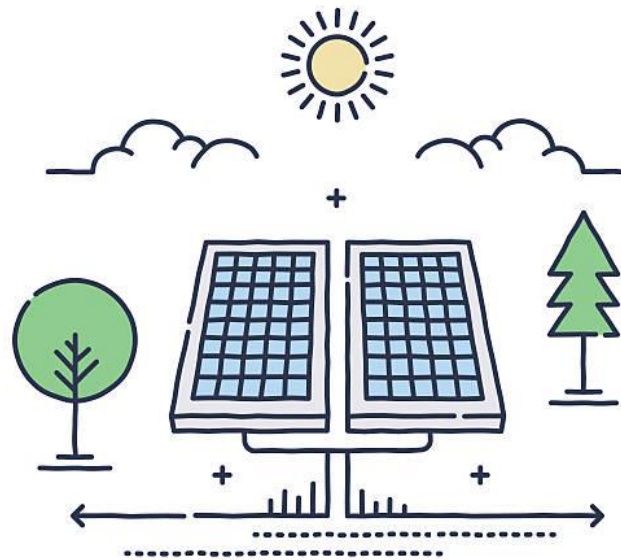




Διπλωματική Εργασία

Προοπτικές ανάπτυξης αγροβολταϊκών συστημάτων και ανάλυση των αλληλεπιδράσεών τους με το πλέγμα νερού-τροφής-ενέργειας



Κατερίνα Ρωξάνη

Επιβλέπων καθηγητής: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Νοέμβριος 2022

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	9
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	9
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Εδαφικές απαιτήσεις φωτοβολταϊκών πάρκων και ανταγωνιστικές χρήσεις γης.....	12
2.3 Αγροβολταϊκά.....	13
2.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αγροβολταϊκών.....	15
2.4.1 Ύψος.....	16
2.4.2 Τρόπος στήριξης.....	16
2.4.3 Πυκνότητα τοποθέτησης.....	18
2.4.4 Κλίση.....	19
2.4.5 Προσανατολισμός.....	21
2.4.6 Τύπος φωτοβολταϊκής μονάδας.....	22
2.5 Καλλιέργειες στα αγροβολταϊκά.....	25
2.6 Σύστημα αγροβολταϊκών σε σχέση με την βροχόπτωση και τις αρδευτικές ανάγκες της καλλιέργειας.....	30
2.7 Επίδραση του συστήματος αγροβολταϊκών στο μικροκλίμα.....	31
2.8 Αγροβολταϊκά στην Ελλάδα.....	32
3. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	34

3.1 Ηλιακή ακτινοβολία και ενεργειακό ισοζύγιο.....	35
3.1.1 Ηλιακή γεωμετρία.....	37
3.1.2 Ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμοσφαιράς.....	39
3.1.3 Ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος.....	39
3.1.4 Ακτινοβολία μακρών κυμάτων που εκπέμπεται από το έδαφος.....	41
3.2 Παραγωγή ενέργειας στα αγροβολταϊκά.....	42
3.3 Παραγωγή καλλιεργειών στα αγροβολταϊκά.....	43
3.4 Άρδευση των καλλιεργειών των αγροβολταϊκών.....	46
3.4.1 Τρόποι άρδευσης και υπολογισμός υδατικών αναγκών.....	46
3.4.2 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς.....	48
4. 4. Μελέτη περίπτωσης.....	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 Δεδομένα και περιοχή μελέτης.....	51
4.3 Υπολογισμός μείωσης ακτινοβολίας.....	52
4.4 Παραγωγή Ενέργειας.....	53
4.6 Υδατικές Ανάγκες του συστήματος αγροβολταϊκών.....	57
5. Αποτελέσματα.....	62
5.1 Μείωση της ακτινοβολίας.....	62
5.1.1 Σκίαση σε σχέση με το ύψος και την πυκνότητα των φωτοβολταϊκών.....	62
5.1.2 Μείωση ακτινοβολίας σε σχέση με την κλίση των φωτοβολταϊκών.....	64
5.1.3 Ομοιομορφία σκίασης.....	65
5.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	66
5.3 Απόδοση καλλιεργειών.....	67

5.4 Υδατικές ανάγκες.....	71
6. Συμπεράσματα και προοπτικές για περαιτέρω έρευνα.....	74
6.1 Συμπεράσματα.....	74
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής κύριο Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επίκουρο καθηγητή του ΕΜΠ για το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα που μου ανέθεσε καθώς και για την συνεργασία που είχαμε. Πέρα από τον σεβασμό στην προσπάθεια μου και την άμεση ανταπόκριση για οποιαδήποτε απορία κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, είναι ο άνθρωπος που με έκανε να αγαπήσω το αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ν. Μαμάση, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής για την πολύτιμη συμβολή του στην υπολογιστική διαδικασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τις φίλες μου για την υποστήριξη τους καθ'όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στη σχολή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους, η Ευρώπη έχει εντατικοποιήσει την μετάβαση στην "πράσινη" ενέργεια. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν μεγάλες εδαφικές απαιτήσεις ενώ παράλληλα κάθε χρόνο τα εδάφη που είναι διαθέσιμα για γεωργική εκμετάλλευση μειώνονται. Επομένως, σχεδιάζοντας την ανάπτυξη νέων μονάδων ΑΠΕ πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η διατήρηση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Τα αγροβολταϊκά, συνδυάζοντας την παραγωγή ενέργειας με την παραγωγή καλλιεργειών στην ίδια έκταση, αποτελούν μια πρόταση για την ομαλή ανάπτυξη της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά.

Στο σύστημα αγροβολταϊκών, τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται σε ύψος 4-5m με στόχο την αξιοποίηση του εδάφους για την ανάπτυξη καλλιεργειών. Η ηλιακή ακτινοβολία που είναι διαθέσιμη για τις καλλιέργειες μειώνεται, διότι μέρος αυτής χρησιμοποιείται από τα φωτοβολταϊκά. Το ποσοστό μείωσης που είναι αποδεκτό εξαρτάται από τις ανάγκες της κάθε καλλιέργειας. Μια τεχνική προσαρμογής των φυτών στην σκίαση που προκαλούν τα φωτοβολταϊκά είναι η αύξηση της επιφάνειας των φύλλων τους, δηλαδή η αύξηση της επιφάνειας που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον, χάρη στις νέες συνθήκες μικροκλίματος που προκαλεί η σκίαση, μειώνεται η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών και έτσι περιορίζονται και οι υδατικές τους ανάγκες.

Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος ανάλογα με την διαμόρφωση του συστήματος αγροβολταϊκών. Μελετώντας φωτοβολταϊκά σταθερής κλίσης καθοριστικός παράγοντας μείωσης της ακτινοβολίας είναι η πυκνότητα τοποθέτησης τους. Στην συνέχεια έγινε διερεύνηση της επίδρασης που είχε η μεταβολή της διαθέσιμης ακτινοβολίας σε καλλιέργειες χειμερινού σίτου, αραβόσιτου και μηδικής. Για πυκνότητα τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών που μεγιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας, την μικρότερη μείωση απόδοσης την είχε το χειμερινό σιτάρι, ενώ μειώνοντας την πυκνότητα τοποθέτησης την είχε ο αραβόσιτος.

ABSTRACT

Over the past decade, for environmental and economic reasons, Europe has intensified the transition to “green” energy. Renewable energy is the least land-efficient energy source, whilst the agricultural lands are being reduced year by year. Therefore, while planning renewable energy development, it should be taken under consideration the maintenance of the arable lands. Agrivoltaics, by combining food and energy production at the same land, can offer a progressive photovoltaic energy development.

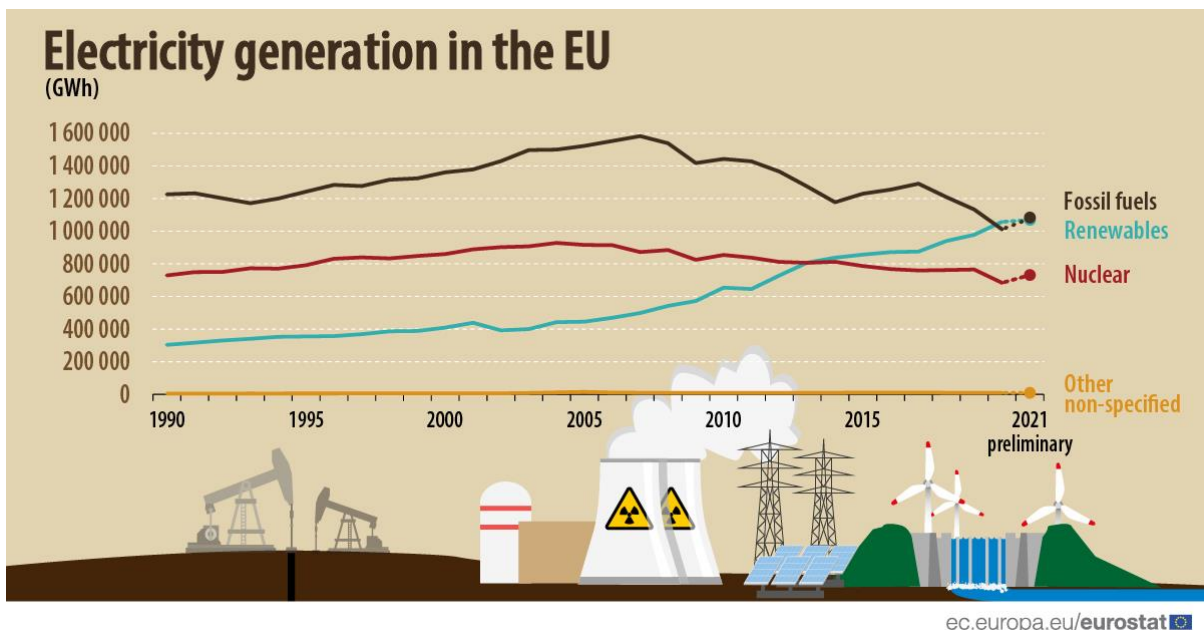
In agrivoltaic systems, photovoltaics are mounted on 4-5m stilts, aiming to utilize the area below for growing crops. The sun radiation that is available for plants is getting reduced, because part of it is being used by solar panels. The acceptable reduction rate is depending on each crop’s needs. An adapting technique that plants have to shading caused by photovoltaics, is to increase the surface area of their leaves, i.e. to increase the area that absorbs solar radiation. Moreover, agrivoltaics create new microclimate conditions that reduce the evapotranspiration.

In this work, the reduction of solar radiation reaching the ground was calculated depending on the configuration of the agrivoltaic system. For constant tilt angle solar panels, a decisive factor in radiation reduction is their placement density. Therefore, the effect of the photovoltaic shadow on crops was estimated for winter wheat, maize and alfalfa. For a dense photovoltaic placement, that is optimizing the energy production, the least affected crop was winter wheat while for reducing the density it was maize. Furthermore, the reduction in water needs due to the limited radiation reaching the crops was calculated.

1. Εισαγωγή

Οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με την αφύπνιση για τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν από την παραγωγή ενέργειας, καθιστούν τον σχεδιασμό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών μια πρόκληση. Η εξάρτηση της παραγωγής ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων, πέρα από το αρνητικό οικολογικό αποτύπωμα που αφήνει, ευθύνεται επίσης σε σημαντικό βαθμό για την ενεργειακή κρίση που διανύει η Ευρώπη.

Επομένως, η στροφή προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι αναπόφευκτη και αναγκαία. Η Ευρωπαϊκή Ένωση κάθε χρόνο αυξάνει το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό της μίγμα (Εικόνα 1.1). Βέβαια, η μετάβαση στην "πράσινη" ενέργεια πρέπει να γίνει με τον κατάλληλο σχεδιασμό και να αποφεύγεται η βεβιασμένη κατάληψη εδαφών για εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ.



Εικόνα 1.1 Πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση
(ec.europa.eu/eurostat)

Ταυτόχρονα, η καλλιεργήσιμη γη μειώνεται συνεχώς υπολογίζοντας ότι τα τελευταία 40 χρόνια η γη έχασε το ένα τρίτο των γεωργικών της εκτάσεων (Grantham Center, 2015)

Τα αγροβολταιικά συνδυάζοντας παραγωγή τροφής και ενέργειας στην ίδια έκταση, αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, δίνοντας λύση και στο πρόβλημα των ορυκτών καυσίμων και της περιορισμένης καλλιεργήσιμης γης.

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η κατανόηση της λειτουργίας των αγροβολταϊκών σε σχέση με τα διάφορα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών και τις ιδιαιτερότητες κάθε καλλιέργειας που επιλέγεται. Σύμφωνα με υπάρχουσες μελέτες, παρουσιάζεται η επίδραση που έχουν στις καλλιέργειες και το μικροκλίμα, οι διάφορες επιλογές διαμόρφωσης του συστήματος αγροβολταϊκών.

Πέραν της αποτύπωσης της διεθνούς εμπειρίας, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε μια παραμετρική ανάλυση σε ελληνικές συνθήκες, και ειδικότερα στην πεδιάδα της Άρτας. Αρχικά υπολογίστηκε πώς επηρεάζεται η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος σε σχέση με τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά των αγροβολταϊκών. Στην συνέχεια εκτιμήθηκε πόσο μειώνεται η παραγωγή ενέργειας για μείωση του αριθμού των φωτοβολταϊκών και τι επίδραση έχει η μειωμένη ακτινοβολία στην απόδοση των καλλιεργειών και. Επιλέχθηκαν να μελετηθούν τρεις καλλιέργειες με διαφορετική περίοδο ανάπτυξης:

- Χειμερινό σιτάρι με περίοδο ανάπτυξης Οκτώβριο-Μάιο
- Μηδική που είναι ετήσια καλλιέργεια
- Αραβόσιτος που έχει περίοδο ανάπτυξης Απρίλιο-Σεπτέμβριο

Τέλος υπολογίστηκε η μεταβολή της εξατμισοδιαπνοής των φυτών εξαιτίας της μείωσης της ακτινοβολίας. Αυτή η παράμετρος έχει σημασία, διότι η εξατμισοδιαπνοή ορίζει τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Στην συνέχεια παρουσιάζεται περιληπτικά το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου της εργασίας:

Κεφάλαιο 2: Γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στα ήδη υπάρχοντα αγροβολταϊκά συστήματα και αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η απόδοση της καλλιέργειάς τους

Κεφάλαιο 3: Αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεγεθών που πρέπει να υπολογιστούν για την μελέτη ενός συστήματος αγροβολταϊκών και η σχέση που έχουν σε σχέση με τα στοιχεία του πλέγματος νερό-τροφή ενέργεια.

Κεφάλαιο 4: Περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της μείωσης της ακτινοβολίας, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της παραγωγής ξηρής ουσίας των καλλιεργειών και της μεταβολής των αρδευτικών αναγκών των φυτών

Κεφάλαιο 5: Παρατίθενται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς

Κεφάλαιο 6: Γίνεται σύνοψη των συμπερασμάτων της εργασίας και προτείνονται θέματα τα οποία θα μπορούσαν να μελετηθούν σε συνέχεια της παρούσας εργασίας

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

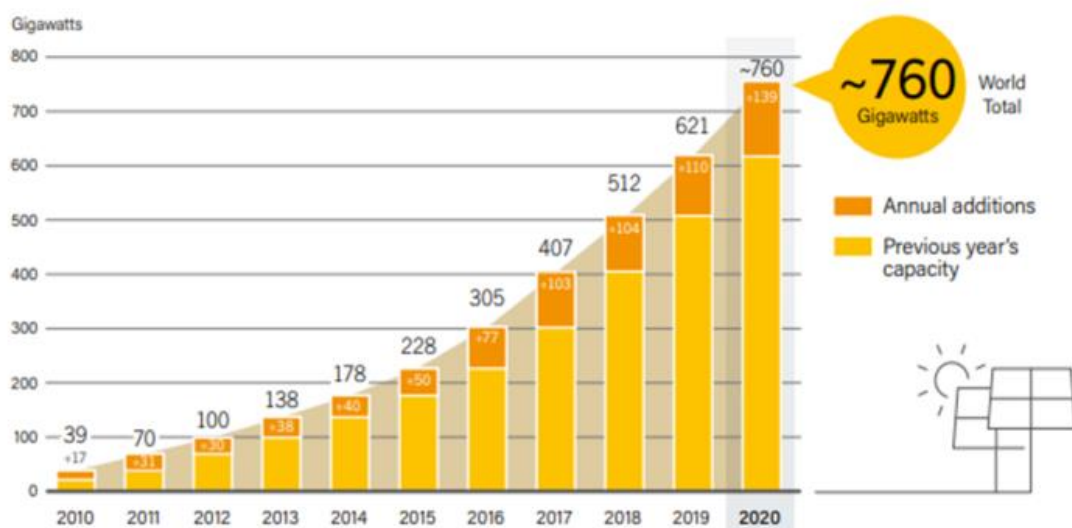
Η ηλεκτρική ενέργεια είναι αδιαμφισβήτητα ένα από τα πιο σημαντικά αγαθά που έχει προσφέρει η επιστήμη και είναι αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης ζωής. Στην καθημερινότητα είναι απαραίτητη για να καλύπτει βασικές ανάγκες των ανθρώπων αλλά και να τους παρέχει ανέσεις. Η εξέλιξη του βιοτικού επιπέδου είναι άμεσα συνδεδεμένη με συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις. Είναι επομένως βασική προτεραιότητα να εξασφαλίζεται ο τρόπος κάλυψης των ενεργειακών αναγκών.

