

# ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ

<sup>1</sup>Κ. Κίττας, <sup>2</sup>Μ. Tchamitchian, <sup>1</sup>Θ. Μπαρτζάνας

<sup>1</sup>Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

<sup>2</sup> Unit PSH, Bt B - INRA Domaine St Paul – 84914 Avignon CX 9 - France

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση ενός βιοφυσικού προσομοιώματος για καλλιέργεια τριαντάφυλλου με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη θέρμανση του θερμοκηπίου τη χειμερινή περίοδο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης προσεγγίζεται, στη συγκεκριμένη εργασία, ως ένα πρόβλημα διαδοχικών αποφάσεων τύπου Markov. Η βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος έγινε με τη μέθοδο της εκμάθησης με ενίσχυση (Reinforcement Learning) που επιτρέπει τον προσδιορισμό των διαφόρων πιθανοτήτων με προσφυγή στην προσομοίωση. Αρχικά αναπτύσσονται το βιολογικό και φυσικό προσομοίωμα και στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του βιοφυσικού προσομοιώματος με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη θέρμανση θερμοκηπίου με καλλιέργεια τριαντάφυλλου.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος του περιβάλλοντος των θερμοκηπιακών καλλιεργειών αποσκοπεί στη δημιουργία βέλτιστων συνθηκών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων με στόχο την αύξηση και ανάπτυξη των καλλιεργειών. Το περιβάλλον του θερμοκηπίου συνίσταται απ' όλα τα φυσικά μεγέθη του χώρου που επιδρούν στην ανάπτυξη των φυτών (κλίμα, θρεπτικά στοιχεία, βιοτικοί παράγοντες). Για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής δεν αρκεί η μεγιστοποίηση καθενός από τους παραπάνω παράγοντες σ' ένα άριστο επίπεδο, αλλά απαιτείται η ρύθμιση καθενός σε συνδυασμό με το επίπεδο όλων των άλλων παραγόντων. Από τους κλιματικούς παράγοντες η θερμοκρασία είναι ο παράγοντας που έχει την πιο πολύπλοκη επίδραση στην ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών καθώς επηρεάζει το σύνολο των φυσιολογικών λειτουργιών του.

Στα μεσογειακά θερμοκήπια, η θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα αποτελεί τον κύριο καταναλωτή ενέργειας του θερμοκηπίου. Η χρησιμοποίηση εναλλακτικών συστημάτων θέρμανσης δεν είναι διαδεδομένη στα ελληνικά θερμοκήπια. Μερικά απλά παθητικά ηλιακά συστήματα με σωλήνες νερού για αποθήκευση της θερμότητας, μπορούν να εφαρμοστούν με μειωμένη όμως αποτελεσματικότητα όταν αυξάνεται η φυλλική επιφάνεια των καλλιεργειών [1], ενώ τα τελευταία χρόνια ευρεία εφαρμογή βρήκε η χρήση της θερμοκουρτίνας [2].

Σήμερα η διαχείριση της θέρμανσης των περισσότερων θερμοκηπίων γίνεται μέσω του προσδιορισμού δύο επιθυμητών θερμοκρασιών ρύθμισης του θερμοστάτη (ημέρας και νύχτας), με βάση κυρίως την εμπειρία του παραγωγού [3]. Ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, η διατήρηση της ίδιας θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, θα απαιτήσει περισσότερη ή λιγότερη ενέργεια. Τα περισσότερα φυτά υπό κάλυψη είναι ικανά να ξεπεράσουν στιγμιαίες αποκλίσεις από τις βέλτιστες συνθήκες, εφόσον οι

αποκλίσεις αυτές εξισορροπηθούν μεταγενέστερα. Είναι, λοιπόν, δυνατόν να ρυθμισθούν οι ενεργειακές δόσεις, ώστε να μειώνεται η θερμοκρασία του θερμοκηπίου όταν το κόστος θέρμανσης είναι υψηλό, αν η θερμοκρασία αυτή αυξάνεται σε κάποια άλλη χρονική στιγμή [4,5,6].

