilă O., Popescu D. – *Undine – Teorie și aplicații*, în curs de apariție la Editura Academiei Române, București, România, 2007.
- [TrMa95] Trap S., Matthies M. – *Generic One-Compartment Model for Uptake of Organic Chemicals by Foliar Vegetation*, Environment Science Technology, No. 29, pp. 2333-2338, 1995.
- [WWSK97] Walcroft A S., Whitehead D., Silvester W.B., Kelliher F.M. – *The Response of Photosynthetic Model Parameters to Temperature and Nitrogen Concentration in Pinus Radiata*, D. Don. Plant, Cell and Environment, No. 20, pp. 1338-1348, 1997.

- [WaPr98] Wang X., Prinn G. – *Combined Effects of Anthropogenic Emissions and Resultant Climatic Changes on Atmospheric*, OH MIT Joint Program Report No. 34, 1998.
- [WMOC05] [World Meteorological Organization Conference](#), Bucharest, Romania, June 2005.