

–ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: Εργαστήριο Αυτοματισμού και Ρομποτικής

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΔΗΜΟΥ ΗΛΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Αριθμός Μητρώου: 227773

Θέμα

«ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ»

Επιβλέπων

Κούσουλας Νικόλαος, Γρουμπός Πέτρος

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

227773 /2019

Πάτρα,/...../.....

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

«Εφαρμογές ευφυούς ελέγχου σε θερμοκήπια»

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Δήμου Ηλίας Γεώργιος

Αριθμός Μητρώου:227773

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

...../...../.....

Ο Επιβλέπων

Νικόλαος Κούσουλας

Ο Διευθυντής του Τομέα

Νικόλαος Κούσουλας

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:227773/2019

Θέμα: «Εφαρμογές ευφυούς ελέγχου σε θερμοκήπια»

Φοιτητής:

Επιβλέπων:

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	12
2.1 Στοιχεία κατασκευής θερμοκηπίων.....	12
2.1.1 Τοποθεσία Θερμοκηπίου	12
2.1.2 Προσανατολισμός θερμοκηπίου.....	13
2.1.3 Προσβασιμότητα σε νερό	14
2.1.4 Προσβασιμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια.....	14
2.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά θερμοκηπίων	15
2.3 Τύποι θερμοκηπίου.....	15
2.4 Σκελετός και λοιπά κατασκευαστικά θερμοκηπίων	20
2.5 Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων	21
2.6 Εξοπλισμός θερμοκηπίων	23
2.6.1 Συστήματα εξαερισμού.....	24
2.6.2 Παθητικά συστήματα εξαερισμού.....	25
2.6.3 Συστήματα δυναμικού εξαερισμού.....	26
2.6.4 Συστήματα θέρμανσης.....	29
2.6.5 Συστήματα παραγωγής θερμότητας	30
2.6.6 Συστήματα αφύγρανσης.....	31
2.6.7 Συστήματα σκίασης	31
2.6.8 Σκίαση με δίχτυ	32
2.6.9 Συστήματα δροσισμού	32
2.6.10 Συστήματα εμπλουτισμού με CO ₂	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΝΤΟΜΑΤΑ	34
3.1 Καταγωγή – χαρακτηριστικά.....	34
3.2 Ποικιλίες και υβρίδια.....	35
3.3 Καλλιέργεια σε θερμοκήπιο και τα βήματα της	36
3.3.1 Σπορείο.....	36
3.3.2 Σπορά στο σπορείο.	36
3.4 Μεταφύτευση στο θερμοκήπιο	37
3.4.1 Προετοιμασία του εδάφους.....	37

3.4.2 Μεταφύτευση στο θερμοκήπιο.....	38
3.4.3 Εποχή Φύτευσης.....	40
3.5 Ιδανικές συνθήκες καλλιέργειας της ντομάτας.....	40
3.5.1 Θερμοκρασία.....	40
3.5.2 Σχετική Υγρασία.....	41
3.5.3 Εμπλουτισμός του θερμοκηπίου με διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	42
3.6 Φυσικές διαταραχές σε καρπούς ντομάτας.....	42
3.6.1 Ανομοιόμορφη ωρίμανση	43
3.6.2 Ακτινωτό σχίσμο καρπών	43
3.6.3 Ξηρή σήψη κορυφής.....	44
3.6.4 Παραμόρφωση κορυφής (catface).....	44
3.6.5 Ξυλοποίηση εσωτερικού καρπού	45
3.7 Θερμικά Μοντέλα Θερμοκηπίου	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	46
4.1 Εισαγωγή	46
4.2 Διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο	49
4.3 Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του θερμοκηπίου	52
4.4 Ανεξάρτητα θερμικά μοντέλα θερμοκηπίου.....	53
4.5 Θερμικά μοντέλα σε συνδυασμό με συστήματα θέρμανσης / αποθήκευσης θερμότητας ..	53
4.6 Θερμικά μοντέλα σε συνδυασμό με αποθήκευση υλικού αλλαγής φάσης (Phase Change Material PCM)	54
4.7 Μοντέλα εξατμισοδιαπνοής(evapotranspiration ET) στο θερμοκήπιο	55
4.8 Το μοντέλο του Hargreaves για την εξατμισοδιαπνοή.....	57
4.9 Συμπεράσματα 4 ^{ου} κεφαλαίου.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΥΦΥΗΣ ΈΛΕΓΧΟΣ	61
5.1 Εισαγωγή	61
5.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη.....	62
5.3 Η Ασαφής Λογική	62
5.4 Η αρχή της ασυμβατότητας	64
5.5 Ο Ευφυής Έλεγχος	64
5.6 Ασαφή Σύνολα	66

5.7 Συναρτήσεις Συμμετοχής.....	68
5.8 Πράξεις Ασαφών συνόλων	71
5.9 Ασαφείς κανόνες	72
5.10 Ασαφείς ελεγκτές	73
5.10.1 Από-ασαφοποίηση μέσου όρου των μεγίστων (Mean of Maximum (MOM))	74
5.10.2 Απο-ασαφοποίηση κέντρου βάρους(Centroid defuzzification COG)	74
Κεφάλαιο 6 Matlab	76
6.1 Εισαγωγή στο Matlab	76
6.2 Γραφικά στο MATLAB.....	77
6.2.1 Η εντολή plot.....	77
6.2.2Χρήσιμες συναρτήσεις για γραφικά	78
6.2.3 Χρώματα, σύμβολα και γραμμές.....	79
6.4 Συνήθεις διαφορικές εξισώσεις και επίλυση τους στο MATLAB.....	81
6.4.1 Γενικά περί συνήθων διαφορικών εξισώσεων	81
6.4.2 Η εντολή ode45.....	82
6.5 Fuzzy Logic Toolbox Matlab	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	87
7.1 Εισαγωγή	87
7.2 Στοιχεία του θερμοκηπίου	87
7.3 Εξίσωση περιγραφής κλίματος θερμοκηπίου	88
7.3.1 περιγραφή στοιχείων θερμικής εξίσωσης θερμοκηπίου.....	88
7.3.2 Περιγραφή στοιχείων εξίσωσης υγρασίας θερμοκηπίου	91
7.3.3 Διαφορικές εξισώσεις κλίματος θερμοκηπίου	91
7.4 Προσομοίωση και έλεγχος κλίματος θερμοκηπίου στο matlab.....	93
7.4.1 Εισαγωγή στοιχείων θερμοκηπίου και κλίματος στο matlab για τον έλεγχο της θερμοκρασίας.....	93
7.4.2 Ευφυής ελεγκτής θερμοκρασίας θερμοκηπίου.....	94
7.4.3 Εισαγωγή στοιχείων θερμοκηπίου και κλίματος στο matlab για τον έλεγχο της υγρασίας.....	97
7.4.4 Ευφυής ελεγκτής θερμοκρασίας υγρασίας	98
7.5 Αποτελέσματα ελέγχου κλίματος.....	101

7.6 Συμπεράσματα – Σχόλια.....	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	104
ΠΗΓΕΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ.....	104
Κεφάλαιο 2	104

Ευχαριστίες

Το τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών λειτούργησε καταλυτικά για τη διαμόρφωση του πεδίου ενδιαφέροντός μου. Πρώτα ευχαριστώ όλους τους καθηγητές που μου έδωσαν την απαραίτητη γνώση ώστε να φέρω σε πέρας τη διπλωματική. Αρχικά τους επιβλέποντες καθηγητές κ. Γρουμπό και κ. Κουσουλα καθώς και την κ.Μπελογιάννη.Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω για την βοήθειά τους ,τους καθηγητές του γεωπονικού πανεπιστήμιου Αθηνών κ.Μπαρτζάνα Θωμά και κ. που επίσης συνεισέφεραν στο να ενισχύσω τις γνώσεις μου πάνω στον τομέα των θερμοκηπίων.Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και φίλους μου που μου στάθηκαν και με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής αυτής της διπλωματικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με το θέμα του ελέγχου του κλίματος ενός θερμοκηπιού μέσω της χρήσης ευφυσούς ελέγχου(fuzzy control). Αφού υποθέσαμε ότι το φυτό προς καλλιέργεια είναι η τομάτα καθότι δίχως φυτό δεν έχει νόημα ο έλεγχος του κλίματος μιας και επηρεάζει και τις επιθυμητές τιμές αυτού αλλά και το ίδιο το κλίμα λόγω των φυσικών διεργασιών που κάνει κατά τη διάρκεια της ημέρας,προσπάθησαμε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο του κλίματος του θερμοκηπίου με βάση νόμους της θερμοδυναμικής ικανό να αναπαριστά με αρκετή ακρίβεια τις μεταβολές που συμβαίνουν στο κλίμα ενός θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας.Η παρούσα διπλωματική εξετάζει και ελέγχει το κλίμα ενός θερμοκηπίου όσον αφορά την εσωτερική του θερμοκρασία και υγρασία χρησιμοποιώντας ως δεδομένα-εισόδους την ένταση της ηλιοφάνειας ,την εξωτερική θερμοκρασία και υγρασία,δεδομένα τα οποία ελήφθησαν απο μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών για την περιοχή της Πάτρας μία τυχαία ημέρα του Νοεμβρίου.Χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό περιβάλλον (Matlab) καταφέραμε να δημιουργήσουμε μέσω διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν σε ένα θερμοκήπιο το μοντέλο του θερμοκηπίου όπου και εφαρμόσαμε τον έλεγχο με την χρήση ενός ψυκτικού σώματος ,ενός θερμαντικού και ενός υγραντήρα ατμόσφαιρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

2.1 Στοιχεία κατασκευής θερμοκηπίων

Το θερμοκήπιο είναι ένα κτήριο με στόχο να παρέχει το πιο ιδανικό μικρο-κλίμα για μεγιστοποίηση της ανάπτυξης των φυτών κατά τη διάρκεια εποχών που δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη τους σε φυσικό περιβάλλον ή σε περιοχές όπου είναι αδύνατη η φυσική ανάπτυξη των εν λόγω φυτών. Η θερμοκρασία αέρα είναι η κυριότερη παράμετρος που επηρεάζει την ανάπτυξη ενός φυτού. Το διάφανο κάλυμμα του θερμοκηπίου επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία (υπεριώδη) να εισέλθει και ταυτόχρονα εμποδίζει την υπέρυθη που εξέρχεται από το χώμα απ το να φύγει από το θερμοκήπιο δημιουργώντας έτσι το λεγόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

2.1.1 Τοποθεσία Θερμοκηπίου

Ένα θερμοκήπιο πρέπει να είναι τοποθετημένο έτσι ώστε να είναι καλά συνδεδεμένο με αγορές και για τις καθημερινές ανάγκες του αλλά και για τη μεταφορά των προϊόντων του. Είναι επιθυμητό επίσης το επίπεδο όπου θα χτιστεί να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδο και να υπάρχει καλή αποστράγγιση των νερών του θερμοκηπίου καθώς υπάρχει εκτεταμένη χρήση νερού. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάτι τέτοιο είναι καλό να προστεθεί πριν από την κατασκευή του θερμοκηπίου ένας αγωγός αποχέτευσης κάτω από την επιφάνεια του θερμοκηπίου. Θετικό επίσης είναι να υπάρχει κάποιο μέσο που εμποδίζει τον αέρα στην βόρεια και βορειοδυτική πλευρά του θερμοκηπίου όπως ένας λόφος ή μία συστάδα δένδρων. Σε περιοχές όπου χιονίζει τα δένδρα αυτά πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 30 μέτρα μακριά από το κτίσμα. Τέλος, σε περίπτωση που υπάρχουν δέντρα γύρω από το θερμοκήπιο θα πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση τουλάχιστον δύομιση φορές του ύψους τους έτσι ώστε να αποφευχθεί να σκιάζουν τα φυτά. Είναι σημαντικό στην επιλογή τοποθεσίας επίσης να υπάρχει πρόβλεψη για μελλοντική επέκταση του θερμοκηπίου ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμο.

2.1.2 Προσανατολισμός θερμοκηπίου

Δύο είναι τα βασικά κριτήρια επιλογής του προσανατολισμού ενός θερμοκηπίου:

- Το επίπεδο φωτός εσωτερικά του θερμοκηπίου πρέπει να είναι ομοιόμορφο σε όλο το μήκος του θερμοκηπίου και ικανό να δώσει τα απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών.
- Οι επικρατούντες άνεμοι πρέπει να μην επηρεάζουν αρνητικά την κατασκευή και την λειτουργία του θερμοκηπίου.

Κτίρια άνω του 40^{ου} βόρειου παραλλήλου (πέριπου άνω της λήμνου για την Ελλάδα) τα οποία είναι μονά σαν θερμοκήπια θα πρέπει να χτίζονται με την οροφή να βλέπει από την ανατολή προς τη δύση έτσι ώστε το χαμηλής γωνίας φως του χειμώνα να μπορεί να μπει από μία πλευρά και όχι από ένα τέλος όπου υπάρχουν περισσότερα μεταλικά μέλη στήριξης. Κάτω από τον 40^ο βόρειο παράλληλο τα θερμοκήπια πρέπει να χτίζονται με κατεύθυνση από τον βορρά προς τον νότο καθώς η γωνία του ηλίου είναι πολλή υψηλότερη. Θερμοκήπια που είναι ενωμένα κατά μήκος πρέπει να είναι πάντα χτισμένα με κατεύθυνση από το βορρά προς το νότο έτσι ώστε να μην πέφτει η σκιά του ενός στο άλλο.

Η κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην κατεύθυνση του θερμοκηπίου καθώς θέλουμε ο εξαερισμός να ανοίγει από τη μεριά των ανέμων. Τέλος, όπως αναφέρθηκε και πριν πρέπει να μην υπάρχει κανένα ψηλό κτίριο ή δέντρο περιμετρικά του θερμοκηπίου.

2.1.3 Προσβασιμότητα σε νερό

Το νερό είναι ένα από τα πιο συχνώς παραβλεπούμενα στοιχεία στην κατασκευή ενός θερμοκηπίου. Είναι εξίσου σημαντική η ποιότητα του νερού η οποία πρέπει να εξεταστεί πριν από την κατασκευή του θερμοκηπίου όσο και η ποσότητα του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μπορεί να χρειαστούν μέχρι και 20 λίτρα νερού ανά τετραγωνικό μέτρο φυτών σε ένα θερμοκήπιο με την ποσότητα να διαφέρει ανάλογα με το κλίμα της περιοχής το χώμα και το φυτό που καλλιεργείται. Το πότισμα των φυτών του θερμοκηπίου είναι ένα από τα πιο καίρια ζητήματα στην παραγωγή καθώς το κακό πότισμα είναι ένας από τους πιο βασικούς λόγους μείωσης της ποιότητας της σοδιάς οπότε είναι σημαντικό το έδαφος να διατηρείται στο ιδανικό επίπεδο υγρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

2.1.4 Προσβασιμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια

Καθώς ένα θερμοκήπιο πλέον έχει ολοένα και περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές είναι σημαντική η παροχή συνεχούς και σταθερής ηλεκτρικής ενέργειας. Ενεργοβόρες συσκευές όπως ανεμιστήρες και θερμαντικά σώματα απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικού ρεύματος.

Ενδεικτικά παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με υπολογισμούς σε ανάγκες ηλεκτρικού ρεύματος ανάλογα με τα τετραγωνικά ενός θερμοκηπίου

Table 3.4 Electrical Power Requirement for Greenhouses of Different Size.

Greenhouse Size (m ²)	Electrical Power Requirement (kW)
500	15
500–2000	24
2000–3000	36
3000–4000	48
4000–8000	96
8000–12000	145

Πίνακας 2.1: Απαιτήσεις Ηλεκτρικής Ισχύος Θερμοκηπίων (Πηγή εικόνας : greenhouse Design and control Pedro Ponce Arturo Molina Brian MacCleery)

2.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά θερμοκηπίων

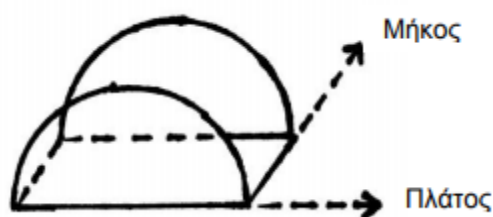
Τα θερμοκήπια, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, διακρίνονται σε χωρικού τύπου και τυποποιημένα. Τα χωρικού τύπου κατασκευάζονται από τους ίδιους τους παραγωγούς, ενώ τα τυποποιημένα κατασκευάζονται από βιοτεχνίες και βιομηχανίες σε μαζική παραγωγή. Το σχήμα, οι διαστάσεις καθώς και τα υλικά σκελετού και κάλυψης είναι ποικίλα. Το τελικό σχήμα ενός θερμοκηπίου εξαρτάται από το σχήμα της Βασικής Κατασκευαστικής Μονάδας (BKM) και των επαναλήψεων της. Βασική κατασκευαστική μονάδα ενός θερμοκηπίου είναι το μικρότερο πλήρες τμήμα του, το οποίο επαναλαμβανόμενο κατά μήκος και κατά πλάτος σχηματίζει το σύνολο. Το πλάτος μίας BKM για κατασκευαστικούς λόγους συνήθως δεν υπερβαίνει τα 8 m. Υπάρχουν όμως και τύποι θερμοκηπίων με BKM που φτάνουν και τα 16 m. Το μήκος της BKM συνήθως κυμαίνεται από 2 έως 3 m. Τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία διακρίνονται τα θερμοκήπια σε κατηγορίες είναι: α) το σχήμα, β) το πλάτος, γ) το ύψος, δ) ο τρόπος διάταξής της BKM στην καλλιεργούμενη επιφάνεια, ε) το υλικό και ο τρόπος κατασκευής του σκελετού, και στ) το υλικό κάλυψης.

2.3 Τύποι θερμοκηπίου

Οι BKM των θερμοκηπίων μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα, τα οποία έχουν επιλεγεί με βάση τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και το κόστος τους. Μία πρώτη βασική διάκριση είναι μεταξύ αυτών που έχουν ημικυκλική (τοξωτή) οροφή και αυτών που έχουν οροφή αποτελούμενη από δύο κεκλιμένα επίπεδα τα οποία συγκλίνουν μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν μία στέγη. Αν και υπάρχουν διάφορες ιδιοκατασκευές, τα επικρατέστερα σχήματα θερμοκηπίων είναι τα εξής:

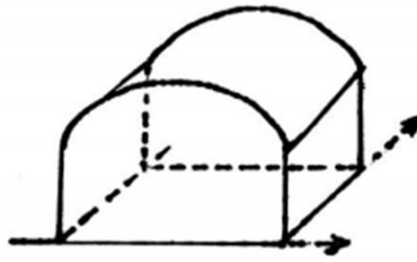
- Τοξωτά θερμοκήπια (ψηλά τούνελ ή ψηλές σήραγγες). Στα τοξωτά θερμοκήπια, η BKM αποτελείται από δύο συνεχόμενες απλές αψίδες. Το ύψος τους συνήθως είναι σχετικά χαμηλό, αλλά επαρκές για την είσοδο ανθρώπων (συνήθως 2-4 m στο κέντρο τους). Επειδή φέρουν μικρό φορτίο, έχουν ελαφρύ σκελετό, με συνέπεια να έχουν φτηνό κόστος. Λόγω του ανομοιομορφου ύψους κατά πλάτος παρουσιάζουν αντίστοιχη ανομοιομορφία και στις συνθήκες περιβάλλοντος στο εσωτερικό τους. Η προοδευτική μείωση του ύψους κατά πλάτος της αψίδας προκαλεί

αντίστοιχα αυξανόμενη δυσκολία στην κίνηση των εργατών και στην κατά ύψος ανάπτυξη φυτών προς τις δύο άκρες της αψίδας. Γι' αυτό, τα τοξωτά θερμοκήπια δεν είναι κατάλληλα για φυτά υψηλής ανάπτυξης, όπως η τομάτα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για καλλιέργειες φράουλας, κολοκυθιού, μη υποστλωμένου καρπουζιού και πεπονιού, μαρουλιού και λιγότερο συχνά για φυτά όπως νωπό φασόλι, πιπεριές, μελιτζάνες, κ.λπ. Ο αερισμός γίνεται χειρωνακτικά με πλαϊνά ανοίγματα τα οποία συχνά δεν μπορούν να μειώσουν σε κατάλληλα επίπεδα την εσωτερική θερμοκρασία την περίοδο από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο. Λόγω του χαμηλού κόστους τους όμως, είναι πολύ διαδεδομένα, κυρίως για μικρής διάρκειας καλλιέργειες.



Εικόνα 2.2: Τοξωτό Θερμοκήπιο

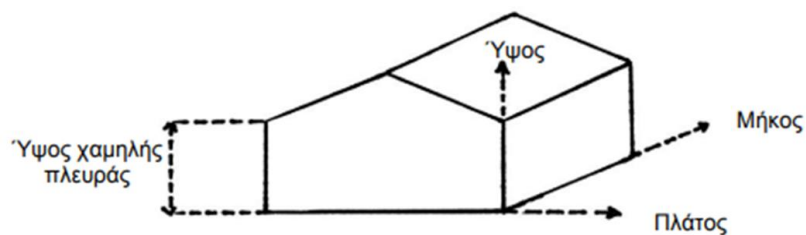
- Τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια (τοξωτά με κάθετες πλευρές). Στα τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια η αψίδα είναι στερεωμένη σε δύο κάθετους στύλους, τους ορθοστάτες. Με αυτό το τρόπο σχηματίζεται ένα θερμοκήπιο με κάθετες πλάγιες πλευρές και ημικυκλική (τοξωτή) οροφή. Τεχνικά, έχουν την δυνατότητα να είναι αρκετά ψηλά, αλλά συνήθως δεν είναι πολύ μεγάλου ύψους. Κατά κανόνα φέρουν μεταλλικό σκελετό αν και υπάρχουν και μικτοί τύποι (ξύλο και μέταλλο). Είναι ένας πολύ διαδεδομένος τύπος θερμοκηπίων σε όλο τον κόσμο. Τα υλικά κάλυψης των κάθετων πλευρών και της ημικυκλικής οροφής συχνά είναι διαφορετικά, αλλά σε κάθε περίπτωση και τα δύο είναι κατασκευασμένα από κάποιο είδος διαφανούς πλαστικού. Μπορούν να φέρουν ανοίγματα και στην οροφή και στα πλάγια και να συνοδεύονται από εξοπλισμό για θέρμανση, δροσισμό κ.λπ., καθώς και αυτοματισμούς.



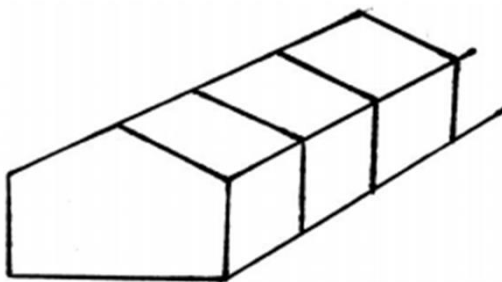
Εικόνα 2.3: Τροποποιημένα Τοξωτά Θερμοκήπια

- Αμφίρρικτα (αμφικλινή) θερμοκήπια. Η ΒΚΜ αυτών των θερμοκηπίων διαφέρει από την προηγούμενη στο ότι η αψίδα έχει αντικατασταθεί από ένα ισοσκελές τρίγωνο (ζευκτό), σχηματίζοντας μία συμμετρική στέγη. Τα αμφίρρικτα θερμοκήπια μπορούν να φέρουν ανοίγματα εξαερισμού τόσο στην οροφή όσο και στα πλάγια. Τα ανοίγματα οροφής μπορούν να είναι συνεχόμενα ή ασυνεχή. Τα συνεχόμενα ανοίγματα οροφής συνιστώνται όταν οι ανάγκες εξαερισμού κάποιες εποχές του έτους είναι μεγάλες (μεσογειακά κλίματα). Στη Βόρεια Ευρώπη συνήθως τα ανοίγματα οροφής δεν είναι συνεχόμενα, ενώ δεν υπάρχουν πλευρικά παράθυρα. Κάθε ΒΚΜ μπορεί να καλύπτεται είτε από δύο κεκλιμένα επίπεδα που σχηματίζουν μία μονή οροφή είτε από τέσσερα κεκλιμένα επίπεδα που συγκλίνουν ανά δύο σχηματίζοντας δύο συνεχόμενες οροφές. Η μονή οροφή δημιουργεί μεγαλύτερο εσωτερικό όγκο στέγης. Επειδή η μονή οροφή καλύπτει όλο το πλάτος της ΒΚΜ, αναφέρεται διεθνώς ως wide span type. Αντίστοιχα, η διπλή οροφή δημιουργεί μικρότερο εσωτερικό χώρο στέγης, αφού κάθε επιμέρους στέγη καλύπτει μόνο το μισό από το συνολικό πλάτος της ΒΚΜ. Τα αμφίρρικτα θερμοκήπια με διπλή οροφή είναι διεθνώς γνωστά ως τύπου Venlo. Άλλα χαρακτηριστικά που μπορούν να διαφοροποιούν τα αμφίρρικτα θερμοκήπια είναι: α) το ύψος τους, β) η γωνία κλίσης των κεκλιμένων επιπέδων, γ) το είδος του σκελετού και δ) το υλικό κάλυψης. Σε αυτόν τον τύπο ανήκουν τα περισσότερα γυάλινα θερμοκήπια. Ο τύπος του αμφίρρικτου θερμοκηπίου είναι αρκετά διαδεδομένος διεθνώς.

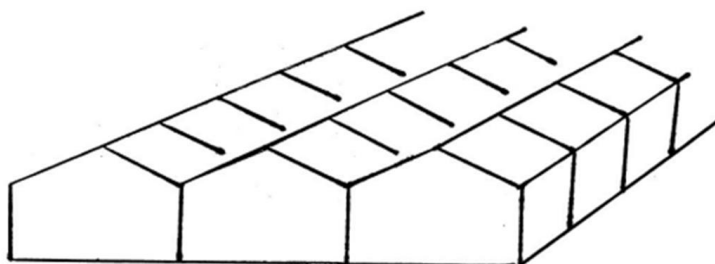
- Αμφίρρικτα (αμφικλινή) θερμοκήπια με κεκλιμένες πλευρές. Στην ΒΚΜ των αμφίρρικτων θερμοκηπίων με κεκλιμένες πλευρές οι ορθοστάτες δεν είναι κάθετοι αλλά ελαφρώς κεκλιμένοι με κατάλληλη αντιστήριξη για να παρέχουν μεγαλύτερη αντίσταση στον άνεμο. Ως προς τα υπόλοιπα ισχύουν τα ίδια με τα τυπικά αμφίρρικτα θερμοκήπια με την επισήμανση ότι κατά κανόνα έχουν μικρότερο ύψος και είναι καλυμμένα με πλαστικό και όχι με γυαλί.



Εικόνα 2.4: Αμφίρρικτο Απλό Θερμοκήπιο



Εικόνα 2.5: Αμφίρρικτο Θερμοκήπιο με Επανάληψη



Εικόνα 2.6: Αμφίρρικτο Πολλαπλό Θερμοκήπιο

- Ετεροκλινή θερμοκήπια. Η ΒΚΜ αυτών είναι όπως του αμφίρρικτου με τη διαφορά ότι το τρίγωνο που δημιουργεί τη στέγη δεν είναι ισοσκελές αλλά σκαλινό. Έτσι δημιουργείται μία μη συμμετρική στέγη. Κατά τα άλλα, ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί και για τα αμφικλινή θερμοκήπια. Τα ετεροκλινή θερμοκήπια είναι όμως πολύ λιγότερο διαδεδομένα διεθνώς σε σύγκριση με τα αμφικλινή.
- Θερμοκήπια γοτθικού τύπου. Η ΒΚΜ των θερμοκηπίων γοτθικού τύπου μοιάζει με αυτή των τοξωτών. Η διαφορά είναι στο σχήμα της αψίδας, το οποίο δεν είναι το κλασσικό ημικυκλικό τόξο αλλά το γοτθικό. Το γοτθικό τόξο συνίσταται από δύο ελαφρά κυρτές (καμπυλωτές) πλευρές που συγκλίνουν προς το κέντρο. Τα θερμοκήπια γοτθικού τύπου παρουσιάζουν και αυτά ανομοιομορφία στο ύψος κατά πλάτος, όπως τα τοξωτά. Γενικά όμως είναι ψηλότερα από τα

τοξωτά, ανάλογα βέβαια και με τον βαθμό καμπυλότητας των πλευρικών τοιχωμάτων τους. Λόγω της σχετικά μεγάλης κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων τους, είναι κατάλληλα για περιοχές με υψηλό ύψος βροχών και συχνές χιονοπτώσεις. Δεν είναι πολύ διαδεδομένα διεθνώς. Χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις σε χώρες με ψυχρό και υγρό κλίμα.



Εικόνα 2.7 Γοτθικό Θερμοκήπιο (πηγή: <https://www.gaiasergon.gr/services/greenhouses/gothic/>)

- Θερμοκήπια με στέγη γοτθικού τύπου. Η ΒΚΜ μοιάζει με αυτή των τροποποιημένων τοξωτών με μόνη διαφορά την αντικατάσταση της κλασσικής καμπυλωτης αψίδας που σχηματίζει την στέγη με την γοτθική αψίδα Όσον αφορά τους ορθοστάτες, αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν είτε κάθετα είτε ελαφρά κεκλιμένοι, όπως στα αμφίρρικτα με κεκλιμένες πλευρές. Γενικά έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα τροποποιημένα τοξωτά με την διαφορά ότι μπορούν να σχηματίζουν στέγη με μεγαλύτερη κλίση η οποία αφενός διευκολύνει την απορροή του νερού και του χιονιού και αφετέρου βελτιώνει την διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας τον χειμώνα. Συνεπώς, σε σύγκριση με το τροποποιημένο τοξωτό είναι ένας πιο κατάλληλος τύπος θερμοκηπίου για βορειότερα και ψυχρότερα κλίματα.

Τα χωρικού τύπου θερμοκήπια μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα με επικρατέστερο το αμφίκρικο ή διάφορες παραλλαγές του. Στην Νότια Ισπανία και κυρίως στην Αλμερία, τα χωρικού τύπου θερμοκήπια, τα οποία έχουν επίπεδη ή ελάχιστα κεκλιμένη στέγη, πολύ χαμηλό ύψος και ξύλινο σκελετό, είναι γνωστά ως parral-type (Montero et al., 2013). Σε όλους τους τύπους θερμοκηπίων που σχηματίζουν στέγη, η κλίση της οροφής καθορίζει τον βαθμό ευκολίας στην απομάκρυνση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, δηλαδή των νερών της βροχής, του χιονιού και του χαλαζιού. Επιπλέον καθώς αυξάνεται η κλίση της οροφής, διευκολύνεται η απομάκρυνση του νερού που δημιουργείται από τη συμπύκνωση των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου. Όσον αφορά την επίδραση της κλίσης στον εσωτερικό φωτισμό, έχει διαπιστωθεί ότι, όσο αυξάνεται η κλίση της οροφής, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται σε ένα θερμοκήπιο μέσω του διαφανούς υλικού κάλυψής του τον χειμώνα (Montero et al., 2013). Από την άλλη πλευρά όμως, η αύξηση της κλίσης της οροφής δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις κυρίως όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής του σκελετού του θερμοκηπίου, με συνέπεια να αυξάνει το κόστος της κατασκευής του. Η προσπάθεια για επίτευξη της χρυσής τομής μεταξύ κόστους και λειτουργικότητας έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση κλίσεων οροφής μεταξύ 25ο και 30ο (Montero et al., 2013).

2.4 Σκελετός και λοιπά κατασκευαστικά θερμοκηπίων

Ο σκελετός του θερμοκηπίου είναι το φέρον σύστημα πάνω στο οποίο θα αναρτηθεί το διαφανές υλικό κάλυψης. Ο σκελετός θα πρέπει να έχει επαρκή στατική ευστάθεια και αντοχή για να φέρει τα παρακάτω φορτία.

