

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε



Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

(πρ. Τ.Ε.Ι. Πάτρας & πρ. Τ.Ε.Ι. Μεσολογγίου)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1458

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΜΕΡΟΥΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΤΟΥΣ ΑΝΑΓΚΩΝ.**

ΑΡΕΣΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΚΑΡΑΛΗ ΖΩΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

1.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1.1 Εισαγωγή 5

1.1.2 Γεωθερμική Ενέργεια 6

1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.2.1 Ιστορική Αναδρομή 6

1.2.2 Τεχνολογίες Ηλιακής Ενέργειας8

1.2.3 Συστήματα συλλογής και θερμικής μετατροπής της ηλιακής
ενέργειας9

1.2.4 Συστήματα ηλεκτρικής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας 9

1.2.5 Συστήματα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας10

1.3 ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

1.3.1 Εισαγωγή11

1.3.2 Ιστορική και Περιφερειακή Ανάπτυξη12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

2.1 ΦΩΤΙΣΜΟΣ

2.1.1 Εισαγωγή14

2.1.2 Φυσικός και Τεχνητός Φωτισμός15

2.1.3 Ηλιακή Ακτινοβολία16

2.1.4 Θερμοκήπιο και Ηλιακή Ακτινοβολία18

2.1.5 Ραδιομετρικές και Θερμικές Ιδιότητες των Υλικών Κάλυψης19

2.1.6 Επίδραση στο Μικροκλίμα του Θερμοκηπίου21

2.1.7 Ταξινόμηση Υλικών Κάλυψης24

2.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ

2.2.1 Εισαγωγή25

2.2.2 Συστήματα Θέρμανσης Θερμοκηπίων26

2.2.3 Κεντρικά Συστήματα Θέρμανσης27

2.2.4 Θέρμανση Υπεδάφους Θερμοκηπίου29

2.2.5 Συστήματα Θέρμανσης με Νερό Χαμηλής Θερμοκρασίας30

2.3 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.3.1 Γενικά31

2.3.2 Ηλιακή Ενέργεια33

2.3.3 Γεωθερμική Ενέργεια35

2.3.4 Αιολική Ενέργεια35

2.3.5 Παθητικά συστήματα θέρμανσης.....38

2.3.6 Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας.....39

2.4 ΨΥΞΗ

2.4.1 Εισαγωγή40

2.4.2 Αερισμός41

2.4.3 Φυσικός Εξαερισμός42

2.4.4 Δυναμικός Εξαερισμός45

2.4.5 Δροσισμός46

2.4.6 Σκίαση.....	47
-------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	48
---------------------------	-----------

3.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ FRESNEL

3.2.1 Γενικά για την Συγκέντρωση της Ηλιακής Ακτινοβολίας	49
---	----

3.2.2 Φακοί Fresnel	51
---------------------------	----

3.2.3 Θεωρία των Φακών Fresnel	52
--------------------------------------	----

3.2.4 Γραμμικοί Φακοί Fresnel (LFLs)	54
--	----

3.2.5 Κυρτοί Γραμμικοί Φακοί Fresnel	55
--	----

3.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΦΑΚΩΝ FRESNEL ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ.

3.3.1 Επίδραση στο Φωτισμό και στο Μικροκλίμα του Θερμοκηπίου.....	57
--	----

3.3.2 Συνδυασμός των Φακών Fresnel με PVT Συστήματα	58
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ.

4.1.1 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε θερμοκήπιο.....	60
--	----

4.1.2 Πλωτό θερμοκήπιο	61
------------------------------	----

4.1.3 Έξυπνη θερμοκηπιακή μονάδα με αυτοματοποιημένη χρήση των ΑΠΕ.....	62
---	----

4.1.4 Γεωθερμικά και υδατικά αυτόνομα θερμοκήπια.....	63
---	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66
---------------------------	-----------

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στον τομέα των θερμοκηπίων για τον έλεγχο του φωτισμού και της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες ανάπτυξης των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Η κατάλληλη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την αποδοτική ανάπτυξη των καλλιεργειών σε ελεγχόμενες συνθήκες εντάσσεται στην κατεύθυνση της χρήσης εναλλακτικών ενεργειακών πηγών σε υποκατάσταση των συμβατικών πηγών για εξοικονόμηση ενέργειας και προστασία του περιβάλλοντος. Τα θερμοκήπια αποτελούν διατάξεις για πιο αποδοτικές καλλιέργειες με ελεγχόμενες συνθήκες, αλλά μια σειρά από παράγοντες επηρεάζουν την λειτουργία τους και τα προβλήματα που προκύπτουν απαιτούν σύνθετες μεθόδους επίλυσης. Η μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις παραμέτρους που σχετίζονται με το θερμοκήπιο παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον επειδή η διερεύνηση νέων τρόπων ρύθμισης του φωτισμού μπορεί να συνδυαστεί με την κατάλληλη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου για θερμότητα και ηλεκτρισμό (Rigoroulos and Santamouris 1981). Στην κατεύθυνση αυτή εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής νέων διαφανών υλικών και οπτικών διατάξεων (Γραμμικοί Φακοί Fresnel), που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε άλλες περιπτώσεις ενεργειακών εφαρμογών στο πεδίο της ηλιακής ενέργειας. Έτσι, η απαιτούμενη μείωση του φωτισμού ορισμένη περίοδο της ημέρας μέσω απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από ειδικού τύπου απορροφητές, για την αποφυγή υπερέκθεσης των φυτών σε αυτήν, μπορεί να οδηγήσει στην αποθήκευση θερμότητας ή και ηλεκτρισμού για χρήση στη διάρκεια της νύκτας όπου υπάρχουν ανάγκες διατήρησης του επίπεδου της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου καθώς και για την επέκταση της περιόδου φωτισμού των φυτών. Στα πλαίσια της εργασίας, μελετήθηκε σχετική ελληνική και διεθνής βιβλιογραφία από Ελληνικά και Διεθνή περιοδικά, από πρακτικά συνεδρίων και από άλλες βιβλιογραφικές πηγές. Αρχικά αναφέρονται οι εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας στον τομέα των θερμοκηπίων (Κεφάλαιο 1). Στη συνέχεια, δίνοντας έμφαση στα θερμοκήπια, μελετήθηκαν συμβατικά συστήματα, μέθοδοι και αποτελέσματα για τον έλεγχο του φωτισμού, της θερμοκρασίας και των άλλων λειτουργικών και ενεργειακών παραμέτρων τους (Κεφάλαιο 2). Μελετήθηκαν επίσης περιληπτικά τα συστήματα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και εκτενώς οι φακοί Fresnel ως προς την αρχή λειτουργίας τους και τις δυνατές εφαρμογές τους κυρίως στα θερμοκήπια (Κεφάλαιο 3). Τέλος αναφέρθηκαν εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε θερμοκηπιακές μονάδες και η δημιουργία ενός διαφορετικού είδους θερμοκηπίου με εντυπωσιακές δυνατότητες (Κεφάλαιο 4).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

1.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1.1 Εισαγωγή

Επιστήμη και τεχνολογία συνδυάζονται για να προάγουν χρήσιμες εφαρμογές. Η ιστορία διαμέσου των αιώνων συσχετίζει την πρόοδο και των δύο σύμφωνα με τους σκοπούς της κάθε περιόδου. Η ενέργεια ήταν πάντοτε η πρώτη ανάγκη της ανθρωπότητας διαμέσου της οποίας άλλες επιστήμες ή τεχνολογίες προωθήθηκαν. Φυσικές δυνάμεις, σήμερα αποκαλούμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν γνωστές από την αρχαιότητα και χρησιμοποιούντο σε διάφορα πεδία. Παρά την εντυπωσιακή πρόοδο της επιστήμης και τεχνολογίας από του αρχαίους χρόνους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ακόμα στο στάδιο της έρευνας ή των πιλοτικών εφαρμογών. Η πρόοδος στην χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με λίγα λόγια περιγράφεται με έμφαση πάνω στις προσπάθειες που γίνονται για να συλλέγουν και να μετατραπούν αυτές οι φυσικές δυνάμεις σε χρήσιμη μορφή ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η Ηλιακή ενέργεια, η Αιολική ενέργεια, η Βιομάζα, η Υδροηλεκτρική ενέργεια, η παλιρροϊκή και η ενέργεια των κυμάτων και η γεωθερμική ενέργεια.

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των τελευταίων 25 χρόνων, μετατρέποντας τις ανανεώσιμες δυνατότητες σε πραγματική παραγωγή ενεργείας και αυξάνοντας το μερίδιο τους στο ενεργειακό τοπίο. Επιπλέον εξαιτίας της αποκεντρωμένης φύσης τους οι ανανεώσιμες ενεργειακές εφαρμογές έχουν σημαντική δυνατότητα στον αγροτικό τομέα. Σαν τοπικές πηγές, προσφέρουν κέρδη για βιώσιμη ανάπτυξη της απασχόλησης, κοινωνική συνοχή και περιφερειακή ανάπτυξη. Παρόλα τα πλεονεκτήματά τους, εντούτοις, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν έχουν κατορθώσει να αποκτήσουν βιώσιμο ποσοστό της ενεργειακής αγοράς. Είναι επομένως απαραίτητο να αυξηθεί η ανταγωνιστικότητα τους και η αξιοπιστία τους καθώς επίσης εμπιστοσύνη στους συναφείς χειρισμούς με σκοπό να εισαχθούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα σε υψηλότερα ποσοστά.

Τα ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα, ορίζονται σαν ένας συνδυασμός των ανανεώσιμων (και συμβατικών) ενεργειακών τεχνολογιών που προσφέρουν στους όρους ενεργειακών απαιτήσεων έναν βαθμό ευελιξίας λειτουργίας πολύ υψηλότερο από τις μεμονωμένες ανανεώσιμες, και σε πολλές καταστάσεις, είναι πιθανόν να είναι ανταγωνιστικές με τις συμβατικές τεχνολογίες επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα, φιλόδοξους περιβαλλοντολογικούς σκοπούς, όπως μείωση εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων (Kelly and Weinberg, 1993). Αυτό είναι ιδιαίτερα εφικτό όταν οι ολοκληρωμένες ανανεώσιμες πηγές εξετάζονται σε απομονωμένες περιοχές ή σε περιορισμένης έκτασης περιοχές διότι η ενέργεια παράγεται σε μέρος όπου χρησιμοποιείται διαθέσιμη τοπική πηγή ενέργειας και οι αποστάσεις διανομής είναι ελάχιστες.

Ο καθορισμός μοντέλου ετήσιας ενεργειακής απαίτησης είναι συνήθως εξαιρετικά εποχιακός και ποικίλει σε σχέση με την τελική χρήση (θερμοκρασία, ηλεκτρισμός). Τα καθημερινά και μηνιαία μέγιστα ίσως είναι 4-5 φορές η αντίστοιχη μέση κατανάλωση. Ενώ η χρήση των ξεχωριστών και μεμονωμένων τεχνολογιών απαιτεί δαπανηρά υπερμεγέθη και / ή συστήματα μεγάλης ενεργειακής αποθήκευσης για να ικανοποιήσει τα απαιτούμενα μέγιστα,

τα ολοκληρωμένα συστήματα έχουν επιδείξει ότι μπορούν να είναι πιο οικονομικά. (Kyritsis 1986, Jensen 1994).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται σε αφθονία και έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Η οποιαδήποτε αύξηση στην απόσταση μεταξύ της πηγής προέλευσης και του προορισμού ωθεί ανοδικά το κόστος μεταφοράς. Επομένως, η χρήση τους είναι οικονομικά πλεονεκτική όταν η μεταφορά και οι αποστάσεις διανομής είναι μικρές. Θα πρέπει να αξιολογούνται γύρω από την πηγή τους, μέσα σε μία ακτίνα μερικών εκατοντάδων μέτρων ή μερικών χιλιομέτρων, σε εξάρτηση με τη φύση των πηγών (Rozakis et al, 1997).

Γενικά οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας θεωρούνται «πράσινες» επειδή προκαλούν ελάχιστη εξάντληση των επίγειων αποθεμάτων και επειδή ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία και η κυματική ενέργεια προκαλούν μηδενικές αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενεργειακής παραγωγής. Η ενέργεια βιομάζας είναι ανανεώσιμη, αλλά μοιράζεται πολλά χαρακτηριστικά με τα ορυκτά καύσιμα. Στην συνέχεια γίνεται μία συνοπτική αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπου καθορίζονται και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

1.1.2 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια παρουσιάζεται συνήθως σε περιοχές με σχετικά πρόσφατη ηφαιστειότητα, γιατί σε αυτές τις περιοχές παρουσιάζεται το φαινόμενο, διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της γης να έχει κινηθεί προς την επιφάνεια και το υπέδαφος να έχει θερμανθεί. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε τυχόν υδροφόρους σχηματισμούς της περιοχής. Τα νερά θερμαίνονται και κυκλοφορούν μέσα στα πετρώματα φτάνοντας σε πολλές περιπτώσεις μέχρι την επιφάνεια, αφού προηγουμένως έχουν εμπλουτιστεί από άλατα των πετρωμάτων (θερμές πηγές, ατμίδες), ενώ κάποιες άλλες φορές τα νερά εγκλωβίζονται σε μη υδροπερατά πετρώματα και είναι δυνατόν να αποκτήσουν θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 350⁰C.

Σε κάποιες περιοχές της γης, που υπάρχει γεωθερμικό ρευστό χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία ρευστού 100⁰C), είναι δυνατόν με απλές γεωτρήσεις να χρησιμοποιηθεί σαν ενεργειακή πηγή. Μετά την ενεργειακή κρίση, η διερεύνηση των πηγών αυτών έγινε πιο εντατική και τώρα έχουν εγκατασταθεί σταθμοί σε αρκετές χώρες του κόσμου ενώ οι έρευνες συνεχίζονται.

Δυστυχώς δεν υπάρχουν στατιστικά στοιχεία, είναι όμως βέβαιο ότι και η γεωθερμική ενέργεια προς το παρόν έχει περιορισμένη σημασία και είναι βοηθητική σε ορισμένες περιοχές της γης. Τελείως διαφορετική θα ήταν η εικόνα αν ήταν εφικτές οι γεωτρήσεις σε μεγάλα βάθη, στο διάπυρο εσωτερικό του πλανήτη. Εκεί εγκλείονται τεράστια ενεργειακά αποθέματα, απρόσιτα όμως οικονομικά με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα.

1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η αρχική εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας ήταν με την μορφή της φωτιάς. Οι πρώτες γνωστές πρακτικές εφαρμογές ήταν στην ξήρανση για τη συντήρηση των τροφίμων. Η παλαιότερη εγκατάσταση που αφορούσε την ξήρανση των τροφίμων με την ηλιακή ακτινοβολία βρέθηκε στη νότια Γαλλία και χρονολογείται σε 8000 π.Χ.

Η παλιότερη σε μεγάλη κλίμακα πιθανή εφαρμογή, είναι η καύση του Ρωμαϊκού στόλου από τον Αρχιμήδη, τον Έλληνα μαθηματικό και φιλόσοφο (287- 212 π.Χ.), ο οποίος χρησιμοποίησε επίπεδους καθρέπτες για την συγκέντρωση των ακτινών του ηλίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο επάνω στα πλοία. Πολλοί συγγραφείς, από το 100 π.Χ. μέχρι το 1100 μ.Χ., έκαναν αναφορές σε αυτό το γεγονός, το οποίο αργότερα χαρακτηρίστηκε ως μύθος διότι δεν υπήρχε η κατάλληλη τεχνολογία για να κατασκευαστούν καθρέπτες. Δεν είναι γνωστό, εάν το γεγονός έγινε πραγματικά, αλλά ο Αρχιμήδης είναι επίσης συγγραφέας ενός βιβλίου με τον τίτλο «Καθρέπτες», το οποίο δεν έχει διασωθεί, αλλά πολλοί συγγραφείς αρχαιοτήτων αναφέρονται σε αυτό. Αυτό το πείραμα επαναλήφθηκε από τον Πρόκλους κατά την διάρκεια της Βυζαντινής περιόδου όταν έκαψε τον πολεμικό στόλο των εχθρών που πολιορκούσαν το Βυζάντιο (Delyannis, 2003).

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας επανελήφθη κατά τη διάρκεια του 18^{ου} αιώνα πρώτα από το Γάλλο φυσιογνώστη Bouffon το 1747 και το 1748, ο οποίος πειραματίστηκε με διάφορες ανακλώμενες συσκευές που αποκαλούντο από τον ίδιο "καυτοί καθρέπτες που καίνε σε μεγάλη απόσταση." Μια από τις πρώτες μεγάλης κλίμακας εφαρμογές ήταν ο ηλιακός φούρνος που χτίστηκε από το γνωστό Γάλλο φαρμακοποιό Lavoisier ο οποίος το 1774 κατασκεύασε ισχυρούς φακούς για να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτοί οι δύο επιστήμονες προώθησαν πολύ την έρευνα και την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας.

Η πραγματική όμως επανάσταση της ηλιακής ενέργειας ξεκίνησε στο μέσον του 19ου αιώνα. Στην Ευρώπη και στην Αμερική, διάφοροι ερευνητές πειραματίστηκαν με τις ηλιακές μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η χρήση τους ήταν κυρίως στην άντληση νερού για άρδευση. Αυτοί ήταν οι πρώτοι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες και συγκεντρωτές με τον Schuman να φτιάχνει τον πρώτο επίπεδο συγκεντρωτή. Από το 1866 μέχρι το 1956 μικρές ηλιακές εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν και τέθηκαν σε λειτουργία. Μεταξύ 1866 και 1878 ο Γάλλος μηχανικός Mouchot, κατασκεύασε διάφορους συγκεντρωτικούς συλλέκτες στην Ευρώπη και τη βόρεια Αφρική. Οι προσπάθειες συνεχίστηκαν στις ΗΠΑ όπου ο John Ericsson, ανέπτυξε την πρώτη μηχανή ατμού, οδηγούμενη άμεσα από την ηλιακή ενέργεια (Belessiotis and Delyannis, 2000).

Στην αρχή του 20ού αιώνα, η δραματική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας από τη βιομηχανία, αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον για τη χρήση ηλιακής ενέργειας για μεγάλης κλίμακας πρακτικές εφαρμογές. Ο Eneas το 1901 κατασκεύασε έναν μεγάλο ηλιακό συγκεντρωτή στη Πασαντένα της Καλιφόρνια. Ήταν ένας κόλινος κώνος που είχε μια ηλιακή έκταση συλλογής 59,64 m² και χρησιμοποίησε το νερό ως μέσο λειτουργίας. Το 1901 μια ομάδα μηχανικών κατασκεύασε έναν συγκεντρωτή παρόμοιο με αυτόν του Eneas που η εσωτερική πλευρά του επενδύθηκε με 1788 επιπέδους καθρέπτες και λειτουργούσε δεξιόστροφα για να επαναρυθμίζεται η εστίαση κάθε 20 min. Χρησιμοποιήθηκε για άντληση νερού για άρδευση. Εγκαταστάθηκε επίσης στη Πασαντένα, και ήταν γνωστός ως "μονάδα παραγωγής ηλιακής ενέργειας, Πασαντένα" (Belessiotis and Delyannis, 2000).

Το 1910 ο Harrington δημιούργησε την πρώτη ηλιακή συσκευή αποθήκευσης χωρητικότητας 19m³. Μια ηλιακή οδηγούμενη αντλία χρησιμοποιήθηκε για να αντλήσει το νερό σε μια δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία ήταν 6 m υψηλότερα. Το 1913, ο Harrington συνεργάστηκε με τους Boys να εγκαταστήσει τις μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής ηλιακής ενέργειας που έγιναν στο Meadi, στην Αίγυπτο. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για άντληση νερού για άρδευση από τον ποταμό Νείλο. Αποτελείτο από κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα με προσανατολισμό βορρά-νότο που στρέφονταν αυτόματα κατά την διάρκεια της ημέρας και το σύστημα παρήγαγε 50 KW για να θέτουν σε κίνηση τις αντλίες. Το μέσον λειτουργίας ήταν ο ατμός. Οι επόμενες μεγάλες ηλιακές μονάδες δεν θα εγκαθίσταντο για τα επόμενα 63 έτη.

Μια από τις πρώτες μεγάλης κλίμακας πειραματικές μονάδες ηλιακής ενεργείας κατασκευάστηκε από τον Francia (Delyannis, 2003) και εγκαταστάθηκε κοντά στη Γένοβα.

Οι συγκεντρωτές ήταν κυκλικοί με επεξεργασμένη επιφάνεια καθρέφτες ανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε έναν κεντρικό λέβητα, παραγωγή ατμού. Οι μονάδες αποτελούντο από 270 ηλιοστάτες με παραγωγή 50 kW. Βασισμένη στο ίδιο σχεδιασμό, πιλοτική ηλιακή μονάδα εγκαταστάθηκε το 1977 στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Ατλάντα. Ο συλλέκτης αποτελείτο από έναν οκταγωνικό σχηματισμένο πεδίο καθρεπτών που περιείχε 550 γυάλινες επιφάνειες καθρεπτών. Το πεδίο ήταν εστιασμένο στο ηλιακό φως και η συνολική δύναμη μέσα στην εστιακή ζώνη ήταν περίπου 400 kW.

Σήμερα υπάρχουν πολλές μεγάλες μονάδες ηλιακής ενέργειας με παραγωγή στο εύρος του MW, αντί του kW, για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Οι πρώτες εμπορικές μονάδες ηλιακής ενέργειας εγκαταστάθηκαν στις ΗΠΑ, το 1979. Η πρώτη αποτελείτο από 220 ηλιοστάτες και είχε μια παραγωγή 5 MW ενώ η δεύτερη είχε συνολική θερμική παραγωγή 35 MW.

Οι περισσότερες από τις μονάδες ηλιακής ενέργειας εγκαταστάσεις παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ή/και επεξεργάζονται το νερό για τη βιομηχανική χρήση και παρέχουν τον υπέρθερμο ατμό 673 K (400 °C). Κατά συνέπεια, μπορούν να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια ή/και τον ατμό για να κινήσουν π.χ. μικρής απόδοσης συμβατικές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης εξαρτώμενες από θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια.

1.2.2 Τεχνολογίες Ηλιακής Ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγει η γη κατά την διάρκεια ενός χρόνου είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από τις συνολικές πηγές φυσικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων των αποθεμάτων που δεν έχουν ανακαλυφθεί ή εξερευνηθεί και που δεν είναι ανανεώσιμα. Ο ήλιος καθώς στέλνει στην γη ενέργεια ισχύος 150.109 MW. Από την ενέργεια αυτή το 30% ανακλάται στο διάστημα από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το 46% φτάνει στην επιφάνεια της γης όπου μετατρέπεται σε θερμότητα και επανακλάται με θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Από το υπόλοιπο 24% το 23% δαπανάται για την εξάτμιση του νερού των θαλασσών και το εναπομένον 1% για την αιολική ενέργεια, την ενέργεια των κυμάτων, καθώς και την φωτοσύνθεση.

Η άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας με την παραγωγή και εγκατάσταση συσκευών αποτέλεσε καινοτομία στην ενεργειακή εξέλιξη του ανθρώπου. Ενώ η έμμεση ηλιακή ενεργεία επιδρά με φυσικές διαδικασίες στο νερό, τον αέρα και την φωτοσύνθεση, η άμεση χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί ειδικά σχεδιασμένα και εγκατεστημένα τεχνικά συστήματα προκειμένου να απορροφούν και να μετατρέπουν την συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια.

Τα συστήματα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- i) Συστήματα απευθείας μετατροπής της ενέργειας σε θερμότητα. Η μετατροπή αυτή μπορεί να γίνει με ενεργητικά συστήματα όπως είναι οι ηλιακοί συλλέκτες και οι ηλιακές λίμνες, η με παθητική συλλογή από το ίδιο το κτίριο, τα θερμοκήπια κλπ.
- ii) Συστήματα μετατροπής με ενδιάμεσο θερμοδυναμικό μετασχηματισμό, όπου η θερμότητα χρησιμοποιείται για την δημιουργία ατμού, παραγωγή έργου και τελικά ηλεκτρισμό.
- iii) Συστήματα απευθείας μετατροπής σε ηλεκτρισμό, με πιο διαδεδομένο τα φωτοβολταϊκά κύτταρα στα οποία γίνεται η φωτοβολταϊκή μετατροπή.
- iv) Συστήματα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε χημική ενέργεια, όπως η παραγωγή βιομάζας μέσω της φωτοσύνθεσης, η παραγωγή H₂ με φωτοηλεκτρόλυση κ.α.

1.2.3 Συστήματα συλλογής και θερμικής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας

Επίπεδοι συλλέκτες

Είναι οι πιο διαδεδομένοι όσον αφορά την θέρμανση νερού και την θέρμανση χώρων και είναι η σπουδαιότερη κατηγορία συσκευών συλλογής της ηλιακής ενέργειας από πλευράς εφαρμογών. Ένας τυπικός επίπεδος συλλέκτης (flat plate collector) αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο στο πάνω μέρος του οποίου τοποθετείται κάλυμμα από γυαλί ή πλαστικό, στο εσωτερικό του τοποθετείται απορροφητική επιφάνεια μαύρου χρώματος ενώ τα πλαϊνά και η κάτω πλευρά του συλλέκτη είναι μονωμένα για να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες. Η λειτουργία του συλλέκτη είναι απλή. Το μεγαλύτερο ποσοστό από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια που συμπεριφέρεται ως "μέλαν" σώμα στην ηλιακή ακτινοβολία. Το μεγαλύτερο μέρος από την ενέργεια που απορροφάται, μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται. Η θερμότητα που απάγεται από το ρευστό, είναι το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του συλλέκτη και ή αποθηκεύεται, ή τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο.

Άλλα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι ο ολοκληρωμένος ηλιακός συλλέκτης, ο σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτικός συλλέκτης (CPC) και ο κυλινδροπαραβολικός συλλέκτης.

1.2.4 Συστήματα ηλεκτρικής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας

Φωτοβολταϊκό σύστημα (PV)

Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται με την χρήση ηλιακών κύτταρων, διαδικασία γνωστή ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από την θέρμανση του κυττάρου αφού η απόδοση των φωτοβολταϊκών μειώνεται καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας τους αυξάνει. Τα ηλιακά κύτταρα πλεονεκτούν στο ότι εφαρμόζονται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από μικρή έκθεση στον ήλιο ανά μονάδα επιφανείας. Στην περίπτωση που επικρατεί συννεφιά τα φ/β λειτουργούν με την ίδια απόδοση εν αντιθέσει με τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω θερμοδυναμικής μετατροπής με πολύ χαμηλές αποδόσεις λόγω της συλλογής μόνο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά των φ/β συστημάτων είναι η απευθείας παραγωγή ενέργειας με μηδενικές εκπομπές ρύπων, η αθόρυβη λειτουργία, οι ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης και η μεγάλη διάρκεια ζωής.

Στο φ/β φαινόμενο δεν χρησιμοποιείται όλη η περιοχή του φάσματος αλλά μέρος αυτής. Το κριτήριο είναι $h\nu > E_g$ για να απορροφηθεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και να δημιουργηθεί ζεύγος ηλεκτρόνιου-οπής. Συνεπώς ο συντελεστής απόδοσης ενός φ/β δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρική απόδοση του φ/β εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία λειτουργίας του. Συγκεκριμένα αύξηση της θερμοκρασίας αυτής κατά $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ οδηγεί σε μείωση της ηλεκτρικής του απόδοσης κατά 15%. Σκόπιμη λοιπόν είναι η λειτουργία ενός φ/β συστήματος σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία ώστε η λειτουργία τους να είναι πιο αποδοτική. Η ηλεκτρική απόδοση του φ/β κυμαίνεται από 5%-15% ανάλογα με τον τύπο τους και τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, που είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα του πνέοντος ανέμου.

Υβριδικό Φωτοβολταϊκό/θερμικό (PV/T) σύστημα

Το σύστημα αυτό είναι συνδυασμός φωτοβολταϊκών πλαισίων με θερμικές μονάδες. Είναι υβριδικό και σχεδιάζεται έτσι ώστε να πετυχαίνεται εκτός από παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και απολαβή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό μέσω της φυσικής η εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ενός ρευστού (αέρας η νερό). Σε αυτό οδήγησε το γεγονός ότι τα μέρη στα οποία θα μπορούσαν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά (κτίρια, θερμοκήπια κλπ) δεν έχουν ανάγκη μόνο σε ηλεκτρισμό αλλά και σε θερμική ενέργεια. Τα υβριδικό φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα (PV/T) αποτελείται από δυο επιμέρους μονάδες, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και τον θερμικό συλλέκτη, με τις οποίες επιδιώκεται η πλέον αποδοτική αξιοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη. Η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού λειτουργεί ως απορροφητής της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο για το φωτοβολταϊκό όσο και για τον συλλέκτη. Ένα μικρό ποσοστό της απορροφούμενης ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 70% μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι το φωτοβολταϊκό μπορεί να διατηρείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, ενώ παράλληλα η απαγόμενη θερμότητα καλύπτει θερμικές ανάγκες. Η απόδοση ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού είναι περίπου 10% σε ηλεκτρισμό και 30% σε θερμότητα. Η μελέτη των υβριδικών PV/T ξεκίνησε από τους Kern and Russell (1978), και μέχρι σήμερα υπάρχουν αρκετές μελέτες που επικεντρώθηκαν στην θεωρητική και πειραματική μελέτη των συστημάτων με σκοπό την βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής τους απόδοσης (Cox and Raghuraman 1985, Huang et al 2001, Tripanagnostopoulos et al 2001, Tripanagnostopoulos et al 2002, Tselepis and Tripanagnostopoulos 2002, Tripanagnostopoulos et al 2005)

1.2.5 Συστήματα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

Έχουν μελετηθεί και δοκιμαστεί αρκετοί τύποι ηλιακών συγκεντρωτικών συσκευών, συστημάτων και διατάξεων που περιλαμβάνουν κάτοπτρα, φακούς η συνδυασμό τους, και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε επίπεδους, κυλινδρικούς, σφαιρικούς η και σύνθετους απορροφητές. Η διαφορά στον τρόπο συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας διαχωρίζει αυτά τα ηλιακά συστήματα σε τρεις γενικές κατηγορίες:

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν συνήθως κάτοπτρα, που ενισχύουν λίγο την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην απορροφητική επιφάνεια. Στα συστήματα αυτά η επιτυγχάνομενη συγκέντρωση είναι αρκετά μικρή και η συνεισφορά των κάτοπτρων έγκειται στην μείωση του κόστους του ηλιακού συστήματος και στην βελτίωση της αποδοτικής της λειτουργίας, η οποία συνήθως δεν υπερβαίνει τα όρια των χαμηλών θερμοκρασιών. Στα συστήματα αυτά αξιοποιείται η άμεση και μεγάλο μέρος της διάχυτης ακτινοβολίας (επίπεδα κάτοπτρα).

Στην δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται τα γραμμικής η κυκλικής γεωμετρίας ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα, στα οποία τα συγκεντρωτικά μέσα που διαθέτουν συγκεντρώνουν την προσπίπτουσα παράλληλη δέσμη ηλιακών ακτινών σε ευθεία γραμμή ή σε σημείο αντίστοιχα στο επίπεδο εστίασης τους, επιτυγχάνοντας σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του απορροφητή και δίνοντας έτσι την δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας σε περιοχές μέσων και υψηλών θερμοκρασιών αντίστοιχα. Στα συστήματα αυτά συλλέγεται κύρια η άμεση ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα την αναγκαιότητα ενός μηχανισμού προσανατολισμού μέρους η όλης της συσκευής για παρακολούθηση του ήλιου (φακοί Fresnel, παραβολοειδές κάτοπτρο).

Στην τρίτη κατηγορία τέλος εντάσσονται τα συστήματα, στα οποία η συγκέντρωση επιτυγχάνεται με πολλά επίπεδα κάτοπτρα που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε απορροφητή στην κορυφή ενός πύργου (ηλιακοί πύργοι) για τελική χρήση στην παραγωγή

ηλεκτρισμού και ο συνδυασμός επίπεδων κατόπτρων και παραβολικών κατόπτρων για την επίτευξη πολύ υψηλής συγκέντρωσης και θερμοκρασίας για την επεξεργασία υλικών (ηλιακός φούρνος).

1.3 ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

1.3.1 Εισαγωγή

Τα θερμοκήπια είναι πολύπλοκες κατασκευές που στοχεύουν να παρέχουν προστασία των καλλιεργειών έναντι δυσμενών καιρικών συνθηκών και ικανοποιητικές συνθήκες για την ανάπτυξη και παραγωγή προϊόντων σε όλη την διάρκεια του χρόνου. Οι παράγοντες ανάπτυξης των φυτών φως, θερμοκρασία, υγρασία και CO₂, δύναται να παρέχονται εντός του θερμοκηπίου και να διατηρούνται σε βέλτιστα επίπεδα. Ένα σωστά σχεδιασμένο θερμοκήπιο πρέπει να εξασφαλίζει και να διατηρεί τους σημαντικούς κλιματολογικούς παράγοντες, όσο γίνεται κοντά στις προκαθορισμένες βέλτιστες. Συνεπώς απαιτείται να επιτρέπουν υψηλό ποσοστό διερχόμενης ακτινοβολίας, χαμηλή κατανάλωση θερμότητας, ικανοποιητική αποδοτικότητα αερισμού, επαρκής κατασκευαστική αντοχή και καλή μηχανική συμπεριφορά, χαμηλό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος (Von Elsner et al, 2000a, 2000b).

Οι πιο σπουδαίοι κλιματικοί παράγοντες που έχουν επίδραση στην κατασκευαστική δομή και στην διαμόρφωση του εσωτερικού μικροκλίματος είναι η θερμοκρασία, η συνολική ηλιακή ακτινοβολία, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και η ένταση του ανέμου. Κατόπιν τούτου οι τοπικές κλιματολογικές συνθήκες έχουν ισχυρή επίδραση στην κατασκευή και στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου γιατί ο σχεδιασμός του πρέπει να ακολουθεί κανόνες σύμφωνα με το τοπικό κλίμα. Καθώς η χρήση των θερμοκηπίων σχεδόν εκτείνεται σε ολόκληρη την Ευρώπη, ο σχεδιασμός, τα υλικά κάλυψης και ο εξοπλισμός πρέπει να ακολουθούν τις προϋποθέσεις που τίθενται από τις επιμέρους κλιματολογικές συνθήκες (Trigui et al, 2001). Καθένας σε από τους κλιματολογικούς παράγοντες παράγει έναν συνδυασμό επιδράσεων ο οποίος έχει είτε ευνοϊκή είτε δυσμενή επίδραση στην λειτουργικότητα και του θερμοκηπίου εξαρτώμενες από τις ιδιαίτερες τοπικές περιστάσεις.

