

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (PV) ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ



ΤΡΥΠΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΚΑΥΓΑ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΑΜΑΛΙΑΔΑ 2018



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών, στο Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, της Σχολής Τεχνολογίας Γεωπονίας και Τεχνολογίας Τροφίμων&Διατροφής, του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας.

Η εργασία έχει αντικείμενο διερεύνησης την επίδραση της σκίασης σε καλλιέργεια μαρουλιού, με εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στην οροφή του θερμοκηπίου. Η πειραματική προσέγγιση έγινε στο εργαστήριο Φυσικής Περιβάλλοντος, Τεχνολογίας Θερμοκηπίων και Βιοκλιματολογίας, στις εγκαταστάσεις του τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων, στην Αμαλιάδα, υπό την καθοδήγηση της κα. Αγγελική Καυγά.

Ευχαριστώ θερμά την κα Αγγελική Καυγά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων και τον κ. Γεώργιο Ζερβουδάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη τους σε μένα καθώς και την πολύτιμη και ουσιαστική συνεργασία που δημιουργήσαμε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω τον Ερευνητή κ. Αθανάσιο Κουλόπουλο, για την συμβολή του καθώς η ερευνητική του εμπειρία ενίσχυσαν την θετική εξέλιξη της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την γυναίκα μου Λένα, την μητέρα μου Νινέττα καθώς και τις αδερφές μου Μαρία και Σόφη για την συμβουλευτική και ηθική συμπαράσταση που προσέφεραν.

Η συγκεκριμένη εργασία είναι αφιερωμένη στον εκλιπόντα πατέρα μου, κ. Ιωάννη Τρυπαναγνωστόπουλο, που διετέλεσε ως Καθηγητής στο τμήμα Φυσικής, της σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Πατρών. Το πλούσιο ερευνητικό του έργο αφορούσε τον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας καθώς και την εφαρμογή τους στον Κτιριακό τομέα. Η βασική ιδέα της εργασίας ανήκει ίδιο, που με την πολύπειρη καθοδήγησή του, με υποστήριξε για να την ολοκληρώσω, ακόμη και τώρα που δεν είναι πια κοντά μας.

Τρυπαναγνωστόπουλος Γιώργος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στη στέγη του θερμοκηπίου μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται από την γυάλινη οροφή και λαμβάνεται από τα φυτά στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, επηρεάζοντας τον φωτισμό τους και συνεπώς την καλλιέργεια. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απόδοσης της παραγωγής ενέργειας και της ανάπτυξης φυτών από εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ στην οροφή θερμοκηπίου.

Οι τύποι των φωτοβολταϊκών είναι οι πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si), τοποθετημένα στην οροφή του θερμοκηπίου με νότιο προσανατολισμό και συνεχή παρακολούθηση των μετρήσεων μέσω datalogger συνδεδεμένου στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται από μια καλλιεργητική περίοδο μαρουλιού μέσα σε δύο θερμοκήπια, το ένα με φωτοβολταϊκά τοποθετημένα στην οροφή και μια άλλη μονάδα χωρίς φωτοβολταϊκά.

Όσον αφορά την ηλεκτρική ισχύ, οι φωτοβολταϊκές μονάδες παρήγαγαν  $50,83 \text{ kWhm}^{-2}$  για τη χαρακτηριστική περίοδο της καλλιέργειας (Φεβρουάριος, Μάρτιος, Απρίλιος), δημιουργώντας επίσης σκίαση θερμοκηπίου 20%. Τα αποτελέσματα της καλλιέργειας υπό συνθήκες σκίασης ήταν ικανοποιητικά, καθώς ήταν στο ίδιο επίπεδο με αυτά του θερμοκηπίου αναφοράς χωρίς φωτοβολταϊκή στέγη.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- Πρόλογος.....	i
- Περίληψη.....	iii
- Περιεχόμενα.....	v
1. Εισαγωγή.....	1
2. Ηλιακή Ενέργεια και Θερμοκήπιο.....	3
2.1 Εισαγωγή στην Ηλιακή Ακτινοβολία.....	3
2.1.1 Η κίνηση του Ήλιου, βασικές έννοιες και ορισμοί.....	5
2.1.2 Προσανατολισμός & κλίση της επιφάνειας ηλιακού απορροφητή....	6
2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο & Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	8
2.2.1 Εισαγωγή στο Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	8
2.2.2 Διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	9
2.2.3 Κατασκευαστικά στοιχεία φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	14
2.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	15
2.3 Εισαγωγή στο Θερμοκήπιο.....	17
2.3.1 Ιστορική αναδρομή.....	17
2.3.2 Τύποι Θερμοκηπίων.....	18
2.3.3 Τεχνικός εξοπλισμός Θερμοκηπίων.....	19
2.3.4 Ενεργειακά αυτόνομο Θερμοκήπιο.....	19
3. Θεωρητική προσέγγιση ερευνητικής διαδικασίας.....	21
3.1 Θεωρητική μελέτη εφαρμογής Φωτοβολταϊκών στοιχείων σε Θερμοκηπιακή μονάδα.....	21
3.1.1 Γενικές πτυχές λειτουργίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε οροφή θερμοκηπίου.....	21
3.1.2 Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε οροφή θερμοκηπίου.....	22
3.1.3 Οροφές θερμοκηπίου που λειτουργούν ως παθητικοί ανακλαστήρες.....	22
3.1.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα παρακολούθησης Ηλίου στα θερμοκήπια..	23
3.2 Βασικές γνώσεις για την εφαρμοζόμενη καλλιέργεια Μαρουλιού.....	24
3.2.1 Βοτανικά χαρακτηριστικά Μαρουλιού.....	24
3.2.2 Κλιματικές και εδαφικές συνθήκες.....	25
3.2.3 Πολλαπλασιασμός και ποικιλίες Μαρουλιού.....	26
3.2.4 Εχθροί και Ασθένειες.....	27
4. Πειραματική διαδικασία.....	28
4.1 Εργασίες κατασκευής πειραματικής διάταξης.....	28
4.2 Όργανα πειραματικής διάταξης.....	29
4.3 Πειραματική διαδικασία.....	31
4.3.1 Λίπανση-Άρδευση.....	31
4.3.2 Τεχνική μετρήσεων Ανταλλαγής Αερίων στο Φύλλο.....	31
4.3.3 Συγκομιδή φυτών και επιλογή κατάλληλων στελεχών για επόμενες μετρήσεις.....	31
4.3.4 Ανάλυση δεδομένων.....	31
5. Πειραματικά αποτελέσματα ενέργειας και καλλιέργειας.....	32
5.1 Περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκηπίου.....	32
5.2 Αποτελέσματα καλλιέργειας.....	35
5.3 Αποτελέσματα ενέργειας.....	36
6. Συμπεράσματα.....	38
7. Βιβλιογραφία.....	41





# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να συμβάλουν στις ενεργειακές ανάγκες των θερμοκηπίων και μεταξύ αυτών είναι τα συστήματα ηλιακής ενέργειας όπως φωτοβολταϊκά, ηλιακοί θερμοκοίτες και υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμοκοίτες (PV / T) συστήματα. Για τον βέλτιστο έλεγχο των συνθηκών του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου κατά την καλλιέργεια φυτών, προτείνονται διάφορες μέθοδοι, λαμβανομένων υπόψη των τοπικών κλιματικών συνθηκών και των τεχνικών προδιαγραφών της κατασκευής τους [3-5]. Παράλληλα αυτών των μεθόδων, μπορεί κανείς να αναφερθεί στη χρήση υπέρυθρων θερμομαντικών σωμάτων, τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης για τον εσωτερικό αέρα και το θόλο του φυτού [6].

Το υλικό κάλυψης και η σκίαση επιδρά άμεσα στη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται σε θερμοκήπια [3]. Οι ραδιομετρικές και θερμοκοίτες ιδιότητες των υλικών που καλύπτουν το θερμοκήπιο [7], επίσης αποτελούν σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, και σε συνδυασμό με τις τεχνικές προδιαγραφές των θερμοκηπίων, επηρεάζουν τις εσωτερικές συνθήκες του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Αυτοί οι παράγοντες συνδέονται επίσης με τη ζήτηση ενέργειας για φωτισμό, θέρμανση και εξαερισμό των θερμοκηπίων, όπου η εισερχόμενη ακτινοβολία μπορεί να ανταποκριθεί χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του θερμοκηπίου [8,9]. Επιπλέον, τα νανοϋλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βελτιωμένο υλικό κάλυψης [10], κατάλληλο για ψύξη θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Από την άλλη μεριά, το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του χειμώνα φαίνεται μερικώς ανεπαρκές και ο τεχνητός φωτισμός για κάποιο χρονικό διάστημα τις βραδινές ώρες, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παραταθεί ο χρόνος της φωτοσύνθεσης [11].

Η θερμοκρασία και ο φωτισμός είναι οι κυριότεροι παράγοντες και επηρεάζουν την καλλιέργεια φυτών. Καθώς ένα μικρό μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για τη φωτοσύνθεση, το μεγαλύτερο μέρος αυξάνει τη θερμοκρασία του φυτού. Το υψηλό επίπεδο φωτισμού δεν είναι πάντα ωφέλιμο καθώς υπερθερμαίνει τα φυτά, προκαλώντας δυσλειτουργίες στον μηχανισμό φωτοσύνθεσης και στην πρόσληψη νερού και διατροφικών στοιχείων.

Από την άνοιξη μέχρι το φθινόπωρο, τα θερμοκοίτες πρέπει να αερίζονται και να σκιάζονται επαρκώς, ώστε να επιτυγχάνονται τα κατάλληλα επίπεδα φωτισμού και θερμοκρασίας για την καλλιέργεια. Η σκίαση και η πρόσθετη ηλιακή απορρόφηση από το διαφανές κάλυμμα του θερμοκηπίου (λεύκανση) είναι πρακτικές και οικονομικά αποδοτικές μέθοδοι για τη μείωση της διαπερατότητας του φωτός [12], όταν οι εναλλακτικές μέθοδοι απαιτούν δαπανηρό μηχανικό εξοπλισμό και αρκετή κατανάλωση ενέργειας. Ο φυσικός αερισμός των θερμοκηπίων εξαρτάται ευρέως από την ταχύτητα του ανέμου και τα ανοίγματα εξαερισμού, ενώ η κατεύθυνση του ανέμου δεν έχει αξιοσημείωτη επίδραση στην απόδοση του εξαερισμού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η επίδραση του ανέμου βασίζεται στο φαινόμενο της καμινάδας (chimney effect) [13].

Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται λιγότερο σε θερμοκοίτες σε σύγκριση με άλλα κτίρια [14], αλλά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Τα θερμοκοίτες είναι μεγάλης σημασίας μονάδες για την καλλιέργεια γεωργικών προϊόντων και απαιτούν τον βέλτιστο συνδυασμό φωτισμού, θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού. Οι φακοί Fresnel, που χρησιμοποιούνται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου αντί για τυπικά γυάλινα ή πλαστικά καλύμματα, σε συνδυασμό με απορροφητές, έχουν προταθεί για τον ηλιακό έλεγχο του

εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου και τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα, ηλεκτρισμό ή και τα δύο[15]. Επιπλέον, έχουν προταθεί συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο την ηλιακή όσο και την αιολική ενέργεια για την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας από θερμοκήπια, με το συνδυασμό μικρών ανεμογεννητριών με υβριδικά συστήματα PV/T[16]. Στα συστήματα αυτά, οι φωτοβολταϊκές μονάδες και οι συσκευές εξαγωγής θερμότητας συνεργάζονται, ώστε να θερμαίνεται ένα ψυκτικό υγρό κυκλοφορίας χαμηλότερης θερμοκρασίας από εκείνο των φωτοβολταϊκών μονάδων με ψύξη. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα PV/T μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στον αγροτικό τομέα, όπως σε θερμοκήπια και συστήματα ξήρανσης [17,18].

Έπειτα από την προαναφερθείσα διερεύνηση, μια σειρά πειραμάτων σε θερμοκήπια με χρήση φωτοβολταϊκών στη στέγη τους, έδειξαν την αποτελεσματικότητα αυτής της εφαρμογής [19-24]. Τα τελευταία χρόνια, έχουν κατασκευαστεί θερμοκήπια με φωτοβολταϊκά πλαίσια ενσωματωμένα στις οροφές τους. Ορισμένα από αυτά χρησιμοποιούν αδιαφανή [25] ή ημι-διαφανή [26] φωτοβολταϊκά πάνελ πυριτίου, ενώ άλλα χρησιμοποιούν thin films ή οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) που φαίνονται χρωματισμένα λόγω της εκλεκτικής φασματικής τους απορρόφησης[27]. Στις περισσότερες στέγες θερμοκηπίου, τα φωτοβολταϊκά πυριτίου είναι ενσωματωμένα στην οροφή με νότιο προσανατολισμό, ενώ στην περίπτωση των OPV καλύπτουν μερικώς ή ολικώς την οροφή του θερμοκηπίου.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στις οροφές του θερμοκηπίου μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία που περνά μέσα από το τζάμι. Αυτή η μείωση μπορεί να υποβαθμίσει τον επαρκή φωτισμό των εγκαταστάσεων και απαιτείται η βέλτιστη εγκατάσταση για τους ειδικούς τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό κάλυψης (τυπικός τύπος φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου, τύπος σωλήνων, ημιδιαφανές, thin films, συγκεντρωτικά) . Ένα ποσοστό κάλυψης θερμοκηπίου 9,8% από 24 εύκαμπτες φωτοβολταϊκές μονάδες thin film έδειξε ότι παρέχει ηλεκτρική ενέργεια  $8,25 \text{ kWhm}^{-2}$ , και δεν είχε σημαντική επίδραση στην καλλιέργεια φυτών[28].

Στην παρούσα εργασία, αναλύεται η επίδραση των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του θερμοκηπίου όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας και την καλλιέργεια φυτών λόγω της επίδρασης σκίασης. Πειραματικά αποτελέσματα εξάγονται για την επίδραση της σκίασης στην φυτική ανάπτυξη, που προκαλείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ που έχουν εγκατασταθεί στην οροφή του θερμοκηπίου που βρίσκεται στη Νοτιοδυτική Ελλάδα (Αμαλιάδα, Πύργος). Επιπρόσθετα, οι φωτοβολταϊκές μονάδες σταθερής ηλιακής παρακολούθησης στο θερμοκήπιο μελετώνται θεωρητικά για την παραγωγή ενέργειας. Το έργο αυτό είναι ένα επόμενο βήμα των πρόσφατα εκτελούμενων έργων [29,30] που αποσκοπούν στην εξέταση της σκίασης σε αποτελεσματικά εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα σε στέγες θερμοκηπίων, για την παραγωγή της ενέργειας και ομαλής ανάπτυξης των φυτών.

## 2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

### 2.1 Εισαγωγή στην Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο Ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, αποτελούμενο κυρίως από υδρογόνο (H): 71% και ήλιο (He): 27% κατά μάζα, με ακτίνα  $R_{\odot}=696,000\text{Km}$  (ο δείκτης  $\odot$  αποτελεί το Αστρονομικό σύμβολο του Ήλιου). Η Ηλιακή ακτινοβολία παράγεται στον πυρήνα του Ήλιου ( $\leq 0.1 \cdot R_{\odot}$ ) μέσω θερμοπυρηνικής σύντηξης με τον κύκλο πρωτονίου-πρωτονίου (ή p-p cycle). Κάθε δευτερόλεπτο, συμβαίνουν στον πυρήνα  $9 \cdot 10^{37}$  θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης, μέσω των οποίων το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο και ακτινοβολία. Κάθε δευτερόλεπτο,  $4.4 \cdot 10^{26}$  tn υδρογόνου «καίγονται» αποδίδοντας  $3.84 \cdot 10^{26}$  J ενέργειας υπό μορφή ακτινοβολίας. Αυτή η συνολικά παραγόμενη ενέργεια από τον πυρήνα, λέγεται και λαμπρότητα (luminosity) του Ήλιου και συμβολίζεται  $L_{\odot}$ . Επειδή η ισχύς  $P$  είναι ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας ( $P=dE/dt$ ), έπεται από τα παραπάνω ότι η παραγωγή ισχύος στον πυρήνα του Ήλιου ανέρχεται σε  $P_{\odot}=3.84 \cdot 10^{26}$  W.

Η ενέργεια  $E$  που μεταφέρει κάθε φωτόνιο εξαρτάται από τη συχνότητα  $f$ , το μήκος κύματος  $\lambda$ , και μπορεί να βρεθεί μέσω των σχέσεων  $E=h \cdot f=(h \cdot c)/\lambda$ , όπου  $h=6.626 \cdot 10^{-34}$  η σταθερά του Planck,  $c=2.9979 \cdot 10^8$  m/s η ταχύτητα των φωτονίων στο κενό,  $\lambda$  το μήκος κύματός τους και  $f=c/\lambda$  η συχνότητά τους. Η ακτινοβολία (πίνακας 2.1) που χαρακτηρίζεται από ένα μόνο μήκος κύματος λέγεται μονοχρωματική ακτινοβολία (monochromatic radiation). Όταν σε μια ακτινοβολία, όπως εκείνη του Ηλιακού φωτός, υπάρχουν φωτόνια διαφόρων μηκών κύματος, τότε αναφέρεται ως πολυχρωματική ή ευρυζωνική (broadband) ακτινοβολία.

Φασματική Περιοχή (Band)		Όρια [σε nm]	Ποσοστό Συνολικής Ενέργειας	Πυκνότητα Ισχύος [ $\text{W/m}^2$ ]	
F-UV		< 250	0.15 %	2.1	
N-UV	UV-C	250 – 280	0.5 %	6.9	
	UV-B	280 – 315	2.5 %	34.4	
	UV-A	Near	315 – 348	10.8 %	4.3 %
		Far	348 – 390	6.5 %	88.87
VISUAL 390 – 760	Violet	390 – 455	46.4 %	634.2	
	Dark Blue	455 – 485			
	Light Blue	485 – 505			
	Green	505 – 530			
	Yellow-Green	530 – 575			
	Yellow	575 – 585			
	Orange	585 – 620			
	Red	620 – 760			
INFRA-RED	N-IR	760 – 1055	19.7 %	269.5	
		1055 – 4000	19.8 %	270.6	
	F-IR	$4 \cdot 10^3$ – $100 \cdot 10^3$	0.05 %	0.7	
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ →				<b>1366</b>	

Πίνακας 2.1: Φασματική Περιοχή Ακτινοβολίας

Επειδή τα φωτόνια της Ηλιακής ακτινοβολίας κινούνται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός, συνεπάγεται ότι διαμέσου κάθε επιφάνειας  $A$  διέρχεται κάθε δευτερόλεπτο ένας πολύ μεγάλος αριθμός φωτονίων. Με βάση την Ρευστομηχανική, η διέλευση φωτονίων διαμέσου της  $A$ , αποτελεί μια ροή φωτονίων (κατά τον ίδιο τρόπο που τα μόρια του νερού περνώντας από την διατομή μιας σωλήνας δημιουργούν ροή ή παροχή νερού). Επειδή κάθε φωτόνιο μεταφέρει ενέργεια  $E$ , είναι φανερό ότι η διέλευση (ροή) φωτονίων δια μέσου της  $A$ , ισοδυναμεί τελικά με ροή ενέργειας (radiant energy flux) μέσα από την  $A$ . Πρόκειται δηλαδή για ένα πολύ βασικό μέγεθος που μας δείχνει πόσα Joules ενέργειας παρέχονται κάθε

δευτερόλεπτο από την Ηλιακή Ακτινοβολία, όταν αυτή διέρχεται ή φωτίζει μια επιφάνεια Α με εμβαδόν  $1\text{m}^2$ . Το μέγεθος αυτό ονομάζεται πυκνότητα ισχύος (power density) ή πολύ συχνότερα, Irradiance και μετριέται σε  $(\text{J/s})/\text{m}^2$ . Επειδή  $1\text{J/s} = 1\text{Watt}$ , οπότε η πυκνότητα ισχύος ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μετριέται σε  $\text{W}/\text{m}^2$ .