Η προσπάθεια βελτιστοποίησης της θέρμανσης των θερμοκηπίων σε σχέση με την ανάπτυξη κάποιας καλλιέργειας ξεκίνησε μόλις την τελευταία δεκαετία, με την ανάπτυξη ορισμένων βιολογικών προσομοιωμάτων, με τις περισσότερες από αυτές να περιλαμβάνουν ένα μόνο στάδιο ανάπτυξης του φυτού και όχι ολόκληρο τον κύκλο αύξησης και ανάπτυξης του [7]. Επίσης κανένα προσομοίωμα λειτουργίας της καλλιέργειας δεν έχει χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η επίδραση των αποκλίσεων της θερμοκρασίας από τον μέσο όρο στην συμπεριφορά της καλλιέργειας. Λειτουργίες της καλλιέργειας οι οποίες μεταβάλλονται αργά (π.χ ρυθμός ανάπτυξης) είναι πολύ δύσκολο να συμπεριληφθούν στα προσομοιώματα των καλλιεργειών και καθώς είναι πολύ δύσκολο να οριστεί μια επιθυμητή τιμή – στόχος αυτών των λειτουργιών συχνά παραλείπονται στον καθορισμό των κριτηρίων βάση των οποίων θα γίνει η βελτιστοποίηση της θέρμανσης των θερμοκηπίων. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα δυναμικά βιολογικά προσομοιώματα σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, τα οποία επειδή στηρίζονται στην ολοκλήρωση διαφορικών εξισώσεων καθιστούν τη βελτιστοποίηση τους αρκετά δύσκολη. Σε μία φυτική καλλιέργεια οι ρυθμοί εξέλιξης διαφόρων λειτουργιών μπορεί να μεταβάλλονται χρονικά από πολύ γρήγορα (φωτοσύνθεση, διαπνοή) έως και πολύ αργά (οργανογέννηση, γήρανση οργάνων) με λόγο περίπου 100 προς 1. Ελάχιστες είναι οι προσπάθειες που έγιναν να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα [8] και καμία δεν έχει καταλήξει σε ένα εφαρμόσιμο και λειτουργικό σύστημα αποφάσεων και υποστήριξης των παραγωγών. Έτσι νέες μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι αναγκαίες οι οποίες θα βασίζονται στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και όχι στη δομή του προσομοιώματος. Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ αλλά δεν απαιτούν λεπτομερή περιγραφή του προσομοιώματος.

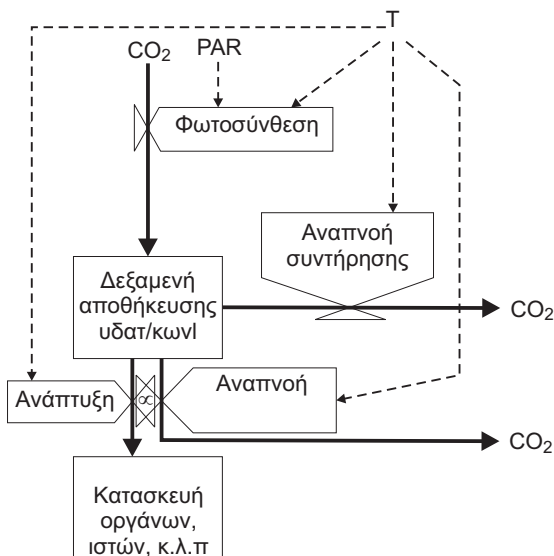
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός βιοφυσικού προσομοιώματος για καλλιέργεια τριανταφυλλιάς το οποίο στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της θέρμανσης θερμοκηπίων με στόχο τη βέλτιστη ανάπτυξη της καλλιέργειας και την εξοικονόμηση ενέργειας.

## 2. ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ

Η διαμόρφωση και ανάπτυξη των φυτών τριανταφυλλιάς στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι γίνεται με την τεχνική «Bending» ή η τεχνική της «έρπουσας καλλιέργειας», σύμφωνα με την οποία ο βλαστός που θα προέλθει από τον οφθαλμό που έχει υποστεί αυστηρό κλάδεμα αφήνεται να αναπτυχθεί ελεύθερα έως ότου σχηματίσει ανθοφόρο οφθαλμό στην κορυφή του. Το προσομοίωμα της παρούσας εργασίας θα αναφέρεται στο ανθικό μέρος του φυτού δηλαδή τον αριθμό των βλαστών οι οποίοι διατηρούνται για ανάπτυξη ανθέων και παραγωγή. Η παραγωγή ξηράς ουσίας και ο ρυθμός ανάπτυξης ανθοφόρων βλαστών θα είναι οι δύο διαδικασίες οι οποίες θα περιγραφούν στο παρόν βιολογικό προσομοίωμα.