- Μόνιμα φορτία, δηλαδή το βάρος του σκελετού και του υλικού κάλυψης
- Φορτία εξοπλισμού
- Φορτίο αναρτημένων φυτών και καρποφορίας στα καρποδοτικά κηπευτικά
- Πρόσκαιρα φορτία (εργάτες, γραμμές μεταφοράς, κ.λπ).
- Κλιματικά φορτία, δηλαδή το βάρος του χιονιού και η πίεση του αέρα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, είναι τεχνικά εφικτό να υπολογισθούν τα υλικά που απαιτούνται και να σχεδιαστεί κατάλληλα η συναρμολόγησή τους, ώστε ο σκελετός που θα

προκύψει να έχει επαρκή μηχανική αντοχή. Μέσω των υπολογισμών αυτών προκύπτουν οι διατομές των στοιχείων του σκελετού, ανάλογα βέβαια με τη φύση του υλικού (ξύλο, χάλυβας, αλουμίνιο κλπ). Ενώ από την μία πλευρά ένα θερμοκήπιο πρέπει να έχει επαρκή στατική και μηχανική αντοχή για να αντέχει στις προβλεπόμενες καταπονήσεις, από την άλλη πλευρά θα πρέπει να μην έχει υπερβολικά βαρύ και εκτεταμένο σκελετό για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι η σκίαση που προκαλεί ο σκελετός στην καλλιέργεια με δεδομένο ότι κατασκευάζεται από 14 αδιαφανή υλικά. Έχει υπολογιστεί ότι ο σκελετός μαζί με το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου μειώνει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία θερμοκηπιακή καλλιέργεια κατά 25-30% σε σύγκρισή με μία υπαίθρια καλλιέργεια στην ίδια περιοχή και τον ίδιο χρόνο. Ένας δεύτερος λόγος που επιβάλλει την κατασκευή θερμοκηπίων με όσο το δυνατόν λιγότερα και λεπτότερα σκελετικά στοιχεία είναι το κόστος της κατασκευής, το οποίο αυξάνεται αναλογικά με τον συνολικό όγκο των τμημάτων που απαρτίζουν τον σκελετό. Συνεπώς, οι κατασκευαστές θερμοκηπίων καλούνται να βρουν την χρυσή τομή μεταξύ της ανάγκης για ισχυρό σκελετό που παρέχει ικανή στατική και μηχανική αντοχή και της ανάγκης για έναν ελαφρύ σχετικά σκελετό που θα ελαχιστοποιεί την σκίαση της καλλιέργειας και το κόστος κατασκευής του.

Πιθανά υλικά κατασκευής του σκελετού είναι

- Ξύλο
- Χάλυβας
- Γαλβανισμένος χάλυβας δηλαδή χάλυβας που έχει επικάλυψη με λεπτό στρώμα ψευδαργύρου και προστατεύει από οξείδωση
- Αλουμίνιο

2.5 Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων

Τα διαφανή υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων διακρίνονται σε τρεις γενικές κατηγορίες και ειδικότερα:

- α) το μαλακό (εύκαμπτο) πλαστικό,
- β) το σκληρό πλαστικό και

γ) το γυαλί.

Τόσα τα μαλακά όσο και τα σκληρά πλαστικά είναι πολυμερισμένοι υδρογονάνθρακες ή παράγωγα αυτών, δηλαδή οργανικές ενώσεις οι οποίες κατασκευάζονται με πρώτη ύλη διάφορα υποπροϊόντα του πετρελαίου. Όλα τα πολυμερή πλαστικά υλικά περιέχουν και διάφορες προσθετικές ουσίες που:

α) είτε τα σταθεροποιούν χημικά,

β) είτε τα προστατεύουν από διάφορους παράγοντες,

γ) είτε τους προσδίδουν ειδικές ιδιότητες που είναι χρήσιμες για την καλλιέργεια των κηπευτικών υπό κάλυψη.

Όπως προκύπτει από την σύγκριση των ειδικών βαρών των σημαντικότερων υλικών κάλυψης θερμοκηπίων, τα πλαστικά είναι πολύ ελαφρύτερα από το γυαλί και συνεπώς πιο εύχρηστα. Επιπλέον, το πάχος των πλαστικών υλικών κάλυψης και ιδιαίτερα των μαλακών φύλλων είναι σημαντικά μικρότερο. Από την άλλη πλευρά όμως, το γυαλί έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα στη φωτεινή ακτινοβολία από τα πλαστικά υλικά κάλυψης. Επίσης, το γυαλί έχει θεωρητικά άπειρη διάρκεια ζωής, ενώ τα πλαστικά υλικά κάλυψης έχουν περιορισμένη διάρκεια ωφέλιμης ζωής που κυμαίνεται από 2 έως 10-15 έτη. Ο περιορισμένος χρόνος ωφέλιμης ζωής των πλαστικών υλικών κάλυψης οφείλεται στην προοδευτική μείωση της περατότητάς τους στο φως, η οποία μετά από κάποια χρόνια πέφτει σε μη αποδεκτά επίπεδα. Η μείωση της περατότητας των πλαστικών υλικών κάλυψης στη φωτεινή ακτινοβολία οφείλεται σε φωτογήρανση η οποία προκαλείται από την συνεχή έκθεσή τους στην ηλιακή ακτινοβολία.

Συνεπώς, τα πλαστικά υλικά κάλυψης πρέπει να απορρίπτονται και να αντικαθίστανται με καινούργια μετά από κάποια χρόνια, ενώ το γυαλί δεν έχει ανάγκη αντικατάστασης, εκτός από μεμονωμένους υαλοπίνακες, εφόσον υποστούν θραύση λόγω κάποιου μηχανικού αιτίου. Η απόρριψη των πλαστικών υλικών κάλυψης θερμοκηπίων μετά την χρήση τους δημιουργεί σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Πρόκειται για το ίδιο πρόβλημα που προκαλείται από την χρήση πλαστικών για εδαφοκάλυψη ή για καλλιέργεια φυτών σε χαμηλές σήραγγες. Συνεπώς οι προτεινόμενες λύσεις είναι κατά βάση παρόμοιες με εκείνες που προτείνονται για τα πλαστικά εδαφοκάλυψης (χρήση φωτο- και βιοαποδομήσιμων υλικών κάλυψης). Επιπλέον, η οργάνωση της

συλλογής των πλαστικών κάλυψης μετά την χρήση τους στα θερμοκήπια και η ανάπτυξη τεχνολογιών ανακύκλωσής τους φαίνεται να αποτελεί μία πολύ καλή στρατηγική επίλυσης αυτού του προβλήματος.

2.6 Εξοπλισμός θερμοκηπίων

Ο εξοπλισμός των θερμοκηπίων αποσκοπεί κυρίως στον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο εσωτερικό τους. Τα υψηλής τεχνολογίας θερμοκήπια μπορεί να διαθέτουν επιπλέον εξοπλισμό για τον έλεγχο και του φωτισμού καθώς και των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο εσωτερικό τους. Σημειώνεται ότι, όσον αφορά τον φωτισμό, στα κηπευτικά μπορεί να ρυθμίζεται η ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (αφομοιωτικός φωτισμός) αλλά δεν υπάρχει σκοπιμότητα ελέγχου της φωτοπερίόδου. Στην Ελλάδα όμως πολύ λίγα λαχανοκομικά θερμοκήπια διαθέτουν εξοπλισμό για αύξηση των επιπέδων CO₂ στο εσωτερικό τους, ενώ ακόμη λιγότερα (κυρίως φυτώρια) μπορεί να διαθέτουν εξοπλισμό για την αύξηση του αφομοιωτικού φωτισμού. Εκτός από τα παραπάνω, στον εξοπλισμό ενός θερμοκηπίου συμπεριλαμβάνονται τα εντομοστεγή δίχτυα που αποσκοπούν στον έλεγχο της εισόδου επιβλαβών εντόμων στο χώρο καλλιέργειας, οι εγκαταστάσεις συσκευασίας των παραγόμενων κηπευτικών, συστήματα πλύσης του θερμοκηπίου, οχήματα κίνησης του προσωπικού ανάμεσα στις γραμμές των φυτών και ανύψωσής τους για να εκτελούν καλλιεργητικές εργασίες, όπως κλάδεμα και υποστύλωση, συγκομιδή, κ.λπ. Στον εξοπλισμό του θερμοκηπίου συμπεριλαμβάνονται επίσης τα συστήματα άρδευσης και υδρολίπανσης. Ειδικού σκοπού θερμοκήπια, όπως τα βιολογικά θερμοκήπια, τα υδροπονικά θερμοκήπια, καθώς και τα θερμοκήπια-φυτώρια, συνήθως περιλαμβάνουν και αντίστοιχο ειδικό εξοπλισμό. Παρακάτω θα γίνει μόνο μία σύντομη τεχνική περιγραφή του βασικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για έλεγχο των κλιματικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμός, διοξείδιο του άνθρακα). Στις Ελληνικές κλιματικές συνθήκες, σε γενικές γραμμές ο εξοπλισμός για την ρύθμιση του εσωτερικού μικροκλίματος των θερμοκηπίων αποσκοπεί:

α) στην θέρμανση και την μείωση της ατμοσφαιρικής υγρασίας τον χειμώνα,

β) στον εξαερισμό για την μείωση της θερμοκρασίας κάποιες ώρες της ημέρας την άνοιξη και το φθινόπωρο και

γ) στην μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση της υγρασίας το καλοκαίρι μέσω εξαερισμού, σκίασης και δροσισμού.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ίδιος εξοπλισμός ρυθμίζει ταυτόχρονα περισσότερες από μία κλιματικές παραμέτρους. Ειδικότερα, τα συστήματα θέρμανσης αυξάνουν την θερμοκρασία ενώ ταυτόχρονα μειώνουν την σχετική υγρασία, ενώ τα συστήματα δροσισμού αυξάνουν την υγρασία ενώ ταυτόχρονα μειώνουν την θερμοκρασία του αέρα. Αντίστοιχα, τα συστήματα εξαερισμού μειώνουν την θερμοκρασία αλλά ταυτόχρονα επηρεάζουν και την υγρασία του αέρα. Τα συστήματα σκίασης μειώνουν την θερμοκρασία του αέρα, ταυτόχρονα μειώνουν και τα επίπεδα της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας, ενώ επιπλέον έμμεσα ασκούν επίδραση και στην σχετική υγρασία του χώρου μέσω της επίδρασής τους στη θερμοκρασία. Επισημαίνεται επίσης ότι, πολλά συστήματα είναι αναγκαίο να λειτουργούν ταυτόχρονα και να συνεργάζονται μεταξύ τους για την ρύθμιση ενός κλιματικού παράγοντα (π.χ. συστήματα δροσισμού και εξαερισμού, ή δροσισμού και σκίασης, η θέρμανσης και ανάδευσης του εσωτερικού αέρα). Λαμβάνοντας αυτά υπόψη, η περιγραφή του κάθε συστήματος παρακάτω γίνεται με βάση την εργασία που εκτελεί και όχι με βάση τον κλιματικό παράγοντα που επηρεάζει.

2.6.1 Συστήματα εξαερισμού

Εξαερισμός είναι η ανταλλαγή αέρα μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού του θερμοκηπίου και αποσκοπεί στην μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας και στην είσοδο CO₂ στη διάρκεια της φωτεινής περιόδου του εικοσιτετραώρου. Τα συστήματα εξαερισμού διακρίνονται στα παθητικά, τα οποία επιτρέπουν την μετακίνηση αέριων μαζών μέσω απλών ανοιγμάτων και τα δυναμικά τα οποία ασκούν πίεση ή αναρρόφηση εξαναγκάζοντας αέριες μάζες να εξέλθουν από το θερμοκήπιο και στη θέση τους να εισέλθουν αέριες μάζες από τον εξωτερικό αέρα, ή αντίστροφα. Σύμφωνα με τον von Zabeltitz (2011), τα πιο σημαντικά ποσοτικά δεδομένα που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος εξαερισμού είναι:

- Ο ρυθμός ανταλλαγών του αέρα, δηλαδή πόσες φορές ανανεώνεται ο αέρας στη μονάδα του χρόνου (συνήθως ανά ώρα ή εναλλακτικά σε $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
- Η διαφορά εσωτερικής – εξωτερικής θερμοκρασίας που μπορεί να επιτύχει
- Η ομοιογένεια στις τιμές θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία εντός του θερμοκηπίου

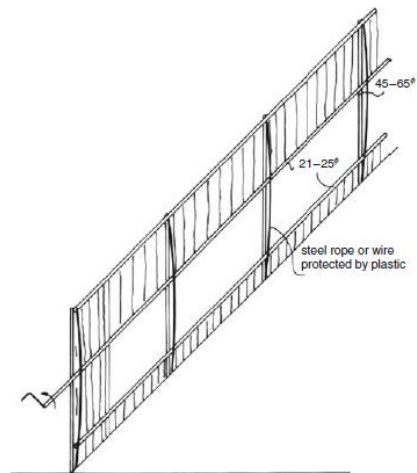
- Η ταχύτητα κίνησης του αέρα πάνω καθώς και δια μέσου της κόμης των φυτών.

2.6.2 Παθητικά συστήματα εξαερισμού

Τα παθητικά συστήματα εξαερισμού συνίστανται από ειδικά παράθυρα (ανοίγματα) στην οροφή του θερμοκηπίου καθώς και στα πλάγια τοιχώματα. Τα ανοίγματα εξαερισμού μπορούν να είναι είτε κλειστά, είτε τελείως ανοιχτά, είτε σε μία ενδιάμεση κατάσταση (μερικό άνοιγμα), ανάλογα με τον επιδιωκόμενο ρυθμό ανανέωσης του εσωτερικού αέρα. Τα παράθυρα που χρησιμοποιούνται για παθητικό εξαερισμό, κατά κανόνα είναι καλυμμένα με το ίδιο διαφανές υλικό που καλύπτει και το υπόλοιπο θερμοκήπιο. Το άνοιγμα και το κλείσιμο των παραθύρων εξαερισμού ελέγχεται από τον καλλιεργητή, είτε χειρωνακτικά είτε μέσω αυτόματων συστημάτων, ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία. Η κινούσα δύναμη για την είσοδο του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου προκύπτει από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού χώρου καθώς και από την κίνηση του ανέμου. Σύμφωνα με τους Papadakis et al. (1996), όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα 2 m/s , ο ρυθμός εισόδου του αέρα στο θερμοκήπιο καθορίζεται από τον άνεμο, ενώ η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού αέρα είναι σχεδόν αμελητέα. Στα θερμοκήπια που είναι καλυμμένα με φύλλα μαλακού πλαστικού, τα καλύμματα των ανοιγμάτων εξαερισμού είναι δύο τύπων, τα πτυσσόμενα (roll-up) και τα πτερυγωτά (flap) (von Zabeltitz, 2011). Στα θερμοκήπια όμως που καλύπτονται με σκληρό πλαστικό ή γυαλί τα καλύμματα των ανοιγμάτων εξαερισμού μπορούν να είναι μόνο πτερυγωτά.

Το βασικότερο κατασκευαστικό ερώτημα σχετικά με τον παθητικό εξαερισμό είναι η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων εξαερισμού, η οποία υπολογίζεται ως εκατοστιαία αναλογία επί της συνολικής έκτασης που καλύπτει το θερμοκήπιο. Σύμφωνα με σχετικά πρότυπα των ΗΠΑ (ANSI/ASAE, 2003), η επιφάνεια των ανοιγμάτων εξαερισμού στα θερμοκήπια πρέπει να ανέρχεται σε 15-25%. Χρησιμοποιώντας θερμοδυναμικά υπολογιστικά μοντέλα, ο von Zabeltitz (2011) καταλήγει σε ένα εύρος επιφάνειας ανοιγμάτων εξαερισμού που κυμαίνεται από 18-29%. Στις Τεχνικές Προδιαγραφές Θερμοκηπίων που έχει καταρτίσει το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (1992) προβλέπεται ελάχιστη επιφάνεια ανοιγμάτων εξαερισμού ίση με το 22% της επιφάνειας που καλύπτει το θερμοκήπιο (πλευρικός 7 %, οροφής 15 %). Τα πλευρικά

ανοίγματα εξαερισμού μπορούν να παραλείπονται τελείως, αν τα ανοίγματα οροφής έχουν συνολική επιφάνεια τουλάχιστον 40% της συνολικής επιφάνειας του θερμοκηπίου. Στα θερμοκήπια που βρίσκονται σε περιοχές με θερμότερα κλίματα, όπως αυτό της Μεσογείου, απαιτούνται προφανώς υψηλότερα ποσοστά επιφάνειας ανοιγμάτων εξαερισμού. Στα θερμότερα κλίματα, με δεδομένο ότι τα ανοίγματα εξαερισμού καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια, συνήθως είναι αναγκαία και ανοίγματα στις πλάγιες πλευρές του θερμοκηπίου, ειδικά αν η ταχύτητα των ανέμων που πνέουν στην περιοχή είναι μικρή (von Zabeltitz, 2011). Στα ψυχρότερα κλίματα, κατά κανόνα αρκούν μόνο τα παράθυρα οροφής τα οποία συνήθως είναι ασυνεχή. Στα τοξωτά θερμοκήπια υπάρχουν σοβαρές δυσκολίες με την δημιουργία ανοιγμάτων εξαερισμού σε επαρκή έκταση, καθώς επίσης και με το άνοιγμα και κλείσιμό τους τον κατάλληλο χρόνο γιατί λειτουργούν χειρωνακτικά. Γι' αυτό συχνά τα τοξωτά θερμοκήπια παρουσιάζουν προβλήματα υπερβολικών θερμοκρασιών στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 2.8: Σχέδιο πτυσσόμενου πλαστικού καλύμματος (πηγή : *integrated greenhouse systems for mild climates*)

2.6.3 Συστήματα δυναμικού εξαερισμού

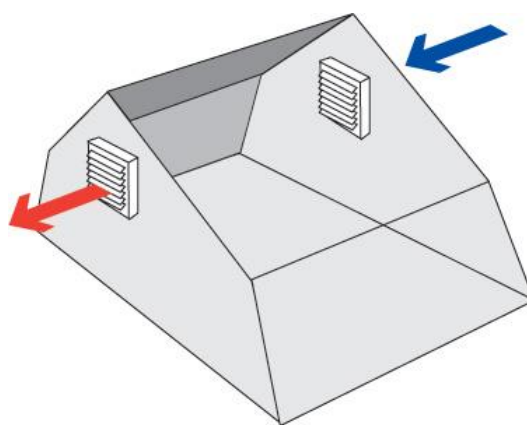
Τα συστήματα δυναμικού εξαερισμού είναι πιο αποτελεσματικά από τα αντίστοιχα παθητικά συστήματα όσον αφορά την ανανέωση του αέρα και την μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Kittas et al., 2005). Ένα σύστημα δυναμικού εξαερισμού περιλαμβάνει ανεμιστήρες από την μία πλευρά του θερμοκηπίου, οι οποίοι αναρροφούν τον εσωτερικό αέρα και τον βγάζουν έξω, καθώς και ανοίγματα από την απέναντι πλευρά, μέσω των

οποίων εισέρχεται εντός του θερμοκηπίου ο εξωτερικός αέρας. Καθώς οι ανεμιστήρες τραβάνε τον εσωτερικό αέρα εκτός του θερμοκηπίου, στο εσωτερικό του τείνει να δημιουργηθεί υποπίεση, με συνέπεια να εισέρχεται εξωτερικός αέρας μέσω των ανοιγμάτων της απέναντι πλευράς, λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα. Στα συστήματα δυναμικού αερισμού τα ανοίγματα που επιτρέπουν στον αέρα να εισέλθει εντός του θερμοκηπίου είναι περυγωτά (flap) και μικρότερα από αυτά που απαιτούνται για παθητικό αερισμό. Τεχνικά γίνεται και το αντίθετο, δηλαδή να εισάγουν οι ανεμιστήρες από την μία πλευρά τον αέρα μέσα στο θερμοκήπιο, οπότε τείνει να δημιουργηθεί υπερπίεση με συνέπεια να ωθείται ο εσωτερικός αέρας σε έξοδο εκτός θερμοκηπίου μέσω των ανοιγμάτων της άλλης πλευράς. Κατά κανόνα όμως, στα συστήματα δυναμικού αερισμού των θερμοκηπίων οι ανεμιστήρες αναρροφούν τον εσωτερικό αέρα και τον βγάζουν εκτός θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τον von Zabeltitz (1999), κατά την εγκατάσταση ενός συστήματος δυναμικού αερισμού θα πρέπει να εφαρμόζονται τα εξής: 30

- Οι ανεμιστήρες πρέπει να αναρροφούν τον αέρα και να τον βγάζουν εκτός θερμοκηπίου γιατί η κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο είναι πιο ομοιόμορφη από την πλευρά της αναρρόφησης του αέρα.
- Η απόσταση μεταξύ δύο ανεμιστήρων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 8–10 m.
- Οι ανεμιστήρες πρέπει να ασκούν μία απορροφητική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας (μύζηση αέρα) ίση με 30–50 Pascal λαμβάνοντας υπόψη και την εφαρμογή δροσισμού με υγρό παραπέτασμα, καθώς και την ύπαρξη εντομοστεγών διχτυών στα ανοίγματα της άλλης πλευράς.
- Συνιστάται η τοποθέτηση των ανεμιστήρων από την πλευρά που δεν είναι εκτεθειμένη στον επικρατούντα ισχυρό άνεμο.
- Από το σημείο εξόδου του ανεμιστήρα θα πρέπει να υπάρχει μία ελεύθερη ζώνη χωρίς εμπόδια σε απόσταση τουλάχιστον ίση με 1,5 φορές την διάμετρό του.
- Η επιφάνεια των ανοιγμάτων της απέναντι πλευράς για την είσοδο του αέρα θα πρέπει να αντιστοιχεί σε τουλάχιστον 1,25 φορές την συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων των ανεμιστήρων. • Η ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη και στην κόμη των φυτών δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 0,5 m s⁻¹.

- Τα ανοίγματα εισόδου του αέρα στην απέναντι πλευρά θα πρέπει να κλείνουν αυτόματα όταν οι ανεμιστήρες εξαερισμού δεν λειτουργούν.
- Η απόσταση μεταξύ της μίας πλευράς στην οποία είναι τοποθετημένοι οι ανεμιστήρες και της άλλης πλευράς στην οποία υπάρχουν τα ανοίγματα εισόδου του αέρα συνιστάται να μην υπερβαίνει τα 30-40 m (Bailey 2006) και σε κάθε περίπτωση να είναι μικρότερη από 50 m (Short, 2004).
- Συνιστάται η χρήση ανεμιστήρων χαμηλής πίεσης (μύζησης) και χαμηλής ταχύτητας περιστροφής (380–725 στροφές ανά λεπτό) με διάμετρο μεταξύ 0,75 – 1,25 m.

Τα συστήματα δυναμικού αερισμού είναι πολύ αποτελεσματικά όσον αφορά τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα και την μείωση της θερμοκρασίας που επιτυγχάνουν, ενώ συμβάλλουν και σε μεγαλύτερη ομοιομορφία όσον αφορά την κατά ύψος διακύμανση της θερμοκρασίας και υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο (Kittas et al., 2001). Το μόνο τους μειονέκτημα είναι το σημαντικό κόστος που συνεπάγεται τόσο η αγορά και εγκατάστασή τους όσο και η λειτουργία τους λόγω κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος. Παρά το κόστος τους όμως, φαίνεται ότι για τα μεσογειακά θερμοκήπια που λειτουργούν τους περισσότερους τουλάχιστον θερμούς μήνες του έτους το όφελος που παρέχουν είναι σημαντικότερο από το κόστος τους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν τα συστήματα δυναμικού αερισμού φέρουν και πρόσθετο εξοπλισμό, ώστε να λειτουργούν και ως συστήματα δροσισμού μέσω διαβρεχόμενων πορωδών πλαισίων.



Εικόνα 2.9: Προσομοίωση δυναμικού εξαερισμού πηγή: <http://turnergreenhouses.com/product/automatic-fan-ventilation-systems/>

2.6.4 Συστήματα θέρμανσης

Το σύστημα θέρμανσης είναι ο σημαντικότερος εξοπλισμός για ένα θερμοκήπιο μετά τα συστήματα αερισμού, δεδομένου ότι ρυθμίζει τον βασικότερο κλιματικό παράγοντα για παραγωγή εκτός εποχής κηπευτικών, δηλαδή την θερμοκρασία κατά την ψυχρή εποχή του έτους. Παρά την σπουδαιότητά τους όμως, τα πιο πολλά θερμοκήπια σε περιοχές με ήπιο χειμώνα όπως οι περιοχές της νότιας Ελλάδας με χαμηλό υψόμετρο δεν διαθέτουν σύστημα θέρμανσης. Στα θερμοκήπια αυτά, η δυνατότητα παραγωγής κηπευτικών εκτός εποχής οφείλεται μόνο στην τροποποίηση της εσωτερικής τους θερμοκρασίας που προκύπτει από το γεγονός ότι συνιστούν κλειστές διαφανείς κατασκευές. Η μη εγκατάσταση συστήματος θέρμανσης όμως δεν οφείλεται στην επάρκεια του θερμοκηπίου ως κλειστής κατασκευής για την επίτευξη ικανοποιητικών θερμοκρασιών. Οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στο πολύ υψηλό κόστος λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης και ειδικότερα στο πολύ υψηλό κόστος των καυσίμων. Αντίθετα, η επίτευξη ικανοποιητικών θερμοκρασιών για καλλιέργεια θερμής εποχής κηπευτικών στα θερμοκήπια τον χειμώνα καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ενός συστήματος θέρμανσης ακόμη και σε χώρες της Βόρειας Αφρικής, όπως π.χ. η Τυνησία. Αν δεν υπάρχει σύστημα θέρμανσης στο θερμοκήπιο, τον χειμώνα τα θερμοαπαιτητικά κηπευτικά εκτίθενται για αρκετά χρονικά διαστήματα σε σαφώς χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που απαιτούνται. Το αποτέλεσμα θα είναι να δίνουν πολύ χαμηλή παραγωγή και μεγάλο 32 ποσοστό καρπών δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας, ενώ επιπλέον αντιμετωπίζουν πολύ μεγαλύτερα προβλήματα φυτοασθενειών. Σημειώνεται ότι, μέσω των συστημάτων θέρμανσης δεν ελέγχεται μόνο η θερμοκρασία αλλά και η σχετική υγρασία μέσα στον χώρο του θερμοκηπίου η οποία, όταν υπερβαίνει το 85-90%, ευνοεί την εμφάνιση φυτοασθενειών. Μερικές πηγές παραγωγής θερμότητας είναι οι:

- Ορυκτά καύσιμα
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Θερμά απόνερα απο βιομηχανίες
- Ηλιακή ενέργεια

2.6.5 Συστήματα παραγωγής θερμότητας

Τα συστήματα παραγωγής θερμότητας στα θερμοκήπια συνήθως είναι εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης ή τοπικές θερμάστρες με καυστήρα και λέβητα για παραγωγή θερμού νερού, ή αερόθερμα διαφόρων τύπων. Σε μικρά θερμοκήπια παλαιάς τεχνολογίας μπορεί να συναντήσει κανείς και άλλα συστήματα θέρμανσης, όπως ξυλόσομπες, σόμπες υγραερίου, θερμάστρες με ηλεκτρικές αντιστάσεις, κ.λπ. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων με παραγωγή θερμού νερού ή θερμού αέρα.

1. Σύστημα κεντρικής θέρμανσης με λέβητα θερμού νερού. Πρόκειται για ένα κεντρικό σύστημα εγκατεστημένο σε έναν ειδικό χώρο, το λεβητοστάσιο, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο κατάλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους συσκευών και οργάνων και αποσκοπεί στην παραγωγή θερμικής ενέργειας μέσω καύσης ορυκτού καυσίμου ή βιομάζας. Η θερμική ενέργεια που παράγεται από την καύση θερμαίνει νερό που υπάρχει μέσα σε έναν λέβητα. Ένα κεντρικό σύστημα θέρμανσης αποτελείται από τον λέβητα, τον καυστήρα, τον κυκλοφορητή, τη δεξαμενή καυσίμων, τις διατάξεις ασφαλείας, την καπνοδόχο και τις σωληνώσεις που μεταφέρουν το θερμό νερό στο θερμοκήπιο.
2. Τοπικές θερμάστρες θέρμανσης με λέβητα θερμού νερού. Βασίζονται στην ίδια αρχή με τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης (καύση ορυκτού καυσίμου ή βιομάζας για παραγωγή θερμικής ενέργειας η οποία διανέμεται στο θερμοκήπιο μέσω νερού). Είναι όμως απλά συστήματα καύσης μικρής δυναμικότητας και επομένως μπορούν να καλύψουν σχετικά περιορισμένες ανάγκες θέρμανσης.
3. Αερόθερμα. Είναι διαφόρων τύπων. Υπάρχουν απλά μικρά αερόθερμα που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια, άλλα μικρά αερόθερμα που καίνε υγραέριο προερχόμενο από φιάλες (γκάζι), καθώς και μεγαλύτερης δυναμικότητας αερόθερμα που καίνε ορυκτά καύσιμα ή βιομάζα. Τα τελευταία είναι και τα πιο συνηθισμένα στα επαγγελματικά θερμοκήπια. Τα κύρια μέρη ενός αερόθερμου που λειτουργεί με καύση είναι το δοχείο καύσης, ο μεταλλάκτης και ο ανεμιστήρας. Ο ανεμιστήρας οδηγεί τον αέρα στον μεταλλάκτη. Ο αέρας θερμαίνεται με συναγωγή καθώς διέρχεται από τον μεταλλάκτη και διοχετεύεται στο χώρο του θερμοκηπίου. Μέσα στο θερμοκήπιο ο θερμός αέρας που έρχεται από το αερόθερμο τείνει να ψύχεται, οπότε επανέρχεται στο αερόθερμο για να

θερμανθεί ξανά, κ.ο.κ. Η παρουσία ειδικών ανεμιστήρων-αναμοχλευτών μέσα στο θερμοκήπιο είναι πολύ σημαντική για να κατανέμεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα ο θερμός αέρας στον εσωτερικό του χώρο και να αποφεύγεται η στρωματοποίησή του.

2.6.6 Συστήματα αφύγρανσης

Τα βασικά εργαλεία για την μείωση της σχετικής υγρασίας τον χειμώνα στα θερμοκήπια είναι η θέρμανση και ο εξαερισμός. Η θέρμανση όμως απαιτεί κατανάλωση ενέργειας, ενώ ο εξαερισμός τον χειμώνα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την εσωτερική, προκαλεί σημαντικές απώλειες σε θερμική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί συστήματα αφύγρανσης βασιζόμενα σε υδροσκοπικά διαλύματα αλάτων υψηλής πυκνότητας τα οποία διαχωρίζονται από τον αέρα μέσω μία υδρόφοβης συνθετικής μεμβράνης (Seginer and Kantz, 1989, Kim et al., 2008). Τα συστήματα αφύγρανσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση της υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο την ψυχρή εποχή του έτους, όταν δεν είναι σκόπιμη ή εφικτή η θέρμανση, με στόχο να αποτραπεί ή να ελαχιστοποιηθεί η ανάγκη για εξαερισμό. Οι μεμβράνες των συστημάτων αφύγρανσης όμως απαιτούν συχνή συντήρηση (αναγέννηση). Προς το παρόν η χρήση συσκευών αφύγρανσης στα Ελληνικά θερμοκήπια είναι πολύ περιορισμένη.

2.6.7 Συστήματα σκίασης

Η σκίαση του θερμοκηπίου αποσκοπεί στην μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας με στόχο την μείωση της θερμοκρασίας στον εσωτερικό του χώρο την θερμή εποχή του έτους, όταν ο αερισμός δεν επαρκεί για το σκοπό αυτό. Ταυτόχρονα όμως, η σκίαση επιδρά και σε δύο άλλες κλιματικές παραμέτρους που είναι σημαντικές για τα καλλιεργούμενα κηπευτικά και ειδικότερα: α) στη σχετική υγρασία και β) στον φωτισμό, δηλαδή στην ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας. Η σκίαση ασκεί θετική επίδραση στη σχετική υγρασία εντός του θερμοκηπίου, καθώς την αυξάνει έμμεσα, μέσω της μείωσης που προκαλεί στη θερμοκρασία. Η ένταση του φωτισμού όμως μειώνεται καθώς αυξάνεται η σκίαση, με συνέπεια, από ένα όριο έντασης φωτισμού και κάτω να περιορίζεται και η φωτοσύνθεση. Συνεπώς, ένα σύστημα σκίασης θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε ένα σημείο ισορροπίας που θα μειώνει σε ικανοποιητικό βαθμό την θερμοκρασία χωρίς να μειώνει υπερβολικά τον φωτισμό. Σύμφωνα με τους Kitta et al. (2012), η σκίαση στις Ελληνικές κλιματικές συνθήκες δεν πρέπει να υπερβαίνει το 35% για να μην καθίσταται ο φωτισμός περιοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη των φυτών και την

παραγωγή. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα συστήματα σκίασης που χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στα θερμοκήπια την θερμή εποχή του έτους για μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους.