Μέχρι τα μέσα του προηγούμενου αιώνα, η παραγωγή ενέργειας εξασφαλιζόταν με την καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ωστόσο, μερικές δεκαετίες αργότερα, άρχισαν να τίθενται προβληματισμοί σε σχέση με την εκτεταμένη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Αρχικά πρόκειται για μη ανανεώσιμους πόρους οι οποίοι κάποια στιγμή εξαντλούνται. Εξίσου σημαντική ανησυχία, που προκύπτει από την καύση ορυκτών καυσίμων, είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και γενικότερα των αέριων του θερμοκηπίου. Επισήμως, το 1997 με το πρωτόκολλο του Κιότο τα Ηνωμένα Έθνη έδωσαν ένα πλαίσιο το οποίο τα συμμετέχοντα κράτη έπρεπε να ακολουθήσουν με στόχο την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την μείωση εκπομπής αερίων (*EUR-Lex - L28060 - EN - EUR-Lex, n.d.*)

Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να προσφέρουν έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους διαχείρισης των παραπάνω ζητημάτων. Η Ευρωπαϊκή Ένωση προσπαθώντας να απομακρυνθεί από τα ορυκτά καύσιμα και να κατευθυνθεί προς την καθαρή ενέργεια, για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους, έχει θέσει ορισμένους στόχους. Σύμφωνα με αυτούς μέχρι το 2030 θα πρέπει το 40% του ενεργειακού μίγματος να αποτελείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (2030 Climate & Energy Framework, n.d.).

Η ηλιακή ενέργεια την τελευταία δεκαετία αναπτύσσεται με εντυπωσιακό ρυθμό (Εικόνα 2.1). Το κόστος της έχει μειωθεί κατά 82% και αναμένεται να συνεχίσει προς αυτή την κατεύθυνση (Lempriere, 2020). Παράλληλα, η τεχνολογία των ηλιακών πάνελ εξελίσσεται ραγδαία ανεβάζοντας διαρκώς την αποδοτικότητά τους. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά συστήματα

εγκαθίστανται εύκολα, είτε πρόκειται για μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα είτε για έργα μικρότερης κλίμακας. Ιδιαίτερα για χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια υπάρχουν προοπτικές η ηλιακή ενέργεια να συμμετέχει σημαντικά στην συνολική παραγωγή ενέργειας. Μετά την υδροηλεκτρική και την αιολική, η ηλιακή έχει το τρίτο μεγαλύτερο μερίδιο συμμετοχής στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Στην Ευρώπη το ποσοστό της στο ενεργειακό μίγμα ΑΠΕ είναι 14% (Eurostat, 2022).



Εικόνα 2. 1 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών και οι ετήσιες προσθήκες της (REN21)

2.2 Εδαφικές απαιτήσεις φωτοβολταϊκών πάρκων και ανταγωνιστικές χρήσεις γης

Οι τεχνολογίες που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται από πυκνότητα ισχύος αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη από τα ορυκτά καύσιμα (van de Ven et al., 2021). Είναι επομένως χρήσιμο να μελετηθούν οι εδαφικές απαιτήσεις που θα έχει η μετάβαση στην καθαρή ενέργεια.

Η βιοενέργεια με βεβαιότητα απαιτεί μεγαλύτερες εκτάσεις γης συγκριτικά με τις υπόλοιπες ΑΠΕ και αποτελεί μη ρεαλιστική εναλλακτική κάλυψης ενεργειακών αναγκών σε μεγάλες κλίμακες. Μετά τη βιομάζα, από άποψη απαίτησης χώρου, ακολουθεί η υδροηλεκτρική ενέργεια, έπειτα η αιολική και τέλος η ηλιακή. Τα φωτοβολταϊκά πάρκα που, όπως και η βιομάζα, επίσης χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρισμού, αν και προϋποθέτουν μεγάλες εκτάσεις γης, μπορούν να συμμετέχουν σε μεγάλο ποσοστό στο ενεργειακό μίγμα (Fthenakis & Kim, 2009). Συγκεκριμένα για την παραγωγή 1 μεγαβατώρας χρειάζονται 5 με 10

στρέμματα, ανάλογα με την τεχνολογία των ηλιακών πάνελ που χρησιμοποιούνται.

Τα εδάφη που είναι κατάλληλα για φωτοβολταϊκά πάρκα είναι αρκετά όμοια με αυτά που είναι κατάλληλα για καλλιέργειες. Όπως και στην γεωργία, μια έκταση πρέπει να είναι σχετικά επίπεδη, με κλίση που δεν ξεπερνάει το 5%, καθαρή, με ελάχιστους έως καθόλου υγροτόπους. Μεγάλα εμπόδια δημιουργούν πρόβλημα σκίασης οπότε πρέπει να αφαιρεθούν. Παράλληλα είναι επιθυμητό η εγκατάσταση να βρίσκεται κοντά σε οδικές, ηλεκτρικές και υδάτινες υποδομές καθώς και σε ανθρώπινους οικισμούς για διευκόλυνση της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης.

Κατά συνέπεια τα φωτοβολταϊκά πάρκα ανταγωνίζονται τις καλλιέργειες ως προς την κάλυψη μιας έκτασης. Η έννοια των ανταγωνιστικών χρήσεων γης τα τελευταία χρόνια είναι ένα αναδυόμενο ζήτημα που προκύπτει από την αύξηση του πληθυσμού. Είναι επιθυμητή παράλληλα η εξασφάλιση απαιτούμενης ποσότητας τροφίμων, φροντίζοντας για την επισιτιστική ασφάλεια, η κάλυψη ενεργειακών αναγκών και η διατήρηση πολυτίμων οικοσυστημάτων. Ως εκ τούτου, απαιτείται μελέτη για το πώς θα αξιοποιηθεί μια έκταση γης.

Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προέκυψε η σκέψη αξιοποίησης μιας έκτασης από δύο δραστηριότητες ταυτόχρονα, αντί να ανταγωνίζονται για αυτή. Μια πρώτη μορφή αυτής της ιδέας είναι η αγροδοασπονία η οποία εφαρμόζεται εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Αντίστοιχα γεννήθηκε και η ιδέα αξιοποίησης της ακτινοβολίας του ηλίου για καλλιέργεια και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3 Αγροβολταϊκά

Ο όρος αγροβολταϊκά (agrivoltaics/agriphotovoltaics) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εκμετάλλευση μιας έκτασης γης για αγροτικές εργασίες και παράλληλα για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών. Αυτή η διπλή χρήση μιας έκτασης προσβλέπει στην αύξηση της οικονομικής της απόδοσης. Επομένως, το σύστημα που θα σχεδιαστεί πρέπει να λαμβάνει υπόψιν και την παραγωγή ενέργειας και την ικανοποιητική απόδοση των καλλιεργειών.

Σε σχέση με τα κλασικά φωτοβολταϊκά πάρκα γίνονται δύο βασικές τροποποιήσεις με σκοπό να είναι δυνατές και αποτελεσματικές οι αγροτικές εργασίες. Αφενός μειώνεται η πυκνότητα των ηλιακών πάνελ και αφετέρου

αυτά τοποθετούνται σε ύψος τέτοιο ώστε να μπορούν τα γεωργικά μηχανήματα να περνάνε από κάτω (Εικόνα 2.2). Βεβαίως η διάταξη σε κάθε αγροτικό φωτοβολταϊκό πάρκο προσαρμόζεται ανάλογα με το ποια δραστηριότητα προτιμάται να ενισχυθεί. Αν κύριος στόχος του έργου είναι η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται η πυκνότητα των πάνελ. Αντιθέτως εάν σκοπός είναι να δοθεί έμφαση στην παραγωγή καλλιέργειας η διάταξη των πάνελ γίνεται πιο αραιή.



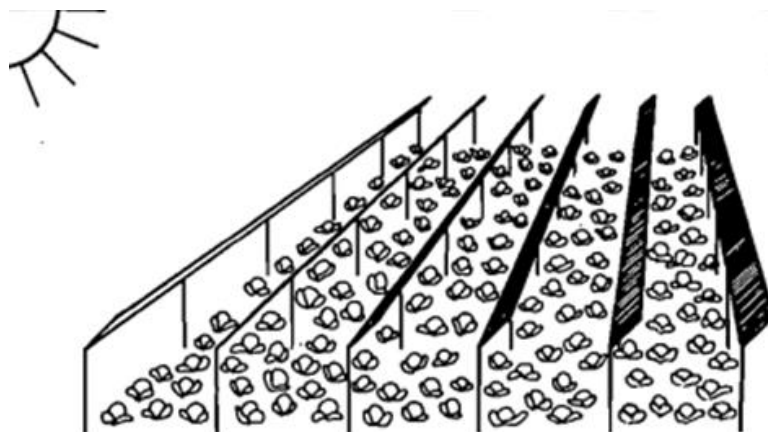
Εικόνα 2.2 Αγροβολταϊκά στο Montpellier, Γαλλία (iea-pnvs.org)

Σε ένα σύστημα αγροβολταϊκών δεν είναι στόχος η απλή συνύπαρξη των φωτοβολταϊκών και των καλλιεργειών, αλλά και τα οφέλη που μπορεί να έχουν λόγω αυτής. Σημαντική επίδραση που έχουν τα πάνελ στην καλλιέργεια είναι ότι λόγω της σκίασης που προκαλούν, μειώνεται η εξατμισοδιαπνοή άρα και οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για άνυδρες, ξηρές περιοχές. Αντίστοιχα οι καλλιέργειες ίσως να διατηρούν την θερμοκρασία κοντά στα πάνελ πιο χαμηλή και με αυτό το τρόπο να ευνοούν την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών. Παράλληλα τα φωτοβολταϊκά μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες της καλλιέργειας (πχ για την άρδευση)

Η ανταγωνιστικότητα διάφορων χρήσεων γής, γίνεται εντονότερη σε βραχώδεις περιοχές, μικρά κατοικήσιμα νησιά και ορεινές βραχώδεις περιοχές. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αξία ενός αγροβολταϊκού συστήματος έχει ακόμα μεγαλύτερη σημασία (Dinesh & Pearce, 2016).

Πρώτη φορά η συνύπαρξη καλλιεργειών και φωτοβολταϊκών διατυπώθηκε από τους Goetzberger and Zastrow το 1982. Στην μελέτη τους πρότειναν τα ηλιακά πάνελ να βρίσκονται ανυψωμένα στα 2 μέτρα σε σειρές με απόσταση 3 και 4 μέτρων με σκοπό η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος

να είναι ομοιογενής. (Εικόνα 2.3 Με αυτή την διάταξη μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας θα φτάνουν στο έδαφος και ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες που οι γωνίες ύψους του ηλίου είναι μεγαλύτερες (GOETZBERGER & ZASTROW, 1982) .



Εικόνα 2.3: Πρότυπο σκίτσο υπερυψωμένων ηλιακών πάνελ (Goetzberg&Zastrow, 1982)

Έπειτα από την πρώτη διατύπωση της ιδέας πέρασαν περίπου 20 χρόνια ώστε να υλοποιηθεί. Πρώτη φορά ένα τέτοιο σύστημα αναπτύχθηκε το 2004 στην Ιαπωνία από τον Akira Nagashima. Ο Nagashima σχεδίασε τα αγροβολταϊκά για διάφορες συνθήκες σκίασης, ανάλογα με το σημείο κορεσμού φωτός κάθε φυτού (σημείο κορεσμού φωτός ονομάζεται μια τιμή την οποία αν ξεπεράσει η ηλιακή ακτινοβολία τα φυτά δεν αυξάνουν τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης τους) (Tajima & Iida, 2021). Στην Ευρώπη τα πρώτα αγροβολταϊκά αναπτύχθηκαν το 2010 για ερευνητικούς σκοπούς, στο Montpellier στην Γαλλία, και το 2012 για εμπορική χρήση στην Βόρεια Ιταλία με το όνομα Agrivoltaico (Dupraz et al., 2011, Amaducci et al., 2018). Στην Κίνα το 2015 έγινε το πρώτο αγροβολταϊκό πάρκο μεγάλης κλίμακας που έχει έκταση περισσότερα από 100 στρέμματα. Όσο η έρευνα σχετικά με τα αγροβολταϊκά συνεχίζεται, εκτιμάται ότι από το 2014 έχουν εγκατασταθεί περίπου 2200 αγροβολταϊκά πάρκα με την Ιαπωνία να έχει τα περισσότερά σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες (Toledo & Scognamiglio, 2021).

2.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αγροβολταϊκών

Για την κατασκευή ενός αγροβολταϊκού πάρκου δεν υπάρχει συγκεκριμένο πλαίσιο σύμφωνα με το οποίο να γίνεται η διαρρύθμιση των πάνελ. Αυτό προκύπτει από τους πολλούς παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος. Τα τελευταία χρόνια γίνονται όλο και περισσότερες έρευνες σε σχέση με τα διάφορα χαρακτηριστικά του

όπως ο τύπος καλλιέργειας και ο τύπος των ηλιακών πάνελ. Έχει επίσης σημασία ποιος είναι ο κύριος στόχος του αγροβολταϊκού συστήματος. Μπορεί να είναι η αύξηση εσόδων, η βελτιστοποίηση ηλεκτροπαραγωγής ή η διατήρηση της παραγωγής της καλλιέργειας σχεδόν στα ίδια επίπεδα που ήταν πριν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών.

2.4.1 Ύψος

Τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται συνήθως σε στύλους ύψους 4-5 μέτρων. Πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα τα γεωργικά μηχανήματα να περνάνε από κάτω (Εικόνα 2.4). Πέρα από την διευκόλυνση των γεωργικών δραστηριοτήτων, τοποθετώντας τα φωτοβολταϊκά σε μεγαλύτερο ύψος από το κλασικό, η ακτινοβολία κάτω από τα πάνελ είναι πιο ομοιογενής κάτι που είναι επιθυμητό για την καλλιέργεια. Όσο πιο χαμηλά είναι τα φωτοβολταϊκά αυξάνεται η ετερογένεια της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Παράλληλα επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν καλλιέργειες με μεγάλο ύψος. Το ύψος δεν αλλάζει την ακτινοβολία που φτάνει στα πάνελ άρα ούτε και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος το ότι τοποθετούνται τα πάνελ αρκετά πάνω από τις καλλιέργειες δυσκολεύει την εναπόθεση σκόνης στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών από τις αγροτικές εργασίες.

Ωστόσο, λόγω του μεγάλου ύψους που έχουν, τα αγροβολταϊκά μπορεί να θεωρηθεί ότι υποβαθμίζουν μια περιοχή ιδιαίτερα εάν είναι τουριστική με μεγάλη επισκεψιμότητα. Η αρνητική επίδραση στο φυσικό τοπίο οδηγεί σε αμφιβολία για την υιοθέτηση μιας τέτοιας εγκατάστασης. Πέρα από την δυσκολία της κοινωνικής αποδοχής, με το ύψος αυξάνεται και το κόστος του συστήματος.

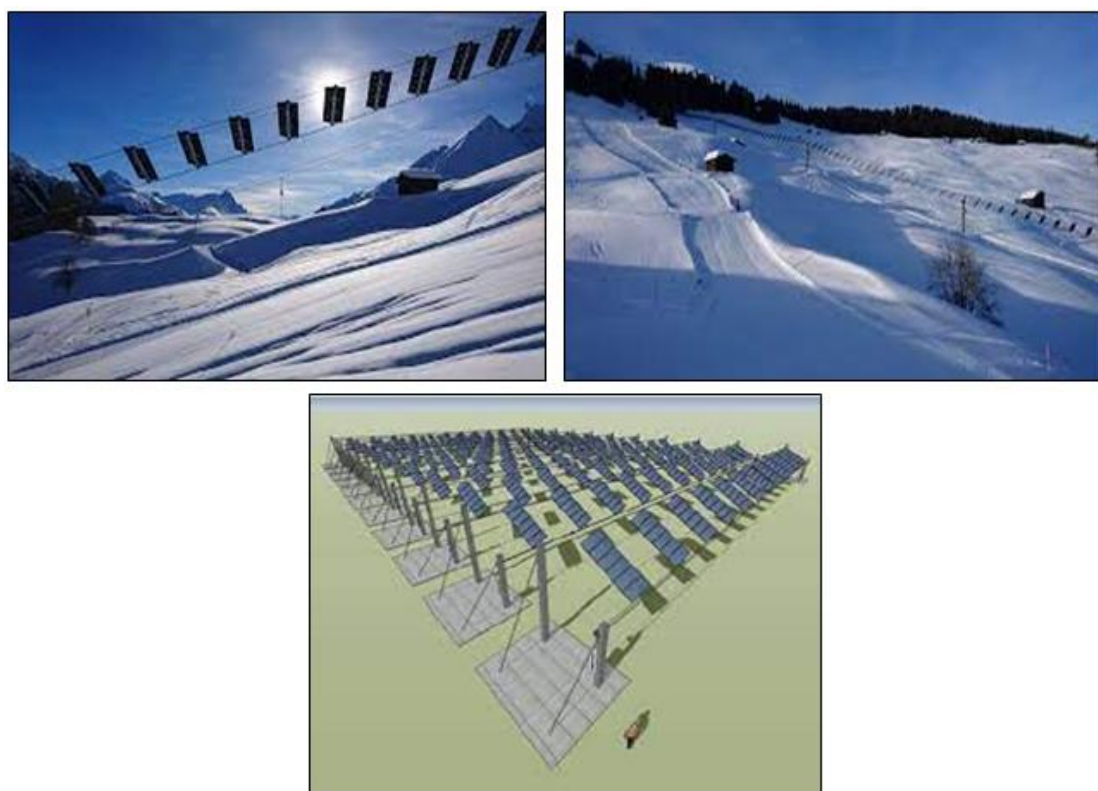


Εικόνα 2.4 Αγροβολταϊκά στη Νότια Γερμανία APV-RESOLA (Fraunhofer ISE)

2.4.2 Τρόπος στήριξης

Οι στύλοι υποστήριξης των φωτοβολταϊκών, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα έχουν συνήθως ύψος 4-5m. Η πυκνότητα τους στον χώρο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν γίνεται αραιότερη διότι κάτω από τα αγροβολταϊκά εκτελούνται οι αγροτικές εργασίες. Έτσι, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των στύλων ορίζεται από την απόσταση που χρειάζονται τα γεωργικά μηχανήματα για να διέρχονται ανάμεσα τους και να κάνουν τους απαραίτητους ελιγμούς. Απαιτείται φυσικά και οι χειριστές των γεωργικών οχημάτων να είναι έμπειροι, όμως αυτό το ζήτημα σύντομα μπορεί να λυθεί χάρη στην αυτοματοποίηση τέτοιων μηχανών και διαδικασιών.