Με αναφορά το κλίμα, η Ευρώπη μπορεί να χωριστεί σε δυο ζώνες. Στην βόρεια και κεντρική Ευρώπη το κλίμα χαρακτηρίζεται από ψυχρούς χειμώνες και ήπια καλοκαίρια (εύκρατο κλίμα). Στην νοτιότερη Ευρώπη οι χειμώνες είναι ήπιοι και τα καλοκαίρια θερμά (Μεσογειακό κλίμα). Η ηλιακή ακτινοβολία στις Μεσογειακές χώρες έχει δυο έως τρεις φορές μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με τις βορειότερες περιοχές. Για αυτόν τον λόγο τα θερμοκήπια στην Ευρώπη διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: θερμοκήπια που είναι σχεδιασμένα για εύκρατο κλίμα και θερμοκήπια που είναι σχεδιασμένα για Μεσογειακό κλίμα. Δεδομένου ότι η Ελλάδα βρίσκεται στην περιοχή της Μεσογείου το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα δεύτερα, με τα κύρια προβλήματα των θερμοκηπίων της Μεσογειακής λεκάνης (Von Elsner et al, 2000a) να είναι:

- θερμοκρασίες κάτω από το βιολογικό βέλτιστο τις χειμωνιάτικες νύχτες που καθιστούν την θέρμανση απαραίτητη από 3 έως 6 μήνες και υψηλές θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της ημέρας
- υψηλή σχετική υγρασία τη νύκτα
- χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα, σημαντικά φορτία ανέμου και μερικές φορές φορτία χιονιού και χαλάζι.

Επομένως τα θερμοκήπια στη Μεσογειακή λεκάνη πρέπει να έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Υψηλή διαπερατότητα ακτινοβολίας
- Καλή θερμική μόνωση και σύστημα θέρμανσης για αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της νύκτας (κατά τη χειμωνιάτικη περίοδο)
- Αποτελεσματικός εξαερισμός από ρυθμισμένους ανεμιστήρες
- Υψηλή σταθερότητα σε σχέση με τον άνεμο και με τα φορτία χιονιού σε κάποιες Περιοχές

1.3.2. Ιστορική και Περιφερειακή Ανάπτυξη

Προσπάθειες να προσαρμοστεί το περιβάλλον στις ανάγκες της φυτικής παραγωγής μέσω προστατευτικών κατασκευών, παρατηρήθηκαν στην αρχαιότητα στην Κίνα, στην Αίγυπτο καθώς και μεταγενέστερα στην Ελλάδα και στη Ρώμη. Με το τέλος της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας οποιαδήποτε τεχνική για προστατευόμενη παραγωγή εξαφανίστηκε. Κατά το μεσαίωνα παρατηρούνται ελάχιστες εξελίξεις στην προστασία των φυτών.

Τα θερμοκήπια εμφανίστηκαν ξανά στο τέλος του 15ου έως και τον 18ο αιώνα στην Αγγλία, Γαλλία και Κάτω χώρες. Την περίοδο αυτή χρησιμοποιούνταν σχεδόν τελείως κλειστά δωμάτια για την προστασία των φυτών καθώς και υπόστεγα που είχαν κτιστό τοίχο προς βορρά, ενώ προς το νότο υπήρχαν ανοίγματα για αερισμό που έκλειναν με ξύλινα παραπετάσματα. Αργότερα τα ανοίγματα αντικαταστάθηκαν από τοίχους με γυάλινα παράθυρα.

Τον 18ο αιώνα εμφανίστηκε η καινοτομία της διάφανης αμφικλινούς στέγης, με τον βόρειο τοίχο να παραμένει κτιστός. Αυτές οι κατασκευές συνέχισαν να βελτιώνονται με την αύξηση των συνεχόμενων επιφανειών γυαλιού, με την χρήση νέων υλικών σκελετού όπως ο σίδηρος, την προσθήκη διαφόρων μηχανισμών όπως αυτών για το άνοιγμα των παραθύρων καθώς και διαφόρων εξελιγμένων συστημάτων θέρμανσης. Τον 19ο αιώνα συστηματοποιήθηκε η χρήση θερμοκηπίου για εμπορική παραγωγή και ο ενδιαφέρων νεωτερισμός κατασκευής πολλαπλών θερμοκηπίων. Στην προσπάθεια για περισσότερο φως αντικαταστάθηκε και ο βόρειος τοίχος από γυαλί. Ο εξαερισμός εκτός από τα παράθυρα γίνεται και με μηχανικούς εξαεριστές. Το 1816 χρησιμοποιήθηκε ο πρώτος αυτόματος μηχανικός θερμοστάτης για τον εξαερισμό θερμοκηπίου.

Τον 20ο αιώνα η καλλιέργεια σε θερμοκήπια γίνεται σχεδόν επαγγελματική υπόθεση με ραγδαία αύξηση μετά το 1945. Το γεγονός αυτό αύξησε την απαίτηση για μεγαλύτερο έλεγχο του περιβάλλοντος και καλύτερες κατασκευές με σκοπό την αύξηση της παραγωγής και τη μείωση του κόστους. Τα θερμοκήπια έγιναν ακόμα πιο φωτεινά με τη χρήση μεγαλύτερων κομματιών γυαλιού αλλά και λεπτότερων στοιχείων του σκελετού. Από τη δεκαετία του '50 και μετά η ευρεία χρήση του πλαστικού έκανε τα θερμοκήπια σημαντικά φτηνότερα φέρνοντας επανάσταση στην εξάπλωση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Τα υλικά κατασκευής του σκελετού είναι πλέον το ξύλο, ο γαλβανισμένος σίδηρος, το αλουμίνιο αλλά και το πλαστικό.

Τα αμφικλινή πολλαπλά θερμοκήπια ήταν τα πιο διαδεδομένα στην αρχή του αιώνα όμως με την εξέλιξη της τεχνολογίας νέοι τύποι άρχισαν να εμφανίζονται έτσι που στην εποχή μας ο αριθμός τους να είναι πολύ μεγάλος.

Από τη δεκαετία του 70 άρχισε να εφαρμόζεται ευρεία ρύθμιση του περιβάλλοντος. Το 1977 μπορούσαν ήδη να ελεγχθούν και να ρυθμιστούν αυτόματα η υγρασία του αέρα, η διαχείριση του νερού, η τεχνητή νέφωση, η θερμοκρασία, ο έλεγχος ηλιακής ακτινοβολίας, ο φωτισμός, το επίπεδο του CO₂ και πολλοί άλλοι παράγοντες. Η χώρα με τη μεγαλύτερη έκταση θερμοκηπίων στον κόσμο είναι η Ιαπωνία ακολουθούν η Ιταλία, η Ισπανία και η

Ολλανδία. Υψηλές συγκεντρώσεις θερμοκηπίων παρατηρούνται σε ειδικές περιοχές με ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες. Για παράδειγμα τα περισσότερα από τα θερμοκήπια στην Γαλλία βρίσκονται κατά μήκος της Μεσογειακής ζώνης ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό την θερμοκηπίων της Ισπανίας βρίσκονται στην περιοχή της Αλμερίας (Briassoulis et al, 1997).

Η Ελλάδα κατέχει την έβδομη θέση στην Ευρωπαϊκή Ένωση σε θερμοκηπιακή εδαφική κάλυψη με το 45% να βρίσκεται στην Κρήτη και έχει πολλά περιθώρια για επιπλέον στρεμματική ανάπτυξη αν θεωρήσουμε ότι η Ισπανία έχει επτά φορές μεγαλύτερη στρεμματική κάλυψη και η Ιταλία πέντε. Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα είναι σε μεγάλο ποσοστό με πλαστικό κάλυμμα και αυτό έχει σαν συνέπεια μια υστέρηση στην διαμόρφωση των ελεγχόμενων συνθηκών για ποιοτική και ποσοτική παραγωγή σε σχέση με τις ανταγωνίστριες χώρες (Μαυρογιαννόπουλος 2001). Έτσι παρά τις γενικά ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες της χώρας μας μια σειρά από αιτίες δεν έχουν επιτρέψει να πρωταγωνιστήσει η χώρα μας στην παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων θερμοκηπιακών προϊόντων.

Σήμερα η έρευνα γύρω από τα θερμοκήπια συνεχίζεται επιδιώκοντας τη λύση προβλημάτων που αφορούν την κατασκευή και τον εξοπλισμό, την αύξηση της ποσότητας και της ποιότητας της παραγωγής, τη μικρότερη επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος και την προστασία της ανθρώπινης υγείας από την παραγωγική διαδικασία στο θερμοκήπιο.

Όσον αφορά την χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα θερμοκήπια ως εναλλακτικοί τρόποι για την εξοικονόμηση συμβατικών ενεργειακών πηγών, έχουν χρησιμοποιηθεί με καλά αποτελέσματα η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα. Η αιολική ενέργεια λόγω υψηλού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης των μεγάλης ισχύος συστημάτων έχει χρησιμοποιηθεί λιγότερο για κάλυψη ενεργειακών αναγκών, ή έχει χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά σε συνδυασμό με κάποια από τις παραπάνω πηγές.

Η καύση βιομάζας, η χρήση διαφόρων τεχνικών συλλογής και αποθήκευσης θερμότητας την ημέρα για υποβοήθηση των θερμικών αναγκών την νύχτα, οι θερμοκουρτίνες οροφής και η γεωθερμία – όπου αυτή είναι διαθέσιμη – είναι ορισμένοι εναλλακτικοί τρόποι για την εξοικονόμηση συμβατικών ενεργειακών πηγών την περίοδο του χειμώνα. Για την θερινή περίοδο, οι υψηλές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και οι αυξημένες θερμοκρασίες αέρα αντιμετωπίζονται συνήθως με τεχνητή αποφυγή περίσσειας φωτισμού, περιορίζοντας την διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος, με πλήρη αερισμό του θερμοκηπίου και με διάφορους τρόπους δροσίσιμου. Κυρίως όμως η κατάλληλη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την αποδοτική ανάπτυξη των καλλιεργειών σε ελεγχόμενες συνθήκες εντάσσεται στην κατεύθυνση της χρήσης εναλλακτικών ενεργειακών πηγών σε υποκατάσταση των συμβατικών πηγών για εξοικονόμηση ενέργειας και προστασία του περιβάλλοντος (Bakker et al, 1995).

Αναφορικά με την παρεχόμενη ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή που θα χρησιμοποιείται, ένα ολοκληρωμένο θερμοκηπιακό ενεργειακό σύστημα θα λαμβάνει πλήρως υπόψιν τις κλιματολογικές συνθήκες και τα πρότυπα καλλιέργειας. Αναφορικά με την απαίτηση, η προσαρμοστικότητα και ευελιξία του συστήματος λειτουργίας θα το έκανε δυνατόν να ικανοποιεί μια ποικιλία πρότυπων ενεργειακών απαιτήσεων σε χαμηλό κόστος (Rozakis et al, 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

2.1 ΦΩΤΙΣΜΟΣ

2.1.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση των φυτών. Συγχρόνως αποτελεί και τη φυσική πηγή θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) αναφέρεται στην ποσότητα της φωτεινής ενέργειας που δέχεται το φυτό ανά μονάδα του χρόνου και ανά μονάδα επιφανείας. Τα κυριότερα είδη και οι σπουδαιότερες ποικιλίες που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια είναι απαιτητικά σε ένταση φωτός και θερμοκρασία οι δε μεταβολές θερμοκρασίας που συμβαίνουν, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει το θερμοκήπιο είναι:

1. Κάθε θερμοκήπιο, επειδή καλύπτεται με διαφανές κάλυμμα, δέχεται στο εσωτερικό του το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.
2. Οι απώλειες του θερμοκηπίου σε θερμότητα, λόγω του λεπτού τοιχώματος του καλύμματος είναι πολύ μεγάλες, 6-12 φορές μεγαλύτερες από εκείνες ενός συνήθους κτίσματος ίσου όγκου.

Λόγω των ιδιαίτερων αυτών χαρακτηριστικών τις ηλιόλουστες ημέρες, η θερμοκρασία του ανέρχεται σε πολύ υψηλά επίπεδα και τις ψυχρές νύχτες η θερμοκρασία πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα δεδομένου ότι η θερμοκρασία και ο φωτισμός είναι παράγοντες του θερμοκηπίου ισχυρά αλληλένδετοι μεταξύ τους.

Ο σκοπός σε μια καλλιέργεια, αν δεν υπάρχει περιορισμός από την αντοχή του φυτού, είναι να δώσουμε βέλτιστη ηλιακή ακτινοβολία για άριστες αποδόσεις. Η διάρκεια και η ποιότητα του φωτισμού έχουν πολύ σημαντική επίδραση στην ποσότητα και ποιότητα των παραγόμενων από την φωτοσύνθεση προϊόντων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια του φωτισμού, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια για φωτοσύνθεση. Για να καλυφθούν οι ανάγκες σε φωτεινή ενέργεια για την φωτοσύνθεση των περισσότερων κηπευτικών καλλιεργειών και δρεπτών ανθέων εντός του θερμοκηπίου, πρέπει να υπάρχει ένταση στην μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία (200-3000 nm) τουλάχιστον $235 W/m^2$ και $450 \mu mol/m^2 sec$ στην φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία (PAR 400-700 nm). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η ένταση και η διάρκεια του φωτός είναι ανεπαρκείς για να υπάρξει το μέγιστο της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Η μείωση της ταχύτητας αύξησης των φυτών αυτήν την εποχή, ακόμα και στα πολύ καλά θερμαινόμενα θερμοκήπια, οφείλεται στον μειωμένο φωτισμό. Μια αύξηση του φυσικού φωτισμού το χειμώνα έστω και 1%, αυξάνει το ύψος της παραγωγής κατά 2% περίπου, την περίοδο αυτή, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση είναι μειωμένη (Μαυρογιαννόπουλος 2001, Ολύμπιος 1994). Για την αύξηση του φωτισμού κατά τη διάρκεια του χειμώνα στο χώρο του θερμοκηπίου μπορεί κανείς να επέμβει είτε μειώνοντας όσο είναι δυνατόν τα εμπόδια στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας εντός του θερμοκηπίου όσον αφορά τον φυσικό φωτισμό, είτε με τη χρησιμοποίηση τεχνητού φωτισμού.

Ο φωτισμός του χώρου που καλύπτει το θερμοκήπιο επηρεάζεται σημαντικά από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τις ιδιότητες του καλύμματος και η ένταση του φωτός επιδρά άμεσα στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα. Οι φωτιστικές ανάγκες εντός του θερμοκηπίου εξαρτώνται από την εποχή και το είδος των καλλιεργούμενων φυτών και έτσι οι δύο βασικές διεργασίες των φυτών, δηλαδή η φωτοσύνθεση και ο φωτοπεριοδισμός, έχουν άμεση σχέση με την ένταση και την διάρκεια του φωτισμού. Για την αντιμετώπιση των

προβλημάτων που προκύπτουν χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές μείωσης της έντασης του φωτός καθώς επίσης και τεχνητού φωτισμού.

Η θερμοκρασία του χώρου εντός του θερμοκηπίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία με συνέπεια άλλοτε να δημιουργούνται συνθήκες υπερθέρμανσης και άλλοτε να υπάρχει ανάγκη πρόσθετης θέρμανσης, ενώ παράλληλα ο συνδυασμός τους επηρεάζει άμεσα και την υγρασία του θερμοκηπίου. Η γεωμετρία του διαφανούς κελύφους του θερμοκηπίου, ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και οι κλιματολογικές συνθήκες της τοποθεσίας είναι δύο καθοριστικοί παράγοντες για την προσλαμβανόμενη φωτοσυνθετική και θερμική ενέργεια, με συνέπεια να απαιτείται συνήθως ρύθμιση των εσωτερικών συνθηκών λειτουργίας του θερμοκηπίου ως προς τις ανάγκες των καλλιεργούμενων φυτών, ανάλογα με την προσπίπτουσα σ' αυτά ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος αέρα και την ταχύτητα του πνέοντος ανέμου (Κουτεπάς και Ταμβάκης, 2000).

2.1.2 Φυσικός και τεχνητός φωτισμός

Ο φυσικός φωτισμός δηλ. φωτεινότητα ενός θερμοκηπίου εξαρτάται από τους μετεωρολογικούς παράγοντες και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής. Παράγοντες που ευνοούν το φωτισμό στο θερμοκήπιο είναι οι εξής:

- ❖ Ο απλός σκελετός. Όσο απλούστερος είναι, τόσο περισσότερο φως περνάει στο θερμοκήπιο. Σκελετοί με μεγάλες διατομές ή με πολλά στοιχεία μειώνουν κατά 4-12% το φωτισμό, ενώ τα δευτερεύοντα στοιχεία κατά 2-5%.
- ❖ Το υλικό κάλυψης. Ο καθαρός υαλοπίνακας μειώνει κατά 10% το φωτισμό που περνάει εντός, ενώ ο ακάθαρτος μέχρι και 70%. Η μείωση του φωτισμού στα πλαστικά φύλλα και στα σκληρά πλαστικά είναι μεγαλύτερη από του υαλοπίνακα και αυξάνει με την πάροδο του χρόνου.
- ❖ Οι εναέριες εγκαταστάσεις μειώνουν σημαντικά το φωτισμό στο χώρο του θερμοκηπίου και αν δυνατόν πρέπει να αποφεύγονται.
- ❖ Τα απλά θερμοκήπια είναι πιο φωτεινά από τα πολλαπλά, γιατί δέχονται περισσότερο διάχυτο φωτισμό από τα πλευρικά τοιχώματα, όμως παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας και μικρότερη εκμετάλλευση εδάφους.
- ❖ Η πυκνότητα των φυτών στο χώρο του θερμοκηπίου, η οποία θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το φως που φθάνει στα φυτά να καλύπτει τις απαιτήσεις τους ως προς την της φωτοσυνθετική λειτουργία.

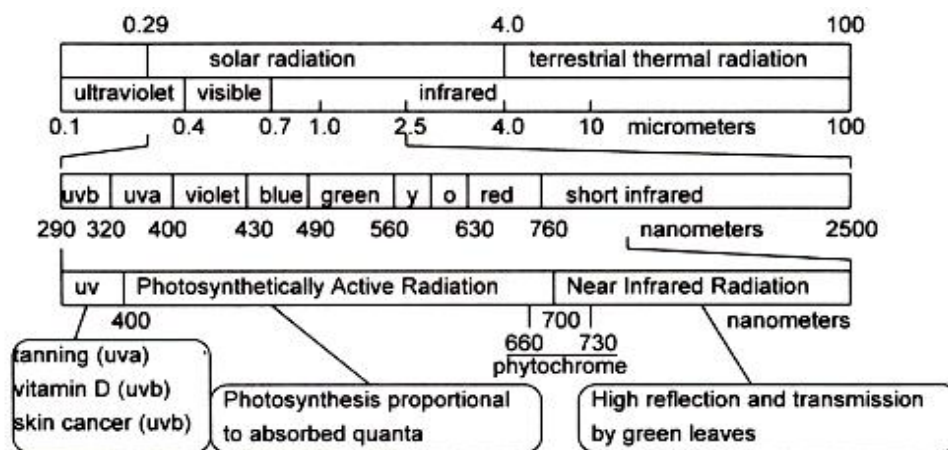
Όσον αφορά τον τεχνητό φωτισμό, τα θερμοκηπιακά είδη έχουν διαφορετικές απαιτήσεις φωτισμού και ανάλογα, αντιδρούν θετικά όταν η διάρκεια της νύχτας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη (φαινόμενο φωτοπεριοδισμού). Συνεπώς, όταν δεν επαρκεί ο φυσικός φωτισμός, όπως συμβαίνει τον χειμώνα που η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη, χρησιμοποιείται συχνά συμπληρωματικός φωτισμός με λαμπτήρες. Ο τεχνητός φωτισμός για την αύξηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας θεωρείται οικονομικά μάλλον ασύμφορος (εγκατάσταση, ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται), για αυτό χρησιμοποιείται μόνο, σε περιπτώσεις που οικονομικά αποδίδει, όπως π.χ. σε ανθοκομικές καλλιέργειες που απολαμβάνουν υψηλές τιμές το χειμώνα. Γίνεται όμως για πειραματικούς σκοπούς και χρησιμοποιούνται θάλαμοι, οι οποίοι διαθέτουν μόνο τεχνητό φωτισμό (80% λαμπτήρες φθορισμού και 20% λαμπτήρες πυρακτώσεως). Οι λαμπτήρες ανάβουν μετά τη δύση του ηλίου και είναι αποδοτικότερο να ανάβουν αργά τη νύχτα. Υπάρχουν δύο τύποι λαμπτήρων: λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού. Στοιχεία που αφορούν σε περαιτέρω αναλύσεις για τους λαμπτήρες και τη χρήση τους βρίσκονται στη βιβλιογραφία (Μαυρογιαννόπουλος 2001).

Ο τεχνητός φωτισμός για την αύξηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας μπορεί να είναι συνεχής ή κυκλικός με μετακινούμενες σειρές λαμπτήρων που η κάθε σειρά περιλαμβάνει 4, 6, 8 ή 10 λαμπτήρες που κρέμονται από τους σωλήνες θέρμανσης. Η ταχύτητα μετακίνησης είναι συνήθως 1m/min. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται μικρότερο κόστος εγκατάστασης, περίπου το 40% αυτής με συνεχή φωτισμό.

2.1.3 Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο ήλιος παράγει ενέργεια από μετατροπή της ύλης με ρυθμό εκατομμυρίων τόνων ανά δευτερόλεπτο. Κάθε χρόνο η ηλιακή ακτινοβολία που περνά την ατμόσφαιρα της γης είναι περίπου 2520.1012 GJ. Αυτό είναι 30000 φορές η χρησιμοποιούμενη παγκοσμίως ενέργεια, αλλά υπολογίζεται ότι αντιπροσωπεύει το μισό του χιλιοεκατομμυριοστού της συνολικά εκπεμπόμενης ενέργειας από τον ήλιο.

Η μέση ένταση της ηλιακής ενέργειας μετρημένη σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία, ανά μονάδα χρόνου και σε ύψους 165 Km από την επιφάνεια της γης είναι περίπου 1.35 KW/m², γνωστή ως ηλιακή σταθερά. Στο υπεριώδες (300-380 nm) αντιστοιχεί το 7% της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει έξω από την ατμόσφαιρα (η ακτινοβολία με $\lambda < 300\text{nm}$ απορροφάται εξ'ολοκλήρου από το O₃ των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας), στο ορατό (380-780nm) το 47% και στο υπέρυθρο (780-3000nm) το 46% (σχήμα 1). Η ηλιακή σταθερά μεταβάλλεται κατά $\pm 3\%$ λόγω μεταβολής της απόστασης Γης-ήλιου κατά την διάρκεια του χρόνου. Η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 1.2 KW/m², με συνολικά λαμβανομένη ενέργεια 21-29 MJ/m² την ημέρα και συμβαίνει μόνο κοντά στον Ισημερινό τις καθαρές ημέρες. Σε αστικές περιοχές είναι περίπου 0.8 KW/m² και στην ύπαιθρο φτάνει 1 KW/m² υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και στο επίπεδο της θάλασσας (Mayers and Mackson, 1982).



Σχήμα 1: Τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που δείχνει τις βιολογικά σημαντικές αλληλεπιδράσεις με τα φυτά

Η ακτινοβολία που φτάνει σε μια επιφάνεια αποτελείται από την άμεση και την διαχεόμενη ακτινοβολία, καθώς και από την ακτινοβολία που ανακλάται στο έδαφος.

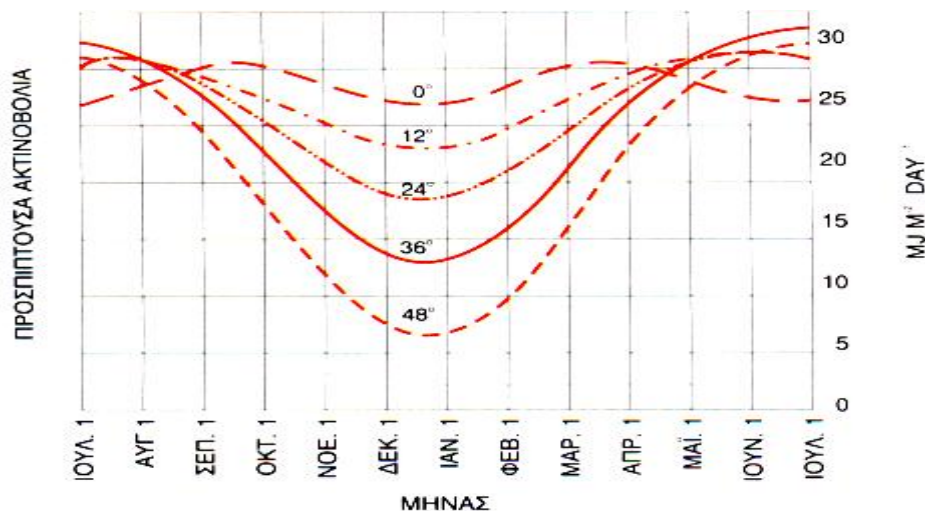
Η άμεση ακτινοβολία είναι αυτή που φτάνει σε μια επιφάνεια σε κατευθείαν γραμμή από τον ήλιο και μπορεί να εστιαστεί από επιπέδους η κυρτούς φακούς και κοίλα κάτοπτρα. Η διαχεόμενη είναι αυτή που έχει διαχυθεί κατά την δίοδο της μέσα από την ατμόσφαιρα λόγω

σκέδασης που οφείλεται στα μόρια του αέρα, στους υδρατμούς, στα σωματίδια της σκόνης και λόγω απορροφήσεως από τα μόρια O_3 , H_2O , και CO_2 , δεν μπορεί να εστιαστεί, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί από επίπεδους αλλά όχι εστιακούς ηλιοσυλλέκτες. Η κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης στο επίπεδο της θάλασσας εξαρτάται από την γωνία που σχηματίζει ο ήλιος με το ζενίθ Θ_Z , δηλαδή από τον συνολικό αριθμό σωματιδίων που συναντά η ακτίνα κατά την διαδρομή της.

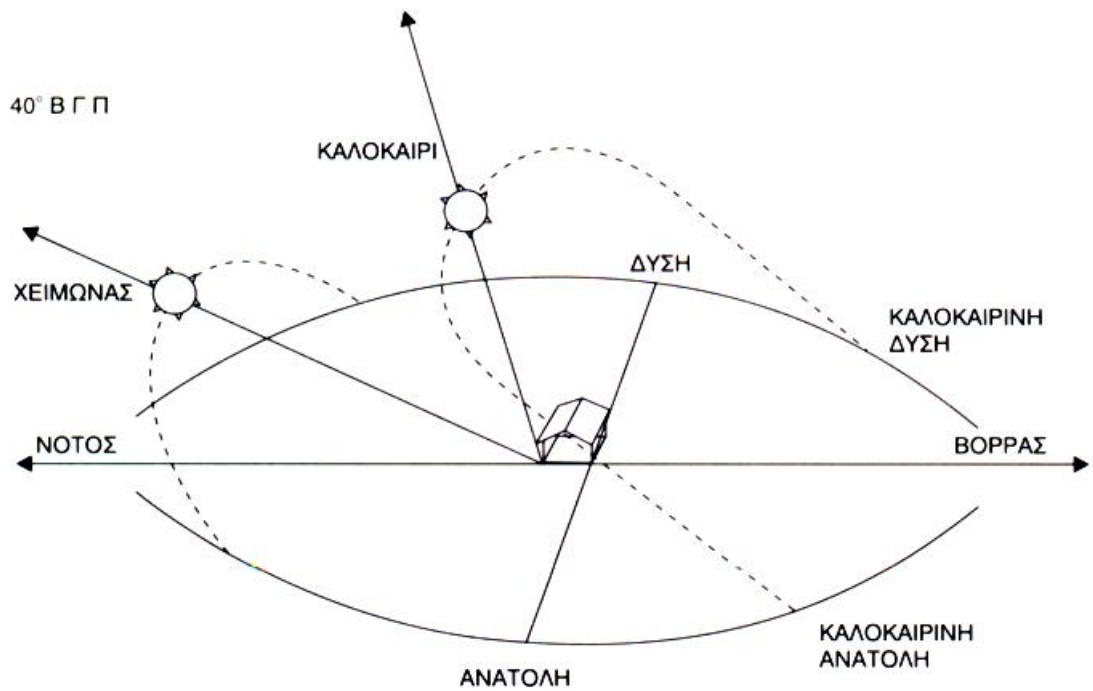
Η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη συνεχώς λόγω του κύκλου ημέρας/νύχτας.

Η ένταση της ποικίλει σε σχέση με την εποχή, το γεωργικό πλάτος και την θέση της επιφάνειας (σχήμα 2). Η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της έχει αποτέλεσμα τον κύκλο ημέρας/νύχτας και οι εποχές είναι αποτέλεσμα της κλίσης του πολικού άξονα της γης σχετικά με το επίπεδο της τροχιάς και της περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο (σχήμα 3). Τέλος η θέση μιας επιφάνειας έχει σημαντική επίδραση στην ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται και μπορεί να συλλεγεί. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας και η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με το έδαφος είναι τα κύρια στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν (Μαυρογιαννόπουλος 2001, Γιανούλης 2001).

Όσον αφορά την χώρα μας σε σχέση με το σχήμα 2, βρίσκεται στο Βόρειο ημισφαίριο και στο γεωγραφικό πλάτος των 40° , με κλιματολογικές συνθήκες αυτές του Μεσογειακού κλίματος όπως έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1.



Σχήμα 2. Ηλιακή ακτινοβολία Σ ημέρας με καθαρό ουρανό, σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους, σε διάφορα βόρεια γεωγραφικά πλάτη



Σχήμα 3: Τροχιά του ηλίου στον ουρανό κατά το χειμώνα και το καλοκαίρι.

2.1.4 Θερμοκήπιο και Ηλιακή Ακτινοβολία

Η μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία (200-3000nm) περιλαμβάνει την υπεριώδη ακτινοβολία 190-380 nm, με την υψηλότερη ενέργεια που καταστρέφει τους δεσμούς των οργανικών ενώσεων που προσπίπτει, την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) 400-700 nm η οποία είναι απαραίτητη για την φωτοσύνθεση που είναι η βασική διαδικασία για την φυτική παραγωγή, και την κοντινή υπέρυθρη 700-3000 nm που επηρεάζει την φυτική διαπνοή διότι συμμετέχει σημαντικά στην θέρμανση των φυτών καθώς και τις μορφοποιητικές διαδικασίες των φυτών.

Αν θεωρήσουμε ένα οικοσύστημα θερμοκηπίου, η μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία παίζει έναν προσθετικό ρόλο στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος του θερμοκηπίου, δηλ. στο ενεργειακό ισοζύγιο της κατασκευής (δομικά στοιχεία και κάλυμμα) και επίσης στα ενεργειακά ισοζύγια του καλυμμένου εδάφους και της καλλιέργειας. Το επίπεδο της ακτινοβολίας εντός του θερμοκηπίου εξαρτάται κυρίως από την διαπερατότητα του υλικού κάλυψης, αλλά επίσης από τον τύπο και προσανατολισμό της κατασκευής του θερμοκηπίου. Γνώση των χαρακτηριστικών της διαπερατότητας του υλικού κάλυψης είναι σημαντική όταν εκτιμώνται τα δυνατά πλεονεκτήματα των διαφόρων υλικών κάλυψης, διότι είναι γνωστό ότι μικρές διαφορές στην ηλιακή μεταβιβαστικότητα μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη της καλλιέργειας (Papadakis et al, 2000).

Η ηλιακή ακτινοβολία όχι μόνο παρέχει ενέργεια στο σύστημα του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της ημέρας (ένα τμήμα αυτής επίσης αποθηκεύεται στο σύστημα και απελευθερώνεται κατά την διάρκεια της νύχτας), αλλά προάγει την φωτοσύνθεση. Είναι προφανές ότι τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου θα πρέπει να επιτρέπουν στην PAR να φτάνει στην καλλιέργεια, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία έξω από το εύρος της PAR δεν είναι πάντα επιθυμητή εντός του θερμοκηπίου ειδικά κατά την διάρκεια θερμής περιόδου. Ο Cockshull et al (1992) έδειξαν ότι μια αύξηση 1% της PAR αύξησε τις αποδόσεις ντομάτας

μακράς περιόδου (χειμερινή καλλιέργεια) κατά προσέγγιση 1% δηλ. μια αναλογικότητα μεταξύ της απόδοσης και της ηλιακής ακτινοβολίας, αποδεικνυόμενη κυρίως στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Η ποιότητα της ακτινοβολίας που το υλικό κάλυψης επιτρέπει να εισέλθει στο θερμοκήπιο είναι σημαντική για εκτίμηση της επίδρασης της στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Συγκεκριμένα η PAR στα 400-700nm ζώνης κύματος, τυγχάνει μεγαλύτερης προσοχής απ'ότι τα άλλα μήκη κύματος εξαιτίας του θεμελιώδους ρόλου της στην φωτοσύνθεση. Οι μετρήσεις αυτής της ακτινοβολίας γίνονται με τον μετρητή PAR που μετρά σχετικά με την ευαισθησία της χλωροφύλλης και υπολογίζεται ότι αντιστοιχούν στο 45% της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που μετρά το πυρανόμετρο (Kittas et al 1999, Μαυρογιαννόπουλος 2001, Γιαννούλης 2001).

Η ανύψωση της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο εξαρτάται από την εισερχόμενη ακτινοβολία (κυρίως την ηλιακή κατά την διάρκεια της ημέρας και από την θερμότητα που παρέχεται από το σύστημα θέρμανσης στα τεχνητά θερμαινόμενα θερμοκήπια), και από τις απώλειες διαμέσου του καλύμματος (θερμική ακτινοβολία, απώλειες αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας). Είναι εμφανές ότι το κάλυμμα παίζει πολύ σημαντικό ρολό σε όλους εκείνους τους μηχανισμούς της μεταφοράς ακτινοβολούμενης και αισθητής θερμότητας. Εκτός από οποιαδήποτε τεχνητή παρέμβαση(ανοίγματα εξαερισμού, δομικός σχεδιασμός, προσανατολισμός), οι παράμετροι που αφορούν το εξωτερικό κλίμα και τις ραδιομετρικές και θερμικές ιδιότητες του καλύμματος είναι σχεδόν αποκλειστικά υπεύθυνοι για τον καθορισμό του μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο. Οποιασδήποτε υπαρκτός μηχανισμός ελέγχου του μικροκλίματος, όπως σύστημα θέρμανσης η δροσισμού, λειτουργεί έτσι ώστε να φέρει το εσωτερικό μικροκλίμα πλησιέστερα στις επιθυμητές συνθήκες καλλιέργειας (Briassoulis et al, 1997).