Εικόνα 2.1: Ηλιακή σταθερά  $I_r$

Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μια θερμοκρασία κοντά στους  $5.800\text{K}$ . Η προσπίπτουσα (κατά μέσο όρο) ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα (εικόνα 2.1) είναι γνωστή ως η ηλιακή σταθερά:  $I_r = 1367\text{W}/\text{m}^2$ .

Γενικότερα, η ολική ισχύς από μια πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αναιρείται λόγω της σκέδασης ή της απορρόφησης από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα και το υλικό που συνήθως αναφέρεται ως αερολύματα (aerosols).[39]

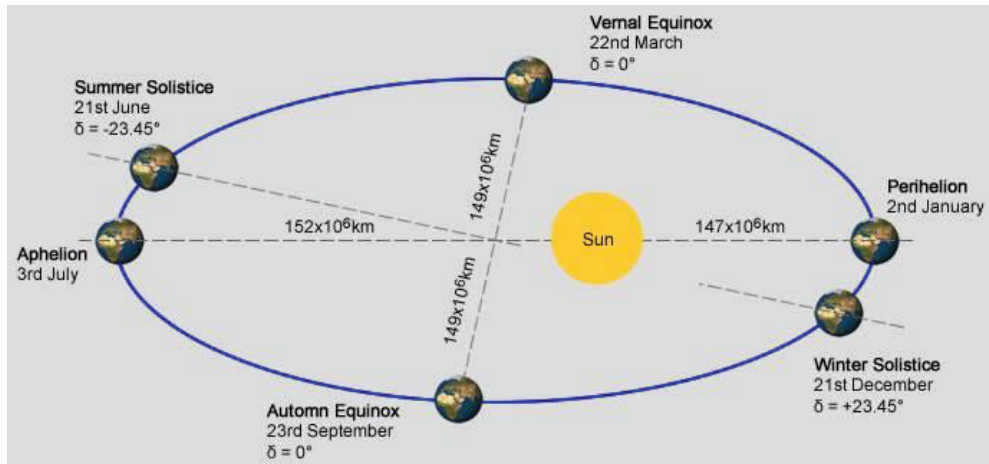
Η ποσότητα της ακτινοβολίας η οποία φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά μεταβλητή. Επιπλέον πέρα από την όποια κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται κοντά στην τοποθεσία της εγκατάστασης.[40]

Μολονότι η ένταση μπορεί να φτάσει την τιμή του  $1\text{KW}/\text{m}^2$ , η διαθέσιμη ένταση είναι συνήθως σημαντικά μικρότερη απ' αυτή της μέγιστης τιμής λόγω της περιστροφής της γης και των αντίξοων καιρικών συνθηκών. Η μέγιστη μέση ακτινοβολία σημειώνεται κοντά στο γεωγραφικό πλάτος των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερω, ενώ είναι μικρότερη στις περιοχές του ισημερινού λόγω της κάλυψής του από σύννεφα. Σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη η ηλιακή ακτινοβολία είναι φυσικά ασθενέστερη λόγω της μικρής ηλιακής ανύψωσης.

Η ένταση της ακτινοβολίας, η ολοκληρωμένη σε μια χρονική περίοδο, ονομάζεται ηλιακή ακτινοβολία. Ιδιαίτερη σημασία για τη σχεδίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει η ακτινοβολία μιας ημέρας. Σημειώνεται ότι η εποχιακή μεταβολή γίνεται περισσότερο προβλέψιμη με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους.

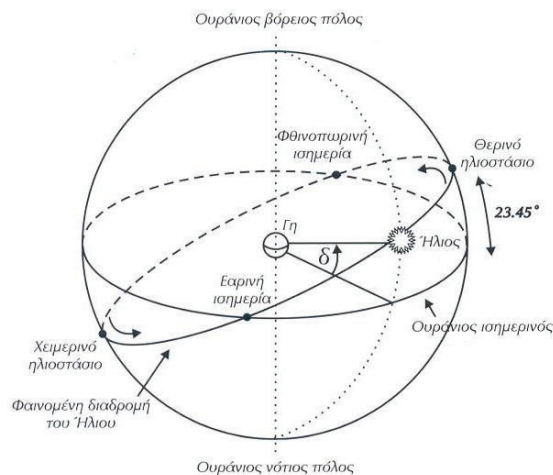
### 2.1.1 Η κίνηση του Ήλιου, βασικές έννοιες και ορισμοί

Η  $I_r$  ή  $I_{sc}$  ή  $S$  είναι γνωστή ως Ηλιακή σταθερά (Solar constant). Στην πραγματικότητα η Ηλιακή σταθερά αποτελεί μια μέση τιμή κατά την διάρκεια ενός έτους. Λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της, η Γη βρίσκεται πλησιέστερα στο Ήλιο στις 2 Ιανουαρίου (περιήλιο) και κατά  $2 \cdot 10^6 \text{km}$  μακρύτερα στις 2 Ιουλίου (αφήλιο). Αποτέλεσμα αυτού είναι η πυκνότητα ισχύος να μεταβάλλεται περίπου κατά  $105 \text{W/m}^2$  κατά την διάρκεια του έτους, από  $1,270$  έως  $1,375 \text{W/m}^2$ . Η μέση τιμή των  $1,366 \text{W/m}^2$  (εικόνα 2.6) επιτυγχάνεται περί τις 3 Απριλίου και 5 Οκτωβρίου, όπου η Γη έχει απόσταση από τον Ήλιο ίση με την μέση τροχιακή της ακτίνα των  $149,598 \cdot 10^6 \text{km}$ .



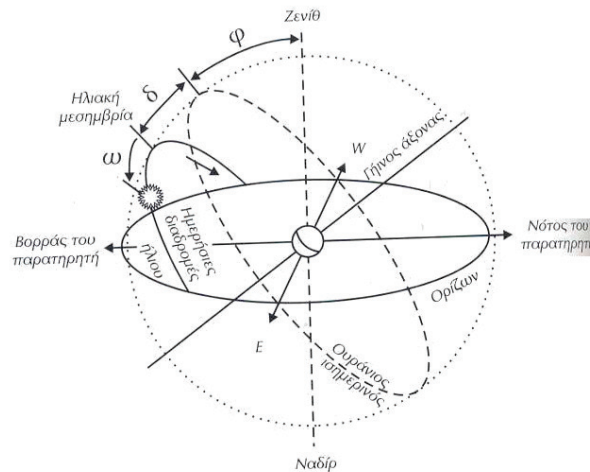
Εικόνα 2.2: Σχετική θέση Ήλιου και Γης

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε μια ελλειπτική τροχιά (που προσεγγίζει πολύ την κυκλική), με τον ήλιο σε μια από τις εστίες της. Το επίπεδο αυτής της τροχιάς ονομάζεται εκλειπτική. Ο χρόνος που απαιτείται για να συμπληρώσει η γη αυτή την τροχιά ορίζεται ως ένα έτος. Η σχετική θέση του ήλιου και της γης, παρουσιάζεται υπό την μορφή μιας ουράνιας σφαίρας γύρω από τη γη (εικόνα 2.6). Το επίπεδο του ισημερινού τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας στους ουράνιους πόλους. Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο μπορεί τότε να αναπαρασταθεί μέσα από μια φαινόμενη κίνηση του ήλιου στην ελλειπτική, η οποία είναι κεκλιμένη κατά  $23.45^\circ$  ως προς τον ουράνιο ισημερινό. Η γωνία μεταξύ της γραμμής που συνδέει τα κέντρα του ήλιου και της γης και του επιπέδου του Ισημερινού ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και δηλώνεται ως  $\delta$ . [41]



Εικόνα 2.3: Η ουράνια σφαίρα με τη φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου

Αυτή η γωνία είναι μηδέν κατά τις Ισημερίες: τη φθινοπωρινή (22/23 Σεπτεμβρίου) και την εαρινή (20/21 Μαρτίου). Αυτές τις ημέρες ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς από την ανατολή και δύει ακριβώς στη δύση. Κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21/22 Ιουνίου) η γωνία είναι  $\delta = 23.45^\circ$  και κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21/23 Δεκεμβρίου)  $\delta = -23.45^\circ$ .



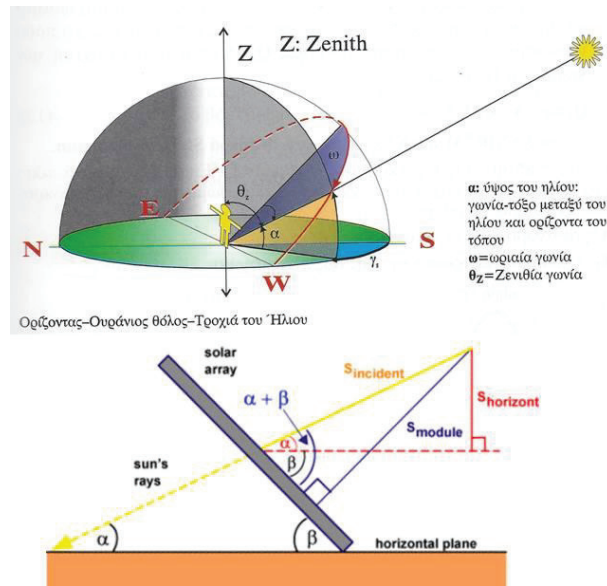
Εικόνα 2.4: Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων Ζενίθ - Ναδίρ το οποίο δεικνύει τη φαινόμενη ημερήσια κίνηση του ήλιου

Η γη περιστρέφεται με ρυθμό μιας περιστροφής την ημέρα γύρω από τον άξονά της. Η ημερήσια περιστροφή της γης περιγράφεται από την περιστροφή της ουράνιας σφαίρας γύρω από τον πολικό άξονα, ενώ η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία  $\omega$ , τη γωνία μεταξύ του μεσημβρινού, που διέρχεται από τον ήλιο, και του μεσημβρινού της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Η ωριαία γωνία είναι μηδέν κατά την ηλιακή μεσημβρία και αυξάνεται προς την ανατολή (εικόνα 2.8). Για έναν παρατηρητή πάνω στη γήινη επιφάνεια, σε μια θέση με γεωγραφικό πλάτος  $\Phi$ , ένα κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων ορίζεται από μια κατακόρυφη γραμμή προς την τοποθεσία, η οποία τέμνει την ουράνια σφαίρα σε δύο σημεία, στο ζενίθ και στο ναδίρ και υποτείνει τη γωνία  $\phi$  με τον πολικό άξονα.

Ο μέγιστος κύκλος που είναι κάθετος προς τον κατακόρυφο άξονα είναι ο ορίζοντας. Η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ήλιου και του ορίζοντα είναι η ανύψωση  $\alpha$  της οποίας η συμπληρωματική είναι η γωνία  $\theta_z$ . Οι άλλες συντεταγμένες μέσα σ' αυτό το σύστημα είναι η αζιμούθια  $\gamma_s$  η οποία είναι μηδέν κατά την ηλιακή μεσημβρία και αυξάνεται προς την ανατολή. Κατά τη διάρκεια της ημερήσιας κίνησης, η ηλιακή απόκλιση συνήθως θεωρείται σταθερή και ίση προς την τιμή της κατά το μέσο της ημέρας.

### 2.1.2 Προσανατολισμός & κλίση της επιφάνειας ηλιακού απορροφητή

Κατά την εγκατάσταση ενός ηλιακού συστήματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η θέση του ήλιου στον ουρανό και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης, περιγράφονται από δύο γωνίες: την κλίση  $\beta$  και την αζιμούθια γωνία  $\gamma$  όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.21. Η κλίση του συλλέκτη  $\beta$ , είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα.

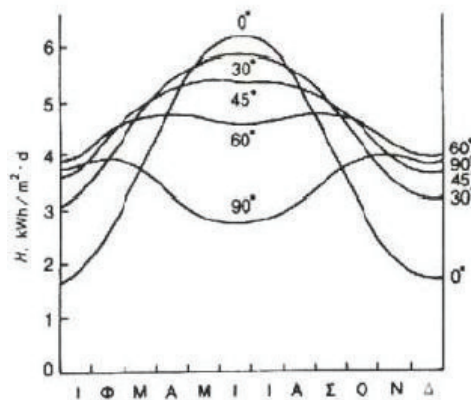


Εικόνα 2.5: Η κλίση  $\beta$  και η αζιμούθια γωνία  $\gamma$ , που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης

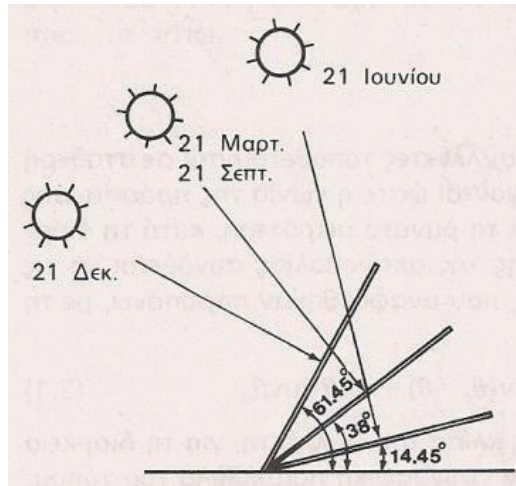
Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη  $\gamma$ , είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ της προβολής της κατακορύφου του συλλέκτη και του τοπικού μεσημβρινού βορρά-νότου.

Η πυκνότερη ισχύς μίας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  που φαίνεται στην εικόνα 2.5 είναι μηδέν. Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί, καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι μηχανικές διατάξεις που αναφέραμε προηγουμένως, μπορεί να προσανατολίζουν συνεχώς το συλλέκτη αλλά είναι δαπανηρές και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα[43].

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις, οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους.



Εικόνα 2.6: Παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας που δέχεται μία επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το διάγραμμα αναφέρεται σε Γεωγραφικό Πλάτος  $40^\circ$ .



Εικόνα 2.7: Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και την εαρινή (21 Μαρτίου) και φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μία τοποθεσία με Γεωγραφικό Πλάτος  $38^\circ$  όπως η Πάτρα. Τα ύψη ηλίου που απεικονίζονται αφορούν αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση τοποθέτησης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι μηδέν (προς το νότο). Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη αλλάζει κάθε εποχή. Στην εικόνα 2.6, φαίνεται η εξάρτηση αυτή της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας από τη γωνία κλίσης του πλαισίου κάθε μήνα του χρόνου.

Όταν το ηλιακό σύστημα, επιδιώκεται να παράγει όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  έως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για το χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  με  $15^\circ$  μεγαλύτερη. Στην εικόνα 2.7 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικές ημερομηνίες του έτους.[43]

## 2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο & Φωτοβολταϊκά στοιχεία

### 2.2.1 Εισαγωγή στο Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Η μετατροπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel, κατά τη διάρκεια πειραμάτων του.

Ειδικότερα κατά την πρόσκρουση φωτονίου σε ημιαγωγικό υλικό, μεταφέρεται η ενέργεια του σε ηλεκτρόνιο( $e^-$ ) του υλικού, το οποίο φεύγει από την θέση ηρεμίας του και κινείται ελεύθερο, στον χώρο, αφήνοντας πίσω του μία κενή θέση (οπή,  $e^+$ ). Η συνεχόμενη δράση φωτονίων θα επιφέρει συνεχόμενη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων και δημιουργία αντίστοιχων οπών. Η δημιουργούμενη πόλωση εξαιτίας της συσσώρευσης ηλεκτρονίων από τη μία μεριά και οπών από την άλλη, επιφέρει μία διαφορά δυναμικού εντός του ημιαγωγού.

Η ένταση του δυναμικού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (παρεχόμενα φωτόνια)
- Το υλικό του ημιαγωγού (διαθεσιμότητα ηλεκτρονίων)
- Την στατιστική πιθανότητα σύγκρουσης φωτονίου-ηλεκτρονίου



Οι δύο περιοχές, που από την μία είναι τα ηλεκτρόνια και από την άλλη οι οπές, ονομάζεται διεπαφή p-n. Στη μεριά τύπου p, έχουμε την περίσσια οπών, άρα και την θετική φόρτιση. Στην μεριά τύπου n, εμφανίζεται η περίσσια ηλεκτρονίων, οπότε έχουμε αρνητικό φορτίο. Όταν έρχονται σε επαφή (Junction) οι δύο περιοχές ηλεκτρόνια που βρίσκονται κοντά στην επαφή μεταπηδούν, από την περιοχή τύπου n στην περιοχή τύπου p, αφήνοντας πίσω τους οπές. Έτσι δημιουργείται μία ανισορροπία στις δύο πλευρές της επαφής που κάποια στιγμή εμφανίζει ένα φράγμα δυναμικού.[42,47]

## 2.2.2 Διάφορες εμπορικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα ηλιακά στοιχεία, διαθέτουν υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας και μεγάλη διάρκεια ζωής και ως κύριοι στόχοι βελτίωσης παραμένουν συνήθως η απόδοση και το κόστος τους [43]. Σκοπός λοιπόν της εξέλιξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η δημιουργία πλαισίων με υψηλότερο κατά το δυνατό βαθμό απόδοσης και χαμηλό κόστος. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών που συναντώνται σήμερα ποικίλουν ως προς το βασικό υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής και το κόστος τους. Μία συνοπτική αναφορά των κυριότερων χαρακτηριστικών τους ακολουθεί στη συνέχεια.

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκά στοιχεία στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών.

Στην παράγραφο αυτή, συμπεριλαμβάνονται και δύο σημαντικές τεχνολογίες που βρίσκονται κυρίως σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχουν ακόμη την εμπορική ανάπτυξη. Συγκεκριμένα είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εύκαμπτης βάσης και τα οργανικά φωτοβολταϊκά, που όμως έχουν τεράστιες δυνατότητες εφαρμογής, εξαιτίας κυρίως της εύκαμπτης επιφάνειας που προσφέρουν.