Μια τεχνολογία εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, που ονομάζεται solar wings, ταιριάζει με τις απαιτήσεις ενός αγροβολταϊκού συστήματος. Αυτός ο τρόπος εγκατάστασης χρησιμοποιεί καλώδια για να τοποθετηθούν πάνω τους τα ηλιακά πάνελ (Εικόνα 2.5). Αυτό δίνει την δυνατότητα για πολύ αραιή τοποθέτηση υποστηρικτικών στύλων, το λιγότερο σε απόσταση 40m. Επίσης, τα ηλιακά πάνελ μπορούν να είναι μεταβαλλόμενης κλίσης ως προς έναν ή δύο άξονες. (A. Büchel, & R. Bartholet, 2008, Bartholet, 2012)



Εικόνα 2.5 Πρώτη εγκατάσταση solar wings στην Ελβετία σε πλαγιά για σκι (solarskilift.ch) και σκίτσο solar wings (F.P. Baumgartner, 2008)

Στην Γερμανία, στην πειραματική αγροβολταϊκή διάταξη APV-RESOLA χρησιμοποίησαν για την θεμελίωση των στύλων ένα σύστημα χωρίς σκυρόδεμα που ακολουθεί τις αρχές των ριζών ενός δέντρου. Αποτελείται από χαλύβδινες ράβδους με σπείρωμα διαμέτρου 1cm, που βιδώνονται σε μια κυκλική πλάκα στο κάτω μέρος του υποστυλώματος (Εικόνα 2.6). Οι ράβδοι είχαν μήκος 4-8m και σε κάθε πλάκα κατέληγαν 12 ή 6 ράβδοι αντίστοιχα. Βέβαια σε κάθε έδαφος οι ανάγκες θεμελίωσης είναι διαφορετικές. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας θεμελίωσης είναι η ευκολία εγκατάστασής της, με μηχανήματα χειρός, και η μικρή επεμβατικότητα στο έδαφος. Είτε κάποια στιγμή το αγροβολταϊκό πάρκο απεγκατασταθεί, είτε τροποποιηθεί εφόσον η έκταση είναι καλλιεργήσιμη, είναι προτιμότερο να γίνονται όσο το δυνατόν λιγότερες επεμβάσεις σε αυτό (Trommsdorff et al., 2021).



Εικόνα 2.6 Τρόπος θεμελίωσης στύλων αγροβολταϊκών (Spinnanker.com)

2.4.3 Πυκνότητα τοποθέτησης

Η πυκνότητα των φωτοβολταϊκών είναι η βασική παράμετρος από την οποία εξαρτάται η διαθέσιμη ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος. Για να ευνοηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η πυκνότητα αυξάνεται, ενώ για να διατηρηθεί η παραγωγή της καλλιέργειας, όσο το δυνατόν πιο κοντά στην απόδοση που είχε πριν την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών, μειώνεται.

Στο Montpellier δοκιμάστηκαν αγροβολταϊκά με δύο πυκνότητες ηλιακών πάνελ. Την πλήρη πυκνότητα με απόσταση συστοιχιών 1,6m και την μισή πυκνότητα με απόσταση 3,2m. Στην περίπτωση της μισής πυκνότητας δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά της απόδοσης παραγωγής της καλλιέργειας με την μέγιστη μείωση να είναι το 2010 20% ενώ το 2011 να είναι σχεδόν μηδενική (Marrou et al., 2013). Στην Αμερική οι Dinesh & Pierce (2016) μελέτησαν επίσης δύο διαφορετικές πυκνότητες με απόσταση συστοιχιών 6,4m και 3,2m για πλήρη και μισή πυκνότητα αντίστοιχα. Για το σενάριο της μισής πυκνότητας προέκυψε ότι τα έσοδα του συνολικού συστήματος από την ηλεκτρική ενέργεια και τις καλλιέργειες ήταν μεγαλύτερα. Επομένως

φαίνεται ότι, από άποψη αποδοτικότητας του συστήματος, η απόσταση τριών μέτρων ανάμεσα στις συστοιχίες πάνελ είναι μια ικανοποιητική τυπική τιμή. Βέβαια για την διευκόλυνση των αγροτικών εργασιών είναι κάπως μικρή, επομένως συχνά επιλέγεται μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών.

2.4.4 Κλίση

Γενικά η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η απόδοση τους να μεγιστοποιείται τον χειμώνα κατά την διάρκεια του οποίου η ηλιακή ακτινοβολία παίρνει τις χαμηλότερες τιμές της. Ένας γενικός κανόνας είναι η κλίση να είναι όσες μοίρες είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης ή ελαφρώς υψηλότερη. Πολύ μικρή κλίση δεν είναι επιθυμητή για να μην συσσωρεύεται σκόνη στην επιφάνεια των πάνελ διότι αυτό μειώνει την αποδοτικότητα τους σημαντικά. Βέβαια στα αγροβολταϊκά η βέλτιστη επιλογή κλίσης δεν γίνεται με μοναδική παράμετρο την παραγωγή ενέργειας αλλά λαμβάνοντας υποψιν και την αποδοτικότητα της καλλιέργειας.

Τα πρώτα αγροβολταϊκά συστήματα χρησιμοποίησαν φωτοβολταϊκά σταθερής κλίσης με το σκεπτικό ότι δεσμεύουν λιγότερη ακτινοβολία την οποία αφήνουν για εκμετάλλευση από τις καλλιέργειες. Με αυτό το τρόπο οι Marrou et al (2013) βρήκαν ένα ποσοστό της συνολικής ακτινοβολίας που είναι αρκετό για να εξασφαλίζει ικανοποιητική παραγωγή της καλλιέργειας. Στόχος άρα της διαμόρφωσης είναι να επιτρέπει τουλάχιστον αυτό το ποσοστό να φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Στην συνέχεια πρότειναν ότι, εάν χρησιμοποιούνταν φωτοβολταϊκά μεταβαλλόμενης κλίσης, αυτά θα μεγιστοποιούσαν την αποτελεσματικότητα του συστήματος, διότι θα φρόντιζαν την περίοδο ανάπτυξης των φυτών να δέχονται την απαραίτητη ακτινοβολία, ενώ σε περιόδους που οι καλλιέργειες δε χρειάζονται τόση ακτινοβολία η κλίση να μεγιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας.

Οι Valle et al. (2017b) μελέτησαν πέρα από σταθερή και δυο σενάρια μεταβαλλόμενης κλίσης. Στο ένα σενάριο "ηλιακή παρακολούθηση" η κλίση των πάνελ μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας για να "κοιτάει" συνεχώς τον ήλιο καθώς αυτός αλλάζει γωνίες ύψους. Αυτή είναι και η κλασική περίπτωση ηλιακών πάνελ μεταβαλλόμενης κλίσης που έχουν στόχο να αυξήσουν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό την ηλεκτροπαραγωγή. Το σενάριο "παρακολούθηση ελέγχου" στοχεύει να αυξήσει την ακτινοβολία στις καλλιέργειες, ελαχιστοποιώντας την σκιά που δημιουργούν τα πάνελ το πρωί και αργά το απόγευμα και μεγιστοποιώντας την σκιά το μεσημέρι που η θερμοκρασία, η εξάτμιση και ο ήλιος

κορυφώνονται. Και στις δύο περιπτώσεις τα αγροβολταϊκά μεταβαλλόμενης κλίσης ήταν πιο αποδοτικά από τα σταθερά. Την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα την είχε το σύστημα “ηλιακής παρακολούθησης” σε συνδυασμό καλλιέργειας και παραγωγής ενέργειας ενώ το σύστημα “παρακολούθηση ελέγχου” είχε την μεγαλύτερη απόδοση στις καλλιέργειες.

Στην Ιταλία το σύστημα Agrivoltaico που έχει φωτοβολταϊκά μεταβαλλόμενης κλίσης περί 2 άξονες αποδείχτηκε επίσης πιο αποδοτικό από μονάδες σταθερής κλίσης. Ωστόσο η βασική παρατήρηση για την διαρρύθμιση των πάνελ ήταν ότι η ακτινοβολία κάτω από το πάνελ επηρεάζεται κυρίως από την πυκνότητα τους και όχι από την διαχείριση της κλίσης τους (Amaducci et al., 2018).

Μια άλλη εκδοχή αγροβολταϊκών πάρκων που έχει μελετηθεί είναι τα κάθετα φωτοβολταϊκά. Η τοποθέτηση των πάνελ κάθετα αφήνει χώρο για να αναπτυχθούν καλλιέργειες ενδιάμεσα, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για ψηλά συστήματα στερέωσης ώστε τα γεωργικά μηχανήματα να περνάνε από κάτω. Βασικό πλεονέκτημα που έχουν έναντι των κλασικών φωτοβολταϊκών είναι ότι προσφέρουν πολύ καλύτερη χωρική ομοιογένεια της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Αυτό τα καθιστά πιο κατάλληλα για μονοκαλλιέργειες. (Εικόνα 2.7)



Εικόνα 2.7 Πιλοτικό σύστημα κάθετων αγροβολταϊκών στην Σουηδία (pv-magazine.com)

Στην σύγκριση με τα πάνελ σταθερής κλίσης τα κάθετα αγροβολταϊκά γίνονται πιο αποδοτικά όσο η πυκνότητα των πάνελ μειώνεται. Χαμηλή πυκνότητα αγροβολταϊκών είναι η απόσταση των 9m ενώ υψηλή η απόσταση 3m. Σε περίπτωση που τα πάνελ τοποθετούνται αραιά, τα κάθετα μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα του συστήματος περίπου κατά 5% σε σχέση με αυτά της σταθερής κλίσης διότι η ενέργεια που παράγεται είναι περισσότερη. Επίσης η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος

είναι ομοιογενής και άρα οι συνθήκες είναι παρόμοιες με αυτές της παραδοσιακής γεωργίας με μια διαφορά στο διαθέσιμο φως. Εάν η πυκνότητα τοποθέτησης είναι μεγάλη, το κάθετο είναι 8% λιγότερο αποδοτικό από το σταθερής κλίσης σύστημα, αν και η παραγωγή βιομάζας των καλλιεργειών είναι μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει λόγω έντονης σκίασης ανάμεσα στα πάνελ άρα και μεγάλης μείωσης της παραγωγής ενέργειας. (Younas et al., 2019)

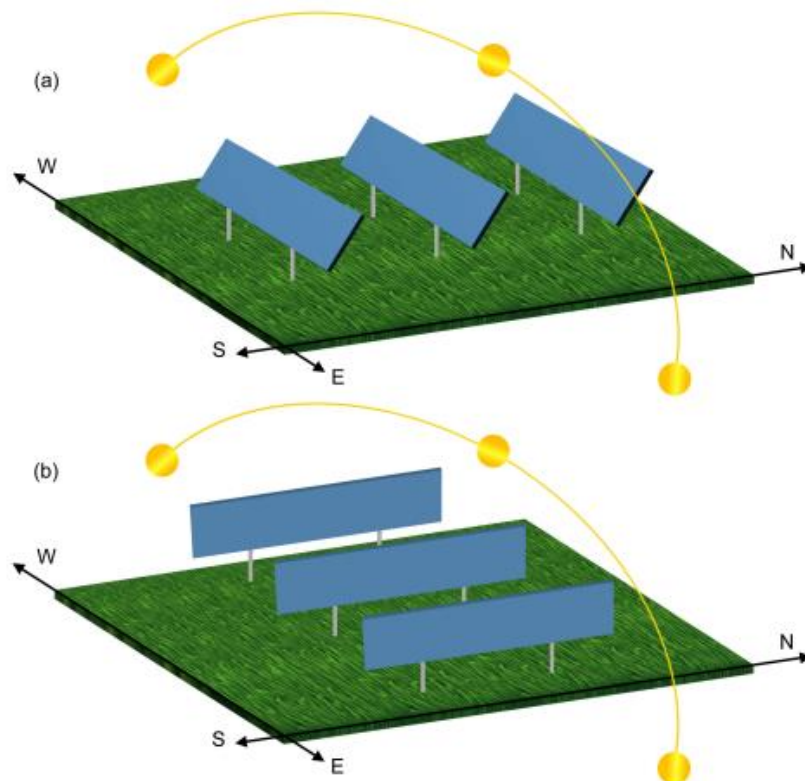
Σε μελέτη για κάθετο αγροβολταϊκό πάρκο στην Σουηδία μια απόσταση που μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα του εδάφους έχει υπολογιστεί 9,2 για καλλιέργειες βρώμης και 9,7 για καλλιέργεια πατάτας. Η απόσταση μεταξύ των συστοιχιών φωτοβολταϊκών επηρεάζει σημαντικά την ακτινοβολία που είναι διαθέσιμη για φωτοσύνθεση. Η παραγωγή των καλλιεργειών μειώνεται κατά 50% εάν η απόσταση μειωθεί από τα 20m στα 9m (Campana et al., 2021).

2.4.5 Προσανατολισμός

Στοχεύοντας την μεγιστοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής τα ηλιακά πάνελ είναι στραμμένα προς τον Νότο. Ωστόσο αυτό προκαλεί συνήθως μεγάλη ανομοιογένεια της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Η άνιση κατανομή του φωτός στο έδαφος είναι ακόμα πιο έντονη για φωτοβολταϊκά στραμμένα προς τον Νότο, όταν η γωνία ύψους του ηλίου είναι μεγάλη δηλαδή προς το τέλος της άνοιξης και την αρχή του καλοκαιριού. Στρέφοντας το σύστημα Νοτιοδυτικά ή Νοτιοανατολικά αυτή η ανομοιογένεια μειώνεται. Διερευνώντας την σχέση μεταξύ της ομοιογένειας της ακτινοβολίας του εδάφους και της απόκλισης από το Νότο, προκύπτει προτεινόμενη στροφή 30°. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και για γωνίες 30-45°, ωστόσο μειώνεται η ηλεκτροπαραγωγή, οπότε δεν προτιμάται η γωνία προς το Νότο να είναι τόσο μεγάλη. Καλύτερη κατανομή του φωτός προκύπτει βέβαια από φωτοβολταϊκά ηλιακής παρακολούθησης τοποθετημένα σε B-N, αλλά αυτό είναι πιο κοστοβόρο οπότε σε περίπτωση επιλογής σταθερής κλίσης ισχύουν τα παραπάνω (Trommsdorff et al., 2021).

Στην κατηγορία των κάθετων φωτοβολταϊκών, η τοποθέτηση συνήθως γίνεται με προσανατολισμό την Δύση-Ανατολή. Εξαιτίας αυτής της κατεύθυνσης η αιχμή παραγωγής ενέργειας καθημερινά είναι το πρωί και το απόγευμα (Reker et al., 2022). Αντίθετα τα κλασικά φωτοβολταϊκά έχουν αυτή την αιχμή το μεσημέρι. Αυτό πιθανά να καθιστά την τιμή της ενέργειας υψηλότερη, εφόσον οι ενεργειακές ανάγκες εκείνες τις ώρες είναι μεγαλύτερες. Επίσης δρα εξισορροπητικά σε ένα βασικό πρόβλημα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το οποίο είναι η παραγωγή μεγάλων

ποσοτήτων ενέργειας σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα (Cannibalisation effect)



Εικόνα 2.8 Φωτοβολταϊκά σταθερής κλίσης που κοιτάνε προς τον Νότο και κάθετα φωτοβολταϊκά που κοιτάνε προς την Δύση-Ανατολή (Younas et al., 2019)

2.4.6 Τύπος φωτοβολταϊκής μονάδας

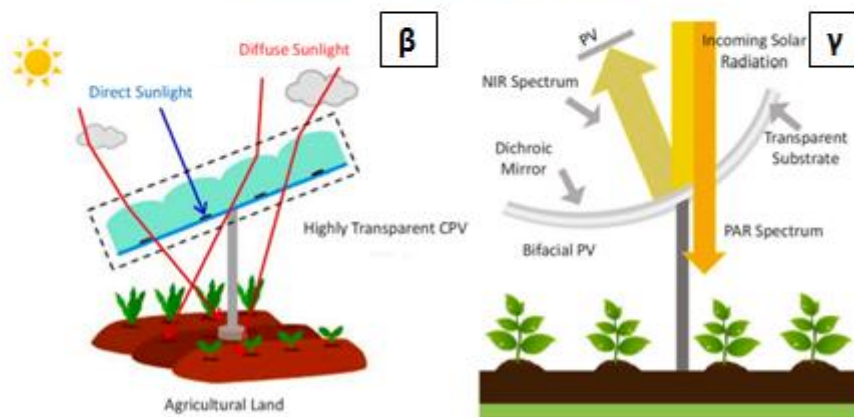
Τα περισσότερα αγροβολταϊκά μέχρι σήμερα χρησιμοποιούν κλασικά αδιάφανα φωτοβολταϊκά πυριτίου χάρη στο χαμηλό τους κόστος. Ωστόσο δοκιμάζοντας και άλλου τύπου τεχνολογίες μπορεί να αυξηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος ή να περιοριστεί σε ένα βαθμό η αρνητική επίδραση των ηλιακών πάνελ στις καλλιέργειες.