2.1.5 Ραδιομετρικές και Θερμικές Ιδιότητες των Υλικών Κάλυψης

Το φάσμα ενδιαφέροντος της ηλιακής ακτινοβολίας για τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου παρατίθεται στον πίνακα:

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, nm
Ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους)	≈ 200-3000
Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR)	≈ 400-700
Θερμική ακτινοβολία (μεγάλου μήκους)	> 3000

Όλες οι επιφάνειες πάνω στη γη δέχονται μικρού μήκους ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της θερμοκρασίας του ήλιου (νόμος του Wien) και ανταλλάσσουν μεγάλο μήκος συνεχώς με την ατμόσφαιρα και μεταξύ τους.

Η θερμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σώμα συνήθους θερμοκρασίας, εξαιτίας της θερμοκρασίας του. Η ακτινοβολία ροή της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Θερμά αντικείμενα ακτινοβολούν περισσότερη ενέργεια στα ψυχρότερα απ'ότι λαμβάνουν. Αυτό καταλήγει σε καθαρή απώλεια ενέργειας ή βαθμιαία ψύξη ενός θερμού αντικειμένου.

Από τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου άλλα επιτρέπουν την διέλευση της θερμικής ακτινοβολίας (πλαστικά), ενώ άλλα μέσω της απορρόφησης, την εμποδίζουν (γυαλί). Η

περατότητα ή μη την θερμική ακτινοβολία είναι πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών κάλυψης. Αυτά που δεν είναι διαπερατά όπως το γυαλί εκδηλώνουν το καλούμενο «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Δηλ. ενώ επιτρέπουν την είσοδο της μικρού μήκους ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας μέσα στο θερμοκήπιο, δεν επιτρέπουν την έξοδο της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα φυτά και το έδαφος και έτσι δημιουργείται μια παγίδα θερμότητας, στην οποία οφείλεται κατά 30% η αύξηση της θερμοκρασίας ενός υαλόφρακτου θερμοκηπίου. Συνεπώς τον χειμώνα, εκείνα που τελικά εμποδίζουν τη θερμική ακτινοβολία, τείνουν να συντηρούν καλύτερα την ενέργεια και να διατηρούν το θερμοκήπιο θερμότερο σε σχέση με άλλα υλικά.

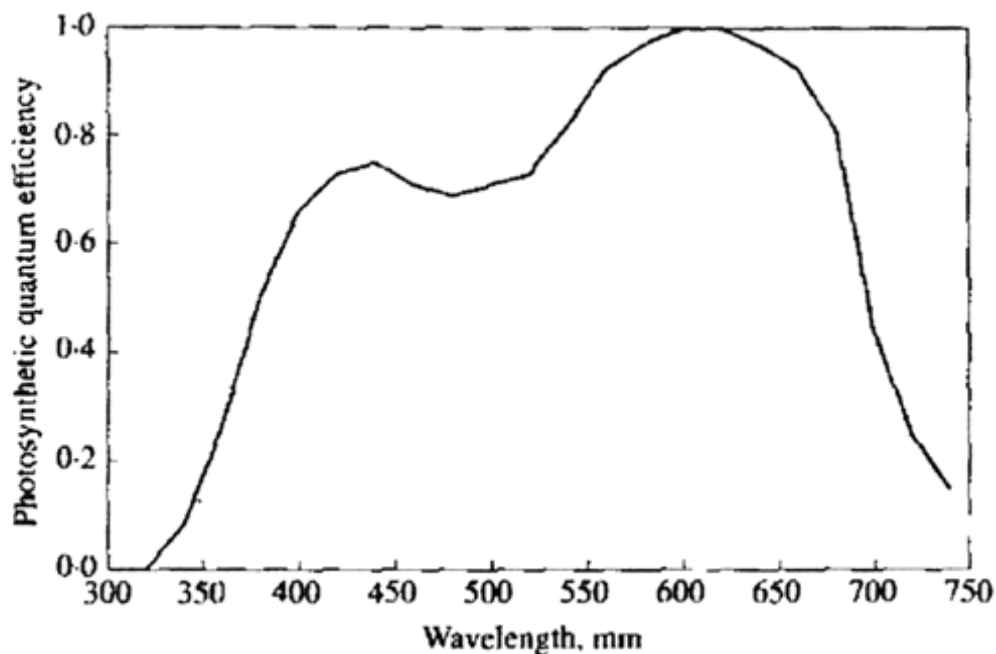
Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα υλικό είναι: ανακλώμενη, απορροφούμενη και διερχόμενη. Ένα υλικό που επιτρέπει ένα μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας να το διαπεράσει καλείται διαφανές, ενώ ένα υλικό που μπλοκάρει την ακτινοβολία καλείται αδιαφανές. Η ακτινοβολία διαπερνά ένα διαφανές υλικό με δυο τρόπους: ως άμεση και ως διαχεόμενη. Η άμεση λαμβάνει χώρα όταν η ακτινοβολία διαπερνά απ' ευθείας το υλικό διατηρώντας την ίδια διεύθυνση με εκείνη του προσβάλλοντος φωτισμού με κάποια μικρή απόκλιση. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι σκιές από τα αντικείμενα που εμποδίζουν την πορεία της (σκελετικά στοιχεία) να είναι πολύ έντονες. Από την άλλη ένα διαφανές ή ημιδιαφανές υλικό όμως προκαλεί σκέδαση στις ακτίνες ακτινοβολίας. Αυτό αναγκάζει την ακτινοβολία να εισέλθει σε όλες τις κατευθύνσεις, δίνοντας ισοτροπική κατανομή της ακτινοβολίας και αδύναμες σκιάσεις στην πλευρά του υλικού που βρίσκεται αντίθετα στην πηγή ακτινοβολίας. Το τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται, ορίζεται ως ανακλαστικότητα (ρ), το τμήμα που απορροφάται ως απορροφητικότητα (α) και το τμήμα που περνάει εντός διαπερατότητα (τ).

Η φασματική διαπερατότητα $\tau(\lambda)$ του υλικού κάλυψης είναι το κλάσμα της κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας, εκπεμπόμενης σε συγκεκριμένο μήκος κύματος λ , ενώ ένας μέσος συντελεστής ηλιακής διαπερατότητας τ_s ορίζεται σαν την μέση διαπερατότητα πάνω σε συγκεκριμένη ηλιακή ζώνη κύματος, υπολογιζόμενο από την συνάρτηση της πυκνότητας κατανομής του μήκους κύματος μέσα στο ηλιακό φάσμα. Η $\tau(\lambda)$ μετριέται με τα φασματοφωτόμετρα (Papadakis et al, 2000).

Ο μέσος συντελεστής ηλιακής ανακλαστικότητας του καλύμματος μπορεί να ευρεθεί με τον ίδιο τρόπο, ενώ η φασματική ανακλαστικότητα $\rho(\lambda)$ μετριέται με τα φασματοφωτόμετρα. Από την στιγμή που έχουν υπολογιστεί τα τ και ρ , εν συνεχεία ο μέσος συντελεστής απορροφητικότητας να υπολογίζεται από τον νόμο του Kirchoff

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

Αρχικά από τον Mc Cree το 1972 παρατηρήθηκε ότι η ποσοτική απόδοση της φωτοσύνθεσης εξαρτάται από το μήκος κύματος. Για να καθορίσουμε την ποσοτικά αποδοτική διαπερατότητα στα μήκη κύματος 400-700 nm δηλ. την PAR διαπερατότητα, είναι απαραίτητο να εισάγουμε έναν παράγοντα στάθμισης της φωτοσύνθεσης $D(\lambda)$ για να υπολογίσουμε την σχετική φωτοσυνθετική απόδοση στα διάφορα μήκη κύματος (Pearson et al, 1995). Ο φωτοσυνθετικός αυτός παράγοντας καθορίζεται από την σχέση της ποσοτικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4 ((Pearson et al, 1995): Σχέση ποσοτικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης και μήκους κύματος (λ) της ακτινοβολίας

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, η απορρόφηση χλωροφύλλης, που είναι ο συλλέκτης ενέργειας για τα φυτά, δείχνει ένα μέγιστο στην περιοχή του μπλε (350-450 nm), που είναι περιοχή υψηλής ενέργειας και ένα δεύτερο μεγαλύτερο μέγιστο στην περιοχή του κόκκινου (600-700 nm), που είναι περιοχή χαμηλότερης ενέργειας σε σχέση με την περιοχή του μπλε.

Η απόδοση (n) αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας (Photosynthetic quantum efficiency) δίδεται από την σχέση: $n = \text{χρησιμοποιούμενη ενέργεια (αυτή που αποδίδεται υπό μορφή ακτινοβολίας)} / \text{απορροφούμενη ενέργεια}$.

Είναι γνωστό ότι η κίνηση των χλωροπλαστών είναι σύνηθες φαινόμενο στα ανώτερα φυτά. Με τον έλεγχο της κίνησης των χλωροπλαστών, τα φύλλα μπορούν να ελέγχουν πόσο φως θα απορροφήσουν. Έτσι η προαναφερθείσα απόδοση (n) στην περιοχή του μπλε (350-450 nm) είναι μικρότερη, διότι οι χλωροπλάστες μετακινούνται στα περιθώρια των επιφανειακών κυττάρων, ώστε να είναι παράλληλοι προς το εισερχόμενο φως, αποφεύγοντας την υπερβολική απορρόφηση του φωτός και κατ' επέκταση την υπερβολική φωτοσύνθεση, διαπνοή κλπ. Αντίθετα, στην περιοχή του κόκκινου (600-700 nm), οι χλωροπλάστες συγκεντρώνονται στα επιφανειακά κύτταρα παράλληλα στην επιφάνεια του φύλλου, έτσι ώστε να παρατάσσονται κάθετα το εισερχόμενο φως, θέση που μεγιστοποιεί την απορρόφηση του φωτός συνεπώς και την φωτοσυνθετική διαδικασία και μεγαλύτερη απόδοση στην περιοχή του κόκκινου (Καραταγλής, 1994).

2.1.6 Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

Η επιλογή των υλικών κάλυψης του θερμοκηπίου είναι ύψιστης σπουδαιότητας στην συνολική συμπεριφορά του συστήματος παραγωγής του θερμοκηπίου, διότι οι ραδιομετρικές ιδιότητες του υλικού παίζουν κυρίαρχο ρόλο και στο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου και στη συμπεριφορά της καλλιέργειας. Από ποσοτική άποψη η διερχόμενη ποσότητα ηλιακής ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο οδηγείται με φυσιολογικές ροές. Η διαπνοή εξαρτάται από την ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην φυτική κόμη (κοντινό υπέρυθρο), και η φωτοσύνθεση εξαρτάται από την ποσότητα της PAR (400-700 nm) που

απορροφάται από τα φυτά, καθορίζοντας έτσι την συνολική παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Από ποιοτικής άποψης το φάσμα της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί σημαντικά να τροποποιηθεί από τις οπτικές ιδιότητες του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου. Αυτές οι ποιοτικές αλλαγές στη διερχόμενη ακτινοβολία επάγουν μορφογενετικές επιδράσεις και μπορούν να καταλήξουν σε τροποποιήσεις στη δομή και στο σχήμα των φυτών, με σημαντικές επιπτώσεις, σε μερικές περιπτώσεις, στην αξία της παραγωγής, ειδικά στα καλλωπιστικά φυτά (Kittas and Baille, 1998).

Η σπουδαιότητα των ραδιομετρικών ιδιοτήτων των υλικών κάλυψης έγκειται και στο γεγονός ότι μπορούν να επηρεάσουν την έκταση των ασθενειών της καλλιέργειας από την απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας που κάποια από αυτά προκαλούν. Για παράδειγμα κάποια λεπτά πλαστικά (PE) που απορροφούν υπεριώδη ακτινοβολία η οποία απαιτείται για τα σπόρια διαφόρων μυκήτων (Reuveni and Ravin, 1997). Το αντίθετο αποτέλεσμα συμβαίνει πάνω στην ποιότητα κατά την παραγωγή μελιτζάνας από την χρήση καλυμμάτων τα οποία απορροφούν στην περιοχή του υπεριώδους (<380 nm), κάτι το οποίο απαιτείται για να αποκτήσει η μελιτζάνα μωβ χρώμα και επίσης φτωχή επικονίαση μέσα στα θερμοκήπια οπού η προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία εξουδετερώνει την ακτινοβολία η οποία διεγείρει τα ματιά των μελισσών που επικονιάζουν (Papadakis et al, 2000).

Οι ραδιομετρικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης στην μικρού μήκους ακτινοβολία, επηρεάζουν άμεσα το μικροκλίμα εντός του θερμοκηπίου. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία είναι η πρωταρχική δύναμη για την φυτική παραγωγή και επίσης η κύρια εισερχόμενη ροή ενέργειας διατίθεται δωρεάν, η διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου του καλύμματος του θερμοκηπίου έχει μελετηθεί πειραματικά και θεωρητικά. Ο Kurata (1991) ερεύνησε πειραματικά την επίδραση στην ηλιακή διαπερατότητα του θερμοκηπίου, την εφαρμογή ενός καλύμματος ειδικού τύπου Fresnel πρίσματος στην νότια στέγη ενός Ανατολής -Δύσης προσανατολισμένου και ενός ανοίγματος θερμοκηπίου, χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας, ενώ οι Papadakis et al (1998) μελέτησαν την διαπερατότητα του θερμοκηπίου ως μια συνάρτηση του μήκους και πλάτους ενός ανοίγματος θερμοκηπίου.

Η σημαντική κατεύθυνση των περισσότερων μοντέλων είναι να παρέχουν ένα εργαλείο για εκτίμηση της επίδρασης της διαφορετικής κατασκευής θερμοκηπίου με διαφορετικά υλικά κάλυψης πάνω στην συνολική διέλευση της ακτινοβολίας. Ένα άλλο αντικείμενο των μοντέλων της ηλιακής διέλευσης είναι ο υπολογισμός της διαπερατότητας του θερμοκηπίου κάθε στιγμή της ημέρας, ως συνάρτηση της θέσης του ηλίου, ώστε η ανάπτυξη της καλλιέργειας και το εσωτερικό κλίμα του θερμοκηπίου να μπορούν να προσομοιωθούν. Όλα αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπ' όψιν τους με τον έναν ή άλλον τρόπο τις ραδιομετρικές ιδιότητες του καλύμματος. Η μεταφορά θερμικής ακτινοβολίας είναι ένας σημαντικός μηχανισμός υπεύθυνος για τις απώλειες θερμότητας των καλυμμάτων πολυαιθυλενίου (PE) στα θερμοκήπια, διότι το PE αντίθετα με το γυαλί έχει υψηλή διαπερατότητα στη θερμική ακτινοβολία (Spanomitsios, 2001). Συνεπώς η ανταλλαγή με το περιβάλλον θερμικής ακτινοβολίας περιλαμβάνεται σε κάθε μελέτη του ντος θερμοκηπίου και σύνθετοι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για έρευνα του προβλήματος. Οι ραδιομετρικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην περίπτωση της μεταφοράς της θερμικής ακτινοβολίας (Silva et al 1991, Papadakis et al 1989a).

Στο παρελθόν το <<Φαινόμενο του Θερμοκηπίου>> θεωρήθηκε η κύρια αιτία για την εξέλιξη του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Με αυτήν την έννοια σήμαινε ότι η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο θερμοκήπιο μέσω του διαφανούς καλύμματος, απορροφάται εντός του θερμοκηπίου και δεν μπορεί να διαφύγει με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας διότι το κάλυμμα δεν είναι διαπερατό στην θερμική ακτινοβολία. Είναι γνωστό πια ότι αυτό το φαινόμενο έχει μια μικρή επιρροή στην ανάπτυξη του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Τα κανονικά λεπτά φύλλα PE που χρησιμοποιούνται συνήθως ως υλικά κάλυψης έχουν υψηλή διαπερατότητα στη θερμική ακτινοβολία όταν ειδικά δεν υπάρχει συμπύκνωση υδρατμών

(Pollet and Pieters 1999, 2000, 2001). Αυτό το γεγονός συνεπάγεται ότι το μικροκλίμα διαφέρει τελείως σε ένα θερμοκήπιο με κάλυψη πολυαιθυλενίου (PE) και σε ένα υαλόφρακτο θερμοκήπιο.

Κατά την διάρκεια της ημέρας, το κάλυμμα, ο σκελετός και η επιφάνεια του εδάφους απορροφούν ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και αυξάνει η θερμοκρασία τους. ο εσωτερικός αέρας έρχεται σε επαφή με αυτές τις επιφάνειες, απορροφά θερμότητα και η θερμοκρασία του αυξάνει επίσης με έναν ρυθμό που εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας, τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τον ρυθμό εναλλαγής αέρα (Papadakis et al, 2000). Έτσι η χρήση του όρου «φαινόμενο θερμοκηπίου» θα πρέπει να αναφέρεται στην διαδικασία ακτινοβολίας και μεταφοράς διαφορετικά μπορεί να είναι παραπλανητικό. Επίσης και τα φυτά απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία αλλά η θερμοκρασία τους παραμένει συνήθως χαμηλότερη από αυτήν του αέρα του θερμοκηπίου, γιατί τα φυτά αποβάλλουν την πλεονάζουσα ενέργεια με τη διαπνοή (Papadakis et al, 1994).

Κατά την διάρκεια της νύχτας το κάλυμμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία στο περιβάλλον και επίσης ανταλλάσει ενέργεια με τον εσωτερικό και εξωτερικό αέρα. Στα θερμαινόμενα θερμοκήπια, η θερμοκρασία καλύμματος είναι μεταξύ της θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού αέρα. Στα καλυμμένα με PE και χωρίς θέρμανση θερμοκήπια κατά την διάρκεια ψυχρών, υψήνεμων και ξάστερων νυχτών, οι καθαρές απώλειες ακτινοβολίας του ίδιου του καλύμματος είναι τόσο έντονες μετά το ηλιοβασίλεμα ώστε το θερμοκρασιακό ισοζύγιο του καλύμματος γίνεται αρκετούς βαθμούς χαμηλότερο από ότι ο εξωτερικός αέρας και επίσης χαμηλότερο από ότι ο αέρας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αυτό καταλήγει σε θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου χαμηλότερη σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία διότι ο αέρας του θερμοκηπίου χάνει θερμότητα λόγω μεταφοράς προς το ψυχρότερο κάλυμμα. Η θερμοκρασία του καλύμματος παραμένει χαμηλότερη από εκείνη του αέρα του θερμοκηπίου διότι ο ρυθμός απωλειών θερμικής ακτινοβολίας είναι υψηλότερος σε σχέση με τον ρυθμό μεταφερομένης θερμότητας που αποκτά από τον αέρα (Silva et al 1991, Spanomitsios 2001).

Τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου αποτελούν το φραγμό ανάμεσα στην καλλιέργεια και το εξωτερικό περιβάλλον. Το κάλυμμα όχι μόνο θα πρέπει να παρέχει ένα καταφύγιο κατά την διάρκεια δυσμενών καιρικών συνθηκών αλλά θα πρέπει επίσης να προάγει την μετατροπή του μικροκλίματος για διασφάλιση βέλτιστης ανάπτυξης της καλλιέργειας. Είναι επιθυμητό ένα υλικό κάλυψης να έχει καλά μονωτικά(θερμικά) χαρακτηριστικά, αλλά επειδή τα καλύμματα είναι γενικώς λεπτά έχουν μικρή θερμοχωρητικότητα και δείχνουν φτωχή μονωτική συμπεριφορά.

Το τέλειο κάλυμμα εκτός από καλά μονωτικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να επιτρέπει το 100% της PAR διαπερατότητας και να εμποδίζει την ηλιακή ακτινοβολία έξω από την PAR ανάλογα με τις απαιτούμενες εσωτερικές κλιματικές συνθήκες και τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Τέτοια χαρακτηριστικά τείνουν όμως να εξουδετερώνουν το ένα το άλλο και κανένα υλικό δεν έχει κατασκευαστεί έως τώρα που να επιδεικνύει τέτοιες ιδιότητες.

2.1.7 Ταξινόμηση Υλικών Κάλυψης

Πλαστικά

- Ø Θερμοπλαστικά υλικά: χάνουν το σχήμα τους όταν θερμανθούν και μπορεί να ανασχηματισθούν όταν αφεθούν να κρυώσουν χωρίς να χάσουν σημαντικά χαρακτηριστικά από τις ιδιότητες τους. Στην ιδιότητα αυτή βασίζεται η θερμοσυγκόλιση (PE, PVC, PC, PMMA).
- Ø Θερμοσκληρά υλικά: υφίστανται μια χημική μεταβολή κατά τη διάρκεια του σχηματισμού τους από τη ρευστή στη στερεή κατάσταση, που τα καθιστά αμετάβλητα στο σχήμα, χωρίς να είναι δυνατόν να μαλακώσουν με τη θερμοκρασία ή να ρευστοποιηθούν πάλι (Βακελίτης, ενισχυμένος πολυεστέρας).
- Ø Ελαστομερή: διακρίνονται από την πολύ υψηλή ελαστικότητα που έχουν. Αυτά χαρακτηρίζονται θεωρητικά ως θερμοσκληρά υλικά, αλλά παρουσιάζουν κάποια μικρή δυνατότητα επαναφοράς τους μετά από τη θέρμανση.

Οι βασικές ιδιότητες των πλαστικών είναι:

- Επιδεικνύουν ανθεκτικότητα στην ατμοσφαιρική διάβρωση και στη διάβρωση πολλών χημικών αντιδραστηρίων.
- Έχουν αρκετά χαμηλή σχετική πυκνότητα, μερικά μόλις επιπλέουν στο νερό. Τα περισσότερα είναι λίγο πυκνότερα.
- Μεγάλος αριθμός πλαστικών παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στην έλξη σε σχέση με το βάρος τους (αντοχή/βάρος). Η αντοχή των θερμοπλαστικών μειώνεται γρήγορα με την άνοδο της θερμοκρασίας τους.
- Η πλειοψηφία των πλαστικών μαλακώνουν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και ελάχιστα μπορούν να φανούν χρήσιμα για θερμοκρασίες υψηλότερες των 100 °C. Ένας μεγάλος αριθμός πλαστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή διαφανών επιφανειών ή φύλλων, χωρίς κανένα χρωματισμό, ενώ τα περισσότερα έχουν ευχάριστη εμφάνιση και μπορούν να χρωματιστούν.

Τα σοβαρά μειονεκτήματα των πλαστικών υλικών κάλυψης (Dilara and Briassoulis, 2000) είναι η μειωμένη περατότητα στο φως ιδίως μετά την πάροδο κάποιων χρονών (περίπου 3 έτη στα θερμοπλαστικά υλικά), μεγάλο συντελεστή θερμοπερατότητας, διαπερατότητα στην θερμική ακτινοβολία, ευαισθησία στη γήρανση, μικρή αντίσταση στα χτυπήματα από χαλάζι, και στο σκίσιμο, ευαισθησία στη συγκράτηση σκόνης, τρόπος συμπύκνωσης υγρασίας (με σταγόνες και όχι σε μεμβράνη όπως συμβαίνει στους υαλοπίνακες), διαπερατότητα στη υπεριώδη ακτινοβολία, ευαισθησία στις διάφορες χημικές ουσίες.

Υαλοπίνακες

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του γυαλιού σαν υλικό κάλυψης των θερμοκηπίων είναι η διατήρηση των ιδιοτήτων του με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι ένας υαλοπίνακας θερμοκηπίου έχει πρακτικά την ίδια περατότητα στο φως για πολλά χρόνια σε σχέση με έναν καινούργιο, πράγμα που δεν συμβαίνει με κανένα άλλο υλικό κάλυψης. Συνεπώς τα υαλόφρακτα θερμοκήπια έχουν μικρότερο συντελεστή θερμοπερατότητας με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση. Η πιθανή μείωση της φωτεινότητας

του γυαλιού οφείλεται στις ακαθαρσίες που όμως είναι δυνατόν να απομακρυνθούν. Ο υαλοπίνακας είναι αδιαπέραστος στα αέρια και τους υδρατμούς. Τα προβλήματα στεγανότητας που μπορεί να εμφανιστούν στα υαλόφρακτα θερμοκήπια, προέρχονται από κακή επαφή που παρουσιάζεται σταδιακά στα σημεία στήριξης του υαλοπίνακα με το σκελετό και από το σπάσιμο των υαλοπινάκων που προέρχεται από χαλάζι ή από απροσεξία, λόγω του εύθραυστου που χαρακτηρίζει το γυαλί. Ο υαλοπίνακας μπορεί να είναι διαφανής, με τις δύο του επιφάνειες, επίπεδες και λείες, ή διαφώτιστος, με την μια επιφάνεια κυματοειδή ή φολιδωτή, ώστε να διευκολύνει τη διάχυση του φωτός. Συνήθως στην οροφή θερμοκηπίου τοποθετούνται υαλοπίνακες με κυματοειδή ή φολιδωτή τη μια πλευρά για καλύτερη διάχυση του φωτός, ενώ στις πλευρές τοποθετούνται υαλοπίνακες με τις δύο τους επιφάνειες επίπεδες, διότι το φως που εισέρχεται από πλάγια είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος διάχυτο, προερχόμενο κυρίως από ανακλάσεις στο έδαφος ή άλλα αντικείμενα. Η μη επίπεδη πλευρά του υαλοπίνακα της οροφής τοποθετείται προς το εσωτερικό του θερμοκηπίου, για να μην συγκρατείται η σκόνη. Το ποσοστό διέλευσης της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας συνήθους πάχους υαλοπίνακες, είναι συγκριτικά από τα μεγαλύτερα, περίπου 90% και επειδή η περατότητα αυτή είναι σχεδόν σταθερή στο χρόνο, ο υαλοπίνακας αποτελεί το μέτρο σύγκρισης όλων των άλλων διαφανών υλικών. Σε ένα καινούργιο θερμοκήπιο το μεγαλύτερο ποσοστό φωτός, το οποίο αφήνει να διέλθει ο υαλοπίνακας, σε σχέση με ένα διαφανή υλικό, δεν σημαίνει απαραίτητα και σημαντικά μεγαλύτερη φωτεινότητα στο θερμοκήπιο, γιατί ο σκελετός στηρίξεως των μεγάλου βάρους και μικρού μεγέθους υαλοπινάκων παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό σκιάσεων (γι' αυτό το λόγο συνιστώνται όσο είναι δυνατόν, μεγαλύτερων διαστάσεων υαλοπίνακες). Με την πάροδο του χρόνου όμως, στα άλλα υλικά μειώνεται η περατότητα του φωτός, ενώ στους υαλοπίνακες παραμένει η ίδια και το θερμοκήπιο καθίσταται κατά μέσο όρο σημαντικά φωτεινότερο.

2.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ

2.2.1 Εισαγωγή

Το πρωταρχικό αντικείμενο των θερμοκηπίων είναι η παραγωγή αγροτικών προϊόντων εκτός καλλιεργητικής περιόδου. Αυτά έχουν αξιοσημείωτη σημασία στην αγορά της αγροτικής παραγωγής. Για κάθε καλλιέργεια υπάρχει η ευνοϊκή θερμοκρασία στην οποία τα ένζυμα που είναι ευαίσθητα στην θερμότητα και υπεύθυνα για τις βιοχημικές αντιδράσεις του φυτού ενεργοποιούνται. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος του φυτού και η θερμοκρασία του εδάφους που είναι σημαντικές για την ανάπτυξη του φυτού εξαρτώνται από την πυκνότητα του φωτός, την λήψη CO₂, την υγρασία, και την ταχύτητα του αέρα. Για να επιτευχθούν βέλτιστες εσωτερικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η θέρμανση, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των ψυχρών εποχών (Santamouris, 1993). Ο τομέας των θερμοκηπίων έχει μεγάλη δυνατότητα για ενεργειακό απόθεμα. Εφαρμογές θέρμανσης μέσα στα θερμοκήπια και βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας του αέρα έχουν σημαντικό αποτέλεσμα πάνω στην παραγωγή, καθώς επίσης στην ποιότητα και στον χρόνο καλλιέργειας (πρωίμιση παραγωγής). Κατά τον σχεδιασμό ενός θερμοκηπιακού συστήματος θέρμανσης διάφοροι παράγοντες λαμβάνονται υπ' όψιν. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι είναι προτεινόμενο η θερμοκρασία στο επίπεδο του φυτού να είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση του θερμοκηπίου. Επίσης η θερμοκρασία των καλλιεργειών κατά την διάρκεια της θέρμανσης πρέπει να είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία του σημείου δροσού, για να εμποδίζεται η συμπύκνωση των υδρατμών και έτσι να μειώνεται ο κίνδυνος μυκητολογικών ασθενειών. Επιπλέον η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη.

Τα συμβατικά θερμοκηπιακά συστήματα θέρμανσης διακρίνονται σε αυτά που μεταδίδουν τη θερμότητα με ακτινοβολία, μεταφορά και αγωγιμότητα μέσω μιας θερμαινόμενης επιφάνειας (μεταλλικοί ή πλαστικοί σωλήνες) τα οποία λέγονται στατικά συστήματα, και σε αυτά που μεταδίδουν τη θερμότητα με μεταφορά και αγωγιμότητα μέσω του θερμού αέρα που παράγεται με ηλεκτρογεννήτριες θερμού αέρα ή αερόθερμα και κυκλοφορεί εντός αγωγών ΡΕ, τα οποία λέγονται θερμοδυναμικά συστήματα. Τα πρώτα έχουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και δύσκολη ρύθμιση της λειτουργίας, αλλά ελάχιστα προβλήματα από καυσαέρια, ενώ πετυχαίνουν καλή ομοιογένεια θέρμανσης, ικανοποιητικό επίπεδο σχετικής υγρασίας και θέρμανσης του εδάφους και του αέρα. Ακόμη, σε περίπτωση βλάβης του συστήματος, η πτώση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου γίνεται βαθμιαία. Τα θερμοδυναμικά συστήματα έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, εύκολη ρύθμιση της λειτουργίας και πετυχαίνουν καλή ομοιομορφία θέρμανσης, γρήγορη θέρμανση των φυτών και μείωση της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης λόγω των ρευμάτων αέρα. Τέλος, με τα συστήματα αυτά υπάρχει μεγαλύτερη ευχέρεια κίνησης στο θερμοκήπιο, αφού καταλαμβάνουν μικρό όγκο. Όμως έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι δε θερμαίνεται το έδαφος, μειώνεται η σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, σε περίπτωση βλάβης του συστήματος μειώνεται απότομα η θερμοκρασία και όταν οι συσκευές είναι τοποθετημένες στο εσωτερικό υπάρχει κίνδυνος να ζημιωθούν τα φυτά από τα καυσαέρια.

Ένας δεύτερος διαχωρισμός των συστημάτων γίνεται στα τοπικά, στα οποία χρησιμοποιούνται αερόθερμα ή θερμάστρες (παραφίνης, υγραερίου, επαγωγής) ή συσκευές υπέρυθρης ακτινοβολίας και στα κεντρικά συστήματα θέρμανσης (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

2.2.2 Συστήματα Θέρμανσης Θερμοκηπίων

Θερμότητα και Θερμοκήπιο.

Τα περισσότερα είδη και ποικιλίες που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια είναι απαιτητικά σε ένταση φωτός και θερμότητα. Οι θερμικές ροές που συμβαίνουν λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει το θερμοκήπιο είναι:

1. Κάθε θερμοκήπιο, επειδή καλύπτεται με διαφανές κάλυμμα, δέχεται στο εσωτερικό του το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.
2. Οι απώλειες του θερμοκηπίου σε θερμότητα, λόγω του λεπτού τοιχώματος του καλύμματος είναι πολύ μεγάλες, 6-12 φορές μεγαλύτερες από εκείνες ενός συνήθους κτίσματος ίσου όγκου .
3. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που χάνεται τη νύχτα, όταν $T_o < T_a$ είναι άμεσα ανάλογη με την συνολική επιφάνεια της δομής του θερμοκηπίου και με τη διαφορά θερμοκρασίας. Μια τέτοια είδους σχέση αντιπροσωπεύει υψηλές απαιτήσεις για να διατηρηθεί μια δεδομένη εσωτερική θερμοκρασία (Μαυρογιαννόπουλος , 2005).

Λόγω των ιδιαίτερων αυτών χαρακτηριστικών τις ηλιόλουστες ημέρες, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου ανέρχεται σε πολύ υψηλά επίπεδα και τις ψυχρές νύχτες η θερμοκρασία πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς η απόδοση της παραγωγής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις επικρατούσες θερμοκρασίες εντός του θερμοκηπίου.

Συστήματα Θέρμανσης με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Έχουν χαμηλό ενεργειακό κόστος συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμοκήπια αλλά και χαμηλό συντελεστή ενεργειακής απόδοσης λόγω της διακύμανσης που παρουσιάζουν στην διαθεσιμότητά τους, του κόστους αρχικής επένδυσης και των δαπανηρών μεθόδων αποθήκευσης που απαιτούν και για αυτό έχουν μικρό μερίδιο στην ενεργειακή αγορά. Και με αυτά τα συστήματα η ενέργεια προσφέρεται πρωταρχικά στον αέρα του θερμοκηπίου, στο θερμοκήπιο πρέπει να επικρατεί ισοθερμοκρασιακό κλίμα, ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και οι ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή παραμένουν υψηλές.

Κατά την εγκατάσταση ενός συστήματος θέρμανσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

- η μείωση του φυσικού φωτισμού που προκαλείται στο χώρο του θερμοκηπίου θα πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή.
- Ο χώρος που καταλαμβάνει το σύστημα θέρμανσης δε θα πρέπει να είναι σε βάρος του χώρου καλλιέργειας.
- Η θέση όπου τοποθετείται δε θα πρέπει να δυσχεραίνει τις καλλιεργητικές εργασίες ή την απόδοση εργασίας (εμπόδια στους διαδρόμους, κ.λ.π.).
- Μια πιθανή αύξηση της ταχύτητας του αέρα δε θα πρέπει να προκαλεί τοπικούς κραδασμούς ή τοπικές αφυδατώσεις των φυτών.
- Να μην αυξάνεται υπερβολικά ο ολικός συντελεστής απωλειών του θερμοκηπίου. Πολύ μεγάλες ταχύτητες του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο ή πολύ μεγάλες επιφάνειες θερμαντικών στοιχείων, αυξάνουν τις απώλειες ενέργειας.
- Η κατανομή της θερμότητας στο χώρο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφη, ώστε να αποφευχθούν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας τοπικά και επομένως ανομοιομορφία κατανάλωσης νερού και ρυθμού αύξησης των φυτών.
- Το σύστημα θέρμανσης θα πρέπει να μειώνει αποτελεσματικά και την πύκνωση υδρατμών επάνω στα φυτά.

Θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλο σύστημα ελέγχου, ώστε το σύστημα θέρμανσης να αντιδρά γρήγορα στις μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων.