### Φωτοβολταϊκά πλαίσια Μονοκρυσταλλικού πυριτίου:



Εικόνα 2.8: Κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου[44]

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα υλικό με εύρος ζώνης 1.12eV[52]. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου, κυμαίνεται από 15-18%. Σε εργαστηριακές δοκιμές έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24.7% [44]. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης-επιφάνειας ή “ενεργειακής πυκνότητας”. Ένα άλλο χαρακτηριστικό, είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Αμφότερες, βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος Czochralski (CZ) και η μέθοδος float zone (FZ). Έχει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

### Φωτοβολταϊκά πλαίσια Πολυκρυσταλλικού πυριτίου:



Εικόνα 2.9: Κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [44]

Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά, μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές, δηλαδή το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κύτταρα.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές, έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% , ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως 15% για τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης, *directional solidification (DS)*, η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου («χύτευση») και η ηλεκτομαγνητική χύτευση EMC. Για την πειραματική και υπολογιστική μελέτη της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η συγκεκριμένη κατηγορία φωτοβολταϊκών, εξαιτίας της μεγάλης παραγωγής και ευρείας χρήσης τους.

### Φωτοβολταϊκά πλαίσια Άμορφου πυριτίου:



Εικόνα 2.10: Κύτταρο άμορφου πυριτίου [44]

Το άμορφο πυρίτιο, έχει εύρος ζώνης που κυμαίνεται μεταξύ 1.7-1.8eV[49]. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναποθέτηση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο), πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται, η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό, προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά αυτού του τύπου, κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6% έως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. [44]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το άμορφο πυρίτιο είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των πλαισίων άμορφου πυριτίου, είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης, υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των πλαισίων άμορφου πυριτίου αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις. Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών.

**Φωτοβολταϊκά πλαίσια Δισεληνοϊνδούχου χαλκού (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS και με προσθήκη γαλλίου CIGS):**



Εικόνα 2.11: Κύτταρο δισεληνοϊνδούχου χαλκού [44]

Ο δισεληνοϊνδούχος χαλκός έχει κατά προσέγγιση ενεργειακό χάσμα 1eV[49]. Έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρ' όλα αυτά, η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% για το πλαίσιο.[44]

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8%[44], η οποία είναι η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης. Με την πρόσμιξη γαλλίου (CIGS), η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Πρόβλημα είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται το κόστος να είναι αρκετά χαμηλότερο.

**Φωτοβολταϊκά πλαίσια Τελουριούχου Καδμίου (CdTe):**



Εικόνα 2.12: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe [44]

Το τελουριούχο κάδμιο, έχει ενεργειακό χάσμα στο 1.44 eV[49], και έχει τη δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά οι σύγχρονες τεχνικές, μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου τελουριούχου καδμίου γύρω στο 6-8% . Στο εργαστήριο, η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φτάσει το 16%. [44]

Μελλοντικά, αναμένεται μείωση του κόστους. Τροχοπέδη για τη χρήση του, αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Επίσης πρόβλημα είναι και η έλλειψη του τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό με την εφαρμογή του σε κτίρια (Building Intergrated Photovoltaic, BIPV).

#### **Φωτοβολταϊκά πλαίσια Αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs):**



Εικόνα 2.13: Κύτταρο αρσενιούχου γαλλίου[44]

Το αρσενιούχο γάλλιο, είναι ένα κράμα μετάλλων που περιέχει εκτός από γάλλιο, μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από το χρυσό. Το αρσενικό δεν είναι σπάνιο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικό γάλλιο έχει ενεργειακό χάσμα  $1.42\text{eV}$ [49] και είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%[44]. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν τη χρήση τους σε εφαρμογές συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν τις υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και γι' αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσής τους ενδείκνυνται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

#### **Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer):**

Τα πιο γνωστά εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής, αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω), ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17.2%[44] και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Άλλα πλεονεκτήματα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στη διάχυτη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο ετεροεπαφής είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

## Φωτοβολταϊκά πλαίσια εύκαμπτης βάσης:



Εικόνα 2.14: Εικονική εφαρμογή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών

Μία νέα τεχνολογία, αποτελεί το πρωτοποριακό προϊόν spheral solar, που βασίζεται σε υλικό που αντίθετα με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κύτταρα, δεν επικάθεται σε άκαμπτη βάση πυριτίου αλλά είναι φτιαγμένο από χιλιάδες πολύ οικονομικά σφαιρίδια πυριτίου, εγκλωβισμένα ανάμεσα σε δύο φύλλα αλουμινίου. Τα σφαιρίδια αυτά, κατασκευάζονται από υπολείμματα πυριτίου που προκύπτουν από τη βιομηχανία των chips των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Κάθε σφαιρίδιο, λειτουργεί ως ανεξάρτητο μικροσκοπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο, απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρισμό. Τα φύλλα αλουμινίου εξασφαλίζουν στο υλικό τη φυσική αντοχή που χρειάζεται, του επιτρέπουν να είναι εύκαμπτο αλλά και ελαφρύ, ενώ ταυτόχρονα παίζουν το ρόλο ηλεκτρικής επαφής.

Η γεμάτη φουσαλίδες επιφάνεια που δημιουργούν τα σφαιρίδια επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακού φωτός, χαρίζοντας στο υλικό αποδοτικότητα της τάξης του 11%.[44] Οι εφευρέτες του υποστηρίζουν ότι μπορεί να καλύψει οποιοδήποτε σχήματος επιφάνειες, αυξάνοντας κατά πολύ τους χώρους όπου μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και δίνοντας στους αρχιτέκτονες τη δυνατότητα να σχεδιάσουν κτίρια με καμπύλες που θα μπορούν να είναι εξοπλισμένα με φωτοβολταϊκά, χωρίς μάλιστα να απαιτούνται ενισχυμένες κατασκευές για την στήριξή τους όπως αυτό στην εικόνα 2.18.

## Οργανικά φωτοβολταϊκά:



Εικόνα 2.15: Εύκαμπτο οργανικό φωτοβολταϊκό[50]

Στα λεγόμενα ηλεκτροχημικά ή οργανικά στοιχεία η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα. Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα (πλαστικά ηλιακά κύτταρα) είναι ένας τύπος των οργανικών

φωτοβολταϊκών. Είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία εμφανίζεται με την μορφή λεπτού φιλμ.

Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να κατασκευάσουν όσο το δυνατόν πιο στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί το πάνελ. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης (υγρό διάλυμα) τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα.

Η απόδοση των πολυμερών οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι συγκριτικά χαμηλή σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη. Πρόσφατες ερευνητικές μελέτες όμως, έχουν καταφέρει απόδοση που να φτάνει στο 10%. Το βασικό πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυτής της τεχνολογίας είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους, γεγονός που επιτρέπει να θεωρείται δυνατή η αξιοποίησή τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρότερου χρόνου ζωής τους σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

### **2.2.3 Κατασκευαστικά στοιχεία φωτοβολταϊκών συστημάτων**

Το υλικό κατασκευής των περισσότερων φωτοβολταϊκών κυττάρων (στοιχείων) είναι το πυρίτιο. Ένας αριθμός φωτοβολταϊκών κυττάρων (συνήθως 36) συνδεδεμένων σε σειρά, ώστε να εμφανίζουν συγκεκριμένη τάση ανοικτού κυκλώματος (έως 22V), τοποθετούνται σε επίπεδη γυάλινη πλάκα, προσαρμοσμένη σε μεταλλικό πλαίσιο, συνήθως από αλουμίνιο, υψηλής αντοχής. Το πίσω μέρος καλύπτεται από ειδικό πλαστικό υλικό ενθυλάκωσης. Η τελική κατασκευή πληροί ειδικές προδιαγραφές, ώστε να διαθέτει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις κατάλληλες υποδοχές στήριξης και επιπλέον την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία. Επίσης, πρέπει να είναι ιδιαιτέρως ανθεκτική σε ατμόσφαιρα υψηλής περιεκτικότητας σε άλμη, σε δυνατές κρούσεις χαλαζόπτωσης και σε θερμικές καταπονήσεις.

Η διάταξη αυτή αποτελεί την τυπική βιομηχανική μονάδα και ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο (Photovoltaic Module). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελεί την βασική δομική μονάδα κάθε μεγαλύτερης εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής φωτοβολταϊκής ενέργειας, δηλαδή της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (Photovoltaic Generator). Οι τυπικές τιμές ισχύος αιχμής ενός μικρού τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου κυμαίνονται από 25W έως 85W και της μεγαλύτερης επιφάνειας και μεγαλύτερης ισχύος ακόμα και 240 W. Η αρχική μορφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο πλαίσιο ήταν η κυκλική (κυκλικά wafers από το κυλινδρικό ingot της μεθόδου Kzochralski), με αποτέλεσμα να μένει αρκετή μη χρησιμοποιούμενη επιφάνεια. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια έχουν σχήμα τετραγωνικό (p-Si) ή τετραγωνικό με κομμένες τις γωνίες του (c-Si), ώστε η ενεργός επιφάνεια να προσεγγίζει την γεωμετρία της επιφάνειας του πλαισίου.[46]

Η όψη του φωτοβολταϊκού καλύπτεται από διαφανή ουσία (π.χ. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, MgF<sub>2</sub>). Η μεμβράνη αυτή χαρακτηρίζεται από δείκτη διάθλασης τέτοιο ώστε, για μια περιοχή μηκών κύματος, συνήθως γύρω στα 600nm, κοντά στο μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας (480nm), να ελαχιστοποιείται το ανακλώμενο φως (αντιανακλαστική επίστρωση). Επιπλέον, τα μεταλλικά ηλεκτρόδια συλλογής των φορέων, πρέπει να βρίσκονται κοντά στην ενεργό περιοχή. Το πίσω ηλεκτρόδιο καλύπτει όλη την έκταση του φωτοβολταϊκού και συνήθως αποτελείται, για λόγους κόστους και βάρους της διάταξης, από λεπτό και σχετικά πυκνό μεταλλικό πλέγμα. Ενώ το μεταλλικό πλέγμα, που τοποθετείται στην όψη του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπου προσπίπτει το φως, πρέπει να έχει το σχήμα αραιής μεταλλικής σχάρας έτσι ώστε οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς να συλλέγονται απ' όλη την έκταση της επιφάνειάς του, προκαλώντας ταυτόχρονα την ελάχιστη δυνατή μείωση στη διέλευση του φωτός.[47]



Εικόνα 2.16: Φωτοβολταϊκό πάρκο με σύνδεση σε σειρά ή παράλληλα[51]

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα. Ο συνδυασμός πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μια επίπεδη συνήθως πλάκα, σταθερή ή περιστρεφόμενη, αποτελεί την φωτοβολταϊκή συστοιχία (array). Ένα συνεργαζόμενο σύνολο συστοιχιών αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό συγκρότημα ή φωτοβολταϊκό πάρκο. Για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εμφανίζονται δύο βασικοί τύποι :

- τα αυτόνομα φβ συστήματα και
- τα συνδεδεμένα με το δίκτυο φβ συστήματα

Τα αυτόνομα φβ συστήματα δεν είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο και συνδυάζονται συχνά με ηλεκτρικό συσσωρευτή. Η ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος από ένα σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο καταλήγει στο κτίριο μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος γενικά συνδέεται με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων, απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή/και μετατροπή της σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνεπώς, η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, επιβάλλει τον προσδιορισμό των κατάλληλων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές και τα ηλεκτρονικά ισχύος, όπως οι μετατροπείς συνεχούς τάσεως σε συνεχή ή σε εναλλασσόμενη και τα συστήματα ελέγχου λειτουργίας φόρτισης αποτελούν τα βασικότερα τμήματα ενός φωτοβολταϊκού σταθμού.[45]

#### **2.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων**

##### **Παράγοντες απόδοσης:**

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, δεν λαμβάνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους. Οι παράγοντες επίδρασης αυτοί, μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο ή από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς αναλύονται στη συνέχεια.

Πριν όμως αναφέρουμε τους κυριότερους παράγοντες μείωσης της απόδοσης των ηλιακών πλαισίων, να σημειώσουμε πως για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC), κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι τους. Αυτές είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία Στοιχείου : 250C
- Ηλιακή Ακτινοβολία: 1000 W/m<sup>2</sup>
- A.M (Air Mass): 1.5

Οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι οι εξής:

- Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Θερμοκρασία κυττάρου
- Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου
- Ρύπανση
- Σκίαση
- Γήρανση
- Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος
- Οπτικές απώλειες

### **Κόστος παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων:**

Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων σήμερα αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνεται η απόδοση των φωτοβολταϊκών και μειώνεται το κόστος τους, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτών των συστημάτων. Επίσης, καθοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών αποτέλεσε η ευρύτερη εφαρμογή τους. Σήμερα, η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si), κυμαίνεται στα ποσοστά του 14-17% ενώ τα φωτοβολταϊκά από άμορφο πυρίτιο (a-Si:H), φθάνει το 10%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) συνδυάζουν καλή ποιότητα κατασκευής, καλή απόδοση ~13-14% και μικρότερο κόστος κατασκευής από τα μονοκρυσταλλικά, με τα οποία έχουν τον ίδιο, περίπου, χρόνο ζωής. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι σήμερα δίνεται εγγύηση καλής λειτουργίας, για περισσότερο από 25 χρόνια, αλλά και εγγυήσεις για αντικατάσταση όσων πλαισίων μειώνεται η απόδοση περισσότερο του 10% στη δεκαετία ή περισσότερο του 20% στα 25 χρόνια.

Το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων εκφράζεται συνήθως σε €/Wp αιχμής. Το κόστος για ένα σύστημα κατανέμεται, ως προς τα τμήματά του ως εξής:

φωτοβολταϊκά πλαίσια: 40-60%, συσσωρευτές: 15-25%, αντιστροφείς: 10-15%, υποδομή στήριξης: 10-15%,σχεδιασμός και εγκατάσταση: 8-12%.

Για τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, η παρασκευή της πρώτης ύλης, απαιτεί το 30–35 % του συνολικού κόστους και το υπόλοιπο 30-35 %, η παρασκευή του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου, το κόστος παρασκευής της πρώτης ύλης, ελαττώνεται περίπου στο μισό (18%). Το μεταλλικό πλαίσιο, μαζί με τα υλικά ενθυλάκωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, τον υαλοπίνακα και το κιβώτιο με τις ηλεκτρικές απολήξεις, απαιτεί το υπόλοιπο 30–40 % του συνολικού κόστους της μονάδας. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου έχουν διάρκεια ζωής που ξεπερνάει τα 30 έτη χωρίς ιδιαίτερη συντήρηση, ενώ σε αυτό το διάστημα οι συσσωρευτές αντικαθίστανται 4-5 φορές.

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ενός συστήματος είναι το είδος της εφαρμογής και το αν το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ή όχι. Το κόστος είναι συνήθως χαμηλότερο για συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο και η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με τα αυτόνομα συστήματα, δεν απαιτούν συσσωρευτές. Επίσης, το κόστος ανά Wp μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του φωτοβολταϊκού συστήματος.[48]



## 2.3 Εισαγωγή στο Θερμοκήπιο

Το θερμοκήπιο ή θερμοκηπιακή μονάδα είναι μία ολοκληρωμένη κατασκευή που προφυλάσσει μία καλλιέργεια από περιβαλλοντικές συνθήκες και εξωτερικούς παράγοντες. Κατά βάση, χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλλιέργειας, όταν οι εξωτερικές συνθήκες δεν ευνοούν, καθώς μπορεί να δεχτεί την ηλιακή ακτινοβολία και να διαμορφώσει περιβάλλον θερμοκρασίας και υγρασίας στο επιθυμητό επίπεδο.



Εικόνα 2.17: Τοξωτό Θερμοκήπιο[52]

Τα θερμοκήπια μπορούν να έχουν μόνιμους σιδερένιους ή ξύλινους σκελετούς και να περιβάλλονται από γυαλί, πλαστικό ή άλλα ειδικά είδη μεμβρανών. Αναλόγως των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής, το είδος της καλλιέργειας και του μεγέθους της παραγωγής, προτιμάται διαφορετική κατασκευή και χρήση υλικών για τη θερμοκηπιακή μονάδα.

Σε χώρες με δυσμενείς καιρικές συνθήκες (π.χ. βόρεια Ευρώπη) επιλέγεται η βαριά κατασκευή με διπλά τζάμια και διπλή οροφή. Η μόνωση είναι σημαντικό μέλημα καθώς και η διαφάνεια του γυαλιού να είναι σε υψηλά επίπεδα για την πρόσληψη της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Στα εύκρατα κλίματα, όπως στην Ελλάδα, η κατασκευή δεν χρειάζεται να είναι τόσο βαριά και συνηθίζεται το μονό τζάμι ή και η πλαστική επιφάνεια.

Διαφορετικοί τύποι θερμοκηπίου ταιριάζουν καλύτερα στην κάθε καλλιέργεια, διακρίνοντας τα σε θερμοκήπια εύκρατης, τροπικής, χαμηλής θερμοκρασίας. Επίσης ανάλογα με τη θέση τους, διακρίνονται σε επίγεια και υπέργεια.[34]

### 2.3.1 Ιστορική αναδρομή

Από την αρχαιότητα γνωρίζουμε ότι ο άνθρωπος καλλιεργούσε φυτά σε προστατευμένους ή σε κλειστούς χώρους προσπαθώντας να επιταχυνθεί ο ρυθμός ανάπτυξης τους. Κατά τις αφηγήσεις του Πλάτωνα αυτό εφαρμοζόταν στους φημισμένους «Κήπους του Άδωνη», 5ος αιώνας π.Χ..

Τη ρωμαϊκή περίοδο γνωρίζουμε ότι γινόταν προσπάθειες για να διασφαλίσουν τεχνητό περιβάλλον στα φυτά και να παράγουν προϊόντα εκτός εποχής. Έτσι οι κηπουροί του Τιβέριου Καίσαρα (1ος αιώνας μ.Χ.) κατάφεραν να παράγουν το χειμώνα καρπούς αγγουριάς, στην προσπάθειά τους να του προσφέρουν καθημερινά την αγαπημένη του σαλάτα αγγούρι.

Στην Ευρώπη εμφανίζονται κατά τον 17ο αιώνα οι πρώτες μορφές θερμοκηπίων όπου φυλάσσονταν εξωτικά φυτά για φαρμακευτικούς λόγους αρχικά και μετέπειτα για βοτανικούς και καλλωπιστικούς στις αυλές των αριστοκρατών. Από τον 18ο αιώνα γίνονται συνεχείς βελτιώσεις στην κατασκευή των θερμοκηπίων κυρίως όσον αφορά τον τρόπο και τα υλικά κατασκευής. Αυτή την περίοδο κατασκευάζονται οι πιο γνωστοί Βοτανικοί Κήποι του κόσμου του Gilfford στην Αγγλία και του Πανεπιστημίου Leyden στην Ολλανδία.