2.6.8 Σκίαση με δίχτυ

Τα δίχτυα που χρησιμοποιούνται για σκίαση των θερμοκηπίων συνήθως είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για σκίαση υπαίθριων καλλιεργειών. Τα δίχτυα σκίασης τοποθετούνται τόσο εσωτερικά, όσο και εξωτερικά του θερμοκηπίου. Όταν τοποθετούνται εσωτερικά, εφαρμόζονται στο ύψος της υδρορροής. Εξωτερικά συνήθως τοποθετούνται σε χαμηλής τεχνολογίας θερμοκήπια, ή σε γυάλινα σε χαλαζόπληκτες περιοχές, πάνω από την οροφή, για προστασία από χαλάζι. Στην εσωτερική τοποθέτηση, κατά κανόνα αυτοματοποιούνται για να απλώνονται και να μαζεύονται ανάλογα με την θερμοκρασία του θερμοκηπίου. Ο αυτοματισμός γίνεται με τη βοήθεια θερμοστάτη ή αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας. Στην εξωτερική τοποθέτηση δύσκολα μπορούν να αυτοματοποιηθούν.

2.6.9 Συστήματα δροσισμού

Τα συστήματα δροσισμού αποσκοπούν στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μέσω εξάτμισης νερού. Η εξάτμιση νερού μετατρέπει μέρος της αισθητής θερμότητας σε λανθάνουσα θερμότητα, με συνέπεια να μειώνεται η θερμοκρασία του αέρα. Για να ψυχθεί ο αέρας μέσω εξάτμισης νερού θα πρέπει να μην είναι κορεσμένος σε υγρασία, ώστε να μπορεί το νερό να μετατρέπεται σε υδρατμούς. Προφανώς, όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας τόσο μεγαλύτερο δυναμικό εξάτμισης νερού έχει και συνεπώς τόσο περισσότερο και ταχύτερα μπορεί να μειωθεί η θερμοκρασία του. Η χρήση ενός συστήματος δροσισμού είναι αναγκαία κυρίως στα θερμοκήπια που είναι εγκατεστημένα σε περιοχές με σχετικά θερμό κλίμα, εφόσον αυτά λειτουργούν το καλοκαίρι. Κατά κανόνα εφαρμόζονται δύο συστήματα δροσισμού στα θερμοκήπια, το σύστημα ομίχλης και το υγρό παραπέτασμα (γνωστά και ως υγρή παρειά ή υγρό τοίχωμα).

1. Ένα σύστημα ομίχλης περιλαμβάνει μία μονάδα πίεσης του νερού, σωληνώσεις για την μεταφορά του νερού και διατάξεις εκτοξευτήρων (ακροφύσια) που ψεκάζουν το νερό σε μορφή πολύ λεπτών σταγόνων στον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου.

2. Το υγρό παραπέτασμα δημιουργείται με τοποθέτηση συνεχόμενων πορωδών πλακών σε τμήμα της μίας πλευράς του θερμοκηπίου αντί κανονικού υλικού κάλυψης, οι οποίες διαβρέχονται συνεχώς με νερό όταν το σύστημα δροσισμού λειτουργεί. Οι πορώδεις πλάκες συνδυάζονται με ανεμιστήρες δεξιά) τοποθετημένους είτε στην ακριβώς απέναντι πλευρά είτε στην ίδια πλευρά του θερμοκηπίου (von Zabeltitz, 2011).

2.6.10 Συστήματα εμπλουτισμού με CO₂

Όταν επικρατούν χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, το θερμοκήπιο παραμένει κλειστό και δεν αερίζεται, με συνέπεια η συγκέντρωση CO₂ κοντά στην κόμη των φυτών να μειώνεται σε επίπεδα σημαντικά χαμηλότερα από αυτά που επικρατούν στον εξωτερικό αέρα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι ρυθμοί φωτοσύνθεσης περιορίζονται δραστικά, με συνέπεια η παραγωγή των κηπευτικών που καλλιεργούνται μέσα στο θερμοκήπιο να μειώνεται σημαντικά. Από την άλλη πλευρά, έχει διαπιστωθεί ότι η ανύψωση της φυσικής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μέσω συστημάτων εμπλουτισμού σε 46 επίπεδα μεταξύ 700 και 1000 ppm αυξάνει τους ρυθμούς φωτοσύνθεσης, με συνέπεια να λαμβάνεται υψηλότερη παραγωγή κατά 21-61% σε ξηρή μάζα (Dion et al., 2011). Επιπλέον, η αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μέσω συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού επιταχύνει την ανάπτυξη των φυτών, με συνέπεια να πρωιμίζει την παραγωγή (Nederhoff, 1994)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΝΤΟΜΑΤΑ

3.1 Καταγωγή – χαρακτηριστικά

Η ντομάτα (*Lycopersium esculentum*) είναι φυτό ιθαγενές της Ν. Αμερικής. Τον 16^ο αιώνα εισάγεται στην Ευρώπη από το Περού και το Μεξικό, στην άγρια μορφή της. Στην Ελλάδα ήρθε λίγο μετά το 1800 μ.Χ. αλλά εντατικά καλλιεργήθηκε αμέσως μετά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο.

Η ντομάτα (*Solanum lycopersicum*) ανήκει στην οικογένεια των σολανωδών (*Solanaceae*). Στην οικογένεια αυτή ανήκουν περισσότερα από 1600 είδη. Πολλά από τα φυτά αυτά, όπως η μελιτζάνα, η πιπεριά, η πατάτα, ο καπνός, η μπελαντόνα, έχουν μεγάλη σημασία για τον άνθρωπο, γιατί χρησιμοποιούνται στη διατροφή του, στη φαρμακοβιομηχανία κ.ά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τομάτα είναι ετήσιο φυτό στην Ευρώπη και πολυετές στις τροπικές χώρες. Το *Lycopersium esculentum* είναι ένα είδος με πολλές παραλλαγές στον τρόπο ανάπτυξης και τη ζωηρότητα των φυτών. Οι καλλιεργούμενες σήμερα ποικιλίες κατατάσσονται σε δύο τύπους ανάπτυξης, στον τύπο της συνεχούς ανάπτυξης (*Indeterminate*) και στον τύπο της περιορισμένης ανάπτυξης (*Determinate*) ή αυτοκορυφολογούμενος. Τα φυτά του τύπου συνεχούς ανάπτυξης έχουν ένα κεντρικό στέλεχος που αυξάνει συνέχεια εφόσον οι καλλιεργητικές συνθήκες του το επιτρέπουν. Από το κεντρικό στέλεχος αναπτύσσονται πλάγιοι βλαστοί, οι οποίοι σύμφωνα με τη συνηθισμένη τακτική καλλιέργειας στα θερμοκήπια απομακρύνονται αμέσως όταν εμφανισθούν και έτσι τα φυτά διαμορφώνονται σε μονοστέλεχα. Μερικοί καλλιεργητές διαμορφώνουν διστέλεχα ή τριστέλεχα αφήνοντας τους αντίστοιχους πλάγιους. Η τεχνική όμως αυτή είναι λανθασμένη και πρέπει να εγκαταλειφθεί. Στα μονοστέλεχα φυτά, κάτω από καλές συνθήκες καλλιέργειας και για μεγάλης διάρκειας καλλιέργεια, το μήκος του στελέχους μπορεί να φτάσει αρκετά μέτρα, σχηματίζοντας πολλούς σταυρούς (ταξικαρπίες).

Στα φυτά περιορισμένης ανάπτυξης ή αυτοκορυφολογούμενα η αύξηση του στελέχους σταματά νωρίς και στη συνέχεια αναπτύσσονται οι πλάγιοι βλαστοί, οι οποίοι σταματούν και πάλι και αναπτύσσονται νέοι πλάγιοι κ.ο.κ.

Το στέλεχος είναι ημιξυλώδες, ανίκανο να κρατηθεί όρθιο, γι' αυτό υποστυλώνεται με κατακόρυφους σπάγκους ή σε μερικές περιπτώσεις στα πρόχειρα θερμοκήπια με καλάμια. Το ριζικό σύστημα είναι πυκνό κι αναπτύσσεται στα πλάγια παρά σε βάθος. Τα φύλλα είναι μεγάλα και σύνθετα με διαφορές από ποικιλία σε ποικιλία. Τα άνθη είναι κίτρινα, ενώμένα σε ταξιανθίες

με πέντε ή περισσότερα πέταλα και σέπαλα, πέντε στήμονες με δίβολο ανθήρα και ύπερο με πολύχρωρη ωοθήκη (δίχρωρη σε ορισμένες ποικιλίες) που περιέχει πολλά ωάρια, τα οποία μετά την γονιμοποίηση δίνουν τους σπόρους. Η κατασκευή του άνθους, με τον στύλο πιο κοντό και το στίγμα να περιβάλλεται από τους ανθήρες, βοηθά στην αυτογονιμοποίησή του.

3.2 Ποικιλίες και υβρίδια

Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα δεν είχε γίνει καμία προσπάθεια για την βελτίωση των ποικιλιών της τομάτας. Στις αρχές του 20ου αιώνα, όταν άρχισε να αυξάνεται η ζήτηση της τομάτας, άρχισαν και οι πρώτες προσπάθειες για την βελτίωση του σχήματος των καρπών. Οι ποικιλίες που είναι γνωστές σήμερα δημιουργήθηκαν τα τελευταία 85-90 χρόνια. Μεγάλη πάντως πρόοδος έχει σημειωθεί τα τελευταία 20 χρόνια, στη δημιουργία νέων ποικιλιών και F₁ υβριδίων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των υβριδίων είναι ότι έχουν ενσωματωμένα τα πλεονεκτήματα και των δύο γονέων οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του σπόρου του. Βασικά κριτήρια για την επιλογή σπόρων είναι η αποδοτικότητα και η προσαρμοστικότητά του ανάλογα με τον τόπο και την εποχή των καλλιεργειών. Επίσης βασικός παράγοντας επιλογής είναι η εμπορικότητα και η υψηλή ποιότητα των προϊόντων τους. Επίσης αρκετές ανθεκτικότητες έχουν ενσωματωθεί σε πολλές αξιόλογες ποικιλίες, όπως π.χ. ανθεκτικότητα στο κλαδοσπόριο, το βερτισίλιο, το φουζάριο και το μωσαϊκό της τομάτας που προηγουμένως ήταν αδύνατο να ελεγχθούν. Όπου παρουσιάζονται δυσκολίες στην απολύμανση του εδάφους είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται ποικιλίες με τέτοιες ανθεκτικότητες. Στα θερμοκήπια καλλιεργούνται κυρίως υβρίδια τομάτας που παράγονται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο εξωτερικό. Στον παραγωγό οι σπόροι φτάνουν συσκευασμένοι σε φακελάκια. Ένα κριτήριο που έχει επικρατήσει για την ταξινόμηση των καλλιεργούμενων υβριδίων στα θερμοκήπια είναι το μέγεθος του καρπού. Έτσι διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες:

- 1) Κερασόμορφες ποικιλίες
- 2) Μικρόκαρπες ποικιλίες
- 3) Μεσόκαρπες ποικιλίες με 2-3 χώρους
- 4) Μεγαλόκαρπες ποικιλίες με πολλούς χώρους.

3.3 Καλλιέργεια σε θερμοκήπιο και τα βήματα της

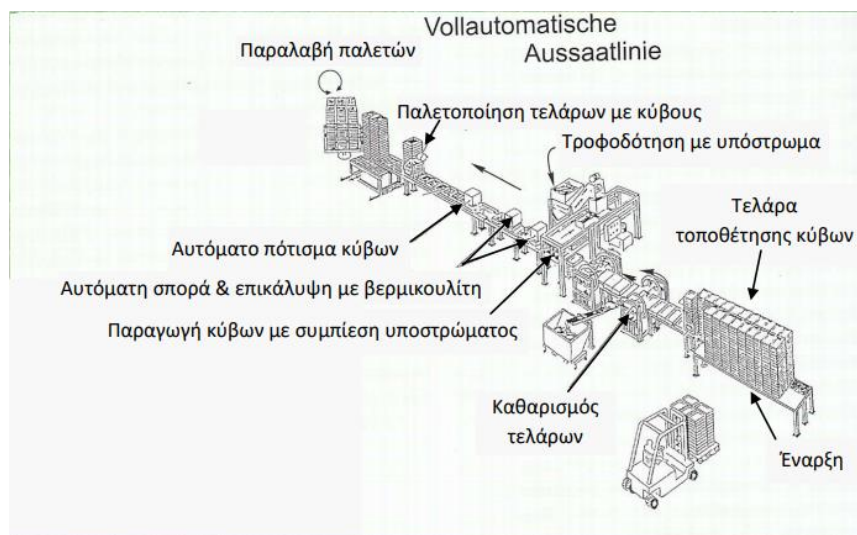
3.3.1 Σπορείο

Το σπορείο είναι χώρος κατάλληλα διαμορφωμένος που προορίζεται αποκλειστικά για την παραγωγή πολλαπλασιαστικού υλικού. Υπάρχουν δύο τύποι σπορείων. α) τα θερμά σπορεία (χρησιμοποιούμε μια τεχνητή πηγή θερμότητας). β) τα ψυχρά σπορεία. Ανάλογα με την καλλιεργητική περίοδο επιλέγεται και ο τύπος του σπορείου. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται από την σπορά μέχρι την μεταφύτευση στα ψυχρού τύπου σπορεία που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι 25-30 ημέρες. Στο σπορείο η θερμοκρασία θα πρέπει να είναι 24-27 °C μέχρι να παρουσιαστούν τα φυτά στην επιφάνεια του εδάφους. Στην συνέχεια η θερμοκρασία την ημέρα πρέπει να είναι 18-23 °C και την νύχτα 14-16 °C. Επίσης πρέπει να υπάρχει αρκετός φωτισμός γιατί όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή και ο φωτισμός μειωμένος η ταξιανθία καθυστερεί να παρουσιαστεί και μάλιστα ορισμένες φορές σχηματίζεται μετά από το 18^ο φύλλο. Τέλος έχει βρεθεί ότι ο εμπλουτισμός με CO₂ (1000 - 1500 ppm) αυξάνει τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών, προκαλεί σχηματισμό πλουσιότερου ριζικού συστήματος και προωμίζει την άνθηση καθώς επίσης και βοηθάει στην καρποδεσμία.

3.3.2 Σπορά στο σπορείο.

Η σπορά της τομάτας γίνεται σε ξύλινου πάγκους σποράς, τις «καρούτες», διαστάσεων 2.15m χ 1.20m. Οι ξύλινοι πάγκοι γεμίζουν με ειδικά προετοιμασμένα υποστρώματα. Το υπόστρωμα σποράς που χρησιμοποιείται είναι συνήθως κάποια εγγυημένη κομπόστα (compost) του εμπορίου π.χ. DEGA, EGO κ.α. τα οποία δεν χρειάζονται άλλες προσμίξεις ή απολυμάνσεις. Η σπορά γίνεται με το χέρι στα πεταχτά. Μετά την στρωμάτωσή τους οι σπόροι καλύπτονται με μια στρώση κομπόστας πάχους 0,5-1 cm και στην συνέχεια το υπόστρωμα συμπίεζεται ελαφρά για να έρθουν σε επαφή οι σπόροι με αυτό. Οι σπόροι της τομάτας φυτρώνουν καλύτερα στο σκοτάδι και θέλουν αρκετή υγρασία για να μαλακώσει το περίβλημα. Για τον λόγο αυτό μετά την σπορά ακολουθεί προσεκτικό πότισμα με αρκετό νερό και στην συνέχεια ορισμένοι παραγωγοί καλύπτουν το μίγμα του σπορείου με μαύρο πλαστικό ή εφημερίδα. Τα οποία απομακρύνονται

μετά το φύτευμα των σπόρων. Από εκεί τα σπορόφυτα αφήνονται να αναπτυχθούν κανονικά για 6 - 8 εβδομάδες και μετά μεταφυτεύονται στην οριστική τους θέση στο θερμοκήπιο.



Εικόνα 3.1: Σύστημα αυτόματης σποράς-δημιουργίας σπορίων

3.4 Μεταφύτευση στο θερμοκήπιο

3.4.1 Προετοιμασία του εδάφους

Πριν την μεταφύτευση της τομάτας, το έδαφος του θερμοκηπίου πρέπει να προετοιμαστεί έγκαιρα και σωστά, για το λόγο αυτό γίνονται οι εξής εργασίες: Αρχικά γίνεται κατεργασία εδάφους με δυο φρεζαρίσματα βάθους 20 - 30 cm. Στην συνέχεια ενσωματώνεται η οργανική ουσία (συνήθως χωνεμένη κοπριά) με την βοήθεια φρέζας, σε ποσότητα 4 - 6 τόνους / στρ. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι γίνονται και κανονικά οργώματα συνήθως μετά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου και αφού απομακρυνθούν βέβαια τα υπολείμματα της καλλιέργειας. Μετά την ενσωμάτωση της οργανικής ουσίας το έδαφος ποτίζεται και απολυμαίνεται. Για την απολύμανση του εδάφους δεν χρησιμοποιείται πλέον το βρωμιούχο μεθύλιο. Τα τελευταία χρόνια οι παραγωγοί απολυμαίνουν το έδαφος με ριζοποτίσματα με διάφορα μυκητοκτόνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιοι παραγωγοί κάνουν ηλιοαπολύμανση, κατά την οποία καλύπτεται το έδαφος του θερμοκηπίου με διαφανές πλαστικό για 6 - 8 εβδομάδες. Η απολύμανση με υδρατμό δεν έχει βρει εφαρμογή, λόγω της ανάγκης ύπαρξης ειδικού εξοπλισμού. Επειδή στο έδαφος του νομού υπάρχει υψηλή συγκέντρωση αλάτων, οι παραγωγοί αποφεύγουν την βασική λίπανση για να μην

υπάρξει ανεξέλεγκτη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι απαιτήσεις των φυτών σε ανόργανα θρεπτικά στοιχεία καλύπτονται πλήρως κατά την εφαρμογή της επιφανειακής λίπανσης. Στην συνέχεια γίνεται η εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος. Από τους παραγωγούς, προτιμάται η στάγδην άρδευση, κυρίως για οικονομικούς λόγους αλλά και για την ικανοποιητική απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος στις απαιτήσεις της καλλιέργειας. Τέλος γίνεται η χάραξη των γραμμών φύτευσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο τέλος κάθε καλλιέργειας απομακρύνονται προσεκτικά τα υπολείμματά της και καταστρέφονται σε σκουπιδότοπο.

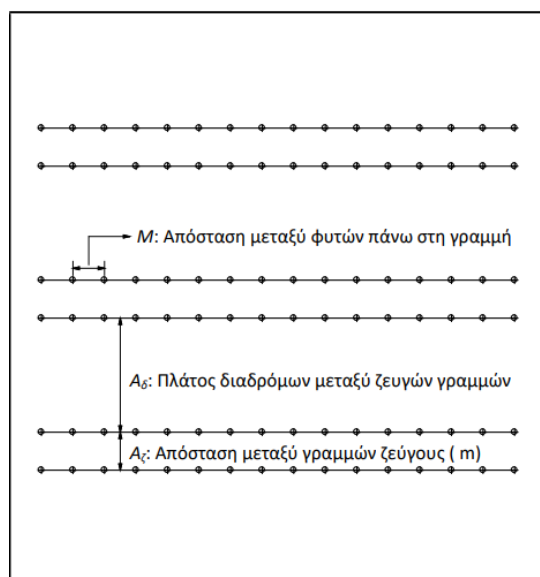
3.4.2 Μεταφύτευση στο θερμοκήπιο

Μετά την περίοδο των 40-50 ημερών παραμονής στο σπορείο, και αφού τα σπορόφυτα της τομάτας αποκτήσουν 6-8 πραγματικά φύλλα, γίνεται η μεταφύτευση τους στο έδαφος του θερμοκηπίου. Δίδεται ιδιαίτερη προσοχή από τους παραγωγούς, έτσι ώστε να μην ξεπεραστεί το στάδιο της έκπτυξης της πρώτης ταξιανθίας πριν γίνει η μεταφύτευση, για να μην δημιουργηθούν προβλήματα τινάγματος των ανθέων (ανθόρροια). Οι αποστάσεις φύτευσης της τομάτας ποικίλλουν, ανάλογα με τις διαστάσεις του θερμοκηπίου, την επιδιωκόμενη πυκνότητα φύτευσης και τον τρόπο διάταξης των φυτών στο θερμοκήπιο. Η πυκνότητα φύτευσης, στην περιοχή της

Πάτρας, κυμαίνεται γύρω στα 2.000 φυτά / στρέμμα (2 φυτά / m²), ενώ η διάταξη των φυτών στο θερμοκήπιο γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η τοποθέτηση των φυτών σε γραμμές που απέχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών ανέρχονται στα 0,9-1,2 m, ενώ οι αποστάσεις των φυτών πάνω σε κάθε γραμμή στα 0,3-0,6 m. Ο δεύτερος τρόπος αποβλέπει στην τοποθέτηση των φυτών σε ζεύγη γραμμών, που απέχουν μεταξύ τους γύρω στα 0,70-0,80 m. Μεταξύ των διπλών γραμμών υπάρχει διάδρομος πλάτους 1-1,3 m. Πάνω σε κάθε γραμμή τα φυτά απέχουν μεταξύ τους 0,4-0,5 m. Με τον τρόπο αυτό η λωρίδα εδάφους μέσα σε κάθε ζεύγος γραμμών παραμένει ασυμπίεστη, αφού η μετακίνηση του εργατικού προσωπικού γίνεται μέσω των διαδρόμων. Η φύτευση της τομάτας στο θερμοκήπιο γίνεται κατά κανόνα με το χέρι. Επιλέγονται τα πιο εύρωστα φυτά του σπορείου, καθώς επίσης και αυτά τα φυτά που το πλάτος του φυλλώματος τους είναι ίσο ή μεγαλύτερο του ύψους τους. Αφού χαραχθούν οι γραμμές φύτευσης, στις θέσεις που θα τοποθετηθούν τα φυτά ανοίγονται λάκκοι πλάτους 10-15 cm και βάθους 10-15 cm περίπου. Ακολουθεί η φύτευση των σποροφύτων μέσα σ' αυτούς. Το υπόστρωμα με το ριζικό σύστημα των φυτών ποτίζονται καλά μερικές ώρες πριν, για να μην υποστούν ζημιά από πιθανή αποσάθρωση του υποστρώματος κατά τη μεταφύτευση, και

πολύ προσεκτικά «τραβιούνται» τα νεαρά φυτά από το υπόστρωμα για να μεταφυτευθούν. Το βάθος φύτευσης είναι το ίδιο ή 2-3 cm βαθύτερο απ' ό,τι στο σπορείο, με σκοπό να αυξηθεί η στήριξη του κεντρικού στελέχους των σποροφύτων. Η τοποθέτηση των φυτών τομάτας πάνω στο έδαφος γίνεται με τους εξής τρόπους: α) πάνω σε επίπεδο έδαφος β) πάνω σε ανάχωμα ύψους 10-15 cm, το οποίο φτιάχνεται είτε ως απλό «σαμάρι» κατά μήκος της γραμμής φύτευσης, είτε ως «τραπέζι» που καλύπτει τη λωρίδα εδάφους μεταξύ των διπλών γραμμών. Η φύτευση σε ανάχωμα γίνεται σε περιπτώσεις βαρειών εδαφών, γιατί βοηθάει στη στράγγιση του νερού άρδευσης, ενώ η φύτευση σε αυλάκια παρουσιάζει το πλεονέκτημα της συγκράτησης του νερού μόνο κατά μήκος της γραμμής φύτευσης. Μετά τη φύτευση ακολουθεί πότισμα, με στόχο τη δημιουργία καλής επαφής του ριζικού συστήματος με το έδαφος και την άμεση κάλυψη των αναγκών των φυτών και τη ολοκλήρωση των απωλειών σε νερό μέσω της διαπνοής.

Εικόνα 3.2: Φυτά τομάτας τα οποία είναι έτοιμα προς μεταφύτευση



Εικόνα 3.3: Η τεχνική φύτευσης σε ζεύγη γραμμών



Εικόνα 3.4: Το αποτέλεσμα της φύτευσης σε ζεύγη γραμμών

3.4.3 Εποχή Φύτευσης

Υπάρχουν δύο εποχές φύτευσης στην Ελλάδα για την τομάτα σε θερμοκήπιο η πρώτη περίοδος με μεταφύτευση από 15/8 μέχρι 15/10 και συγκομιδή από 15/10 -15/12 μέχρι τέλη Ιουνίου δηλαδή με διάρκεια περί τους οχτώ μήνες. Ενώ η δεύτερη εποχή φύτευσης είναι από 15/1 με 15/2 με συγκομιδή 1 /4 με 30/6 με διάρκεια συγκομιδής τρεις μήνες.

3.5 Ιδανικές συνθήκες καλλιέργειας της ντομάτας

3.5.1 Θερμοκρασία

Η τομάτα είναι ένα μέτρια θερμοαπαιτητικό λαχανικό. Αν και τα φυτά της μπορούν να αντέξουν θερμοκρασίες μέχρι 1 °C χωρίς να υποστούν ζημιές από ψύξη, η αύξηση τους αναστέλλεται πλήρως σε θερμοκρασίες κάτω από 9 °C, ενώ ήδη κάτω από 13°C δημιουργούνται προβλήματα με τη βλάστηση της γύρης και συνεπώς με την καρπόδεση. Μεγάλες απαιτήσεις σε θερμοκρασία έχουν και οι καρποί κατά την ωρίμανση. Σε θερμοκρασίες κάτω από 16 °C δεν σχηματίζεται λυκοπίνη (ή το λυκόπινο) και επομένως οι καρποί δεν κοκκινίζουν. Για όλους αυτούς τους λόγους η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία στο θερμοκήπιο κατά τους χειμερινούς μήνες κυμαίνεται μεταξύ 20-22 °C και η νυχτερινή γύρω στους 14-16 °C, ενώ κατά τους ανοιξιάτικους και φθινοπωρινούς μήνες μεταξύ 21-26 °C η ημερήσια και 15-19 °C η νυχτερινή.

Εδώ θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι από τα όρια αυτά οι υψηλότερες τιμές αφορούν χρονικά διαστήματα που επικρατεί ηλιοφάνεια την ημέρα, ενώ οι χαμηλότερες αφορούν περιόδους με νεφοσκεπείς ημέρες. Η ύπαρξη μιας διαφοράς θερμοκρασίας της τάξεως των 5-7 °C μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι επιβεβλημένη όχι μόνο για οικονομικούς λόγους, αλλά και για λόγους καλύτερης ανάπτυξης των φυτών. Τα φυτά τη νύχτα δεν φωτοσυνθέτουν (δηλαδή δεν παράγουν βιομάζα), αλλά αναπνέουν μόνο (δηλαδή καταναλώνουν βιομάζα). Έτσι μείωση της θερμοκρασίας τη νύχτα μειώνει τις απώλειες μέσω της αναπνοής, ενώ η διατήρηση υψηλότερων θερμοκρασιών την ημέρα ευνοεί την παραγωγή βιομάζας. Υψηλές θερμοκρασίες τη νύχτα (π.χ. 21 °C) συμβάλλουν στην πρωί μίση των πρώτων καρπών τομάτας, αλλά μειώνουν τη συνολική παραγωγή της καλλιέργειας. Βέβαια, εκτός από τις χαμηλές θερμοκρασίες λαμβάνεται μέριμνα και για την αποφυγή πολύ υψηλών θερμοκρασιών στο θερμοκήπιο. Σε θερμοκρασίες πάνω από 32 °C τα άνθη της τομάτας αδυνατούν να δέσουν καρπούς, δεδομένου ότι η βλαστικότητα της γύρης είναι δραστικά μειωμένη, ενώ ήδη σε θερμοκρασίες πάνω από 30 °C παρεμποδίζεται η σύνθεση της λυκοπίνης, της χρωστικής που είναι υπεύθυνη για το κόκκινο χρώμα των καρπών. Ως θερμοκρασία εξαιρισμού τίθενται οι 27 °C. Παράλληλα με τη θερμοκρασία του αέρα, σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών παίζει και η θερμοκρασία του εδάφους. Σε θερμοκρασίες κάτω από 14 °C η ρίζα της τομάτας δεν αναπτύσσεται κανονικά, λόγω μειωμένης μεταβολικής δραστηριότητας. Παρατηρείται δυσκολία στη μεταφορά των νιτρικών ιόντων (NO_3) και των ιόντων καλίου (K^+) από τη ρίζα στα φύλλα καθώς επίσης και δυσκολία απορρόφησης του φωσφόρου.

3.5.2 Σχετική Υγρασία

Στις καλλιέργειες τομάτας υπό κάλυψη στο νομό Αχαΐας, η υγρασία της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου κυμαίνεται μεταξύ 60-70%. Όταν η σχετική υγρασία είναι χαμηλότερη από 60% το στίγμα ξηραίνεται με συνέπεια η γονιμοποίηση των ανθέων να καθίσταται προβληματική, ενώ κάτω από 50% αυξάνεται η συχνότητα εμφάνισης της «ξηρής σήψης κορυφής», που οφείλεται στη μειωμένη τροφοδότηση των καρπών με ασβέστιο. Από την άλλη πλευρά, και η υψηλή σχετική υγρασία (πάνω από 90%) δημιουργεί προβλήματα, αν και εικάζεται ότι πιθανόν να ευνοεί την πρωίμηση της παραγωγής κατά τους χειμερινούς μήνες. Κατ' αρχήν, σε σχετική υγρασία πάνω από 90% η γύρη γίνεται κολλώδης και δεν μπορεί να μεταφερθεί στο στίγμα, με συνέπεια να δημιουργούνται προβλήματα γονιμοποίησης. Εκτός αυτού, δημιουργούνται δυσχέρειες και με τη

διακίνηση και κατανομή του ασβεστίου στα νεαρά φύλλα, γιατί μειώνεται η διαπνοή σε τέτοιες συνθήκες και δεν γίνεται καλή τροφοδοσία των νέων φύλλων μέσω του ρεύματος διαπνοής. Τέλος, δεν υποτιμάται και ο αυξημένος κίνδυνος προσβολών από βοτρυτή και άλλες μυκητολογικές ασθένειες όταν η σχετική υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο υπερβαίνει για μεγάλα χρονικά διαστήματα το 85-90%.

3.5.3 Εμπλουτισμός του θερμοκηπίου με διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου με CO₂ ασκεί ευεργετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών και αυξάνει την παραγωγή από 10-70%. Τα πλέον θεαματικά αποτελέσματα προκύπτουν όταν η συγκέντρωση του ανέρχεται στα 1.000-1.200 ppm, αντί των 300 ppm της εξωτερικής ατμόσφαιρας, και για τις ώρες από 10 το πρωί ως 4 το απόγευμα κατά τους χειμερινούς μήνες. Βέβαια, ο εμπλουτισμός έχει οικονομικό αντιστάθμισμα μόνο όταν το θερμοκήπιο παραμένει κλειστό (χωρίς εξαερισμό) όλη την ημέρα και για μερικούς μήνες. Τέτοιες όμως προϋποθέσεις δεν μπορούν να ικανοποιηθούν στα ελληνικά πλαστικά θερμοκήπια, που δεν εξασφαλίζουν ικανοποιητική στεγανότητα. Εκτός αυτού, σύμφωνα με τις γνωστές κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας και ειδικότερα της Αχαΐας, δύσκολα ένα θερμοκήπιο μπορεί να παραμείνει κλειστό για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και τους κρύους μήνες. Συνεπώς δεν συνίσταται ο εμπλουτισμός σε CO₂. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι ένας πολύ μικρός αριθμός παραγωγών τοποθετεί διάσπαρτα στο θερμοκήπιο μικρά δοχεία με μαρμαρόσκονη. Στα δοχεία αυτά προσθέτει ακουαφόρτε (νιτρικό οξύ) και από τη χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα, εκλύονται στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου ποσότητες CO₂. Αυτό συμβαίνει μόνο κατά τις μέρες που το θερμοκήπιο παραμένει κλειστό.