Τα ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά ταιριάζουν σε μεγάλο βαθμό στο τρόπο που λειτουργούν τα αγροβολταϊκά. Η ακτινοβολία φτάνει στα ηλιακά πάνελ, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έπειτα ένα ποσοστό της διαπερνά την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών. Φυσικά αυτή η ακτινοβολία που διαπερνάται, είναι πολύτιμη για τις καλλιέργειες και για την ανάπτυξη τους αλλά και για την ομοιγένεια του φωτός κάτω από τα αγροβολταϊκά. Βέβαια, ο βαθμός απόδοσης των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών είναι πιο χαμηλό από τα κλασικά φωτοβολταϊκά και το κόστος τους υψηλότερο οπότε δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ακόμα.

Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών και στα αγροβολταϊκά συστήματα αυτά που έχουν χρησιμοποιηθεί πιο πολύ είναι ημιδιαφανείς μονάδες πυριτίου διότι έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και υψηλή και σταθερή απόδοση. Μελετώντας την επίδραση που θα έχουν ημιδιαφανή πάνελ με ποσοστό διαπερατότητας κοντά στο 50% σε καλλιέργειες μαρουλιού, ντομάτας και αμπέλια, έχει προκύψει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μειώσεις στην απόδοσή τους (Hassanien et al., 2018, Cho et al., 2020)

Μια άλλη πολύ ενδιαφέρουσα τεχνολογία ημιδιαφανών πάνελ είναι τα οργανικά, τα οποία επιλέγουν συγκεκριμένα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας για να παράγουν ενέργεια και τα υπόλοιπα τα αφήνουν να τα διαπεράσουν. Έτσι τα μήκη κύματος που είναι χρήσιμα για την φωτοσύνθεση μπορούν να διαπερνάνε τα πάνελ και να φτάνουν στην καλλιέργεια. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι πολύ λεπτά και εύκαμπτα και έχουν παρόμοιες ιδιότητες με το πλαστικό (Εικόνα 2.9α). Είναι πολύ εύκολο επομένως να αντικαταστήσουν το πλαστικό σε θερμοκήπια. Σε εξωτερικές καλλιέργειες επίσης η υποστήριξή τους απαιτείται να είναι πολύ πιο απλή λόγω του μικρού βάρους τους. Αυτή τη στιγμή το κόστος τους είναι υψηλό και η απόδοσή τους σχετικά χαμηλή. Επίσης η απόδοσή τους είναι ασταθής επηρεαζόμενη από πολλούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και το νερό (Organic Photovoltaics Research, n.d.).

Επίσης μια τεχνολογία που ταιριάζει με τις απαιτήσεις των αγροβολταϊκών είναι τα ημιδιαφανή συγκεντρωτικά πάνελ. Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούν ανακλαστές ή διαθλαστές ώστε να συγκεντρώσουν την ακτινοβολία σε ένα ηλιακό στοιχείο-αποδέκτη. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι χρειάζονται λιγότερη επιφάνεια και έχουν υψηλή απόδοση. Συνήθως χρειάζονται σύστημα ηλιακής παρακολούθησης διότι αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία. Επομένως η διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να διατεθεί αποκλειστικά στις καλλιέργειες. Ανάλογα με την τεχνολογία των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους γίνονται ημιδιαφανή. Έαν πρόκειται για φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιούν φακούς Fresnel, το διάχυτο ηλιακό φως μπορεί να περάσει και να φτάσει στο έδαφος (Εικόνα 2.9β). Εάν χρησιμοποιούνται καμπυλωτοί καθρέφτες μπορούν να εφαρμοστούν ειδικοί διχρωμικοί καθρέφτες που επιτρέπουν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος να περάσουν (Εικόνα 2.9γ). Μέχρι στιγμής δεν έχει μελετηθεί η επίδραση που θα είχαν αυτά τα φωτοβολταϊκά στις καλλιέργειες (Gorjian et al., 2022).



Εικόνα 2.9 (α): Οργανικό φωτοβολταϊκό (β): Τρόπος λειτουργίας συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών με φακό Fresnel όπου η διάχυτη ακτινοβολία περνάει στο έδαφος (Sato&Yamada,2019) (γ): Τρόπος λειτουργίας συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούν διχρωμικούς καθρέπτες (Miskin et al, 2019)

Μια τεχνολογία φωτοβολταϊκών που έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται στα αγροβολταϊκά είναι τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες διπλής όψης διαφέρουν από τις συμβατικές διότι στην πίσω πλευρά των πάνελ τοποθετείται υλικό που μπορεί επίσης μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και έτσι αυξάνεται η αποδοτικότητά τους. Το πόσο θα αυξηθεί η αποδοτικότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανακλαστικότητα του εδάφους και των φυτών κάτω από τα φωτοβολταϊκά. Εάν το έδαφος έχει μεγάλη ανακλαστικότητα επιστρέφει μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας στο πίσω μέρος των πάνελ και η αποδοσή τους αυξάνεται. Μια Ισραηλινή εταιρία έχει στήσει ένα αγροβολταϊκό σύστημα σε οπωρώνες χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά διπλής όψης. Για να αυξήσει την αποδοτικότητα του συστήματος, τοποθέτησε στο έδαφος λευκές λωρίδες υφάσματος έτσι ώστε περισσότερη ακτινοβολία να ανακλάται στα πάνελ και να παράγουν περισσότερη ενέργεια, αλλά και στα δέντρα ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των καρπών και το χρώμα τους (Εικόνα 2.10). Επιπλέον τα υφάσματα εμποδίζουν την ανάπτυξη ζιζανίων κοντά στις ρίζες των δέντρων και επιβραδύνουν την εξάτμιση του νερού (Matich, 2021).



Εικόνα 2.10 Οπωροβολταϊκά διπλής όψης στο Ισραήλ, (pv-magazine.com)

2.5 Καλλιέργειες στα αγροβολταϊκά

Σε σχέση με την επιλογή καλλιέργειας που είναι κατάλληλη για τα αγροβολταϊκά συστήματα δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Κάθε καλλιέργεια έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάπτυξης και συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με το κλίμα της περιοχής. Ακόμα και από χρόνο σε χρόνο, μπορεί να αλλάξει ο τρόπος που αλληλεπιδρά ένα είδος καλλιέργειας με την ύπαρξη των φωτοβολταϊκών, ανάλογα με την βροχόπτωση, την θερμοκρασία και την υγρασία. Εφόσον βασική διαφορετική συνθήκη για τις καλλιέργειες των αγροβολταϊκών είναι η περιορισμένη ακτινοβολία μια πρώτη σκέψη είναι να δοκιμαστούν φυτά ανθεκτικά σε χαμηλές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας (Curl, 2022) :

- Πράσινα λαχανικά σαλάτας: Μαρούλι, σπανάκι, σέσκουλα, ρόκα
- Φυλλώδη πράσινα λαχανικά: Φυλλώδες λάχανο (Kale), σέσκουλα
- Φυτλα που καλλιεργούνται για τα υπόγεια όργανά τους: Πατάτες, καρότα, ραπανάκια, πατζάρια,
- Είδη της οικογένειας Brassicaceae: μπρόκολο, κουνουπίδι, λάχανο
- Μπιζέλια και φασόλια
- Πράσα και κρεμμύδια
- Βότανα: μέντα, μοσχοκάρυδο, κόλιανδρος, ρίγανη, μαϊντανός

Πράγματι στα πρώτα αγροβολταϊκά μελετήθηκαν τέτοιου τύπου καλλιέργειες. Βέβαια η σκίαση στην οποία θα υποβάλεται η καλλιέργεια σε κάθε σύστημα μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της. Αν τα

φωτοβολταϊκά είναι ρυθμιζόμενης κλίσης, μπορεί ειδικά σε κάποια στάδια ανάπτυξης να επιτρέπεται μέχρι και σε ολόκληρη την ηλιακή ακτινοβολία να φτάνει στο έδαφος. Ακόμα, το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από ηλιακά πάνελ μπορεί να είναι πολύ μικρό. Επομένως αξίζει να δοκιμαστούν πολλές καλλιέργειες και ειδικά αυτές που έχουν εμπορικό ενδιαφέρον και μεγάλη ζήτηση.

Στη Γαλλία, σε μια πειραματική διάταξη στο Montpellier, μελετήθηκαν τέσσερις ποικιλίες μαρουλιών για κανονική πυκνότητα συστοιχιών ενός φωτοβολταϊκού πάρκου και για μισή πυκνότητα. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε δύο συνεχή έτη. Για την πλήρη πυκνότητα τον πρώτο χρόνο η μείωση της βιομάζας ανα τετραγωνικό μέτρο ήταν περίπου 40% ενώ τον δεύτερο 20%. Στην μισή πυκνότητα οι τιμές ήταν αντίστοιχα 20% και 1% δηλαδή σχεδόν καθόλου. Μάλιστα στην μισή πυκνότητα δύο ποικιλίες παρήγαγαν περισσότερη βιομάζα κάτω από τα φωτοβολταϊκά συγκριτικά με τις συνθήκες πλήρους ηλίου. Σε κάθε περίπτωση τα αγροβολταϊκά ήταν πιο αποδοτικά την άνοιξη σε σχέση με τις άλλες εποχές. Γενικά η μείωση της βιομάζας ήταν μικρότερη από την μείωση της ακτινοβολίας, κάτι που υποδεικνύει την ικανότητα των μαρουλιών να παράγουν βιομάζα πιο αποτελεσματικά όταν μειώνεται η ακτινοβολία. Ο αριθμός των φύλλων μειώθηκε σημαντικά, αλλά παράλληλα αυξήθηκε η επιφάνεια τους. Η ετερογένεια του φωτός ανάμεσα στα αγροβολταϊκά δεν μεταφράστηκε με κάποιον σημαντικό τρόπο στην παραγωγή της καλλιέργειας (Marrou, Guillioni, et al., 2013).

Επεκτείνοντας το παραπάνω σύστημα, προστέθηκαν δύο μέρη με φωτοβολταϊκά μεταβαλλόμενης κλίσης. Στην περίπτωση της μεταβαλλόμενης κλίσης η παραγόμενη βιομάζα ήταν πάντα μεγαλύτερη από την περίπτωση σταθερής κλίσης. Οι διαφορές ήταν σχετικά μικρές, με την άνοιξη να είναι πιο αισθητές ενώ το φθινόπωρο ανεπαίσθητες (Valle et al., 2017)

Στην βόρεια Ιταλία το σύστημα Agrivoltaico αποτελεί ένα αγροβολταϊκό πάρκο που εξυπηρετεί και εμπορικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Πρόκειται για ένα σύστημα με καλλιέργεια αραβοσίτου και φωτοβολταϊκά μεταβαλλόμενης κλίσης ως προς τους 2 άξονες. Στον αραβόσιτο η σκιά περιορίζει την παραγωγή βιομάζας αρκετά, καθώς ανήκει σε κατηγορία φυτών (C4) που η φωτοσύνθεση αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται το φως. Υπό συνθήκες πλήρους άρδευσης η μείωση της ακτινοβολίας πάντα επηρεάζει την παραγωγή βιομάζας στο Agrivoltaico, με την μείωση να κυμαίνεται από 1 έως 35%. Για ήπια σκίαση (20-35% της συνολικής ακτινοβολίας) η απόδοση της καλλιέργειας κάτω από τα φωτοβολταϊκά είναι αρκετά κοντά με την απόδοση που έχει σε συνθήκες πλήρους ηλίου.

Σε συνθήκες που οι υδατικές απαιτήσεις της καλλιέργειας ικανοποιούνται από το νερό της βροχής, σε άνυδρα έτη με περιορισμένη βροχόπτωση η βιομάζα είναι πάντα περισσότερη στο Agrivoltaico. Για τα έτη που η βροχόπτωση ικανοποιεί τις υδατικές ανάγκες, η βιομάζα είναι περισσότερη για συνθήκες πλήρους ηλίου. Επομένως, οι συνθήκες διαθεσιμότητας νερού στην καλλιέργεια είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση της απόδοσής της υπο σκίαση. Επίσης, η απόδοση της καλλιέργειας από χρόνο σε χρόνο στην περίπτωση πλήρους ηλίου έχει μεγάλες μεταβολές σε αντίθεση με το Agrivoltaico. Επομένως τα αγροβολταϊκά έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν σταθεροποίηση της απόδοσης κάθε χρόνο (Amaducci et al., 2018).

Στην Γερμανία ένα αγροβολταϊκό πάρκο χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά διπλής όψης και έχει τέσσερις διαφορετικές καλλιέργειες. Μια χειμερινή, το χειμερινό σιτάρι, δύο ανοιξιάτικες, πατάτα και σέλινο και μια πολυετή, το τριφύλλι. Και οι τέσσερις καλλιέργειες κάτω από τα αγροβολταϊκά αύξησαν το ύψος και την επιφάνεια των φύλλων τους. Αυτό θεωρείται τεχνική προσαρμογής στην σκίαση. Επίσης η ανάπτυξή τους καθυστερεί για μερικές μέρες λόγω της σκίασης, αλλά κατά την συγκομιδή οι διαφορές έχουν εξαφανιστεί. Ωστόσο αυτό δε μεταφράζεται πάντα και σε αύξηση ξηρής υπέργειας βιομάζας. Η απόδοση της καλλιέργειας ήταν χαμηλότερη το πρώτο έτος παρατήρησης στο αγροβολταϊκό σύστημα, ενώ το δεύτερο, που ήταν ξηρό με υψηλές θερμοκρασίες, έγινε το αντίθετο. Συγκριτικά η απόδοση συγκομιδής επηρεάστηκε περισσότερο για το χειμερινό σιτάρι, μετά για την πατάτα, το σέλινο και λιγότερο για το τριφύλλι. Σε κάθε περίπτωση και οι τέσσερις είναι καλλιέργειες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτά τα συστήματα (Weselek et al., 2021, Weselek, Bauerle, Zikeli, et al., 2021)

Στο Ορεγκον διαμορφώθηκε αγροβολταϊκό πάρκο με χαμηλό ύψος ηλιακών πάνελ ($z=1,1m$) σε ήδη υπάρχον βοσκοτόπι. Εγινε σύγκριση ανάμεσα σε μια περιοχή ελέγχου χωρίς καθόλου σκίαση και σημεία διαφορετικής σκίασης μέσα στο αγροβολταϊκό σύστημα. Τα διαφορετικά σημεία σκίασης θεωρήθηκαν ακριβώς κάτω από τα πάνελ ως "σημεία πλήρους σκίασης" και ενδιάμεσα από τις συστοιχίες των πανελ ως "σημεία σε άνοιγμα". Επειτα από την συλλογή της καλλιέργειας, παρατηρήθηκε ότι στο σημείο πλήρους σκίασης παρήγαγε 90% περισσότερη βιομάζα από το σημείο ελέγχου που δεν σκιάζεται καθόλου και 126% περισσότερη βιομάζα από το "σημείο σε άνοιγμα". Αυτή η τεράστια ανομοιογένεια στην ανάπτυξη οφείλεται στις τελείως διαφορετικές συνθήκες σκίασης. Επομένως η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών τόσο χαμηλά δεν εξυπηρετεί την διαχείριση της καλλιέργειας (Hassanpour Akeh et al., 2018)