Τον 19ο αιώνα, άρχισε να χρησιμοποιείται γυαλί ως υλικό κάλυψης στα θερμοκήπια, έτσι το 1842 κατασκευάζεται το Βικτωριανό θερμοκήπιο στο Kew Gardens της Αγγλίας. Ακολουθούν τον 20ο αιώνα θεαματικές βελτιώσεις στις κατασκευές τους αλλά και στον εξοπλισμό τους.

Σήμερα τα θερμοκήπια είναι κατασκευασμένα από υλικά ελαφριά αλλά ανθεκτικά, το υλικό κάλυψης είναι από γυαλί ή πλαστικό ειδικής επεξεργασίας για να διαπερνάται η επιθυμητή ακτινοβολία. Ο εξοπλισμός τους υψηλής τεχνολογίας, διασφαλίζει ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη των φυτών. Ο αυτοματοποιημένος εξοπλισμός, με το κατάλληλο υπόστρωμα και σε συνδυασμό με τις νέες ποικιλίες και υβρίδια που δημιουργήθηκαν την τελευταία εικοσαετία έχει επιτευχθεί το μέγιστο των αποδόσεων στα καλλιεργούμενα κηπευτικά και στα ανθοκομικά φυτά.



Εικόνα 2.18: Πάρκο Θερμοκηπίων, Αλμερία, Ισπανία[53]

Επικεφαλής όλων των παραπάνω παραμέτρων είναι ο επιχειρηματίας ο οποίος εκτός από τα υψηλά κεφάλαια που διαθέτει, οφείλει να διασφαλίζει εξειδικευμένο προσωπικό στην τεχνογνωσία. Οι θερμοκηπιακές μονάδες θεωρούνται σήμερα οι πιο δυναμικές εκμεταλλεύσεις στο πρωτογενή τομέα της φυτικής παραγωγής.[35]

### 2.3.2 Τύποι Θερμοκηπίων

Οι επικρατέστεροι τύποι θερμοκηπίων σε σχέση με τα υλικά κατασκευής τους είναι

- Τοξωτοί (ημικυκλικοί)
- Δίρριχτης στέγης με κάλυψη από πλαστικό
- Δίρριχτης στέγης με κάλυψη από γυαλί

Επίσης κατασκευάζονται θερμοκήπια, κυκλικά, πύργοι, αεροστήριχτα, μονόρικτης στέγης, κινητά, ημιυπόγεια και υπόγεια, βοτανικών κήπων, πειραματικά και ερασιτεχνικά.

Ακόμη υπάρχουν θερμοκήπια ειδικών χρήσεων, όπως καλλιέργειας μανιταριών , για γόνο ψαριών, για εκτροφή σαλιγκαριών και στη σηροτροφία.[35]



Εικόνα 2.19: Γυάλινο θερμοκήπιο, δίρριχτης στέγης[54]

### 2.3.3 Τεχνικός εξοπλισμός Θερμοκηπίων

Η δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου επιτυγχάνονται με τον κατάλληλο τεχνικό εξοπλισμό. Ο πιο συνηθισμένος τεχνικός εξοπλισμός ενός θερμοκηπίου που συναντάται στις μέρες μας αποτελείται από:

- Το σύστημα εξαερισμού
- Το σύστημα θέρμανσης
- Το σύστημα δροσισμού
- Τα συστήματα άρδευσης και υδρολίπανσης
- Το σύστημα σκίασης
- Το συμπληρωματικό φωτισμό
- Διάφορα άλλα συστήματα αυτοματισμού

Η ταυτόχρονη λειτουργία και χρήση των παραπάνω συστημάτων είναι μια σύνθετη διαδικασία η οποία απλοποιείται με τη χρήση αυτοματισμών που τοποθετούνται στις κατάλληλες θέσεις του θερμοκηπίου. Αυτοί είναι συνδεδεμένοι με μία ειδική συσκευή (προγραμματιστή) ή μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη βοήθεια ενός ειδικού λογισμικού, που ενεργοποιούν ή σταματούν λειτουργίες και μπορούν να δίνουν σήμα κινδύνου αν κάτι δεν εξελίσσεται καλά.[35]

### 2.3.4 Ενεργειακά αυτόνομο Θερμοκήπιο

Το ενεργειακά αυτόνομο θερμοκήπιο είναι η ολιστική προσέγγιση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο περιβάλλον ενός θερμοκηπίου. Ο σχεδιασμός του θερμοκηπίου έχει μελετηθεί ώστε να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο τις δυνατότητες του περιβάλλοντος (προσανατολισμός, προστασία από ανέμους και σκίασμό, κατάλληλο έδαφος, χρήση ΑΠΕ) και επιπλέον να καταναλώνει το ελάχιστο δυνατό ποσό ενέργειας. Παράλληλα, με την χρήση

ΑΠΕ, γίνεται παραγωγή ενέργειας για να καλυφθούν οι απαιτούμενες ανάγκες για την λειτουργία του θερμοκηπίου, κάνοντάς το ενεργειακά αυτόνομο ή σχεδόν αυτόνομο.

Το ενεργειακά αυτόνομο θερμοκήπιο, αποτελεί πολυπαραγωγική μονάδα, αφού εκτός της φυτικής καλλιέργειας παράγει ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, η οποία όταν ενδεχομένως είναι σε περίσσια, διοχετεύεται ανάλογα στο δίκτυο ή να εκμεταλλεύεται από άλλα σημεία κατανάλωσης στην παραγωγική μονάδα του καλλιεργητή.



Εικόνα 2.20: Ενεργειακά Θερμοκήπια, Αυστραλία[55]

Στο θερμοκήπιο έχουν εγκατασταθεί «έξυπνα» συστήματα διαχείρισης των εσωτερικών συνθηκών, λαμβάνοντας υπ' όψιν κάθε παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει τη μεταβολή τους. Τα συστήματα μπορούν να ελέγχουν τον εξαερισμό, την θερμοκρασία, την υγρασία, τη σκίαση και φωτισμό, το πότισμα και λίπανση της καλλιέργειας. Τα «έξυπνα» συστήματα ρυθμίζονται κεντρικά με ηλεκτρονικούς υπολογιστές και είτε είναι προγραμματισμένα σε αυτόματη λειτουργία-έλεγχο ανάλογα των συνθηκών, είτε ρυθμίζονται χειροκίνητα, βάση των συνθηκών κατά τους επιτόπιους ελέγχους, είτε και τα δύο.

### 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

#### 3.1 Θεωρητική μελέτη εφαρμογής Φωτοβολταϊκών στοιχείων σε Θερμοκηπιακή μονάδα

##### 3.1.1 Γενικές πτυχές λειτουργίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε οροφή θερμοκηπίου

Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται σε θερμοκήπια για τη λειτουργία εξαεριστήρων, αυτόματων συστημάτων ανοίγματος-κλεισίματος παραθύρων, τεχνητού φωτισμού, προγραμματισμένης άρδευσης, και λοιπών εξοπλισμών αυτοματισμού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων (κύτταρα Si με κάλυψη 50% ή λιγότερο των γυάλινων ναλοπινάκων [26], φωτοβολταϊκών thin films, οργανικών φωτοβολταϊκών [27]), αλλά οι επιδόσεις τους ανά καλυπτόμενη επιφάνεια στέγης είναι χαμηλές και συνεπώς τα αποδοτικά συστήματα αδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων προτιμώνται στην εφαρμογή τους.



Εικόνα 3.1: Εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά σε στέγη θερμοκηπίου, Σάντα Κρούζ, ΗΠΑ[56]

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκήπια μαζί με ηλιακούς συλλέκτες, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, λέβητες βιομάζας ή και μικρές ανεμογεννήτριες, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τις δυνατότητες των τοπικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα, για μια αποτελεσματική συμβολή στη ζήτηση ηλεκτρισμού και θερμότητας [17,31].

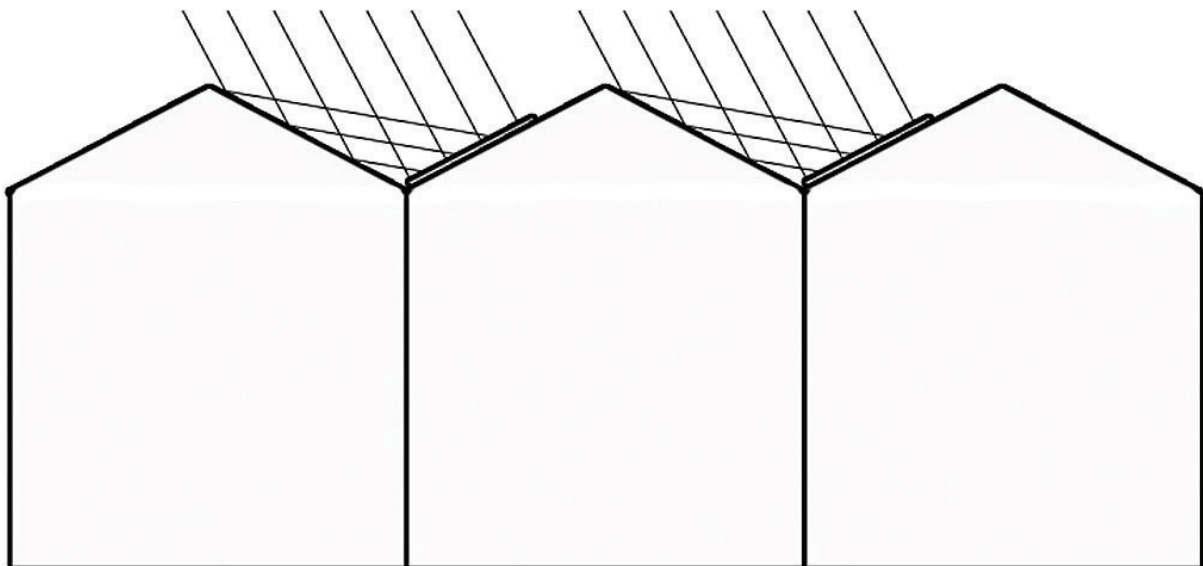
### 3.1.2 Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε οροφή θερμοκηπίου

Στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε οροφές θερμοκηπίου με άξονα προσανατολισμού ανατολή προς δύση, τα πάνελ είναι συνήθως τοποθετημένα στις νότιες πλευρές της στέγης [25]. Σε αυτά τα θερμοκήπια, η σκίαση των φυτών λόγω των πάνελ δεν είναι ίδια για όλα τα φυτά κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων ημερών, με ένα μέρος των οποίων να είναι συνεχώς σκιασμένο σχεδόν όλη την ημέρα, ενώ τα υπόλοιπα να φωτίζονται επαρκώς. Αυτή η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο προκαλεί ανομοιογενή φυτική ανάπτυξη, με κακή επίδραση στην καλλιέργεια.

Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετούνται κατά γραμμές διεύθυνσης βορρά-νότου με κατάλληλη απόσταση γραμμή κατά γραμμή. Με τον τρόπο αυτό η σκίαση μετακινείται εντός του θερμοκηπίου με συνεχή εναλλαγή σκίασης-ηλίας στο κάθε φυτό της καλλιέργειας. Η δεύτερη επιλογή είναι η διάταξη τύπου σκακιέρας, που έχουμε παρόμοιο αποτέλεσμα, αλλά υπάρχει μεγαλύτερη δυσκολία και κόστος εγκατάστασης, καθώς έχει και περισσότερες πιθανότητες εμφάνισης δυσλειτουργιών στη συνέχεια λόγω πολυπλοκότητας της εγκατάστασης.

Τα θερμοκήπια που προσφέρουν στέγες προσανατολισμού με κατεύθυνση βορρά-νότου, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν και στις δύο πλευρές της στέγης, τα οποία βλέπουν ανατολικά και δυτικά. Σε αυτή την περίπτωση εγκατάστασης φωτοβολταϊκού θερμοκηπίου, η σκίαση από τα εγκατεστημένα πάνελ «κινείται» κατά τη διάρκεια της ημέρας, αποφεύγοντας τη μόνιμη σκίαση των φυτών και επιτυγχάνοντας σχεδόν τον ίδιο φωτισμό των φυτών, με αποτέλεσμα μια αποτελεσματική καλλιέργεια.

### 3.1.3 Οροφές θερμοκηπίου που λειτουργούν ως παθητικοί ανακλαστήρες



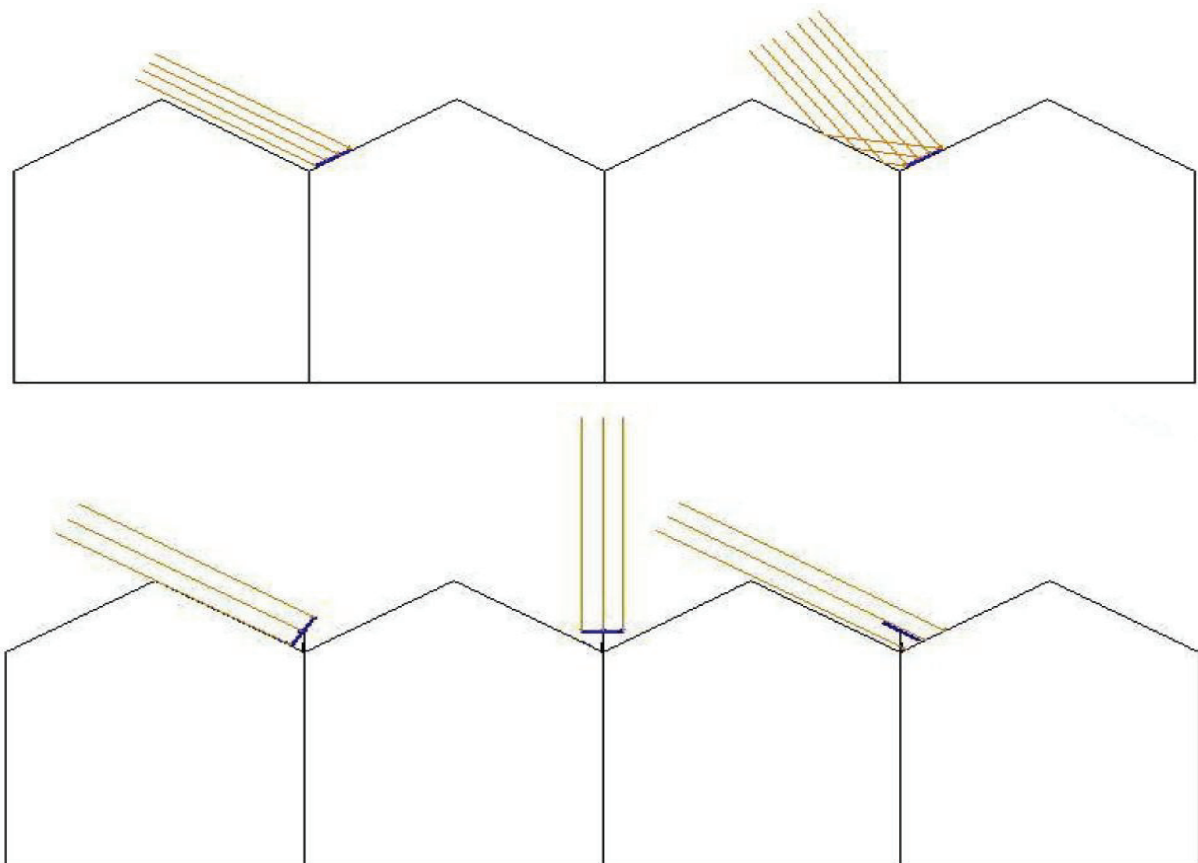
Εικόνα 3.2: Η μία πλευρά της οροφής λειτουργεί ως ανακλαστήρας για την πλευρά στέγης με φωτοβολταϊκά του διπλανού θερμοκηπίου[3]

Παθητική αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί σε εγκατάσταση θερμοκηπίων σε σειρά με δίριχτης στέγης (προσανατολισμού νότου και βορά). Απαιτείται σωστή εκμετάλλευση της βόρειου πλευράς, ενώ στη νότια πλευρά της στέγης έχουν τοποθετηθεί τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Σε αυτά τα θερμοκήπια, η διαφανής επιφάνεια στέγης (βόρεια) ανακλά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προς την αντίθετη πλευρά (εικόνα 3.2), αυξάνοντας την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πάνελ.

Η χρήση ενισχυτικών ανακλαστήρων έχει δείξει σημαντική αύξηση της λήψης ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά [31]. Αυτός ο τρόπος παθητικής βελτίωσης της παραγωγής των φωτοβολταϊκών μπορεί να οδηγήσει στη χρήση μικρότερου αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή και έτσι να μειώσει το φαινόμενο σκίασης στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου με οφέλη στην καλλιέργεια φυτών.

### 3.1.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα παρακολούθησης Ηλίου στα θερμοκήπια

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν σε οροφή θερμοκηπίου ή μπορούν να τοποθετηθούν σε περιστρεφόμενο άξονα, ακολουθώντας τη διαδρομή του ηλίου (εικόνα 3.3). Ο άξονας περιστροφής μπορεί να είναι προσανατολισμένος προς κατεύθυνση Βορρά-Νότου ή προς την κατεύθυνση Ανατολής-Δύσης. Στον άξονα βορρά-νότου, τα ηλιακά πάνελ ακολουθούν την καθημερινή διαδρομή από το πρωί μέχρι το βράδυ. Στην ανατολικοδυτική κατεύθυνση του άξονα περιστροφής, οι ηλιακοί συλλέκτες βλέπουν νότια και ακολουθούν την εποχική ανύψωση του ήλιου.



Εικόνα 3.3: Σύστημα παρακολούθησης (κάτω) συγκριτικά με σταθερό σύστημα(πάνω) φωτοβολταϊκού[3]

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρακολούθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του φωτισμού του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου, επιλέγοντας κατάλληλη θέση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σε περίπτωση που απαιτείται χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία εντός του θερμοκηπίου, τα φωτοβολταϊκά πάνελ προσανατολίζονται κάθετα στην ηλιακή διαδρομή και παρέχουν το μέγιστο σε σκίαση. Από την άλλη πλευρά, εάν απαιτείται μέγιστη ηλιακή πρόσληψη εντός του θερμοκηπίου, τα

επίπεδο των πάνελ προσανατολίζονται παράλληλα με την διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και απορροφούν ελάχιστη ενέργεια.

Αυτές οι ιδιότητες της παρακολούθησης φωτοβολταϊκών πλαισίων (υψηλότερη ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας, ηλιακός έλεγχος εντός του θερμοκηπίου και επιλογή λιγότερου φαινομένου σκίασης) αποτελούν την προβλεπόμενη βελτίωση του συστήματος. Η μεγαλύτερη απόδοση των συστημάτων, σε σχέση με το μοντέλο σταθερών απορροφητών, εξομαλύνει το πρόσθετο κόστος εξαιτίας της ακριβότερης εγκατάστασης στην οροφή του θερμοκηπίου. Η εικόνα 3.3 δείχνει αυτές τις λειτουργίες φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και επιπρόσθετα φωτοβολταϊκά πάνελ παράλληλα με τις ηλιακές ακτίνες για το ελάχιστο αποτέλεσμα σκίασης.