3.6 Φυσικές διαταραχές σε καρπούς ντομάτας

Μη παρασιτικές ασθένειες-φυσικές διαταραχές θεωρούνται εκείνες οι παθήσεις των φυτών που προκαλούνται από περίσσεια ή έλλειψη κάποιου ή κάποιων θρεπτικών στοιχείων ή ιχνοστοιχείων, από έλλειψη ή περίσσεια νερού, από ακραίες θερμοκρασίες, από διαταραχή του pH, από άλλες συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως αέριοι ρύποι καθώς και από υπερβολικές δόσεις φυτοφαρμάκων ή λιπασμάτων. Τα συμπτώματα γενικά, των μη παρασιτικών ασθενειών μπορεί να συγχέονται σε ορισμένες περιπτώσεις με προσβολές μυκήτων, βακτηρίων και ιών. Όμως οι μη

παρασιτικές ασθένειες δεν προκαλούνται από την προσβολή του φυτού από έναν άλλο οργανισμό, για το λόγο αυτό δεν είναι και μεταδοτικές.

Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες διαταραχών οι οποίες και θα αναλυθούν παρακάτω:

- Ανομοιόμορφη ωρίμανση
- Σχίσσιμο καρπών
- Ξηρή σήψη κορυφής
- Παραμόρφωση κορυφής (catface)
- Ξυλοποίηση εσωτερικού καρπού

3.6.1 Ανομοιόμορφη ωρίμανση

Προκαλείται λόγω της έλλειψης καλλίου στο έδαφος το φρούτο εμφανίζει ανομοιόμορφες κηλίδες πράσινου και κίτρινου χρώματος στον καρπό



Εικόνα 3.5: Ανομοιόμορφη ωρίμανση τομάτας

3.6.2 Ακτινωτό σχίσσιμο καρπών

Οφείλεται σε απότομες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και υγρασίας. Αντιμετωπίζεται με σκίαση, κανονικότητα στο νερό άρδευσης και συγκομιδή σε αρχικό στάδιο ωρίμανσης.



Εικόνα 3.6: σχίσσιμο καρπού τομάτας

3.6.3 Ξηρή σήψη κορυφής

Εμφανίζεται στον καρπό μία μάρνη κορυφή. Είναι αποτέλεσμα της έλλειψης ασβεστίου του φυτού



Εικόνα 3.7: Ξηρή σήψη κορυφής της τομάτας

3.6.4 Παραμόρφωση κορυφής (catface)

Η ακριβής αιτία της παραμόρφωσης κορυφής δεν είναι ακόμα εξακριβωμένη καθώς πολλοί παράγοντες δείχνουν να τη δημιουργούν. Θερμοκρασίες κάτω από 16 βαθμούς κελσίου για μεγάλη διάρκεια ημερών όταν ακόμα το φυτό είναι ανώριμο δηλαδή περίπου 2-3 βδομάδες πριν την άνθιση δημιουργεί στο φυτό παραμορφώσεις λόγω της μη πλήρους γονιμοποίησης του καρπού, ενώ και χτυπήματα στον ίδιο τον καρπό μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις.



Εικόνα 3.8: Παραμόρφωση κορυφής

3.6.5 Ξυλοποίηση εσωτερικού καρπού

Αιτία αυτής της πάθησης είναι οι απότομες αλλαγές στην θερμοκρασία οι οποίες επηρεάζουν την ωρίμανση του καρπού. Οι τομάτες που εκτίθενται σε χαμηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στην δημιουργία ξυλοποίησης εσωτερικού καρπού



Εικόνα 3.9: Πως φαίνεται το εσωτερικό μίας τομάτας με ξυλοποίηση εσωτερικού καρπού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου είναι πολύ σημαντική για τη διατήρηση του βέλτιστου εσωτερικού περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων της ανάπτυξης των φυτών. Για να διαμορφωθεί ένα ακριβές θερμικό μοντέλο, ο υπολογισμός της ακριβούς εισόδου ηλιακής ακτινοβολίας και του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι σημαντικός καθώς επηρεάζουν την ενέργεια του θερμοκηπίου και την ισορροπία μάζας. Πολυάριθμα θερμικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν το μικροκλίμα ενός θερμοκηπίου και να επικυρωθούν σε διάφορες τοποθεσίες, κλίματα και καλλιέργειες.

Σε αντίξοες χειμερινές κλιματολογικές συνθήκες, το θερμοκήπιο πρέπει να συνδυαστεί με διάφορα ενεργητικά ή παθητικά συστήματα θέρμανσης για να διατηρηθεί το εσωτερικό μικροκλίμα σύμφωνα με τις ανάγκες των καλλιεργειών.

Ένας από τους καλύτερους τρόπους για την παροχή βέλτιστων συνθηκών στην καλλιέργεια είναι η ανάπτυξη ακριβών μοντέλων θερμοκηπίου για τον εσωτερικό έλεγχο περιβάλλοντος. Η ρύθμιση καθεμιάς από τις μεταβλητές που επηρεάζουν το εσωτερικό περιβάλλον ενός θερμοκηπίου είναι μια δυναμική διαδικασία. Η δυναμική συμπεριφορά του κλίματος του θερμοκηπίου είναι ένας συνδυασμός φυσικών διεργασιών που περιλαμβάνουν τη μεταφορά ενέργειας (ακτινοβολία και θερμότητα) και μεταφορά μαζών (ροές υδρατμών και συγκέντρωση CO₂) που πραγματοποιούνται στο θερμοκήπιο και από το θερμοκήπιο στο εξωτερικό περιβάλλον. Αυτές οι διαδικασίες εξαρτώνται από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, τη δομή του θερμοκηπίου, τον τύπο και την κατάσταση της καλλιέργειας και από τα σήματα ελέγχου ενεργοποίησης. Συνήθως, μπορούμε να βρούμε τον εξαερισμό και τη θέρμανση για να τροποποιήσουμε τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας εντός εσωτερικού χώρου, σκίαση και τεχνητό φως για να αλλάξουμε την εσωτερική ακτινοβολία και την έγχυση CO₂ για να επηρεάσουμε τη φωτοσύνθεση και την ψύξη με εξάτμιση για τον εμπλουτισμό της υγρασίας και τη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα (Salgado and Cunha, 2005).

Το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας είναι οι βασικές εννοιολογικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν τις διάφορες διαδικασίες στο θερμικό μοντέλο του θερμοκηπίου. Για τα θερμικά μοντέλα, η είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σημαντική, ενώ για τα μοντέλα καλλιέργειας η ένταση του φωτός είναι πιο σημαντική. Ο κανόνας του αντίχειρα για την ενεργειακή ισορροπία δηλώνει ότι η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας θα είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας που αποκτάται από τις εσωτερικές πηγές ενέργειας και τα κέρδη από την ηλιακή ακτινοβολία, μείον τις συνολικές απώλειες στο περιβάλλον και στο έδαφος. Αυτές οι απώλειες οφείλονται σε αγωγιμότητα μέσω του καλύμματος, ακτινοβολία μακρών και βραχέων κυμάτων, εξάτμιση αναφορικά με τον εξαερισμό, τον εναλλάκτη θερμότητας και τη διείσδυση (Sethi and Sharma, 2007). Όσον αφορά την ισορροπία μάζας νερού, ο ρυθμός αλλαγής της υγρασίας θα είναι το άθροισμα των αλλαγών που οφείλονται στον αερισμό και τη διήθηση, την υγρασία / αφυγραντικότητα και τη διαφορά μεταξύ της εξάτμισης και της συμπύκνωσης (Jolliet, 1994).

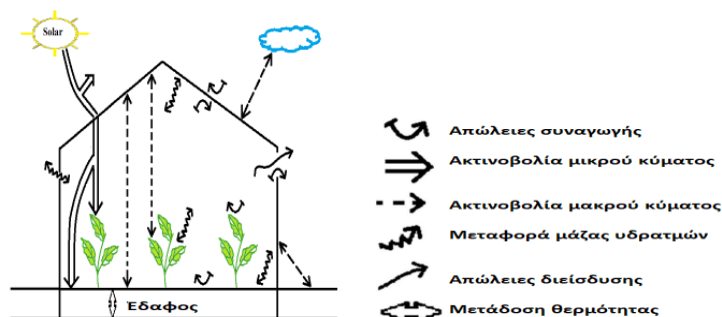
Κατηγοριοποιούμε τα μοντέλα θερμικού θερμοκηπίου σε τρεις κατηγορίες. Πρώτη κατηγορία είναι τα ανεξάρτητα θερμικά μοντέλα θερμοκηπίου, χωρίς να ενσωματώνονται σε οποιοδήποτε σύστημα θέρμανσης / αποθήκευσης θερμότητας και έχουν διατυπωθεί για να περιγράψουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου όπως π.χ. θερμοκρασία εσωτερικού αέρα, εσωτερική σχετική υγρασία και πρόσληψη CO₂ με ή χωρίς αποτέλεσμα καλλιέργειας. Δεύτερη κατηγορία είναι τα μοντέλα θερμοκηπίου που εξαρτώνται από τη θέρμανση, σε συνδυασμό με ένα ενεργό ή παθητικό σύστημα θέρμανσης / αποθήκευσης θερμότητας για έλεγχο μικροκλίματος θερμοκηπίου. Η τρίτη κατηγορία είναι τα μοντέλα θερμοκηπίου που εξαρτώνται από την ψύξη, σε συνδυασμό με ένα ενεργό σύστημα ψύξης, όπως η ψύξη με εξάτμιση συμπυκνωμάτων, η ψύξη με εξαέρωση ομίχλης, η ψύξη με εξάτμιση στην οροφή, ο εξαναγκασμός εξαερισμού ή τα παθητικά συστήματα ψύξης όπως το φυσικό αερισμό. Λόγω του τεράστιου πεδίου εφαρμογής, σε αυτή τη μελέτη συζητούνται μόνο διάφορες πτυχές των μοντέλων πρώτης και δεύτερης κατηγορίας και των παραμέτρων του συστήματος τους και αποκλείονται τα μοντέλα τρίτης κατηγορίας. Από όλα τα αναθεωρημένα έγγραφα, έχουν συζητηθεί τα αντιπροσωπευτικά μοντέλα. Τα σημεία που εξετάζονται σε κάθε μοντέλο είναι: ο τύπος του μοντέλου, το εργαλείο / πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για τη λύση / προσομοίωση, τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση προσομοιώσεων, τα βασικά διαδραστικά στοιχεία, οι βασικές παράμετροι που μελετήθηκαν, οι παραδοχές για τη σύνταξη των εξισώσεων ενεργειακού ισοζυγίου, τα σημαντικά

χαρακτηριστικά του μοντέλου και τα κύρια αποτελέσματα που λαμβάνονται μαζί με τις θέσεις επικύρωσης. Λεπτομέρειες προδιαγραφών συστήματος παρέχονται επίσης για μοντέλα δεύτερης κατηγορίας. Με βάση τις συγκεντρωτικές πληροφορίες, διατυπώνεται γενικευμένη διαδικασία για την ανάπτυξη θερμικού μοντέλου θερμοκηπίου. Τέλος, με βάση τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα του μοντέλου, έχουν επίσης εκφραστεί ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα.

4.2 Θερμικά Μοντέλα Θερμοκηπίου

Ένας απ' τους καλύτερους τρόπους για να προσφέρεις τις βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη ενός φυτού είναι η ανάπτυξη ενός ακριβούς μοντέλου για το κλίμα ενός θερμοκηπίου. Ο έλεγχος της κάθε μεταβλητής που επηρεάζει το εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι μία δυναμική διαδικασία. Η δυναμική συμπεριφορά του κλίματος του θερμοκηπίου είναι ένας συνδυασμός φυσικών διαδικασιών που περιλαμβάνουν τη μεταφορά ενέργειας (ακτινοβολία και θερμότητα) και μεταφοράς μάζας (κίνηση υδρατμών και συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου) τα οποία λαμβάνουν χώρα μέσα στο θερμοκήπιο και εξωτερικά αυτού. Αυτές οι διαδικασίες εξαρτώνται από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες την δομή-κατασκευή του θερμοκηπίου, την κατάσταση του καλλιεργήσιμου φυτού και τέλος, στους μηχανισμούς ενεργοποίησης των συσκευών ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου. Τυπικά μπορούμε να εισαγάγουμε εξαερισμό και θέρμανση για να ελέγξουμε την εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία, τεχνητό φως και σκίαση για να ελέγξουμε την εσωτερική ακτινοβολία και μία συσκευή προσθήκης διοξειδίου του άνθρακα για τον έλεγχο του ποσοστού διοξειδίου στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου με σκοπό τον έλεγχο της φωτοσύνθεσης. Τα Μοντέλα ισορροπίας της μάζας και της ενέργειας σε ένα θερμοκήπιο είναι οι πιο βασικές νοητικές εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν της διάφορες διεργασίες σε ένα θερμικό μοντέλο θερμοκηπίου. Για τα θερμαντικά μοντέλα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι από τις πιο σημαντικές εισόδους ενώ για τα μοντέλα ανάπτυξης καρπού η ένταση του φωτός θεωρείται πιο σημαντική. Ο βασικός κανόνας που ακολουθείται στα θερμικά μοντέλα ορίζει ότι η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται θα είναι ίση με το σύνολο της ενέργειας που προσφέρεται από πηγές θερμότητας και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειούμενη κατά το σύνολο των απωλειών προς το εξωτερικό περιβάλλον και το έδαφος. Αυτές οι απώλειες είναι λόγω της μεταγωγής μέσω του καλλύμματος, μακρού και μικρού κύματος ακτινοβολίας, όσον αφορά των εξαερισμό λόγω εξάτμισης και τέλος λόγω της διείσδυσης από το εξωτερικό περιβάλλον. Όσον αφορά την

ισορροπία της μάζας νερού, ο λόγος μεταβολής της υγρασίας θα είναι το σύνολο των αλλαγών αέρα λόγω εξαερισμού και διείσδυσης, η ύγρανση/αφύγρανση του χώρου και η διαφορά μεταξύ εξάτμισης και συμπύκνωσης των υδρατμών (Jolliet, 1994).



Εικόνα 4.1: Η αλληπίδραση των στοιχείων ενός θερμοκηπίου στην μετάδοση θερμότητας (Πηγή: Rim BEN ALI 2015)

4.3 Διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο

Τα περισσότερα υπάρχοντα μοντέλα κλίματος θερμοκηπίου χρησιμοποιούν απλουστευμένες υπορουτίνες μετάδοσης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτά τα μοντέλα όμως επιτρέπουν τον προσδιορισμό των σημαντικότερων παραγόντων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας των θερμοκηπίων ανάλογα με τον προσανατολισμό του θερμοκηπίου. Δεδομένου ότι όλες οι μετρήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα σε πραγματικό θερμοκήπιο υπό συνθήκες πεδίου και τα αποτελέσματα μέτρησης θα είναι πάντοτε επιρρεπή σε αλλαγές στις εξωτερικές συνθήκες ακτινοβολίας. Η χρήση μοντέλων κλίμακας επιτρέπει τη διερεύνηση των επιπτώσεων του προσανατολισμού του θερμοκηπίου, της γεωμετρίας κ.λπ., με σχετικά χαμηλό κόστος. Λόγω των πρακτικών δυσκολιών στην ακριβή μέτρηση της εισόδου ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμοκήπια, οι περισσότερες μελέτες που αφορούν το θέμα αυτό αφορούν υπολογισμούς ή προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές προσεγγίσεις και τεχνικές. Οι πειραματικές μελέτες, οι υπολογισμοί καθώς και οι προσομοιώσεις που έγιναν από πολλούς ερευνητές επέτρεψαν να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι οι μεμβράνες συμπύκνωσης και οι επίπεδες σταγόνες προκαλούν χαμηλή μείωση διαπερατότητας ή ακόμη και μικρές αυξήσεις, ενώ

οι σταγόνες με υψηλές γωνίες επαφής οδηγούν σε μειώσεις μετάδοσης μέχρι 40% σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υλικού και την προσομοίωση ή τις πειραματικές συνθήκες.

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από ένα υλικό ανά πάσα στιγμή μπορεί επίσης να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια αναπτυγμένη διαδικασία (Froehlich et al., 1979). Αυτή η διαδικασία υπολογίζει τις απορροφούμενες ροές ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορα δομικά καλύμματα, επιφάνειες φυτών και δαπέδων στο θερμοκήπιο χρησιμοποιώντας τις ολικές ροές ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν σε μια οριζόντια επιφάνεια στη γη. Η φωτοσυνθετική ενεργός ακτινοβολία (PAR) είναι το μέρος της εισερχόμενης παγκόσμιας ακτινοβολίας, από 400 έως 700 nm, η οποία χρησιμοποιείται για τη φωτοσύνθεση από τα φυτά.

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης μοντέλα βελτιστοποίησης απλής μορφής για σήραγγες μονής κλίμακας και λήφθηκε υπόψη μόνο η απευθείας ακτινοβολία. Η διαπερατότητα του διάχυτου φωτός ελήφθη ως ο μέσος όρος των άμεσων εκπομπών φωτός από διάφορα τμήματα του θόλου του ουρανού.

Ένα μοντέλο για την ηλιακή ενέργεια που συλλέχθηκε από το θερμοκήπιο παρουσιάστηκε στο οποίο απεδείχθη ότι η συνολική ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται αποτελείται από την ακτινοβολία που μεταδίδεται και στη συνέχεια απορροφάται στα εσωτερικά συστατικά και ένα κλάσμα απορροφάται από την οροφή. Η ενέργεια που συλλέγεται από τα πλευρικά τοιχώματα και η επίδραση της σκιάς τους θεωρήθηκε επίσης (Jolliet et al., 1991). Με βάση αυτό το μοντέλο, αργότερα αρκετοί άλλοι ερευνητές όπως οι Tiwari et al. (1998), οι Sethi (2009) και οι Singh και Tiwari (2010) ανέπτυξαν ακριβή μοντέλα ηλιακής ακτινοβολίας για θερμοκήπια. Το μοντέλο της μεταφοράς ακτινοβολίας με φωτοσυνθετική ακτινοβολία (PAR) πραγματοποιήθηκε για να καταστεί δυνατή η κατανομή του φωτός σε θερμοκήπια (Farkas et al., 2001). Αυτή η μελέτη εξέτασε την ακρίβεια του μοντέλου ακτινοβολίας που αναπτύχθηκε από τους Rosa et al. (1989) για πλαστικά θερμοκήπια σήραγγας. Οι Liu και Jordan (1960) παρουσίασαν σχέσεις που επιτρέπουν τον προσδιορισμό σε οριζόντια επιφάνεια της στιγμιαίας έντασης της διάχυτης ακτινοβολίας σε διαυγείς ημέρες, των μακροπρόθεσμων μέσων ωριαίων και ημερήσιων ποσών διάχυτης ακτινοβολίας και των ημερήσιων ποσών διάχυτης ακτινοβολίας για διάφορες κατηγορίες ημερών διαφορετικών βαθμών θολερότητας. Για αυτούς τους προσδιορισμούς, γνώση της συνολικής (άμεσης και διάχυτης) ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, η μέτρησή της ήταν απαραίτητη. Reindl et al. (1990) διερεύνησαν την απόδοση των ισοτροπικών και τεσσάρων

ανισότροπων ωριαίων μοντέλων ακτινοβολίας επιφανειακής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας μηνιαία μέση ωριαία χρησιμοποιούμενη ενέργεια ως πρότυπο μέτρησης. Οι Duffie και Beckman (1991) παρουσίασαν μια τριγωνομετρική σχέση για να υπολογίσουν τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας του ήλιου σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Η σχέση μπορεί να τροποποιηθεί για οριζόντια επιφάνεια (γωνία υψομέτρου) και κατακόρυφη επιφάνεια (γωνία zenith).

4.4 Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του θερμοκηπίου

Ο ρυθμός ροής θερμότητας μέσω του καλύμματος θερμοκηπίου εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους όπως η θερμική αγωγιμότητα και οι ακτινοβολίες μεγάλου μήκους κύματος του υλικού επικάλυψης, ο εξωτερικός αέρας, ο εσωτερικός αέρας και η θερμοκρασία του καλύμματος και η κίνηση αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά επικάλυψης έχουν έναν δημοσιευμένο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που ονομάζεται ο συνολικός συντελεστής απώλειας θερμότητας, U σε $W m^2 C^{-1}$. Ο συντελεστής αυτός συνδυάζει τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, τους συντελεστές θερμικής μεταφοράς στο εσωτερικό και έξω από το κάλυμμα και τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μακρού κύματος μέσω του καλύμματος.

Ωστόσο, η τιμή U εξαρτάται από τις *in situ* περιβαλλοντικές συνθήκες και τις θερμικές ακτινοβολίες των υλικών κάλυψης, οι διαφορετικές τιμές του U αναφέρονται στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται από πολλούς συγγραφείς για το ίδιο υλικό κάλυψης. Ο παράγοντας U διαπιστώθηκε ότι εξαρτάται όχι μόνο από τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του θερμοκηπίου αλλά και από τη θερμοκρασία του καλύμματος, τη μεταφορά ενέργειας μέσω του καλύμματος, την ταχύτητα του ρεύματος αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο και τον ουρανό θερμοκρασία. Επομένως, δεν είναι βολικό να θεωρείται ο συντελεστής U ως μια σταθερή τιμή που πρέπει να χρησιμοποιείται στο ισοζύγιο ενέργειας θερμοκηπίου. Όλες αυτές οι εκφράσεις μοντελοποιούν τον ελεύθερο μηχανισμό μεταφοράς μέσα στο θερμοκήπιο, ο οποίος δεν ισχύει πάντοτε λόγω εσωτερικών κινήσεων του θερμού αέρα.

Ο συντελεστής ακτινοβολίας θερμότητας είναι συνάρτηση της εσωτερικής θερμοκρασίας δαπέδου, της θερμοκρασίας της καλλιέργειας, της θερμοκρασίας του ουρανού, της εκπομπής και του συντελεστή σχήματος των αλληλεπιδρώντων συστατικών. Ο συντελεστής μεταφοράς αγωγού ή πυθμένα είναι συνάρτηση της αγωγιμότητας και του βάθους του εδάφους, της αγωγιμότητας του δαπέδου του σκυροδέματος, της μόνωσης κάτω ή πάνω στην επιφάνεια. Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μπορεί έτσι να υπολογιστεί αφού παραμεληθεί η θερμική αντίσταση του υλικού καλύμματος.

4.5 Ανεξάρτητα θερμικά μοντέλα θερμοκηπίου

Οι παλαιότερες προσπάθειες για την ανάπτυξη μοντέλου θερμικού περιβάλλοντος θερμοκηπίου ήταν κυρίως για τον προσδιορισμό των μεγεθών των θερμαντήρων και των ανεμιστήρων (Morris, 1956, Walker, 1965). Ήταν γενικά απλές θερμικές ισορροπίες σταθερής κατάστασης, συχνά παραμελώντας συστατικά του θερμικού περιβάλλοντος. Υπάρχουν βασικά τρεις τύποι μοντέλων όπως: στατικά, δυναμικά και ενδιάμεσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας θερμοκηπίου. Στατικά μοντέλα, όπου η κατανάλωση ενέργειας προσεγγίζεται από τις συνολικές θερμικές απώλειες (Morris, 1964). Το πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι η απλότητα τους, αλλά η ακρίβειά τους είναι πολύ περιορισμένη ($\pm 25\%$ σφάλμα) καθώς η ηλιακή ενέργεια δεν λαμβάνεται υπόψη. Αυτά τα μοντέλα απαιτούν ετήσια ή μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα. Τα δυναμικά μοντέλα δείχνουν καλή ακρίβεια ($\pm 10\%$ σφάλμα) αλλά είναι πολύπλοκα και δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν για προσομοίωση για μεγάλες περιόδους: χρειάζονται πολύ χρόνο υπολογισμού και απαιτούν σημαντική μετεωρολογική εισροή. Αυτά τα μοντέλα απαιτούν ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα.

4.6 Θερμικά μοντέλα σε συνδυασμό με συστήματα θέρμανσης / αποθήκευσης θερμότητας

Κατά τις χειμερινές κλιματολογικές συνθήκες, το θερμοκήπιο συνδυάζεται είτε με παθητικό είτε με ενεργό σύστημα θέρμανσης για τη διατήρηση του εσωτερικού μικροκλίματος για σωστή ανάπτυξη των φυτών. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται όλα τα θερμικά μοντέλα θερμοκηπίου που είναι ενσωματωμένα σε συστήματα θέρμανσης, όπως: rock-bed, υλικά αλλαγής φάσης, συστήματα εναλλαγής θερμότητας με γείωση, όλα τα συστήματα θέρμανσης νερού (θερμική αποθήκευση μάζας νερού, θερμαντικό σύστημα θέρμανσης, τα συστήματα θέρμανσης λιμνών, το σύστημα αντλίας θερμότητας εδάφους, το σύστημα αντλίας θερμότητας εδάφους υποβοηθούμενο από ηλιακό σύστημα, το σύστημα εναλλάκτη θερμότητας συζευγμένο με υδροφόρο ορίζοντα), το σύστημα συλλογής αέρα εδάφους, το βόρειο τοίχο και τη θερμική κουρτίνα και το σύστημα εναλλάκτη θερμότητας εδάφους. Γενικά, δίνεται η κύρια ώθηση στις αρχές λειτουργίας και τις εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση διαφόρων μοντέλων.

Ένα δημοφιλές και οικονομικό υλικό αποθήκευσης θερμότητας είναι ένας συνδυασμός από βότσαλο, χαλίκι και τούβλα. Η λογική αποθήκευση θερμότητας (με τον αέρα ως μηχανισμό μεταφοράς ενέργειας) τοποθετημένη υπόγεια έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει μια μεγάλη και φθηνή επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας (Sethi and Sharma, 2008). Αυτού του είδους οι τεχνικοί συνδυασμοί υλικών χρησιμοποιούνται συνήθως για την εξυπηρέτηση του σκοπού, καθώς έχουν μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ταχεία μεταφορά θερμότητας, χαμηλό κόστος και μεγάλη διάρκεια ζωής.

4.7 Θερμικά μοντέλα σε συνδυασμό με αποθήκευση υλικού αλλαγής φάσης (Phase Change Material PCM)

Το πλεονέκτημα της αποθήκευσης PCM σε σύγκριση με τα συστήματα αισθητής αποθήκευσης θερμότητας είναι η πιθανότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης της με μικρή μόνο μεταβολή θερμοκρασίας (Hasan, 1994, Sethi and Sharma, 2008). Επιπλέον, τα PCM διατίθενται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, το οποίο μπορεί να ταιριάζει με την ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας σε εφαρμογές θερμοκηπίου.

Η μοντελοποίηση του PCM είναι ένα κινούμενο όριο ως διεπαφή στερεών-υγρών όπου ένα τέτοιο πρόβλημα που επιλύεται κινείται κατά την αλλαγή φάσης (Lamberg και Siren, 2003). Για τις διεργασίες αλλαγής φάσης, η εξίσωση θερμότητας και η διαφορική έκφρασή της κρατούνται μέσα στο υγρό ή το στερεό και μια κατάσταση άλματος που εκφράζει την εξοικονόμηση ενέργειας επικρατεί κατά μήκος των καμπυλών που διαχωρίζουν το στερεό από το υγρό (Rathjen and Latif, 1971).

Οι αναλυτικές μελέτες για την οιονεί σταθερή προσέγγιση, τις μεθόδους διαταραχής και την ολοκληρωτική μέθοδο της θερμικής ισορροπίας πραγματοποιήθηκαν για μονοδιάστατα κινούμενα συνοριακά προβλήματα με διαφορετικές οριακές συνθήκες (Satzger et al., 1997). Διαφορετικά είδη αριθμητικών μεθόδων εξέρχονται επίσης για την επίλυση των προβλημάτων PCM. Ένα μοντέλο διαμόρφωσης δισδιάστατης ενθαλπίας παρουσιάστηκε χρησιμοποιώντας μια ρητή μέθοδο (Voller, 1990). Αποδείχθηκε ότι το PCM τήκεται ταχύτερα από ό, τι στερεοποιείται

επειδή η φυσική κυκλοφορία επιταχύνει την τήξη του PCM (Stritih and Novak, 2000). Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η μεταφορά θερμότητας με αγωγιμότητα στο στερεό είναι πολύ πιο αργή από τη μεταφορά στην υγρή φάση και επομένως ο ρυθμός στην στερεά φάση είναι το καθοριστικό βήμα για την εκροή θερμότητας κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης (Aghbalou et al., 2002). Το μοντέλο αλλαγής φάσης βασίστηκε στη μέθοδο ενθαλπίας όπως τροποποιήθηκε από τους Zivkovic και Fujii (2001), στην οποία διεξήγαγαν την ανάλυση της ισοθερμικής αλλαγής φάσης του PCM μέσα σε ορθογώνια και κυλινδρικά δοχεία. Ένα μαθηματικό μοντέλο συζευγμένο με αποθήκευση PCM αναπτύχθηκε και επιλύθηκε αριθμητικά χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μέθοδο ενθαλπίας (Najjar and Hasan, 2008). Οι συντάκτες χρησιμοποίησαν την ιδέα ότι η εσωτερική ενέργεια στο θερμοκήπιο είναι το καθαρό αποτέλεσμα του ηλιακού κέρδους μέσω του φακέλου, οι απώλειες θερμότητας μέσω του καλύμματος και η διείσδυση του αέρα μέσω του περιβλήματος του θερμοκηπίου. Το μοντέλο απλοποιήθηκε με τον αποκλεισμό του θόλου και το περιεχόμενο αντιμετωπίστηκε κυρίως ως ιδιότητες του αέρα.

4.8 Μοντέλα εξατμισοδιαπνοής(evapotranspiration ET) στο θερμοκήπιο

Η εξατμοδιαπνοή (ET) είναι η διαδικασία που επιστρέφει νερό στην ατμόσφαιρα από επιφάνειες. Το ποσοστό και η ποσότητα του ET είναι οι βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για το σχεδιασμό των έργων άρδευσης και είναι επίσης ουσιώδεις για τη διαχείριση της ποιότητας των υδάτων και άλλων περιβαλλοντικών ανησυχιών. Η ET μπορεί να χωριστεί σε δύο υπο-διαδικασίες: εξάτμιση και διαπνοή. Εξάτμιση συμβαίνει στις επιφάνειες ανοιχτού νερού, όπως δεξαμενές, λακκούβες ή από βλάστηση, έδαφος και έδαφος. Πού αλλού η διαπνοή περιλαμβάνει την απομάκρυνση του νερού από το έδαφος από τις ρίζες των φυτών, τη μεταφορά του νερού μέσω του φυτού στο φύλλο και την εξάτμιση του νερού από το εσωτερικό του φύλλου στην επιφάνεια (Ward and Elliot, 1995).

Η ET περιλαμβάνει δύο διαδικασίες εξάτμισης και διαπνοής. Σχεδόν το 100% του ET είναι μορφή εξάτμισης από το στάδιο σποράς (όταν η καλλιέργεια είναι μικρή) ενώ για πλήρη κάλυψη καλλιέργειας περισσότερο από το 90% του ET προέρχεται από τη διαπνοή.

Όπως και η εξάτμιση, η διαπνοή εξαρτάται επίσης από τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, του ανέμου και της τάσης ατμών. Το ποσοστό διαπνοής επηρεάζεται επίσης από τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, τις περιβαλλοντικές πτυχές και τις

καλλιεργητικές πρακτικές. Τα διαφορετικά είδη φυτών μπορεί να έχουν διαφορετικά ποσοστά εμφύτευσης.

Υπάρχουν πολλές βιβλιογραφίες σχετικά με τις μεθόδους εκτίμησης του ET σε θερμοκήπια. Το ET μπορεί να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί με άμεσες ή έμμεσες μεθόδους. Η πιο συνηθισμένη εκτίμηση της άμεσης μεθόδου ET είναι από μετρήσεις με λυσιόμετρα ζύγισης (Baille et al., 1992). Αυτό περιλαμβάνει επίσης τον εξοπλισμό μέτρησης της εξάτμισης, τη λεκάνη τάξης A, το μειωμένο στρώμα εξάτμισης, το μετρητή Piche και το τροποποιημένο ατμόμετρο (Blanco and Folegatti, 2004, Fernandes et al., 2003, Souza κ.ά., 2002). Η έμμεση μέθοδος περιλαμβάνει τη μέτρηση της καθαρής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας της επιφάνειας της καλλιέργειας και του ελλείμματος υδρατμών. Πολλά μοντέλα είχαν αναπτυχθεί από αυτές τις μετρήσεις για να προσδιοριστεί η ET ειδικά για το μοντέλο διαπνοής για παράδειγμα τα μοντέλα Okuya (1988) και De Graaf (Graaf, 1988).