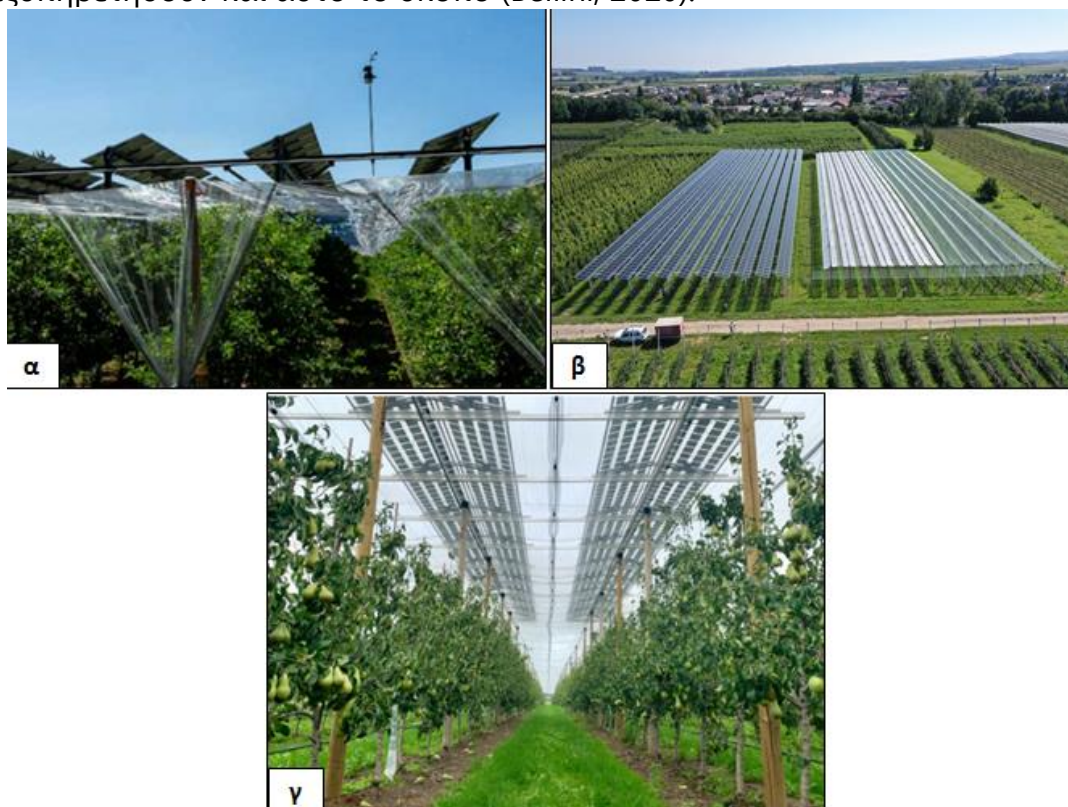
Το αμπέλι είναι μια καλλιέργεια που είναι δυνατόν να εμφανίσει παράσιτα και να επιδεινωθεί η απόδοσή τους, όταν την περίοδο ανάπτυξης τους δέχονται έντονη βροχόπτωση. Για το λόγο αυτό συχνά χρησιμοποιούνται εγκαταστάσεις σε σχήμα ομπρέλας για να απομακρύνουν το νερό από το φυτό. Στην περίπτωση των αγροβολταϊκών τα ηλιακά πάνελ μπορούν να εξυπηρετήσουν αυτό το σκοπό. Επομένως, πέρα από τα γνωστά πλεονεκτήματα ενός αγροβολταϊκού συστήματος, σε ορισμένες καλλιέργειες φαίνεται πως τα οφέλη από την συνεργασία μεταξύ των δυο λειτουργιών μπορεί να είναι παραπάνω. Σε σύγκριση με αμπέλια σε κλασικές συνθήκες, αυτά που βρίσκονται κάτω από φωτοβολταϊκά καθυστέρησαν την βλάστησή τους 1-2 ημέρες και την ανάπτυξη των σταφυλιών 7-10 μέρες (Εικόνα 2.11). Πέρα από την καθυστέρηση στην ανάπτυξη, η ποσότητα, ο χρωματισμός και η περιεκτικότητα σε ζάχαρη ήταν πολύ κοντά με τα κανονικά αμπέλια. (Cho et al., 2020) Για κάθετη τοποθέτηση των πάνελ πάνω από τα αμπέλια, υπολογίστηκε ότι με το 40-60% των φωτοβολταϊκών που θα τοποθετούνταν σε ένα κανονικό φωτοβολταϊκό πάρκο, η σκίαση στα αμπέλια είναι αμελητέα. Για να επιτευχθεί αποδεκτό ποσοστό σκίασης, ο λόγος της απόστασης συστοιχιών προς το ύψος αγροβολταϊκών πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 1,5 (Padilla et al., 2022).



Εικόνα 2.11 Αγροβολταϊκά διπλής όψης σε σταφύλια, ενσωματωμένα σε εγκατάσταση που τα προστατεύει από την βροχή (Cho,2020)

Τα τελευταία χρόνια επίσης, έχει αρχίσει να διερευνάται μια άλλη εκδοχή των αγροβολταϊκών, τα οπωροβολταϊκά (orchardvoltaics), δηλαδή τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε οπωρώνες (Matich, 2021). Στην Κίνα μελετήθηκε πειραματικά η εγκατάσταση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών που τοποθετήθηκαν τρία μέτρα πάνω από το έδαφος σε καλλιέργεια ακτινιδίων. Εγινε διερεύνηση για τρεις διαφορετικές πυκνότητες φωτοβολταϊκών με ποσοστό κάλυψης 19%(T1), 30,4%(T2) και 38%(T3). Τα αποτελέσματα της

μελέτης έδειξαν ότι με την κατάλληλη σκίαση (T1) ένα αγροβολταϊκό σύστημα δεν θα έχει σημαντικές απώλειες στην απόδοση των δέντρων (~5% μείωση), σε αντίθεση με μεγαλύτερα ποσοστά σκίασης (T2,T3) που την επηρεάζουν πολύ (20-40% μείωση) (Jiang et al., 2022). Στην Γαλλία δοκιμάστηκε σύστημα αγροβολταϊκών ύψους 5m με μηλιές(Εικόνα 5.12α). Τα φωτοβολταϊκά προσέφεραν σταθερότητα στην άνθηση των δέντρων σε αντίθεση με αυτά που βρίσκονταν υπο κανονικές συνθήκες πλήρους ηλίου. Το μέγεθος των φρούτων ήταν λιγότερο ευαίσθητο από τον αριθμό τους στην σκίαση. Ωστόσο, η παραγωγή φρούτων μειώθηκε και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την εύρεση μια διαρρύθμισης που θα είναι αποδοτική (Juillion et al., 2022). Η Γερμανία αντίστοιχα, έχει δημιουργήσει ένα πειραματικό αγροβολταϊκό πάρκο με μηλιές με διαμόρφωση των πάνελ που επιτρέπουν ή δεν επιτρέπουν στην βροχή να πέφτει στα δέντρα (Εικόνα 5.12β) (Sakharkar, 2021). Στο Βέλγιο επίσης, έχουν δοκιμάσει ημιδιαφανή πάνελ σε συνδυασμό με αχλαδιές, ένα δέντρο το οποίο χρειάζεται προστασία από χαλάζι και συχνά τοποθετούνται ειδικά δίχτυα προστασίας για την αποφυγή του (Εικόνα 2.12γ). Τα φωτοβολταϊκά βέβαια μπορούν εξυπηρετήσουν και αυτό το σκοπό (Bellini, 2020).



Εικόνα 2.12 Οπωροβολταϊκά (α) Μηλιές, Γαλλία (Juillion, 2022) (β) Μηλιές Γερμανία (ise.fraunhofer) (γ) Αχλαδιές, Βέλγιο (Bellini, 2020)

Γενικά μια βασική μέθοδος προσαρμογής των φυτών στην μείωση της ακτινοβολίας είναι να αυξάνουν την επιφάνεια των φύλων τους έτσι ώστε να μπορούν να πάρουν όσο περισσότερη μπορούν. Βέβαια αυτό δεν συμβαίνει και με τον αριθμό φύλλων, ο οποίος στην σκίαση μειώνεται. Αυτή

η προσαρμοστικότητα αποδίδει σε φυλλώδη λαχανικά ,όπως το μαρούλι, ωστόσο σε καλλιέργειες που σκοπός είναι η αξιοποίηση των καρπών τους δεν είναι εξίσου σημαντική. Αυτό δεν αποκλείει τέτοιες καλλιέργειες από το να χρησιμοποιηθούν σε αγροβολταικά συστήματα, αφού μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση της καλλιέργειας ρυθμίζοντας την σκίαση μέσω της πυκνότητας των πάνελ. Το αποδεκτό ποσοστό μείωσης της καλλιέργειας λόγω των αγροβολταικών δεν είναι συγκεκριμένο στις περισσότερες περιπτώσεις. Η Ιαπωνία από το 2013 έχει ορίσει μέγιστο ποσοστό μείωσης καλλιέργειας το 20% προκειμένου να χρηματοδοτήσει το αγροβολταικό έργο. (Toledo & Scognamiglio, 2021).

2.6 Σύστημα αγροβολταικών σε σχέση με την βροχόπτωση και τις αρδευτικές ανάγκες της καλλιέργειας

Ένα ζήτημα που προκύπτει στα αγροβολταικά, είναι το πώς επηρεάζουν το έδαφος και την καλλιέργεια σε περίπτωση βροχής. Όταν βρέχει τα σημεία που είναι κάτω από τα ηλιακά πάνελ δε βρέχονται σε αντίθεση με τα σημεία ενδιάμεσα από αυτά. Αυτό δημιουργεί ανομοιογενείς συνθήκες υγρασίας του εδάφους. Παράλληλα, λόγω της κεκλιμένης τοποθέτησης των φωτοβολταικών, η περιοχή κάτω από το χαμηλότερο σημείο των πάνελ δέχεται συσσωρευμένο νερό που μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση. Βέβαια, η υγρασία στις καλλιέργειες συχνά προκαλεί ανάπτυξη ασθενειών και μυκητιάσεων, επομένως τα αγροβολταικά μπορούν να μετριάσουν τέτοια ζητήματα. Γενικά, τα αγροβολταικά μπορούν να λειτουργήσουν προστατευτικά σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης, χαλαζιού και χιονιού, φαινόμενα που συχνά οδηγούν στην καταστροφή καλλιεργειών. (Dupaz et al., 2010, Dinesh&Pierce, 2016).

Σημαντική παράμετρος των αγροβολταικών είναι ότι έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν την αποδοτικότητα χρήσης νερού η οποία υπολογίζεται ως η παραγόμενη βιομάζα ανά μονάδα αρδευόμενου νερού που χρησιμοποιείται. Δηλαδή, αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού σημαίνει διατήρηση ή αύξηση ποσότητας παραγόμενης βιομάζας για μικρότερη ποσότητα χρησιμοποιούμενου νερού. Οι Marou et al. (2013), έδειξαν ότι κάτω από τα αγροβολταικά οι απαιτήσεις σε νερό μπορούν να μειωθούν κατά 14-29% ανάλογα με το ποσοστό σκίασης και την. Αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας που προκαλείται από την σκίαση των αγροβολταικών. Αν και η εξατμισοδιαπνοή μειώνεται σε κάθε περίπτωση καλλιέργειας και σκίασης, αυτό δεν συνεπάγεται πάντα με αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού. Για να επιτευχθεί αυτό προτείνονται καλλιεργειες με ικανότητα να καλύπτουν το έδαφος γρήγορα. Με αυτό το τρόπο μειώνεται η εξάτμιση

τους εδάφους διότι το φυτό καλύπτει μεγαλύτερη επιφάνεια και άρα εμποδίζει τη διαδικασία της εξάτμισης (Marrou, Dufour, et al., 2013).

Γενικά, τα αγροβολταϊκά αναμένεται να είναι πιο ωφέλιμα όσον αφορά την αποδοτικότητα χρήσης νερού σε περίπτωση καλλιεργειών που υποβάλλονται σε υδατική καταπόνηση. Σε προσομοιώσεις που βασίστηκαν σε δεδομένα 40 ετών οι Amaducci et al. (2016) διαπίστωσαν ότι σε καλλιέργειες μη αρδευόμενου αραβόσιτου στα αγροβολταϊκά μειώθηκε η εξάτμιση και αυξήθηκε η απόδοση της καλλιέργειας, ιδιαίτερα στα ξηρά έτη με μειωμένη βροχόπτωση.

2.7 Επίδραση του συστήματος αγροβολταϊκών στο μικροκλίμα

Η επιρροή των αγροβολταϊκών στο μικροκλίμα δεν έχει μελετηθεί εκτενώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πειραματικές διατάξεις δεν συμφωνούν πάντα μεταξύ τους. Μερικές παράμετροι που έχουν ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό, είναι η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, ο άνεμος, καθώς και η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους.

Σύμφωνα με τους Marrou et al η θερμοκρασία του αέρα δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη φωτοβολταϊκών. Παρατηρείται βέβαια ότι τις μέρες με χαμηλή ταχύτητα ανέμου ή περισσότερη ακτινοβολία υπάρχει μια τάση η θερμοκρασία κάτω από τα πάνελ να είναι υψηλότερη. Αντίθετα, οι τιμές που προκύπτουν από διάταξη που έχει στηθεί στην Νοτιοδυτική Γερμανία δείχνουν ότι η θερμοκρασία κοντά στα πάνελ είναι περίπου 1°C χαμηλότερη, με αυτή τη διαφορά να είναι εντονότερη την περίοδο του καλοκαιριού. Στο Ορεγκον σε έκταση με βοσκοτόπια και χαμηλά αγροφωτοβολταϊκά τοποθετημένα σε ύψος 1,1m, μετρήσεις της θερμοκρασίας που έγιναν σε 4 υψόμετρα (0,5, 1,2, 2 και 2,7m) έδειξαν ότι κοντά στην επιφάνεια των πάνελ η θερμοκρασία είναι ελαφρώς υψηλότερη, ενώ κοντά στο έδαφος και πάνω από το φωτοβολταϊκό το αντίθετο. Και για τις τέσσερις μετρήσεις η διαφορά της θερμοκρασίας με ή χωρίς φωτοβολταϊκά είναι μικρότερη από 0,5°C. (Marrou H, Guillioni et al., 2013, Weselek et al., 2021, Hassanpour Adeh et al., 2018)

Ως προς την υγρασία του αέρα, τα αποτελέσματα από τις πειραματικές διατάξεις εμφανίζονται επίσης αντικρουόμενα. Στη μελέτη στη Γερμανία λόγω των αγροβολταϊκών η υγρασία φαίνεται, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες, να αυξάνεται, ενώ στο Ορεγκον να μειώνεται. Και στις δύο περιπτώσεις η μεταβολή της τιμής της υγρασίας είναι της τάξης 2%. Αντίστοιχα για την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου δεν υπάρχει σαφές

συμπέρασμα, με τις τιμές να επηρεάζονται περίπου ± 0.3 m /s. (Weselek et al., 2021, Hassanpour Adeh et al., 2018)

Ενδιαφέρουσα είναι η επίδραση των αγροβολταϊκών στην υγρασία του εδάφους, μια παράμετρο σημαντική για την ανάπτυξη των καλλιιεργειών. Σε μη αρδευόμενα βοσκοτόπια παρατηρήθηκε ότι το σημείο ενδιάμεσα από δύο συστοιχίες πάνελ ξηραίνεται γρηγορότερα από το σημείο εκτός του αγροφωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτό είναι ένα απροσδόκητο αποτέλεσμα αφού αυτές οι δύο περιοχές λαμβάνουν την ίδια ακτινοβολία. Σε σημείο ακριβώς κάτω από τα πάνελ η υγρασία του εδάφους διατηρείται σε ικανοποιητικό επίπεδο καθ'όλη την διάρκεια ανάπτυξης της καλλιέργειας. Ο διαφορετικός ρυθμός με τον οποίο το έδαφος ξηραίνεται σε διάφορα σημεία του συστήματος δημιουργεί μια ανεπιθύμητη ανομοιομορφία στην υγρασία του εδάφους. Αντικρουόμενα αποτελέσματα προκύπτουν σε μη αρδευόμενες καλλιέργειες σιταριού, πατάτας, τριφυλλιού και σελινόριζας στην Γερμανία όπου η υγρασία του εδάφους μειώνεται σημαντικά κάτω από τα πάνελ. Αυτό είναι επίσης ένα μη αναμενόμενο αποτέλεσμα διότι λόγω της μικρότερης εξατμισοδιαπνοής κάτω από τα πάνελ η υγρασία αναμενόταν να είναι αυξημένη. (Weselek et al., 2021, Hassanpour Adeh et al., 2018)

2.8 Αγροβολταϊκά στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, αν και η ηλιακή ενέργεια κατέχει σημαντικό ποσοστό στο ενεργειακό της μίγμα, τα αγροβολταϊκά δεν έχουν εφαρμοστεί σχεδόν καθόλου. Εξάριση αποτελούν δύο μονάδες φωτοβολταϊκών, μια στην Θράκη και μια στην Πελοπόννησο.

Το φωτοβολταϊκό έργο Πεζουλιώτικα στην Θράκη, εγκατεστημένης ισχύος 3,5MW, είναι το πρώτο που συνδύασε τις αγροτικές εργασίες με τα φωτοβολταϊκά. Αν και ο σχεδιασμός του φωτοβολταϊκού πάρκου δεν έγινε για αυτό τον σκοπό, από το 2016 και μετά χρησιμοποιείται και ως βοσκοτόπι. Τα πρόβατα καταναλώνοντας το γρασίδι, εξασφαλίζουν ότι αυτό δεν θα παρεμποδίσει την λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται τα έξοδα συντήρησης του εδάφους και παράλληλα ευνοείται η τοπική κτηνοτροφία. (Enel Green Company, n.d.)