2.2.3 Κεντρικά Συστήματα Θέρμανσης

Στα σχετικά μεγάλης έκτασης θερμοκήπια, η θέρμανση γίνεται με ζεστό νερό που παράγεται από λέβητα ζεστού νερού. Στα μεγάλης έκτασης θερμοκήπια (άνω των 30 στρ.), προτιμάται ο λέβητας παραγωγής ατμού. Ο λέβητας τοποθετείται σε μόνιμη θέση έξω από το θερμοκήπιο και το θερμό νερό ή ο ατμός οδηγείται στο θερμοκήπιο με σωληνώσεις (ripe system). Με το σύστημα αυτό θερμαίνεται ικανοποιητικά και ο αέρας και το έδαφος του θερμοκηπίου, έχει όμως μεγάλη αδράνεια, δηλαδή από τη στιγμή που θα δεχθεί την εντολή να θερμαίνει το χώρο ή να σταματήσει τη θέρμανση, μέχρι αυτό να πραγματοποιηθεί, μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Είναι το καταλληλότερο σύστημα για υαλόφρακτα θερμοκήπια

μεγάλης έκτασης, γιατί η λειτουργία και συντήρησή του, συγκριτικά με τη χρησιμοποίηση πολλών αερόθερμων στα οποία κυκλοφορεί θερμός αέρας που διανέμεται μέσω αγωγών πολυαιθυλενίου PE (air heating), στοιχίζει φθηνότερα. Η θέρμανση με θερμό νερό προτιμάται στην Ευρώπη (ακόμα και σε μεγάλα θερμοκήπια) από τη θέρμανση με ατμό, εφαρμόζεται όμως σύστημα υψηλής πίεσης που επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες (95 °C) στο νερό και επομένως μεγαλύτερη θερμική απόδοση, σε σχέση με τα συστήματα χαμηλής πίεσης (θερμοκρασία νερού 85 °C). Με τη χρήση σωληνώσεων θερμού νερού, είναι δυνατό να γίνει και κάποια εξοικονόμηση ενέργειας, με την ανοχή μικρότερων θερμοκρασιών στα υψηλότερα στρώματα του θερμοκηπίου.

Για τις περιπτώσεις χρήσης σωληνώσεων θερμού νερού ή αγωγών θερμού αέρα λεπτομέρειες σχετικά με την τεχνική κατασκευή καθώς και την τοποθέτηση τους βρίσκονται στη βιβλιογραφία (Μαυρογιαννόπουλος 2001, Γραφιαδέλης 1987).

Οι δύο κύριες μέθοδοι θέρμανσης των θερμοκηπίων δηλ. το pipe και air σύστημα θέρμανσης έχουν αναφερθεί από διάφορους συγγραφείς περισσότερο τα τελευταία 30 χρόνια και εν συντομία παρατίθενται παρακάτω, μέσω ερευνών που διεξήχθησαν στο Ισραήλ, στη Γερμανία και στην Πορτογαλία.

Τα περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα θέρμανσης στα θερμοκήπια του Ισραήλ είναι βασισμένο σε θερμό αέρα, διανεμημένο μέσα στο θερμοκήπιο μέσω διάτρητων αγωγών PE. Προσφάτως υπάρχει μια ανάπτυξη προς την κατεύθυνση της εγκατάστασης συστημάτων σωληνώσεων ζεστού νερού μέσα στα νέα θερμοκήπια. Και στα δυο συστήματα ένας ανοιγοκλεινόμενος controller γενικά χρησιμοποιείται για να ελέγχει την θερμοκρασία του αέρα εντός του θερμοκηπίου. Πειράματα έχουν διεξαχθεί για να συγκρίνουν τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων θέρμανσης στην θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, υγρασία, θερμοκρασία της καλλιέργειας και στην ενέργεια που απαιτείται για την διατήρηση της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Τα πειράματα διεξήχθησαν μόνο κατά την διάρκεια της νύχτας σε πειραματικά και εμπορικά θερμοκήπια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και στις δυο μεθόδους θέρμανσης, κάτω από ανοιγοκλεινόμενο έλεγχο, υπάρχουν κυκλικές μεταβολές-εναλλαγές στις θερμοκρασίες της καλλιέργειας και του αέρα και στην αναλογία της υγρασίας του θερμοκηπιακού αέρα. Λιγότεροι κύκλοι θερμότητας ανά νύχτα παρατηρήθηκαν με σωλήνες θέρμανσης από ότι με θερμό αέρα, εξαιτίας της σχετικά της μεγάλης αδράνειας των γεμάτων με νερό σωλήνων. Ο λόγος της υγρασίας στο επίπεδο της καλλιέργειας αυξήθηκε κατά την διάρκεια της αύξησης της θερμοκρασίας σε καθένα θερμικό κύκλο και στις 2 μεθόδους θέρμανσης, αλλά ο ρυθμός της αύξησης και το εύρος ήταν μεγαλύτερα με θερμό αέρα από ότι με σύστημα σωληνώσεων. Η θερμική ακτινοβολία μεταφέρεται μεταξύ των σωλήνων θέρμανσης και η καλλιέργεια διασφραφίζεται. Επίσης με σωλήνες θέρμανσης, τα φύλλα στο χαμηλότερο τμήμα των φυτών (εκεί που είναι τοποθετημένοι οι σωλήνες), ειδικά εκείνα που είναι στραμμένα προς τους σωλήνες, ήταν γενικά θερμότερα σε σχέση με τον αέρα, και εκείνα στα υψηλότερα σημεία του φυτού ψυχρότερα σε σχέση με τον αέρα, κατά την διάρκεια της ανόδου της θέρμανσης. Με την θέρμανση με ζεστό αέρα τα φύλλα ήταν ψυχρότερα σε σχέση με τον αέρα και στις 2 περιοχές των φυτών, κατά την διάρκεια των περισσότερων θερμικών κύκλων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις 2 μεθόδους στην κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για να αποκτηθεί ένα δοθέν θερμοκρασιακό επίπεδο μέσα στο θερμοκήπιο, καθώς και οι σωλήνες και οι αγωγοί τοποθετούνται ανάμεσα στις γραμμές των φυτών (Teitel et al, 1996, 1999).

Παραμεφερείς τεχνικές θέρμανσης αναλυθεί από τον Van de Braak (1988), ο οποίος παρουσίασε το κεντρικό σύστημα θέρμανσης στα γερμανικά θερμοκήπια που βασίζεται σε χαλύβδινους σωλήνες. Αυτοί οι σωλήνες είναι τοποθετημένοι κοντά στις βαθμίδες καλλιέργειας και χρησιμοποιούνται για διανομή της θερμότητας σε όλη την έκταση του θερμοκηπίου. Εναλλακτικές τοποθεσίες έχουν χρησιμοποιηθεί με τους σωλήνες κοντά στην

καλλιέργεια και στα υποστρώματα, για να παρέχουν θέρμανση στο ριζικό σύστημα. Ο Van de Braak (1988), επίσης αποδεικνύει ότι οι περυγωτοί σωλήνες αλουμινίου που έχουν σχεδιαστεί από Γερμανούς κατασκευαστές, προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του λιγότερο περιεχόμενου σε νερό σε σχέση με τους χαλύβδινους και την γρηγορότερη ανταπόκριση στην ενέργεια του ελέγχου. Σύμφωνα πάντα με τον ίδιο, η μέθοδος θέρμανσης με θερμό αέρα είναι λιγότερο συνηθισμένη στα γερμανικά θερμοκήπια από ότι η θέρμανση με σωληνώσεις. Το κύριο πλεονέκτημα της θέρμανσης με θερμό αέρα είναι η γρήγορη ανταπόκριση στην ενέργεια του ελέγχου, ενώ το μειονέκτημα είναι η επιπλέον κατανάλωση ηλεκτρισμού η οποία μπορεί να είναι 10% περίπου της ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση.

Η διαθεσιμότητα δεδομένων με ηλεκτρογεννήτριες θερμού αέρα δεν είναι τόσο άφθονα όσο εκείνων των συστημάτων που χρησιμοποιούν ζεστό νερό. Οι Meneses and Monteiro (1990), χρησιμοποίησαν ηλεκτρογεννήτριες θερμού αέρα. Ο ζεστός αέρας διανέμετο μέσω δυο διάτρητων αγωγών PE και η θερμοκρασία του αέρα ήταν αρκετά ομοιόμορφη και στις κατακόρυφες και στις κεκλιμένες διευθύνσεις, αλλά μεγάλες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στην κατά μήκος διεύθυνση οι οποίες συνεισέφεραν στην μείωση της θερμοκρασίας του αέρα καθώς αυτός έρεε κατά μήκους των αγωγών σε διαδοχικές οπές εκφόρτωσης.

Τέλος, τα αποτελέσματα των δυο προαναφερθέντων συστημάτων θέρμανσης και δύο υλικών κάλυψης στην ενεργειακή κατανάλωση και παραγωγή τομάτας αναφέρονται από τον Manrogiannopoulos et al (1992), οι οποίοι απέδειξαν ότι ο συνολικός συντελεστής των θερμικών απωλειών θερμοκηπίου θερμαινόμενο με σωλήνες ζεστού νερού ήταν σημαντικά υψηλότερος από ότι ενός θερμοκηπίου θερμαινόμενο με ζεστό αέρα. Αναφέρει δε, ότι άλλοι ερευνητές έχουν βρει χαμηλότερες τιμές για τον συντελεστή απωλειών στην περίπτωση της θέρμανσης με σωλήνες και θεωρεί ότι οι δικές του υψηλές τιμές οφείλονται στο μικρό μέγεθος του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε και στο γεγονός ότι οι μισοί από το συνολικό μήκος των σωλήνων θέρμανσης τοποθετήθηκαν κοντά στα εξωτερικά τοιχώματα. Επίσης έδειξε ότι ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με PE έχει μια συνολικά μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με ένα γυάλινο όταν η θέρμανση βασίζεται σε σωλήνες, αλλά ότι όταν και τα δύο θερμοκήπια θερμαίνονται με ζεστό αέρα η ενεργειακή τους κατανάλωση είναι κατά προσέγγιση η ίδια.

2.2.4 Θέρμανση Υπεδάφους Θερμοκηπίου

Οι εγκαταστάσεις θέρμανσης του εδάφους του θερμοκηπίου έχουν γίνει βασικό τεχνικό εργαλείο στα μοντέρνα θερμοκήπια. Μέσω της βελτίωσης των περιβαλλοντικών συνθηκών των καλλιεργουμένων φυτών, αυτά επιδρούν και στην απόδοση και στην ποιότητα της καλλιέργειας. Συγκρινόμενες με τις παραδοσιακές εγκαταστάσεις θερμοκηπίων χωρίς θέρμανση του υπεδάφους, οι μοντέρνες εγκαταστάσεις προσφέρουν σύμφωνα με τους Kuraska and Slipek (2000) τα αποδοτικώς ενεργειακά πλεονεκτήματα: η μεταφορά θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, επιτρέπει την διατήρηση σωστής κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο. το υπεδάφος θερμαίνει το ριζικό σύστημα των φυτών, στην πραγματικότητα μια χαμηλότερη ολική θερμοκρασία μέσα στην εγκατάσταση είναι επαρκής. Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα του εδάφους ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις της θερμοκρασιακής πηγής, και ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του ανώτερου στρώματος του εδάφους και του περιβάλλοντος αέρα, συμπληρωματικά μεταφορά θερμότητας σε όλη την εγκατάσταση συμβαίνει (συμπληρώνοντας δηλ. το κύριο σύστημα θέρμανσης).

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αποτέλεσμα της θέρμανσης του υπεδάφους του θερμοκηπίου βρίσκεται στην εφαρμογή πηγής θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας (περιεκτικότητα θερμότητας). Για παράδειγμα οι γεωθερμικές πηγές, η ενέργεια των αποβλήτων από σταθμούς παραγωγής ενέργειας ή συνδυαζόμενα συστήματα όπως οι ηλιακοί συλλέκτες μαζί με το θερμοκηπιακό υπέδαφος ενεργούν σαν αποθήκη θερμότητας (Rosik and Dulewska 1992, Rakovek and Hocesvar 1988). Στην θερμοκηπιακή πρακτική δυο υπεδάφια συστήματα θέρμανσης επικρατούν: σωλήνες θέρμανσης τοποθετούνται μέσα στο υπέδαφος με κυκλοφορία ζεστού νερού ή θερμαινόμενου αέρα, και σωλήνες θέρμανσης τοποθετούνται ακριβώς πάνω στην επιφάνεια του εδάφους (Boulard et al 1989, Kupraska and Slipek 1996).

Και στα δυο συστήματα ο συνολικός στόχος λειτουργίας, είναι η πρόβλεψη της απαιτούμενης θερμοκρασίας του υπεδάφους σε σχέση με τα είδη των καλλιεργειών που καλλιεργούνται. Για να εκτιμήσουμε την ποσότητα ενεργειακής θερμότητας που πρέπει να εφοδιαστεί στο υπόστρωμα, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την συνήθη ολική θερμότητα του συστήματος θέρμανσης του υπεδάφους. Αυτό εξαρτάται από έναν αριθμό εξωγενών παραγόντων, όπως: ο τύπος και η φυσική κατάσταση του υπεδάφους του θερμοκηπίου, η ολική θερμοκρασία εντός της εγκατάστασης, ο τύπος του εδαφικού συστήματος θέρμανσης και οι τεχνικές του παράμετροι, καθώς επίσης οι συνήθεις ιδιότητες του συστήματος(τύπος και συνθήκη του βασικού κατασκευαστικού υλικού, την ταχύτητα ροής και την θερμοκρασία του ζεστού νερού)(Kupraska and Slipek 2000).

2.2.5 Συστήματα Θέρμανσης με Νερό Χαμηλής Θερμοκρασίας

Εξετάζοντας το θέμα της θέρμανσης θερμοκηπίων πρέπει να αναφέρουμε τις αρχικές έρευνες του Poronski (1986) σχετικά με τον προσδιορισμό μηχανισμών για θέρμανση θερμοκηπίου με θερμά ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας. Ο Poronski έδειξε ότι το σύστημα αυτό όταν εγκαθίσταται εντός του θερμοκηπίου χαμηλά, ελαχιστοποιεί την ακτινοβολία προς το διαφανές κάλυμμα (άρα μείωση των θερμικών απωλειών προς την οροφή) και μεγιστοποιεί την ακτινοβολία προς τον φυτικό θόλο, ενώ το έδαφος και το υπέδαφος θερμαίνονται περισσότερο με ακτινοβολία παρά με αγωγή. Στα συστήματα θέρμανσης με νερό χαμηλής θερμοκρασίας οι σωληνώσεις μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στις καλλιέργειες, χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής των φυτών(λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του ρευστού), το περιβάλλον κοντά στην καλλιέργεια να ελέγχεται καλύτερα και περιορίζονται οι προσβολές από μυκητολογικές ασθένειες. Γενικά όταν οι σωληνώσεις αυτών των συστημάτων θέρμανσης είναι τοποθετημένοι σε διάφορα επίπεδα , κοντά στο έδαφος και εντός της περιοχής καλλιέργειας, οι Teitel et al (1999) σε συνδυασμό με τους Baille and Von Elser (1988) συμφωνούν ότι η τοποθέτηση των εναλλακτών θερμότητας κοντά στο έδαφος και ανάμεσα στην καλλιέργεια διευκολύνει καλύτερα τον έλεγχο του μικροκλίματος και καταλήγει σε ομοιομορφία του αέρα και των θερμοκρασιών των φύλλων στο επίπεδο της καλλιέργειας. Τα μειονεκτήματα είναι η ανάγκη για σωληνώσεις με αντοχή στα χημικά και το ότι οι σωληνώσεις πρέπει να μετακινούνται για να διευκολύνουν τις καλλιεργητικές εργασίες.

Σε μια γενική άποψη των χαμηλής θερμοκρασίας συστημάτων θέρμανσης και της επίδρασης τους στο μικροκλίμα (Baille and von Elser, 1988) 6 τύποι τέτοιων συστημάτων θέρμανσης έχουν παρουσιαστεί και μελετηθεί: 1) εναλλάκτες θερμότητας μέσα στο έδαφος 2) εναλλάκτες θερμότητας τοποθετημένοι ακριβώς στην επιφάνεια του εδάφους 3) εναέριες σωληνώσεις κοντά στο έδαφος ή σε αναβαθμούς, 4) μονάδες αερόθερμων 5) συστήματα θέρμανσης οροφής και 6) ένας συνδυασμός δύο εξ αυτών.

Τα συστήματα αυτά διαφέρουν αρκετά από τα κλασικά συστήματα, όπου το νερό έχει υψηλή θερμοκρασία. Πράγματι, προκειμένου να αποδοθεί η ίδια ποσότητα θερμότητας θα πρέπει η επιφάνεια των θερμοκρασιών στοιχείων να είναι μεγαλύτερη, ή να είναι μεγαλύτερος

ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το θερμαντικό στοιχείο στον αέρα θερμοκηπίου. Επίσης πρέπει να περάσει μεγαλύτερη μάζα νερού, για να αποδώσει την ίδια ποσότητα θερμότητας και επομένως απαιτούνται σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου και αντλίες μεγαλύτερης ισχύος, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη χρήση αερόθερμων απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα για να αποσπαστεί η ίδια ποσότητα θερμότητας, με αποτέλεσμα αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση. Σημαντικό όμως πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες από φτηνό πλαστικό υλικό (PE), αντί για σωλήνες από αλουμίνιο ή χάλυβα.

Τα συστήματα θέρμανση με νερό χαμηλής θερμοκρασίας θα πρέπει να σχεδιάζονται προσεχτικά, έτσι ώστε να δημιουργούνται πολύ καλές συνθήκες μικροκλίματος, τόσο στο εναέριο όσο και στο ριζικό σύστημα των φυτών, να βελτιώνεται η ανάπτυξη και εμφάνιση της καλλιέργειας και να μειώνονται οι ζημιές από αρρώστιες και παθογόνα. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται όταν χρησιμοποιούνται συστήματα θέρμανσης στο έδαφος ή στην επιφάνεια, ώστε η θερμοκρασία εδάφους να παραμένει σταθερά στα ιδανικά επίπεδα για κάθε φυτό.

Στην περίπτωση που υπάρχουν δυο ξεχωριστά συστήματα θέρμανσης, τότε είναι δυνατή η ανεξάρτητη θέρμανση της ριζόσφαιρας ή του υποστρώματος και του αέρα του θερμοκηπίου. Γενικά είναι δυνατό να γίνεται συνδυασμός δύο συστημάτων, από τα οποία το ένα δίνει το βασικό φορτίο θέρμανσης (π.χ. θέρμανση εδάφους, εδάφους-αέρα ή εναέριοι σωλήνες) και το δεύτερο δίνει το φορτίο αιχμής (κλασικό σύστημα θέρμανσης ή χαμηλής θερμοκρασίας).

2.3 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.3.1 Γενικά

Από τη στιγμή που η πρακτική εφαρμογή των συστημάτων θέρμανσης απαιτείται σχεδόν σε όλα τα θερμοκήπια, η κατανάλωση καυσίμων γίνεται επομένως ένας σημαντικός οικονομικός παράγοντας. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί από την χρήση χαμηλού κόστους θερμαντικών τεχνικών αντί της θέρμανσης με συμβατικά καύσιμα. Εξαιτίας του υψηλά μεγάλου κόστους και της αβεβαιότητας της διαθεσιμότητας των συμβατικών καυσίμων, σημαντική προσοχή έχει δοθεί στις νέες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης των θερμοκηπίων. Επιπλέον η ανάπτυξη αποδοτικών και οικονομικών συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας, και των σχετικών με αυτά μηχανισμών είναι τόσο σημαντική όσο και η ανάπτυξη νέων πηγών ενέργειας από την άποψη της ενεργειακής συντήρησης.

Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων συμβάλλοντας έτσι στην εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμοκήπια.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι αποδεκτή από το κοινό.

Ü Θεωρούνται «πράσινες» επειδή προκαλούν ελάχιστη εξάντληση των επίγειων αποθεμάτων και μηδενικές αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενεργειακής παραγωγής.

Τα μειονεκτήματά τους επίσης είναι:

- Ü Παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών
- Ü Εξαιτίας αυτής της διακύμανσης απαιτούν δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης, δαπανηρά υπερμεγέθη και / ή συστήματα μεγάλης ενεργειακής αποθήκευσης
- Ü η χαμηλή διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους. Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό, για αυτό και δεν έχουν κατορθώσει να αποκτήσουν βιώσιμο ποσοστό της ενεργειακής αγοράς.

Η απόδοση αυτών των συστημάτων εξαρτάται έντονα από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες της περιοχής και τα πρότυπα καλλιέργειας (Rozakis et al, 1997). Η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από θερμικά απόβλητα και η βιομάζα μπορούν να αξιοποιηθούν στη θέρμανση του θερμοκηπίου. Στην πράξη, εφαρμογή με σχετικά καλά αποτελέσματα έχουν βρει αρχικά η ηλιακή ενέργεια και δευτερευόντως η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα. Η αιολική ενέργεια ελάχιστα ή καθόλου έχει χρησιμοποιηθεί στην θέρμανση των θερμοκηπίων γιατί δεν είναι προβλέψιμη, ομαλή και συνεχής και το μεγάλο πρόβλημα βρίσκεται στην αποθήκευσή της, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί όταν χρειάζεται. Επίσης έχει υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των μεγάλης ισχύος συστημάτων που χρησιμοποιούνται.

Η ηλιακή ενέργεια η οποία είναι μία άφθονη, καθαρή και ασφαλής πηγή, είναι ένα ελκυστικό υποκατάστατο των συμβατικών καυσίμων για παθητική και ενεργητική θέρμανση στα θερμοκήπια. Κατά την διάρκεια της ημέρας άφθονη ηλιακή θερμότητα συλλέγεται για μικρό ή μεγάλο διάστημα αποθήκευσης και αποδίδεται την νύχτα για να διασφαλίσει επαρκώς τις θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου. Αποδοτική και οικονομική αποθήκευση θερμότητας είναι ο κύριος παράγων στην χρήση της ηλιακής ενέργειας για καλλιεργητικούς σκοπούς. Η ηλιακή θερμική ενεργεία μπορεί να υποθηκευθεί σαν αισθητή θερμότητα, λανθάνουσα θερμότητα, θερμότητα αντίδρασης η ένας συνδυασμός αυτών.

Στα περισσότερα αποθηκευτικά συστήματα, αυτή αποθηκεύεται ως αισθητή θερμότητα σε υλικά όπως νερό και πέτρες (Orzurk et al 1999). Στα συστήματα συλλογής αέρα, τα πετρώματα συνήθως χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμότητας. Για εφαρμογές ηλιακής θέρμανσης στα θερμοκήπια, η χρήση θερμικών αποθηκευτικών μονάδων από εγκιβωτισμένα πετρώματα για θερμικά ενεργειακή αποθήκευση έχει γίνει μια ελκυστικά σχεδιαστική άποψη με όρους κατασκευαστικού κόστους και αποδοτικότητας αποθήκευσης. Η αποτελεσματικότητα της εποχιακής καθώς επίσης και της ημερήσιας εξαρτάται από την διαμόρφωση του συστήματος, τις κλιματολογικές συνθήκες και διάφορα σημεία που τίθενται για τον περιβαλλοντικό έλεγχο του θερμοκηπίου (Orzurk and Bascetincelik 2003). Οι Kyrata και Takamura (1991), διερεύνησαν την κάτω από το έδαφος αποθήκευση ηλιακής ενέργειας για θέρμανση του θερμοκηπίου. Οι δυνατότητες για εποχιακή αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας μέσα στο έδαφος κάτω από το θερμοκήπιο διερευνήθηκε και συγκρίθηκε με εκείνη της ημερήσιας αποθήκευσης. Υπέθεσαν ένα σύστημα συνιστώμενο από συλλέκτες, θερμοκήπιο, σωλήνες συνδεδεμένους με τους συλλέκτες και θαμμένους κάτω από το θερμοκήπιο για κυκλοφορία νερού και ένα άλλο σετ από υπόγειους σωλήνες για την κυκλοφορία του αέρα του θερμοκηπίου. Ένα αριθμητικό πειραματικό έδειξε ότι κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε για κυκλοφορία νερού

και αέρα στην εποχιακή αποθήκευση ήταν περισσότερη από την ενέργεια που αποταμιεύτηκε για θέρμανση του θερμοκηπίου.

Στα λανθάνουσας θερμότητας αποθηκευτικά συστήματα, η λανθάνουσα θερμότητα προέρχεται από την αλλαγή φάσης του υλικού που χρησιμοποιείται για ενεργειακά θερμική αποθήκευση. Τα αλλαγής φάσης υλικά (PCM) μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας κατά την αλλαγή της φάσης από στερεό σε υγρό. Τα λανθάνουσας θερμότητας αποθηκευτικά συστήματα που χρησιμοποιούν PCM, γενικά προσφέρουν υψηλότερης πυκνότητας ενεργειακή αποθήκευση σε σχέση με τα αισθητής θερμότητας αποθηκευτικά συστήματα. Οι περισσότερες από τις θερμικές απαιτήσεις του θερμοκηπίου μπορούν να παρέχονται από τα λανθάνουσας θερμότητας αποθηκευτικά συστήματα (Huang et al, 1986). Οι Puri and Zuritz (1985), απέδειξαν ότι τα PCM μπορούν να παρέχουν το 37% των ετησίων θερμικών απαιτήσεων ενός θερμοκηπίου χωρίς κουρτίνες μόνωσης και αυτό το κλάσμα μπορεί να είναι μεγαλύτερο του 80% για ένα μονωμένο θερμοκήπιο. Όμως η αρχική τους οικονομική ανάλυση έδειξε ότι το κόστος εγκατάστασης των PCM είναι σημαντικά υψηλότερο από τα ενεργειακά αποθέματα. Το σύστημα περιγραφόμενο από άλλους ερευνητές (υλικά από χλωριούχα άλατα, 2800Kg) εξασφάλισε το 22% των ετησίων θερμικών αναγκών ενός υαλόφρακτου θερμοκηπίου με επιφάνεια κάλυψης 200 m². Οι Baille and Boulard (1987), χρησιμοποίησαν CaCl₂·6H₂O σε ένα θερμοκήπιο με διπλό περίβλημα polycarbonate. Για ανοιξιάτικη φύτευση ντομάτας το σύστημα τους εφοδίασε το 41% των θερμικών απωλειών και η εξοικονόμηση ενέργειας ήταν περίπου 30%.

Η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από θερμικά απόβλητα, η βιομάζα μπορούν να αξιοποιηθούν στη θέρμανση του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στη εξοικονόμηση ενέργειας, στη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και στον περιορισμό της εξάρτησης από το (εισαγόμενο) πετρέλαιο. Στην πράξη εκτεταμένη εφαρμογή στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες έχουν βρει η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμική ενέργεια και λιγότερο η αιολική ενέργεια.

2.3.2 Ηλιακή Ενέργεια

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας είναι κυρίως οι ξεχωριστοί ηλιακοί συλλέκτες (αέρα ή νερού) που τοποθετούνται έξω από το θερμοκήπιο, οι ηλιακοί συλλέκτες που αποτελούν στοιχείο της κατασκευής του θερμοκηπίου (θερμοκήπιο με διπλά τοιχώματα όπου κυκλοφορεί διάλυμα που απορροφά την υπέρυθη μόνο ακτινοβολία) και το ίδιο το θερμοκήπιο. Για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας ώστε να χρησιμοποιηθεί τη νύχτα χρησιμοποιούνται συνήθως νερό σε δεξαμενές, ηλιακές λίμνες, πέτρες και χαλίκια, έδαφος, υλικά αλλαγής φάσης. Οι πέτρες και τα χαλίκια είναι ταυτόχρονα και στοιχεία αποθήκευσης και εναλλάκτες θερμότητας, είναι όμως οπωσδήποτε ογκώδη υλικά. Η απόδοση της θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας γίνεται με κατάλληλο σύστημα διανομής, δηλαδή σωλήνες κατανεμημένοι σε όλο το χώρο, από πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, αλουμίνιο ή χάλυβα, ή αερόθερμα.

Οι συνήθεις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας είναι:

1. Θέρμανση εδάφους και υπεδάφους θερμοκηπίου με τη χρησιμοποίηση εξωτερικού ηλιακού συλλέκτη ζεστού νερού και αποθήκης νερού κάτω από το έδαφος. Τη νύχτα το ζεστό νερό κυκλοφορεί στο θερμοκήπιο και αποδίδει τη θερμότητά του σε αυτό (Kurata and Takamura 1991). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί εξωτερικός ηλιακός συλλέκτης ζεστού αέρα και αποθήκη θερμότητας σε χαλίκια που βρίσκονται κάτω από τα τραπέζια καλλιέργειας ή κάτω από το έδαφος του θερμοκηπίου (Ozturk and Bascetincelik 2003). Τη νύχτα ο αέρας του θερμοκηπίου κυκλοφορεί από τα χαλίκια

και ζεσταίνεται. Ένα στοιχείο που επιβαρύνει το κόστος αυτού του συστήματος, επειδή η αξία της γης γύρω από το θερμοκήπιο είναι υψηλή, είναι το γεγονός ότι για την εγκατάσταση του συλλέκτη απαιτείται έκταση περίπου 30% επιπλέον αυτής του θερμοκηπίου.

2. Θέρμανση εσωτερικού χώρου θερμοκηπίου με τη χρησιμοποίηση διαφανών σωλήνων, μεγάλης διαμέτρου (0,5-0,75m), λεπτών τοιχωμάτων, γεμάτων νερό, που ενεργούν ως παθητικό σύστημα θέρμανσης. Κάτω από τους σωλήνες, που τοποθετούνται ανάμεσα στις γραμμές των φυτών υπάρχει μαύρο φύλλο πολυαιθυλενίου που συλλέγει τη φωτεινή ηλιακή ακτινοβολία, τη μετατρέπει σε ενέργεια και τη δίνει στο νερό. Οι σωλήνες του νερού τη μέρα συλλέγουν το 20% περίπου της ηλιακής ενέργειας που μπαίνει στα θερμοκήπια. Τις ψυχρές ώρες το ζεστό νερό ελκύει θερμότητα προς το χώρο του θερμοκηπίου (Graziadellis 1986, Mavrogianopoulos and Kyritsis 1993).

Από διάφορες έρευνες που έγιναν βρέθηκε ότι με το ηλιακό αυτό σύστημα ανυψώνεται κατά 3-6 °C η ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα, των φυτών και το εδάφους του θερμοκηπίου, μειώνεται κατά 10-12% η σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου και η απόθεση σταγόνων πάνω στα φυτά και αυξάνεται κατά 10-15% τις μεσημεριανές ώρες της ημέρας η ένταση του φωτός και πολύ περισσότερο τις πρωινές ώρες. Επίσης μειώνεται κατά 3-4 °C η μέγιστη θερμοκρασία. Το παθητικό ηλιακό σύστημα έχει εφαρμοστεί σε αρκετές εκτάσεις (800στρ. περίπου) κυρίως στη Β. Ελλάδα και συνιστάται ιδιαίτερα σε καλλιέργειες μικρού ύψους.

3. Θέρμανση εδάφους και εσωτερικού του θερμοκηπίου με τη χρησιμοποίηση εναλλάκτη εδάφους-αέρα. Στο υπέδαφος του θερμοκηπίου και σε βάθος 1-2 m εγκαθίσταται εναλλάκτης θερμότητας εδάφους-αέρα που αποτελείται συνήθως από πλαστικούς σωλήνες μικρού πάχους και διαμέτρου 0,2-0,4 m. Η θερμοκρασία του χώρου του θερμοκηπίου ρυθμίζεται με κυκλοφορία του αέρα του θερμοκηπίου σε κλειστό κύκλωμα, μέσα από το σύστημα του εναλλάκτη. Η κυκλοφορία του αέρα γίνεται με τη λειτουργία ανεμιστήρων οποτεδήποτε η θερμοκρασία του χώρου πέσει κάτω από την ελάχιστη επιθυμητή θερμοκρασία ή τη μέγιστη επιθυμητή. Επειδή η θερμοκρασία του υπεδάφους μεταβάλλεται πολύ λίγο και με χρονική υστέρηση κατά τη διάρκεια του 24ώρου και είναι συνήθως υψηλότερη από την ελάχιστη επιθυμητή και χαμηλότερη από τη μέγιστη επιθυμητή του αέρα του θερμοκηπίου, ο αέρας που κυκλοφορεί στον εναλλάκτη όταν έχει χαμηλή θερμοκρασία αποσπά ενέργεια από το υπέδαφος. Κατά αυτόν τον τρόπο το υπέδαφος χρησιμοποιείται ως φθηνή αποθήκη ενέργειας που ταυτόχρονα αποθηκεύει και με φυσικό τρόπο ενέργεια από το καλοκαίρι μέχρι και το χειμώνα (Mavrogianopoulos and Kyritsis 1986, Kempkes et al, 2000).

Προς το παρόν, τα ηλιακά συστήματα στο θερμοκήπιο έχουν εφαρμοστεί εμπορικά σε λίγες μόνο περιπτώσεις με πλήρη επιτυχία, γιατί εμφανίζουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Με τη συνεχή όμως βελτίωσή τους και την αύξηση της τιμής των καυσίμων, δεν αποκλείεται σύντομα να εφαρμοστούν με θετικό οικονομικό αποτέλεσμα σε μεγάλη έκταση. Με τα σημερινά δεδομένα η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να καλύψει οικονομικά, το 100% των αναγκών του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται ότι το άριστο που μπορεί να τροφοδοτήσει η ηλιακή ενέργεια κυμαίνεται από 60-70% μέχρι 10-12%. Η σημαντική αυτή διαφορά οφείλεται στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται το μέγεθος του συλλέκτη και του συστήματος αποθήκευσης και να εξαρτάται βασικά από τις ενεργειακές ανάγκες μερικών μόνο ψυχρών και συννεφιασμένων ημερών, όταν δεν είναι διαθέσιμη η ηλιακή πηγή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αναλύοντας το κόστος των συστημάτων αυτών, μπορεί κανείς να προτείνει ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο θα καλύπτει τις απαιτήσεις σε

θερμότητα τις συννεφιασμένες περιόδους. Είναι ευνόητο ότι η ηλιακή ενέργεια γίνεται πιο αποδοτική όταν συνδυάζεται με συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις ανάγκες θέρμανσης.

2.3.3 Γεωθερμική Ενέργεια

Πρόκειται για την ενέργεια που παράγεται στο υπέδαφος και μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους μέσω διαφόρων ρευστών (κυρίως του νερού), τα οποία βρίσκουν φυσική διέξοδο από τα βάθη της γης προς την επιφάνεια ή ανεβαίνουν με ειδικές γεωτρήσεις.

Οι παράγοντες οι οποίοι προσδιορίζουν το κόστος της εκμετάλλευσης, σε συνδυασμό με τα φυσικά, χημικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την παραγωγή και τη χρήση της, είναι η θερμοκρασία, το βάθος, η διαθεσιμότητα και η περιεκτικότητα ή ανάμειξη διαφόρων χημικών ουσιών και αλάτων στο νερό (θερμικό φορέα).