### 2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ

Η παραγωγή ξηράς ουσίας των ανθοφόρων βλαστών θα υπολογιστεί με βάση το ισοζύγιο των υδατανθράκων όπως αυτό περιγράφηκε από τους Seginer et al. [9]. Το μοντέλο αυτό χωρίζει την καλλιέργεια σε δύο τμήματα, ένα για την αποθήκευση των υδατανθράκων (άμυλο) το οποίο καθορίζεται από τη φωτοσύνθεση, και ένα της κατασκευής των μερών της καλλιέργειας. (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου παραγωγής ξηράς ουσίας. Οι συνεχόμενες γραμμές είναι ροές CO<sub>2</sub> ενώ οι διακεκομμένες αναπαριστούν την επίδραση του περιβάλλοντος σε μια διαδικασία

Το μοντέλο φωτοσύνθεσης των φύλλων της καλλιέργειας στηρίζεται στο απλό μοντέλο των Acock et al. [10] τροποποιημένο όμως έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση του κορεσμού της φωτοσύνθεσης μετά από μια ορισμένη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub>.

$$P_b = P_x \left(1 - e^{-pk \cdot C}\right) \frac{Q}{\frac{P_x \left(1 - e^{-pk \cdot C}\right)}{\alpha} + Q} \quad (2)$$

όπου  $P_b$  είναι η συνολική (gross) φωτοσύνθεση,  $P_x$  είναι η μέγιστη φωτοσύνθεση σε επίπεδα φωτός στα οποία υπάρχει κορεσμός της φωτοσύνθεσης και υψηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub>,  $pk$  είναι ο ρυθμός μείωσης του φωτός (όταν ο ρυθμός φωτοσύνθεσης έχει κορεστεί) σε σχέση με το CO<sub>2</sub>,  $\alpha$  είναι η αποτελεσματικότητα του φωτός,  $C$  είναι η συγκέντρωση του εσωτερικού CO<sub>2</sub> και  $Q$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας στο φάσμα της ενεργού φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας (PAR). Οι τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους έχουν προέρθει από την προσαρμογή του προσομοιώματος στα αποτελέσματα των Gonzalez-Real & Baille [11]. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των ανθοφόρων βλαστών της τριανταφυλλιάς προκύπτει από το συνδυασμό του παραπάνω προσομοιώματος φωτοσύνθεσης για τα φύλλα με το συντελεστή απόσβεσης του φωτός (Beer's law) και την ολοκλήρωση του ως προς τη φυλλική επιφάνεια αυτών των βλαστών.

$$P_c = \frac{P_{max}}{K} \text{Log} \left( \frac{(1-m)P_{max} + \alpha K I_0}{(1-m)P_{max} + \alpha K I_0 e^{-KLAI}} \right) \quad (2)$$

όπου  $P_{max}$  είναι ο μέγιστος ρυθμός φωτοσύνθεσης  $P_{max} = P_x(1 - e^{-pkC})$ ,  $K$  ο συντελεστής απόσβεσης του φωτός,  $m$  είναι παράμετρος που σχετίζεται με τη διάχυση του φωτός ανάμεσα στα φύλλα,  $LAI$  η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας και  $I_0$  η ένταση της προσπίπτουσας ενεργά φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας (PAR). Διάφοροι άλλοι παράμετροι του μοντέλου ελήφθησαν σύμφωνα με τους Seginer et al. [9]. Η φυλλική επιφάνεια νεαρών φυτών

τριανταφυλλιάς συσχετίστηκε σε σχέση με τις βαθμομέρες που απαιτήθηκαν για την εμφάνιση τους χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα από καλλιέργεια τριανταφυλλιάς.