Κάθε τύπος θερμοκηπίου παρέχει ένα διαφορετικό μικροκλίμα το οποίο επηρεάζει τη φυσική διαδικασία του ποσοστού ET ενός θόλου θερμοκηπίου. Η εκτίμηση της ποσότητας ενέργειας που απορροφάται από την εγκατάσταση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου (υλικό επένδυσης) και από τον εξοπλισμό ελέγχου του κλίματος (οθόνη σκίασης, σύστημα, θέρμανση και εξαερισμός). Επομένως, οι αξιόπιστες εκτιμήσεις για τις απαιτήσεις των φυτών πρέπει να λαμβάνουν υπόψη αυτούς τους παράγοντες και να καταρτίζουν μεθόδους που να συνδέουν μεταξύ της καλλιέργειας ET και του κλίματος του θερμοκηπίου. Με την επέκταση της καλλιέργειας του θερμοκηπίου σε όλο τον κόσμο, αυτό είχε οδηγήσει σε διάφορα μοντέλα ET για την εκτίμηση του ET. Συνεπώς, αυτό οδηγεί στη ζήτηση για μοντέλα ET που είναι κατάλληλα και αξιόπιστα για τις συνθήκες θερμοκηπίου.

Τα θερμοκήπια χαμηλής τεχνολογίας έχουν δομές χαμηλού κόστους καλυμμένες με πλαστική μεμβράνη, χωρίς συστήματα ενεργού κλιματικού ελέγχου και συνήθως καλλιεργούνται σε έδαφος. Τα τυπικά θερμοκήπια είναι οι πλαστικές σήραγγες θερμοκηπίου, οι οικοδομικές εγκαταστάσεις ή οι δομές δικτύων εντόμων που απλά έχουν δομές καλυμμένες με δίχτυα. Ο φυσικός αερισμός είναι η συνήθης πρακτική για αυτόν τον τύπο θερμοκηπίου (Baille et al., 2001, Fernández et al., 2009).

Το πλαστικό θερμοκήπιο έχει συμμετρική οροφή με κλίση 12,5%, χωρίς εξοπλισμό θέρμανσης και αεριζόμενο παθητικά ανοίγοντας πλευρικά τοιχώματα και οπές οροφής. Πολυετή καλλιέργεια χόρτου αναπτύχθηκε στο θερμοκήπιο. Ο υπολογισμός του ET με μοντέλα συγκρίθηκε με το μετρούμενο ET από ένα λυσιμέτρο ζύγισης που βρίσκεται στο θερμοκήπιο. Η υπολογισμένη ET ελέγχθηκε για αμφοότερες τις συνθήκες χωρίς και με λεύκανση (λεύκανση με ανθρακικό ασβέστιο στο εξωτερικό πλαστικό κάλυμμα για ψύξη) Fernández et al. (2009). Για το μοντέλο Hargreaves που παρουσιάζουμε στην ενότητα που ακολουθεί, ο υπολογιζόμενος ET υπερεκτιμήθηκε σε μεγάλο βαθμό όταν υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την αρχική εξίσωση (Hargreaves et al., 1985). Ωστόσο, οι Fernández et al. (2009) τον επανυπολογίζει πολλαπλασιάζοντας τον εξωγήινο ακτινοβολισμό με την εκπομπή του θερμοκηπίου και το αποτέλεσμα συμφωνεί με ακρίβεια με μετρημένο ET με ένα μικρό σχετικό σφάλμα 3,7% και r^2 ίσο με 0,97.

4.8 Το μοντέλο του Hargreaves για την εξατμισοδιαπνοή.

Ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο για την εξατμισοδιαπνοή αποτελεί το μοντέλο του Hargreaves. Το συγκεκριμένο μοντέλο απαιτεί μόνο μετρημένα δεδομένα θερμοκρασίας, τα οποία είναι απλά και λιγότερο επιρρεπή από άλλα μοντέλα (Hargreaves et al., 2003). Αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση όταν τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας, τα δεδομένα σχετικής υγρασίας ή τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου δεν είναι διαθέσιμα (Allen et al., 1998). Η μέθοδος με βάση τη θερμοκρασία Hargreaves δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} (0.0023)(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

όπου

λ : Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($MJ\ kg^{-1}$)

R_a : Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)

T_{max} : Μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}C$)

T_{min} : Ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα (°C)

T_{mean} : Μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (°C)

4.9 Συμπεράσματα 4^{ου} κεφαλαίου

Αν και η ηλιακή ενέργεια είναι ελεύθερη και διαθέσιμη, η πρακτική χρήση για τη θέρμανση του θερμοκηπίου παρουσιάζει ακόμη τεχνικά και οικονομικά προβλήματα. Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται μέσα στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της ημέρας καλύπτει ένα μέρος της θερμικής ενέργειας που απαιτείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να χρησιμοποιηθεί η ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση του θερμοκηπίου (από τον Νοέμβριο έως τον Μάρτιο) κατά τη διάρκεια της νύχτας, πρέπει να λυθούν δύο προβλήματα: i) η μετατροπή της παγκόσμιας ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια και ii) η αποθήκευση θερμικής ενέργειας για θέρμανση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Προκειμένου να καταστεί οικονομικά πιο εφικτή η επιστημονική καλλιέργεια θερμοκηπίου, εκτός από την αύξηση της ηλιακής ενέργειας, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μελέτες και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική ενέργεια, η βιομάζα και το γεωθερμικό νερό και η θερμική μάζα εδάφους. Παρόλο που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία συστήματα θερμοηλεκτρικού συστήματος θερμότητας και συστήματα ζεστού νερού / θερμότητας για συστήματα θέρμανσης δαπέδου θερμοκηπίου, η πλειοψηφία των καλλιεργητών θερμοκηπίων καίουν τεράστιες ποσότητες ορυκτών καυσίμων (προπάνιο, LPG κλπ.) Και προσθέτουν την ήδη χύνοντας τόνους CO₂ και άλλων ενοχλητικών εκπομπών στο περιβάλλον. Η χρήση συστημάτων ανταλλαγής θερμότητας από χαλυβδοσωλήνες, συστημάτων θέρμανσης σωλήνων θέρμανσης και συστημάτων αντλιών θερμότητας εδάφους μπορεί να μειώσει τα φορτία θέρμανσης κατά 20-70% σε διάφορες τοποθεσίες. Η ανασκόπηση δείχνει ότι η αποτελεσματική χρήση συστημάτων άντλησης θερμότητας εδάφους με κατάλληλη τεχνολογία στα σύγχρονα θερμοκήπια θα διαδραματίσει ηγετικό ρόλο στο μέλλον δεδομένου ότι το σύστημα αυτό δεν είναι μόνο ικανό να θερμαίνει αποτελεσματικά το θερμοκήπιο, αλλά έχει επίσης αναγνωριστεί το δυναμικό ψύξης και αφύγρανσης. Τον τελευταίο καιρό η χρήση του κλιβάνου, του συλλέκτη εδάφους και της θερμικής αποθήκευσης μάζας νερού για τη θέρμανση του θερμοκηπίου ανέφερε περιορισμένες μελέτες. Μπορεί να οφείλεται στους δύο λόγους. Η αποθήκευση και η παροχή θερμότητας μέσω αυτών των συστημάτων εξαρτώνται από την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας.

(1) Σε τροπικές τοποθεσίες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι άφθονη, τα θερμοκήπια δεν χρειάζεται να θερμαίνονται τη νύχτα ακόμη και κατά τη χειμερινή νύχτα (ή λόγω του ήπιου και του μικρού χειμώνα το υπερβολικό κόστος αυτών των συστημάτων καθιστά μη οικονομικό, εξαιρουμένης της μάζας νερού)

(2) σε ψυχρά κλίματα, η είσοδος ηλιακής ακτινοβολίας για την αποθήκευση υπερβολικής θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι πολύ μικρή (ακόμη και σε συνδυασμό με ηλιακά συστήματα συλλογής αέρα) που θα χρησιμοποιηθούν τη νύχτα για θέρμανση του θερμοκηπίου.

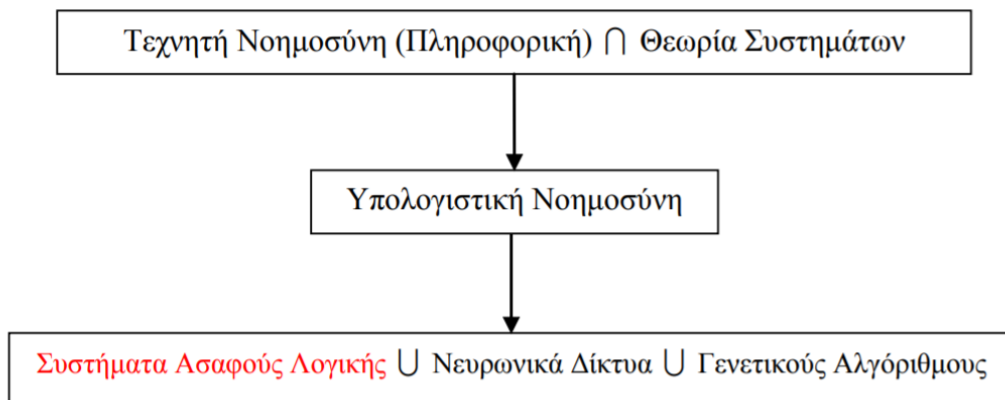
Από την άλλη πλευρά, η αποθήκευση PCM κερδίζει δημοτικότητα, αλλά όχι πολλές επιτυχημένες προσπάθειες εκτός από μερικές που έχουν αναφερθεί αποκλειστικά για εφαρμογές θερμοκηπίου. Απαιτούνται πιο συγκεκριμένες μελέτες για τυποποιημένα συζευγμένα συστήματα PCM για θέρμανση θερμοκηπίων. Η θέρμανση θερμοκηπίου στα ακραία χειμωνιάτικα κλίματα είναι πολύ ενεργειακά έντονη, που κοστίζει πολύ πριν από το μικροκλίμα ελέγχεται. Η οικονομική ανάλυση θα πρέπει επίσης να προστεθεί σε μελλοντικές μελέτες, καθώς οι συντάκτες δεν μπορούσαν να βρουν πολλές μελέτες που να καλύπτουν αυτή την πτυχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΥΦΥΗΣ ΈΛΕΓΧΟΣ

5.1 Εισαγωγή

Η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence) είναι μια από τις νεότερες επιστήμες και αποτελεί έναν κλάδο της επιστήμης των υπολογιστών. Ουσιαστικά γεννήθηκε το 1956 και ο στόχος που τέθηκε ήταν να δημιουργήσει μηχανές με σκοπό να λειτουργούν αυτόνομα μέσα σε πολύπλοκα και δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Η θεωρία συστημάτων και ειδικότερα η θεωρία ελέγχου προσέφεραν το μαθηματικό υπόβαθρο για την προσέγγιση της λύσης αυτού του προβλήματος. Τα εργαλεία της τεχνητής νοημοσύνης χρησιμοποιήθηκαν στη θεωρία ελέγχου για να ξεπεραστούν οι μαθηματικοί περιορισμοί της θεωρίας ελέγχου.

Ο συγκερασμός της τεχνητής νοημοσύνης και της θεωρίας των συστημάτων δημιούργησε ένα νεοσύστατο επιστημονικό κλάδο αυτό της Υπολογιστικής νοημοσύνης (Computational Intelligence). Η υπολογιστική νοημοσύνη εμπεριέχει και συνδυάζει συνεργατικά τρία βασικά δομικά επιστημονικά πεδία, δηλαδή τα συστήματα ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Systems), τα νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks) και τους γενετικούς αλγόριθμους Genetic Algorithms). Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ότι τα συστήματα ασαφούς λογικής αναδεικνύονται μέσα από τον συγκερασμό που προκύπτει από την τομή δύο επιστημονικών κλάδων.



Σχήμα 5.1 Επιστημονικά Πεδία και τα Συστήματα Ασαφούς Λογικής

5.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη

Ένα από τα κύρια πεδία έρευνα της τεχνητής νοημοσύνης είναι η τεχνολογία της γνώσης (Knowledge engineering). Η τεχνική νοημοσύνη χρησιμοποιεί εξειδικευμένη γνώση (π.χ. για προβλήματα διάγνωσης) του υπό μελέτη πεδίου και τεχνικές συλλογισμού για την αναζήτηση της λύσης σε συγκεκριμένα προβλήματα. Τα συστήματα αυτά περιέχουν: βάση γνώσης (κανόνες με σύμβολα), μηχανισμό απόκτησης γνώσης, σύστημα επεξήγησης, διεπικοινωνία χρήστη με το σύστημα και έναν μηχανισμό συμπερασμού και ονομάστηκαν έμπειρα συστήματα (Expert Systems).

Η γλώσσα αναπαράστασης που χρησιμοποιείται είναι η προτασιακή λογική ή λογική Boole και για περίπλοκα περιβάλλοντα η λογική πρώτης τάξης (first-order logic, FOL) ή κατηγορηματικός λογισμός πρώτης τάξης. Η FOL είναι η κλασική Αριστοτέλεια λογική.

5.3 Η Ασαφής Λογική

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια επέκταση της κλασικής αριστοτέλειας λογικής. Μια πρόταση δηλαδή μπορεί να είναι αληθής "με κάποιο βαθμό αληθείας", και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με απλά λόγια, η ασαφής λογική λέει ότι τα πράγματα συχνά δεν είναι «άσπρο-μαύρο» αλλά «αποχρώσεις του γκρι». Η ιδέα αυτή απετέλεσε επανάσταση στη θεωρία της λογικής, γιατί ξέφυγε από το μοντέλο που κυριαρχούσε εδώ και 2500 χρόνια, δηλαδή το μοντέλο του «0-1», «αληθές-ψευδές» και μπόρεσε να περιγράψει ένα ή περισσότερα σύνολα τα οποία δεν έχουν σαφώς καθορισμένα όρια.

Η έννοια της ασαφούς λογικής εισήχθη για πρώτη φορά από τον L.A. Zadeh το 1960 και παρουσιάστηκε εκτενώς στο βιβλίο του Fuzzy Sets το 1965. Κατά τον Zadeh μια τιμή μπορεί να ανήκει ταυτόχρονα σε περισσότερα του ενός υποσύνολα στο καθένα με διαφορετικό βαθμό συμμετοχής.

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια επέκταση της κλασικής αριστοτέλειας λογικής. Μια πρόταση δηλαδή μπορεί να είναι αληθής "με κάποιο βαθμό αληθείας", και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με απλά λόγια, η ασαφής λογική λέει ότι τα πράγματα συχνά δεν είναι «άσπρο-μαύρο» αλλά «αποχρώσεις του γκρι». Η ιδέα αυτή απετέλεσε επανάσταση στη θεωρία της λογικής, γιατί

ξέφυγε από το μοντέλο που κυριαρχούσε εδώ και 2500 χρόνια, δηλαδή το μοντέλο του «0-1», «αληθές-ψευδές» και μπόρεσε να περιγράψει ένα ή περισσότερα σύνολα τα οποία δεν έχουν σαφώς καθορισμένα όρια.

Η έννοια της ασαφούς λογικής εισήχθη για πρώτη φορά από τον L.A. Zadeh το 1960 και παρουσιάστηκε εκτενώς στο βιβλίο του Fuzzy Sets το 1965. Κατά τον Zadeh μια τιμή μπορεί να ανήκει ταυτόχρονα σε περισσότερα του ενός υποσύνολα στο καθένα με διαφορετικό βαθμό συμμετοχής.

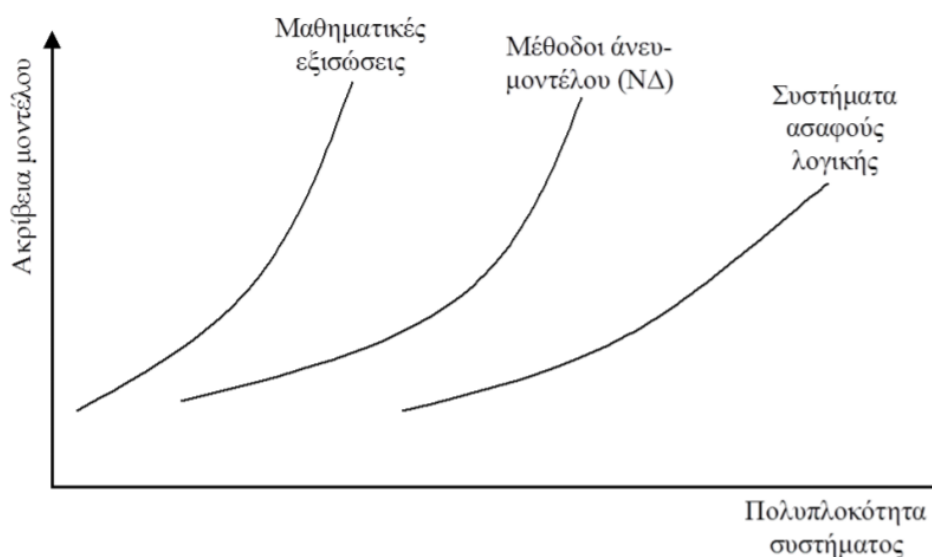
Για παράδειγμα η κατηγορία των ζώων περιλαμβάνει σκύλους, άλογα, πουλιά κ.τ.λ. ως μέλη της και όχι άλλα αντικείμενα όπως πέτρες, υγρά, ρευστά κ.τ.λ. Η ασαφής λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγηθεί η διαφορούμενη σχέση που υπάρχει ως προς την κατάταξη τους στην κατηγορία των ζώων, αντικειμένων όπως οι αστερίες ή τα βακτήρια. Ένα άλλο παράδειγμα έρχεται από τη θεωρία των αριθμών και τη σχέση ενός αριθμού όπως το 10 με την «κατηγορία» του συνόλου των πραγματικών αριθμών που είναι μεγαλύτεροι του 1. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι τόσο η «κατηγορία όλων των πραγματικών αριθμών πολύ μεγαλύτερων του 1» όσο και η «κατηγορία των πολύ ψηλών ανδρών» δεν συνιστούν κατηγορίες ή σύνολα με την κλασσική μαθηματική έννοια των όρων.

Έτσι η έννοια του ασαφούς συνόλου (fuzzy set) δίνει ένα πρώτο σημείο εκκίνησης για την κατασκευή ενός εννοιολογικού πλαισίου το οποίο από πολλές απόψεις μοιάζει με αυτό που χρησιμοποιείται στα συνήθη σύνολα αλλά είναι πολύ πιο γενικό από το τελευταίο και μπορεί να έχει ένα πολύ πιο ευρύ πεδίο εφαρμογής.

Τα ασαφή μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιούν αβέβαιες και ακαθόριστες πληροφορίες, χωρίς να απαιτούν ακριβή αριθμητικά δεδομένα των παραμέτρων του συστήματος. Ουσιαστικά η ασαφής λογική μέσα από ένα σύνολο απλών λεκτικών κανόνων μπορεί να μοντελοποιήσει τη γνώση και την εμπειρία ενός έμπειρου χρήστη. Έτσι διαμορφώνεται ένα σύστημα βασισμένο στη γνώση, το οποίο οδηγεί σε απλούστερα μοντέλα, πιο εύχρηστα και πιο κοντά στην ανθρώπινη λογική. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτός ο έλεγχος συστημάτων ακόμα και σε συνθήκες λειτουργίας στις οποίες οι κλασσικές μέθοδοι αποτυγχάνουν.

5.4 Η αρχή της ασυμβατότητας

Η αρχή αυτή διατυπωμένη από τον Zadeh λέει ότι: “Καθώς η πολυπλοκότητα ενός συστήματος αυξάνει μειώνεται η ικανότητά μας να προβούμε σε ακριβείς και σημαντικές περιγραφές όσον αφορά τη συμπεριφορά του συστήματος μέχρι που φθάνουμε σε ένα όριο πέρα από το οποίο τα χαρακτηριστικά της ακρίβειας και της σημαντικότητας γίνονται σχεδόν αμοιβαία αποκλειόμενα”. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η αρχή της ασυμβατότητας δηλαδή δείχνει τελικά ότι τα συστήματα ασαφούς λογικής αντιμετωπίζουν την πολυπλοκότητα του συστήματος χωρίς να μειώνεται σημαντικά η ακρίβεια της περιγραφής του.



Σχήμα 5.2 Η ακρίβεια ενός μοντέλου ως συνάρτηση της πολυπλοκότητας ενός συστήματος

5.5 Ο Ευφυής Έλεγχος

Ο Ευφυής Έλεγχος είναι το αποτέλεσμα της εφαρμογής της Υπολογιστικής Νοημοσύνης στον Έλεγχο Προηγμένων Συστημάτων. σε προβλήματα που είναι δύσκολο ή και αδύνατο να παρασταθούν με ακρίβεια από μαθηματικά μοντέλα ο Ευφυής Έλεγχος χρησιμοποιεί τη γνώση και την εμπειρία για την περιγραφή και λύση τους. Στόχος του ευφυούς ελεγκτή που σχεδιάζεται είναι να λειτουργεί όπως ο άνθρωπος – χειριστής και με τους ίδιους κανόνες, αλλά χωρίς τις ελλείψεις και τις αδυναμίες του. Να είναι ικανός να αντισταθμίσει τις αποκλίσεις των μεταβλητών της διαδικασίας από τις επιθυμητές και να επαναφέρει σταδιακά τη διαδικασία στην ονομαστική

της κατάσταση χωρίς παρέμβαση του χειριστή και τέλος να προσαρμόζεται σε αβέβαιες και απρόβλεπτες καταστάσεις.

Τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να υποστηρίζει κάθε αρχιτεκτονική Ευφυούς Συστήματος είναι τα εξής:

- Η ορθότητα (correctness) που είναι η ικανότητα εκτέλεσης των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος με απόλυτη ασφάλεια.
- Η σθεναρότητα ή ευρωστία (robustness) που είναι η ικανότητα του συστήματος να παραμένει λειτουργικό κάτω από απρόβλεπτες και αντίξοες συνθήκες είτε αυτές είναι ενδογενείς, είτε εξωγενείς. Σε κάθε επίπεδο ιεραρχίας θα πρέπει να υπάρχει το απαραίτητο περιθώριο για την αντιμετώπιση προσωρινών αναγκών.
- Η επεκτασιμότητα (extendibility) που είναι η ικανότητα της αρχιτεκτονικής να επιτρέπει επέκταση τόσο του υλικού όσο και του λογισμικού, χωρίς επανασχεδιασμό του συστήματος.
- Η επαναχρησιμότητα (reusability) που είναι η ικανότητα της αρχιτεκτονικής να χρησιμοποιεί τα ίδια υπολογιστικά υποσυστήματα (ειδικά το λογισμικό), σε διαφορετικές αλλά παρόμοιες εφαρμογές. Για να επιτύχουμε αυτά τα χαρακτηριστικά η αρχιτεκτονική του συστήματος θα πρέπει να είναι ανοιχτή.

Οι τεχνικές του Ευφυούς Ελέγχου είναι η Ασαφής Λογική, τα Έμπειρα Συστήματα και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Τα Ασαφή Γνωστικά Δίκτυα (ΑΓΔ) είναι μία ακόμα μέθοδος που έχει προταθεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο πολύπλοκων συστημάτων.

5.6 Ασαφή Σύνολα

Η έννοια του ασαφούς συνόλου είναι μόνο επέκταση της έννοιας ενός κλασικού ή Crisp συνόλου. Το ασαφές σύνολο είναι στην πραγματικότητα ένα βασικά ευρύτερο σύνολο σε σύγκριση με το κλασικό σύνολο. Το κλασικό σύνολο εξετάζει μόνο έναν περιορισμένο αριθμό βαθμών συμμετοχής όπως «0» ή «1» ή μια σειρά δεδομένων με περιορισμένους βαθμούς συμμετοχής. Για παράδειγμα αν μία θερμοκρασία ορίζεται σαν ένα κλασικό σύνολο τιμών και οριστεί ως υψηλή θερμοκρασία η θερμοκρασία των 70 βαθμών κελσίου τότε οποιαδήποτε τιμή κάτω των 70 βαθμών δεν θα θεωρείται ως υψηλή θερμοκρασία συνεπώς θερμοκρασίες πχ 65 βαθμών κελσίου που παρότι βρίσκονται κοντά στην θερμοκρασία των 70 δεν θα ανήκουν καθόλου στο σύνολο των υψηλών θερμοκρασιών. Ένα ασαφές σύνολο θα λαμβάνει υπόψιν του ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών και θα τις ορίζει σαν υψηλές θερμοκρασίες πχ ξεκινώντας από τους 0 βαθμούς κελσίου. Ο ακριβής βαθμός που θα ορίζουν την υψηλή θερμοκρασία η κάθε θερμοκρασία του συνόλου εξαρτάται από την συνάρτηση συμμετοχής. Με αυτόν τον τρόπο, το κλασικό σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως υποσύνολο του ασαφούς συνόλου.

Ένα κλασικό σύνολο είναι μία συλλογή αντικειμένων σε ένα δοσμένο εύρος με αυστηρό όριο. Ένα αντικείμενο μπορεί είτε να ανήκει στο σύνολο είτε όχι. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ένα τμήμα σχολής F αποτελούμενο από 10 καθηγητές x_1, x_2, \dots, x_{10} σε ένα πανεπιστήμιο.

$$F = \{ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \}$$

Γενικώς το σύνολο F αποτελείται από τα στοιχεία του συνόλου x_i . Υποθέτοντας ότι τα στοιχεία x_1 - x_4 ανήκουν στο τμήμα επιστήμης της πληροφορικής θα μπορούσαμε να ορίσουμε ένα νέο σύνολο A. Τα στοιχεία x_1 - x_3 έχουν ηλικία μικρότερη των 50 και μπορούν να δημιουργήσουν ένα σύνολο B.

Τότε θα ισχύει ότι:

$$x \in F$$

$$A = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \in F$$

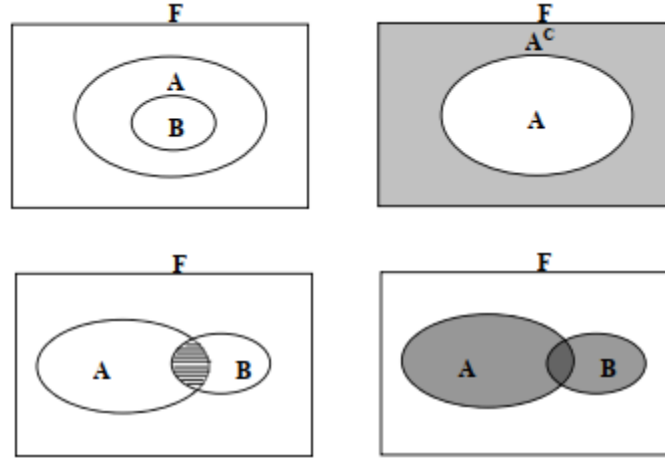
$$B = \{x_1, x_2, x_3\} \subset A$$

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι όλα τα στοιχεία στο σύνολο B ανοίκουν και στο σύνολο A, ή ότι το σύνολο A περιέχει και το σύνολο B. Σε αυτή την περίπτωση το B λογίζεται ως υποσύνολο του A και μπορεί να εκφραστεί ως $B \subset A$. Οι βασικές σχέσεις μεταξύ συνόλων μπορούν να οριστούν ως το **συμπλήρωμα**, η **τομή** και η **ένωση** για τις οποίες ισχύουν τα παρακάτω :

$$\text{Συμπλήρωμα : } A^c(x) = 1 - A$$

$$\text{Τομή του A και B } (A \cap B) = A(x) \cap B(x)$$

Ένωση του A και B $(A \cup B) = A(\chi) \cup B(\chi)$



Σχήμα 5.3 αναπαράσταση βασικών σχέσεων μεταξύ συνόλων: Πάνω αριστερά το B υποσύνολο του A πάνω δεξιά γραμμοσκιασμένο το συμπλήρωμα του A κάτω αριστερά η τομή μεταξύ A και B και κάτω δεξιά η ένωση A και B

Τα στοιχεία όλων των συνόλων υπό μελέτη ανήκουν σε ένα υπερσύνολο αναφοράς. Αν αυτά τα στοιχεία $a_i (i=1, \dots, n)$ του A είναι όλα μαζί ένα υποσύνολο του υπερσυνόλου αναφοράς F, το σύνολο A μπορεί να αναπαρασταθεί από όλα τα στοιχεία $x \in X$ σύμφωνα με τη χαρακτηριστική συνάρτηση:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{όταν } x \in F \\ 0 & \text{όταν } x \notin F \end{cases}$$

Στην κλασική θεωρία των συνόλων το $\mu_A(x)$ έχει μόνο τις τιμές 0 (ψευδής) και 1 (αληθής) που είναι οι τιμές της αλήθειας. Τέτοια σύνολα επίσης ονομάζονται crisp (σαφή) σύνολα (crisp sets). Τα μη-crisp σύνολα ονομάζονται ασαφή σύνολα (fuzzy sets). Οπότε αν υποθέσουμε ξανά το προηγούμενο παράδειγμα με τα μέλη ενός τμήματος τότε ένας καθηγητής του τμήματος είτε ανήκει είτε όχι στο σύνολο A ο διαχωρισμός είναι σαφής και αυστηρός χωρίς περιθώριο ασάφειας. Με άλλα λόγια αν κάποιος ανήκει στο σύνολο A τότε ανήκει πλήρως στο σύνολο και έχει τιμή συμμετοχής 1 και αν δεν ανήκει μπορεί να χαρτογραφηθεί σαν μέλος του συνόλου A σε βαθμό 0. Σε σύγκριση με ένα κλασικό σύνολο ένα ασαφές σύνολο επιτρέπει στα μέλη του να έχουν ένα ομαλό όριο ή αλλιώς να εμπεριέχονται σε ένα σύνολο σε ένα βαθμό. Έτσι αν ορίζαμε ότι μία θερμοκρασία είναι χαμηλή αν έχει τιμή 0-30 βαθμούς μέση για 30 μέχρι 60 και υψηλή για 60 μέχρι 80 βαθμούς κελσίου, σε ένα κλασικό σύνολο μία θερμοκρασία θα μπορούσε να είναι μέλος μόνο ενός υποσυνόλου ενώ σε ένα ασαφές σύνολο μία θερμοκρασία μπορεί να ανήκει σε 2 ή ακόμα και στα 3 υποσύνολα σε διαφορετικούς βαθμούς. Είναι σαφές ότι ένα ασαφές σύνολο περιέχει στοιχεία που έχουν διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής στο σύνολο, και αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα κλασικά σύνολα επειδή τα μέλη ενός κλασικού συνόλου δεν μπορούν να είναι μέλη -εκτός εάν η συμμετοχή τους είναι πλήρης- σε αυτό το σύνολο. Ένα ασαφές σύνολο επιτρέπει σε ένα μέλος να έχει μερικό βαθμό ιδιότητας μέλους.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ασαφές σύνολο A, και εάν ένα στοιχείο x είναι μέλος αυτού του ασαφούς συνόλου A, αυτή η χαρτογράφηση μπορεί να δηλωθεί ως:

$$\mu_A(x) \in [0, 1] \quad (A = (x, \mu_A(x) | x \in X)$$

Ένα ασαφές σύνολο A του υπερσυνόλου αναφοράς X μπορεί να εκφραστεί ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών ως εξής:

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots = \sum_i \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}$$

Αν το υπερσύνολο αναφοράς X είναι συνεχές και άπειρο τότε το ασαφές σύνολο A μπορεί να οριστεί και σαν:

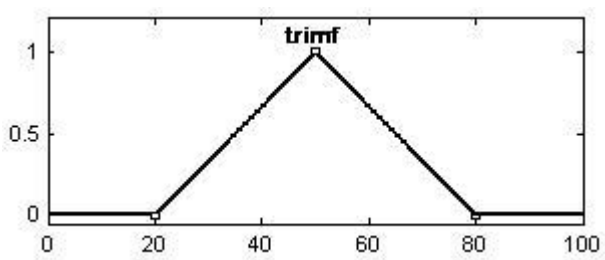
$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x}$$