Η γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας ($\Theta < 100$ °C) που εντοπίζεται μακριά από κατοικημένες περιοχές, προσφέρεται αποκλειστικά για γεωργικές χρήσεις, ενώ η γεωθερμία υψηλής ενθαλπίας ($\Theta = 150-300$ °C) συμφέρει για παραγωγή ηλεκτρισμού (Μαυρογιαννόπουλος, 1992).

Η Ελλάδα διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό πηγών υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας και μάλιστα σε μικρά βάθη (50-400m, έναντι 2.800-3.200m στην Ουγγαρία). Προς το παρόν όμως η χρήση γεωθερμικών νερών εντοπίζεται κυρίως στη Βόρεια Ελλάδα, για τη θέρμανση περίπου 200 στρ. θερμοκηπίων. Κι αυτό γιατί η χρήση της γεωθερμίας παρουσιάζει αρκετά προβλήματα, σε ότι αφορά τόσο τη διανομή της ενέργειας στα θερμοκήπια όσο και την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών, με αποτέλεσμα τη σχετικά περιορισμένη εφαρμογή της. Το σημαντικότερο πρόβλημα δημιουργείται από την υψηλή αλατότητα του γεωθερμικού νερού, το οποίο συχνά περιέχει άλατα διαβρωτικά για τα κοινά μέταλλα και απαιτεί τη χρησιμοποίηση ακριβότερων μετάλλων στους εναλλάκτες. Ακόμη όμως και αν δεν είναι διαβρωτικά, συχνά τα άλατα καθιζάνουν στα τοιχώματα των σωλήνων που πολύ γρήγορα κλείνουν. Η χρησιμοποίηση κατάλληλων πλαστικών υλικών είναι μια καλή και οικονομική λύση. Μια γεώτρηση που φθάνει στο βάθος του γεωθερμικού ορίζοντα, μπορεί να αντικαταστήσει την εγκατάσταση ενός κλασικού συστήματος θέρμανσης σε ένα θερμοκήπιο. Στο σύστημα μεταφοράς της θερμότητας υπάρχει μια αντλία υπολογισμένη να δίνει την παροχή και πίεση που απαιτεί το σύστημα θέρμανσης και οι ανάγκες του χώρου (Γραφιαδέλλης, 1995).

2.3.4 Αιολική Ενέργεια

Η ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) στο πεδίο του θερμοκηπίου μπορεί να αξιοποιηθεί για να καλύψει διάφορες ενεργειακές ανάγκες του σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Η αιολική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι και συμπληρωματική της ηλιακής ενέργειας επειδή μπορεί να συμβάλλει τόσο κατά την ημέρα όσο και κατά την νύκτα στη διάρκεια όλου του έτους. Μέχρι τώρα έχουν μελετηθεί διατάξεις ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών με ενδιαφέροντα αποτελέσματα (Bristot et al, 2002, Elhadidy and Shaahid 1999, Kawakami and Seki, 2002). Κατάλληλες αιολικές μηχανές για χρήση στα θερμοκήπια είναι οι μικρές ανεμογεννήτριες, που πρέπει να είναι αποδοτικές και για μικρές ταχύτητες ανέμου και να είναι αισθητικά συμβατές με το περιβάλλον του θερμοκηπίου, έχοντας ένα σχετικά χαμηλό

ύψος. Οι ανεμογεννήτριες (WT) μπορούν να συμβάλλουν στην κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου σε ηλεκτρισμό, αλλά και ακόμη να αποθηκεύεται η πλεονάζουσα ποσότητα παραγόμενου ηλεκτρισμού σε θερμότητα (Tripanagnostopoulos and Tselepis 2003), για χρήση στη διάρκεια της νύκτας όπου υπάρχουν ανάγκες διατήρησης της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου.

Πίνακας : Διάφορα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για θέρμανση του θερμοκηπίου (Μαυρογιανόπουλος 2001)

Πηγή ενέργειας	Θερμαντικό σώμα	Διανομή θερμότητας
Ηλιακή ενέργεια	<ul style="list-style-type: none"> • παθητικοί συλλέκτες • δυναμικοί συλλέκτες • αποθήκες θερμότητας 	θερμό νερό θερμός αέρας
Γεωθερμική ενέργεια	<ul style="list-style-type: none"> • απ' ευθείας χρήση • μεταλλάκτες θερμότητας • αντλίες θερμότητας 	θερμό νερό θερμός αέρας
Απόβλητη ενέργεια βιομηχανίας	<ul style="list-style-type: none"> • απ' ευθείας χρήση • μεταλλάκτες θερμότητας • αντλίες θερμότητας 	θερμό νερό σε σωλήνες θερμός αέρας
Άνεμος	<ul style="list-style-type: none"> • μηχανική δύναμη • αποθήκευση θερμότητας • ηλεκτρόθεμα 	θερμό νερό θερμός αέρα
Ξηρή βιομάζα	<ul style="list-style-type: none"> • καυστήρες ξηρών καυσίμων 	θερμό νερό θερμός αέρας
Βιοαέριο	<ul style="list-style-type: none"> • καυστήρες αερίου 	θερμό νερό θερμός αέρας
Υδατοπτώσεις	<ul style="list-style-type: none"> • μηχανική δύναμη • παραγωγή ηλεκτρισμού 	θερμό νερό θερμός αέρας
Νερό ή αέρας	<ul style="list-style-type: none"> • Αντλία θερμότητας 	θερμό νερό θερμός αέρας

Γενικά τα συστήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας έχουν μεγάλο αρχικό κόστος. Αν δεν ληφθεί υπόψη ότι οι απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας για την θέρμανση του θερμοκηπίου είναι πολύ μεγάλες, γίνεται σαφές ότι απαιτούνται μεγάλης ισχύος συστήματα και συνεπώς θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Αποδοτικότερη εφαρμογή έχουν τα ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα, ορίζονται ως συνδυασμός ανανεώσιμων και συμβατικών ενεργειακών τεχνολογιών και προσφέρουν με όρους ενεργειακών απαιτήσεων έναν βαθμό ευελιξίας λειτουργίας πολύ υψηλότερο από τις μεμονωμένες ανανεώσιμες, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα, φιλόδοξους περιβαλλοντολογικούς σκοπούς, όπως μείωση εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων (Kelly and Weinberg, 1993).

Η ηλιακή ενέργεια όπως προαναφέρθηκε είναι αυτή που κυρίως χρησιμοποιείται και είναι η πλέον ελκυστική λύση για εφαρμογή στα θερμοκήπια, διότι αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και συχνά εύκολα προσιτή. Το βασικό πρόβλημα και μεγάλο μειονέκτημά της οφείλεται στο γεγονός ότι είναι διαθέσιμη μόνο κατά την διάρκεια της ημέρας και η ποσότητά της μεταβάλλεται με τις διάφορες εποχές του χρόνου (μικρή ποσότητα τον χειμώνα), με αποτέλεσμα να μην συγχρονίζεται η ζήτηση της ενέργειας για θέρμανση που είναι τον χειμώνα και κυρίως την νύχτα. Αυτό επιβάλλει την χρησιμοποίηση εκτός των συστημάτων συλλογής της ηλιακής ενέργειας και αποθηκών ενέργειας για βραχυχρόνια ή μακροχρόνια χρήση. Τα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν τη ηλιακή ενέργεια για σκοπούς θέρμανσης ταξινομούνται σε 2 κατηγορίες, τα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά θερμοκήπια (Santamouris et al, 1994b).

- Ø Τα ενεργητικά ηλιακά θερμοκήπια είναι εξοπλισμένα με ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούν ένα σύστημα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα το οποίο είναι ξεχωριστό από το θερμοκήπιο, και ένα ανεξάρτητο σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας. Περιλαμβάνουν διάφορους τύπους ηλιακών συσσωρευτών και συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας.
- Ø Τα παθητικά ηλιακά θερμοκήπια έχουν το σύστημα συλλογής θερμότητας ενσωματωμένο στο ίδιο το θερμοκήπιο, ή το ίδιο το θερμοκήπιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης, δεδομένου ότι σχεδιάζεται για τη μεγιστοποίηση των ηλιακών κερδών. Τα παθητικά ηλιακά θερμοκήπια μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Το μέσο της αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να ποικίλλει και χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά όπως το νερό, η λανθάνουσα θερμότητα, διάφορα πετρώματα, ή το υπέδαφος του θερμοκηπίου (μέσω των θαμμένων σωλήνων).

Σήμερα τα ηλιακά συστήματα στο θερμοκήπιο εφαρμόζονται εμπορικά σε αρκετές περιπτώσεις (περίπου 50.000 ha ηλιακά θερμοκήπια στην Ευρώπη) όχι όμως με ικανοποιητική επιτυχία, γιατί εμφανίζουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Με τα σημερινά δεδομένα η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να καλύψει το 100% των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται ότι το άριστο που μπορεί να τροφοδοτήσει η ηλιακή ενέργεια κυμαίνεται από 50-60% μέχρι 10-12%. Η σημαντική αυτή διαφορά οφείλεται στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται το μέγεθος του συστήματος συλλογής και του συστήματος αποθήκευσης της θερμότητας.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να γίνει πιο αποδοτική όταν συνδυάζεται σε υβριδικά σχήματα με άλλα συστήματα θέρμανσης και μπορούν να εξοικονομήσουν σημαντικά οφέλη ως προς τις θερμικές ανάγκες. Ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας, είναι ένα σύστημα όπου δύο ή περισσότερες παροχές από διαφορετικές πηγές ενέργειας ανανεώσιμης ή μη, ενσωματώνονται για να παράσχουν ηλεκτρισμό ή θερμότητα, ή και τα δύο, καλύπτοντας την ίδια ζήτηση (Jensen, 1994). Μια περιληπτική ανάπτυξη των κυριότερων ενεργητικών και παθητικών συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται σήμερα στα θερμοκήπια δίδεται παρακάτω.

Τα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης είναι λιγότερο ελκυστικά σε σχέση με τα παθητικά και η χρήση τους στα θερμοκήπια είναι περιορισμένη (και απαγορευτική για τις μικρές κλίμακας εφαρμογές) λόγω: (i) του υψηλού κόστους των ηλιακών συσσωρευτών, (ii) του πολύτιμου εδάφους που καταλαμβάνουν και που συνήθως δεν είναι διαθέσιμο, (iii) του εφεδρικού συστήματος που πρέπει να διαθέτουν και (iv) της αποθήκευσης και του συστήματος διανομής της θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου που πρέπει να διασφαλίζουν.

Συστήματα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα

Στην κατηγορία ανήκουν οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες (flat plate collector) που τοποθετούνται έξω από το θερμοκήπιο. Είναι οι πιο διαδεδομένοι όσον αφορά την θέρμανση νερού ή αέρα και η σπουδαιότερη κατηγορία συσκευών συλλογής της ηλιακής ενέργειας από πλευράς εφαρμογών σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας έως 75 °C. Ένας τυπικός επίπεδος συλλέκτης αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο στο πάνω μέρος του οποίου τοποθετείται κάλυμμα από γυαλί ή πλαστικό, στο εσωτερικό του τοποθετείται απορροφητική επιφάνεια μαύρου χρώματος ενώ τα πλαϊνά και η κάτω πλευρά του συλλέκτη είναι μονωμένα για να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες. Κατά την λειτουργία του συλλέκτη, το μεγαλύτερο ποσοστό από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια που συμπεριφέρεται ως «μέλαν» σώμα στην ηλιακή ακτινοβολία. Το μεγαλύτερο μέρος από την ενέργεια που απορροφάται, μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται. Η θερμότητα που απάγεται από το ρευστό, είναι το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του συλλέκτη και ή αποθηκεύεται, ή τροφοδοτεί απευθείας το θερμοκήπιο. Άλλα τέτοια ηλιακά θερμικά συστήματα είναι ο ολοκληρωμένος ηλιακός συλλέκτης ICS, (Tripanagnostopoulos and Yianoulis, 1992), (σχήμα 2-2 α,β), ο σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτικός συλλέκτης CPC, (Tripanagnostopoulos et al, 2000a; Tripanagnostopoulos et al, 2002) και ο κυλινδροπαραβολικός συλλέκτης οι οποίοι λειτουργούν σε χαμηλές (100-150 °C), μέτριες (150-400 °C) ή υψηλές θερμοκρασίες (>400 °C).

Ακόμα πιο περιορισμένη χρήση στα θερμοκήπια έχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) με τα οποία επιτυγχάνεται άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα (PV/T). Το γεγονός ότι τα μέρη στα οποία θα μπορούσαν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά (κτίρια, θερμοκήπια κλπ) δεν έχουν ανάγκη μόνο σε ηλεκτρισμό αλλά και σε θερμική ενέργεια οδήγησε στην δημιουργία των υβριδικών φωτοβολταϊκών (PV/T) που πετυχαίνουν εκτός από παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και απολαβή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό μέσω της φυσικής η εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ενός ρευστού (αέρας η νερό) (Huang et al 2001; Tripanagnostopoulos et al, 2002b; Tripanagnostopoulos et al, 2005; Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007)

2.3.5 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Συστήματα αποθήκευσης νερού

Χρησιμοποιούνται συνήθως διαφανείς σωλήνες πολυαιθυλενίου (PE), μεγάλης διαμέτρου (0.5-0.75m), λεπτών τοιχωμάτων, που είναι γεμάτοι με νερό και ενεργούν ως παθητικό σύστημα θέρμανσης (σχήμα 2-4α). Κάτω από τους σωλήνες, που τοποθετούνται ανάμεσα στις γραμμές των φυτών υπάρχει μαύρο φύλλο πολυαιθυλενίου για αύξηση της απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι σωλήνες του νερού τη ημέρα θερμαίνονται κυρίως από την ηλιακή και θερμική ακτινοβολία αλλά και με συναγωγή από τον θερμότερο αέρα του θερμοκηπίου. Τις νυχτερινές ώρες το ζεστό νερό ελκύει θερμότητα προς το χώρο του θερμοκηπίου. Αντί για διαφανείς σωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεξαμενές νερού

τοποθετημένες κατά μήκος του βορινού τοιχώματος του θερμοκηπίου που ενεργούν σαν ηλιακοί συλλέκτες και μέσον αποθήκευσης θερμότητας (σχήμα 2-4β). Σε αυτήν την περίπτωση η βορινή πλευρά συνήθως μονώνεται για να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες και οι δεξαμενές βάζονται μαύρες για να αυξηθεί η απορρόφηση θερμότητας.

Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στις δεξαμενές μπορεί επίσης να αυξηθεί με την τοποθέτηση ανακλαστήρων στο βορινό κάλυμμα του θερμοκηπίου.

Από πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει στην περίπτωση των διαφανών σωλήνων (Kyritsis & Manrogiopoulos, 1987; Manrogiopoulos & Kyritsis, 1993) βρέθηκε ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μπορεί να αυξηθεί από 2-6 °C για περιοχές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος από 32 °N έως και 52.5 °N και για έκταση θερμοκηπίων από 72-500 m². Γυαλί και PE μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων. Το νερό ως μέσον αποθήκευσης θερμότητας στοιχίζει ελάχιστα, το μειονέκτημα όμως είναι ότι το 20-25% της πολύτιμης επιφάνειας του εδάφους καθίσταται μη αξιοποιήσιμη για καλλιέργεια εξαιτίας των σωλήνων.

Επιπλέον η απόδοση του συστήματος είναι μικρή κατά την διάρκεια του χειμώνα ιδιαίτερα όταν τα φυτά είναι μεγάλου ύψους και δεν υπάρχει πολλή διαθέσιμη ακτινοβολία κάτω από αυτά. Ένας συνδυασμός διαφανών σωλήνων αποθήκευσης θερμότητας που έχουν γεωθερμικό ρευστό και θερμοκουρτίνας δύναται να αυξήσει αρκετά την απόδοση του συστήματος (Barrel et al, 1999)

Η χρήση δεξαμενών νερού ως μέσον αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα από 2-11°C για γεωγραφικού πλάτους περιοχές από 28 °N έως και 52.5 °N και για έκταση θερμοκηπίων από 12-1000 m² και χρειάζονται λιγότερο χώρο σε σχέση με τους διαφανείς σωλήνες εδάφους (Santamouris et al, 1994b, Gupta and Tiwari, 2002, Sethi et al, 2003). Όμως η διάβρωση και οι διαφυγές του νερού είναι προβλήματα που εμφανίζονται κατά την χρήση τους.

2.3.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μετακινούμενη μόνωση / θερμοκουρτίνας

Η κινητή μόνωση είναι συνήθως μια θερμοκουρτίνα νύχτας ή ένα θερμικό παραπέτασμα που σύρεται εσωτερικά ή εξωτερικά του καλύμματος θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια της νύχτας στους χειμωνιάτικους μήνες για να μειώσει τις απώλειες θερμότητας στο εξωτερικό περιβάλλον καταλήγοντας στην διατήρηση της ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο. Αυτές οι κινητές μόνωσεις απομακρύνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας προκειμένου η ηλιακή ακτινοβολία για εισέρχεται απρόσκοπτα στο θερμοκήπιο και να ικανοποιεί τις θερμικές και φωτοσυνθετικές ανάγκες των φυτών. Η αρχή λειτουργίας της θερμοκουρτίνας είναι να είναι να παρέχει πρόσθετη θερμική αντίσταση και να μειώνει το συνολικό ποσοστό μεταφοράς θερμότητας στο περιβάλλον. Η θερμοκουρτίνα νύχτας που τοποθετείται μεταξύ των φυτών και του καλύμματος του θερμοκηπίου λέγεται εσωτερική κουρτίνα ενώ η εξωτερική κουρτίνα τοποθετείται μεταξύ του καλύμματος του θερμοκηπίου και του περιβάλλοντος. Η εσωτερική κουρτίνα προτιμάται επειδή μειώνει τη θερμική περατότητα της θερμοκηπιακής δομής. Χαμηλώνει τις ενεργειακές απώλειες με την προσθήκη δύο ή περισσότερων στάσιμων στρωμάτων αέρα μεταξύ του εσωτερικού του θερμοκηπίου και του καλύμματος και την τοποθέτηση υαλοπινάκων.

Οι εσωτερικές θερμοκουρτίνας προτιμώνται σε σχέση με τις εξωτερικές καθώς η χρήση τους είναι απλή, ανέξοδη και αποδοτική στη μείωση των νυχτερινών ενεργειακών απωλειών. Η εξωτερική θερμοκουρτίνα φθείρεται αρκετά γρήγορα κάτι που οφείλεται στις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος. Αν και πολλοί τύποι υλικών για θερμοκουρτίνας είναι διαθέσιμοι

στο εμπόριο, η δημοφιλέστερη επιλογή είναι το φύλλο πολυεστέρα με επικάλυψη αλουμινίου. Όταν και οι δύο πλευρές της θερμοκουρτίνας είναι από αλουμίνιο τότε επιτυγχάνονται τα μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη. Η χρήση τέτοιων θερμοκουρτίνων μπορεί να πετύχει εξοικονόμηση ενέργειας 30-40% ή μπορεί να διατηρήσει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα 3-4 °C υψηλότερα σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους από 30 °N ως 46 °N (Cui and Wang, 2002, Ozturk and Bascetincelik, 2003b, Kittas et al, 2003). Η χρήση της νυχτερινής θερμοκουρτίνας σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους εξοικονόμησης θερμική ενέργειας όπως διπλό κάλυμμα (Abak et al, 1994), στρώμα πετρωμάτων ή γεωθερμική ενέργεια (Ghosal and Tiwari, 2004), μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα από 8-12 °C κατά την διάρκεια της νύχτας σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες και μπορεί να μειώσει το ενεργειακό κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου περίπου 90% ανάλογα και με την γεωγραφική περιοχή που βρίσκεται το θερμοκήπιο. Εντούτοις, τα μειονεκτήματα των θερμοκουρτίνων είναι η ανεπαρκής μηχανική αξιοπιστία, η ελλιπής σφράγιση μετά την διαδικασία κλεισίματος και εκτεταμένες βλάβες και προβλήματα από την συμπύκνωση υδρατμών και στις θερμοκουρτίνες και στα φυτά.

2.4 ΨΥΞΗ

2.4.1 Εισαγωγή

Από την κατασκευή του το θερμοκήπιο αποτελεί ένα ηλιακό συλλέκτη ο οποίος με τον συνδυασμό της παγίδευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και του περιορισμού των ανταλλαγών θερμότητας με συναγωγή οδηγεί σε υψηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό του. Οι θερμοκρασίες αυτές γίνονται υπερβολικές όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη και ο έλεγχος της θερμοκρασίας καθίσταται απαραίτητος. Τα θερμοκήπια χρειάζεται να ψύχονται και το ρεύμα αερισμού γίνεται αυξητικά κρίσιμο και μια ποικιλία θερμοκηπίων, ιδιαίτερα αυτών σε θερμά κλίματα της Μεσογειακής λεκάνης. Ο καλύτερος τρόπος να πληρούνται οι ανάγκες της εμπορικής αγροτικής παραγωγής είναι μια βέλτιστη διαχείριση του κλίματος του θερμοκηπίου. Αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνει την αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ενέργειας, θέρμανση εδάφους και αέρα, αερισμό και δροσισμό, έλεγχο υγρασίας, εμπλουτισμό με CO₂ και εφαρμογή λίπανσης. Μια ουσιαστική διαδικασία είναι η εναλλαγή αέρα μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Αυτό άμεσα επιδρά στην μεταφορά της αισθητής θερμότητας, στην εξάτμιση H₂O και στο CO₂ προς ή από τον εσωτερικό αέρα. Επομένως μια ακριβής κατανόηση των μηχανισμών της εναλλαγής αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του αέρα, της συγκέντρωσης CO₂ και στην μείωση υπερβολικής υγρασίας που οφείλεται στην διαπνοή των φυτών (Roy et al, 2002).

Ο κλιματισμός των θερμοκηπίων κατά τη θερινή περίοδο είναι πρόβλημα που γίνεται όλο και πιο σοβαρό σε ζώνες μεσογειακού κλίματος όπως η Ελλάδα, Ιταλία, Νότια Γαλλία, Ισπανία και οι χώρες της Βόρειας Αφρικής. Οι περιοχές αυτές τον τελευταίο καιρό γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, χάρη στις κλιματολογικές συνθήκες του χειμώνα, οι οποίες είναι πολύ πιο ευνοϊκές από αυτές που επικρατούν στις βόρειες χώρες, όπως η Ολλανδία.

Το πρόβλημα έγκειται στη συμπεριφορά αυτών των θερμοκηπίων κατά τις περιόδους μεγάλης ζέστης καθώς οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται, συνδυαζόμενες συχνά με ανεπαρκή υγρασία, δεν ευνοούν την παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας. Ένας καλός κλιματισμός κατά την θερινή περίοδο είναι απαραίτητος, αλλά απαιτεί επενδύσεις μικρότερες ή μεγαλύτερες ανάλογα με την ποιότητα που επιθυμεί ο καλλιεργητής. Είναι προφανές ότι είναι πολύ πιο δύσκολο να ψυχθεί ένα θερμοκήπιο το καλοκαίρι από το να

θερμανθεί τον χειμώνα. Η καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο το καλοκαίρι φτάνει, στη μέγιστη τιμή, τα 500-600 Wm⁻² από τα οποία, αν θέλουμε να έχουμε θερμοκρασίες ανάλογες με τις εξωτερικές, πρέπει να αφαιρεθούν 200-250 Wm⁻² αισθητής θερμότητας. Η εξάλειψη αυτής της πλεονάζουσας ενέργειας δεν μπορεί να γίνει με κλασικά ψυκτικά μηχανήματα που είναι πολύ ακριβά, αλλά πρέπει να γίνει με μεθόδους όσο το δυνατόν λιγότερο δαπανηρές όπως ο αερισμός (φυσικός ή δυναμικός εξαερισμός), ο δροσισμός, η τεχνική ομίχλη, η σκίαση ή συνδυασμός περισσότερων του ενός από αυτά τα συστήματα.

2.4.2 Αερισμός

Ο όρος «αερισμός» του θερμοκηπίου περιλαμβάνει δύο έννοιες: Την ανάδευση του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου, με σκοπό τη δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών σ' όλη την έκταση του, και την ανταλλαγή του θερμού αέρα του θερμοκηπίου με τον εξωτερικό αέρα, που ονομάζεται ειδικότερα εξαερισμός. Στόχος του εξαερισμού είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη θερμή περίοδο, η μείωση της σχετικής υγρασίας και η ρύθμιση της συγκέντρωσης του CO₂.

Στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες, οι ανάγκες για εξαερισμό είναι μεγάλες, από νωρίς την άνοιξη έως αργά το φθινόπωρο. Ακόμα και το χειμώνα, που, με απλή ανάδευση του αέρα, επιδιώκεται βασικά η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο, υπάρχουν περιπτώσεις που απαιτείται εξαερισμός για μείωση της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα στις νότιες περιοχές, τις ηλιόλουστες ώρες.

Ένα αποτελεσματικό σύστημα εξαερισμού πρέπει:

- Ø να έχει ικανοποιητική ισχύ, ώστε να μπορεί, αλλάζοντας τον αέρα του θερμοκηπίου, να περιορίζει στο ελάχιστο την αύξηση της θερμοκρασίας, κατά τις θερμές ώρες της ημέρας.
- Ø Να δημιουργεί ομοιόμορφες συνθήκες,
- Ø Να έχει μικρές απαιτήσεις συντήρησης,
- Ø Να είναι απλό και αξιόπιστο και να διαθέτει αυτοματισμούς, να έχει χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Διακρίνουμε δύο τύπους εξαερισμού:

- 1) Φυσικό ή στατικό, όταν ο αέρας κινείται λόγω των διαφορών πίεσης που δημιουργούνται από τις φυσικές συνθήκες (άνεμοι, διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού-εξωτερικού χώρου και συνδυασμός τους).
- 2) Δυναμικό, όταν οι διαφορές πίεσης που κινούν τον αέρα δημιουργούνται από ανεμιστήρες.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες παράγοντες που επηρεάζουν τις ανάγκες σε εξαερισμό είναι:

- Ø Η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.
- Ø Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Ø Η μέγιστη ανεκτή θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο που εξαρτάται από το είδος του φυτού.
- Ø Το μέγεθος και τα υλικά κατασκευής του θερμοκηπίου.
- Ø Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής στο χώρο του θερμοκηπίου.

2.4.3 Φυσικός Εξαερισμός

Ο φυσικός εξαερισμός μεταξύ του εσωτερικού ενός θερμοκηπίου και του περιβάλλοντος του είναι ο κύριος ρυθμιστικός παράγοντας για τον έλεγχο του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Η διαδικασία του εξαερισμού περιλαμβάνει ένα κύριο ρεύμα αέρα κινούμενο από σταθερά πεδία πιέσεων δημιουργούμενα από τον άνεμο, μια τυρβώδη ροή κινουμένη από διακυμάνσεις των πιέσεων του αέρα και από ένα φαινόμενο στρωμάτωσης λόγω των δυνάμεων άνωσης και θερμοκρασιακών διαφορών (Boulard et al, 1998). Με δεδομένο ότι ο φυσικός εξαερισμός είναι η συνήθης πρακτική καθώς πια τώρα όλα τα θερμοκήπια περιλαμβάνουν κάποιο τέτοιο σύστημα εξαερισμού (Boulard and Baille 1995, Kittas et al, 1997), στόχος είναι να βελτιστοποιήσουμε το θερμοκήπιο και τον σχεδιασμό του αερισμού. Ένα αποδοτικό σύστημα αερισμού είναι ιδιαίτερα κρίσιμο υπό Μεσογειακές συνθήκες για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας και σε ορισμένο βαθμό της διαπνοής της καλλιέργειας (Boulard and Baile, 1993).

Οι περισσότερες πειραματικές μελέτες πάνω στον εξαερισμό σε πλήρους κλίμακας θερμοκήπια έχουν χρησιμοποιήσει tracer τεχνικές (διοχέτευση αερίου για εντός του χώρου). Αυτές περιλαμβάνουν μετρήσεις σε θερμοκήπια εξοπλισμένα είτε με ανεμιστήρες οροφής (Fernandez and Bailey, 1992) η εξαεριστήρες οροφής και πλαϊνών (Papadakis et al 1996, Kittas et al, 1996). Εν τούτοις οι tracer τεχνικές ούτε επιτρέπουν σαφή ταυτοποίηση των στοιχείων της συνολικής ροής ούτε πρόβλεψη του μοντέλου ροής του αέρα. Πιο πρόσφατα απευθείας μετρήσεις στις εναλλαγές αέρα και θερμότητας διαμέσου εξαεριστήρων θερμοκηπίου είχαν αναλάβει να υπολογίσουν τα μεγέθη των διαφορετικών στοιχείων της ροής χρησιμοποιώντας μονοδιάστατα ηχητικά ανεμόμετρα και λεπτά θερμοζεύγη.

Ο μηχανισμός του φυσικού εξαερισμού εξαρτάται από τις επιδράσεις του ανέμου, την θερμική άνωση και τον συνδυασμό και των δύο, ανέμου και δυνάμεων άνωσης. (Hsin Yu et al, 2002). Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου είναι οι κυρίαρχοι παράγοντες στις επιδράσεις του επαγόμενου ανέμου. Οι Miguel et al (2001), υπέδειξαν ότι μια πλήρης κατανόηση της σχέσης μεταξύ των χαρακτηριστικών του ανέμου (ταχύτητα και διεύθυνση) και των χαρακτηριστικών του εξαερισμού (διαστάσεις , εσωτερικός και εξωτερικός σχεδιασμός) απαιτούνται για να επιτευχθεί αποδοτικός φυσικός εξαερισμός. Δηλ. ο εξαερισμός και οι ρυθμοί διαφυγής εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, διαφορά εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας και το άνοιγμα του αερισμού.

Τα ανοίγματα φυσικού αερισμού περιλαμβάνουν παράθυρα, πόρτες, ανοίγματα εκπομπής και φωταγωγούς, ανεμιστήρες οροφής και ειδικού σχεδιασμού εσωτερικά και εξωτερικά ανοίγματα. Ο ρυθμός φυσικού εξαερισμού εξαρτάται από την επίδραση του μετακινούμενου ανέμου μέσω των ανοιγμάτων. Προτείνεται μια εμπειρική σχέση για να προβλέπει την ροή μέσω ενός πλαϊνού τοιχώματος ανοίγματος ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και της αποτελεσματικότητας των ανοιγμάτων. Η σχέση αυτή είναι $Q = EAV$, όπου Q ο ρυθμός ροής ανέμου σε m^3/s , E η αποτελεσματικότητα των ανοιγμάτων (μη διαστασοποιημένη), A το μέγεθος του εσωτερικού ανοίγματος σε m^2 και V η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec .

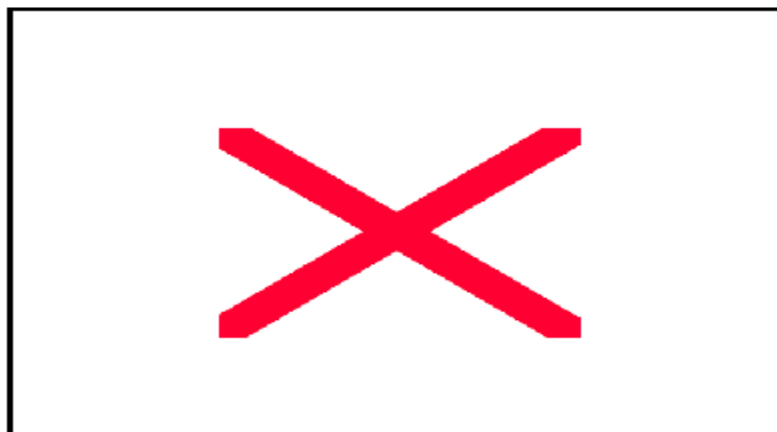
Η εναλλαγή αέρα μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου επιδρά στις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμοκρασία, υγρασία και συγκέντρωση CO_2 που με την σειρά τους επιδρούν στην ανάπτυξη και παραγωγή της καλλιέργειας. Κατά την διάρκεια του χειμώνα, ο εξαερισμός πρέπει να αναιρεί την υπερβολική υγρασία και να παρέχει μια καλή ατμόσφαιρα εντός του θερμοκηπίου, ενώ κατά

την διάρκεια του καλοκαιριού οι κύριες αιτίες για αερισμό είναι για δροσισμό και για αφαίρεση υγρασίας, εξαρτώμενες από τις εσωτερικές συνθήκες. Εντούτοις η ακρίβεια της πρόβλεψης είναι ακόμα αβέβαιη εξαιτίας των δυσκολιών της εκτέλεσης ακριβών μετρήσεων και του ελλείμματος μοντέλων που πρέπει να εφαρμοστούν σε ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών θερμοκηπίων. Οι μετρήσεις του εξαερισμού και οι ρυθμοί διαφυγής είναι απαραίτητες για να παρέχουν καλή κατανόηση του ελέγχου του κλίματος στα θερμοκήπια. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του εξαερισμού ενός θερμοκηπίου για να προάγουμε καλό έλεγχο των εσωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών και μια καλή απόδοση σε υψηλής ποιότητας παραγωγή (Batista et al, 1999).

Γενικά χαρακτηρίζουμε τον αερισμό ενός θερμοκηπίου με βάση τον ρυθμό ωριαίας ανανέωσης N , δηλ. το πόσες φορές ο όγκος του θερμοκηπίου ανανεώνεται σε μια ώρα (h^{-1}). Από συγκριτική άποψη είναι προτιμότερο να εκφράζεται ο αερισμός ως ροή όγκου αέρος η μάζα αέρος που αντιστοιχεί στην επιφάνεια του ανοίγματος η στην επιφάνεια του θερμοκηπίου.

Σε ένα θερμοκήπιο που διαθέτει ανοίγματα οροφής και πλαϊνά (σχήμα 10) ο φυσικός αερισμός δηλ. η ροή αέρα μέσω ενός ανοίγματος προκαλείται από τον συνδυασμό των διαφορών πίεσης που δημιουργούνται:

1. λόγω των δυνάμεων άνωσης που οφείλονται σε διαφορές θερμοκρασίας (φαινόμενο καμινάδας) μεταξύ εξωτερικού περιβάλλοντος και εσωτερικού χώρου, καθώς ο θερμός αέρας μέσα στο θερμοκήπιο, επειδή είναι ελαφρύτερος, ανεβαίνει προς τα πάνω και βγαίνει από τα ανοίγματα της οροφής. Έτσι δημιουργείται υποπίεση και από τα πλευρικά ανοίγματα εισέρχεται στο θερμοκήπιο ψυχρός αέρας, ο οποίος επειδή είναι βαρύτερος παραμένει χαμηλά μέχρι να ζεσταθεί, οπότε ανεβαίνει μέχρι την οροφή κ.ο.κ.
2. λόγω της ταχύτητας του ανέμου, αφού ο αέρας μπαίνει από τα παράθυρα της πλευράς με την μεγαλύτερη πίεση και βγαίνει από εκείνα της απέναντι πλευράς που έχει μικρότερη πίεση (Kittas et al, 2001).