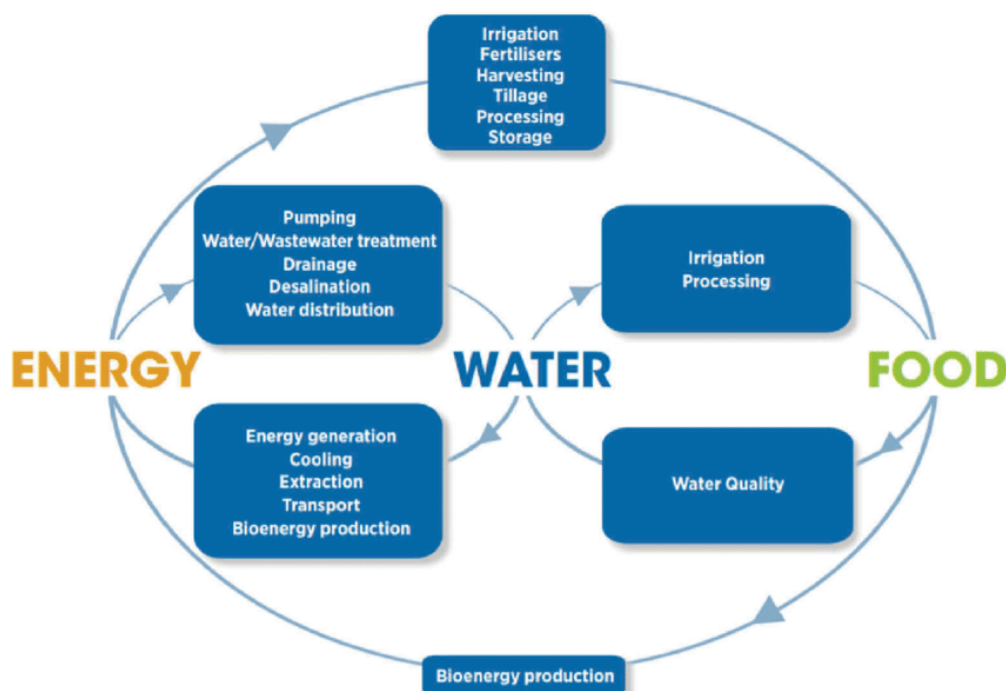
Στο άλλο φωτοβολταϊκό έργο στο Κούρτεσι Ηλείας, τα φωτοβολταϊκά είναι τοποθετημένα σε ύψος 2-2,5m και μελετήθηκε η καλλιέργεια μιας σειράς αρωματικών φυτών ειδών όπως θυμάρι, ρίγανη, δεντρολίβανο και τσάι του

βουνού. Οι δοκιμές έγιναν το 2021 μέχρι το καλοκαίρι του 2022 από την εταιρία Enel Green Company σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Νάπολης Federico II. (Enel Green Company, n.d.)

Στην Θεσσαλονίκη επίσης, το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο μελέτησε την επίδραση οργανικών φωτοβολταϊκών τοποθετημένα στην σκεπή θερμοκηπίου σε πιπεριές. Για κάλυψη του 22% της σκεπής του θερμοκηπίου οι πιπεριές παρήγαγαν 20,2% περισσότερη μάζα φρούτων και αύξησαν το ύψος τους κατά 21,8% σε σχέση με πιπεριές σε θερμοκήπιο που δεν είχαν τοποθετηθεί φωτοβολταϊκά στην σκεπή του (Zisis et al., 2019)

3. Θεωρητικό υπόβαθρο

Με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, την ταχεία αστικοποίηση, την αλλαγή διατροφικών συνθηκών και την οικονομική ανάπτυξη αυξάνονται οι απαιτήσεις τροφής, νερού και ενέργειας. Αυτά τα τρία αγαθά είναι απαραίτητα για τον άνθρωπο και είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ένας βιώσιμος τρόπος διαχείρισης και εξασφάλισης τους, λαμβάνοντας υπόψη παράλληλα και την φύση και την οικονομία. Ο τρόπος με τον οποίο αλληλοεπιδρούν τα τρία στοιχεία είναι πολύπλοκος και δυναμικός, άλλοτε με συνεργατικό και άλλοτε με ανταγωνιστικό χαρακτήρα (Εικόνα 3.1). Παράλληλα, το πλέγμα νερού-τροφής-ενέργειας (ΠΝΤΕ) συνδέεται άμεσα με τις ανταγωνιστικές χρήσεις γης, εφόσον η συλλογή νερού και η παραγωγή τροφής και ενέργειας απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης.



Εικόνα 3.1 Αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων του ΠΝΤΕ (Mohtar & Daher, 2012 by IRENA 2015)

Τα αγροβελταϊκά είναι μια τεχνολογία που λειτουργεί κατά του ανταγωνισμού που έχουν το νερό, η τροφή και η ενέργεια μεταξύ τους, αλλά και στο ανταγωνισμό που έχουν για την αξιοποίηση μια έκτασης. Η ενέργεια και η τροφή δεν ανταγωνίζονται για την γη, αλλά την χρησιμοποιούν ταυτόχρονα. Επίσης οι νέες συνθήκες μικροκλίματος που δημιουργούν τα αγροβελταϊκά ελαττώνουν τις αρδευτικές ανάγκες. Άρα, τα

αγροβολταϊκά αναμειγνύονται και με τα τρία στοιχεία του πλέγματος νερό-τροφή-ενέργεια (ΠΝΤΕ)

- Νερό: Μείωση αρδευτικών αναγκών λόγω μειωμένης εξατμισοδιαπνοής
- Τροφή: Παραγωγή τροφής μέσω φωτοσύνθεσης
- Ενέργεια: Παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών

Κοινός παρονομαστής σε όλες τις διαδικασίες που συμβαίνουν στα αγροβολταϊκά είναι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μέσω της οποίας γίνεται η φωτοσύνθεση, η ηλεκτροπαραγωγή και η εξατμισοδιαπνοή.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τον υπολογισμό διάφορων παραμέτρων απόδοσης των αγροβολταϊκών: η ηλιακή ενέργεια και ο τρόπος υπολογισμού της, καθώς και η σχέση που έχουν τα αγροβολταϊκά με κάθε στοιχείο του ΠΝΤΕ.

3.1 Ηλιακή ακτινοβολία και ενεργειακό ισοζύγιο

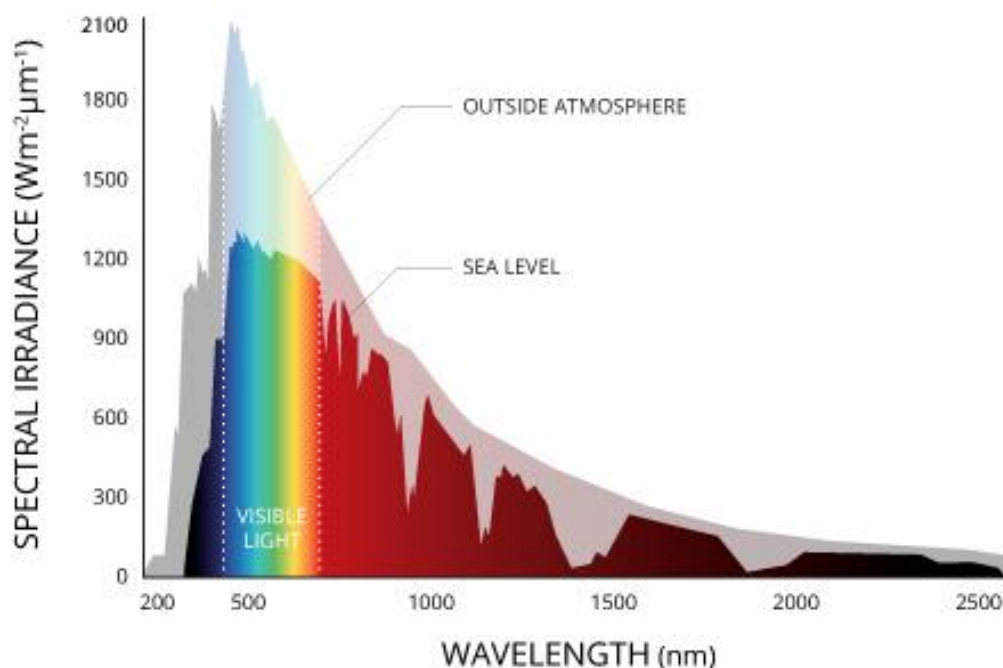
Ηλιακή ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο. Παρέχει φως και θερμότητα για την Γη, καθώς και ενέργεια για φωτοσύνθεση. Το κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που φτάνει στη γη από τον ήλιο ανήκει σε μήκη κύματος από 100 nm μέχρι 1 mm. Αυτά αντιπροσωπεύουν την υπέρυθη ακτινοβολία, το ορατό φως και την υπεριώδη ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία κυμαίνεται σε μήκη κύματος 100-400nm, το ορατό φως 400nm-700nm και η υπέρυθη ακτινοβολία πάνω από 700nm.

Η ηλιακή ακτινοβολία χωρίζεται σχεδόν ισάξια σε υπέρυθη (47%) και ορατό φως (44%) ενώ ένα μικρό μέρος της ανήκει και στην υπεριώδη (9%) (Εικόνα 3.2)

Ο ήλιος παράγει ισχύ τιμής $3,91 \cdot 10^{23}$ kW. Η μέση απόσταση Γης-Ηλίου είναι $149 \cdot 10^6$ km. Η ποσότητα της ενέργειας σε επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ηλίου, που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας, ονομάζεται ηλιακή σταθερά και ισούται με 1367 W/m^2

Η ηλιακή ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στα όρια της ατμόσφαιρας δέχεται ελάχιστες απώλειες. Εισχωρώντας στην ατμόσφαιρα ανακλάται και απορροφάται και επομένως μέχρι να φτάσει στο έδαφος μειώνεται. Το

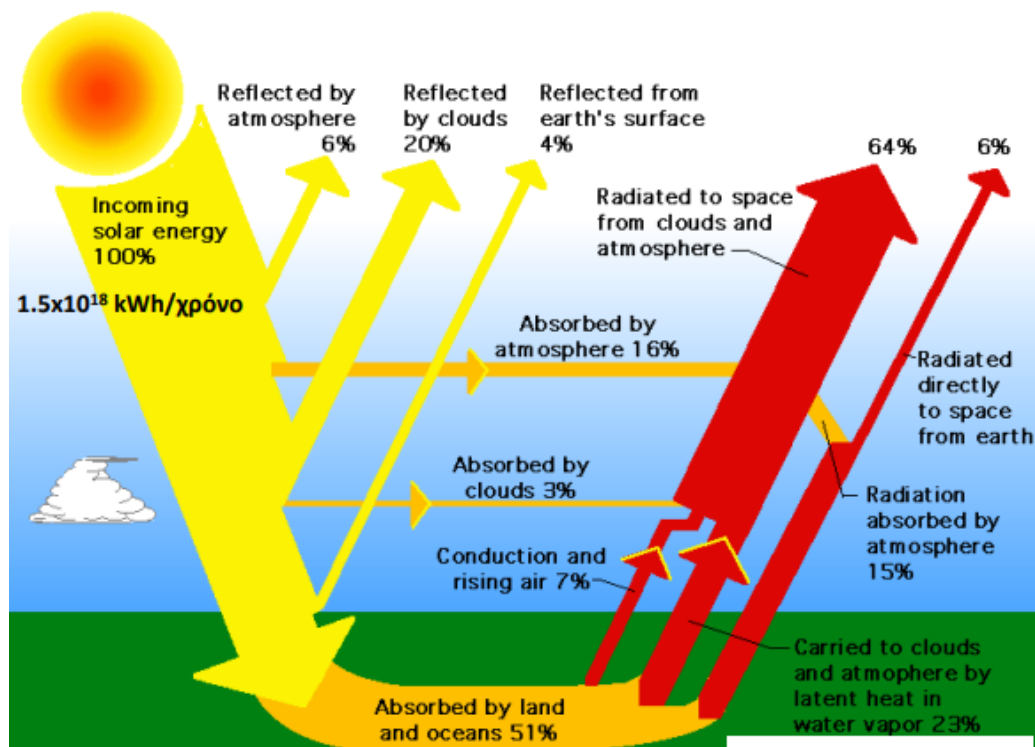
μέγεθος της μείωσης εξαρτάται από την σύσταση της ατμόσφαιρας. Ο πιο καθοριστικός παράγοντας μείωσης είναι η νέφωση. (Μπαλάρας et al., 2006)



Εικόνα 3.2 Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολία (fondriest.com)

Μελετώντας το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης ορίζεται ότι μέσω του ηλίου εισρέουν στην ατμόσφαιρα 100 ενεργειακές μονάδες. Από αυτές, 30 ανακλώνται στην ατμόσφαιρα, στα νέφη και στην επιφάνεια της γης. Επίσης 19 μονάδες απορροφώνται από την ατμόσφαιρα και τα νέφη. Μένουν άρα 51 μονάδες οι οποίες απορροφώνται από την ξηρά και την θάλασσα. Παράλληλα, η γη εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία, που αντιστοιχεί σε 117 ενεργειακές μονάδες. Από αυτές, 6 μονάδες επιστρέφουν απευθείας στην ατμόσφαιρα. Οι υπόλοιπες απορροφώνται από τα αέρια του θερμοκηπίου και τα σύννεφα και είτε επανεκπέμπονται στο διάστημα (64 ενεργειακές μονάδες) είτε επιστρέφουν στη γη (96 μονάδες). Αυτή η επανεκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας στη γη είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Εικόνα 3.3).

Από το παραπάνω ενεργειακό ισοζύγιο προκύπτει ότι στην επιφάνεια της γης υπάρχει κέρδος 30 ενεργειακών μονάδων. Αυτές επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα με δύο τρόπους. Είτε μέσω αγωγής θερμότητας, αισθητή θερμότητα, (7 μονάδες), είτε μέσω εξάτμισης τους νερού, λανθάνουσα θερμότητα (23 μονάδες) (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).



Εικόνα 3.3 Ενεργειακό ισοζύγιο Γης (NASA GPM, gpm.nasa.gov)

3.1.1 Ηλιακή γεωμετρία

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας εξαρτάται από την θέση της Γης σε σχέση με τον Ήλιο. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα μεγέθη που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της

- Ηλιακή απόκλιση $\delta(^{\circ})$

Η ηλιακή απόκλιση είναι το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο οι ακτίνες πέφτουν κάθετα το μεσημέρι. Μεταβάλλεται συνεχώς αλλά μπορεί να θεωρηθεί σταθερό για μια ημέρα διότι η μέγιστη ημερήσια μεταβολή της ηλιακής απόκλισης μπορεί να είναι $0,5^{\circ}$. Οι μέγιστη τιμή που παίρνει κατά την διάρκεια του έτους είναι $\pm 23,5^{\circ}$.

$$\delta = -0,409 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} + 0,16\right) \quad (3.1)$$

Όπου J ο αριθμός της ημέρα του χρόνου

- Ωριαία γωνία $\omega(^{\circ})$

Η Γη κάνει μια περιστροφή την ημέρα, γυρίζοντας με ρυθμό 15° . Η ωριαία γωνία είναι η γωνιακή απόσταση από την ηλιακή μεσημβρία. Στην ηλιακή μεσημβρία η ωριαία γωνία είναι μηδενική, τις πρωινές ώρες παίρνει θετικές τιμές και τις απογευματινές αρνητικές.

$$\omega = (\Omega - 12) * 15^\circ \quad (3.2)$$

Όπου Ω η ώρα της ημέρας

- Ωριαία γωνία δύσης/ανατολής ω_s ($^\circ$)

$$\omega_s = \pm \cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad (3.3)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος.

Το θετικό πρόσημο αντιστοιχεί στην Δύση, ενώ το αρνητικό στην ανατολή

- Ζενιθιακή γωνία θ_z ($^\circ$)

Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας παρατηρητή-ηλίου. Παίρνει τιμές από $0-90^\circ$.

$$\cos\theta_z = (\sin\delta * \sin\varphi) + (\cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega) \quad (3.4)$$

- Ηλιακό ύψος α ($^\circ$)

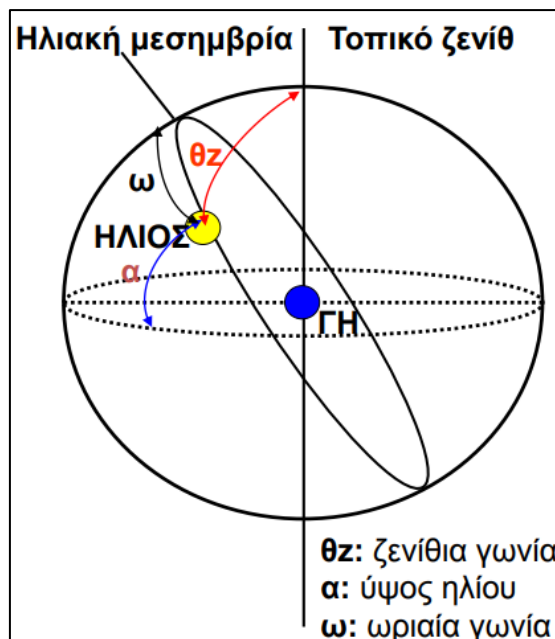
Το ηλιακό ύψος είναι η συμπληρωματική γωνία της ζενιθιακής. Μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του έτους και το χειμώνα παίρνει μικρότερες τιμές σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες ($0 \leq \alpha \leq 90$).