$$A_i(dd) = \frac{668.6}{1 + e^{-0.06(dd-95.3)}} \quad (3)$$

Ο αριθμός των φύλλων σε κάθε βλαστό μπορεί να υπολογιστεί από τα αποτελέσματα των Pasian & Leith [12], στα οποία αναφέρεται ο απαιτούμενος αριθμός βαθμομερών που απαιτήθηκαν για την εμφάνιση κάθε φύλλου. Για την εμφάνιση κάθε φύλλου απαιτείται θερμότητα (θερμομέρες) ίση με αυτήν που απαιτήθηκε για την εμφάνιση του προηγούμενου φύλλου σύμφωνα με την εξίσωση:

$$D_i = 35.187 - 2.139i \quad (4)$$

όπου  $D_i$  είναι το άθροισμα θερμοκρασιών που απαιτείται για την εμφάνιση του φύλλου  $i$  ξεκινώντας από την ημερομηνία εμφάνισης του φύλλου  $i-1$ . Η σχέση αυτή ισχύει για  $i \in \{2, 18\}$ . Το πρώτο φύλλο απαιτεί 107 βαθμομέρες. Με τον συνδυασμό των ανωτέρω πληροφοριών είναι εφικτός ο προσδιορισμός της φυλλικής επιφάνειας ενός βλαστού από την ηλικία του, η οποία εκφράζεται ως βαθμομέρες, σύμφωνα με την εξίσωση.

$$A_i(dd) = \sum_{i=1}^{nf} A_i(dd - d_n(i)) \quad (5)$$

όπου  $d_n(i)$  είναι οι βαθμομέρες από την εμφάνιση του βλαστού έως και την εμφάνιση του φύλλου  $i$ . Η φυλλική επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί με το συνδυασμό της κατανομής των ημερομηνιών εμφάνισης των βλαστών και της πυκνότητας τους στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

## 2.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στον έλεγχο των καλλιεργειών είναι η ανάπτυξη ιδίως όταν πρόκειται για καλλιέργειες των οποίων τα άνθη είναι εμπορεύσιμα καθώς η ανάπτυξη συνδέεται άμεσα με τη συγκομιδή των παραγόμενων προϊόντων. Επομένως ο υπολογισμός της κατανομής των ημερομηνιών εμφάνισης των ανθοφόρων βλαστών είναι απαραίτητος. Για το σκοπό αυτό μπορούν να εφαρμοστούν δύο διαφορετικές πρακτικές. Η πρώτη στηρίζεται στην παραγωγή σε καθορισμένες περιόδους (η οποία και θα αναλυθεί στην συγκεκριμένη εργασία, ενώ η δεύτερη στη συνεχή παραγωγή.

Στην παραγωγή σε καθορισμένες περιόδους υπάρχει συγχρονισμός όλων των συντελεστών παραγωγής για την επίτευξη του στόχου (συγκομιδή του συνόλου της παραγωγής σε καθορισμένη ημερομηνία). Καθώς με τη συγκομιδή απομακρύνονται όλοι οι ανθοφόροι βλαστοί, η έκπτωση των νέων βλαστών θα γίνει σε όλα τα φυτά την ίδια ημερομηνία, με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η γνώση της κατανομής των βλαστών αλλά η ηλικία των βλαστών αυτών, κάτι που μπορεί να προσδιοριστεί με βάση την ημερομηνία εμφάνισης τους και κλιματικά δεδομένα του θερμοκηπίου. Ο λόγος των βαθμομερών σε μια συγκεκριμένη ημερομηνία προς ( $dd_i$ ) προς τις βαθμομέρες από την εμφάνιση των βλαστών μέχρι και την ημερομηνία συγκομιδής τους ( $D_H$ ) προσδιορίζει την ηλικία των βλαστών. Ο αναμενόμενος αριθμός ημερών πριν τη συγκομιδή ( $n_H$ ) μπορεί να προσδιοριστεί από το λόγο:

$$n_H = \frac{D_H - \sum_{j=e}^i dd_j}{dd_i} \quad (6)$$

όπου  $e$  η ημέρα εμφάνισης του βλαστού,  $dd_i$  ο αριθμός των βαθμομερών από την ημέρα  $i$  όπου το άθροισμα  $dd_i$  από την ημέρα  $e$  έως την δεδομένη ημερομηνία αναπαριστά την ηλικία των βλαστών την ημερομηνία αυτή. Η ισχύς του ανωτέρω υπολογισμού περιορίζεται από την

υπόθεση ότι η στρατηγική θέρμανσης που εφαρμόζεται την ημέρα  $i$  θα πρέπει να είναι η ίδια έως και την ημερομηνία συγκομιδής.