Σχήμα 5: Ανοίγματα φυσικού εξαερισμού θερμοκηπίου

Τα ανοίγματα πρέπει να καλύπτουν μια επιφάνεια ίση με το 25-30% της επιφάνειας του εδάφους, ώστε ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα να είναι ικανοποιητικός (Γραφιαδέλλης, 1987). Η ελάχιστη σχετική επιφάνεια των ανοιγμάτων εξαερισμού, εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες τις περιοχής και από το είδος των φυτών που καλλιεργούνται. Η έκταση και το γεωμετρικό σχήμα των ανοιγμάτων του θερμοκηπίου επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση της ροής και επομένως το ρυθμό αερισμού. Τα παράθυρα της υπήνεμης πλευράς,

που βρίσκονται σε αρνητική πίεση σε σχέση με τη βαρομετρική, είναι ασφαλέστερο να ανοίγουν πρώτα.

Ο καλύτερος τρόπος φυσικού εξαερισμού είναι ο συνδυασμός πλευρικών ανοιγμάτων με παράθυρα οροφής, σε διάφορες διαστάσεις ή συνεχή, σε όλο το μήκος του θερμοκηπίου. Αυτός ο συνδυασμός ανοιγμάτων έχει ως αποτέλεσμα καλό εξαερισμό, ιδιαίτερα τις θερμές περιόδους του έτους. Η αυτοματοποίηση των ανοιγμάτων γίνεται με ηλεκτροκινητήρες που η εκκίνηση τους γίνεται με την βοήθεια θερμοστάτη χώρου. Το μειονέκτημα είναι ότι το σύστημα λειτουργεί με βάση μόνο τη θερμοκρασία του χώρου, χωρίς να παίρνει υπόψη τους ανέμους. Ένας ισχυρός άνεμος, όμως, μπορεί να προκαλέσει υπερβολική μείωση της θερμοκρασίας και εκτός από το θερμοστάτη πρέπει να υπάρχει και ανεμόμετρο, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η ταχύτητα του αέρα. Μόνο με την λειτουργία τέτοιου συστήματος δεν μπορούν να επιτευχθούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στο χώρο του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα τις ημέρες με άπνοια (η θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο είναι συνήθως μεγαλύτερη από την εξωτερική κατά 6°C και πάνω). Τέλος, για να λειτουργήσει σωστά απαιτούνται κατασκευές θερμοκηπίου μεγάλου ύψους και δυνατότητα κατασκευής στεγανών παραθύρων οροφής που να αυτοματοποιούνται εύκολα.

Το χειμώνα η θερμοκρασία πρέπει να ρυθμίζεται μόνο από τα ανοίγματα της οροφής, ώστε να προφυλάσσονται τα φυτά από τα ψυχρά ρεύματα. Την άνοιξη και το φθινόπωρο υπολογίζεται ότι στις ελληνικές συνθήκες απαιτούνται περίπου 40 αλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου την ώρα. Το καλοκαίρι όμως, συχνά δεν επαρκούν τα ανοίγματα για τη μείωση της υψηλής θερμοκρασίας, οπότε είναι απαραίτητη η εφαρμογή δυναμικού εξαερισμού, σε συνδυασμό ίσως και με σύστημα δροσισμού.

Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για να μετρήσουν και να προβλέψουν τον αερισμό και τους ρυθμούς διαφυγής όπως tracer gas τεχνικές, ενεργειακά ισοζύγια και μετρήσεις διαφορών πίεσης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Το ενεργειακό ισοζύγιο είναι βασισμένο στο γεγονός ότι ο εξαερισμός αφαιρεί ενέργεια μέσα από το θερμοκήπιο ως τρόπος πρόληψης υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών. Οι Fernandez and Bailey (1992), συγκρίναν τα αποτελέσματα που πήραν από το ενεργειακό ισοζύγιο και τις tracer gas τεχνικές. Η tracer gas έδειξε ακρίβεια σε σχέση με το ενεργειακό ισοζύγιο σε χαμηλούς ρυθμούς εξαερισμού. Εν τούτοις, τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια για ανοίγματα αερισμού περισσότερα από 20%. Η δυσκολία στην χρήση αυτής της μεθόδου είναι η ανάγκη να μετρηθούν ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών και μια μόνο ανακρίβεια μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

Οι Fernandez and Bailey (1992), έχουν δείξει ότι η διεύθυνση του ανέμου δεν έχει ανιχνεύσιμη επίδραση στο ρυθμό του εξαερισμού είναι η ηλιακή ακτινοβολία, διότι είναι ένα σημαντικό συστατικό του ενεργειακού ισοζυγίου. Όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι υψηλή, η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου αυξάνει και ο ρυθμός αερισμού αυξάνει ως αποτέλεσμα του ισχυρότερου φαινομένου της θερμικής άνωσης. Άρα σε περιοχές που ο άνεμος δεν είναι τόσο δυνατός, η διαφορά στην θερμοκρασία είναι περισσότερο σημαντική στον φυσικό αερισμό των θερμοκηπίων. Η ροή αέρα μέσω ανοίγματος οφείλεται στην διαφορά πίεσης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι Boulard et al (1996), Papadakis et al (1996), Kittas et al, (1996) μέτρησαν διαφορές πίεσης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος σε διάφορα θερμοκήπια για να ταυτοποιήσουν τους συντελεστές πίεσης του ανέμου και τις μεταβολές του σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του ανέμου. Οι Kittas et al (1996) έχουν αποδείξει, ότι ο ρυθμός αερισμού του επαγόμενου ανέμου μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση ενός συντελεστή πίεσης ανέμου CW. Οι Boulard et al (1996) επίσης συνέκριναν τις μετρήσεις των διαφορών πίεσης με τις tracer gas τεχνικές και επιβεβαίωσαν ότι οι tracer gas τεχνικές μπορεί να μην επιτρέπουν τον καθορισμό πραγματικής ροής αλλά χαρακτηρίζουν την αποτελεσματική ροή μέσω των ανοιγμάτων.

2.4.4 Δυναμικός Εξαερισμός

Τα περισσότερα θερμοκήπια στις μεσογειακές περιοχές δροσίζονται κυρίως με φυσικό εξαερισμό. Αυτός ο τρόπος εξαερισμού είναι αποτελεσματικός μόνο όταν υπάρχει άνεμος και όταν η ατμοσφαιρική θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν υπερβαίνει τους 30 °C, με τον όρο ότι τα ανοίγματα στις πλευρές και την οροφή είναι αρκετά σε αριθμό και εμβαδόν. Το καλοκαίρι και όταν επικρατεί άπνοια ο φυσικός εξαερισμός δεν είναι επαρκής (Baille 1988, El-Aidy 1991).

Ο δυναμικός εξαερισμός με ανανέωση του αέρα του θερμοκηπίου ανά λεπτό, είναι πιο αποτελεσματικός στον δροσισμό των θερμοκηπίων όταν ο εξωτερικός αέρας είναι πολύ κρύος (χειμώνας) ή πολύ ξηρός (καλοκαίρι) τα φυτά στο θερμοκήπιο υποφέρουν (Triti et al, 1984). Το κόστος του εξοπλισμού και η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται εμποδίζουν την εκτεταμένη εφαρμογή του δυναμικού εξαερισμού στα θερμοκήπια (Baille, 1988), η οποία σε περιοχές όπως η χώρα μας κρίνεται απαραίτητη.

Με τον δυναμικό αερισμό είναι δυνατόν να επιτευχθούν ρυθμοί ανανέωσης του αέρα μεγαλύτεροι των 40 ανά ώρα (h^{-1}) κάτι που δεν επιτυγχάνεται με τα συστήματα φυσικού αερισμού. Προς τούτο γίνεται χρήση ανεμιστήρων που τοποθετούνται στο τοίχωμα του θερμοκηπίου. Ιδιαίτερα στις θερμές περιοχές, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή, για να επιτευχθεί μια διαφορά θερμοκρασιών μέσα-έξω 6 °C, απαιτούνται 60 αλλαγές του αέρα την ώρα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μηχανικά μέσα, δεδομένου ότι συχνά επικρατούν και χαμηλές ταχύτητες ανέμων. Είναι γνωστό ότι όταν το ποσοστό ανοιγμάτων φυσικού αερισμού ξεπερνά το 30% η επίδραση του αερισμού στην διάφορα θερμοκρασίας (ΔT) καθίσταται αμελητέα (Kittas et al, 1997).

Με την τοποθέτηση ηλεκτροκίνητων ανεμιστήρων ή εξαεριστήρων, ο αέρας του θερμοκηπίου μπορεί να ανανεώνεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι εξαεριστήρες απορροφούν αέρα από το περιβάλλον εκτός του θερμοκηπίου και τον διοχετεύουν στον εσωτερικό, απωθώντας τον αέρα που πρέπει να ανανεωθεί (εξαερισμός με υπερπίεση). Συνηθέστερα όμως απομακρύνουν τον αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου προς το εξωτερικό, δημιουργώντας υποπίεση, οπότε φρέσκος αέρας εισέρχεται από τα παράθυρα που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά. Λεπτομέρειες για τον τύπο και την τοποθέτηση και τον χρόνο λειτουργίας των ανεμιστήρων ανάλογα με τις απαιτήσεις του θερμοκηπίου σε εξαερισμό τις διαφορές εποχές του έτους, δίδονται στην βιβλιογραφία (Μαυρογιαννόπουλος, 2001, Γραφιαδέλης, 1987).

Μια τυπική εγκατάσταση δυναμικού εξαερισμού απαιτεί ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 15-50 MJm² κι ισχύ 5-15 W /m² , ανάλογα με τον τύπο του εξαεριστήρα. Περισσότερες από 60 αλλαγές θεωρούνται αντιοικονομικές, γι' αυτό αν χρειάζεται μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας πρέπει να σκιάζεται το θερμοκήπιο ή να τοποθετείται σύστημα δροσισμού με εξάτμιση νερού. Οι απαιτήσεις σε εξαερισμό, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, επηρεάζονται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη μέγιστη ανεκτή θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο και το μέγεθος του θερμοκηπίου. Ο ρυθμός εξαερισμού, για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη θερμοκρασία εξαρτάται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, την εξατμισοδιαπνοή στο χώρο του θερμοκηπίου και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής.

Τα θερμοκήπια με δυναμικό εξαερισμού παρέχουν ικανοποιητική ανανέωση του αέρα στο χώρο του θερμοκηπίου, ακόμα και σε περιπτώσεις άπνοιας, και είναι η μόνη λύση σε θερμοκήπια όπου είναι τεχνικά και οικονομικά δύσκολη η κατασκευή σωστού συστήματος

παθητικού εξαερισμού. Επίσης, επειδή απαιτούν θερμοκήπια μικρότερου όγκου, οι απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης μικρότερες.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι επίσης το γεγονός ότι με μικρές προσθήκες μπορεί να λειτουργήσει σύστημα δροσισμού, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του χώρου να μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα και κάτω της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα. Το βασικό του μειονέκτημα είναι ότι καταναλώνει σημαντική ποσότητα ενέργειας το καλοκαίρι και φυσικά ότι το θερμοκήπιο πρέπει να βρίσκεται σε περιοχή με παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας σημαντικός κίνδυνος είναι και το ενδεχόμενο να καταστραφεί η φυτεία, αν το σύστημα υποστεί μια ξαφνική βλάβη που δεν μπορεί να επισκευαστεί εύκολα (Μαυρογιαννόπουλος 2001, Γραφιαδέλλης 1987).

2.4.5 Δροσισμός

Ο δροσισμός του θερμοκηπίου είναι ένα θέμα αυξανόμενου ενδιαφέροντος ιδίως για τους καλλιεργητές στις θερμές χώρες όπου υψηλή θερμοκρασία και έλλειμμα πίεσης αέρα παρατηρούνται κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Επειδή ο φυσικός εξαερισμός δεν είναι ικανοποιητικός για εξαγωγή της υπερβολικής ενέργειας κατά την διάρκεια καλοκαιρινών ημερών, διάφοροι μέθοδοι για δροσισμό της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ευνοϊκού μικροκλίματος εντός του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τον εξαερισμό.

Μέθοδοι που επιτρέπουν την μείωση της θερμοκρασίας του αέρος του θερμοκηπίου είναι:

- Ø Ψύξη του αέρα πριν την είσοδο του στο θερμοκήπιο. Είναι η περίπτωση του συστήματος δυναμικού αερισμού με υγρή παρειά (Cooling system).
- Ø Μετατροπή σε λανθάνουσα θερμότητα της ενέργειας ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο, ώστε να μειωθεί το φορτίο αισθητής θερμότητας. Ο όρος λανθάνουσα θερμότητα αντιπροσωπεύεται από το $a.R_n$, στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου, πρέπει λοιπόν να αυξηθεί το a . Πρόκειται για το σύστημα υδρονέφωσης με χαμηλή πίεση και υδρονέφωση με υψηλή πίεση (Fog system).

Η αρχή της ψύξης με την τεχνική της υδρονέφωσης βασίζεται στη μετατροπή της προσπίπτουσας ενέργειας ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα με εξάτμιση των σταγονιδίων νερού που ψεκάζονται από τις συσκευές υδρονέφωσης χαμηλής και υψηλής πίεσης (Fog system)

Προκειμένου για υδρονέφωση χαμηλής πίεσης τα σταγονίδια νερού είναι μεγέθους μεγαλύτερου των 200 μm , τα οποία και πέφτουν κατά ένα μέρος στο έδαφος και στα φυτά, απ' όπου εξατμίζονται ανάλογα με την θερμοκρασία αυτών των επιφανειών και με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούνται κλασικοί εκτοξευτές (Sprinklers) ή μικροεκτοξευτές (Mini sprinklers). Εξαιτίας του μεγέθους των σταγόνων (περίπου 200 μm) η ποσότητα του εξατμιζόμενου νερού στον αέρα είναι σχετικά μικρή, 20% με 30% (Timmons - Baughman, 1983).

Προκειμένου όμως για το Fog system ή υδρονέφωση υψηλής πίεσης, τα σταγονίδια του νερού είναι της τάξης μερικών δεκάδων μm και παραμένουν αιωρούμενα μέχρι την πλήρη εξάτμιση. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ομίχλης αποτελούμενης από πολύ ψηλά σταγονίδια τα οποία στην συνέχεια παραμένουν αιωρούμενα στον αέρα, είναι δύο ειδών: σωλήνες διανομής και δίσκοι. Αυτά τα μικρά σταγονίδια εξατμίζονται στον αέρα

κατά μεγάλο μέρος, βρέχοντας ελάχιστα τα όργανα (άνθη, καρποί, φύλλα) αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα που δημιουργούνται από την χρήση ψεκασμού με χαμηλή πίεση (στίγματα στα φύλλα, καψίματα από το φαινόμενο του φακού από τα σταγονίδια, μηχανικές βλάβες στα ευαίσθητα όργανα κ.λ.π.).

Οι επιδόσεις αυτών των συστημάτων είναι γενικά πολύ ικανοποιητικές, υπό τον όρο ότι γίνεται ταυτόχρονα καλή διαχείριση του αερισμού και υπό την προϋπόθεση της ύπαρξης πολύ καλής ποιότητας νερού και χρήσης συστημάτων απιονισμού του νερού για την αποφυγή της απόφραξης των μικροεκτοξευτήρων.

2.4.6 Σκίαση

Η τρίτη δυνατότητα ψύξης ενός θερμοκηπίου είναι η μείωση του ποσοστού ενέργειας ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο. Η καθαρή ακτινοβολία μέσα στο θερμοκήπιο είναι κατά την διάρκεια της ημέρας η συνισταμένη:

- ∅ Της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται μέσα στο θερμοκήπιο.
- ∅ Της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους και των φυτών του θερμοκηπίου που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του συντελεστή εκπομπής των τοιχωμάτων (στέγη, κάθετα τοιχώματα).
- ∅ Της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους και των φυτών του θερμοκηπίου που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του συντελεστή εκπομπής του εδάφους και των φυτών.

Οι δύο πρώτοι όροι είναι θετικοί και προστίθενται, ενώ ο τρίτος αφαιρείται από δύο πρώτους.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι, για να μειωθεί το R_n στο θερμοκήπιο, πρέπει να επέμβουμε:

- Είτε στη διαπερατότητα του θερμοκηπίου, κάτι που γίνεται με λεύκανση ή με τοποθέτηση σκιάστρων.
- Είτε στη θερμοκρασία του τοιχώματος κάτι που γίνεται με ψεκασμό στη στέγη, ή με κυκλοφορία νερού στη στέγη.
- Είτε και στα δύο μαζί. Είναι η αρχή του ηλιακού θερμοκηπίου με γυαλί που φιλτράρει, και με κυκλοφορία νερού στη στέγη.

Διακρίνουμε δύο κύριους τύπους σκιάσεως:

- ∅ Τη διαρκή σκίαση. Γίνεται με λεύκανση των τοιχωμάτων ή με σκίαστρο, σε σταθερή θέση (σκίαστρο τοποθετημένο στο εξωτερικό ή στο εσωτερικό του θερμοκηπίου).
- ∅ Την προσωρινή σκίαση. Γίνεται με ένα ύφασμα κουρτίνα το οποίο ξεδιπλώνεται είτε με το χέρι είτε αυτόματα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλές.

Λεύκανση: Μια συνήθης μέθοδος που υιοθετήθηκε από τους παραγωγούς λόγω του χαμηλού κόστους είναι η σκίαση μέσω λεύκανσης του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου για μείωση του φορτίου της ηλιακής ακτινοβολίας. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι δεν είναι εκλεκτική στην ηλιακή ακτινοβολία. Παρουσιάζει την ίδια διαπερατότητα σε όλο το ηλιακό

φάσμα και απορροφά την ίδια ακτινοβολία τόσο στο φωτοσυνθετικά ενεργό τμήμα PAR (400-700 nm) όσο και στο υπόλοιπο φάσμα. Οι Kittas et al (1999) και οι Baille et al (2001), αναφέρουν ότι η εφαρμογή λεύκανσης πάνω σε υλικό κάλυψης γυαλί, επαύξησε την αποδοτικότητα της χρήσης της ακτινοβολίας επαυξάνοντας την PAR, αναλογικά της εισερχομένης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει διότι αύξησε σημαντικά το κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας, μειώνοντας το κλάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση θερμοκρασίας περίπου 7-9 °C. Αυτό το χαρακτηριστικό της λεύκανσης μπορεί να είναι πλεονέκτημα σε σχέση με τους άλλους μηχανισμούς σκίασης, ειδικά στις θερμές χώρες με υψηλή ακτινοβολία κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Άλλο πλεονέκτημα της λεύκανσης είναι ότι δεν επιδρά πάνω στον εξαερισμό του θερμοκηπίου, ενώ τα εσωτερικά δίκτυα σκίασης επιδρούν στην συμπεριφορά του εξαερισμού οροφής. Τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται έχουν ως βάση τον ασβέστη και την κιμωλία. Υπάρχουν και άλλα μίγματα που περιέχουν υγροσκοπικά άλατα που παρουσιάζουν το πλεονέκτημα να δημιουργούν μια σκίαση που είναι συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται (π.χ. Varishade).

Σκίαστρα: Οι περισσότερες έρευνες έχουν ασχοληθεί με άλλες τεχνικές σκίασης, όπως εξωτερικά ή εσωτερικά, σταθερά ή μετακινούμενα παραπετάσματα σκίαση (στόρια) και ασχολούνται κυρίως με τις τροποποιήσεις στην ακτινοβολία επαγόμενες κυρίως από τον μηχανισμό σκίασης. Αυτές οι τεχνικές σκίασης είναι δαπανηρές αλλά έχουν σημαντικές επιδόσεις τόσο στο επίπεδο της σκίασης όσο και στο επίπεδο της θερμικής μόνωσης.

Την τελευταία δεκαετία εμφανίστηκε στο εμπόριο μεγάλος αριθμός υφασμάτων από ακρυλικό, πολυπροπυλένιο, πολυεστέρα, πολυαμίδιο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σκίαστρα. Διαθέτουν μεγάλη ποικιλία αεροπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία. Σήμερα η πιο προηγμένη τεχνολογία σκιάστρων είναι τα σκίαστρα εξοικονόμησης ενέργειας – σκίασης, με λεπτό στρώμα αλουμινίου, που ανακλούν μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας στο εξωτερικό περιβάλλον. Το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται ως κουρτίνες σκίασης με μείωση θερμοκρασίας 8-10 °C ανάλογα αν χρησιμοποιούνται ως κουρτίνες σκίασης στην οροφή του θερμοκηπίου ή και στα πλαϊνά τοιχώματα. Αυτή η μείωση είναι εφικτή μέσα από τον συνδυασμό κουρτινών σκίασης με κάποια άλλη μέθοδο ψύξης του θερμοκηπίου, π.χ φυσικός εξαερισμός. Τον χειμώνα χρησιμοποιούνται ως θερμομονωτικές κουρτίνες, επιτυγχάνεται αύξηση της θερμοκρασίας έως και 5 °C διότι συγκρατούν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου την θερμική ακτινοβολία και είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης καυσίμων για θέρμανση τον χειμώνα έως και 50%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοκήπια στοχεύουν να παρέχουν ιδανικές συνθήκες για ανάπτυξη φυτών και παραγωγή προϊόντων σε όλη τη διάρκεια του χρόνου αποφεύγοντας τις αντίξοες καιρικές συνθήκες όπως χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλό φωτισμό και υψηλή ένταση ανέμου. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (φωτισμός, θερμοκρασία, σχετική υγρασία)

καθορίζουν την ανάπτυξη των φυτών. Ο έλεγχος αυτών των παραγόντων μέσα στα θερμοκήπια είναι πολύ δύσκολος, όχι διότι υπεισέρχονται ταυτόχρονα, αλλά γιατί ο κάθε ένας από αυτούς μεταβάλλεται συνεχώς και υπάρχει μια συνεχής αλληλοεπίδραση μεταξύ τους. Μεταξύ αυτών των παραγόντων ο φωτισμός του θερμοκηπίου είναι ο πλέον σημαντικός για τη φωτοσύνθεση και την ανάπτυξη των φυτών και τα υλικά κάλυψης χαρακτηρίζονται από την σπουδαιότητά τους όσον αφορά το διερχόμενο ποσό και το φάσμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα θερμοκήπια μελετώνται αναφορικά με τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των υλικών κάλυψης. Αναλυτική αναφορά στα είδη των υλικών κάλυψης, στην επίδρασή τους στη σκίαση και στη φασματική κατανομή του φωτός στα θερμοκήπια, στις ραδιομετρικές και θερμικές ιδιότητες, στους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των θερμοκηπίων στις Ευρωπαϊκές χώρες καθώς επίσης και των μεθόδων σκίασης έγινε στο Κεφάλαιο 2 με τις σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύθηκαν διάφοροι μέθοδοι για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραγόντων μέσα στα θερμοκήπια που η εφαρμογή τους εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και από τις τεχνικές λεπτομέρειες της κατασκευής του θερμοκηπίου.

Ο φυσικός φωτισμός είναι ουσιαστικός παράγοντας ανάπτυξης των φυτών και τα θερμοκήπια κατασκευάζονται από διαφανή καλύμματα για μέγιστη αποδοτικότητα εξαρτώμενη από τις ημερήσιες και εποχιακές ανάγκες. Μεταξύ των συνήθων χρησιμοποιούμενων υλικών κάλυψης το γυαλί είναι το πιο σταθερό υλικό με ικανοποιητικές οπτικές και θερμικές ιδιότητες. Τα πλαστικά καλύμματα είναι φτηνότερα από το γυαλί, αλλά τα περισσότερα εξ αυτών μειονεκτούν όσον αφορά τον φωτισμό και τις θερμικές ιδιότητες (Papadakis et al, 2000).

Ένα εναλλακτικό διαφανές υλικό κάλυψης στην κατηγορία των υαλοπινάκων για θερμοκήπια είναι ο υαλοπίνακας τύπου φακού Fresnel. Η χρήση του για έλεγχο φωτισμού και ενέργειας εσωτερικών χώρων έχει παρουσιαστεί από τους Jirka et al (1998) και έχει σαν αποτέλεσμα την χρήση τους ως υλικό κάλυψης και θερμοκηπίων (Jirka et al, 1999). Η χρήση των φακών Fresnel αντί των τυπικών υαλοπινάκων στην κάλυψη των θερμοκηπίων είναι μια νέα ιδέα που αποσκοπεί στη βελτίωση του φωτισμού και των ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου. Στην παρούσα εργασία μελετάται ο έλεγχος φωτισμού και θερμοκρασίας στα θερμοκήπια με τη χρήση των γραμμικών φακών Fresnel και τρόποι αξιοποίησης της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας.

3.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ FRESNEL

3.2.1 Γενικά για την Συγκέντρωση της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πριν την απορρόφηση και η μετέπειτα μετατροπή της σε χρήσιμη ενέργεια γίνεται όλο και πιο σημαντική για τις πρακτικές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας. Οι κύριες αιτίες για συγκέντρωση φωτός είναι δύο: το υψηλό κόστος των μετατροπέων της ηλιακής ενέργειας κάνει προτιμότερη την συλλογή φωτός χρησιμοποιώντας ένα οπτικό στοιχείο χαμηλού κόστους και μεγάλου διαμετρήματος

και συγκέντρωση του φωτός πάνω σε έναν μετατροπέα μικρότερης επιφάνειας και δεύτερον σε πολλές περιπτώσεις η αποδοτικότητα της διαδικασίας μετατροπής αυξάνει όταν μεγαλώνει η πυκνότητα της ακτινοβολίας του προσπίπτοντας φωτός πάνω στον μετατροπέα.

Στο κεφάλαιο 1 και στην παράγραφο 1.2.5 έγινε διάκριση των ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι φακοί Fresnel ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων που είναι γραμμικά στοιχεία και που συγκλίνουν μια προσπίπτουσα παράλληλη δέσμη ηλιακών ακτίνων σε μια ευθεία γραμμή ή ζώνη στο επίπεδο εστίασης τους. Οι γραμμικοί συγκεντρωτές είναι φτιαγμένοι από ανακλαστικά ή διαθλαστικά υλικά και είναι συχνά προτιμότεροι έναντι των στοιχείων κυκλικής γεωμετρίας, εξαιτίας της απλότητας τους και των χαμηλών απαιτήσεων ευθυγράμμισης.

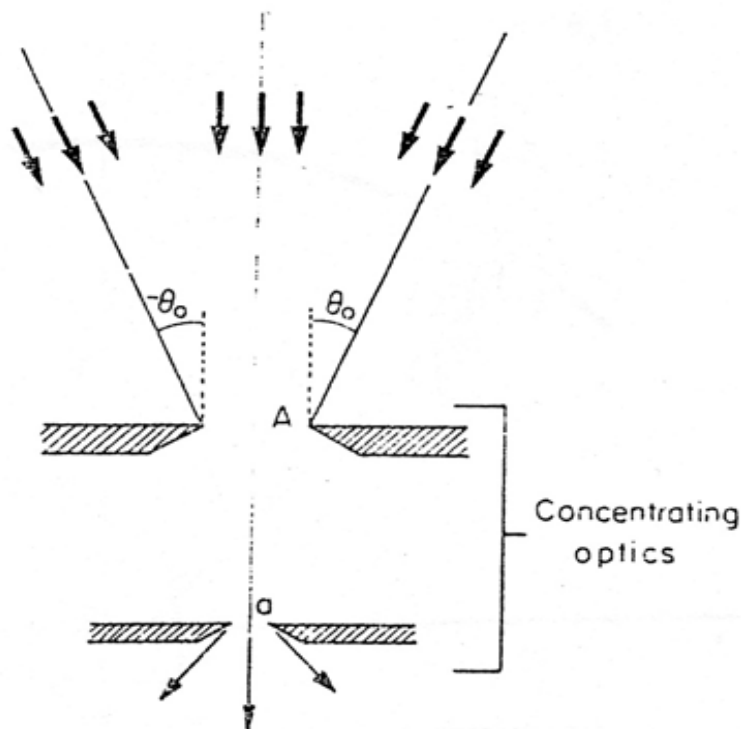
Στα συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ενέργειας η πηγή ακτινοβολίας διαδίδεται κατά μήκος ενός μονοπατιού στο εγκάρσιο επίπεδο ενός γραμμικού άξονα. Η ανάλυση συνεπώς απλοποιείται στον διδιάστατο χώρο αυτού του επιπέδου. Σ' αυτήν την περίπτωση, ο λόγος συγκέντρωσης $C(\theta_0)$ ορίζεται ως:

$$C(\theta_0) = A/a$$

όπου A είναι το πλάτος του διαμετρήματος εισόδου του απορροφητή και a αναπαριστά το εξερχόμενο διαμέτρημα ή το πλάτος του μετατροπέα στον οποίο η ακτινοβολία συγκεντρώνεται (Rabl, 1976a, Kritchman et al, 1979). Το μέγιστο δυνατό όριο της συγκέντρωσης γίνεται όταν:

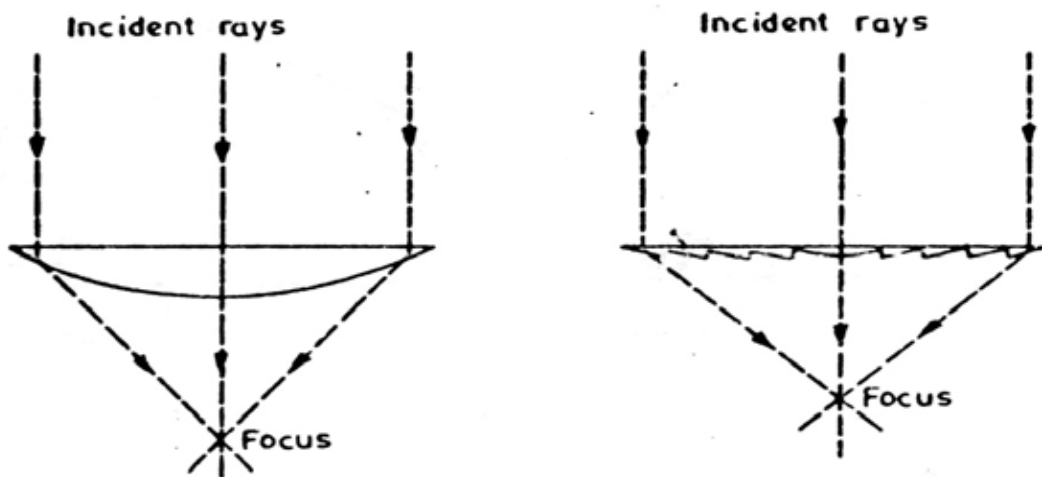
$$C(\theta_0) \leq 1/\sin\theta_0$$

Όπου θ_0 είναι το μισό της γωνίας υποδοχής της εισερχόμενης ακτινοβολίας



3.2.2 Φακοί Fresnel

Ο φακός **Fresnel** ο οποίος συμπεριφέρεται όπως ο συμβατικός σφαιρικός φακός είναι φτιαγμένος από ένα λεπτό επίπεδο φύλλο από διαφανές υλικό έχοντας ομόκεντρα πρισματικά αυλάκια χαραγμένα στην μια η και στις δυο πλευρές.



Σχήμα 2 (Francisde Winter, 1990) : Συμβατικός φακός και φακός Fresnel

Είναι δύσκολη η διαμόρφωση ενός φακού Fresnel από γυαλί, διότι η υψηλή έκταση της επιφανείας του γυαλιού εμποδίζει τη συμβατότητα και στην παραμικρή λεπτομέρεια της κατασκευής. Έτσι η εντατική ανάπτυξη και εξάπλωση της χρήσης των φακών **Fresnel** άρχισε μόλις το 1949 με την ανακάλυψη των οπτικών πλαστικών τα οποία μπορούν να διαμορφωθούν σε φακούς Fresnel, ιδανικοί για δημιουργία ειδώλου, έχοντας περισσότερα από 20 αυλάκια ανά mm. Τα πλαστικά είναι ιδιαίτερος χρήσιμα διότι ένα φύλλο μπορεί να πεπιεσθεί θερμικά η να εκχυθεί υπό πίεση σε εκμαγείο έχοντας γυαλισμένες-λείες πλευρές.

Εξαιτίας των πολλών και ελκυστικών χαρακτηριστικών, του μικρού όγκου και βάρους, της σχετικά μεγάλης διαμέτρου, της μικρής εστιακής απόστασης f και του χαμηλού κόστους, οι φακοί Fresnel έχουν επεκταθεί για πολλές εφαρμογές. Εντούτοις με λίγες εξαιρέσεις, ο σχεδιασμός των φακών Fresnel δίνει έμφαση σε εφαρμογές εστίασης και προβολής. Αυτό οφείλεται στις συγκεντρωτικές του ικανότητες που είναι πολύ σημαντικές στο πεδίο της ηλιακής ενέργειας.

Όταν ο φακός χρησιμοποιείται ως συγκεντρωτής με τα αυλάκια προς τα πάνω (δηλ. προς την μεριά του ήλιου) η απώλεια είναι μεγάλη εξαιτίας του "blocking" αποτέλεσμα της κάθετης πλευράς των αυλάκων και λόγω της σκόνης που συσσωρεύεται γρήγορα σε τέτοιο ανάγλυφο επίπεδο. Από την άλλη πλευρά αν τα αυλάκια είναι στραμμένα προς τα κάτω, σοβαρές παρεκκλίσεις εκτός αξόνων συμβαίνουν, εμποδίζοντας καλή συγκέντρωση εκτός από πολύ μικρές γωνίες πρόσπτωσης (Kritchman et al, 1979a). Εν συνεχεία όμως ο σχεδιασμός των φακών βελτιώθηκε διότι οι Kritchman et al (1979b) έφτιαξαν ένα συμμετρικό φακό που αποφεύγει αυτά τα προβλήματα. Αυτός ο νέος φακός Fresnel αν και

είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να έχει τα αυλάκια στραμμένα προς τα κάτω για να εμποδίζεται το "blocking", διαχειρίζεται παρόλα αυτά την διατήρηση υψηλής συγκέντρωσης ακόμα και για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Ο σχεδιασμός μοιάζει στα ιδανικά συγκεντρωτικά κάτοπτρα του R. Winston. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η διδιάστατη περίπτωση των γραμμικών συγκεντρωτικών στοιχείων.