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (3.5)$$

- Συνολικές ώρες ηλιοφάνειας N

Οι ώρες μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου

$$N = 2 * \frac{\omega_s}{15} \quad (3.6)$$



Εικόνα 3.4 Γωνίες μεταξύ του ηλίου και ενός παρατηρητή στην επιφάνεια της γης

3.1.2 Ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμοσφαιράς

Η εξωγήινη ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας εξαρτάται από την μέρα του χρόνου και από το γεωγραφικό πλάτος μια περιοχής. Για οποιαδήποτε χρονική στιγμή μεταξύ ανατολής και δύσης η ηλιακή ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο στα όρια της ατμόσφαιρας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$G_o = I * dr * \cos(\theta z) = I * dr * (\sin\delta * \sin\varphi) + (\cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.7)$$

- I: Ηλιακή σταθερά 1367W/m
- φ: Γεωγραφικό μήκος
- dr: Εκκεντρότητα

$$dr = 1 + 0,034 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J - 0,05\right) \quad (3.8)$$

Η ημερήσια τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_o = \frac{24 * 3600}{\pi} * I * dr * (\cos\varphi * \cos\delta * \sin\omega_s + \omega_s * \sin\varphi * \sin\delta) \quad [\text{J/m}^2] \quad (3.9)$$

Για τον υπολογισμό της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα μιας ώρας ή την περίοδο ανάμεσα σε δύο ωριαίες γωνίες ω_1, ω_2 :

$$I_o = \frac{12 * 3600}{\pi} * I * dr * (\cos\varphi * \cos\delta * (\sin\omega_2 - \sin\omega_1)) + ((\sin\omega_2 - \sin\omega_1) * \sin\varphi * \sin\delta) \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2}\right] \quad (3.10)$$

3.1.3 Ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος είναι άμεση και διάχυτη. Άμεση ορίζεται η ακτινοβολία η οποία δεν έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και έτσι η κατεύθυνση της είναι σταθερή όπως προέρχεται από τον ήλιο. Η άμεση ακτινοβολία που φτάνει σε ένα σημείο του εδάφους εξαρτάται από:

- Την απορρόφηση και την διάχυση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα
- Ύψος του ήλιου
- Γεωγραφικό πλάτος περιοχής
- Κλίση επιφάνειας
- Απόσταση Ηλίου-Γης

- Απόκλιση του ηλίου

Η διάχυτη ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης με διαφορετική από την αρχική της κατεύθυνσή λόγω της σκέδασης που έχει υποστεί στην ατμόσφαιρα. Καθώς εισέρχεται η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα απορροφάται, διαχέεται και ανακλάται από μόρια του αέρα, υδρατμούς, σύννεφα, σκόνη και ρύπους. Σε περίπτωση έντονης νέφωσης μια μέρα η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος είναι κατά κύριο λόγο, ή και αποκλειστικά, διάχυτη. Ωστόσο, και τις μέρες χωρίς σύννεφα που το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας είναι υψηλό, υπάρχει πάντα ένα ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας που είναι διάχυτη. Αυτό το ποσοστό είναι περίπου 25% και προκύπτει από το ότι η ακτινοβολία σκεδάζεται πέρα από τα σύννεφα και σε μόρια του αέρα. Σε περίπτωση που η ατμόσφαιρα είναι καθαρή το μεγαλύτερο μέρος της ολικής ακτινοβολίας είναι άμεση και είναι περίπου το 75% της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας (Mamassis et al., 2012, Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Η ποσότητα της ακτινοβολίας που μένει στο έδαφος βέβαια δεν είναι το άθροισμα της ολικής και της διάχυτης αλλά ένα ποσοστό αυτού. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μέρος την ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια της γης. Η ανακλαστικότητα εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και εκφράζεται από την λευκαύγεια (albedo) Τυπικές τιμές της λευκαύγειας για διαφορετικές επιφάνειες είναι:

- Καλλιέργειες 0,15-0,3
- Καλλιέργειες Ελλάδα τυπική τιμή 0,25
- Δενδρώδεις καλλιέργειες 0,15-0,18
- Γρασίδι 0,25-0,3

Άρα η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος εξαρτάται από το ποσοστό νέφωσης και την ανακλαστικότητα του εδάφους και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_n = (1 - a) * f_s * S_o \quad [J/m^2] \quad (3.11)$$

- α: λευκαύγεια

- f_s: Συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα.

Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_s = a_s + \frac{n}{N} * b_s \quad (3.12)$$

- a_s, b_s : Παράμετροι που υποδεικνύουν το ποσοστό συμμετοχής άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που έχουν τυπικές τιμές 0,25 και 0,5 αντίστοιχα
- n/N : Σχετική ηλιοφάνεια. N είναι οι θεωρητικές ώρες ηλιοφάνειας κατά την διάρκεια μια μέρας και n οι πραγματικές ώρες ηλιοφάνειας. Μια μέρα με πολύ έντονη συννεφιά ο λόγος n/N είναι σχεδόν μηδέν ενώ μια μέρα χωρίς συννεφιά είναι κοντά στη μονάδα.

3.1.4 Ακτινοβολία μακρών κυμάτων που εκπέμπεται από το έδαφος

Από το έδαφος εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μακρών κυμάτων προς την ατμόσφαιρα. Στην συνέχεια μέρος αυτής επανεκπέμπεται στο έδαφος από μόρια του αέρα και σύννεφα. Μένει επομένως στο έδαφος η καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων L_n , που είναι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μείον αυτής που γύρισε πίσω. Η τιμή της καθαρής ακτινοβολίας μακρών κυμάτων εξαρτάται από την θερμοκρασία, την υγρασία και την σχετική ηλιοφάνεια. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$L_n = \varepsilon_n * f_L * \sigma * (T + 273)^4 \quad \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3.13)$$

- ε_n : καθαρή ικανότητα εκπομπής

$$\varepsilon_n = a_e - b_e * \sqrt{e} \quad (3.14)$$

a_e, b_e : Παράμετροι με τυπικές τιμές κατά Penman 0,56 και 0,08

e : Τάση ατμών σε hPa

- f_L : Συντελεστής μείωσης λόγω νέφωσης

$$f_L = a_L + b_L * \frac{n}{N} \quad (3.15)$$

$a_L = 0,1$ και $b_L = 0,9$ κατά Penman

- σ : Σταθερά του νόμου θερμικής εκπομπής μελανού σώματος με τιμή

$$\sigma = 5,6697 * 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$$

- T : Η θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$)

Τέλος, η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας είναι:

$$R_n = S_n - L_n \quad (3.16)$$

3.2 Παραγωγή ενέργειας στα αγροβολταϊκά

Η ενέργεια στα αγροβολταϊκά παράγεται μέσω φωτοβολταϊκών. Τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και παράγουν συνεχές ρεύμα. Φυσικά δεν μετατρέπουν ολόκληρη την ηλιακή ενέργεια που δέχονται αλλά ένα μέρος αυτής, ωστόσο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πάρα πολύ μεγάλη, οπότε ένα μέρος της είναι αρκετό για να παραχθεί σημαντική ποσότητα ρεύματος. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική εξαρτάται από τον συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών. Η τεχνολογία των ηλιακών πάνελ είναι ραγδαία εξελισσόμενη και την τελευταία δεκαετία ο συντελεστής απόδοσης έχει αυξηθεί από 15% σε τιμές άνω του 20%. Αυτή η αύξηση αναμένεται να συνεχιστεί.

Επομένως για τον υπολογισμό της ενέργειας που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πολλαπλασιάζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με τον συντελεστή απόδοσης και την επιφάνεια του ηλιακού πάνελ:

$$P_{\text{φωτοβολταϊκού}} = I * e * A_{\Phi} \quad (3.17)$$

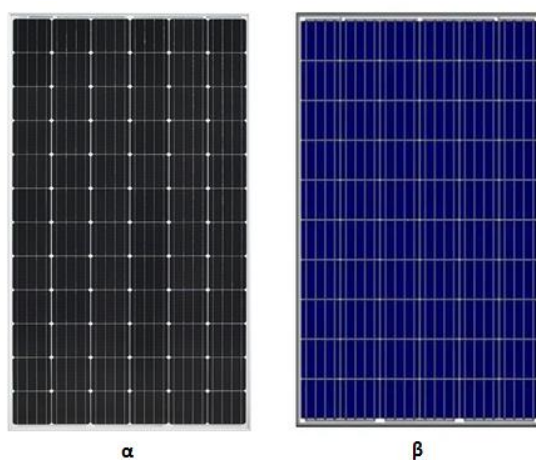
- I: Ηλιακή σταθερά 1367 W/m²
- e: συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού
- A_Φ: Επιφάνεια ηλιακού πάνελ

Ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του φωτοβολταϊκού. Σχεδόν όλα τα φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από πυρίτιο. Οι δύο πιο δημοφιλείς τύποι είναι τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά. Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ χρησιμοποιούν πυρίτιο υψηλής καθαρότητας και έχουν μαύρο χρώμα (Εικόνα 3.5α). Η απόδοσή τους είναι πιο υψηλή από τα πολυκρυσταλλικά αλλά είναι πιο ακριβά. Τα πολυκρυσταλλικά πάνελ που χρησιμοποιούν πυρίτιο όχι τόσο μεγάλης καθαρότητας έχουν μπλε χρώμα (Εικόνα 3.5β). Η τιμή τους είναι πιο χαμηλή από τα μονοκρυσταλλικά πάνελ και συμπεριφέρονται λίγο καλύτερα σε μεγάλες θερμοκρασίες. Ωστόσο λόγω της χαμηλότερης απόδοσης όταν ο χώρος είναι περιορισμένος πιθανά να συμφέρει η επιλογή μονοκρυσταλλικών πάνελ. (Solar Mag, 2022)

Η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών. Ένα μέρος της ακτινοβολίας που φτάνει στα πάνελ

μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα ενώ η υπόλοιπη μένει με την μορφή θερμότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει τον συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού γραμμικά και η τιμή της μείωσης εξαρτάται από τον θερμικό συντελεστή κάθε φωτοβολταϊκού. Ο θερμικός συντελεστής είναι το ποσοστό της μείωσης της απόδοσης του φωτοβολταϊκού για κάθε βαθμό άνω των 25°C. Στην περίπτωση των αγροβολταϊκών η παρουσία καλλιεργειών δημιουργεί ένα μικροκλίμα που σε περίπτωση καύσωνα μειώνει τις αρνητικές επιδράσεις της θερμοκρασίας. (Dubey et al., 2013)

Επίσης αρνητική επίδραση στην απόδοση των φωτοβολταϊκών έχει η συσσώρευση σκόνης στην επιφάνεια τους. Στα αγροβολταϊκά τα ηλιακά πάνελ τοποθετούνται σε μεγάλο ύψος ωστόσο οι αγροτικές εργασίες και τα μηχανήματα που περνάνε από κάτω είναι πιθανό να δημιουργούν σκόνη στην ατμόσφαιρα. Είναι πολύ σημαντικό να γίνεται η απαραίτητη συντήρηση και τα πάνελ να καθαρίζονται τακτικά. Σε περίπτωση αρδευόμενης καλλιέργειας είναι δυνατόν ο καθαρισμός των πάνελ να συνδυάζεται με το σύστημα άρδευσης. (Hussain et al., 2017)



Εικόνα 3.5 (α): Πολυκρυσταλλικό πάνελ (β): μονοκρυσταλλικό πάνελ (aydinlatma.org)

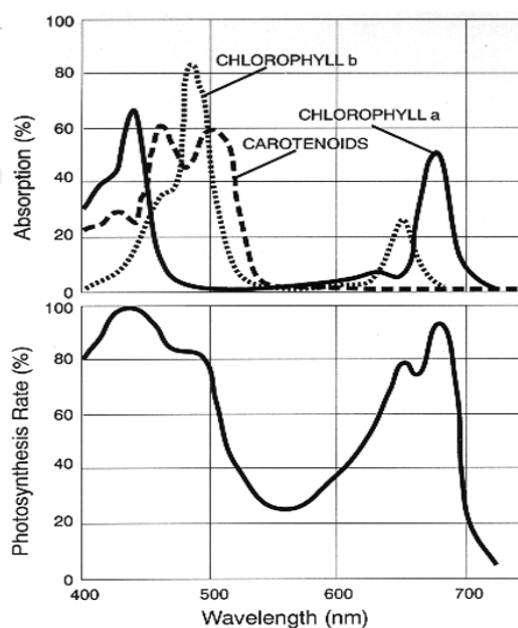
3.3 Παραγωγή καλλιεργειών στα αγροβολταϊκά

Για την ανάπτυξη των καλλιεργειών η πιο σημαντική διαδικασία είναι η φωτοσύνθεση. Κατά την φωτοσύνθεση τα φυτά, μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε οργανικές ουσίες, κυρίως υδατάνθρακες, απαραίτητες για την ανάπτυξη και την συντήρησή τους. Αυτή την μετατροπή την κάνουν με την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την βιομάζα και την απόδοση παραγωγής μια καλλιέργειας

καθώς και την ποιότητά της. Στα αγροβολταιϊκά ο βασικός περιοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη των καλλιεργειών είναι η μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία που προκαλείται από την σκίαση των φωτοβολταιϊκών.

Η ικανότητα ενός φυτού να συλλέγει ηλιακή ακτινοβολία είναι ανάλογη με την επιφάνεια των φύλλων της. Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το φυτό είναι άμεση και διάχυτη. Τα φύλλα που βρίσκονται υψηλότερα λαμβάνουν και τους δύο τύπους, ενώ αυτά που βρίσκονται χαμηλότερα απορροφούν μικρό μέρος της άμεσης ακτινοβολίας. Η διάχυτη ακτινοβολία δηλαδή γίνεται πιο σημαντική στα χαμηλότερα φύλλα λόγω της ακτινοβολίας που διαχέεται και ανακλάται από τα υπόλοιπα φύλλα και το έδαφος. (Campillo et al., 2012)

Από το σύνολο της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που δέχονται τα φυτά είναι συγκεκριμένα μήκη κύματος τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν. Αυτά τα μήκη κύματος είναι 400nm με 700nm δηλαδή σχεδόν συμπίπτουν με το ορατό φως. Η ακτινοβολία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά ονομάζεται Φωτοσυνθετικά Ενεργός Ακτινοβολία (Photosynthetically active radiation PAR) και προσεγγιστικά είναι το 50% της συνολικής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Ακόμα και για τα μήκη κύματος που συμπεριλαμβάνονται στην ακτινοβολία φωτοσύνθεσης οι διάφορες ουσίες του φυτού αποκρίνονται διαφορετικά για ορισμένες περιοχές του φάσματος. Η χλωροφύλλη είναι η κύρια χρωστική ουσία που απορροφά το φως και αξιοποιεί καλύτερα μήκη κύματος στην περιοχή 400-500 και 600-700 ενώ για 500-600 έχει πολύ χαμηλή δυνατότητα απορρόφησης (Εικόνα 3.6) Environmental Monitor, 2022)



Εικόνα 3.6 Απορρόφηση ακτινοβολίας από διάφορες ουσίες του φυτού (Whitmarsh and Govindjee, 1999)

Ανάλογα με την διαδικασία φωτοσύνθεσης που ακολουθούν, τα φυτά χωρίζονται σε κατηγορίες C3 και C4. Τα φυτά C3 μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα σε 3-φωσφογλυκερικό οξύ. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν σιτηρά, δημητριακά, λαχανικά όπως πατάτες, ντομάτες, σπανάκι και δέντρα όπως μήλο, ροδάκινο κ.α. Η πλειοψηφία των φυτών που χρησιμοποιούνται για την ανθρώπινη διατροφή είναι φυτά C3. Τα φυτά C4 κατά τη φωτοσύνθεση μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα σε ουσίες με τέσσερα άτομα άνθρακα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν ορισμένα είδη φυτών των βοσκότοπων, το καλαμπόκι το ζαχαροκάλαμο κ.α. Η φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών C3 είναι μικρότερη από τη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών C4. Αυτό οφείλεται στη φωτοαναπνοή που παρατηρείται στα φυτά C3, δηλαδή την έκλυση μέρους του διοξειδίου του άνθρακα που είχε δεσμευθεί, η οποία είναι αμελητέα στα φυτά C4 (Wang et al., 2012).

Για τον υπολογισμό της απόδοσης των καλλιεργειών στην περίπτωση των αγροβολταϊκών, υπολογίζεται η μείωση που προκαλεί η σκίαση των φωτοβολταϊκών στην παραγόμενη ξηρή βιομάζα. Η σχέση της βιομάζας καλλιεργειών με την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία έχει θεωρηθεί σε διάφορες μελέτες γραμμική κατά προσέγγιση (Gallagher and Biscoe, 1978; GOSSE et al., 1986, 1986; Sinclair et al., 1992). Η κλίση αυτής της σχέσης ονομάζεται συνήθως αποδοτικότητα χρήσης ακτινοβολίας (Radiation Use Efficiency RUE). Στην παρούσα εργασία για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές RUE που δίνονται από τους Gnosse et al:

$$DM = RUE * PARa \quad (3.18)$$

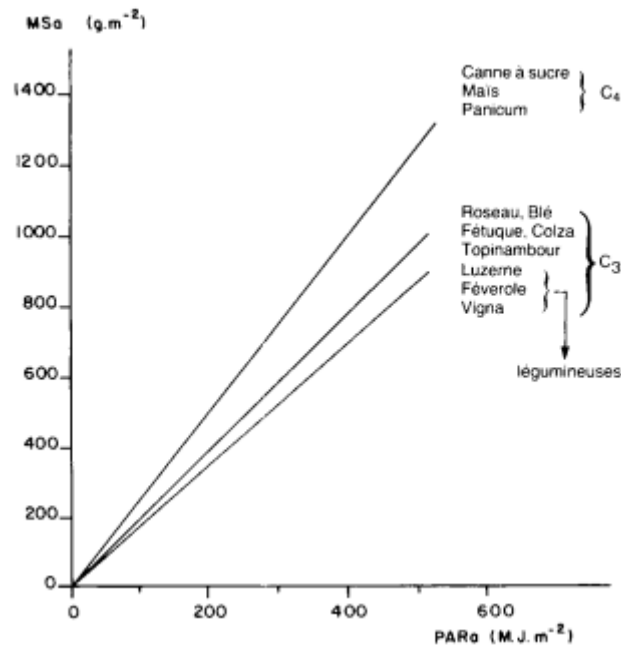
- DM: Ξηρή ουσία (Dry matter) σε g/m²
- PARa: Ακτινοβολία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιομάζας (MJ/m²)
- RUE: εξαρτάται από τον τύπο καλλιέργειας και την ικανότητα της να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα.