### 3. ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Σκοπός του φυσικού προσομοιώματος θα είναι ο υπολογισμός του κόστους ενέργειας μιας δεδομένης στρατηγικής θέρμανσης η οποία θα ορίζεται από μια αλληλουχία θερμοκρασιών και όχι η πρόβλεψη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά πολύπλοκα δυναμικά φυσικά προσομοιώματα του θερμοκηπίου [13,14] τα οποία όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο παρόν προσομοίωμα είτε γιατί ο μετασχηματισμός τους είναι δύσκολος είτε γιατί περιέχουν παραμέτρους οι οποίες πρέπει να προσδιορίζονται για θερμοκήπιο ξεχωριστά. Έτσι για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ένα απλό προσομοίωμα το οποίο προβλέπει τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και την ένταση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού [15]:

$$T_g = T_o + \frac{b \cdot Rg + H}{U + V} \quad (7)$$

όπου  $T_g$  είναι η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου,  $T_o$  είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα,  $Rg$  είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας,  $H$  είναι η ένταση του συστήματος θέρμανσης,  $U$  είναι ο συντελεστής απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου, ανάλογος της ταχύτητας του αέρα,  $V$  είναι οι απώλειες ενέργειας λόγω αερισμού, ανάλογες της ταχύτητας του εξωτερικού αέρα και της επιφάνειας αερισμού και  $b$  είναι συντελεστής ο οποίος εκφράζει την αποτελεσματικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στη θέρμανση του θερμοκηπίου. Η απαιτούμενη θερμότητα προκειμένου να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σύμφωνα με την εξίσωση (7) είναι:

$$H = (T_g - T_o)(U + V) - bRg \quad (8)$$

### 4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης προσεγγίζεται ως ένα πρόβλημα διαδοχικών αποφάσεων τύπου Markov (MDP), [16]: Η ημέρα χωρίζεται σε χρονικά βήματα και η κατάσταση του συστήματος στο τέλος κάθε χρονικού βήματος εξαρτάται από την κατάσταση του συστήματος στο προηγούμενο χρονικό βήμα και από τη δράση (δόση θέρμανσης – αερισμού) που αποφασίστηκε στο διαρρέυσαν χρονικό βήμα καθώς και από την εξέλιξη του εξωτερικού κλίματος.

Ο δυναμικός προγραμματισμός επιτρέπει να επιλυθούν προβλήματα τέτοιου τύπου όταν είναι γνωστές οι πιθανότητες μετάβασης του συστήματος από μια δεδομένη αρχική κατάσταση σε οιαδήποτε δυνατή επόμενη κατάσταση. Επιβάλλεται στο μοντέλο του συστήματος μια αλληλουχία αποφάσεων (όχι κατ' ανάγκη βέλτιστων) και η εξέλιξη του συστήματος προσομοιώνεται κάτω από διαφορετικά «σενάρια» συνθηκών του εξωτερικού κλίματος. Οι πιθανότητες μετάβασης προσδιορίζονται από τις προσομοιώσεις αυτές και επιτρέπουν να παραχθούν νέες διαδοχικές αποφάσεις (στρατηγικές ελέγχου) κατά τρόπο που να βελτιστοποιούν ένα δεδομένο κριτήριο. Τα προβλήματα αυτού του τύπου μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας τις μεθόδους εκμάθησης με ενίσχυση (Reinforcement Learning, R-Learning) οι οποίες επιτρέπουν τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων με προσφυγή στην προσομοίωση. Η μέθοδος αυτή η οποία είναι διαθέσιμη στη [17] έχει χρησιμοποιηθεί σπάνια σε γεωργικές εφαρμογές και καθόλου σε θερμοκήπια.