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίστηκε η απόδοση ενέργειας για τους δύο κύριους τρόπους εγκατάστασης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην οροφή του θερμοκηπίου, τα σταθερά φωτοβολταϊκά πάνελ και τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρακολούθησης με άξονα περιστροφής προς κατεύθυνση βορρά-νότου και ανατολής-δύσης. Κατά τους υπολογισμούς, θεωρήθηκε ένα θερμοκήπιο 1 εκταρίου σε μια τοποθεσία με ήπιες καιρικές συνθήκες (Πύργος, Δυτική Πελοπόννησος), πολύ κοντά στο χώρο των δοκιμασμένων μικρών θερμοκηπίων.

## **3.2 Βασικές γνώσεις για την εφαρμοζόμενη καλλιέργειας μαρουλιού**

Το καλλιεργούμενο μαρούλι (*Lactuca sativa* L.) θεωρείται ότι κατά πάσα πιθανότητα προήλθε είτε από το άγριο μαρούλι (*Lactuca serriola* L. ή *L. scariola* L.), το οποίο συναντάται ως ζιζάνιο στην Κρήτη και σε πολλές περιοχές της Ευρώπης, είτε από διασταυρώσεις με τα άγρια είδη *L. saligna* L. και *L. virosa* L. Υπάρχουν πάνω από 100 είδη στο γένος *Lactuca*. Το μαρούλι τύπου *Cos* πιστεύεται ότι έχει διαδοθεί από την Ελλάδα (το όνομα του προέρχεται από την νήσο Κω της Δωδεκανήσου). Επίσης χώροι προέλευσης του μαρουλιού θεωρούνται οι περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου, Μικράς Ασίας, Καυκάσου, Περσίας και Τουρκιστάν. Στην Ελλάδα, αυτοφύονται 9 είδη του γένους *Lactuca*. Απεικονίσεις του μαρουλιού τύπου *Cos* έχουν βρεθεί σε επιτύμβιες πλάκες στην Αίγυπτο από το 4500 π.Χ. και είναι γνωστό ότι το μαρούλι χρησιμοποιείται πάρα πολύ στη διατροφή του ανθρώπου πάνω από 2000 χρόνια. Όμως, πριν από τη χρήση του ως τροφή του ανθρώπου χρησιμοποιήθηκε για τις φαρμακευτικές του ιδιότητες ως πανσίπονο. Ο χυμός του ήμερου μαρουλιού *L. sativa* είναι φαρμακευτικός, λαμβάνεται από τομές που γίνονται στον ανθοφόρο βλαστό του φυτού. Φαρμακευτικό είναι επίσης και το “θριδάκινον ύδωρ,” το οποίο λαμβάνεται μετά από απόσταξη των φύλλων του μαρουλιού.[36]

### **3.2.1 Βοτανικά χαρακτηριστικά Μαρουλιού**

Το καλλιεργούμενο μαρούλι είναι φυτό ποώδες και μονοετές με ρίζα πασσαλώδη, η οποία κατά τη μεταφύτευση καταστρέφεται για να αναπτυχθεί αργότερα ένα επιπόλαιο θυσσανώδες ριζικό σύστημα. Τα φύλλα σχηματίζονται από ένα βραχύ στέλεχος και είναι πλατιά, με επιφάνεια λεία ή κυματοειδή, χρώματος πράσινου ή πρασινοκίτρινου και σε μερικές ποικιλίες με απόχρωση κόκκινη, ενώ το μέγεθος και το σχήμα ποικίλει ανάλογα την ποικιλία. Τα φύλλα είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο κατά τρόπο που να σχηματίζουν κατά την ανάπτυξη του φυτού σφαιροειδή ή προμήκη. Κατά την εποχή της αναπαραγωγής το στέλεχος του φυτού επιμηκύνεται φτάνοντας συνήθως το ύψος των 0,8-1,2 m και σχηματίζει διακλαδώσεις, οι οποίες καταλήγουν σε ταξιανθίες με 15-25 ερμαφρόδιτα άνθη η καθεμιά.



Τα άνθη είναι μικρά, κίτρινου χρώματος με στεφάνη από 5 ενωμένα πέταλα και 5 στήμονες που σχηματίζουν σωλήνα γύρω από το στύλο. Ο τελευταίος είναι εφοδιασμένο με λεπτές τρίχες και φέρει δίλοβο στίγμα, το οποίο είναι επιδεικτικό επικονίασης μόνο για μερικές ώρες το πρωί. Η αυτογονιμοποίηση είναι ο κυριότερος τρόπος γονιμοποίησης των ανθέων ενώ σπάνια συμβαίνει να σταυρογονιμοποιηθούν μερικά άνθη. Ο σπόρος είναι μικρός, επιμήκης, ενώ το χρώμα διαφοροποιείται ανάλογα την ποικιλία και εφοδιασμένος με πάππο (φούντα) από λεπτές και λευκές τρίχες.[37]

### 3.2.2 Κλιματικές και εδαφικές συνθήκες

Το μαρούλι, ως φυτό ψυχρής εποχής, ευδοκίμει καλύτερα στη χώρα μας κατά την περίοδο του φθινόπωρου μέχρι την άνοιξη ενώ όπως προαναφέρθηκε είναι φυτό μεγάλης ημέρας. Γενικώς τα μαρούλια και ιδιαιτέρως τα κεφαλωτά απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες κυρίως κατά τη περίοδο σχηματισμού της κεφαλής. Ειδάλλως, αν σχηματιστεί η κεφαλή, αυτή θα είναι μάλλον χαλαρή και η γεύση των φύλλων υπόπικρη. Δροσερή θερμοκρασία, δηλαδή 12-15°C, βοηθά στην άριστη ανάπτυξη των φυτών. Τα μαρούλια παθαίνουν ζημιά κάτω από -5°C, ενώ υψηλές θερμοκρασίες δηλαδή 21-26°C την εποχή σχηματισμού της κεφαλής προκαλούν επιμήκυνση του στελέχους και πίκρυνση των φύλλων. Η άριστη θερμοκρασία είναι 15-18°C και όχι μεγαλύτερη από 24°C. Οι σπόροι φυτρώνουν άριστα σε θερμοκρασία εδάφους 5-25°C.



Εικόνα 3.4: Καλλιέργεια μαρουλιού[57]

Ως προς το έδαφος το μαρούλι είναι λιγότερο απαιτητικό. Αναπτύσσεται και αποδίδει ικανοποιητικά σε διάφορους τύπους εδαφών, οπωσδήποτε όμως ευδοκίμει καλύτερα σε γόνιμα, μέσης σύστασης εδάφη. Ιδιαιτέρως απαιτητικό σε εδαφική υγρασία είναι το κεφαλωτό μαρούλι, η υπερβολική όμως υγρασία του εδάφους μπορεί να προκαλέσει ασθένειες και ιδίως τη σκληρωτινίαση. Εδάφη συνεκτικά και βαριά, τα οποία συγκρατούν υγρασία, είναι περισσότερο κατάλληλα για καλλιέργεια στις θερμότερες εποχές, ενώ τα ελαφρύτερα εδάφη θα εξυπηρετούσαν καλύτερα χειμερινές καλλιέργειες. Ως προς την οξύτητα των εδαφών, καταλληλότερα εδάφη είναι τα ουδέτερα ή τα ελαφρώς όξινα (pH 6-7). Περισσότερο όξινα εδάφη δεν είναι ευνοϊκά για το μαρούλι και πρέπει να διορθώνονται με ενσωμάτωση της αναγκαίας ποσότητας ασβεστίου. Επίσης πρέπει να αποφεύγονται και τα πολύ αλκαλικά εδάφη, στα οποία τα φυτά μπορούν να παρουσιάσουν χλώρωση.[37]

### 3.2.3 Πολλαπλασιασμός και ποικιλίες Μαρουλιού

Η σπορά γίνεται συνήθως σε δίσκους σποράς με υπόστρωμα τύρφη και σε βάθος 0,5-1cm. Τα νεαρά φυτά μεταφυτεύονται σε δίσκους με ατομικές θέσεις ανάπτυξης μετά την εμφάνιση των κοτυληδονόφυλλων και στη συνέχεια φυτεύονται στο έδαφος όταν αποκτήσουν 4-6 πραγματικά φύλλα, περίπου 4-6 εβδομάδες μετά τη σπορά.

Μία άλλη τεχνική που ακολουθείται είναι η σπορά κανονικού σπόρου με το χέρι ή η αυτόματη σπορά καλυμμένου (pelleted) σπόρου σε κύβους εδάφους. Η σπορά γίνεται συνήθως από τον Αύγουστο μέχρι και τον Φεβρουάριο αλλά με τη χρήση κατάλληλων ποικιλιών η καλλιέργεια μπορεί να επεκταθεί και στους καλοκαιρινούς μήνες. Ο σπόρος του μαρουλιού παρουσιάζει αδυναμία να βλαστήσει όταν ο χρόνος μεταξύ συγκομιδής και σποράς είναι μικρότερη από 6 μήνες (λήθαργος φρεσκοσυγκομισμένου σπόρου) και όταν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από τους 27°C (θερμολήθαργος). Στην πρώτη περίπτωση η διακοπή του λήθαργου γίνεται με τοποθέτηση του σπόρου σε βρεγμένο χαρτί ή ύφασμα που βρίσκεται σε ψυγείο (2-5°C) για 48 ώρες. Όταν πρόκειται να γίνει σπορά σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών εκτός από τα μέτρα που λαμβάνονται για τη μείωση της θερμοκρασίας (επιλογή δροσερού χώρου, ψύξη του υποστρώματος, σκίαση του σπορείου, σπορά το απόγευμα) ικανοποιητικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται και με την τοποθέτηση βρεγμένου σπόρου σε ψυγείο με θερμοκρασία 4-5°C για 3-5 ημέρες πριν από τη σπορά.

Στην παγκόσμια αγορά κυκλοφορούν εκατοντάδες ποικιλίες μαρουλιού, προϊόντα διασταυρώσεων και γενετικής επιλογής, αποτέλεσμα μιας προσπάθειας από τους γενετιστές και τους σποροπαραγωγικούς οίκους να αναπτύξουν τις εμπορικές τους δραστηριότητες σε όλα τα μήκη και πλάτη της μεσογείου. Υπάρχουν επομένως ποικιλίες μέσα στους διάφορους τύπους μαρουλιού, κατάλληλες για τις διάφορες εποχές σε μια συγκεκριμένη περιοχή, κατάλληλες για διάφορες εδαφοκλιματικές συνθήκες και με ανθεκτικότητα στα σοβαρά προβλήματα που αντιμετωπίζει η καλλιέργεια στην περιοχή. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στις κυριότερες ποικιλίες κατά τύπο, που καλλιεργούνται σήμερα στην Ελλάδα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι προτιμάται ο τύπος "Ρωμάνα" και μια πολύ σύντομη αναφορά στις ποικιλίες που καλλιεργούνται στις πιο σημαντικές χώρες παραγωγής μαρουλιού.[38]

Ποικιλίες Μαρούλι φυτό	
Artemis	Italica
Bibb	Marvel
Brogan	Parris Cos
Citation	Parris island Cos
E9908	Parris white noga
Empire	Prizehead
Fairen	Rachel
Gramsi	Salad bowl
Grand rapids	Salinas

Πίνακας 3.1: Αναλυτικά όλες οι σημαντικότερες ποικιλίες του μαρουλιού[38]

### 3.2.4 Εχθροί και Ασθένειες

Το μαρούλι προσβάλλεται από πολλές μυκητολογικές κυρίως ασθένειες αλλά και ιολογικές όπως τον περονόσπορο, το ωΐδιο, τη σκληροτίνια, το μωσαϊκό κ.ά.. Επίσης τα κυριότερα έντομα που προκαλούν προβλήματα στην καλλιέργεια είναι οι αφίδες, ο αλευρώδης, οι θρίπες, τα σαλιγκάρια και τα έντομα εδάφους (κρεμμυδοφάγος, μύγα караφατμέ, σιδηροσκώληκας).[38]

Ασθένειες Μαρούλι φυτό	Εχθροί Μαρούλι φυτό
Αδρομυκώσεις	Αλευρώδης
Αλτεναρίωση	Αφίδες
Ανθράκωση	Θρίπας
Βοτρύτης	Σαλιγκάρια
Μεγαλονεύρωση	<i>Έντομα εδάφους:</i> Κρεμμυδοφάγος Σιδηροσκώληκας Μύγα караφατμέ
Μωσαϊκό	
Περιφερειακό κάψιμο φύλλων	
Περονόσπορος	
Σκληροτίνια	
Τήξη σπορείων	
Ωΐδιο	

Πίνακας 3.2: Αναλυτικά όλες οι ασθένειες και οι εχθροί του μαρουλιού[38]

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.1 Εργασίες κατασκευής πειραματικής διάταξης

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στις στέγες του θερμοκηπίου επηρεάζει την καλλιέργεια φυτών εξαιτίας του λιγότερου φωτοσυνθετικού ηλιακού δυναμικού λόγω σκίασης. Προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της σκίασης στην ανάπτυξη φυτών, πραγματοποιήσαμε δοκιμές με δύο θερμοκηπιακές μονάδες, τη μία με εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ στην οροφή και τη δεύτερη χωρίς, λειτουργώντας ως θερμοκήπιο αναφοράς. Αυτή η δοκιμή καλλιέργειας αποσκοπεί στο να καταγραφεί η επίδραση της σκίασης των φωτοβολταϊκών πάνελ στην ποσότητα και την ποιότητα των προϊόντων, συγκριτικά με καλλιέργεια χωρίς την συγκεκριμένη σκίαση.



Εικόνα 4.1: Πειραματικά θερμοκήπια. Αριστερά θερμοκήπιο αναφοράς. Δεξιά θερμοκήπιο με φωτοβολταϊκά στην οροφή του[1]

Δύο πανομοιότυπα θερμοκήπια μικρής κλίμακας που βρίσκονται στη νοτιοδυτική Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν ως πειραματικά μοντέλα για τις επιλογές εγκατάστασης με και χωρίς φωτοβολταϊκά στην οροφή του θερμοκηπίου. Και τα δύο θερμοκήπια κατασκευάστηκαν από πλαίσιο αλουμινίου, με υαλοπίνακες πάχους 3mm. Είχαν τον ίδιο προσανατολισμό και βρίσκονταν στον ίδιο περιβάλλοντα χώρο, με επαρκή απόσταση μεταξύ τους για να αποφεύγουν αμοιβαία παρεμβολή. Οι διαστάσεις τους είναι Πλάτος 2,13m, Μήκος 2,00m, Ύψος έως το χαμηλότερο σημείο της στέγης 1,00m και Ύψος έως το ανώτερο σημείο της στέγης 1,50m Η επιφάνεια κάλυψης του εδάφους κάθε θερμοκηπίου  $A_p$  είναι ίση με  $4,26m^2$ , η επιφάνεια καλύμματος του θερμοκηπίου  $A_c$  είναι  $14,05m^2$  και ο όγκος του θερμοκηπίου  $V$  είναι  $5,33m^3$ .

Χρησιμοποιήθηκε μαρούλι ως δοκιμαστική καλλιέργεια (εικόνα 4.3). Τα φυτά καλλιεργήθηκαν στο έδαφος, καθώς οι εδαφικές καλλιέργειες θερμοκηπίων υπερτερούν αριθμητικά, δεδομένου ότι η υδροπονία εξακολουθεί να είναι περιορισμένη στη χώρα μας. Η ανάπτυξη των επιλεγμένων καλλιεργειών βασίζεται στην ανάλυση του εδάφους και στην ποσότητα των μακρο-μικρο-στοιχείων που απορροφούν από το έδαφος. Οι επαναλαμβανόμενες αναλύσεις φύλλων προσαρμόζουν ανάλογα την εφαρμογή λιπασμάτων.



Εικόνα 4.2: Διαδικασία τοποθέτησης νεαρών φυτών εντός του θερμοκηπίου[58]

Η άρδευση βελτιστοποιείται με τη χρήση μετρήσεων υγρασίας εδάφους σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να διατηρηθεί η υγρασία του εδάφους στο επιθυμητό επίπεδο. Σε κάθε θερμοκήπιο φυτεύτηκαν 16 νεαρά φυτά μαρουλιού, σχηματίζοντας τέσσερις σειρές τεσσάρων φυτών το καθένα και οι αποστάσεις φύτευσης ήταν 36cm x 24cm (φυτό κατά φυτό x γραμμή κατά γραμμή).



Εικόνα 4.3: Καλλιεργημένα μαρούλια εντός του θερμοκηπίου[1]

## 4.2 Όργανα πειραματικής διάταξης

Στην οροφή του θερμοκηπίου εγκαταστάθηκαν δύο φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) με καθαρή επιφάνεια κυψελίδων  $0,4\text{m}^2$ , καλύπτοντας συνολικά (συμπεριλαμβανομένου του πλαισίου εγκατάστασης)  $0,85\text{m}^2$  της επιφάνειας της στέγης του θερμοκηπίου ή το 20% της. Η εικόνα 4.1 περιλαμβάνει τις φωτογραφίες των πειραματικών μονάδων θερμοκηπίου με αριστερά το θερμοκήπιο αναφοράς και δεξιά το θερμοκήπιο με την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στην οροφή. Θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν στο εμπρόσθιο τμήμα και στις επιφάνειες του πίσω τοιχώματος, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πάνελ. Ένα πυρανόμετρο (CMP3, Kipp & Zonen) τοποθετήθηκε παράλληλα με το επίπεδο των πλαισίων, για να μετρήσει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και επιπλέον μετρήθηκε η ηλεκτρική παραγωγή των φωτοβολταϊκών για να υπολογιστεί η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στο διάστημα του καλλιεργητικού κύκλου.

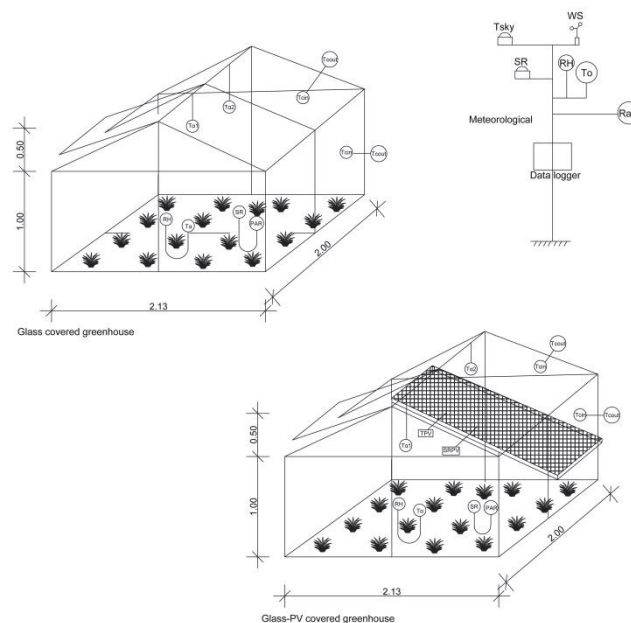
Οι παράμετροι του εσωτερικού μικροκλίματος που παρακολουθούνται και στα δύο θερμοκήπια ήταν οι θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις στο θόλο, στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος των θερμοκηπίων, όπως και των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Επιπλέον καθώς καταγράφηκε η σχετική υγρασία, η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) (από PAR-LITE, Kirp & Zonen).