5.7 Συναρτήσεις Συμμετοχής

Χρησιμοποιώντας τα ασαφή σύνολα είμαστε ικανοί να προσομοιάσουμε τον ανθρώπινο λογισμό σε μαθηματικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά το ασαφές σύνολο καθαυτό δεν προσφέρει ιδιαίτερα χρήσιμα αποτελέσματα χωρίς την διαδικασία ασαφή συμπερασμού. Για την εφαρμογή ασαφή συμπερασμού σε ένα πραγματικό πρόβλημα χρειάζονται τρία βήματα : **Η ασαφοποίηση** , ο **ασαφής συμπερασμός** και η **άποασαφοποίηση**. Η ασαφοποίηση είναι το πρώτο βήμα στην εφαρμογή ενός ασαφούς συμπερασμού. Οι περισσότερες μεταβλητές που υπάρχουν στον πραγματικό κόσμο είναι κλασικού τύπου και πρέπει να μετατραπούν σε ασαφείς μεταβλητές ώστε να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα ο ασαφής συμπερασμός με σκοπό να επεξεργαστούν τα δεδομένα κατάλληλα ώστε να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις οι ασαφείς έξοδοι πρέπει και πάλι να μετατραπούν σε κλασικές μεταβλητές με τη μέθοδο της **άποασαφοποίησης** ώστε να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο ενός συστήματος. Γενικά, η **ασαφοποίηση** περιλαμβάνει δύο διαδικασίες την δημιουργία της **συνάρτησης συμμετοχής** για τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος και την αναπαράσταση τους με λεκτικές μεταβλητές (πχ. Κρύο , ζέστη). Υπάρχουν οι εξής συναρτήσεις συμμετοχής :

Η **τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής** (triangular mf) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους {a,b,c}, ως εξής:

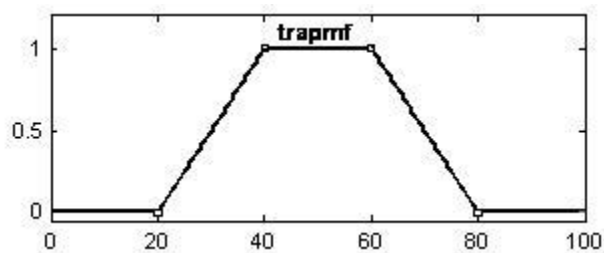
$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right)$$



Σχήμα 5.4 : Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 20, 50, 80$)

Η **τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής** (trapezoidal mf) χαρακτηρίζεται από τις τέσσερις παραμέτρους {a, b, c, d}, ως εξής:

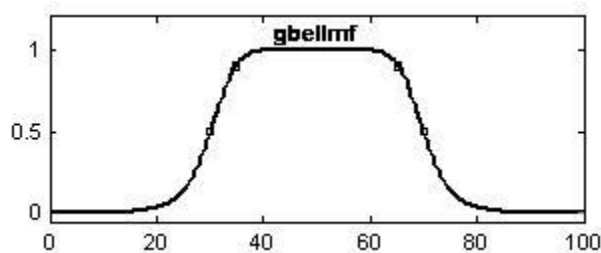
$$\text{Trapezoid}(x; a, b, c, d) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right)$$



Σχήμα 5.5 παράδειγμα τραπεζοειδής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 20, 40, 60, 80$)

Η **καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής** (generalize bell mf ή gbell mf) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους $\{a, b, c\}$, ως εξής:

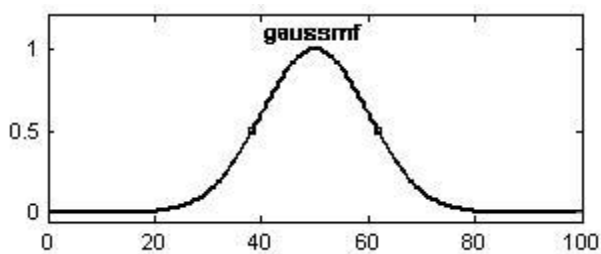
$$\text{Bell}(x;a,b,c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$



Σχήμα 5.6 παράδειγμα καμπανοειδής συνάρτησης συμμετοχής ($\chi; 20, 4, 50$)

Η **γκουσιανή συνάρτηση συμμετοχής** (gaussian mf) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους $\{\sigma, c\}$, όπου το σ καθορίζει το πλάτος της συνάρτησης συμμετοχής (mf) και το c αναπαριστά το κέντρο της mf :

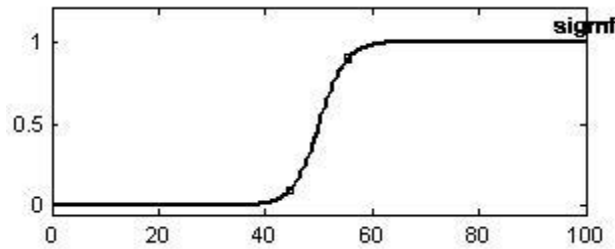
$$\text{Gaussian}(\chi; \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$



Σχήμα 5.7 παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής ($\chi; 10, 50$)

Η σιγμοειδής συνάρτηση συμμετοχής (sigmoidal mf) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους $\{\alpha, c\}$, ως εξής:

$$\text{Sigmoid}(x; \alpha, c) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-c)}}$$



Σχήμα 5.7 παράδειγμα σιγμοειδής συνάρτησης συμμετοχής ($\chi; 0.4, 50$)

Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης συμμετοχής εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής. Για συστήματα τα οποία χρήζουν σημαντικής δυναμικής διαφοροποίησης τιμών σε σύντομο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούνται τριγωνικές και τραπεζοειδής συναρτήσεις συμμετοχής. Αντίθετα για συστήματα που χρήζουν υψηλής ακρίβειας ελέγχου χρησιμοποιείται η γκαουσιανή και η σιγμοειδής συνάρτηση συμμετοχής.

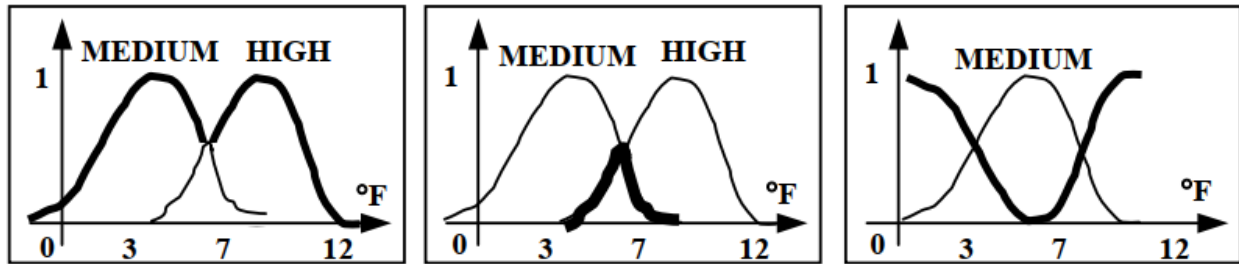
5.8 Πράξεις Ασαφών συνόλων

Όπως και στα κλασικά σύνολα έτσι και στα ασαφή ορίζονται πράξεις μεταξύ συνόλων. Έτσι για 2 σύνολα A και B σε ένα υπερσύνολο αναφοράς X ισχύει ότι:

Ένωση : $A \cup B = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X$

Τομή : $A \cap B = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X$

Συμπλήρωμα : $A^c = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X$

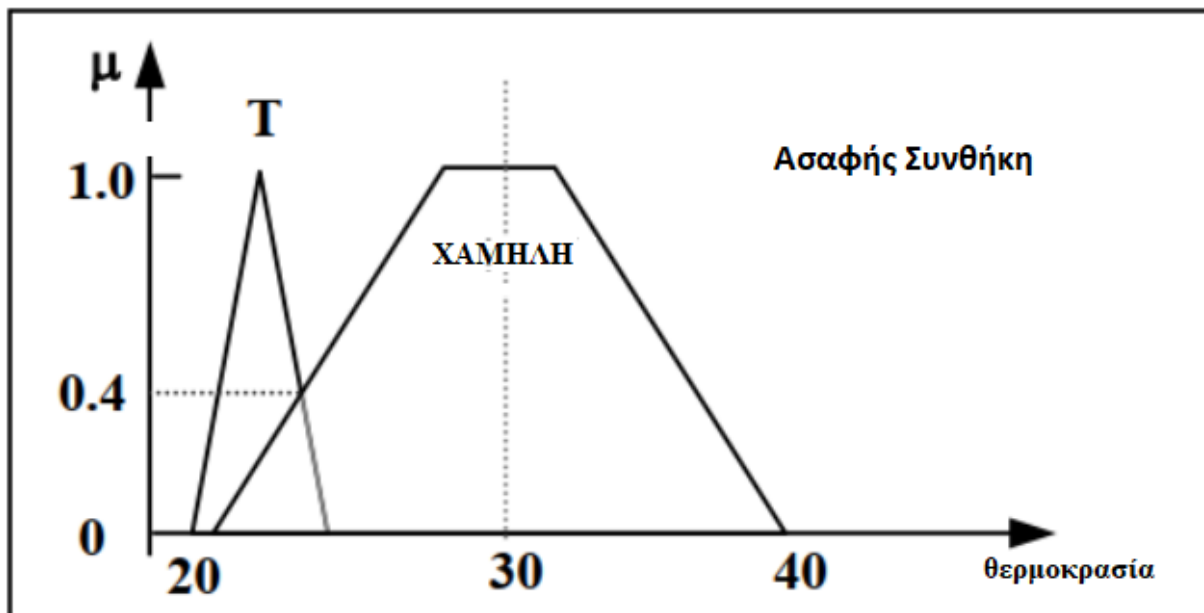


Σχήμα 5.8 αναπαράσταση των πράξεων μεταξύ ασαφών συνόλων αριστερά εντόνως γραμμοσκιασμένη η ένωση στη μέση η τομή γραμμοσκιασμενη και στα δεξιά το συμπλήρωμα

5.9 Ασαφείς κανόνες

Οι ασαφείς κανόνες μπορούν να θεωρηθούν ως γνώση ενός εμπειρογνώμονα σε οποιοδήποτε σχετικό πεδίο εφαρμογής. Ο ασαφής κανόνας αντιπροσωπεύεται από μια ακολουθία της φόρμας εάν-τότε, που οδηγεί σε αλγόριθμους που περιγράφουν ποια ενέργεια ή έξοδος πρέπει να ληφθεί σε σχέση με τις τρέχουσες παρατηρούμενες πληροφορίες, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο την είσοδο όσο και την ανατροφοδότηση εάν εφαρμόζεται ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. Ο νόμος για το σχεδιασμό ή τη δημιουργία ενός συνόλου ασαφών κανόνων βασίζεται στη γνώση ή την εμπειρία ενός ανθρώπου, ο οποίος εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ένας ασαφής κανόνας του τύπου εάν-τότε συσχετίζει μια συνθήκη που περιγράφεται χρησιμοποιώντας γλωσσικές μεταβλητές και ασαφή σύνολα σε μια έξοδο ή ένα συμπέρασμα. Το μέρος εάν χρησιμοποιείται κυρίως για να συλλάβει τη γνώση χρησιμοποιώντας τις ελαστικές συνθήκες, και το μέρος τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει το συμπέρασμα ή την έξοδο σε γλωσσική μεταβλητή μορφή. Αυτός ο κανόνας εάν τότε χρησιμοποιείται ευρέως από το σύστημα ασαφών συμπερασμάτων για τον υπολογισμό του βαθμού στον οποίο τα δεδομένα εισαγωγής ταιριάζουν με την κατάσταση ενός κανόνα. Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τον βαθμό μεταξύ της ασαφούς μεταβλητής εισόδου T (θερμοκρασία) και της ασαφούς συνθήκης χαμηλή. Έξοδος μας

είναι μία μονάδα κλιματισμού



Σχήμα 5.8 ενώνοντας μία ασαφή είσοδο με μία ασαφή συνθήκη

Ο υπολογισμός μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί και από τη συνάρτηση:

$$M(T, XAMHΛH) = \min(\mu_T(x), \mu_{XAMHΛH}(x))$$

Ένας ασαφής κανόνας περιγράφει μια πως οι είσοδοι εμπλέκονται με τις εξόδους. Οι ασαφείς κανόνες εμπλοκής έχουν σχετίζονται με την κλασική λογική Boolean αλλά και με τη λογική πολλαπλών τιμών. Στο προηγούμενο παράδειγμα θα μπορούσε ο ασαφής κανόνας μας να είναι λοιπόν:

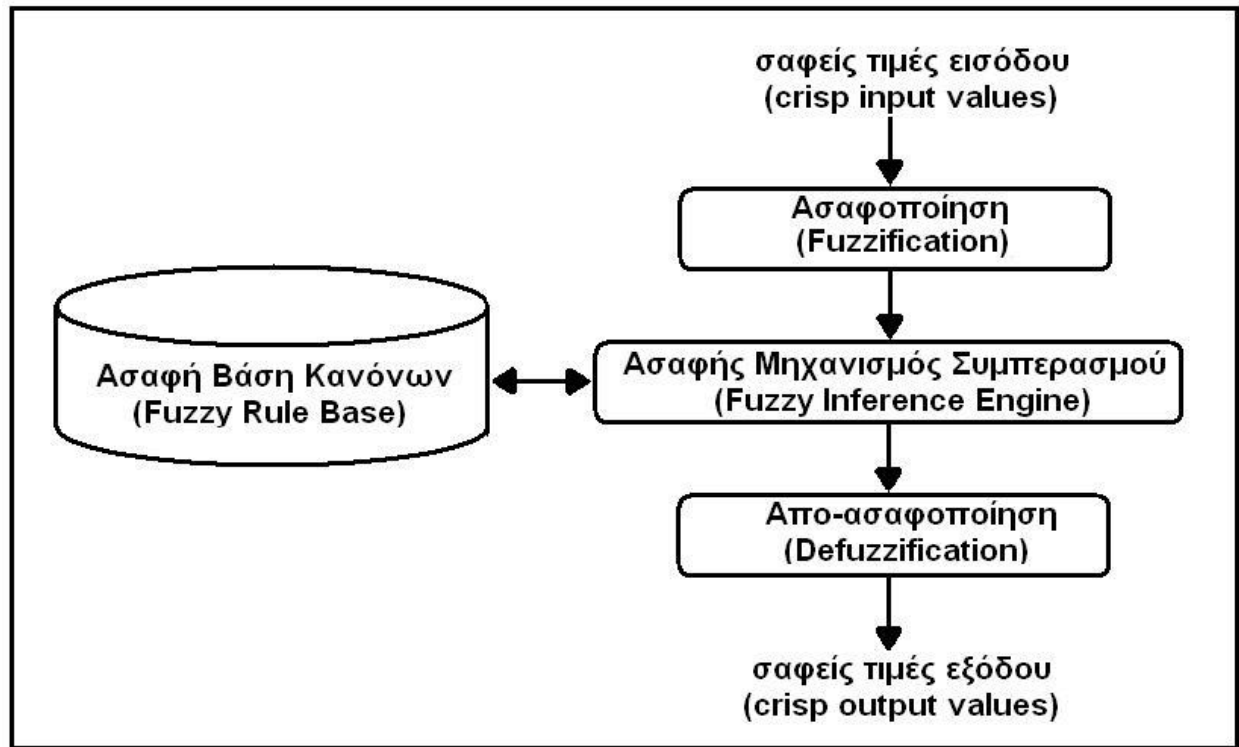
Αν η **θερμοκρασία** είναι XAMHΛH , TOTE ο ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ πρέπει να είναι ενεργός στη ΓΡΗΓΟΡΗ **ταχύτητα**

Η θερμοκρασία είναι η είσοδος του συστήματος χαμηλή είναι η συνθήκη και η ταχύτητα του κλιματισμού είναι η έξοδος του συστήματος. Για μία έξοδο ή για πολλαπλές εξόδους μπορεί να απαιτείται παραπάνω από μία είσοδοι να πληρούν συγκεκριμένες συνθήκες.

5.10 Ασαφείς ελεγκτές

Η έξοδος του συστήματος ελέγχου προκύπτει από τον συνδυασμό των συναρτήσεων συμμετοχής των εισόδων και των εξόδων του συστήματος σε συνδυασμό με τους ασαφείς κανόνες σε μία διαδικασία που ονομάζεται ασαφής συμπερασμός. Για να μετατραπεί η ασαφής

έξοδος σε κάτι χρήσιμο σε πραγματική εφαρμογή απαιτείται η διαδικασία της άποασαφοποίησης η οποία μετατρέπει την ασαφή έξοδο σε μία κλασική μεταβλητή. Όλες αυτές οι λειτουργίες πραγματοποιούνται από έναν ασαφή ελεγκτή.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα ροής ενός ασαφούς ελεγκτή

Για την διαδικασία της αποασαφοποίησης χρησιμοποιούνται κατα κύριο λόγο δύο διαφορετικές μέθοδοι οι οποίες είναι:

5.10.1 Από-ασαφοποίηση μέσου όρου των μεγίστων (Mean of Maximum (MOM))

Με αυτή τη μέθοδο υπολογίζονται οι μέσοι όροι των ασαφών εξόδων που έχουν τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής και μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\chi'_{\text{MOM}} = \left(\frac{1}{m}\right) \sum^m \max \mu(\chi)$$

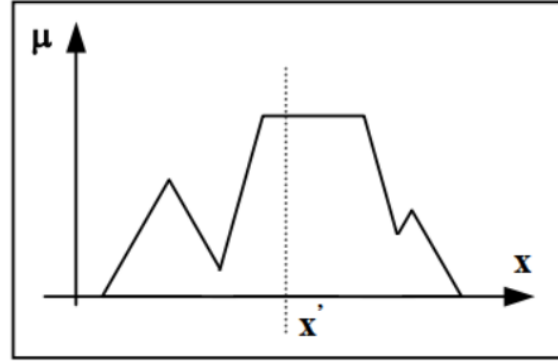
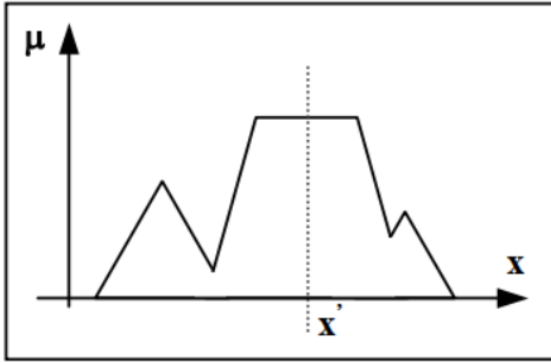
Ένα αρνητικό της μεθόδου μέσου όρου μεγίστων είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ολοκληρωτική μορφή της συνάρτησης συμμετοχής της εξόδου αλλά μόνο τα σημεία που έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής.

5.10.2 Απο-ασαφοποίηση κέντρου βάρους (Centroid defuzzification COG)

Η μέθοδος αποασαφοποίησης κέντρου βάρους είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος αποασαφοποίησης και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές. Προσομοιάζει την εύρεση κέντρου βάρους στη φυσική. Η σταθμισμένη μέση τιμή της συνάρτησης συμμετοχής ή το κέντρο βάρους της

περιοχής περιορισμένο από την καμπύλη της συνάρτησης συμμετοχής υπολογίζει την κλασική τιμή της ασαφούς μεταβλητής.

$$\chi'_{\text{COG}} = (\int x \cdot \mu(x) dx) / \int \mu(x) dx$$



Σχήμα 5.10 σύγκριση μεταξύ μεθόδου μέσου όρου μεγίστου (αριστερά) και κέντρου βάρους (δεξιά)

Κεφάλαιο 6 Matlab

Όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 5 το μοντέλου του συστήματος μεταφοράς ενέργειας του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήσαμε περιγράφεται από δύο διαφορικές εξισώσεις, μία για τον υπολογισμό της εσωτερικής θερμοκρασίας ανά χρονική στιγμή και μία για τον υπολογισμό της εσωτερικής υγρασίας ανά χρονική στιγμή. Για την επίλυση των διαφορικών αυτών εξισώσεων καθώς και για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab.

6.1 Εισαγωγή στο Matlab

Το **MATLAB** είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιείται σε πανεπιστημιακά μαθήματα αλλά και ερευνητικές και άλλες εφαρμογές με επιστημονικούς υπολογισμούς (scientific computing). Το όνομά του προέρχεται από τα αρχικά γράμματα των λέξεων **MA**Ttrix **LAB**oratory (*εργαστήριο πινάκων*). Το MATLAB είναι ένα **διαδραστικό** (interactive) πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και οπτικοποίηση δεδομένων (data visualization) με δυνατότητες προγραμματισμού που το καθιστούν ένα ισχυρό και χρήσιμο εργαλείο στις μαθηματικές και φυσικές επιστήμες. Σε αντίθεση με τα λογισμικά Maple και Mathematica, το MATLAB στις αρχικές του εκδοχές δεν έκανε συμβολικούς υπολογισμούς. Στις νεότερες εκδοχές του, το πακέτο περιλαμβάνει εργαλείοι που επιτρέπουν συμβολικούς υπολογισμούς.

Όπως υποδηλώνεται και από το όνομά του, το MATLAB είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως η επίλυση γραμμικών συστημάτων, η εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, η αντιστροφή τετραγωνικών πινάκων κλπ. Επιπλέον το πακέτο αυτό είναι εφοδιασμένο με πολλές επιλογές για γραφικά (δηλ. την κατασκευή γραφικών παραστάσεων) και προγράμματα γραμμένα στη δική του γλώσσα προγραμματισμού για την επίλυση άλλων προβλημάτων όπως η εύρεση των ριζών μη γραμμικής εξίσωσης, η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων, η επίλυση προβλημάτων αρχικών τιμών με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις κα.

6.2 Γραφικά στο MATLAB

Η MATLAB έχει εξαιρετικές δυνατότητες για γραφικά και είναι εφοδιασμένη με αρκετές συναρτήσεις για εύκολο και ευέλικτο σχεδιασμό επίπεδων καμπυλών, τρισδιάστατων επιφανειών, ισοϋψών, παραμετρικών δισδιάστατων αλλά και τρισδιάστατων καμπυλών κα. Το κεφάλαιο αυτό είναι μια εισαγωγή στις σημαντικότερες γραφικές συναρτήσεις της MATLAB.

6.2.1 Η εντολή plot

Η συνάρτηση **plot** χρησιμοποιείται για την κατασκευή του γραφήματος μιας **επίπεδης καμπύλης** τα σημεία της οποίας είναι αποθηκευμένα στα **ισομήκη διανύσματα** x και y . Αν για παράδειγμα, έχουμε τα διανύσματα

```
>> x=[0 1 1.5 2.2 3.]
```

```
x =
```

```
0 1.0000 1.5000 2.2000 3.0000
```

```
>> y = [0 1.65 1.45 1.4 1]
```

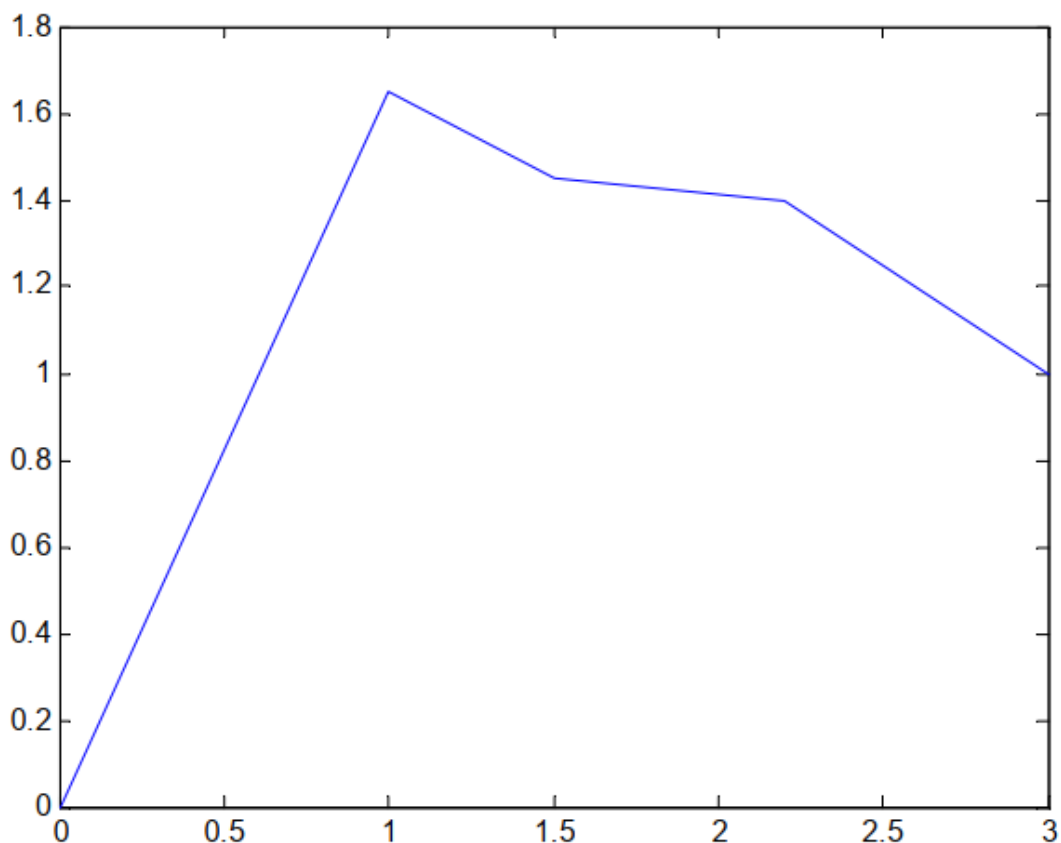
```
y =
```

```
0 1.6500 1.4500 1.4000 1.0000
```

με την εντολή

```
>> plot(x,y)
```

εμφανίζεται αυτόματα ένα παράθυρο γραφικών με το πιο κάτω γράφημα:



Παρατηρούμε ότι η plot ενώνει τα 5 σημεία που ορίζουν τα x και y με συνεχείς γραμμές. Υπάρχουν φυσικά και άλλες επιλογές τις οποίες θα δούμε στη συνέχεια.

6.2.2 Χρήσιμες συναρτήσεις για γραφικά

Το γράφημα που πήραμε πιο πάνω είναι απλό αφού δεν έχει ετικέτες στους άξονες, τίτλο και λεζάντα. Όλα αυτά μπορούν να προστεθούν και να τροποποιηθούν είτε απευθείας με το μενού του παραθύρου γραφικών είτε με συναρτήσεις βιβλιοθήκης στο παράθυρο εντολών.

Εντολή	Περιγραφή	Παράδειγμα
Plot	Δημιουργεί το γράφημα του y συναρτήσει του x	<code>plot(x,y)</code>
title	Προσθήκη τίτλου	<code>title('Titlos')</code>

Xlabel	Προσθήκη ετικέτας στον οριζόντιο άξονα	xlabel('Xronos, t')
ylabel	Προσθήκη ετικέτας στον κατακόρυφο άξονα	ylabel('Taxuthta, cm/s')
Legend	Προσθήκη λεζάντας	legend('First', 'Second')
Text	Προσθήκη κειμένου στη θέση (xi,yi)	text(xi, yi, 'string')
Grid	Δημιουργία πλέγματος	Grid grid on grid off
Figure	Άνοιγμα άλλου παραθύρου γραφικών	figure(2)
Hold	Πάγωμα του τρέχοντος παραθύρου γραφικών για το σχεδιασμό και άλλων καμπυλών	hold on/hold off
Axis	Κλείδωμα/ξεκλείδωμα αξόνων Ίσες μονάδες αξόνων Διαγραφή αξόνων Όρια αξόνων	axis axis equal axis off axis([xmin, xmax,ymin,ymax])

6.2.3 Χρώματα, σύμβολα και γραμμές

Η εντολή plot παρέχει μια ευρεία επιλογή χρωμάτων, συμβόλων και τύπων γραμμών.

Ενώ η εντολή

```
>> plot(x,y)
```

μας δίνει γράφημα με μπλε συνεχή γραμμή, η εντολή

```
>> plot(x,y, '[color][style][ltype]')
```

μας επιτρέπει να επιλέξουμε το χρώμα του γραφήματος και τους τύπους συμβόλου και γραμμής.

Το χρώμα **[color]** ορίζεται με ένα από τα πιο κάτω γράμματα:

[color]	Color	Χρώμα
b	blue	μπλε
g	green	πράσινο
r	red	κόκκινο
c	cyan	κυανό
m	magenta	μοβ
y	yellow	κίτρινο
k	black	μαύρο
w	white	άσπρο

Για τον τύπο **[style]** του συμβόλου έχουμε τις εξής επιλογές:

[stype]	Symbol	Σύμβολο
.	point	τελεία
o	circle	κύκλος
x	x-mark	χι
+	plus	συν
*	star	αστερίσκος
s	square	τετράγωνο
d	diamond	ρόμβος
v	triangle (down)	κάτω τρίγωνο
^	triangle (up)	άνω τρίγωνο
<	triangle (left)	αριστερό τρίγωνο
>	triangle (right)	δεξιό τρίγωνο
p	pentagram	πεντάλφα
h	hexagram	εξάλφα

Για τον τύπο **[ltype]** της γραμμής έχουμε τις εξής επιλογές:

[ltype]	Line type	Τύπος γραμμής
-	solid	συνεχής
:	dotted	λεπτή διακεκομμένη
--	dashed	αδρή διακεκομμένη
-.	dashdot	διακεκομμένη-τελείες

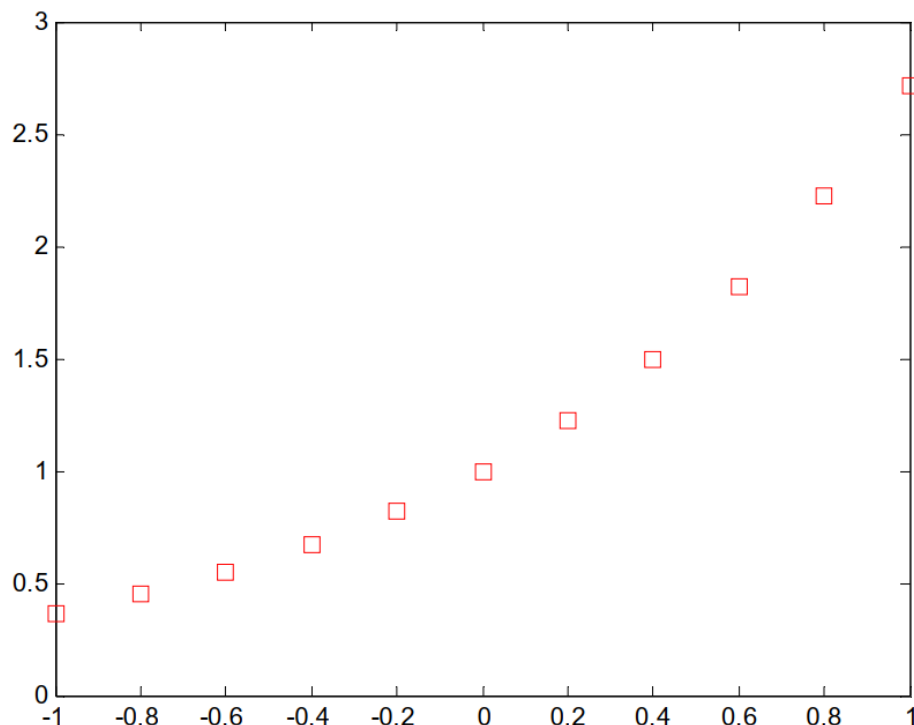
Οπότε για παράδειγμα αν ορίζαμε τα σημεία :

```
>> x = -1:0.2:1;
```

```
>> y=exp(x);
```

Η εντολή:

```
>> plot( x, y, 'rs')
```

6.4 Συνήθεις διαφορικές εξισώσεις και επίλυση τους στο MATLAB

6.4.1 Γενικά περί συνήθων διαφορικών εξισώσεων

Μια συνήθης διαφορική εξίσωση (ΣΔΕ) 1ης τάξης έχει τη μορφή

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y(t))$$

όπου $f(t, y)$ γνωστή και $y(t)$ άγνωστη συνάρτηση. Η πιο πάνω εξίσωση καλείται *διαφορική* γιατί περιέχει την παράγωγο μιας συνάρτησης. Καλείται *συνήθης* γιατί η παράγωγος είναι συνήθης (και όχι για μερική), και τέλος είναι 1ης τάξης γιατί περιλαμβάνει μόνο την 1η παράγωγο της άγνωστης συνάρτησης. Αν και μπορούμε να μιλήσουμε για ΣΔΕ 2ης, 3ης, ... τάξης, θα περιοριστούμε μόνο σε αυτές που είναι 1ης τάξης γιατί οι υπόλοιπες μπορούν να εκφραστούν σαν ένα *σύστημα* ΣΔΕ 1ης τάξης. Άρα είναι αρκετό να ξέρουμε πώς να λύνουμε συστήματα ΣΔΕ 1ης τάξης στη MATLAB.