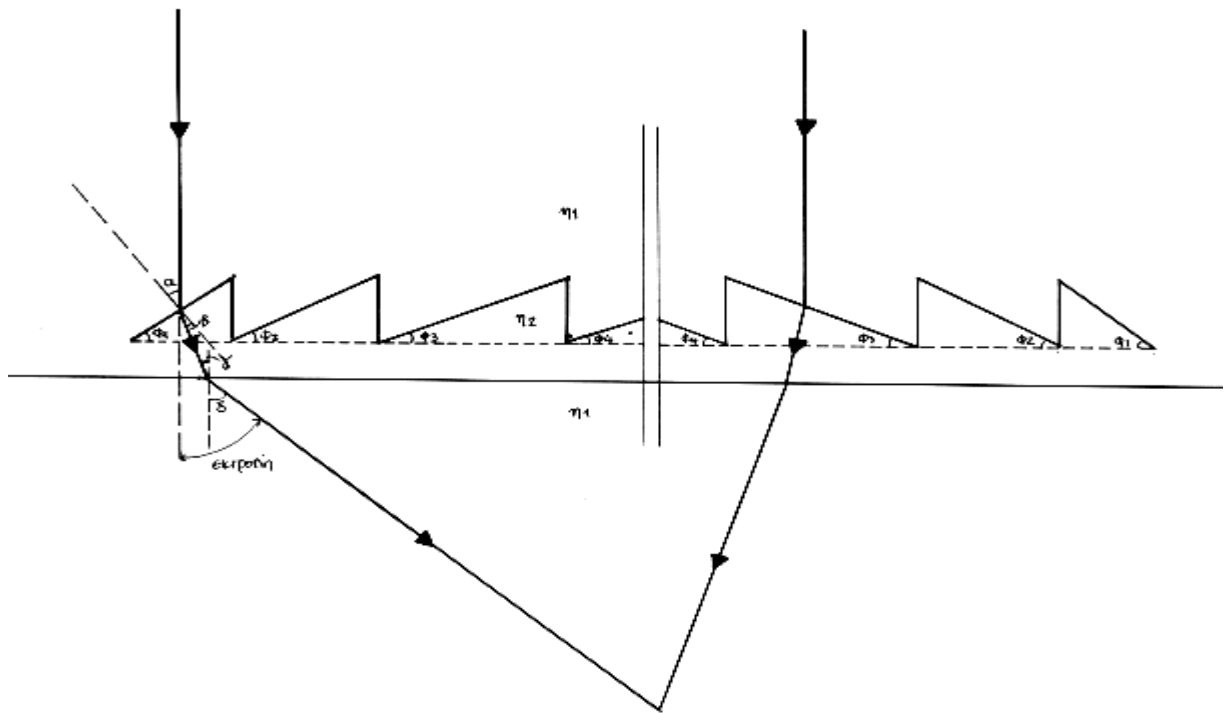
Η προέλευση των φακών Fresnel (Miller et al, 1951) χρονολογείται από τις αρχές του 18ου αιώνα όταν ο Abbe Rochon κατασκεύασε ένα φακό με ομόκεντρα αυλάκια. Η πραγματική ανάπτυξη ενός «συγκεντρωτικού κλιμακωτού» τύπου φακών δεν έπιασε μέχρι που ο Fresnel συνέλαβε την ιδέα να κατασκευάσει τέτοιους φακούς και έφτιαξε μεγάλο αριθμό για την χρήση ως φανοστάτες. Το όνομα φακός Fresnel δόθηκε σε αυτό τον τύπο φακού και έχει παραμείνει από εκείνη την περίοδο. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή αυτών των φακών ήταν το γυαλί και στοιχεία εκμαγείου γυαλιού, εμφάνιζε όμως δυσκολίες στη διαμόρφωσή του σε καλούπι ώστε να προσαρμόζεται σε τέλειο πρότυπο αυλακιών σε σχηματισμό φακού μεγάλης διαμέτρου. Οι φακοί Fresnel χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι γυάλινοι συμπαγείς φακοί μεγάλου διαμετρήματος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας του βάρους, του όγκου και του κόστους. Οι βελτιωμένες τεχνικές παραγωγής έχουν αναδείξει χρήσεις για αυτούς τους φακούς από απλούς συγκεντρωτές σε μεγάλο διαμετρήματος τηλεσκόπια, έως συλλέκτες ηλιακής ενέργειας σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές για παραγωγή ενέργειας.

3.2.3 Θεωρία των Φακών Fresnel

Οι φακοί Fresnel είναι απλά μια ακολουθία πρισμάτων που η μεταξύ τους απόσταση μπορεί να είναι τόσο μικρή όσο λίγα δέκατα του χιλιοστού και να εκτείνονται σε μήκος αρκετών εκατοστών. Η γωνία κάθε πρίσματος είναι φτιαγμένη έτσι ώστε κάθε ένα να διαθλά το φως με την ίδια γωνιακή ποσότητα όπως ένας κανονικός σφαιρικός φακός του ίδιου εστιακού μήκους. Στην αρχή και οι δυο πλευρές του φακού Fresnel μπορούν να αυλακωθούν, αλλά πρακτικά μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει τους φακούς κρατώντας την μια επιφάνεια λεία. Οι φακοί Fresnel μπορούν επίσης να χρησιμοποιούνται με δυο τρόπους- με τα αυλάκια στην πίσω πλευρά ή με τα αυλάκια στην μπροστινή πλευρά.

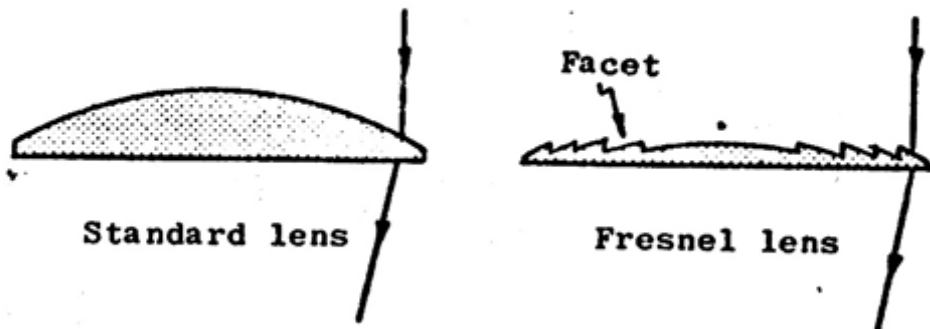
Η συγκεντρωτική λειτουργία των Fresnel φαίνεται στο σχήμα 2 και βασίζεται στον νόμο του Snell : $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$, $n_2 \sin \gamma = n_1 \sin \delta$

n_1 , n_2 , δείκτες διάθλασης αέρος και γυαλιού αντίστοιχα και $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots$ οι αντιστοιχούσες θλαστικές γωνίες έκαστου πρίσματος με συνθήκη $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3 > \dots$



Σχήμα 3 : Σχηματική διάταξη Γραμμικών Φακών Fresnel

Γενικά η οπτική συμπεριφορά ενός φακού Fresnel είναι σχεδόν ισοδύναμη με έναν συνηθισμένο φακό Fresnel με τη διαφορά στην καθαρότητα του ειδώλου. Γι' αυτό οι φακοί Fresnel χαρακτηρίζονται ως φακοί μη ευκρινούς ειδώλου (non imaging) . Η σχέση φαίνεται καθαρά στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 4 (Rabl, 1985) : Σχεδιασμός των αυλακιών σε σχέση με έναν συμβατικό φακό

Καθένα από τα αυλάκια ενός επιπεδόκυρτου φακού έχει την γωνία και την καμπυλότητα του αντιστοίχου τμήματος του διαμετρήματος ενός συμβατικού φακού. Στον σχεδιασμό ενός φακού Fresnel η γωνία α του αυλακιού υπολογίζεται ως συνάρτηση ανεξαρτήτων μεταβλητών: της ακτίνας r μέχρι το κέντρο του αυλακιού, της εστιακής

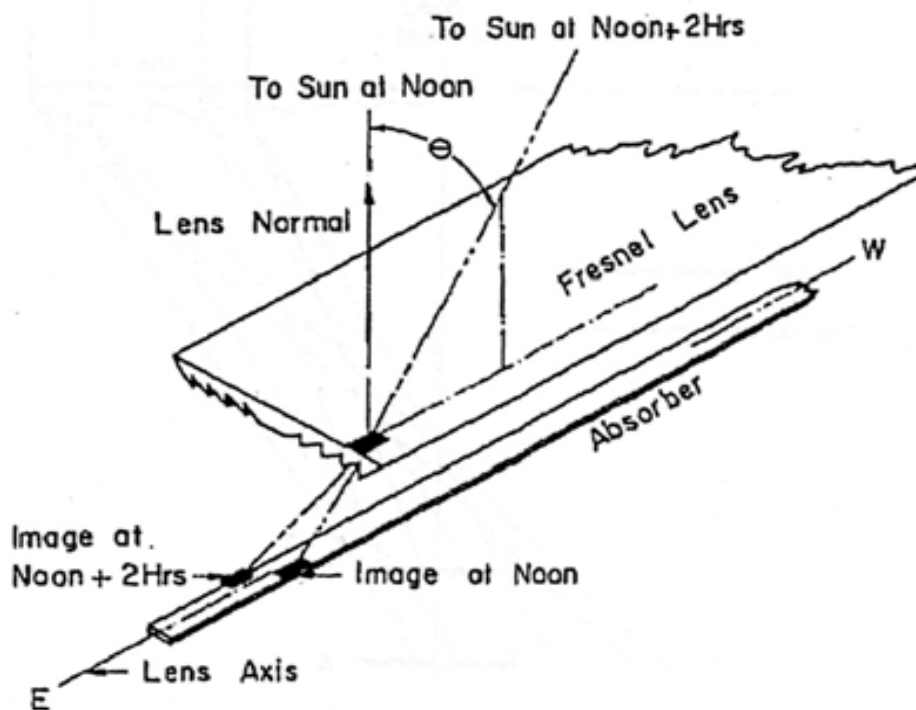
απόστασης f , του πάχους του φακού t , του πλάτους w του αυλακιού και του δείκτη διάθλασης n του υλικού ως προς τον αέρα.

Στον Fresnel οι έδρες του αυλακιού δεν χρειάζεται να είναι καμπυλωμένες αλλά μόνο κεκλιμένες κατά την σωστή γωνία προκειμένου να διαθλούν την ακτίνα του φωτός στην εστία, επειδή το μέγεθος της απορροφούσας επιφάνειας είναι γενικά πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος της Fresnel ζώνης του φακού. Τα αυλάκια ενός φακού Fresnel δημιουργούν κάποιο σφάλμα στην ακρίβεια της εστίασης. Κατά κανόνα υπάρχει κάποια στρογγύλευση των κορυφών η οποία διαχέει το φως έξω από την ζώνη ειδώλου. Επιπλέον για λοξές γωνίες από τον ήλιο έως τους φακούς κάποιο φως θα προσπέσει στην κατακόρυφη πλευρά των αυλακιών του φακού και θα διαθλασθεί έξω από την ζώνη σχηματισμού ειδώλου.

3.2.4 Γραμμικοί Φακοί Fresnel (LFLs)

Οι Γραμμικοί φακοί Fresnel (Linear Fresnel Lenses, LFLs) είναι ηλιακοί συγκεντρωτές με γραμμικά στοιχεία που μετατρέπουν μια προσπίπτουσα παράλληλη δέσμη ηλιακών ακτίνων σε μια ευθεία γραμμή ή ζώνη στο επίπεδο εστίασης τους. Οι Nelson et al (1975) έχουν αναλυτικά μελετήσει την συμπεριφορά ενός εποχιακά ρυθμιζόμενου ή ευθυγραμμισμένου ως προς ένα άξονα γραμμικού φακού Fresnel συγκεντρωτή, με τον κύριο άξονα του στην διεύθυνση Ανατολή-Δύση. Ο φακός θεωρείται προσανατολισμένος στην διεύθυνση Α-Δ και κανονικός ως προς την διεύθυνση των ακτίνων του ηλίου το μεσημέρι. Έχει παρατηρηθεί ότι καθώς ο χρόνος προχωρά μετά το μεσημέρι, η διαθλώμενη εικόνα μετακινείται και κατά την διεύθυνση του άξονα του φακού και κάθετα προς αυτήν. Ακόμα και στις ισημερινές που το ποσό ακτινοβολίας είναι σταθερό όλη μέρα, η διαθλώμενη εικόνα μετακινείται κατά μήκος του άξονα της και επεκτείνεται κατά πλάτος καθώς ο ήλιος απομακρύνεται από την μεσημεριανή του θέση. Αυτή η επίδραση μεγαλώνει τις άλλες ημέρες. Εξαιτίας αυτής της επίδρασης ο αριθμός των χρήσιμων για συλλογή ωρών h , σε έναν τέτοιο φακό γίνεται μικρότερος. Συνεπώς για να συλλέξουμε περισσότερη ακτινοβολία και για περισσότερες ώρες, το πλάτος του απορροφητή μπορεί να αυξηθεί αλλά στην περίπτωση αυτή ο λόγος της συγκέντρωσης μειώνεται.

Δυο εναλλακτικές μέθοδοι για τον σχεδιασμό του πλάτους και της θέσης του απορροφητή (receiver) προτείνονται από τους Nelson et al (1975). Στην πρώτη μέθοδο τα αυλάκια σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το μεσημέρι η διαθλώμενη ακτινοβολία από την αριστερή πλευρά του φακού να είναι προσπίπτουσα στην αριστερή εξωτερική πλευρά του απορροφητή και η διαθλώμενη ακτινοβολία από την δεξιά πλευρά του φακού να είναι προσπίπτουσα στην δεξιά εξωτερική πλευρά του απορροφητή. Στην δεύτερη μέθοδο τα αυλάκια σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε στο ηλιακό μεσημέρι όλες οι διαθλώμενες ακτίνες να πέφτουν στο κέντρο του απορροφητή. Κατά τον πρώτο σχεδιασμό η διαθλώμενη εικόνα μετακινείται κάθετα στον απορροφητή καθώς περνάει ο χρόνος μετά το μεσημέρι στις ισημερινές και είναι πιο ωφέλιμη (πλεονεκτική) σε τέτοιες μέρες. Η δεύτερη μέθοδος είναι καλύτερη στις ημέρες ηλιοστάσιου διότι αν θεωρήσουμε τη συνδυασμένη επίδραση της μεταβολής του ηλιακού ύψους με τον ήλιο, η διαθλώμενη εικόνα παραμένει περισσότερο στον απορροφητή. Συνιστάται ότι σε περίπτωση ευθυγράμμισης ως προς ένα άξονα η πρώτη μέθοδος δίνει καλύτερη συμπεριφορά.



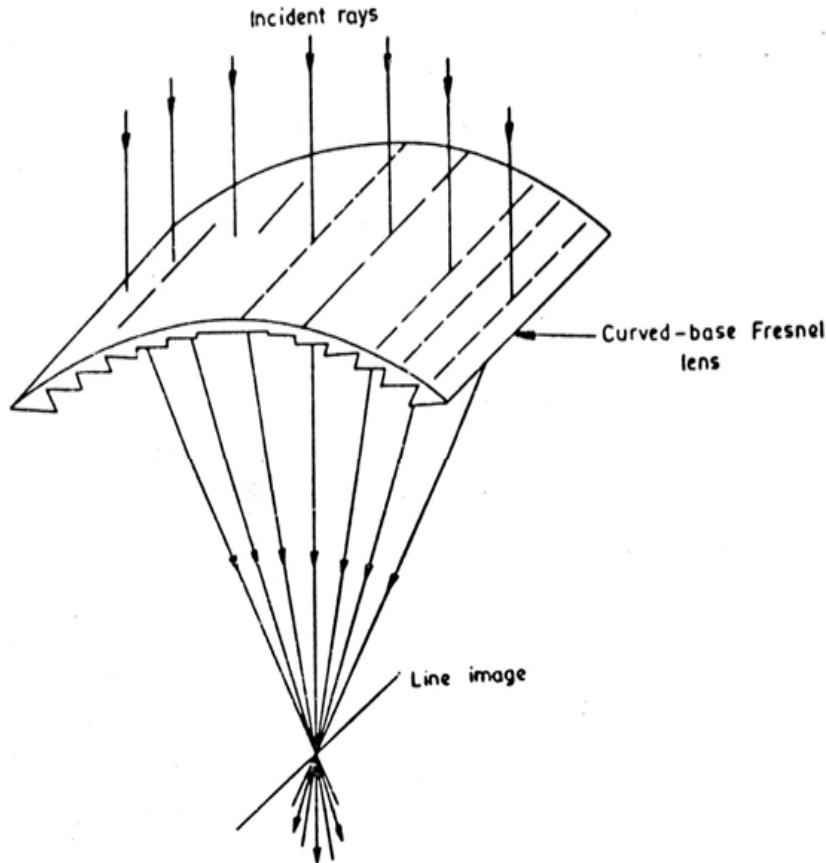
Σχήμα 5 (Nelson et al, 1975): Φακός Fresnel ευθυγραμμισμένος ως προς έναν άξονα

Στο πεδίο της ηλιακής ενέργειας δυο τύποι γραμμικών φακών Fresnel είναι περισσότεροι γνωστοί. Ο πρώτος είναι ένας επίπεδος φακός με τα αυλάκια προς τα πάνω (προς τον ήλιο) και την λεία επιφάνεια προς τα κάτω με τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα αυτής της διαμόρφωσης. Ως αποτέλεσμα αυτών των δυσκολιών οι σχεδιαστές κατέφευγαν σε έναν φακό με το αυλακωμένο μέρος να είναι προς τα κάτω και την καθαρή επιφάνεια προς τα πάνω. Έναν τέτοιο φακό όμως, υποφέρει από σχετικά υψηλές επιφανειακές ανακλάσεις και από μεγάλες εκτός αξόνων παρεκκλίσεις. Οι απώλειες ανάκλασης οδηγούν σε χαμηλή αποδοτικότητα και οι εκτός αξόνων παρεκκλίσεις καταλήγουν σε έναν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης. Για να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα οι Kritchman et al (1979b) και οι Kaminar and Curchod (1990) θεώρησαν έναν κυρτό γραμμικό φακό Fresnel.

3.2.5 Κυρτοί Γραμμικοί Φακοί Fresnel

Η οπτική συμπεριφορά ενός γραμμικού φακού Fresnel μπορεί να βελτιωθεί εάν η λεία επιφάνεια του είναι ελαφρώς κυρτωμένη παρά επίπεδη. Αυτή η καμπυλότητα εισάγει μια δεύτερη ενεργή επιφάνεια για την διάθλαση και αναδιεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σε έναν επίπεδο φακό η μείωση της εστιακής απόστασης f υποβαθμίζει την οπτική συμπεριφορά του φακού, ενώ σε ένα κυρτωμένο φακό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερη εστιακή απόσταση f χωρίς καμία υποβάθμιση των οπτικών ιδιοτήτων, συνεπώς μειώνοντας την δομική υποστήριξη και το μέγεθος και το κόστος του μηχανισμού ευθυγράμμισης. Στο σχήμα 6 φαίνεται η καμπυλωμένη βάση και η γραμμή εστίασης ενός φακού Fresnel.

Για έναν αποδοτικό και πρακτικό φακό Fresnel για την συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας, οι δυο βασικές συνθήκες που πρέπει να πληρούνται είναι οι εξής: πρώτον, η εστιακή απόσταση f πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και δεύτερον, τα αυλάκια πρέπει να είναι στραμμένα προς τα κάτω για να μειώνεται το πρόβλημα του "Blocking". (Leutz et al, 1999)



Σχήμα 6 (Kritchman et al 1979): Κυρτός γραμμικός φακός Fresnel

Σ' αυτόν τον σχεδιασμό (ο οποίος εξαρτάται από το δοθέν πεδίο της γωνίας πρόσπτωσης $\pm\theta_0$ υπό την οποία το φως προσπίπτει) για ένα κυρτό διδιάστατο φακό Fresnel, που συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ένας "ιδανικός" συγκεντρωτής τα ακόλουθα χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας είναι:

- Η εξωτερική επιφάνεια είναι λεία
- Για ένα δεδομένο οπτικό πεδίο $\pm\theta_0$ η συγκέντρωση πλησιάζει την μέγιστη επιτρεπτή σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής, δηλ. επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή γεωμετρική συγκέντρωση.
- Η γωνία ανάμεσα στην προσπίπτουσα ακτίνα και την πρώτη επιφάνεια είναι πολύ κοντά στην γωνία ανάμεσα στην μεταδιδόμενη ακτίνα και την επιφάνεια με τους αυλάκες και ως εκ τούτου ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω ανάκλασης.
- Το κοίλο-καμπύλο σχήμα προσθέτει υψηλή μηχανική ευστάθεια και δύναμη στον φακό.
- Παρόλο που οι ιδιότητες συγκέντρωσης και μετάδοσης φθίνουν καθώς η απόκλιση του ήλιου παρεκτρέπεται-παρεκκλίνει από το επίπεδο της εγκάρσιας

διατομής του φακού, η μείωση αυτή δεν είναι τόσο σοβαρή όσο στην περίπτωση των επίπεδων φακών Fresnel.

3.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΦΑΚΩΝ FRESNEL ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ.

3.3.1 Επίδραση στο Φωτισμό και στο Μικροκλίμα του Θερμοκηπίου

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο φωτισμό και στη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο παρουσιάζει ερευνητικό ενδιαφέρον επειδή η διερεύνηση νέων τρόπων ρύθμισης του φωτισμού μπορεί να συνδυαστεί με την κατάλληλη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου για θερμότητα και ηλεκτρισμό. Στην κατεύθυνση αυτή εξετάζεται η εφαρμογή των γραμμικών φακών Fresnel.

Η απαιτούμενη μείωση του φωτισμού ορισμένη περίοδο της ημέρας, για την αποφυγή υπερέκθεσης των φυτών, μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή της πλεονάζουσας ακτινοβολίας υπό μορφή θερμότητας ή ηλεκτρισμού και στην αποθήκευσή τους για χρήση στη διάρκεια της νύκτας όπου υπάρχουν ανάγκες διατήρησης του επίπεδου της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου καθώς και για την επέκταση της περιόδου φωτισμού των φυτών.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των φακών Fresnel είναι ότι διαχωρίζουν την άμεση από την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Το πλεονέκτημα τους αυτό τους κάνει ιδιαίτερα κατάλληλους για έλεγχο του φωτισμού και της θερμοκρασίας εσωτερικών χώρων. Τέτοια μέρη είναι εσωτερικοί χώροι κτηρίων, θερμοκήπια, εργαστήρια, πισινές, εκθεσιακοί χώροι, διάδρομοι, σοφίτες, όπου δίνεται η δυνατότητα φωτισμού σε κατάλληλο επίπεδο έντασης και χωρίς έντονες αντιθέσεις (Jirka et al, 1999).

Η ενσωμάτωση των γραμμικών φακών Fresnel (LFLs) στην οροφή υαλοφρακτων θερμοκηπίων, παρέχει καινούργιες δυνατότητες για φυσικό φωτισμό του εσωτερικού χώρου, αποφεύγοντας την υπερθέρμανση που είναι δυνατόν να συμβαίνει στα συμβατικά θερμοκήπια. Αυτό είναι εφικτό να γίνει χρησιμοποιώντας συστοιχία γυάλινων LFLs σε συνδυασμό με ένα μετακινούμενο πλαίσιο πάνω στο οποίο τοποθετούνται οι απορροφητές. Οι LFLs δύναται έτσι να αποτελούν μέρος της δομικής κατασκευής της οροφής, ενώ το μετακινούμενο πλαίσιο με τους απορροφητές τοποθετείται στην εστιακή απόσταση περίπου 40cm των φακών. Δεδομένου ότι οι LFLs διαχωρίζουν αποτελεσματικά το άμεσο και διαχεόμενο τμήμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο θερμοκήπιο, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του απορροφητή ενώ η διάχυτη ακτινοβολία δεν εστιάζεται και διαχέεται μέσα στο θερμοκήπιο και το φωτίζει. Τα διαφανή φύλλα φακών Fresnel έχουν αρχικά μελετηθεί στις συνθήκες της Τσεχίας και θεωρείται ότι μπορούν να τοποθετηθούν ακίνητα στη νότια οροφή του θερμοκηπίου, στη θέση των γυάλινων πλακών. Μια τέτοια διαμορφούμενη οροφή ως διαφανής, σταθερός συλλέκτης συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, έχει τις ακόλουθες επιδράσεις πάνω στο φωτισμό και στην θερμοκρασία και γενικότερα στη διαμόρφωση του μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο:

Όσον αφορά τον φωτισμό, επιτρέπει στην διάχυτη ακτινοβολία να εισέλθει, δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο, πιο φυσικό φωτισμό χωρίς οξείες αντιθέσεις και έντονες σκιάσεις. Η διάχυτη ακτινοβολία περνά χωρίς σχεδόν καμία αλλαγή, παρέχοντας το κύριο μέρος του ημερησίου φωτισμού κάτω από τον συλλέκτη και είναι κατάλληλη για το εσωτερικό του θερμοκηπίου που απαιτεί καλό και άρτιο φυσικό φωτισμό.

Όσον αφορά την θερμοκρασία οι LFLs διαχωρίζουν αποτελεσματικά την άμεση και διαχεόμενη ηλιακή ακτινοβολία και η άμεση συγκεντρώνεται και μετατρέπεται σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια, στο εστιακό επίπεδο του φακού όπου είναι τοποθετημένος ένας

μετακινούμενος απορροφητής. Αν η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από ένα επιθυμητό επίπεδο, και με την προϋπόθεση ότι ο ουρανός είναι καθαρός, οι απορροφητές μετακινούνται έξω από την ζώνη εστίασης και έτσι στην περιοχή κάτω από τον συλλέκτη αυξάνεται η θερμοκρασία, από την εισερχόμενη άμεση ακτινοβολία. Όταν το βέλτιστο επίπεδο θερμοκρασίας επιτευχθεί εντός του χώρου, οι απορροφητές μπορούν αυτόματα να προσαρμόζονται στην γραμμή εστίασης και το σύστημα αρχίζει να εργάζεται ξανά ως συλλέκτης συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Με αυτόν τον τρόπο μια σημαντική ποσότητα της εισερχόμενης ενέργειας, περίπου το 60% της άμεσης ακτινοβολίας, μεταφέρεται εκτός του θερμοκηπίου μέσω θερμότητας και ηλεκτρισμού, μειώνοντας έτσι το θερμικό φορτίο, τόσο όσο ο χώρος να μην υπερθερμαίνεται, ενώ παραμένουν τα πλεονεκτήματα του κανονικού «Φαινόμενου του Θερμοκηπίου» (Jirka et al, 1999).

Για την αποδοτική παρακολούθηση της εστιαζόμενης δέσμης φωτός λόγω της διαφορετικής θέσης του ηλίου (σχήμα 3, κεφάλαιο 2) το πλαίσιο με τους τοποθετημένους απορροφητές σχεδιάζεται να κινηθεί αυτόματα προκειμένου να ακολουθείται η εστιαζόμενη δέσμη. Η ενέργεια που απαιτείται για αυτήν την αυτόματη ρύθμιση της θέσης πλαισίων μπορεί να παρέχεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ή από εξωτερική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Μια ηλεκτρονική μονάδα για τον έλεγχο του συστήματος και για την παρακολούθηση της εστιαζόμενης δέσμης φωτός συμπεριλαμβάνεται επίσης. Αυτή η μονάδα ελέγχει και την κυκλοφορία ύδατος στο σύστημα στην περίπτωση των θερμικών συλλεκτών.

Συμπερασματικά, το περιγραφόμενο σύστημα, δύναται να παρέχει κατάλληλες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος όπως φωτισμό, θερμοκρασία και σχετική υγρασία, για υψηλής ποιότητας καλλιέργειες θερμοκηπίων προϊόντων. Ακόμα και κατά την διάρκεια περιόδων που έχουμε απορρόφηση μέγιστης ποσότητας ηλιακής ενεργείας από τους συλλέκτες, παραμένει επαρκής φωτισμός για την ικανοποιητική ανάπτυξη των φυτών μέσα στο θερμοκήπιο.

3.3.2 Συνδυασμός των Φακών Fresnel με PVT Συστήματα

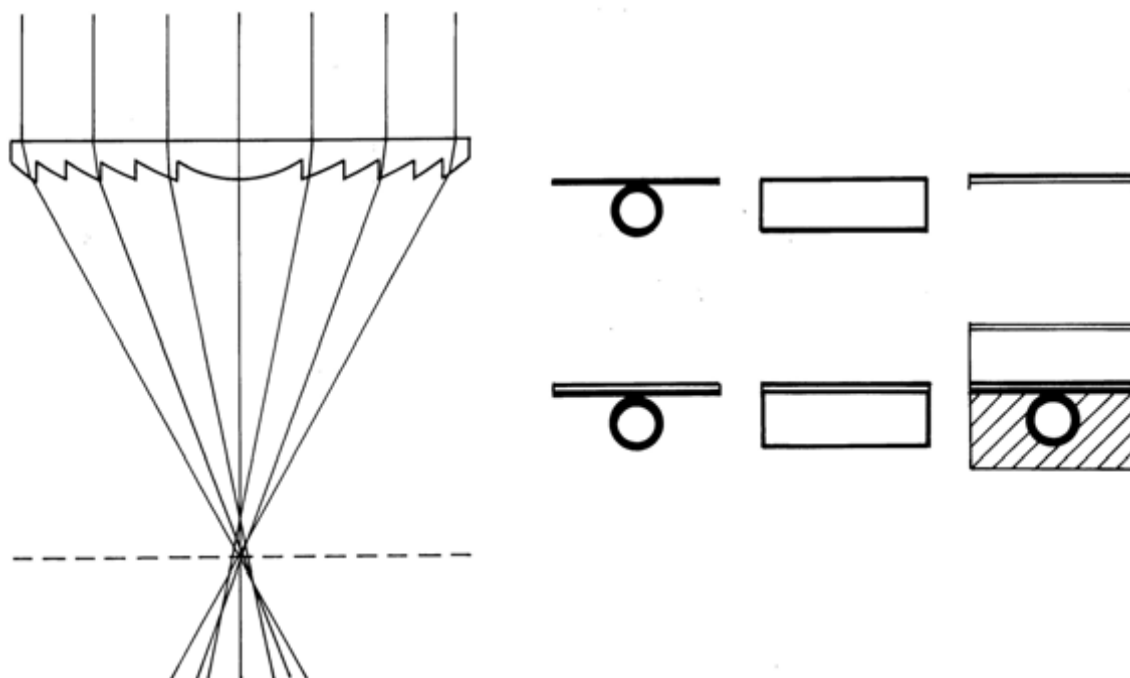
Στοχεύοντας στον έλεγχο του φωτισμού και της θερμοκρασίας των θερμοκηπίων επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα και ενεργειακό κέρδος από το πλεόνασμα της ηλιακής ακτινοβολίας εξετάζεται η εφαρμογή των γραμμικών φακών Fresnel ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου.

Οι γραμμικοί φακοί Fresnel, συνδυάζονται με γραμμικούς πολυχρηστικούς απορροφητές που μετατρέπουν την συγκεντρωθείσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα, ηλεκτρισμό η και τα δύο. Σε χαμηλή ένταση ακτινοβολίας, λόγω της θέσης του ηλίου σχετικά με την οροφή του θερμοκηπίου (χαμηλό ύψους θερμοκηπίου) ή εξαιτίας σύννεφων, οι απορροφητές μπορούν να τεθούν εκτός της ζώνης εστίασης, αφήνοντας το φως να εισέλθει στον εσωτερικό χώρο και να διατήρηση τον φωτισμό σε ένα αποδεκτό επίπεδο για τα καλλιεργούμενα φυτά.

Κατά την θερμική μετατροπή με τη χρήση θερμικών συλλεκτών (TC) η μέγιστη απόδοσή του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 60% και 70%. Η συγκεντρωθείσα ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται και αυξάνει την θερμοκρασία ενός απορροφητή τύπου σωλήνα ή απορροφητή πτερυγίου με σωλήνα. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ενός κυκλοφορούντος ρευστού, που συνήθως είναι το νερό και το υδραυλικό σύστημα συνδέεται με αποθήκη για μετέπειτα χρήση. Όταν εφαρμόζεται αυτό το σύστημα στα θερμοκήπια, θεωρούμε ότι η θέρμανση του νερού γίνεται κυρίως το μεσημέρι, που υπάρχει πλεόνασμα ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο. Το αποθηκευμένο ζεστό νερό δύναται να κυκλοφορεί διαμέσου των σωλήνων του απορροφητή στην διάρκεια της νύχτας συνεισφέροντας στις θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου και διατηρώντας την θερμοκρασία του αέρα σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Στην περίπτωση της χρήσης φωτοβολταϊκών ως απορροφητές, η απόδοση είναι 5%-15% ανάλογα με τον τύπο του φ/β και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τις ηλεκτρικές ανάγκες του θερμοκηπίου, να μεταφερθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο ή να αποθηκευτεί σε μπαταρίες.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV) μετατρέπουν ένα μικρό μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό, με το μεγαλύτερο μέρος αυτής να μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτό το γεγονός αυξάνει την θερμοκρασία τους, με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα τους να μειώνεται. Φωτοβολταϊκά και θερμικά συστήματα μπορούν να συνδυαστούν σε μια μονάδα αποτελώντας το υβριδικό PVT σύστημα, το οποίο παρέχει ταυτόχρονα ηλεκτρισμό (απόδοση 10% για pc-Si) και θερμότητα (απόδοση 30% για 50 °C) και μπορεί να διατηρήσει την απόδοση του PV σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο (Tripanagnostopoulos et al, 2001, 2002, 2005). Στις εφαρμογές PVT συστημάτων και θεωρώντας ότι ο ηλεκτρισμός είναι η προτεραιότητα τους, η λειτουργία των PV στοιχείων σε χαμηλότερες θερμοκρασίες είναι απαραίτητη για να διατηρηθεί η ηλεκτρική αποδοτικότητα των PV στοιχείων σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Αυτή η απαίτηση περιορίζει το λειτουργικό εύρος της θερμικής μονάδας του PVT συστήματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και η εξαγόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμικές ανάγκες χαμηλότερης θερμοκρασίας. Θεωρώντας την ενσωμάτωση των φακών Fresnel-PVT συστημάτων στην οροφή του θερμοκηπίου είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε την χρήσιμα παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια μαζί με τα οφέλη στον έλεγχο φωτισμού και στο κέρδος αερισμού για να επιτευχθεί τελικά αποδοτικό κόστος εγκατάστασης.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η σχεδιαστική αρχή ενός φακού Fresnel, ο οποίος είναι μη ευκρινούς ειδώλου συγκεντρωτής και επομένως οι διαθλώμενες ακτίνες σχηματίζουν ένα διαχεόμενο είδωλο του ηλίου στην εστιακή απόσταση. Στην ίδια εικόνα, παρουσιάζονται έξι τύποι των δυνατών απορροφητών ηλιακής ακτινοβολίας, όπου στην πρώτη γραμμή είναι ο απορροφητής τύπου σωλήνα και απορροφητής πτερυγίου με σωλήνα για θέρμανση νερού, ο αγωγός αέρα για θέρμανση αέρα και ο φωτοβολταϊκού τύπου απορροφητής. Στην δεύτερη γραμμή υπάρχουν οι υβριδικού τύπου PVT απορροφητές, για θέρμανση νερού, για θέρμανση αέρα και επίσης για θέρμανση νερού με επιπλέον γυάλινο κάλυμμα και θερμική μόνωση (Tripanagnostopoulos et al, 2004).