Οι εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία του ουρανού και το επίπεδο βροχής, παρακολούθηθηκαν σε ύψος 2,50m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, σε μετεωρολογικό σταθμό κοντά στα θερμοκήπια.



Εικόνα 4.4: Εγκατάσταση αισθητήρων και μετεωρολογικού σταθμού και συνδέσεων[58]

Για τρεις μήνες (από το Φεβρουάριο έως τον Απρίλιο του 2016) περίοδος λειτουργίας (για την ακρίβεια 85 ημέρες) και για τις δύο μονάδες θερμοκηπίου καταγράφηκαν όλα τα δεδομένα κάθε λεπτό και μέσοι όροι ανά 10mins αποθηκεύτηκαν σε ένα καταγραφικό δεδομένων (CR1000, Campbell Scientif) με έναν αναλογικό αναμεταδότη(relay analogue multiplexer). Οι μέσες τιμές ημέρας και νύχτας υπολογίστηκαν επίσης από τις αντίστοιχες καταγεγραμμένες τιμές. Ο διαχωρισμός ημέρας με νύκτα έγινε βάση της απότομης μεταβολής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, οριοθετώντας τες κατά την ανατολή και το ηλιοβασίλεμα. Το λογισμικό Analyzer 4.5 Datalogger χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων.



Εικόνα 4.5: Θέσεις αισθητήρων και μετεωρολογικού σταθμού[2]

## 4.3 Πειραματική διαδικασία

### 4.3.1 Λίπανση-Άρδευση

Η γονιμοποίηση της επιλεγμένης καλλιέργειας βασίστηκε στην ανάλυση του εδάφους πριν από την εγκατάσταση των φυτών. Η λίπανση των φυτών έγινε με ένα υδατοδιαλυτό λίπασμα 20:20:20(N:P:K) μέσω του συστήματος άρδευσης. Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, 250g του λιπάσματος χορηγήθηκαν σε κάθε θερμοκήπιο. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα άρδευσης στάγδην. Η δόση άρδευσης για το μαρούλι κατά τις πρώτες 4 εβδομάδες ήταν 0,3L ανά φυτό ανά εβδομάδα και στη συνέχεια αυξήθηκε σε 0,5L ανά φυτό την εβδομάδα.

### 4.3.2 Τεχνική μετρήσεων Ανταλλαγής Αερίων στο Φύλλο

Μη καταστρεπτικές μετρήσεις του ρυθμού φωτοσύνθεσης και διαπνοής και της στοματικής αγωγιμότητας λήφθηκαν με το φορητό σύστημα φωτοσύνθεσης LCpro-SD(ADC, BioScientific Ltd., England) στις 11:30π.μ., ηλιόλουστης ημέρας, σε υγιή, πλήρως ανεπτυγμένα νεαρά φύλλα, αντιπροσωπευτικά για την κάθε καλλιέργεια. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στην 7<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> εβδομάδα μετά την εγκατάσταση των φυτών μαρουλιού στις συνθήκες θερμοκηπίου, μετά την αντίστοιχη εγκατάστασή τους. Οι μετρήσεις ανταλλαγής αερίων έγιναν για 7 με 10 φυτά ανά καλλιέργεια θερμοκηπίου.

### 4.3.3 Συγκομιδή φυτών και επιλογή κατάλληλων στελεχών για επόμενες μετρήσεις

Στο τέλος της αντίστοιχης περιόδου καλλιέργειας μετά τη μεταφύτευση, τα φυτά απομακρύνθηκαν προσεκτικά από το έδαφος προκειμένου να μην προκληθεί βλάβη στο ριζικό σύστημα. Οι ρίζες πλύθηκαν επιμελώς για να απομακρυνθούν όλες οι βρωμιές. Το ύψος και το νωπό βάρος κάθε φυτού (συμπεριλαμβανομένων των ριζών) μετρήθηκαν. Ακολούθως κόπηκε το υπερκείμενο μέρος του φυτού και μετρήθηκε το ύψος και το βάρος του.

Στη συνέχεια μετρήθηκε ο αριθμός των ώριμων φύλλων κάθε φυτού καθώς και το μήκος και το πλάτος του 5<sup>ου</sup>, 6<sup>ου</sup>, 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> φύλλου κάθε φυτού, που αριθμούνται από τη βάση του φυτού. Κάθε ένα από αυτά τα φύλλα κάθε φυτού συλλεφθήκαμε σε χαρτί γραφής και προσδιορίσαμε την επιφάνειά τους.

Όλα τα φύλλα κάθε φυτού ξεχωριστά εισήχθησαν σε χάρτινες σακούλες και τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 70°C επί 72 ώρες. Η ίδια διαδικασία έγινε για τις ρίζες κάθε φυτού. Στο τέλος, τα φύλλα και οι ρίζες ζυγίστηκαν, εξάγοντας το ξηρό βάρος τους.

### 4.3.4 Ανάλυση δεδομένων

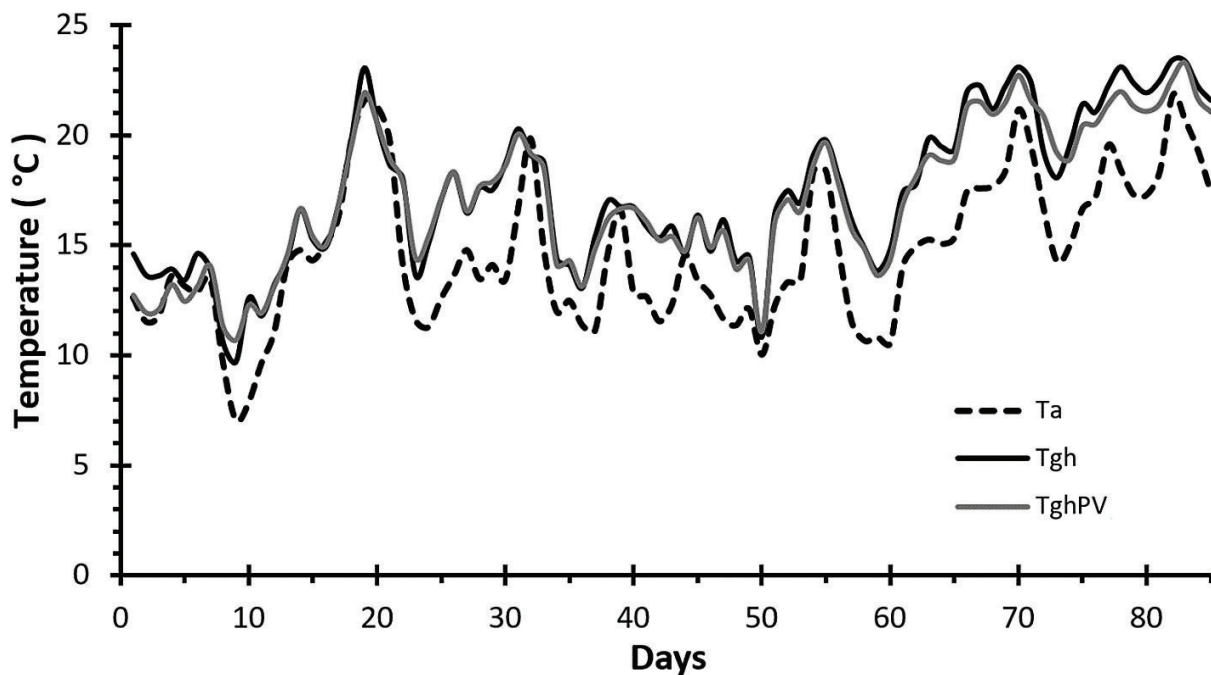
Τα αποτελέσματα των μεταβλητών ανάπτυξης ελήφθησαν με 14-16 ανεξάρτητες μετρήσεις ανά καλλιέργεια. Τα αποτελέσματα της ανταλλαγής αερίων ελήφθησαν από 7 με 10 ανεξάρτητες μετρήσεις ανά καλλιέργεια. Όλα τα αποτελέσματα εκφράζονται ως μέσος όρος  $\pm$  το τυπικό σφάλμα του μέσου όρου (SEM). Όλα τα δεδομένα σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας το Microsoft Office Excel 2007. Οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μέσων των διαφορετικών μεταβλητών υπολογίστηκαν με την εφαρμογή ενός t-test Student σε MS-Excel για στατιστικό επίπεδο σπουδαιότητας  $\alpha = 0,05$ .

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Η έρευνα που διεξήχθη αφορούσε τις επιπτώσεις της σκίασης που δημιουργείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ στα φυτά ενός θερμοκηπίου. Στη μελέτη αυτή, οι απαραίτητοι παράμετροι φυτικής ανάπτυξης που λειτούργησαν ως δείκτες ήταν το νωπό και το ξηρό βάρος, το μήκος και η επιφάνεια των φύλλων. Το πείραμα διεξήχθη για 85 ημέρες και από τα συλλεχθέντα δεδομένα στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα καταγεγραμμένα και υπολογισμένα αποτελέσματα.

### 5.1 Περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκηπίου

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η μεταβολή των θερμοκρασιών κατά την περίοδο των τριών μηνών. Τα παρουσιαζόμενα γραφήματα αφορούν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_a$ , την εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου αναφοράς  $T_{gh}$  και του θερμοκηπίου με το φωτοβολταϊκό  $T_{ghPV}$ . Από αυτά τα διαγράμματα μπορεί κανείς να δει ότι η θερμοκρασία μέσα στα δύο θερμοκήπια είναι σχεδόν στο ίδιο επίπεδο, με ελαφρώς υψηλότερες τιμές μέσα στο θερμοκήπιο αναφοράς. Η παρατηρούμενη μικρή διαφορά θερμοκρασίας οφείλεται στη φωτοβολταϊκή σκίαση και στον εξαερισμό που διατηρούταν και στα δύο θερμοκήπια κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την συνεχή ανανέωση του εσωτερικού αέρα.



Σχήμα 5.1: Μεταβολή θερμοκρασιών εντός του θερμοκηπίου και περιβάλλοντος[1]

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση προκάλεσε μείωση θερμοκρασίας  $2,2^{\circ}\text{C}$ , για την περίοδο καλλιέργειας του μαρούλι. Επίσης, από τον Φεβρουάριο μέχρι τον Απρίλιο, το γυάλινο φωτοβολταϊκό θερμοκήπιο εμφάνισε αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $4,1\%$ , ενώ δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των νυκτερινών συνθηκών των θερμοκηπίων.

Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τους μέσους όρους θερμοκρασίας (T) και σχετικής υγρασίας (RH) που παρακολουθούνται και στα δύο θερμοκήπια κατά τη διάρκεια της ημέρας, της

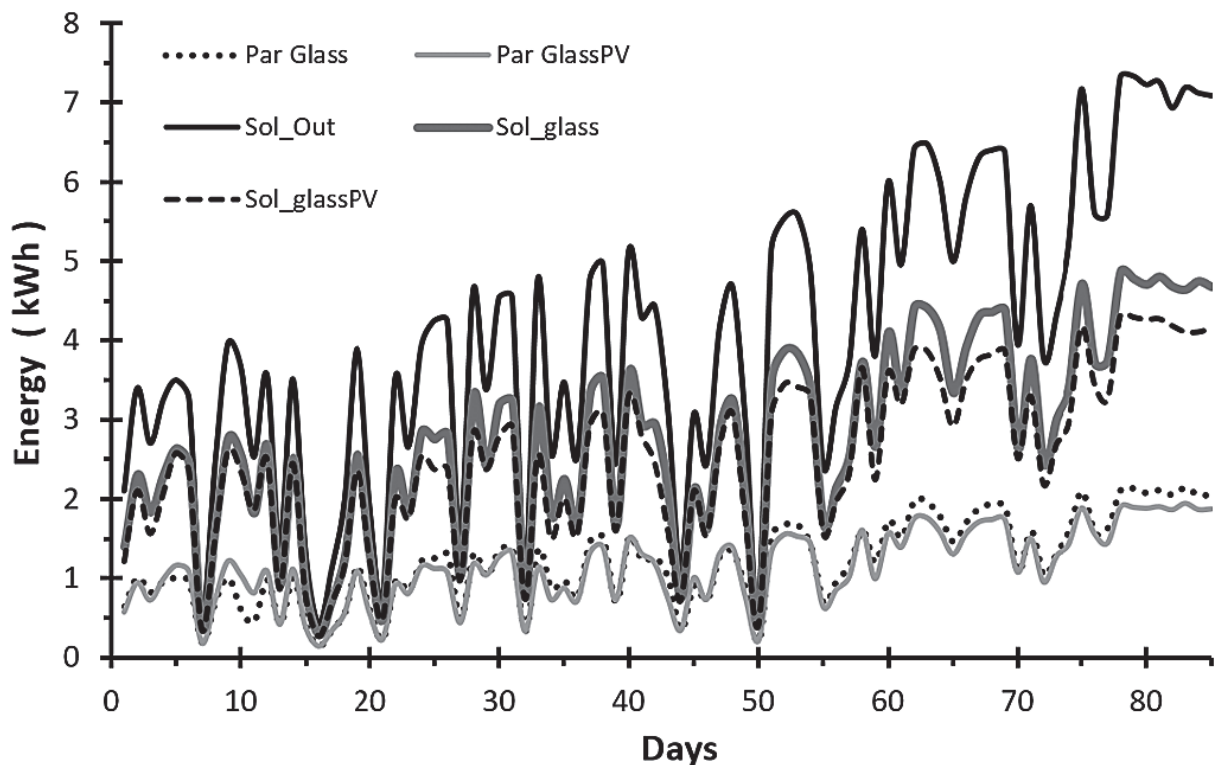


νύχτας και της χρονικής περιόδου των μετρήσεων της Ανταλλαγής Αερίων (11:30π.μ. - 12:30μ.μ.) περίοδο καλλιέργειας και των δύο πειραματικών φυτών.

Καλλιέργεια	Χρονική περίοδος	T <sub>gh</sub>	T <sub>PV</sub>	RH <sub>gh</sub>	RH <sub>PV</sub>
Καλλιεργητική περίοδος μαρουλιού (Φεβρουάριος-Απρίλιος)	ημέρα	27.7	25.5	54.0	58.1
	11:30π.μ.-12:30μ.μ.	33.3	30.3	40.7	45.7
	νύκτα	12.7	13.1	93.7	93.8

Πίνακας 5.1: Μέσες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας για τις περιόδους ημέρας-νύκτας και την μία ώρα κατά το μεσημέρι που λαμβάνονταν οι μετρήσεις της Ανταλλαγής Αερίων στο Φύλλο [2]

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η χρονικά μεταβαλλόμενη η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, εκτός και εντός των δύο θερμοκηπίων, καθώς και οι μετρήσεις του PAR σε αυτές. Η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στα θερμοκήπια είναι το Sol\_glass και το Sol\_glassPV, για το θερμοκήπιο αναφοράς και το θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά πάνελ αντίστοιχα. Και οι δύο αυτές τιμές είναι χαμηλότερες από τις τιμές από το οριζόντιο πυραρόμετρο εκτός των θερμοκηπίων (Sol\_Out), λόγω της μείωσης της μεταδιδόμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της ανάκλασης και της απορρόφησης από το γυάλινο κάλυμμα.



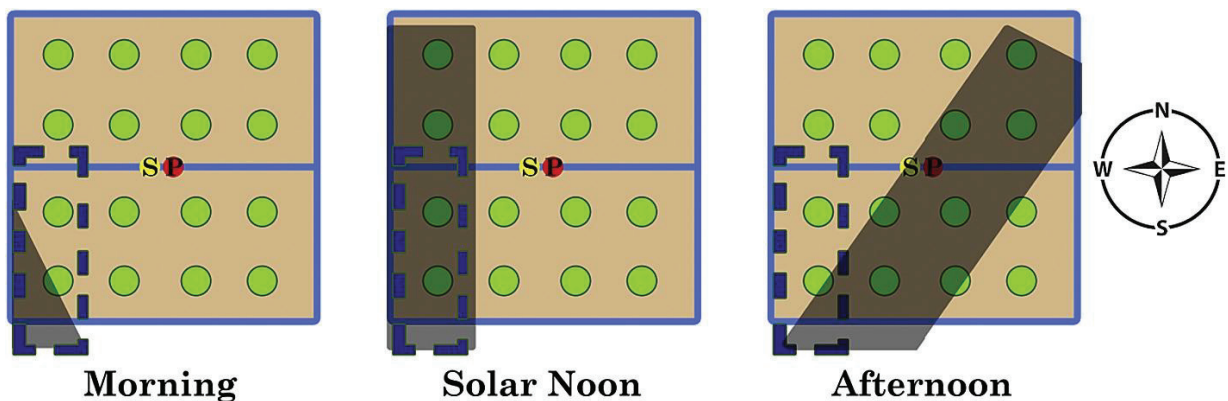
Σχήμα 5.2: Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας και PAR[1]

Σύμφωνα με τις παρακολουθούμενες μετρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας και στα δύο θερμοκήπια, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση προκάλεσε κατά μέσο όρο μείωση κατά 7,2% της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR).

Συγκρίνοντας τα δύο θερμοκήπια όσον αφορά την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, οι τιμές που παρουσιάζονται επιβεβαιώνουν ότι το θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά πάνελ λειτουργεί σε χαμηλότερο επίπεδο από το θερμοκήπιο αναφοράς, λόγω της σκίασης από φωτοβολταϊκά πάνελ. Μια παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τα ληφθέντα αποτελέσματα για τις μετρήσεις PAR. Στο σχήμα 5 δίδονται τα αποτελέσματα της ληφθείσας ενέργειας για τα αντίστοιχα συστήματα και για τη συνολική πειραματική περίοδο. Η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στα θερμοκήπια παρουσιάζει σχεδόν την ίδια συμπεριφορά με δεδομένα για την PAR. Παρατηρούμε και πάλι ότι οι μετρήσεις PAR και Sol είναι χαμηλότερες λόγω της σκίασης PV.