Σημειώνουμε ότι στη ειδική περίπτωση που η συνάρτηση f εξαρτάται μόνο από το t , τότε έχουμε:

$$\frac{dy}{dt} = f(t) \Rightarrow y = \int f(t)dt + C$$

όπου C μια αυθαίρετη σταθερά, και έτσι παίρνουμε τη λύση αναλυτικά. (Για την ακρίβεια, παίρνουμε άπειρες λύσεις, μια για κάθε σταθερά.)

Αν εκτός από την διαφορική εξίσωση μας δοθεί και μια *αρχική συνθήκη*, π.χ. $y(t_0)=y_0$, με τα t_0 y_0 δοσμένα, τότε η λύση της Σ.Δ.Ε. είναι μοναδική, με την προϋπόθεση ότι η συνάρτηση $f(t, y)$ ικανοποιεί κάποιες συνθήκες ομαλότητας. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα *πρόβλημα αρχικών τιμών* (ΠΑΤ):

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

6.4.2 Η εντολή ode45

Η MATLAB διαθέτει αρκετές συναρτήσεις/εντολές βιβλιοθήκης για την επίλυση Π.Α.Τ., όπως οι **ode23**, **ode45**, **ode113**, **ode15s**, **ode23s**, **ode23t**, **ode23tb**, **ode45**. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εντολή ode45 η οποία λύνει το Π.Α.Τ

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Και έχει την εξής δομή: **[t_out,y_out] = ode45(odefun, t_span, y0)**

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου έχουν ως εξής:

- **odefun**: η συνάρτηση $f(t, y)$ (σαν m-file ή ανώνυμη συνάρτηση)
- **t_span**: το διάστημα $[t_0, T]$ όπου ανήκει το t – αυτό πρέπει να δοθεί με αγκύλες
- **y0**: η αρχική τιμή $y_0 (= y(t_0))$
- **t_out**: το διάστημα με τα σημεία t_0, t_1, t_2, \dots
- **y_out**: το διάστημα με τις προσεγγιστικές τιμές y_0, y_1, y_2 της λύσης

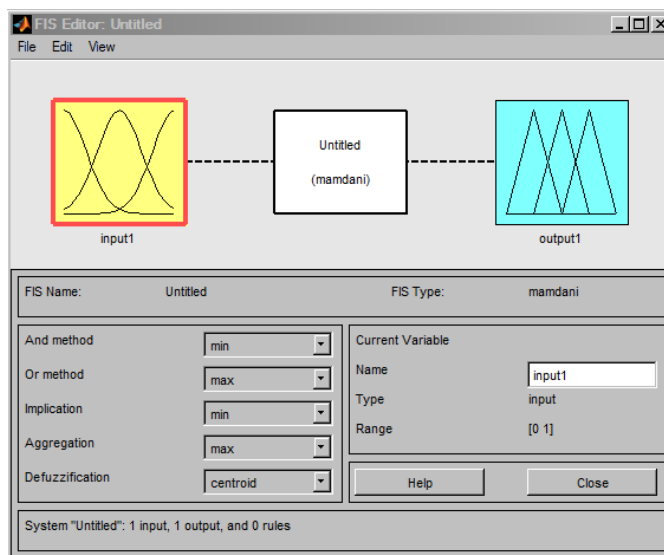
6.5 Fuzzy Logic Toolbox Matlab

Για την υλοποίηση του ευφυούς ελεγκτή που θα ελέγχει το σύστημα χρησιμοποιήθηκε το fuzzy logic toolbox που είναι εργαλείο του Matlab.

Το Fuzzy Logic Toolbox είναι μια συλλογή λειτουργιών που βασίζονται στο MATLAB. Παρέχει εργαλεία για τη δημιουργία και την επεξεργασία ασαφών συστημάτων συμπερασμάτων στο πλαίσιο του MATLAB, μπορεί να ενσωματώσει τα ασαφή συστήματα στο Simulink®. Η εργαλειοθήκη παρέχει τρεις κατηγορίες εργαλείων:

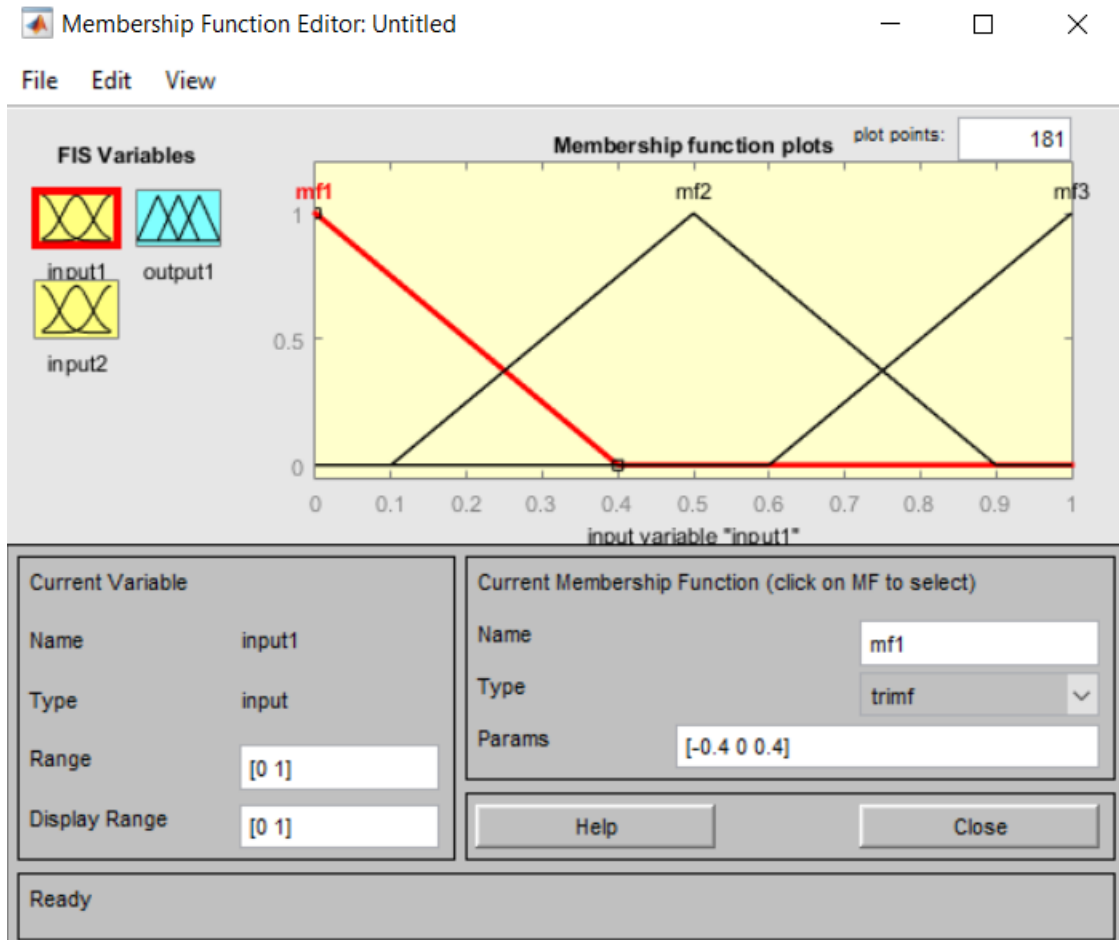
- Λειτουργίες γραμμής εντολών
- Γραφικά, διαδραστικά εργαλεία
- Μπλοκ Simulink και παραδείγματα

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την αρχική οθόνη που εμφανίζεται πατώντας fuzzy στο command window του matlab.



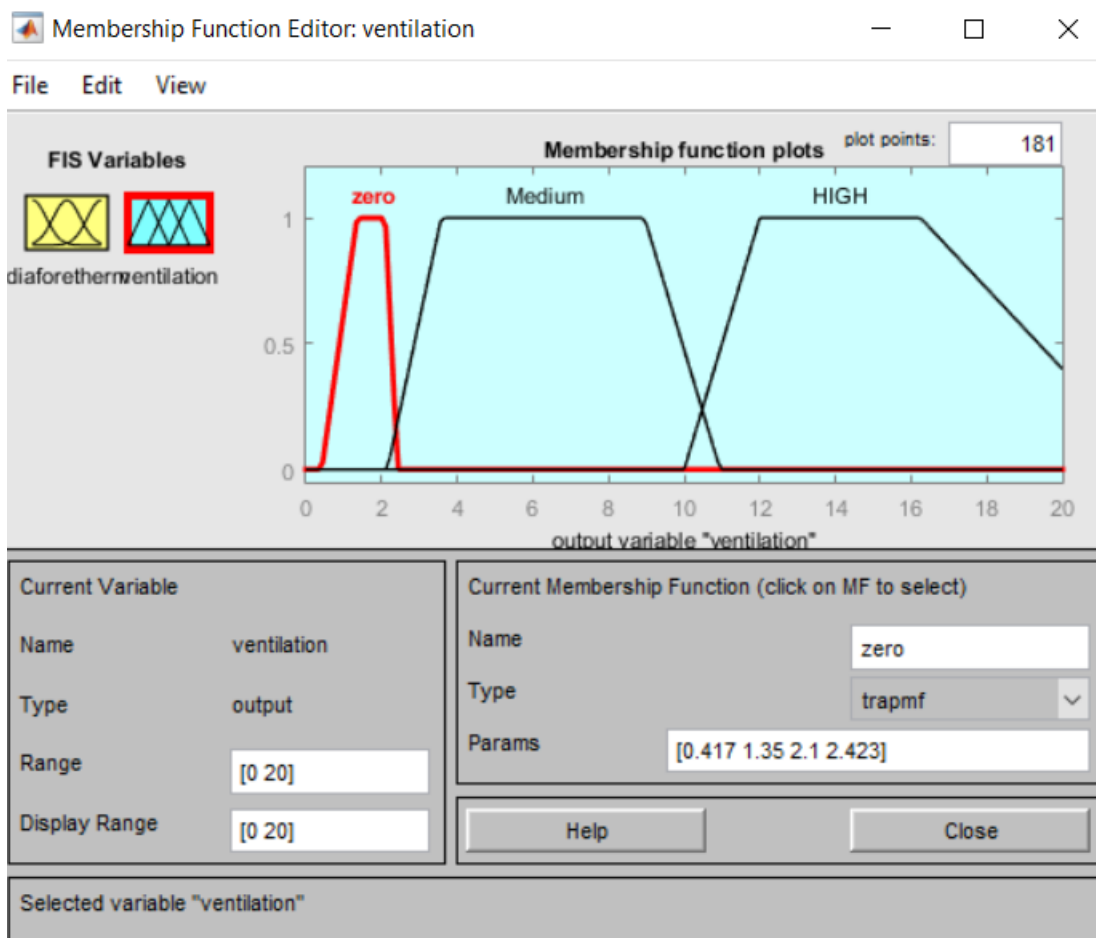
Fuzzy inference system editor

Σε αυτή την οθόνη ο χρήστης μπορεί να ορίσει είσοδο στο σύστημα στη δική μας περίπτωση την εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία του χώρου καθώς και να ορίσει διαστήματα αλήθειας για την είσοδο πχ πολύ χαμηλή ή χαμηλή υψηλή κ.ο.κ.



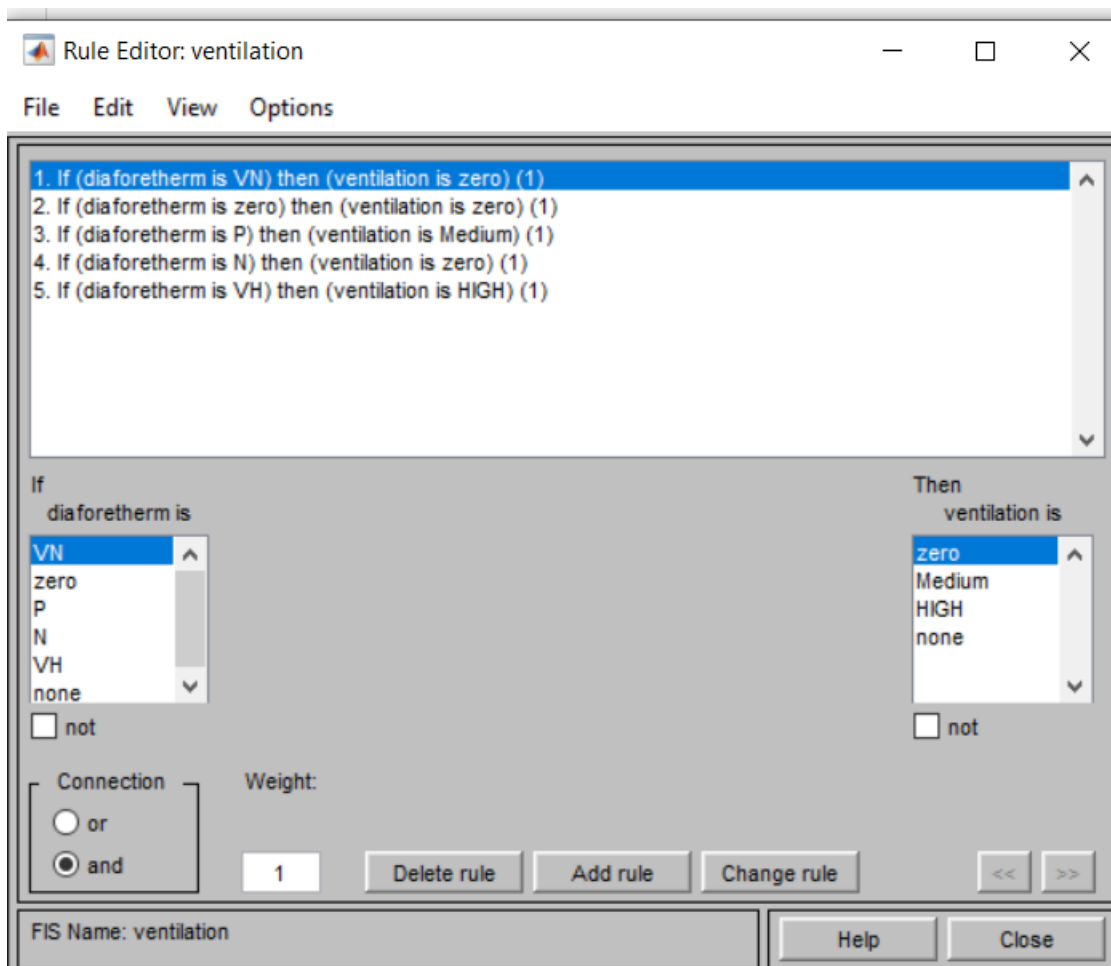
Ορισμός τύπου εισόδου και ποσοστού αλήθειας λεκτικής μεταβλητής

Εφόσον οριστούν οι είσοδοι στο σύστημα το επόμενο βήμα είναι να οριστούν οι έξοδοι του συστήματος συμπερασμών το οποίο επιτυγχάνεται πατώντας την εικόνα με επιγραφή output1



Ορισμός τύπου εξόδου και τιμής αυτής με βάση το μηχανισμό συμπερασμών.

Αφού δημιουργηθούν οι είσοδοι και οι εξοδοι του συστήματος. Δημιουργείται μία βάση λεκτικών κανόνων με βάση την οποία οι είσοδοι και οι συναρτήσεις συμμετοχής τους μεταφράζονται στην έξοδο του συστήματος.



Λεκτικοί κανόνες

Έτσι αν για παράδειγμα ορίσουμε σαν είσοδο του συστήματος τη διαφορά θερμοκρασίας σε ένα χώρο και σαν λεκτικές μεταβλητές ορίσουμε την πολύ αρνητική, αρνητική, μηδενική, θετική και πολύ θετική διαφορά θερμοκρασίας, μπορούμε να ορίσουμε κανόνες όπως αν η διαφορά θερμοκρασίας είναι πολύ χαμηλή τότε ενεργοποίησε την θέρμανση στην πολύ υψηλή θερμοκρασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

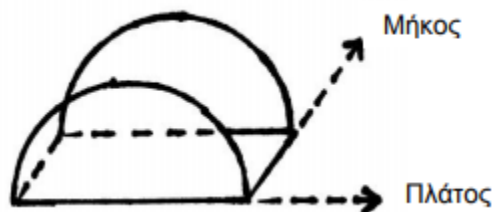
7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου. Αρχικά, υποθέτουμε ένα θερμοκήπιο το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του πανεπιστημίου πατρών . Λόγω του περιορισμού μεγάλου όγκου δεδομένων ο έλεγχος του κλίματος θα πραγματοποιηθεί καθ' όλη τη διάρκεια μίας τυχαίας ημέρας (23 Νοέμβρη) με τα κλιματικά δεδομένα να λαμβάνονται από τον μετεωρολογικό σταθμό της Πάτρας ενώ η ένταση της ηλιοφάνειας μετράται από τον ακτινομετρικό σταθμό που βρίσκεται στη σχολή Φυσικού του πανεπιστημίου Πάτρας. Οποτε αφού ληφθούν τα κλιματικά δεδομένα για την ημέρα αυτή εισαγάγονται στο προγραμματιστικό περιβάλλον του matlab σε μορφή πινάκων . Στη συνέχεια ορίζεται η διαφορική εξίσωση η οποία περιγράφει το εσωτερικό κλίμα σε ένα θερμοκήπιο . Για τον έλεγχο του κλίματος υποθέτουμε ότι το θερμοκήπιο έχει ένα θερμαντικό σώμα αέρα και ένα νεφελοποιητή για την παροχή υγρασίας. Οι συσκευές αυτές ελέγχονται μέσω των δύο ευφών ελεγκτών που δημιουργήθηκαν –ένας για την υγρασία και ένας για την θερμοκρασία- έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας και υγρασίας για την ανάπτυξη του φυτού.

7.2 Στοιχεία του θερμοκηπίου

Το προσομοιωμένο θερμοκήπιο θεωρείται ότι είναι ένα απλό τοξωτό θερμοκήπιο μέγιστου ύψους τριών μέτρων με ανοίγματα στο πλάι για εξαερισμό καθώς και ένα άνοιγμα μπροστά για είσοδο. Είναι μήκους 40 μέτρων και πλάτους έξι μέτρων. Συνεπώς το εμβαδό του S είναι ίσο με $S = L * W = 240 \text{ m}^2$ ενώ ο όγκος του V δίνεται από τη σχέση:

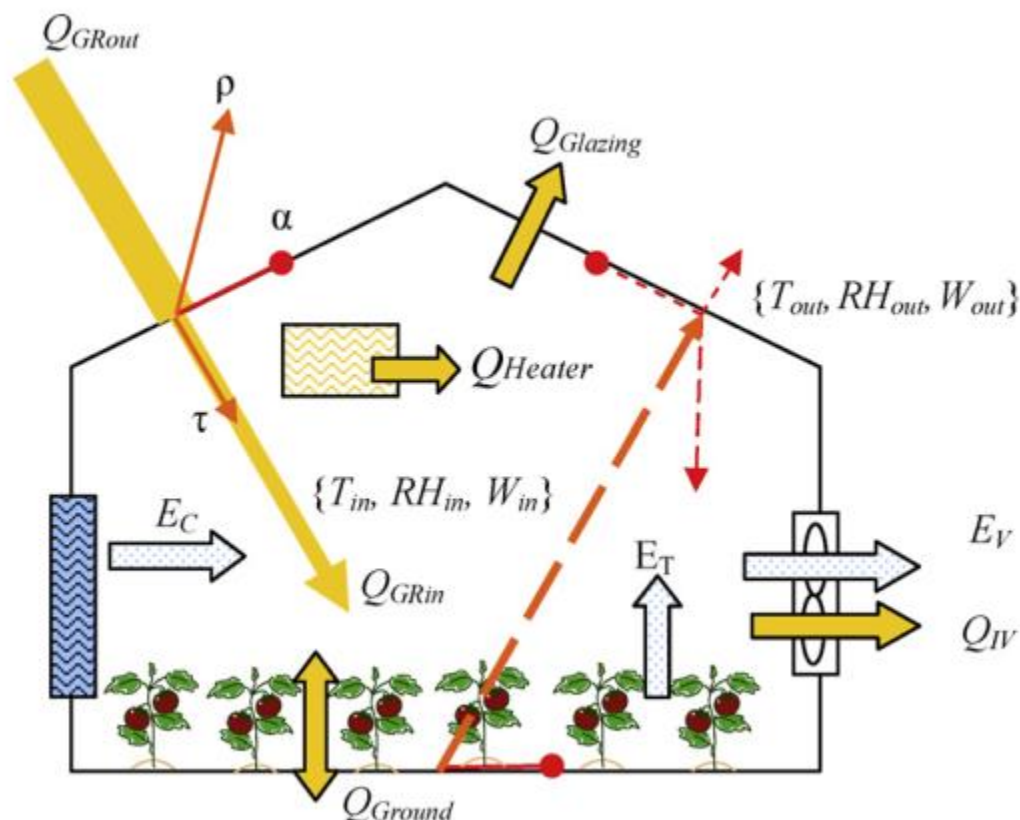
$$V = 0.5 * \frac{\pi * W^2 * L}{4} = 565.49 \text{ m}^3$$



Εικόνα 7.1: Τοξωτό Θερμοκήπιο

7.3 Εξίσωση περιγραφής κλίματος θερμοκηπίου

Όπως αναδειχθηκε και στο κεφάλαιο 4 υπάρχουν πολλές διαφορετικές εξισώσεις που μπορούν να περιγράψουν το κλίμα ενός θερμοκηπίου είτε όσον αφορά τη θερμοκρασία είτε την υγρασία. Ο von zabeltitz (1999) περιέγραψε την ενεργειακή ισορροπία σε ένα θερμοκήπιο σαν μία εξίσωση μεταξύ τεσσάρων αλληλεπιδρώντων στοιχείων (θερμοκρασία αέρα, φυτά, θερμοκρασία δάπεδου και θερμοκρασία οροφής)



Εικόνα 7.2: Ισορροπία ενέργειας και υγρασίας σε ένα θερμοκήπιο αλληλεπιδρώντα στοιχεία

7.3.1 περιγραφή στοιχείων θερμικής εξίσωσης θερμοκηπίου

Μία απλοποιημένη εξίσωση ισορροπίας ενεργειών που περιγράφει το κλίμα σε ένα θερμοκήπιο μπορεί να περιγραφεί βάσει των παγκοσμίων πρότυπων (ASAE 2003) ως:

$$Q_{Grin} + Q_{Heater} = Q_{IV} + Q_{Glazing} \quad (7.1)$$

Όπου Q_{Grin} ($W \cdot m^{-2}$) είναι η ακτινοβολία που απορροφάται από το θερμοκήπιο, Q_{Heater} ($W \cdot m^{-2}$) είναι η θερμική ενέργεια που παρέχεται από το θερμαντικό σύστημα, Q_{IV} ($W \cdot m^{-2}$) είναι η ενέργεια που ανταλλάσσεται μέσω του εξαερισμού και της διήθησης του αέρα. Τέλος, $Q_{Glazing}$ λογίζεται ως η απώλεια θερμότητας από την οροφή. Στην παρούσα εργασία υποθέτουμε ότι η

ενέργεια που παρέχεται από τα φυτά και χάνεται από την κτηριακή δομή είναι αδιάφορη καθώς είναι δύο μεγέθη της ίδιας τάξης μεγέθους και ακυρώνουν το ένα το άλλο.

Η ενέργεια από την ακτινοβολία Q_{Grin} υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{Grin} = \tau_c * (1 - p_g) * Q_{Grount} \quad (7.2)$$

Όπου τ_c είναι η διαπερατότητα ηλιακής ακτινοβολία του υλικού κατασκευής του θερμοκηπίου (αδιάστατο μέγεθος), p_g είναι η ικανότητα αντανάκλασης του εδάφους (αδιάστατο μέγεθος) και Q_{Grount} είναι η εξωτερική ακτινοβολία ($W \cdot m^{-2}$).

Οι απώλειες λόγω του εξαερισμού και της φίλτρανσης του αέρα υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης:

$$Q_{IV} = L * E + q_v * C_p * \rho * (T_{in} - T_{out}) \quad (7.3)$$

Τα δύο στοιχεία στο δεξί μέρος της εξίσωσης ορίζουν τις απώλειες λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας αντίστοιχα, όπου $L(J \cdot KG^{-1})$ είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του νερού E είναι ο λόγος εξατμισοδιαπνοής μέσα στο θερμοκήπιο ($KG \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), q_v είναι ο λόγος εξαερισμού ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), C_p είναι η ειδική θερμότητα του υγρού αέρα ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), ρ είναι το ειδικό βάρος του αέρα ($kg_{dryair} \cdot m^{-3}$) και ο όρος $(T_{in} - T_{out})$ περιγράφει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου και του περιβάλλοντα χώρου.

Η ροή θερμότητας μέσω των υλικών δόμησης του θερμοκηπίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{Glazing} = k * w * (T_{in} - T_{out}) \quad (7.4)$$

Όπου k είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$) και w είναι ο λόγος ανάμεσα στις επιφάνειες δόμησης και την επιφάνεια του εδάφους.

Η προσφορά θερμότητας του αερόθερμου υπολογίζεται από την ποσότητα θερμαντικών σωμάτων και την ικανότητα τους για παροχή θερμου αέρα και εκφράζεται σε σχέση με την επιφάνεια εδάφους του θερμοκηπίου με βάση τη σχέση:

$$Q_{Heater} = N_H * (H_{cap} / A_H) \quad (7.5)$$

Με N_H να είναι ο αριθμός των θερμαντικών σωμάτων A_H η επιφάνεια εδάφους του θερμοκηπίου και H_{cap} η ικανότητα τροφοδοσίας ζεστού αέρα του θερμαντικού σώματος.

7.3.2 Περιγραφή στοιχείων εξίσωσης υγρασίας θερμοκηπίου

Για την ισορροπία μάζας του αέρα (υγρασία) μέσα στο θερμοκήπιο υποθέτουμε ότι δεν πραγματοποιείται συμπήκνωση στην εσωτερική επιφάνεια του καλλύματος του θερμοκηπίου καθώς επίσης και ότι δεν υπάρχει εξατμίσηση στην επιφάνεια του εδάφους. Μόνες πηγές νερού στο ενάεριο περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι το σύστημα νεφελοποίησης (EC) και η διαπνοή από τα φυτά (ET). Η μόνη απώλεια νερού από το σύστημα ωφείλεται στον εξαερισμό (EV). Οπότε η εξίσωση ισορροπίας της υγρασίας στο θερμοκήπιο γίνεται :

$$E_c + E_T = E_V \quad (7.6)$$

Θεωρώντας τις δύο πηγές νερού σαν ένα στοιχείο ($E = E_c + E_V$) και εκφράζοντας το περιεχόμενο νερού στον αέρα του θερμοκηπίου σαν απόλυτη υγρασία ($g_{\text{water}} \text{kg}^{-1} \text{dryair}$) τότε η προκύπτουσα εξίσωση υγρασίας θερμοκηπίου γίνεται:

$$W_{\text{in}} * q_v * \rho = W_{\text{out}} * q_v * \rho + E \quad (7.7)$$

Όπου W_{in} και W_{out} είναι η απόλυτη υγρασία του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο αντίστοιχα και E ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$) είναι ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής (σύνολο από τα φυτά και το σύστημα ύγρανσης) μέσα στο θερμοκήπιο. Υπάρχουν πολλά μοντέλα εξατμισοδιαπνοής με κάποια από αυτά να χρησιμοποιούν τη θερμοκρασία στα φύλλα του φυτού και την ταχύτητα του ανέμου όμως όπως αναφέρει και ο Jolliet (1999) ο κύριος παράγοντας αναπνοής των φυτών μέσα σε ένα θερμοκήπιο ήταν η εσωτερική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.

7.3.3 Διαφορικές εξισώσεις κλίματος θερμοκηπίου

Αφού δημιουργήθηκαν οι εξισώσεις ισορροπίας θερμότητας και υγρασίας το επόμενο βήμα για να εφαρμοστεί ο έλεγχος του κλίματος είναι να ελεγχθεί ο ρυθμός μεταβολής των δύο αυτών μεγεθών ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία.

Συνεπώς η συμπεριφορά του συστήματος του κλίματος ενός θερμοκηπίου μπορεί να περιγραφεί με την εξής σειρά από διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης:

$$\frac{dT_{\text{in}}}{dt} = \left(\frac{1}{C_p * \rho * H} \right) * (Q_{GRin} + Q_{Heater} - (L * E) - (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})) * (q_v * C_p * p + (w * k)) \quad (7.8)$$

Συνεπώς δημιουργήσαμε μία διαφορική εξίσωση η επίλυση της οποίας δίνει την εσωτερική θερμοκρασία κάθε στιγμή στο θερμοκήπιο στην οποία εισάγαμε και το θερμαντικό σώμα που θα πραγματοποιήσει τον έλεγχο της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την απόλυτη υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δίνεται από την σχέση :

$$\frac{dW_{in}}{dt} = \frac{1}{H \cdot p} * (E - (W_{in} - W_{out}) * qv * p)(7.9)$$

Όπου C_p είναι η ειδική θερμότητα του αέρα ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) και H είναι το μέσο ύψος του θερμοκηπίου.

Για την εύρεση των απωλειών ενέργειας λόγω εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Hargreaves

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} (0.0023)(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a(7.10)$$

Όπου λ : Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($MJ \text{ kg}^{-1}$) R_a : Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) T_{max} : Μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$) T_{min} : Ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$) T_{mean} : Μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$).

7.4 Προσομοίωση και έλεγχος κλίματος θερμοκηπίου στο matlab

Αφού ερευνηθήκαν οι διαφορετικές εξισώσεις που περιγράφουν το κλίμα του θερμοκηπίου το επόμενο βήμα ήταν να δημιουργηθεί η προσομοίωση του θερμοκηπίου στο προγραμματιστικό περιβάλλον του matlab. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο έλεγχος του κλίματος του θερμοκηπίου προσομοιώθηκε για 24 ώρες, τα στοιχεία θερμοκρασίας και υγρασίας ελήφθησαν από την ΕΜΥ και ήταν ανά ώρα. Για τον λόγο αυτό και για να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια ο έλεγχος δημιουργήθηκαν στοιχεία τα οποία ακολουθούσαν την καμπύλη θερμοκρασίας και υγρασίας ώστε να υπάρχουν 300 δείγματα θερμοκρασίας υγρασίας έντασης ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου και να ελέγχεται το σύστημα ανα πέντε λεπτά πραγματικού χρόνου. Θεωρείται ότι το δείγμα είναι ικανοποιητικό καθώς οι αλλαγές στις καιρικές συνθήκες δεν είναι ακαριαίες και συνεπώς δεν θα επιφέρουν κάποια ανακρίβεια στον έλεγχο του συστήματος.