Σχήμα 7: Φακός Fresnel και εναλλακτικοί τύποι απορροφητών θερμικού, φωτοβολταϊκού (PV) και υβριδικού φωτοβολταϊκού (PVT) τύπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ.

4.1.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Θα θέλαμε να αναφερθούμε σε διάφορες περιπτώσεις με θερμοκήπια στα οποία εφαρμόζονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Βέβαια στην Ελλάδα αυτό βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο , στο εξωτερικό όμως η εταιρία φωτοβολταϊκών TRITEC ολοκλήρωσε πρόσφατα την κατασκευή ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος 2,5 MW, σε στέγη θερμοκηπίου στο Montelimar της Γαλλίας (με τη βοήθεια των εταιρειών GPVL και SUDELIO).

Οι εργασίες στο χώρο των 40.000 τετραγωνικών μέτρων διήρκεσαν 6 μήνες και υπολογίζεται ότι, η συγκεκριμένη εγκατάσταση θα παράγει ενέργεια ίση με 3 GWh ετησίως, που μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες 2.000 ανθρώπων, μειώνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 254 τόνους ανά έτος.

Τα 13.440 πάνελς που ενσωματώθηκαν στη στέγη, αφήνουν διαφανή κενά, ώστε να μπορεί να φτάσει το φως στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Από εκεί και πέρα, για την ολοκλήρωση του έργου απαιτήθηκαν 230 χιλιόμετρα καλωδίων και 4 κύριοι μετατροπείς της SMA. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών, ο μετρητής απόδοσης TRI-KA (της TRITEC)

έκανε τις σχετικές μετρήσεις, ώστε να επαληθευτεί η καλή λειτουργία και απόδοση του συστήματος.



4.1.2 ΠΛΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Επίσης ένα πλωτό θερμοκήπιο ικανό να «ταΐσει» δύο οικογένειες δημιουργήθηκε στην Ιταλία. Το Jellyfish Barge όπως το ονόμασαν λειτουργεί εκτός δικτύου και παράγει το δικό του καθαρό νερό μέσω ενός συστήματος εν πλω ηλιακής απόσταξης.



Η ιταλική υπηρεσία design Studiomobile συνεργάστηκε με τον καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Φλωρεντίας Stefano Mancuso, ο οποίος είναι ο διευθυντής του International Laboratory of Plant Neurobiology, για να δημιουργήσει ένα πλωτό θερμοκήπιο, σε μια προσπάθεια να βελτιωθεί η ασφάλεια των τροφίμων σε περιοχές με λίγη καλλιεργήσιμη γη. Το Jellyfish

Barge λειτουργεί εκτός δικτύου και παράγει τον δικό του καθαρό νερό μέσω ενός συστήματος εν πλω ηλιακής απόσταξης.

Το Jellyfish Barge περιλαμβάνει ένα γυάλινο θερμοκήπιο, υποστηριζόμενο από μια ξύλινη βάση 70 τ.μ. Το θερμοκήπιο μπορεί να αντλήσει το νερό πάνω στο οποίο επιπλέει για άρδευση, είτε πρόκειται για νερό του ποταμού, το θαλασσινό νερό, ή ακόμα και μολυσμένο νερό. Το νερό γίνεται κατάλληλο για άρδευση με κατεργασία από επτά ηλιακούς αποστακτήρες που βρίσκονται πάνω στο «σκάφος».

«Η ηλιακή απόσταξη είναι ένα φυσικό φαινόμενο: στις θάλασσες η ηλιακή ενέργεια εξατμίζει το νερό, το οποίο στη συνέχεια πέφτει σαν βροχή», εξηγεί η Studiomobile. «Στο Jellyfish Barge το ηλιακό σύστημα αφαλάτωσης αναπαράγει το φαινόμενο αυτό σε μικρή κλίμακα, απορροφώντας την υγρασία και αναγκάζοντάς τη να συμπυκνωθεί όταν έρχεται σε επαφή με την ψυχρή επιφάνεια της θάλασσας. Η χαμηλή ενέργεια που απαιτείται για αυτό παρέχεται από τα συστήματα που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και είναι ενσωματωμένα στη δομή του».

Υπάρχει επίσης ένα σύστημα απορροής ομβρίων υδάτων επί του σκάφους και η Studiomobile λέει ότι το Jellyfish Barge είναι σε θέση να παράγει μέχρι 150 λίτρα γλυκού νερού ανά ημέρα. Διαθέτει επίσης ένα υδροπονικό σύστημα, το οποίο, σύμφωνα με την Studiomobile, είναι πολύ αποτελεσματικό και μπορεί να εξοικονομήσει μέχρι και 70% περισσότερο νερό από ό, τι άλλα υδροπονικά συστήματα. Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει περίπου 15% θαλασσινό νερό, προκειμένου να ενισχύσει την αποδοτικότητα. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παρέχει απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο του υδροπονικού συστήματος.

Η Studiomobile αναφέρει ότι ένα Jellyfish Barge είναι ικανό να παράγει αρκετά τρόφιμα για να δώσει τροφή σε δύο οικογένειες. Η εταιρεία προς το παρόν επιδιώκει να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση του συστήματος και στη μείωση του κόστους κατασκευής.

4.1.3 ΕΞΥΠΝΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΜΕ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ Α.Π.Ε.

Στην Ελλάδα Μέχρι και σήμερα, η παραγωγή στον αγροτικό τομέα βασίζεται σε παραδοσιακές μεθόδους και τεχνικές όσον αφορά στην παροχή ενέργειας και στην εν γένει λειτουργία τους. Από την άλλη, τα υβριδικά συστήματα που ενσωματώνουν ΑΠΕ σε διάφορες υφιστάμενες τεχνολογίες, αναμένεται να γίνουν ανταγωνιστικά στο άμεσο μέλλον και έτσι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας αυτών χρήζει ιδιαίτερης ενασχόλησης και ενδιαφέροντος. Έτσι, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος με θέμα «**Εξυπνη Θερμοκηπιακή Μονάδα με Αυτοματοποιημένη Χρήση των Α.Π.Ε.**», αναπτύχθηκε μία πρωτοποριακή εφαρμογή όπου ενσωματώθηκαν σε μία υφιστάμενη θερμοκηπιακή μονάδα τεχνολογίες ΑΠΕ. Η μονάδα λειτουργεί πλήρως αυτοματοποιημένα και με δυνατότητα εξ' αποστάσεως παρακολούθησης και χειρισμού.

Συγκεκριμένα, το έργο αφορά στη βελτιστοποίηση των τιμών παραγόντων ενός θερμοκηπιακού περιβάλλοντος (φως, θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, CO₂ κλπ.), της κόμης, καθώς και παραγόντων του περιβάλλοντος της ρίζας (νερό, οξυγόνο, θερμοκρασία, ανόργανα στοιχεία, οξύτητα κλπ.) με χρήση αυτοματοποιημένου συστήματος «έξυπνων αισθητήρων» απευθείας συνδεδεμένων σε Η/Υ. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα της εξ' αποστάσεως παρακολούθησης του θερμοκηπίου καθώς και του ελέγχου των ζωτικών

λειτουργιών αυτού. Η αυτοματοποιημένη παρακολούθηση είναι απαραίτητη σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές θερμοκηπιακές μονάδες πάνω στις οποίες προβλέπεται ότι θα στηρίζεται ένα μεγάλο μέρος της ενεργειακής γεωπονίας – γεωργίας ακριβείας της Ελλάδας στο άμεσο μέλλον. Ο ουσιαστικός στόχος της προτεινόμενης έρευνας επετεύχθη με την ενεργειακή ανεξαρτητοποίηση του θερμοκηπίου βελτιστοποιώντας τη χρήση ανανεώσιμων και παραδοσιακών μορφών ενέργειας (υβριδικό σύστημα με ηλιακή και αιολική ενέργεια, βιομάζα, βιοντίζελ καθώς και γεωθερμική ενέργεια) με γνώμονα τη αριστοποίηση του παραγόμενου τελικού προϊόντος(ποιότητα, αύξηση της παραγωγής).

4.1.4 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Επίσης χάρη σε ένα καινοτόμο κοινοτικό πρόγραμμα Εξοικονόμησης νερού κι ενέργειας στα θερμοκήπια μπορούμε να πετύχουμε Μείωση κατανάλωσης έως 80% στη χρήση ορυκτών καυσίμων και 90% στη χρήση νερού. Ο λόγος για το Adapt2Change, η πιλοτική εφαρμογή του οποίου έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για να πετύχουν οι παραγωγοί στα γεωθερμικά και υδατικά αυτόνομα θερμοκήπια.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει στους παραγωγούς τη δυνατότητα να πετύχουν εξοικονόμηση νερού, με τρόπο που τους βοηθά να εξασφαλίσουν την παραγωγή τους.

Στην περιοχή της Λάρισας έχουν ήδη στηθεί δύο θερμοκήπια, 216 τ.μ. έκαστο, με το ένα να είναι κλειστού τύπου και κατασκευασμένο με βάση την καινοτομία που προωθεί το Project, ενώ το άλλο είναι συμβατικού τύπου. Από τον Οκτώβριο του 2013 και τα δύο θερμοκήπια φιλοξενούν καλλιέργειες ντομάτας και μελιτζάνας και οι μετρήσεις- μέχρι στιγμής -έχουν δώσει τα παραπάνω αποτελέσματα- ευεργετικά τόσο για την “τσέπη” του παραγωγού όσο και για το περιβάλλον.

Αυτό το πρότυπο σύστημα θερμοκηπίου- ανακύκλωσης νερού, που βασίζεται σε αβαθή γεωθερμική ενέργεια, μπορεί, να αναπαραχθεί εύκολα με τη βοήθεια πρακτικών οδηγιών σχεδιασμού και εφαρμογής (εγχειρίδιο αίτησης χρήσης αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας στη γεωργία).

Με το πρόγραμμα αυτό εισάγεται ουσιαστικά, μια καινοτόμος προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση της ζήτησης του νερού στον γεωργικό τομέα, τη μείωση της ζήτησης ενέργειας και τη διάχυση της ρύπανσης από τη γεωργία.

Στόχοι του προγράμματος είναι: να ελαχιστοποιήσει τη χρήση φρέσκου νερού για τη γεωργική παραγωγή και να εισαγάγει μεθόδους ανακύκλωσης νερού σε ένα κλειστό σύστημα θερμοκηπίου, να δείξει πώς η αβαθή γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία ανακύκλωσης του νερού και να εισαγάγει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον γεωργικό τομέα.

Παράλληλα, στους στόχους εντάσσονται: η δημιουργία ενός συστήματος διαχείρισης για την αυτοματοποίηση και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής θερμοκηπίου, η ελαχιστοποίηση απαίτησης γης για τη γεωργία και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και η παροχή βοήθειας στους αγρότες, η προσαρμογή των γεωργικών πρακτικών παραγωγής για τους περιορισμούς και τις ευκαιρίες του μεταβαλλόμενου κλίματος, η επίδειξη ενός συστήματος παραγωγής κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών και η παροχή στους παραγωγούς ενός απομακρυσμένου συστήματος υποστήριξης.

Η χρήση του νερού για γεωργικούς σκοπούς, σημειώνει, είναι ένα θεμελιώδες ζήτημα για συζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο. Αν και η επέκταση των αρδευόμενων εκτάσεων έχει αυξήσει τη γεωργική παραγωγή και την προμήθεια τροφίμων, μια σειρά από ξηρές υδρολογικά χρονιές, οι οποίες συνήθως έρχονται μαζεμένες, συμβάλλουν σε αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα των υδάτων. Και μπορεί ο γεωργικός τομέας να είναι ο πιο σημαντικός σε οικονομικούς όρους σε όλες τις χώρες της Μεσογείου, ωστόσο έχει μετατραπεί και στον μεγαλύτερο καταναλωτή νερού.

Μάλιστα, στην Ελλάδα, η μέση ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για γεωργικούς σκοπούς αναλογεί στο 80%-85% της συνολικής χρήσης του νερού, σε σύγκριση με το μέσο όρο του 70% σε παγκόσμια κλίμακα. Ταυτόχρονα, η χρήση του νερού στη γεωργία έχει γίνει πολύ αναποτελεσματική, με ποσοστό αποδοτικότητας μόνο περίπου 35%.

Επισημαίνεται ότι το πρόγραμμα, που φέρει τον τίτλο “Προσαρμογή της γεωργικής παραγωγής στην κλιματική αλλαγή και στους περιορισμένους υδάτινους πόρους” και “τρέχει από τον Σεπτέμβριο του 2010, με ορίζοντα ολοκλήρωσης το 2016, ύστερα από διετή παράταση, έχει προϋπολογισμό 2,57 εκατ. ευρώ.





ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

- Bailey B. J., (1988). Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouses Heating. FAO- Reur technical series, Vol. 3, pp. 17-41
- Baille A. and von Elser B., (1988). Low Temperature Heating Systems. CNRE Guideline, Vol. 2, pp. 149-167
- Baille A. and Boulard T., (1987). Phase Change Material for Heat Storage in Greenhouse. FAO- Reur technical series, Vol. 1, pp. 139-142
- Baille A., (1988). Greenhouse micro-climate and its management in mild winter climates. Symposium ISHS on "Protected ornamental cultivation in Mild Winter Climate". Tenerife Oct. 1988
- Baille A., Kittas C., Katsoulas N., (2001). Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 107, pp. 293-306
- Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., Van de Braak N.J., Greenhouse climate control, Wageningen Pers, 1995
- Batista J. F., Bailey B. J., Randall M. J., Meneses F. J., (1999). Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. J. Agric. Engng Res., Vol. 72, pp. 363-374
- Belessiotis V., Delyannis E., (2000). The History of Renewable energies for Water Desalination. Desalination, Vol. 128, pp. 147-159
- Boulard T. and Baille A., (1993). A Simple Greenhouse Climate Control Model Incorporating Effects of Ventilation and Evaporation Cooling. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 65 pp. 145-157
- Boulard T. and Baille A., (1995). Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. J. Agric. Engng Res., Vol. 61, pp. 37-48
- Boulard T., Kittas C., Papadakis G., Mermier M., (1998). Pressure Field and Airflow at the Openings of a Naturally Ventilated Greenhouse. J. Agric. Engng Res., Vol. 71, pp. 93-102
- Boulard T., Meneses F. J., Mermier M., Papadakis G., (1996). The Mechanisms Involved in the Natural Ventilation of Greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 79 pp. 61-77
- Boulard T., Papadakis G., Kittas C., Mermier M., (1998). Airflow and Associated Sensible Heat Exchanges in a Naturally Ventilated Greenhouse
- Boulard T., Razafinjohany E., Baille A., (1989). Heat and Water Vapour Transfer in a Greenhouse with an Underground Heat Storage System. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 45, pp. 171-183
- Briassoulis D., Waaijenberg D., Gratraud J., von Eslner B., (1997). Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses: Part 1, General Overview. Journal of Agriculture Engineering Research, Vol. 67, pp.81-96
- Bristot A., Dos Santos J.C.V., Ocacia G. C., Dias S.S., (2002). A Low Cost Hybrid Wind-PV System for Rural Residential Electrification. In Proc. of World Renewable Energy Congress VII (WREC 2002)
- Campbell S.G. and Norman M.J., An Introduction to Environmental Biophysics, Springer-Verlag, New York, 1998
- Chiapale J.P., van Bavel C.H.M., Sadler E.J., (1983). Comparison of calculated and measured performance of a fluid roof and a standard greenhouse. Energy in

- Argiculture, Vol. 2, pp. 75-89.
- Cockshull E. K., Graves J. C., Cave J.R., (1992). The Influence of Shading on Yield of Glasshouse Tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, Vol. 67, pp. 11-24
- Cox C.H. III and Ranghuraman P., (1985). Design considerations for flat-plate Photovoltaic thermal collectors. *Solar Energy*, Vol. 35, pp. 227-241
- Delyannis E., (2003). Historic Background of Desalination and Renewable energies. *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 357-366
- Demrati H., Boulard T., Bekkaoui A., Bouirden L., (2001). Natural Ventilation and Microclimatic Performance of a Large-scale Banana Greenhouse. *J.agric.Engng Res.* Vol. 80 (3), pp. 261-271.
- Dilara P. A., Briassoulis D. 2000. Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as Greenhouse covering materials. *J. Agric. Engng Res.* 76: 309-321.
- Duffie J. and Beckman W., *Solar Energy Thermal Processes*, Wiley J. and Sons, INC, 1980
- Elhadidy M. A. and Shaahid S. M., (1999). Feasibility of Hybrid (wind+solar) Power Systems for Dhahran, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, Vol. 16, pp. 970-976
- Fernandez E. J. and Bailey B. J., (1992). Measurement and Prediction of Greenhouse Ventilation Rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 58 pp. 229-245
- Francis Winter, *Solar Collectors, Energy Storage, and Materials*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1990
- Grafiadellis M., (1986). Development of a Passive Solar System for Heating Greenhouses. *Acta Horticulturae*, Vol. 191, pp.245-252
- Garcia-Rodriguez L., Palmero-Marrero A., Gomez-Camacho C., (2002). Comparison of Solar Thermal Technologies on Applications in Seawater Desalination. *Desalination*, Vol. 142, pp. 135-142
- Grafiadellis M., Kyritsis S., (1978). New developments in shading plastic greenhouse. *Acta Horticulture*, Vol. 76, pp. 365-368.
- Hsin Yu, Chiu-Hsiung Hou, Chung-Min Liao, (2002). Scale Model Analysis of Opening Effectiveness for Wind-induced Natural Ventilation Openings. *Biosystems Engineering*, Vol. 82 (2), pp.199-207.
- Huang B.J. Lin T.H. Hung W.C. and Sun F.S. (2001). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy* 70: 443-448.
- Huang K.B., Toksoy M., Cengel A. Y., (1986). Transient Response of Latent Heat Storage in Greenhouse Solar System. *Solar Energy*, Vol. 28, pp. 313-321
- Imre L.L., *Solar Drying*. In *Handbook of Industrial Drying*, Edited by Mujumdar, A. S., 1987
- Jensen T., (1994). *Hybrid Systems on an Isolated Island in Northern Norway*. Research Council of Norway, Hydroenergi, Munchen.
- Jirka V., Kuceravy V., Maly M., Pech F., Pokorny J., (1999). Energy flow in a greenhouse equipped with glass raster lenses Part II. *Renewable Energy*, Vol. 16, pp. 660-664.
- Jirka V., Kuceravy V., Maly M., Pokorny J. and Rehor E., (1998). The architectural use of glass raster lenses. In *Proc. of World Renewable Energy Congress V, Part III*. pp. 1595-1598.
- Kalogirou S., (1996). Survey of solar desalination systems and system selection. *Energy*. Vol. 22, No. 1, pp. 69-81.
- Kalogirou S., (1997). Economic analysis of a solar assisted desalination system. *Renewable Energy*. Vol. 12, No. 4, pp. 351-367.
- Kaminar R.N., Curchod D., (1990). Design and Construction of a Extruded, Curved,

Linear Focus, Fresnel Lens, 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference

Kawakami K. and Seki K., (2002). A Study of Wind-photovoltaic Hybrid Generation System for Daily Farm (efficiency of control system and annual generation results). In Proc. of World Renewable Energy Congress VII (WREC 2002)

Kelly H. and Weinberg C. J., "Utility strategies for using renewables" in Johansson T., Kelly H., Reddy A., Williams R., (eds), *Reweable Energy: Source for Fuels and Electricity*, Island Press, 1993

Kempkes F.L.K., Van de Braak J.K., Bakker C. J., (2000). Effect of Heating System Position on Vertical Distribution of Crop Temperature and Transpiration in Greenhouse Tomatoes. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 75, pp. 57-64

Kern E. C. and Russel M.C., (1978). Combined Photovoltaics and Thermal Hybrid Collector Systems. Proc. of the of 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, 1978, pp. 1153-1157

Kittas C. and Baille A., (1998). Determination of the Spectral Properties of Several Greenhouse Cover Materials and Evaluation of Specific Parameters Related to Plant Response. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 71, pp.193-202

Kittas C., Baille A., Giaglaras P., (1999). Influence of Covering Material and Shading on the Spectral Distribution of Light in Greenhouses. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 73, pp.341-351

Kittas C., Boulard T., Mermier M., Papadakis G., (1996). Wind Induced Air Exchange Rates in a Greenhouse Tunnel with Continuous Side Openings. *J. Agric. Engng Res.*, Vol. 65, pp. 37-49

Kittas C., Boulard T., Papadakis G., (1997). Natural Ventilation of a Greenhouse with Ridg and Side Openings; Sensitivity to Temperature and Wind Effects. *Transactions of the A.S.A.E.*, Vol. 40 (2), pp. 415-425.

Kittas C., Katsoulas N., Baille A. (2001). Influence of Greenhouse Ventilation Regime on the Microclimate and Energy Partitioning of a Rose Canopy during Summer Conditions. *J.agric. Engng Res.*, Vol. 79 (3), pp. 349-360

Kritchman M. E., Friesem A. A., Yekutieli G., (1979a). Highly Concentrating Fresnel Lenses, *Applied Optics*, Vol.18, pp.2688-2695

Kritchman M. E., Friesem A. A., Yekutieli G., (1979b). Efficient Fresnel Lens for Solar Concehtration, *Solar Energy* Vol.22, pp.119-123

Kupraska S., Slipek Z., (1996). Mathematical Model of Heat and Mass Exchange in a Garden Subsoil during Warm-air Heating. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 65, pp. 305-311

Kupraska S., Slipek Z., (2000). Optimization of Greenhouse Substrate Heating. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 76, pp.129-139

Kurata K. and Takamura T., (1991). Underground Storage of Solar Energy for Greenhouse Heating. I. Analysis of Seasonal Storage System by Scale and Numerical Models. *Transactions of ASAE*, Vol. 34(2), pp. 563-569

Kurata K., (1991). Scale-model Experiments of Applyind a Fresnel Prism to Greenhouse Covering. *Solar Energy*, Vol. 46, pp.53-57

Kyritsis S., (1986). An Integrated Energy System in a Small Agricultural Region. Proc. 2nd International Conference in Energy and Agricultural Sirmione, Italy

Leutz Ralf, Susuki Akio, Akisawa Atsushi, Kashiwagi Takao, (1999). Desing of a Nonimaging Fresnel Lens for Solar Concentrators, *Solar Energy*, Vol. 65, pp.379-387

Lorenzo E., Minano C. J., (1986). Desing of One-axis Tracted Linear Fresnel Lenses, *Solar Energy*, Vol. 36, pp.531-534

Mastalerz W. J., *The Greenhouse Environment*, 1977

- Mavrogianopoulos G. and Kyritsis S., (1986). The Performance of a Greenhouse Heated by an Earth-air Heat Exchanger. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 36, pp. 263-268
- Mavrogianopoulos G. and Kyritsis S., (1993). Analysis and Performance of a Greenhouse with Water Filled Passine Solar Sleeves. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 65, pp. 47-61
- Mavrogianopoulos G., Choustoulakis P., Kyritsis S., (1992). Tomatoes Production in Heated and Unheated Greenhouses. *Agricultura Metiteranea International Journal of Agricultural Science*, Vol. 122, pp. 111-119
- Mayers C. and Mackson C. J., (1982). Application of Solar Energy in Agriculture. Economic Commission of Europe, AGRI/MECH, Report No 94
- Methy M. 2000. A two-channel hyperspectral radiometer for the assessment of photosynthetic radiation-use efficiency. *J. Agric. Engng. Res.* 75: 107-110.
- Miguel F.A., van de Braak J.N., Silva M.A., Bot A.P.G., (1998). Free-Convection Heat Transfer in Screened Greenhouses. *J.agric.Engng Res* Vol. 69, pp. 33-139.
- Miguel F.A., van de Braak J.N., Silva M.A., Bot A.P.G., (2001). Wind-induced airflow through permeable materials Part II: air infiltration in enclosures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 59-72.
- Miller E. O., Mcleod H. J., Sherwood T. W., (1951). Thin Sheet Plastic Fresnel Lenses of High Aperture, *Optical Society of America*, Vol.41, pp. 807-815
- Nelson T. D., Evans L. D., Bansal K. R., (1975). Linear Fresnel Lens Concentrators, *Solar Energy*, Vol. 17, pp.285-289
- Oca J., Montero I.J., Antón A., Crespo D. (1999). A Method for Studying Natural Ventilation by Thermal Effects in a Tunnel Greenhouse using Laboratory-Scale Models. *J.Agric.Engng Res.*, Vol. 72, pp. 96-104
- Ozturk H.H., (2005). Experimental Evaluation of Energy and Exergy Efficiency of a Seasonal Latent Heat Storage System for Greenhouse Heating. *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 1523-1542
- Ozturk H.H. and Bascetincelik A., (2003). Energy and Exergy Efficiency of a Packed bed Heat Storage Unit for Greenhouse Heating. *Biosystems Engineering*, Vol. 86, pp. 231-254
- Ozturk H.H., Bascetincelik A., Paksoy H. O., Demirel Y., (1999). The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. *Proceedings of ICAME '99 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy*, Adana, Turkey, pp. 326-331
- Papadakis G., Briassoulis D., Scarascia Mygnozza G, Vox G., Feuilleley P., Stffers A.J., (2000). Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 77(1), pp.7-38.
- Papadakis G., Frangoudakis A., Kyritsis S., (1989 α). Theoretical and Experimental Investigation of Thermal Radiation Transfer in Polyethylene Covered Greenhouses. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 44, pp. 97-111
- Papadakis G., Frangoudakis A., Kyritsis S., (1994). Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Tranfer between a Tomato Crop and the Greenhouse Environment. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 57, pp.217-227
- Papadakis G., Manolakos D., Kyritsis S., (1998). Solar Radiation Transmissivity of a Single-Span Greenhouse through Measurements on Scale Models. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 71, pp.331-338
- Papadakis G., Mermier M., Meneses F. J., Boulard T., (1996). Measurent and

Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings. *J. Agric. Engng Res.*, Vol. 63, pp. 219-228

Pearson S., Wheldon E. A., Hadley P., (1995). Radiation Transmission and Fluorescence of Nine Greenhouse Cladding Materials. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 62, pp.61-70

de la Plaza S., Benavente M. R., Garsia L. J., Nanas M.L., Luna L., Duran M.J., Retamal N., (1999). Modelling and Optmal Design of an Electric Substrate Heating for Greenhouse Crops. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 73, pp. 131-139

Pollet V. I., Pieters G. J., (1999). Condensation and Ratiation Transmittance of Greenhouse Cladding Materials: Part I, Laboratory Measuring and Performance. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 74, pp.369-377

Pollet V. I., Pieters G. J., (2000). Condensation and Ratiation Transmittance of Greenhouse Cladding Materials: Part II, Results for a Complete Condensation Cycle. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 75, pp. 65-72

Pollet V. I., Pieters G. J., (2001). Condensation and Ratiation Transmittance of Greenhouse Cladding Materials: Part III, Results for Glass Plates and Plastic Films. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 77(4), pp. 419-428

Popovski K., (1986). Location of Heating Installations in Greenhouses for Low Temperature Heating. *CNRE Bulletin*, Vol.15, pp. 51-55

Puri V. M. and Zuritz C. M., (1985). Feasibility of Subsurface Latent Heat Storage for Plant Root Zone and Greenhouse Heating. *ASAE Paper No. 85*, pp. 40-45

Rabl Ari., *Active Solar Collectors and Their Applications*, Oxford University Press, 1985.

Rakovec J. and Hocevar R., (1988). Simulation of Soil-and-air Microclimate Modifications Using Soil Heating with Warm Air. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 42, pp. 41-52

Re uveni R., Raviv M., (1997). Manipulation of Light for the Management of Foliar Pathogens of Greenhouse Crops. Paper presented at 'International Congress for Plastic in Agriculture', March 9-14, Tel-Aviv, Israel. (Proceedings, pp.269-281)

Rigopoulos R., Santamouris I., *Solar Greenhouse heating*, 1981

Roy C.J., Boulard T., Kittas C., Wang S., (2002). Corrective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfect Stirred Tank. *Biosystems Engineering*, Vol. 83 (1), pp.1-20.

Rosello C., Berna A., Mulet A., (1990). Solar Drying of Fruits in a Mediterranean Climate. *Drying Technology*, Vol. 8 (2), pp. 305-321

Rozakis S., Soldatos P., Papadakis G., Kyritsis S., Papantonis D., (1997). Evaluation of an Integrated Renewable energy System for Electricity Generation in Rural Areas. *Energy Policy*, Vol. 25 (3), pp. 337-347

Santamouris M.I., (1993). Active Solar Agricultural Greenhouse. The State of Art. *International Journal Solar Energy*. Vol. 14, pp. 19-32

Seginer I., (2002). The Penman-Monteith Evapotranspiration Equation as an Element in Greenhouse Ventilation Design. *Biosystems Engineering*, Vol. 82 (4), pp. 423-439.

Serway A. R., *Physics*, Saunders College Publishing, 1990

Singh D. and Sharma K. S., (1989). The Integration of a Solar Energy Collection System with a Multi-stage Flash Desalination Unit. *Desalination*, Vol. 73, pp. 191-199

Silva A. M., Miguel A., Rosa R., (1991). Thermal Radiation Inside a Single-span Greenhouse with a Thermal Screen. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 49, pp. 185-298

- Spanomitsios K. G., (2001). Temperature Control and Energy Conservation in a Plastic Greenhouse. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 80, pp.251-259
- Swinkels G.L.A., Sonneveld P.J., Bot G.P.A. (2001). Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through zigzag covering material. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol.79, pp. 91-97
- Teitel M., Segal I., Shklyar A., Barak M., (1996). Effects of Nonsteady Hot-water Greenhouse Heating on Heat Transfer and Microclimate. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 65, pp. 297-304
- Teitel M., Segal I., Shklyar A., Barak M., (1999). A Comparison between Pipe and Air Heating Methods for Greenhouses. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 72, pp. 259-273
- Timmons M.B. and Baughman F., (1983). Experimental evaluation of poultry mistfog systems. *Transactions of the A.S.A.E.*, Vol. 26, pp. 207-210.
- Tiwari G.N., Sutar R.F., Singh H.N., Goyal R.K. 1998. Performance studies of earth air tunnel cum greenhouse technology. *Energy Convers. Mgmt.* 39: 1497-1502.
- Trigui M., Barrigton S., Gauthier L., (2001). A Strategy for Greenhouse Climate Control, Part I: Model Development. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 78, pp. 407-413
- Tripanagnostopoulos Y., Tzavellas D., Zoulia I. and Chortatou M. 2001. Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. In Proc. 17th PV Solar Energy Conference, Munich, 22-26 Oct: 2515-2518.
- Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. (2002). Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy* 72: 217-234.
- Tripanagnostopoulos Y. and Tselepis S., (2002). Hybrid Solar/wind (PVT/WT) Building Integrated Systems. In Proc. 2nd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, Kassel, Germany, 25-26 Sept. 2003, pp.329-333
- Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Tonui J.K., Kavga A., (2004 α). Illumination aspects for efficient greenhouses. In Proc. (CD-ROM) Int. Conf. Greensys 2004, Leuven, Belgium.
- Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Tonui J.K., Kavga A., (2004 β). Greenhouse energy supply by solar/wind systems. In Proc. (CD-ROM) Int. Conf. Greensys2004, Leuven, Belgium.
- Tripanagnostopoulos Y. Souliotis M., Battisti R. and Corrado A., (2005). Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, Vol. 13, pp. 235-250.
- Tselepis S. and Tripanagnostopoulos Y., (2002). Economics Analysis of Hybrid Photovoltaic/thermal Solar Systems and Comparison with Standard PV Modules. *Proc. of the International Conference on PV in Europe 7-11 October, Rome, Italy*, pp. 856-859
- Van de Braak N. J., (1988). New Methods of Greenhouses Heating. *Engineering and Economics Aspects. Acta Horticulturae*, Vol. 245, pp. 149-157
- Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijbergen D., Mistriotis A., von Zabeltitz C., Graatrad J., Russo G., Suay- Cortes R., (2000a). Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouse in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 75, pp. 1-16
- Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijbergen D., Mistriotis A., von Zabeltitz C., Graatrad J., Russo G., Suay- Cortes R., (2000b). Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouse in European Union Countries: Part II, Typical Designs. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 75, pp. 111-126

- Wang S., Boulard T., (2000). Predicting the Microclimate in a Naturally Ventilated Plastic House in a Mediterranean Climate. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol. 72, pp. 27-38.
- Weiner D., Fisher D., Moses E. J., Katz B., Meron G., 2001. Operation experience of a solar- and wind- powered desalination demonstration plant. *Desalination*, Vol. 137, pp. 7-13.
- Willits D.H., (2001). The effect of cloth characteristics on the cooling performance of external shade cloths for greenhouses. *Journal of Agriculture Engineering Research*, Vol.79, pp. 331-340.
- Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A. 2002. The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy* 72:113-128.
- Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A. 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy* 74:253-269.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γεωργία και Κτηνοτροφία, 1999, τεύχος 9, Εκδόσεις Αγρότυπος
- Γιαννούλης Π., Νέες Πηγές Ενέργειας, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2001
- Γραφιαδέλλης Μ., Σύγχρονα Θερμοκήπια, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη 1987
- Θερμοκήπια 1996, Εκδόσεις Γεωργική Τεχνολογία
- Καπλάνης Σ., Συναρμολόγηση, Κατασκευή και Έλεγχος Λειτουργίας Ηλιακών Συλλεκτών, ΤΕΙ Πατρών, 1985
- Καραταγλής Σ., Φυσιολογία Φυτών, Εκδόσεις Γραφικές Τέχνες, 1994
- Κοπιδάκης Μ., Ήπιες-Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Πρακτικές Εφαρμογές της Ηλικής Ενέργειας στην Αγροτική Οικονομία-Θερμοκήπια, ΤΕΙ Ηρακλείου, 1990.
- Κουτεπάς Ν, Ταμβάκης Ν., Ανθοκομία, Αθήνα, 2000
- Μαυρογιαννόπουλος Ν. Γ., Θερμοκήπια, Περιβάλλον-Υλικά-Κατασκευή-Εξοπλισμός, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε, Αθήνα 2001
- Μπαμπαλής Σ., Μαθιουλάκης Ε., Μπελεσιώτης Β., Σωτηρόπουλος Β., (1999).
- Ολύμπιος Χ., Τεχνική της Κκαλλιέργειας των Κκηπευτικών στο Θερμοκήπιο, Αθηνά, 1994
- Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., Εργαστηριακές Ασκήσεις Περιβαλλοντικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών 2000