Η ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό οριζόντιο πυρανόμετρο (Sol\_Out) για τις 85 ημέρες του πειράματος είναι συνολικά  $349,62\text{kWhm}^{-2}$ . Οι τιμές για την ηλιακή ενέργεια του πυρανομέτρου στο θερμοκήπιο αναφοράς (Sol\_glass) και στο θερμοκήπιο με φωτοβολταϊκά πλαίσια (Sol\_glassPV) είναι  $238,04\text{kWhm}^{-2}$  και  $213,73\text{kWhm}^{-2}$  αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι προφανώς χαμηλότερες από την τιμή του Sol\_Out, λόγω της ανάκλασης και απορρόφησης από το γυάλινο κάλυμμα θερμοκηπίων, όπως παρατηρήθηκε παραπάνω. Η PAR για το θερμοκήπιο αναφοράς (Par\_glass) υπολογίστηκε σε  $102,45\text{kWhm}^{-2}$  και για το φωτοβολταϊκό θερμοκήπιο (Par\_glassPV)  $96,45\text{kWhm}^{-2}$ . Η συνολική ακτινοβολία που καταγράφηκε για την οροφή του θερμοκηπίου κατά την ίδια κλίση με τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ (Sol\_PV) ήταν  $416,57\text{kWhm}^{-2}$  και η συνολική λαμβάνουσα ηλεκτρική ενέργεια των δύο φωτοβολταϊκών πάνελ (PV\_output) ήταν  $40,67\text{kWh}$  (ή  $50,83\text{kWhm}^{-2}$ ). Η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στην φωτοβολταϊκή επιφάνεια είναι υψηλότερη από αυτή που μετράται από το εξωτερικό τοποθετημένο οριζόντιο πυρανόμετρο (Sol\_Out) εξαιτίας της κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ και την περίοδο του πειράματος. Με βάση τα συνολικά καταγεγραμμένα δεδομένα για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πάνελ αλλά και την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση παράγει ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση περίπου 12%.

Η καταγραφείσα συνολική εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο με τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πρέπει να διορθωθεί επειδή δεν αντιστοιχεί στην πραγματική εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, λόγω της θέσης του αισθητήρα μέσα στο θερμοκήπιο. Υπήρχε ένας αισθητήρας στο κέντρο του θερμοκηπίου και όχι διάφοροι αισθητήρες διασκορπισμένα μέσα στο συνολικό χώρο του θερμοκηπίου. Έτσι, για παράδειγμα αν κατά τη διάρκεια του μεσημεριού υπάρχει μερική σκίαση του εσωτερικού χώρου, ο αισθητήρας στέλνει σήματα χωρίς σκίαση. Το ίδιο παρατηρείται και για τα αποτελέσματα της PAR, καθώς οι αισθητήρες PAR τοποθετούνται επίσης στο κέντρο του θερμοκηπίου, παρόμοια με τους αισθητήρες του πυρανομέτρου. Στο Σχήμα 5.3 αποτυπώνεται σαφέστερα η αιτία που τα συλλεχθέντα δεδομένα θα πρέπει να διορθωθούν.



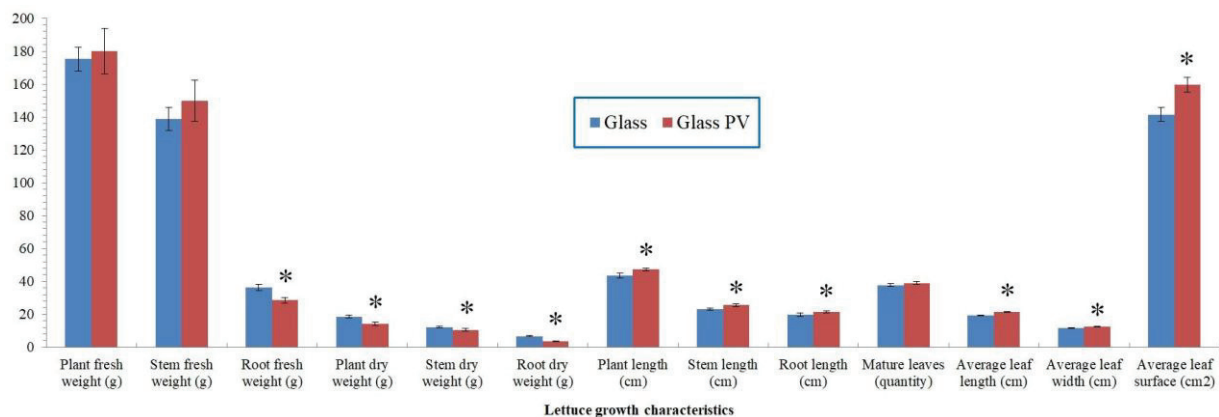
Σχήμα 5.3: Μετακίνηση της σκίασης και επίδραση στους αισθητήρες ακτινοβολίας[1]

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η εικόνα σκίασης του εσωτερικού χώρου για το θερμοκήπιο με φωτοβολταϊκά πάνελ, στο ημερήσιο χρονοδιάγραμμα, στις 24 Μαρτίου. Ο αισθητήρας για το Sol\_glassPV δίνει μεγαλύτερες τιμές εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το σύνολο που εισέρχεται στο θερμοκήπιο κατά το μεσημέρι. Αντίθετα, ο αισθητήρας δίνει πολύ χαμηλότερη τιμή από την πραγματική κατά τη διάρκεια του απογεύματος. Εκτιμάται ότι κατά το ηλιακό μεσημέρι, η πραγματική ακτινοβολία που έχει λάβει συνολικά το θερμοκήπιο είναι κοντά στο 75% της τιμής που υπολογίζεται από τα δεδομένα που αποστέλλονται στο datalogger από τον αισθητήρα.

Το πρόβλημα αυτό παρατηρείται κυρίως από το πρωί έως και 2 ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι. Αυτό σημαίνει ότι η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία και το PAR του φωτοβολταϊκού θερμοκηπίου είναι στην πραγματικότητα χαμηλότερα από το θερμοκήπιο αναφοράς σε περίπου 15% - 20% και όχι στο επίπεδο μέτρησης 10%. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το φαινόμενο σφάλματος του υπολογισμού της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο με φωτοβολταϊκά πάνελ, στα επόμενα πειράματα θα πρέπει να διορθωθεί.

## 5.2 Αποτελέσματα της καλλιέργειας

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δεικτών ανάπτυξης των φυτών. Τα αποτελέσματα για την ποσότητα των ώριμων φύλλων, το νωπό και ξηρό βάρος, το πλήρες μήκος και το μήκος των φύλλων και η επιφάνειά τους, δίνουν διαφορετικό ποσοστό ανάπτυξης μεταξύ των φυτών μαρουλιού του θερμοκηπίου αναφοράς και του θερμοκηπίου με τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Παρατηρείται ότι τα φυτά εντός του θερμοκηπίου με τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν ελαφρώς υψηλότερη ανάπτυξη σε σύγκριση με το θερμοκήπιο αναφοράς χωρίς φωτοβολταϊκή στέγη.



Σχήμα 5.4: Συγκριτικοί δείκτες ανάπτυξης για τα δύο πειραματικά θερμοκήπια. Οι γραμμικές μπάρες στο ανώτερο σημείο των γραφημάτων υποδηλώνει το σφάλμα που εμπεριέχει η κάθε μέτρηση[2]

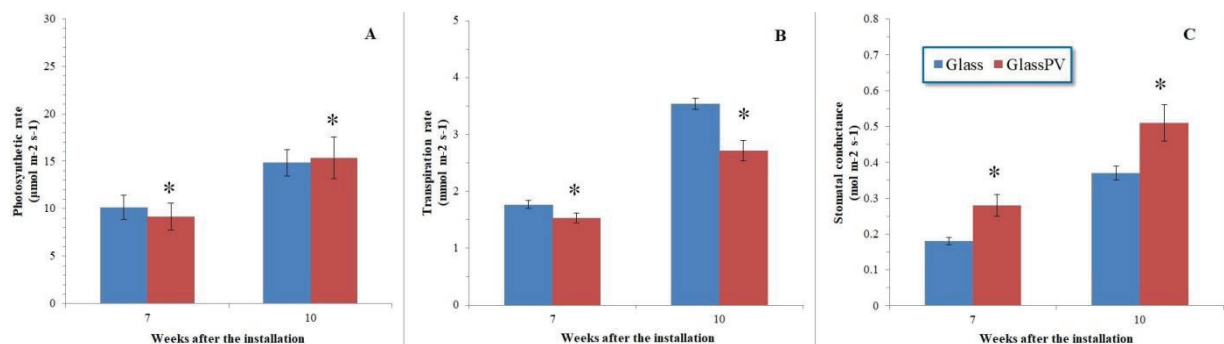
Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η περίοδος ανάπτυξης των φυτών εντός των θερμοκηπίου μονάδων ήταν ελαφρώς θερμότερη σε σχέση με τις συνήθεις συνθήκες για αυτούς τους μήνες (Φεβρουάριος, Μάρτιος, Απρίλιος) και έτσι η φωτοβολταϊκή σκίαση παρείχε ένα ψυχρότερο περιβάλλον, το οποίο οδήγησε σε λιγότερο έντονες συνθήκες για την ανάπτυξη του φυτού. Επιπλέον, η χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά πάνελ «έσπρωξε» τα φυτά για να αυξήσουν το ύψος τους και να αφήσουν επιφάνειες, προκειμένου να αποκτήσουν περισσότερο φως για τη φωτοσύνθεση.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4, τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των μαρουλιών στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά φαίνεται να επηρεάζονται ελαφρώς σε σύγκριση με του θερμοκηπίου αναφοράς. Ειδικότερα, το μήκος των φυτών, των στελεχών και των ριζών και το μέσο μήκος, πλάτος και επιφάνεια φύλλων αυξάνονται κατά 7% -13%. Από την άλλη πλευρά, το ξηρό βάρος των φυτών και των στελεχών και το βάρος των νωπών ριζών μειώνονται κατά 14% -25% και μόνο το ξηρό βάρος των ριζών μειώθηκε έντονα (46%). Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά που είναι πιο σημαντικά για την εμπορική χρήση της καλλιέργειας (νωπό βάρος φυτών και στελεχών και ο αριθμός των ώριμων φύλλων) δεν επηρεάζονται από το θερμοκήπιο με τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Παρόμοια αποτελέσματα έχουν επίσης ληφθεί για την καλλιέργεια μαρουλιού κάτω από διάταξη φωτοβολταϊκών πλαισίων [32,33].

### Φυσιολογικά χαρακτηριστικά μέσω της Ανταλλαγής Αερίων στο Φύλλο

Ο φωτοσυνθετικός ρυθμός δεν επηρεάστηκε στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά σε σύγκριση με το θερμοκήπιο αναφοράς (σχήμα 5.5A) ενώ μειώθηκε ο ρυθμός διαπνοής (σχήμα 5.5B) και αυξήθηκε η στοματική αγωγιμότητα (σχήμα 5.5C). Οι αντίστοιχες μειώσεις ρυθμού της διαπνοής ήταν 14% και 23% ενώ οι αυξήσεις της στοματικής αγωγιμότητας ήταν 56% και 38%.



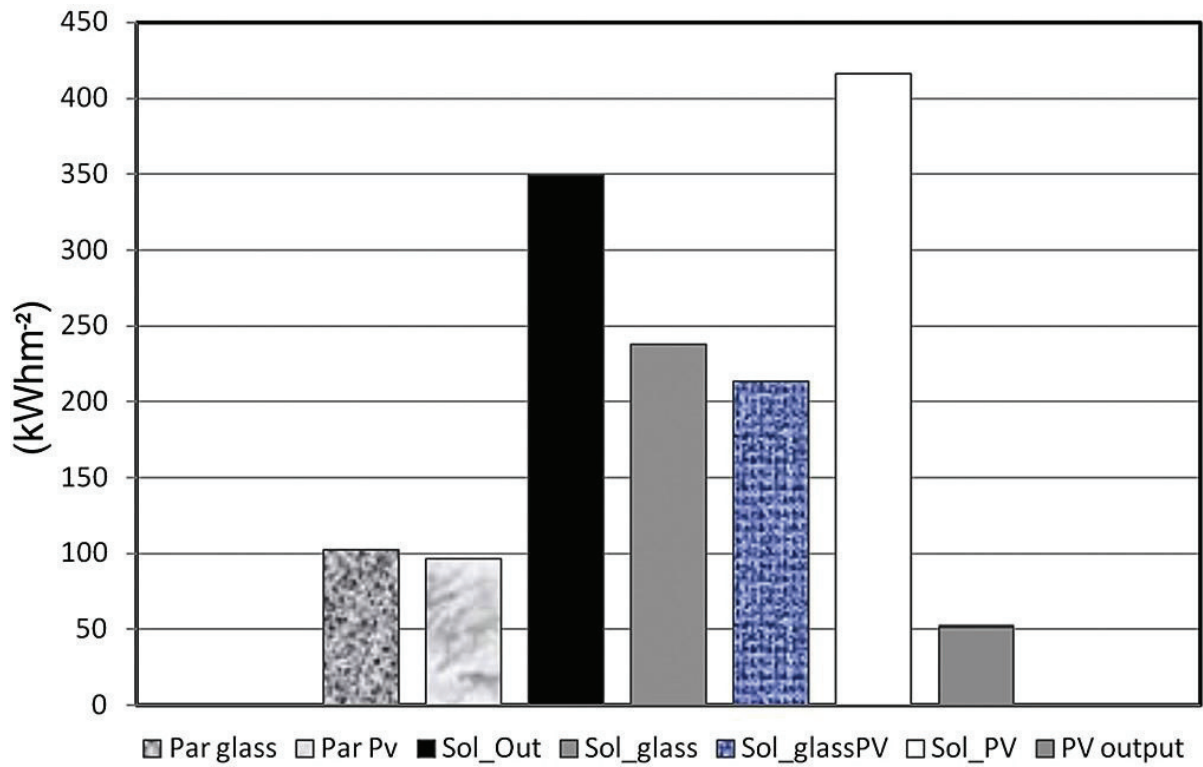
Σχήμα 5.5: Μετρήσεις Ανταλλαγής Αερίων στο Φύλλο. (A) φωτοσυνθετικός ρυθμός, (B) ρυθμός διαπνοής, (Γ) στοματική αγωγιμότητα. Η γραμμική μπάρα στο ανώτερο σημείο των γραφημάτων υποδηλώνει το σφάλμα που εμπεριέχει η κάθε μέτρηση[2]

### 5.3 Αποτέλεσμα ενέργειας

Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ( $2 \times 0,4 \text{m}^2 = 0,8 \text{m}^2$ ) στην οροφή του θερμοκηπίου για λειτουργία 85 ημερών προβλέπει παραγωγή 40,7kWh συνολικά ή  $50,9 \text{kWhm}^{-2}$ , με μέση τιμή 0,47kWh (ή  $0,60 \text{kWhm}^{-2}$ ) ανά ημέρα. Σε θερμοκήπια με χαμηλή ετήσια κατανάλωση ενέργειας (π.χ. κοντά σε  $100 \text{kWhm}^{-2}$ ) η ενεργειακή ζήτηση είναι δυνατό να φτάσει την αναλογία θερμότητας προς ηλεκτρική ενέργεια 75% (για θερμότητα) και 25% (για ηλεκτρική ενέργεια). Η προτεινόμενη μέθοδος τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του θερμοκηπίου με αναλογία σκίασης έως 20% μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική στην καλλιέργεια (στη μελέτη μας για το μαρούλι) και επιπλέον είναι αποτελεσματική στην ενεργειακή συμβολή στην ηλεκτρική ενέργεια και τη θερμότητα.

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι θα μπορούσαν ενδεχομένως να ληφθούν διαφορετικά φυτικά αποτελέσματα για άλλες καλλιέργειες. Λαμβάνοντας υπόψη το  $50,9 \text{kWhm}^{-2}$  που λαμβάνεται από τη χρησιμοποιούμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στη μονάδα μικρού μεγέθους θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των τριών μηνών (Φεβρουάριος, Μάρτιος,

Απρίλιος), μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερο από τα  $100\text{kWhm}^{-2}$  καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 5.6: Συνολικά ποσά ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, PAR και παραγόμενης ηλεκτρικής ανά επιφάνεια  $1\text{m}^2[1]$

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες των θερμοκηπίων στη θέρμανση, τον δυναμικό εξαερισμό, τον τεχνητό φωτισμό και άλλες ενεργειακές απαιτήσεις. Δύο μονάδες θερμοκηπίου ελέγχθηκαν, το ένα με φωτοβολταϊκή οροφή και το δεύτερο χωρίς (θερμοκήπιο αναφοράς). Χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ τύπου pc-Si, καλύπτοντας ένα μικρό μέρος της επιφάνειας του θερμοκηπίου. Για τη διαδικασία δοκιμής, χρησιμοποιήθηκαν φυτά μαρουλιού για τον προσδιορισμό του αποτελέσματος αύξησης λόγω σκίασης PV. Διαπιστώθηκε ότι το φωτοβολταϊκό θερμοκήπιο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τους μελετώμενους δείκτες ανάπτυξης φυτών. Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για μια χαμηλή αναλογία κάλυψης της οροφής θερμοκηπίου από φωτοβολταϊκά, από 20%, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική ενεργειακή συμβολή στη ζήτηση του θερμοκηπίου χωρίς σημαντική επίδραση στη μείωση της φυτικής ανάπτυξης.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή οροφή θερμοκηπίου μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος της ζήτησης ενέργειας του θερμοκηπίου ή ακόμη και τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ένα θερμοκήπιο χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαϊσίων στην οροφή του θερμοκηπίου μελετήθηκε θεωρητικά σχετικά με τους τρόπους σταθερής και ηλιακής παρακολούθησης. Το φωτοβολταϊκό σύστημα του άξονα περιστροφής που προσανατολίζεται προς βορρά-νότο δίνει την υψηλότερη απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθεί το σύστημα με άξονα προσανατολισμού ανατολής-δύσης και τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ. Αν και αυτά τα αποτελέσματα έχουν εξαχθεί από τις κλιματολογικές συνθήκες στη νοτιοδυτική Ελλάδα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω εκτίμηση σε άλλες τοποθεσίες με ελαφρώς διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2, η θερμοκηπιακή καλλιέργεια μαρουλιού επηρεάζεται ελαφρώς υπό φωτοβολταϊκή σκίαση. Η μόνη μεταβλητή ανάπτυξης που επηρεάζεται έντονα ήταν το ξηρό βάρος της ρίζας με μείωση κατά 46%. Συγκεκριμένα, το ξηρό βάρος μειώθηκε (κατά 25%, 14% και 46% για ολόκληρο το φυτό, στελέχους και ρίζα αντίστοιχα) όπως έχει ήδη δειχθεί για τα μαρούλια [59,60] και άλλα σκιασμένα φυτά.[61,62,63] Επιπλέον, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά ανάπτυξης (μήκος φυτού, στελέχους και ρίζας και μήκος, πλάτος και επιφάνεια φύλλων) αυξήθηκαν ελαφρώς (έως και 13%) λόγω σκίασης που επαληθεύεται από προηγούμενες μελέτες για τα μαρούλια [59,60] και άλλα φυτά.[62,64,65]

Από την άλλη πλευρά, είναι πολύ σημαντικό ότι τα κυριότερα χαρακτηριστικά ανάπτυξης εμπορικού ενδιαφέροντος(νωπό βάρος φυτών και στελεχών και ο αριθμός των ώριμων φύλλων) δεν επηρεάστηκαν στο θερμοκήπιο με τη φωτοβολταϊκή στέγη.