7.4.1 Εισαγωγή στοιχείων θερμοκηπίου και κλίματος στο matlab για τον έλεγχο της θερμοκρασίας

Στη συνέχεια στο matlab εισήχθησαν τα στοιχεία του θερμοκηπίου καθώς και οι πίνακες με τα κλιματικά δεδομένα με σκοπό την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης θερμοκρασίας και υγρασίας του θερμοκηπίου.

```
qv=[];  
output=[];  
tep=24;  
L=6;  
W=40;  
H=3;  
V=565.49;  
taxythtaaera = importdata('taxythta aera.txt');  
exwterikh=importdata('metablhtes.txt');  
ilios=importdata('hlios.txt');  
S=L*W;  
Vw=taxythtaaera*0.277777777777778;  
Tac=15; %8ermokrasia se kelsioy|  
Ta=exwterikh;  
Ta(265)=[];  
Ta(143)=[];  
Ta(53)=[];  
Pa=1.137; %air density inside  
Ca=1005; %specific heat of air  
sta=Pa*Ca*V;  
ac=0.1; %cover absorbtivity  
tc=0.85; %cover transmittance  
I=ilios; % pinakas olikh iliakh aktinobolia w/m^2  
Sc=H*W;  
Tsky= 0.0552.*(Ta.^1.5);  
Tskyc=Tsky-300;  
R=0.75; %air changes per hour APO FUSIKO AERISMO  
Qshort=ac*tc*S*I;  
stat=Qshort/sta;
```

Εικόνα 7.3:Εισαγωγή χαρακτηριστικων του θερμοκηπίου και στοιχεία κλίματος

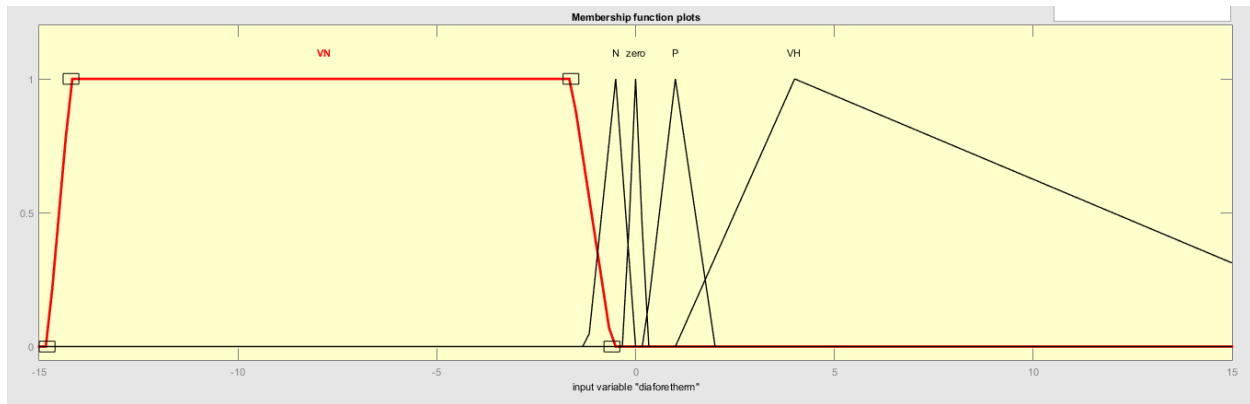
Αφού τα στοιχεία κλίματος εισήχθησαν σε μορφή πίνακα ενώ μεταφέρθηκαν και τα χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου υπολογίστηκαν οι παράμετροι της διαφορικής εξίσωσης 7.8 με αρχικές συνθήκες εσωτερικής θερμοκρασίας 12 βαθμούς κελσίου και σαν χρόνο το 0.

```
function dT= funcODE3(t,T,tspan,ET0,Ta,Qgrout)
tep=24.2;%επι8umhth 8ermokrasia
Tout=interp1(tspan,Ta,t);
Qgrout=interp1(tspan,Qgrout,t);
H=2.1;%meso upsos
Pa=1.137;%air density inside
Ca=1005;%specific heat of air
%Qheat=32000;
%kc=0.15;%w*m-2*c-l*s-l
kc=56.9;
w=240/405.27;
L=2264705;%latent heat of vaporization of water (L*ETO j/s/m^2=w/m^2
%qv=2;
ETO=interp1(tspan,ET0,t);
input=T-tep;
fis=readfis('kalorifer');
output=evalfis(input,fis);
fis2=readfis('ventilation');
qv=evalfis(input,fis2);
%if input<0
    %qv=1.35;
%end
dT=(1./ (Ca.*Pa.*H)) .* (Qgrout+output- (L.*ETO)- ((T-Tout) .* (qv.*Ca.*Pa+(w.*kc))));
```

Εικόνα 7.4:Διαφορική εξίσωση εσωτερικής θερμοκρασίας θερμοκηπίου

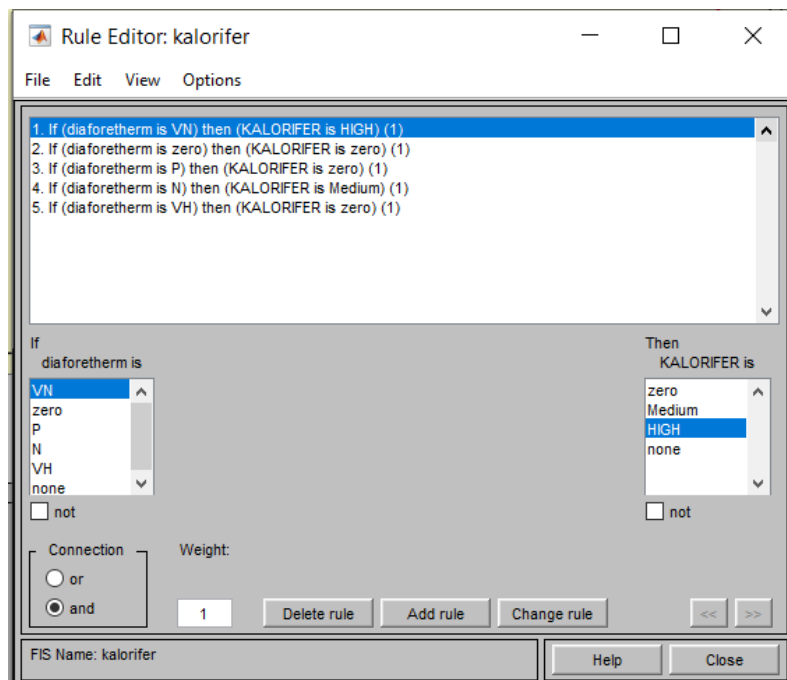
7.4.2 Ευφυής ελεγκτής θερμοκρασίας θερμοκηπίου

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου που ορίστηκε στους 24 βαθμούς κελσίου χρησιμοποιήθηκε ένα υποθετικό αερόθερμο του οποίου η έξοδος σε ελέγχεται από έναν ευφυή ελεγκτή. Σαν είσοδο στον ευφυή ελεγκτή ορίστηκε η διαφορά της εσωτερικής θερμοκρασίας του θερμοκηπίου από την επιθυμητή και σαν έξοδος η θερμότητα που θα εξάγει το αερόθερμο.



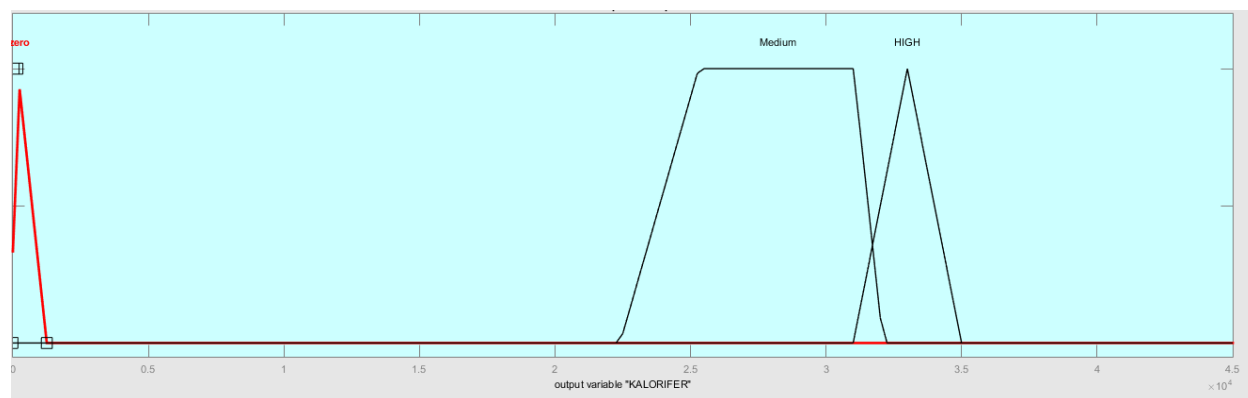
Εικόνα 7.5:Συνάρτηση συμμετοχής διαφοράς θερμοκρασίας

Ορίζουμε 5 πιθανές καταστάσεις της διαφοράς θερμοκρασίας από την επιθυμητή. Η πρώτη είναι η διαφορά να είναι πολύ μεγάλη και αρνητική, η δεύτερη να είναι απλά αρνητική, η Τρίτη να είναι μηδενική, η τέταρτη να είναι θετική και η Πέμπτη να είναι πολύ θετική η διαφορά.



Εικόνα 7.6:Λεκτικοί κανόνες ευφρούς ελεγκτή θερμότητα

Οι λεκτικοί κανόνες που ορίστηκαν έχουν σκοπό όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι θετική ή πολύ θετική να είναι απενεργοποιημένη η θέρμανση. Όταν η διαφορά είναι μηδενική η θέρμανσή είναι σε μία ελάχιστη ποσότητα θέρμανσης ώστε να διατηρηθεί σταθερή. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι αρνητική τότε η έξοδος της θέρμανσης είναι στη μεσαία κλίμακα ενώ όταν η διαφορά είναι πολύ μεγάλη και αρνητική η έξοδος της θέρμανσης είναι στη μέγιστη τιμή της.



Εικόνα 7.6: Έξοδος ευφρούς ελεγκτή θερμότητας

7.4.3 Εισαγωγή στοιχείων θερμοκηπίου και κλίματος στο matlab για τον έλεγχο της υγρασίας
Για τον έλεγχο της υγρασίας του θερμοκηπίου εισάγεται σαν δεδομένο το αποτέλεσμα του ελέγχου της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου δηλαδή η τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι η τιμή της λύσης της διαφορικής εξίσωσης που προέκυψε από τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια εισήχθησαν τα υπόλοιπα αναγκάια στοιχεία από πίνακες και επιλύθηκε η διαφορική εξίσωση με επιθυμητή σχετική υγρασία 75-80%. Σαν αρχική τιμή υγρασίας ορίστηκε το 65% και σαν αρχική χρονική στιγμή το 0.

```
optH=77.5;
format longG
taxythtaaera = importdata('taxythta aera.txt');
humidity=importdata('hygrasia.txt');
exwterikh=importdata('metablhtes.txt');
[C]=load('eswterikhtherm.mat','x');
XA= struct2cell(C);
Tin= cell2mat(XA);
Vw=taxythtaaera*0.277777777777778;
l=2.256 ;%Mj/kg
t0=0;
tend=35640;
n=300;
Wst=0.010;
tspan=linspace(t0,tend,n);
abshygrout=(6.112.*2.71828.^(17.67.*exwterikh)./(exwterikh +243.5)).*humidity.*2.1674)./(273.15 +exwterikh);%gram/m3
abshygrout=abshygrout./1230;%kggram/kgair
P=98.1;
e=2.71727;
psat=0.61.*(1+1.414.*sind(5.82.*(e^-3).*exwterikh)).^8.827;
%abshygrout=((humidity.*0.611.*psat.*exwterikh)./(100.*P));%kggh2o/kgair
extraterrestrial=193.61*11.574./(24*3600); %mm/s
tmax=22.597-8.272*sind((360/365*318)+59.155);
tmin=12.094-6.676*sind((360/365*318)+60.196);
ETO=((1./1).*0.0023.*extraterrestrial.*(exwterikh+17.8).*(tmax-tmin).^1/2);%kg*m^-2*s-1
%options=odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-8);
[tsol,Hsol]=ode15s(@ (t,Win) funcODE2(t,Win,tspan,Vw,abshygrout,ETO),tspan,Wst);
```

Εικόνα 7.7: Εισαγωγή χαρακτηριστικών του θερμοκηπίου και στοιχεία κλίματος για τον έλεγχο της υγρασίας

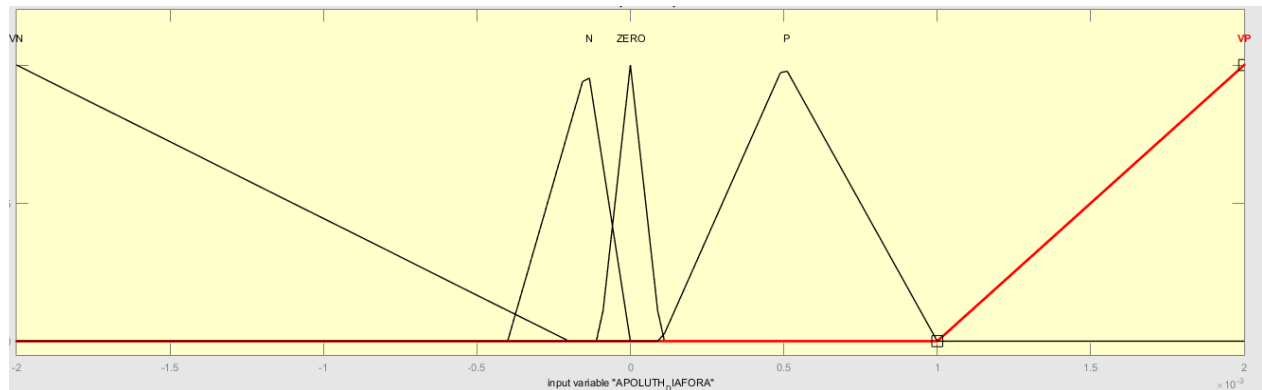
```
function dW= funcODE2(t,Win,tspan,abshygrout,ETO)
Wep=0.0119;
Wout=interp1(tspan,abshygrout,t);
%Vaera=interp1(tspan,Vw,t);
ETO=interp1(tspan,ETO,t);
%W=40;
H=3;
%Sc=H*W;
Pa=1.25; %air density inside
%Gv=10;
input=Win-Wep;
fis2=readfis('ygransh2');
output2=evalfis(input,fis2);
fis=readfis('ygros');
qv=evalfis(input,fis);

dW=(ETO-((Win-Wout).*(qv.*Pa))./(H*Pa)+output2;
```

Εικόνα 7.8: Διαφορική εξίσωση εσωτερικής υγρασίας θερμοκηπίου

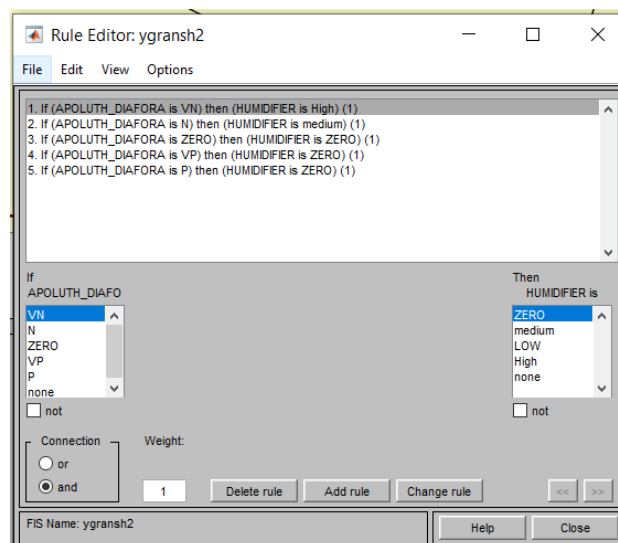
7.4.4 Ευφυής ελεγκτής θερμοκρασίας υγρασίας

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή εσωτερική υγρασία του θερμοκηπίου που ορίστηκε στο 77% χρησιμοποιήθηκε ένα υποθετικός νεφελοποιητής του οποίου η έξοδος σε ελέγχεται από έναν ευφυή ελεγκτή. Σαν είσοδο στον ευφυή ελεγκτή ορίστηκε η διαφορά της εσωτερικής υγρασίας του θερμοκηπίου από την επιθυμητή και σαν έξοδος η ποσότητα υγρασίας από τον νεφελοποιητή. Εφόσον η υγρασία είναι πέραν του επιθυμητού ορίου χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες εξαερισμού ώστε η υγρασία να φτάσει σε αντιστοιχία με την εξωτερική



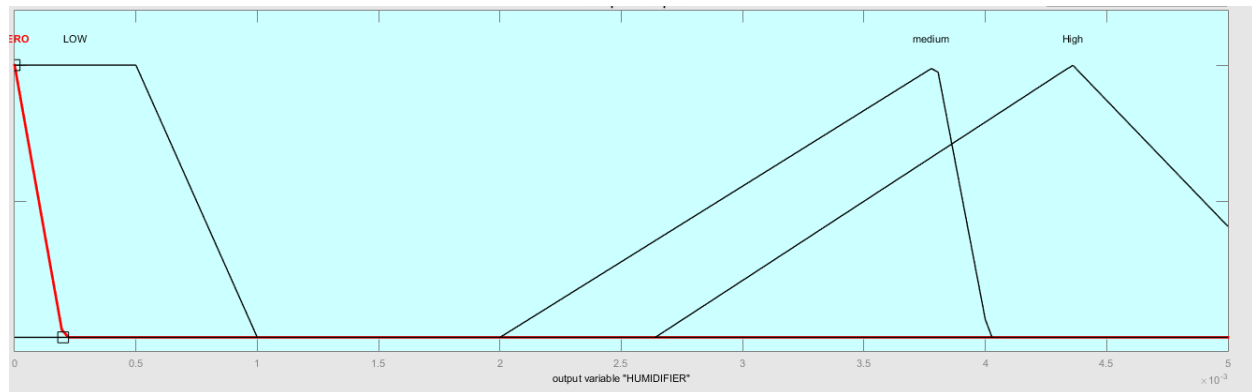
Εικόνα 7.9: Συνάρτηση συμμετοχής διαφοράς υγρασίας

Ορίζουμε 5 πιθανές καταστάσεις της διαφοράς υγρασίας από την επιθυμητή. Η πρώτη είναι η διαφορά να είναι πολύ μεγάλη και αρνητική, η δεύτερη να είναι απλά αρνητική, η Τρίτη να είναι μηδενική, η τέταρτη να είναι θετική και η Πέμπτη να είναι πολύ θετική η διαφορά.

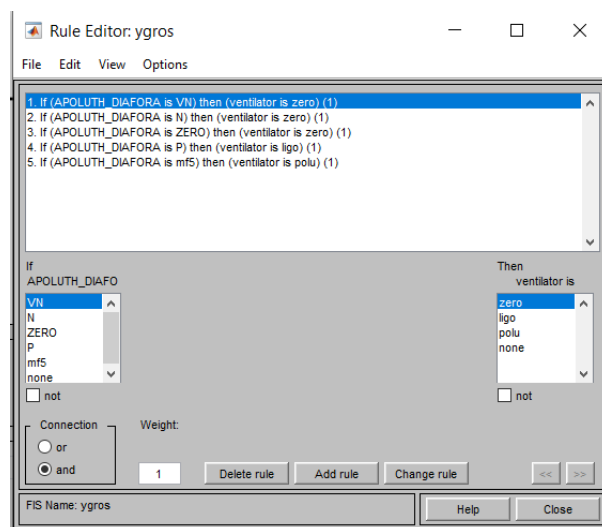


Εικόνα 7.10: Λεκτικοί κανόνες ευφυούς ελεγκτή υγρασίας

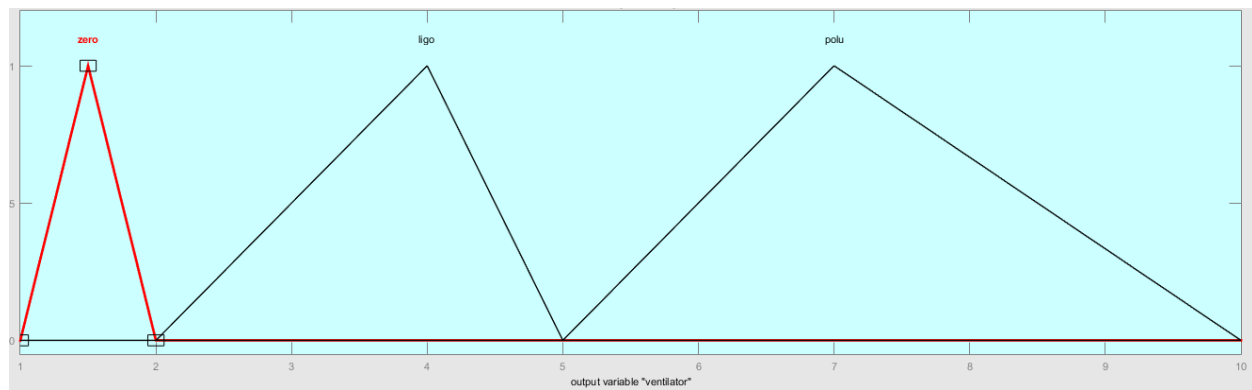
Οι λεκτικοί κανόνες που ορίστηκαν έχουν σκοπό όταν η διαφορά υγρασίας είναι θετική ή πολύ θετική να είναι απενεργοποιημένος ο νεφελοποιητής και ενεργοποιημένος ο εξαερισμός στη μέγιστη τιμή του. Όταν η διαφορά είναι μηδενική ο νεφελοποιητής και ο εξαερισμός είναι σε μία ελάχιστη ποσότητα ύγρανσης ώστε να διατηρηθεί σταθερή. Όταν η διαφορά υγρασίας είναι αρνητική τότε η έξοδος του νεφελοποιητή είναι στη μεσαία κλίμακα ενώ όταν η διαφορά είναι πολύ μεγάλη και αρνητική η έξοδος είναι στη μέγιστη τιμή της, ενώ και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις ο εξαερισμός είναι απενεργοποιημένος.



Εικόνα 7.11: Έξοδος ευφρούς ελεγκτή υγρασίας



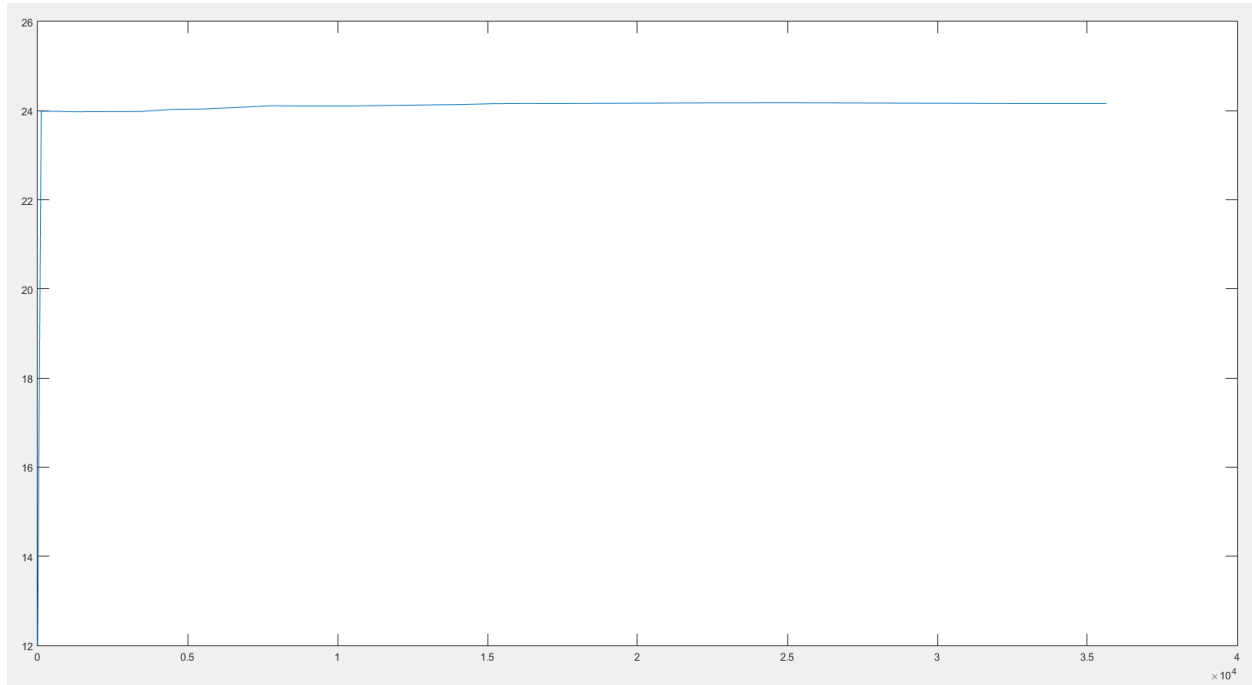
Εικόνα 7.12: Λεκτικοί κανόνες ευφρούς ελεγκτή εξαερισμού



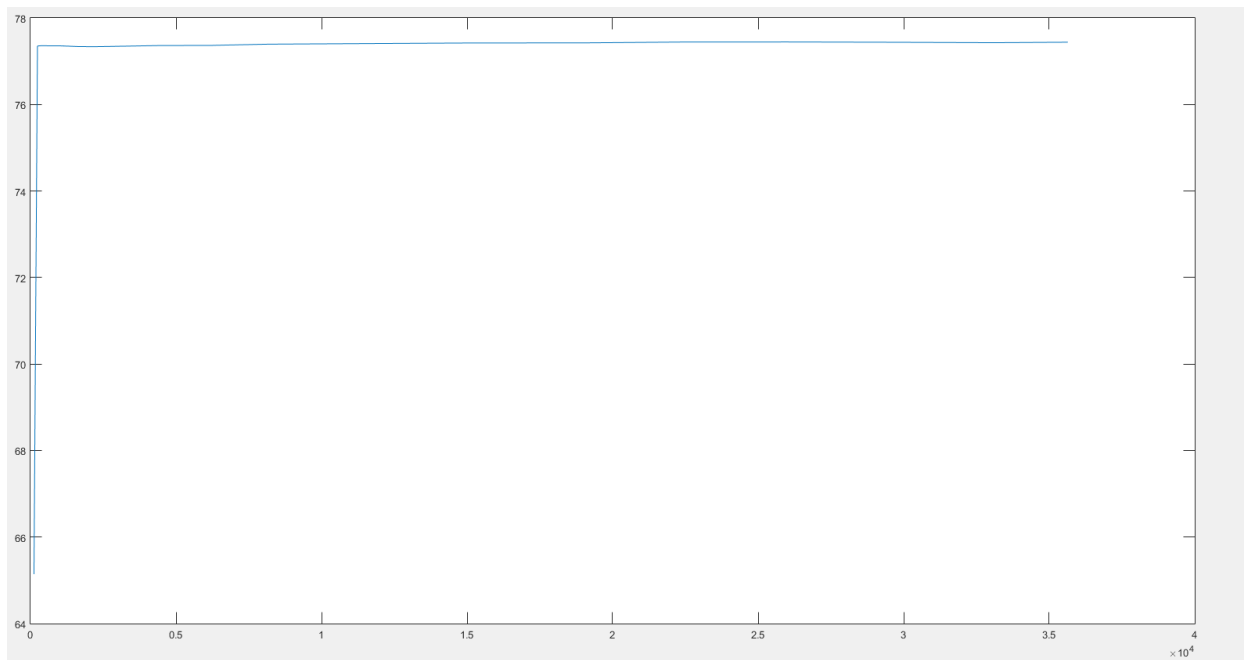
Εικόνα 7.12: Έξοδος ευφρούς ελεγκτή εξαερισμού

7.5 Αποτελέσματα ελέγχου κλίματος

Εκτελώντας τον έλεγχο θερμοκρασίας και υγρασίας παρατηρείται ότι το σύστημα γρήγορα εξισοροπείται στην επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας και υγρασίας και παραμένει στις επιθυμητές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 7.13: Εσωτερική θερμοκρασία θερμοκηπίου



Εικόνα 7.14: Εσωτερική υγρασία θερμοκηπίου

7.6 Συμπεράσματα – Σχόλια

Η εργασία αυτή αναφέρθηκε εκτονώς στον έλεγχο των δύο βασικότερων παραμέτρων ενός θερμοκηπιού δηλαδή την θερμοκρασία και την υγρασία. Τα θερμοκήπια αποτελούν καίριο μέσο της γεωργικής παραγωγής εδώ και αρκετά χρόνια, όμως με την εξέλιξη της τεχνολογίας του αυτομάτου έλεγχου και του IoT άρχισαν να εκσυγχρονίζονται και να αυτοματοποιούνται πλήρως ώστε να επιτυγχάνουν υψηλότερη απόδοση με μικρότερο κόστος τόσο σε ανθρώπινες ώρες όσο και σε οικονομικές μονάδες.

Το θερμοκήπιο είναι ένα σύνθετο σύστημα με πολλούς αστάθμητους παράγοντες που καθιστούν δύσκολη τη μοντελοποίηση του . Ο ευφυής και ο προσαρμοστικός έλεγχος είναι δύο απ τις καλύτερες λύσεις για τον έλεγχο αντιστοίχων συστημάτων.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία προσπαθήθηκε να χρησιμοποιηθεί ο ευφυής έλεγχος σε μία απλοποιημένη μορφή συστήματος ενός θερμοκηπιού με στόχο την βέλτιστη θερμοκρασία και υγρασία σε αυτό για την ανάπτυξη της τομάτας..

Δημιουργήθηκαν τρεις ευφυείς ελεγκτές ένας για την θέρμανση ένας για τον εξαερισμό και ένας για την ύγρανση της ατμόσφαιρας . Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο έλεγχος κατέστη εφικτός και ήταν αποτελεσματικός στον στόχο του της ρύθμισης της θερμοκρασίας και της υγρασίας.

Στην παρούσα εργασία δεν ασχοληθήκαμε καθόλου με την βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης του θερμοκηπιού ενώ ο έλεγχος εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια μίας ημέρας μόνο και καλό θα ήταν να εφαρμοστεί για παραπάνω ημέρες πράγμα που θα δημιουργούσε δυσκολία στην ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΠΗΓΕΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

Κεφάλαιο 2

greenhouse design and control pedro ponce arturo molina

https://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/thermokipia/texn_prod_thermokipion.pdf

<https://www.ypaithros.gr/to-kostos-h-diadikasia-kai-oi-ekselikseis-stin-kataskeui-thermokipion/>

Κεφάλαιο 3

Tomato plant culture: In the field, greenhouse, and home garden, second edition Benton Jones, J., Jr

Kamel Mesmoudi, Azedine Soudani, Pierre-Emmanuel Bournet. Determination of the inside air temperature of a greenhouse with tomato crop under hot and arid climates. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, University of Port Harcourt, 2010, 5 (2), pp.117-129. <hal-00729706>

Θερμοκηπιακή καλλιέργεια της τομάτας στον νομό Κορινθίας τεχνική της καλλιέργειας και προβλήματα Δήμητρα Α Λυμπεροπούλου

Κεφάλαιο 4

Evapotranspiration Models in Greenhouse M.Sc. Thesis by Wan Fazilah Fazlil Ilahi

Jolliet O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses

Hargreaves GH, F.ASCE, Allen RG. 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. J. Irrig. and Drain. Engrg. 129(1):53-63.

Graaf Rd. 1988. Automation of the Water Supply of Glasshouse Crops by Means of Calculation the Transpiration and Measuring the Amount of Drainage Water. Acta Hort. (ISHS) 229:219-232.

Okuya A, Okuya T. 1988. The Transpiration of Greenhouse Tomato Plants in Rockwool Culture and its Relationship to Climatic Factors. Acta Hort. (ISHS) 230:307-312.

Stanghellini C. 1987. Transpiration of Greenhouse Crops: An Aid to Climate Management. PhD Thesis: IMAG, Wageningn.

Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies V.P. Sethi a,†, K. Sumathy a, Chiwon Lee b, D.S. Pal c

A model of humidity and its applications in a greenhouse Cecilia Stanghellini *, Taeke de Jong

Κεφάλαιο 5

Εξοικονόμηση Ενέργειας Κτιρίων με Χρήση Ευφυούς Ελέγχου Μπελογιάννη Βασιλική

Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications Ying Bai Hanqi Zhuang Dali Wang

<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/AUTO114/II.%20%CE%91%CF%83%CE%B1%CF%86%CE%AE%20%CE%A3%CF%8D%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%B1.pdf>

Optimized fuzzy control of a greenhouse F. Lafont *, J.-F. Balmat

Κεφάλαιο 7

Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under severa scenarios: A web-based application Efrén Fitz-Rodríguez a,*, Chieri Kubota b, Gene A. Giacomelli a, Milton E. Tignor c, Sandra B. Wilson d, Margaret McMahon e

Fuzzy logic controller of temperature and humidity inside an agricultural greenhouse RIM Ben Ali Emna Aridhi

Πηγές εικόνων

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1: Απαιτήσεις Ηλεκτρικής Ισχύος Θερμοκηπίων (Πηγή εικόνας : greenhouse Design and control Pedro Ponce Arturo Molina Brian MacCleery)

Εικόνα 2.7 Γοτθικό Θερμοκήπιο (πηγή: <https://www.gaiasergon.gr/services/greenhouses/gothic/>)

Εικόνα 2.8: Σχέδιο πτυσσόμενου πλαστικού καλύμματος (πηγή : integrated greenhouse systems for mild climates

Εικόνα 2.9: Προσομοίωση δυναμικού εξαερισμού πηγή:
<http://turnergreenhouses.com/product/automatic-fan-ventilation-systems/>

Κεφάλαιο 3

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1: Η αλληπίδραση των στοιχείων ενός θερμοκηπίου στην μετάδοση θερμότητας (Πηγή: Rim BEN ALI 2015)

Κεφάλαιο 5