Το κριτήριο που θα προκύψει από την βελτιστοποίηση θα εμπεριέχει το ενεργειακό κόστος της υιοθετηθείσας στρατηγικής, το κέρδος που συνδέεται με την παραγωγή καθώς και τις ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα του θερμοκηπίου που δεν πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να εξασφαλισθεί η μέση θερμοκρασία που επιβάλλεται από τον

παραγωγό. Τα στοιχεία αυτά όμως που εμπλέκονται στη διαμόρφωση του κριτηρίου έχουν τελείως διαφορετική δομή και υπόσταση.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα θα χρησιμοποιηθεί μια στρατηγική ελέγχου ως σημείο αναφοράς βάση της οποίας θα προκύψουν αναφορικές (οριακές) τιμές για την αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας καθώς και για το απαιτούμενο κόστος ενέργειας. Η στρατηγική αναφοράς επιλέχθηκε με βάση τη συνήθη σημερινή διαχείριση της θέρμανσης δηλαδή με τον καθορισμό δυο τιμών θερμοκρασίας (ημέρας – νύχτας). Το κριτήριο βελτιστοποίησης που θα επιλεγεί θα κανονικοποιηθεί ως προς την απόδοση της στρατηγικής αναφοράς έτσι ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση. Ας υποθέσουμε ότι τα διανύσματα  $\{g_r, d_r, c_r\}$  είναι οι τρεις βασικές μεταβλητές που καθορίζουν τη συμπεριφορά της μεταβλητής αναφοράς, όπου  $g_r$  είναι η ανάπτυξη της καλλιέργειας (αύξηση ξηρού βάρους),  $d_r$  είναι η εμφάνιση οργάνων (εμφάνιση ανθοφόρων βλαστών) και  $c_r$  το κόστος ενέργειας της στρατηγικής. Έτσι σε μια δεδομένη χρονική στιγμή η τιμή της στρατηγικής αναφοράς  $S_i$  θα καθορίζεται από την τιμή των διανυσμάτων  $\{g_r, d_r, c_r\}$ . Η τιμή του κριτηρίου βελτιστοποίησης η οποία θα συνδεέται με την τιμή της συνάρτησης  $S_i$  θα είναι:

$$g_i, d_i, c_i, S_i = \alpha_g \frac{g_i}{g_r} + \alpha_d \frac{d_i}{d_r} + \alpha_c \frac{c_i}{c_r} \quad (9)$$

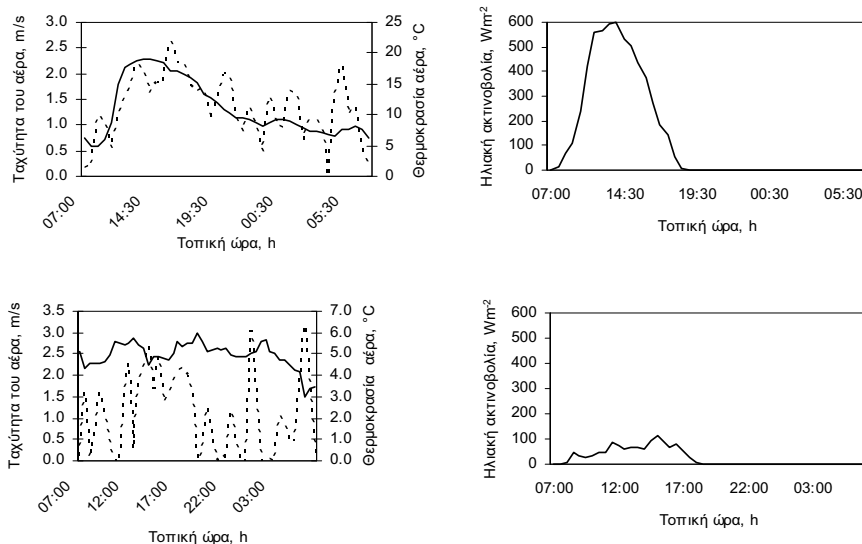
όπου  $\alpha_{g,d,c}$  είναι συντελεστές βαρύτητας της κάθε μεταβλητής οι οποίοι μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με την προτεραιότητα που θέλουμε να δώσουμε σε κάθε παράγοντα που επηρεάζει την τελική τιμή του συστήματος. Εάν το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας ισούται με τη μονάδα τότε κάθε τιμή της στρατηγικής  $S_i$  μικρότερη από τη μονάδα θα είναι χειρότερη από τη στρατηγική αναφοράς και θα πρέπει να απορρίπτεται.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