Βλέποντας ότι η φωτοσύνθεση επηρεάζει αποφασιστικά τη φυσιολογία των φυτών και συνεπώς την παραγωγικότητα των καλλιεργειών, τα αποτελέσματα της ανάπτυξης αντιστοιχούν με τον ρυθμό φωτοσύνθεσης του μαρουλιού που ήταν μάλλον ανεπηρέαστος κάτω από την σκίαση που προκλήθηκε από τα φωτοβολταϊκά σε σύγκριση με το θερμοκήπιο αναφοράς (σχήμα 5.5A). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την έρευνα είναι σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες που αναφέρουν ότι το μαρούλι μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα ηλιακής ακτινοβολίας, δεδομένου ότι δεν απαιτεί υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για να επιτύχει τη μέγιστη φωτοσύνθεση. Ως εκ τούτου, τα ευρήματά μας επιβεβαιώνουν την άποψη που υποστηρίχθηκε προηγουμένως ότι το μαρούλι μπορεί να φυτευτεί σε θερμοκήπια που παρέχουν υψηλή απόδοση, ειδικά κάτω από φύτευση άνοιξη και μέτριες συνθήκες σκίασης [59,60].

Εξ όσων γνωρίζουμε, δεν υπάρχει επαρκής βιβλιογραφία για την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών που καλλιεργούνται σε θερμοκήπια που καλύπτονται από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αν και τα εγγενή χαρακτηριστικά διαφορετικών ειδών ή ποικιλιών του ίδιου είδους μπορεί να διαδραματίσουν ρόλο στην ανταπόκριση της ανάπτυξης των φυτών κατά της σκίασης [59], η επίδραση σκίασης που προκαλείται από τα φωτοβολταϊκά στα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των φυτών και στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών φαίνεται να εξαρτάται από πολλούς άλλους παράγοντες.

Έτσι, έχει αναφερθεί ότι το ποσοστό της καλυμμένης με φωτοβολταϊκά οροφής θερμοκηπίου μπορεί να είναι καθοριστικό είτε για την πιθανή μείωση της απόδοσης [63], είτε ακόμη και για την αύξηση που παρατηρήθηκε σε μια ποικιλία μαρουλιού. [59] Ο σχηματισμός των συστοιχιών φωτοβολταϊκά φαίνεται να είναι επίσης σημαντικός, δεδομένου ότι η σκίαση της φωτοβολταϊκής γραμμής με ευθεία γραμμή προκαλεί σημαντικά χαμηλότερη παραγωγικότητα της καλλιέργειας ενώ η εγκατάσταση τύπου σκακίερας ελαττώνει το φαινόμενο. [66] Εκτός αυτού, για ορισμένες καλλιέργειες, η κατάλληλη καλλιεργητική περίοδος μπορεί να μειώσει την επίδραση σκίασης που προκαλείται από φωτοβολταϊκά. [59]

Τέλος, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι για ορισμένα φυτά η σκίαση που προκαλείται από φωτοβολταϊκά μπορεί να επηρεάσει τα αναπτυξιακά τους χαρακτηριστικά (μερικά από αυτά με εμπορικό ενδιαφέρον), όπως ανάπτυξη φύλλων, μέγεθος φρούτων ή χρώμα, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση τους. [67,68] Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι το φαινόμενο σκίασης φωτοβολταϊκών μπορεί να ευνοήσει την ανάπτυξη μυκητιακών νόσων [67] ένα φαινόμενο που μπορεί να σχετίζεται με πιθανές αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών του θερμοκηπίου που προκαλούνται από τη σκίαση, όπως η μείωση του τη θερμοκρασία ή την αύξηση της σχετικής υγρασίας, όπως παρατηρήσαμε κατά τη διάρκεια του πειράματός μας. (πίνακας 5.1).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματά μας, ο παρόμοιος συντελεστής φωτοσύνθεσης για την καλλιέργεια μαρουλιού στο θερμοκήπιο αναφοράς και στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά (σχήμα 5.5A) αντιστοιχεί με το προφίλ ανάπτυξης και παραγωγικότητας του φυτού και στα δύο θερμοκήπια (σχήμα 5.4).

Επίσης, είναι αρκετά ενδιαφέρον ότι ενώ ο φωτοσυνθετικός ρυθμός δεν επηρεάζεται στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά (σχήμα 5.5A), ο ρυθμός διαπνοής μειώνεται (σχήμα 5.5B) και αντίθετα, η στοματική αγωγιμότητα είναι αυξημένη (σχήμα 5.5C). Μία αρνητική σχέση μεταξύ της στοματικής αγωγιμότητας και της φωτοσύνθεσης [69] και της στοματικής αγωγιμότητας και της διαπνοής [70] έχουν ήδη αναφερθεί.

Είναι γνωστό ότι τα στόματα των φύλλων παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανταλλαγή αερίων των φύλλων, ελέγχοντας τόσο τις απώλειες νερού όσο και την πρόσληψη CO<sub>2</sub>. Δεδομένου ότι το άνοιγμα τους ελέγχεται από την πίεση των καταφρακτικών κυττάρων, τα στόματα έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται γρήγορα σε συνεχώς μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα. [71,72,73] Υπολογίζοντας πως η απώλεια νερού μέσω της διαπνοής των φύλλων εξαρτάται από τους ίδιους περιβαλλοντικούς παράγοντες. [71,73], υποθέτουμε ότι η αρνητική συσχέτιση μεταξύ της στοματικής αγωγιμότητας και της διαπνοής και φωτοσύνθεσης υπό συνθήκες φωτοβολταϊκών θερμοκηπίων (σχήμα 5.5) συνδέεται με τις ειδικές περιβαλλοντικές συνθήκες του θερμοκηπίου. Το τελευταίο είναι κάτι που πρέπει να προσεχθεί για διαφορετικών τύπων καλλιέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα της ανάπτυξης φυτών, η επίδραση της φωτοβολταϊκής σκίασης στην καλλιέργεια μαρούλι ήταν μικρή. Η παρούσα εργασία βασίζεται στη δοκιμή των θερμοκηπίων για μια χαρακτηριστική περίοδο (Φεβρουάριος, Μάρτιος, Απρίλιος), η οποία περιλαμβάνει ημέρες με συνθήκες χειμώνα και ημέρες με συνθήκες άνοιξης, όπου η επίδραση σκίασης στην καλλιέργεια φυτών είναι σημαντική για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Οι διαφορές στους δείκτες ανάπτυξης δεν είναι σημαντικές και η δοκιμή του συστήματος με καλλιέργεια για ολόκληρο το έτος θα παράσχει ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την επίδραση φωτοσκίασμού στην καλλιέργεια φυτών.



## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 G. Trypanagnostopoulos, A. Kavga, M. Souliotis, Y. Tripanagnostopoulos, Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics, *Renewable Energy* 111 (2017) 724-731.
- 2 A. Kavga, G. Trypanagnostopoulos, G. Zervoudakis, Y. Tripanagnostopoulos, Growth and Physiological Characteristics of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Rocket (*Eruca sativa* Mill.) Plants Cultivated under Photovoltaic Panels, *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 46 (2018) 206-212.
- 3 C. Kittas, A. Baille, P. Giaglaras, Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses, *J. Agric. Eng. Res.* 73 (1999) 341-351.
- 4 I.V. Pollet, J.G. Pieters, Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials, part 3: results for glass plates and plastic films, *J. Agric. Eng. Res.* 77 (2000) 419-429.
- 5 T. Bartzanas, T. Boulard, C. Kittas, Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse, *Biosys. Eng.* 88 (4) (2004) 479-490.
- 6 A. Kavga, I. Konstas, Th. Panidis, Assessment of infrared heating benefits in a production greenhouse, *Appl. Eng. Agric.* 31 (1) (2014) 143-151.
- 7 G. Papadakis, D. Briassoulis, G. Mugnozza Scarascia, G. Vox, P. Feuilleley, J.A. Stoffers, Radiometric and thermal properties of and testing methods for, greenhouse covering materials, *J. Agric. Eng. Res.* 77 (2000) 7-38.
- 8 G. Papadakis, D. Manolakos, S. Kyritsis, Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale model, *J. Agric. Eng. Res.* 71 (1998) 331-338.
- 9 C. Kittas, N. Katsoulas, A. Baille, Influence of greenhouse ventilation regime on the microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions, *J. Agric. Eng. Res.* 79 (2001) 349-360.
- 10 A. Kavga, N. Angastiniotis, G. Trypanagnostopoulos, S. Pantelakis, Regulated transparent insulation for greenhouse covers through the use of tailor-made bimodal nanoparticle formations, *Acta Horti* 1170 (2017) 321-328
- 11 X. Guo, X. Hao, S. Khosia, K.G.S. Kumar, R. Cao, N. Bennett, Effect of LED interlighting combined with overhead HPS light on fruit yield and quality of year-round sweet pepper in commercial greenhouse, in: *Acta Horticulturae ISHS VIII International Symposium on Light in Horticulture*, 2016, <http://dx.doi.org/10.17660/1134.10>.
- 12 A. Baille, C. Kittas, N. Katsoulas, Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning, *Agric. For. Meteorol.* 107 (2001) 293-306.
- 13 C. Kittas, B. Draoi, T. Boulard, Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening, *Agric. For. Meteorol.* 77 (1995) 95-111.
- 14 A. Kylili, P.A. Fokaides, Investigation of building integrated photovoltaics potential in achieving the zero energy building target, *Indoor Built Environ.* 23 (2014) 92-106.
- 15 Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, J.K. Tonui, A. Kavga, Irradiation aspects for energy balance in greenhouses, *Acta Horti*. 691 (2005) 733-740.
- 16 Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, J.K. Tonui, A. Kavga, Greenhouse energy supply by solar/wind systems, in: *Proc (CD) Int. Conf Greensys2004*, Leuven, 12-16 Sep 2004.
- 17 M.C. Rocamora, Y. Tripanagnostopoulos, Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses, *Acta Horti*. 719 (2006) 239-246.

- 18 P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, B.A.J. van Tuijl, H.J.J. Janssen, J. Campen, G.P.A. Bot, Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses, *Sol. Energy* 85 (2011) 432-442.
- 19 S. Nayak, G.N. Tiwari, Energy and Exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse, *Energy Build.* 40 (2008) 201-2021.
- 20 A. Yano, A. Furue, M. Kadowaki, T. Tanaka, E. Hiraki, M. Miyamoto, S. Ishizu, F.Noda, Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse, *Biosyst.Eng.* 103 (2009) 228-238.
- 21 H. Fatnasi, Ch Poncet, M.M. Bazzano, R. Brun, N. Bertin, A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate, *Sol. Energy* 120 (2015) 575-584.
- 22 A. Marucci, A. Cappuccini, Dynamic photovoltaic greenhouse: energy efficiency in clear sky conditions, *Appl. Energy* 170 (2016) 362-376.
- 23 Chr. Lamnatou, D. Chemisana, Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: fresnel lenses, NIR- and UV-blocking materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18 (2013) 271-287.
- 24 Reda Hassanien Emam Hassanien, Ming Li, Wei Dong Lin, Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54 (2016) 989-1001.
- 25 M. Cossu, L. Murgia, L. Ledda, P.A. Deligios, A. Sirigu, F. Chessa, A. Pazzona, Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity, *Appl. Energy* 133 (2014) 89-100.
- 26 A. Marucci, D. Monarca, M. Cecchini, A. Colantoni, A. Manzo, A. Cappuccini, The semitransparent photovoltaic films for mediterranean greenhouse: a new sustainable technology, *Math. Probl. Eng.* 2012 (2012). Article ID 451934.
- 27 J.M. Emmott Ch, J.A. Roehr, m. Campoy-Quiles, Th. Kirchartz, A. Urbina, N.J. Ekins-ankes, J. Nelson, Organic photovoltaic greenhouses: a unique application for semi-transparent PV, *Energy Environ. Sci.* 8 (2013) 1317-1328.
- 28 U.-S. Raúl, Angel Jesús Callejo n Ferre, Jose Perez Alonso, Angel Carreno Ortega, Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted flexible solar panels, *Sci. Agric.* 69 (2012) 233-239.
- 29 Y. Tripanagnostopoulos, N. Katsoulas, C. Kittas, Potential energy cost and footprint reduction in Mediterranean greenhouses by means of renewable energy use, in: *OGH 2016 Int. Symposium, Ismir, Turkey, 11-14 April 2016.*
- 30 G. Trypanagnostopoulos, I. Karakostas, A. Koulopoulos, Y. Tripanagnostopoulos, A. Kavga, Implementation of photovoltaics on greenhouses and shading effect to plant growth, in: *International Conference on Agricultural Engineering CIGR - AgEng, 2016. Automation, Environment and Food Safety, Aarhus, Denmark 26-29 June.*
- 31 Y. Tripanagnostopoulos, Th. Nousia, M. Souliotis, P. Yianoulis, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Sol. Energy* 72 (No 3) (2002) 217-234.
- 32 H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, C. Dupraz, Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels, *Eur. J. Agron.* 44 (2013) 54-66.
- 33 A. Tani, S. Shina, K. Nakashima, M. Hayashi, Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, *J. Agric. Meteorol.* 70 (2014) 139-149.
- 34 Σ. Κυρίτσης, Γ. Ν. Μαυρογιαννόπουλος, *Θερμοκήπια*, (1992) Αθήνα, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων.
- 35 Θ. Σ. Ευσταθιάδη, *Θερμοκήπια, Στοιχεία κατασκευής, λειτουργίας και καλλιέργειας*, 1<sup>η</sup> έκδοση, (1987) Αθήνα, Εκδοτική Αγροτεχνική.
- 36 Μ. Ζούμη, *Βιολογική καλλιέργεια μαρουλιού στην Κρήτη*, (2009) Ηράκλειο.

- 37 Μ.-Ε. Χριστουλάκη, Αξιολόγηση υποστρωμάτων με μίγματα ανόργανων υλικών και πριονίδι σε υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού, (2010) Ηράκλειο.
- 38 Χ. Ολύμπιου, Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια, (2001) Αθήνα.
- 39 Hugh D. Young, Πανεπιστημιακή Φυσική, Τόμος Β' (1994), Εκδόσεις Παπαζήση.
- 40 Ε. Τζανακάκη, Ε. Μπάτρα, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε οικιστικά σύνολα, Centre for research and technology, Hellas (CERTH), (2002) σελ.38 Αθήνα.
- 41 Serway, Physics for Scientists and Engineers, Τόμος IV, (1990), Απόδοση στα ελληνικά: Λεωνίδα Κ. Ρεσβάνη.
- 42 [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- 43 Κ. Καγκαράκης, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, (1992), σελ.35-40/78-94, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- 44 Ιστοσελίδα Επιστημονικού περιοδικού "Energy Point" ([www.energypoint.gr](http://www.energypoint.gr)).
- 45 Υ. Tripanagnostopoulos, Aspects and expectations for holistic buildings in next decade, Int. Conf. "Energy Forum on Solar Building Skins". Bressanone, Italy, 6-7 Dec. (2012).
- 46 R.J. Van Overstraeten, R.P.Mertens, Physics Technology and Use of Photovoltaics, (1986) Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston.
- 47 Α. Νεοκλέους, Σ. Π. Κωνσταντινίδη, Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα, σελ.87-100 Εκδόσεις «ΙΩΝ».
- 48 Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, (2007), σελ.86-92, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- 49 Β. Περράκη, Νέες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων, (2010) Πάτρα, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- 50 <http://www.molepv.com>
- 51 <https://cdn.blog.ucsusa.org>
- 52 <https://hermokipia-sarantinos.gr/epaggelmatika-thermokipia>
- 53 photo credit: Yann Athus-Bertrand
- 54 <https://www.greenhousepeople.co.uk>
- 55 <https://www.presspublica.gr>
- 56 <https://www.solarreviews.com>
- 57 <https://es.zenit.org>
- 58 Προσωπικές φωτογραφίες
- 59 H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, C. Dupraz, Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels, European Journal of Agronomy 44 (2013) 54-66.
- 60 A. Tani, S. Shiina, K. Nakashima, M. Hayashi, Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, Journal of Agricultural Meteorology, 70 (2014) 139-149.
- 61 M. S. Mielke, B. Schaffer, Photosynthetic and growth responses of *Eugenia uniflora* L. seedlings to soil flooding and light intensity, Environmental and Experimental Botany, 68 (2010) 113-121.
- 62 G. Zervoudakis, G. Salahas, G. Kaspiris, E. Konstantopoulou, Influence of light intensity on growth and physiological characteristics of common sage (*Salvia officinalis* L.), Braz. arch. biol. technol. 55 (2012) 89-95.

- 63 D. Buttarò, M. Renna, C. Gerardi, F. Blando, P. Santamaria, F. Serio, Soilless production of wild rocket as affected by greenhouse coverage with photovoltaic modules, *Acta Scientiarum Polonorum* 15 (2016) 129-142.
- 64 X.Y. Yang, X.F. Ye, G.S. Liu, H.Q. Wei, Y. Wang, Effects of light intensity on morphological and physiological characteristics of tobacco seedlings, *Chinese Journal of Applied Ecology* 18 (2007) 2642-2645.
- 65 Y. Wang, Q. Guo, M. Jin, Effects of light intensity on growth and photosynthetic characteristics of *Chrysanthemum morifolium*, *Zhongguo Zhongyao Zazhi* 34 (2009) 1633-1635.
- 66 M. Kadowaki, A. Yano, F. Ishizu, T. Tanaka, S. Noda, Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth, *Biosystems Engineering* 111 (2012) 290-297.
- 67 G. Minuto, C. Bruzzone, F. Tinivella, G. Delfino, A. Minuto, Photovoltaics on greenhouse roofs to produce more energy, *Informatore Agrario(Suppl.)* 65 (2009) 16-19.
- 68 R. Ureña-Sánchez, A.J. Callejón-Ferre, J. Pérez-Alonso, A. Carreño-Ortega, Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted flexible solar panels, *Scientia Agricola* 69 (2012) 233-239.
- 69 S.M. Via, J.C. Zinnert, A.D. Butler, D.R. Young, Comparative physiological responses of *Morella cerifera* to RDX, TNT, and composition B contaminated soils, *Environmental and Experimental Botany* 99 (2014) 67-74.
- 70 J.A. Bunce, Does transpiration control stomatal responses to water vapour pressure deficit, *Plant, Cell & Environment* 19 (1996) 131-135.
- 71 M.M. Chaves, J.P. Maroco, J.S. Pereira, Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant, *Functional Plant Biology* 30 (2003) 239-264.
- 72 I. Baroli, G.D. Price, R. Badger, S. vonCaemmerer, The contribution of photosynthesis to the red light response of stomatal conductance, *Plant Physiology* 146 (2008) 737-747.
- 73 J. Padhi, R.K. Misra, J.O. Payero, Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography, *Field Crops Research* 126 (2012) 45-55.