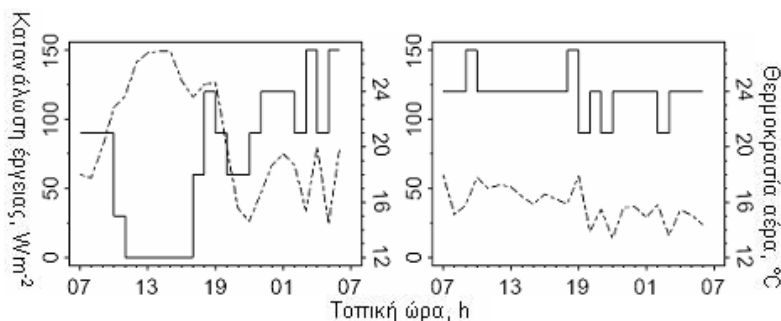
Η βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος έγινε χρησιμοποιώντας κλιματικά δεδομένα της περιοχής του Βελεστίου (Αγρόκτημα Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κοντά στο Βόλο). Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές, ως προς τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, χειμερινές ημέρες (σχήμα 2). Κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας (1<sup>η</sup> Μαρτίου) η μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν  $440 \text{ Wm}^{-2}$  και η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα  $11 \text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας που επιλέχθηκε (4 Μαρτίου) η μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν μόνο  $64 \text{ Wm}^{-2}$  και η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα  $4.8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ως στρατηγική αναφοράς χρησιμοποιήθηκε αυτή που χρησιμοποιείται και από τους παραγωγούς τριαντάφυλλου της περιοχής. Η στρατηγική αυτή συνίσταται στη διατήρηση  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  κατά τη διάρκεια της νύχτας και  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το αναπτυγμένο βιοφυσικό προσομοίωμα επιλύθηκε και βελτιστοποιήθηκε έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη (για την αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας) θερμοκρασία αέρα καθώς και η απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα θέρμανσης. Τα αποτελέσματα αυτά (κατανάλωση ενέργειας και θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου) παρουσιάζονται στο σχήμα 3.

Από το σχήμα 3 προκύπτει ότι την 1<sup>η</sup> Μαρτίου λόγω της υψηλής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας το σύστημα θέρμανσης θα πρέπει να λειτουργήσει ελάχιστα κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συνεχώς τη νύχτα για να μπορέσει να διατηρήσει την επιθυμητή θερμοκρασία των  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στις 4 Μαρτίου, όμως λόγω των χαμηλών επιπέδων της ηλιακής ακτινοβολίας το σύστημα θέρμανσης θα πρέπει να λειτουργήσει συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας λόγω των χαμηλών τιμών της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα η διατήρηση των  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  κρίνεται αντικοινωνική και προτείνεται η διατήρηση χαμηλότερης θερμοκρασίας.



Σχήμα 2. Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες (πάνω σειρά 1/3/04, κάτω σειρά 4/3/04)



Σχήμα 3. Κατανάλωση ενέργειας και θερμοκρασία αέρα (αριστερά 1/3/04, δεξιά 4/3/04)

Και για στις δύο εξεταζόμενες ημέρες η αποτελεσματικότητα του συστήματος (θέρμανση – ανάπτυξη καλλιέργειας) θα μπορούσε να βελτιωθεί καθώς η τιμή του κριτηρίου βελτιστοποίησης ήταν 1.12 για την 1<sup>η</sup> Μαρτίου και 1.04 για τις 4 Μαρτίου, υποδεικνύοντας στρατηγικές διαχείρισης του θερμοκηπίου 12% και 4% αντίστοιχα, καλύτερες από τη στρατηγική αναφοράς.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα βιοφυσικό προσομοίωμα θερμοκηπίου για καλλιέργεια τριαντάφυλλου και αναπτύχθηκε και η μέθοδος βελτιστοποίησης του με τη μέθοδο της εκμάθησης με ενίσχυση (Reinforcement Learning). Το βελτιστοποιημένο προσομοίωμα εφαρμόστηκε σε χειμερινή καλλιέργεια τριαντάφυλλου και τα αποτελέσματα έδειξαν πως η χρησιμοποίηση του μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, επιτρέποντας έτσι μια πιο ορθολογική διαχείριση της ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση του θερμοκηπίου. Η πειραματική επιβεβαίωση του βιολογικού προσομοιώματος καθώς και η επέκταση της εφαρμογής του και σε άλλες τεχνικές και συστήματα καλλιέργειας θα είναι τα επόμενα βήματα αυτής της εργασίας.

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Grafiadellis M., 1990. The use of solar energy for heating greenhouses. *Acta Horticulturae* 263: 83-96
2. C. Kittas; N. Katsoulas, A.. Baille, 2003. Influence of Aluminised Thermal Screens on Greenhouse Microclimate and Night Transpiration. *Transactions of the ASAE*, 46(6): 1653- 1663.
3. Tap RF, van Willigenburg LG, van Straten G, van Henten EJ, 1993. Optimal control of greenhouse climate: computation of the influence of fast and slow dynamics. 12th IFAC Triennial World Congress, Sydney, Australia, Volume 4, 4pp
4. Heuvelink E, 1989. Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 38: 11-22.
5. Myster J, Moe R, 1995. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops – a mini review. *Scientia Horticulturae*, 62: 205-215.
6. Vogelegang J, de Hoog J, Marissen N, 2000. Effects of diurnal temperature strategies on carbohydrate content and flower quality of greenhouse roses. *Acta Horticulturae* 515: 111-118
7. Challa H, Schapendonk AHCM, 1986. Dynamic optimization of CO<sub>2</sub> concentration in relation to climate control in greenhouses. In: H.Z Enoch and B.A. Kimball (Editors), *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops*, Vol. 1. CRC, Boca Raton, FL, pp. 147-160
8. van Henten E.J. and Bontsema J.; Greenhouse climate control: a two time-scale approach. *Acta Horticulturae*, 406:213-219.
9. Seginer I., Gary C. and Tchamitchian M.; Optimal temperature regimes for a greenhouse crop with a carbohydrate pool: a modelling study. *Scientia Horticulturæ*, 60: 55-80, 1994.
10. Acock B., Charles-Edwards D.A., Fitter D.J., Hand D.W., Ludwig L.J., Warren Wilson J. and Withers A.C.; The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy photosynthesis: An experimental examination of two canopy models. *Journal of Experimental Botany*, 29(111): 815-827.
11. Gonzalez-Real M. and Baille A.; Changes in leaf photosynthetic parameters with leaf position and nitrogen content within a rose plant. *Plant, Cell & Environment*, 23(4): 351-363.
12. Pasian C.C. and Leith J.H.; Prediction of rose shoot development: Model validation for the cultivar 'Cara Mia' and extension to the cultivars 'Royalty' and 'Sonia'. *Scientia Horticulturæ*, 66(1-2): 117-124, 1996.
13. Bot, G. P. A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, (NLD).
14. Navas, L. M., de la Plaza, S., Garcva, J. L., Duron, J. M., Retamal, N., Luna, L., Benavente, R., 1998. Formulation and sensitivity analysis of a dynamic model of the greenhouse climate. Validation for a mild mediterranean climate. *Acta Horticulturae* 456, 305–312.
15. Gutman P.O., Lindberg P.O., Ioslovich I. and Seginer I.; A non-linear optimal greenhouse control problem solved by linear programming. *Journal of agricultural Engineering Research*, 55(4): 335-351, 1993.
16. Puterman M.L., *Markov decision processes*, Wiley, New-York, 1994.
17. Sutton R.S. and Barto A.G.; *Reinforcement learning: an introduction*. MIT Press, Cambridge, 1998.



***ΟΙ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ***

---