Η σχέση ανάμεσα στην ξηρή ουσία και την ακτινοβολία είναι γραμμική. Οι Gnosse et al ομαδοποίησαν την συμπεριφορά των καλλιεργειών σε 3 κατηγορίες. Τα φυτά C4, και χώρισαν τα φυτά C3 σε δύο υποκατηγορίες: τα όσπρια και όλα τα υπόλοιπα (Εικόνα 3.7). Η τιμή της RUE για αυτές τις τρεις κατηγορίες είναι:

- C4: RUE=2,51

- C3: RUE=1,93
- C3 όσπρια: RUE=1,72

Βέβαια κάθε καλλιέργεια που ανήκει σε αυτές τις κατηγορίες έχει συγκεκριμένη τιμή RUE. Παραπάνω αναφέρθηκε ο μέσος όρος τους.



Εικόνα 3.7 Τυπικές θεωρητικές σχέσεις μεταξύ υπέργειας βιομάζας και αναχαιτισμένης ηλιακής ακτινοβολίας για τα είδη C4 και C3 (Gosse et al. 1986)

3.4 Άρδευση των καλλιεργειών των αγροβολταϊκών

3.4.1 Τρόποι άρδευσης και υπολογισμός υδατικών αναγκών

Η οργάνωση της άρδευσης της καλλιέργειας που βρίσκεται σε ένα σύστημα αγροβολταϊκών τροποποιείται σε σχέση με την άρδευση μια κλασικής καλλιέργειας. Αρχικά πρέπει να ληφθεί υπόψιν η παρουσία των ηλιακών πάνελ και να επιλεγθεί μια κατάλληλη τεχνική άρδευσης και επίσης να υπολογιστούν οι μεταβολές στις υδατικές απαιτήσεις.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες άρδευσης. Η επιφανειακή, ο καταιονισμός, ο καταιονισμός με αυτοπροωθούμενα συστήματα και η μικροάρδευση. Στην επιφανειακή άρδευση παρέχεται μεγάλη ποσότητα νερού, δημιουργώντας λεκάνες ή ρυάκια και το νερό αφήνεται να διηθηθεί. (Εικόνα 3.8α) Στον καταιονισμό, η άρδευση γίνεται με εκτοξευτήρες, κατανέμοντας το νερό πιο ομοιόμορφα στις καλλιέργειες (Εικόνα 3.8β). Η

άρδευση αυτοπροωθούμενου καταιονισμού χρησιμοποιεί μηχανήματα με εκτοξευτήρες και μειώνουν τα εργατικά χέρια που απαιτούνται για την γεωργία(Εικόνα 3.8γ). Η μικροάρδευση μπορεί να είναι με σταγόνες (στάγδην), με μικροεκτοξευτήρες, είτε υπόγεια με σταγόνες και χρησιμοποιεί την λιγότερη ποσότητα νερού καθώς και την χαμηλότερη πίεση. (Εικόνα 3.8δ)

Η επιφανειακή άρδευση και ο καταιόνισμος με αυτοπροωθούμενο μηχανήματα δεν θα ήταν πρακτικοί τρόποι άρδευσης για αγροβολταϊκά. Στην επιφανειακή άρδευση το νερό λιμνάζει και αυτό θα ήταν πρόβλημα για την θεμελίωση των στύλων. Στον αυτοπροωθούμενο καταιονισμό κατά την πορεία των μηχανημάτων οι στύλοι θα αποτελούσαν εμπόδια. Συνήθως στα αγροβολταϊκά εφαρμόζεται η στάγδην άρδευση, που έχει τον καλύτερο έλεγχο στην ποσότητα νερού και στην έκταση που αυτό καλύπτει.



Εικόνα 3.8 (α)Επιφανειακή άρδευση (β)Καταιονισμός (γ) Καταιονισμός με αυτοπροωθούμενο σύστημα (δ) Στάγδην άρδευση (novagreen.gr)

Ο υπολογισμός των υδατικών αναγκών μια καλλιέργειας εξαρτάται από τον τύπο της και από το έδαφος στο οποίο βρίσκεται. Τα φυτά παίρνουν νερό μέσω των ριζών τους, κρατάνε από αυτό τα θρεπτικά συστατικά που τους είναι απαραίτητα και αποβάλλουν το υπόλοιπο από τα φύλλα τους με την διαδικασία της διαπνοής. Παράλληλα από το έδαφος και την επιφάνεια των

φύλλων εξατμίζεται νερό με την μορφή υδρατμών προς την ατμόσφαιρα. Εξατμισοδιαπνοή (ETc) ονομάζεται η απώλεια του νερού μέσω διαπνοής και εξατμησης από μέρη του φυτού και του εδάφους.

Η εξατμισοδιαπνοή καθορίζει το απαιτούμενο νερό για την ανάπτυξη και την απόδοση μιας καλλιέργειας. Το νερό που λαμβάνει μια καλλιέργεια από την φύση είναι της βροχής (P), της εδαφικής υγρασίας (GW) και της τριχοειδούς ανύψωσης (SM). Άρα, οι καθαρές απαιτήσεις σε νερό μιας καλλιέργειας (IR) είναι:

$$IR = ETc - (P - GW - SM) \quad (3.19)$$

Αφού υπολογιστούν οι καθαρές αρδευτικές ανάγκες προστίθεται η μείωση ανάλογα με τον τρόπο άρδευσης που επιλέγεται και στην συνέχεια μείωση ανάλογα με τις απώλειες του δικτύου μεταφοράς. Ο τρόπος άρδευσης με τις μεγαλύτερες απώλειες είναι η επιφανειακή ενώ με τις μικρότερες η στάγδην. Οι απώλειες του δικτύου διανομής είναι περισσότερες εάν αυτό είναι δίκτυο ανοιχτών αγωγών σε σχέση με δίκτυο κλειστών αγωγών υπο πίεση.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής μια καλλιέργειας προκύπτει από την σχέση:

$$ETc = K\phi * ETr \quad (3.20)$$

- Kφ είναι ο φυτικός συντελεστή που εξαρτάται από τον τύπο της καλλιέργειας
- ETr είναι η εξατμισοδιαπνοή για καλλιέργεια αναφοράς

3.4.2 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς

Για τον υπολογισμό της καλλιέργειας αναφοράς χρησιμοποιείται η μέθοδος Penman-Monteith. Η μέθοδος βασίζεται στην μέθοδο του Penman για τον υπολογισμό της εξατμησης από υδάτινη επιφάνεια. Στην μέθοδο Penman χρησιμοποιούνται μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας του ανέμου σε μια στάθμη. Αυτή η στάθμη ορίζεται στα 2m και είναι σημαντικό οι μετρήσεις του ανέμου να αναφέρονται σε αυτή διότι ο άνεμος μεταβάλλεται σημαντικά συναρτήσει του ύψους. Επίσης για τον υπολογισμό της εξατμησης χρειάζεται η σχετική ηλιοφάνεια. Για να συμπεριλάβει και την διαδικασία της διαπνοής των φυτών ο Monteith εισήγαγε στην εξίσωση του

Penman την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων των φυλλωμάτων. Η εξίσωση Penman-Monteith καθώς και όλες οι παράμετροι του αέρα και των υδρατμών που είναι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς παρατίθενται παρακάτω:

- Ατμοσφαιρική πίεση p (hPa)

$$p = 1013,25 * (1 - 2.256 * 10^{-5} * z)^{5,256} \quad (3.21)$$

- z : Υψόμετρο σε m

- Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης λ (kJ/kg)

$$\lambda = 2502 - 2,361 * T \quad (3.22)$$

- T : Θερμοκρασία σε °C

- Ψυχομετρικός συντελεστής γ (hPa/K)

$$\gamma = \frac{c * p}{\varepsilon * \lambda} \quad (3.23)$$

- c : Ειδική θερμότητα αέρα (kJ/kg/K) Τυπική τιμή 1,013

- ε : Λόγος μοριακών βαρών νερού και ξηρού αέρα. Τυπική τιμή 0,622

- Πίεση κορεσμού υδρατμών e^* (hPa)

$$e^* = 6,11 * \exp\left(\frac{17,277T}{T + 237,3}\right) \quad (3.24)$$

- T : Θερμοκρασία σε °C

- Πραγματική πίεση υδρατμών e (hPa)

$$e = U e^* \quad (3.25)$$

- U : Ποσοστό υγρασίας

- Κλίση καμπύλης πίεσης κορεσμού υδρατμών Δ (hPa/K)

$$\Delta = \frac{4098e^*}{(T + 237.3)^2} \quad (3.26)$$

- Ψυχομετρικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την διαπνοή γ'

$$\gamma' = \gamma * (1 + u * 0,33) \quad (3.27)$$

u : ταχύτητα ανέμου (m/S)

- Έλλειμα κορεσμού D (hPa)

$$D = e - e^* \quad (3.28)$$

- Συνάρτηση ανέμου $F(u)$ (kg/hPa m^2 d)

$$F(u) = \frac{90u}{T + 273} \quad (3.29)$$

- Εξατμισοδιαπνοή ETr (mm/(m^2 d))

$$ETr' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} * \left(\frac{Rn}{\lambda}\right) + \left(\frac{\gamma}{\gamma' + \Delta}\right) * F(u) * D \quad (3.30)$$

4. Μελέτη περίπτωσης

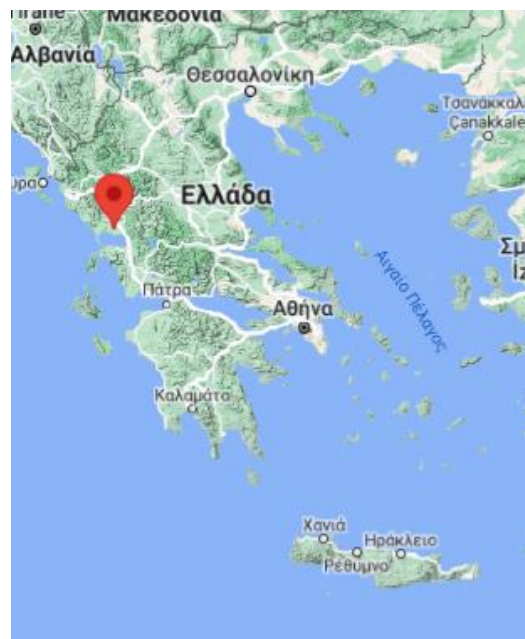
4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν διάφορα σενάρια διαμόρφωσης αγροβολταϊκών. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος αγροβολταϊκών. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι:

- η παραγωγή ενέργειας για διαφορετικές πυκνότητες ηλιακών πάνελ ανά στρέμμα.
- η παραγωγή καλλιέργειας για διαφορετικά ποσοστά ακτινοβολίας που φτάνουν στο έδαφος.
- οι μεταβολές στην εξαμισοδιαπνοή λόγω διαφορετικών ποσοστών σκίασης.

4.2 Δεδομένα και περιοχή μελέτης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς ελήφθησαν από την πλατφόρμα "Δίκτυο Ανοιχτής Πληροφορίας Υδροσυστημάτων" από σταθμό που εγκαταστάθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος IRMA ETCP GR-IT 2007-13. Ο σταθμός βρίσκεται στην Άρτας, στην περιοχή Κωστακιοί, σε υψόμετρο $z=10\text{m}$, γεωγραφικό πλάτος $\varphi=39,12208$ και γεωγραφικό μήκος $\lambda=20,94737$ (Εικόνα 4. 1). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας $S_{\text{obs}}(\text{W}/\text{m}^2)$, υγρασίας $U(\%)$, ταχύτητας του ανέμου $u (\text{m}/\text{s})$ και θερμοκρασίας $T(^{\circ}\text{C})$.

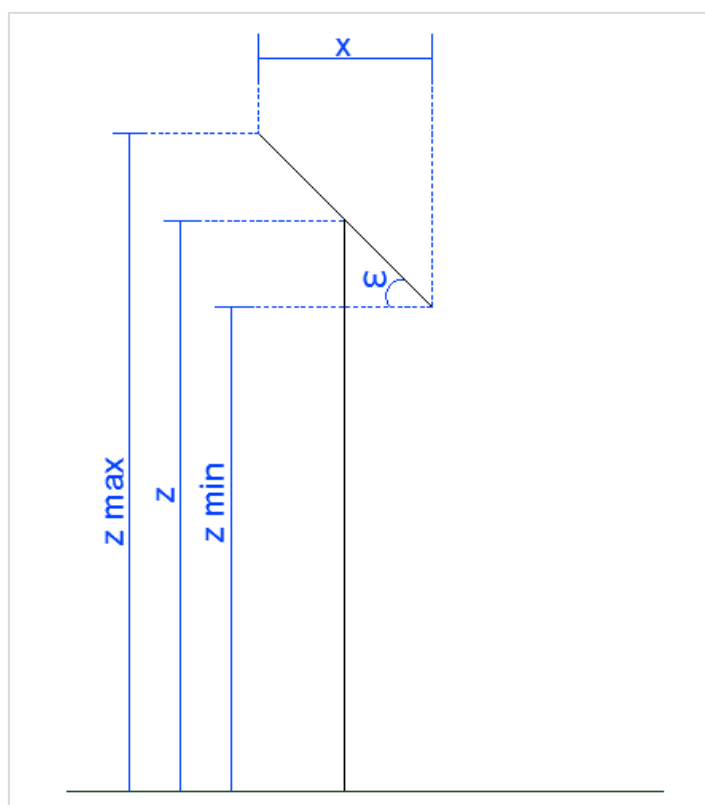


Εικόνα 4. 1. Κωστακιοί, περιοχή σταθμού δεδομένων (Google maps)

4.3 Υπολογισμός μείωσης ακτινοβολίας

Το βασικότερο ζήτημα στα αγροβολταϊκά είναι η σκίαση που δημιουργούν τα φωτοβολταϊκά στο έδαφος όπου υπάρχουν καλλιέργειες. Το ποσοστό σκίασης είναι καθοριστικό για την ανάπτυξη και την ποιότητα των καλλιεργειών καθώς και για την εξατμισοδιαπνοή στην οποία η τιμή της ακτινοβολίας παίζει σημαντικό ρόλο.

Για τον υπολογισμό της μείωσης της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος ορίστηκε το σύστημα των αγροβολταϊκών. Τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται σε ύψος z , με κλίση ω και προσανατολισμό προς το Νότο (Εικόνα 4. 2). Οι συστοιχίες φωτοβολταϊκών έχουν απόσταση d . Οι υπολογισμοί έγιναν για διάφορες τιμές ύψους z , κλίσης ω και απόστασης d . Το ποσοστό σκίασης υπολογίστηκε σε ένα σημείο κάτω από τα πάνελ Σ1 και σε ένα σημείο ενδιάμεσα από δύο συστοιχίες φωτοβολταϊκών Σ2.



Εικόνα 4. 2. Χαρακτηριστικά μεγέθη ΦΒ

Σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας κάθε σημείο στο έδαφος δέχεται άμεση και διάχυτη ακτινοβολία. Τοποθετώντας φωτοβολταϊκά, αυτά εμποδίζουν μέρος της άμεσης ακτινοβολίας να φτάσει στο έδαφος. Το αν ένα φωτοβολταϊκό εμποδίζει ή όχι την άμεση ακτινοβολία να φτάσει στο

έδαφος, εξαρτάται από το αν παρεμβάλλεται στο ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το σημείο με τον ήλιο. Ο ήλιος κατά την διάρκεια της ημέρας και ανα εποχή αλλάζει γωνίες ύψους. Επομένως για κάποιες γωνίες ύψους του ήλιου τα φωτοβολταϊκά εμποδίζουν την άμεση ακτινοβολία να φτάσει στο έδαφος ενώ για κάποιες άλλες όχι. Η διάχυτη ακτινοβολία θεωρείται ότι φτάνει στο έδαφος κάθε στιγμή.

Τα δεδομένα ακτινοβολίας δίνουν το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας για κάθε ώρα S_{obs} . Στόχος είναι ο διαχωρισμός αυτών των δύο. Η διάχυτη ακτινοβολία εκτιμάται κατά προσέγγιση ως:

$$S_{ΔΙΑΧΥΤΗ} = 0,25 * S_o \quad (4.1)$$

Όπου S_o είναι η εξωγήινη ακτινοβολία που φτάνει στην ατμόσφαιρα και υπολογίστηκε από την σχέση (3.10)

Η άμεση ακτινοβολία δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σταθερό ποσοστό της εξωγήινης ακτινοβολίας διότι εξαρτάται από την σχετική ηλιοφάνεια n/N . Η τιμή της σχετικής ηλιοφάνειας για κάθε μέρα υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση του Angström (1956) :

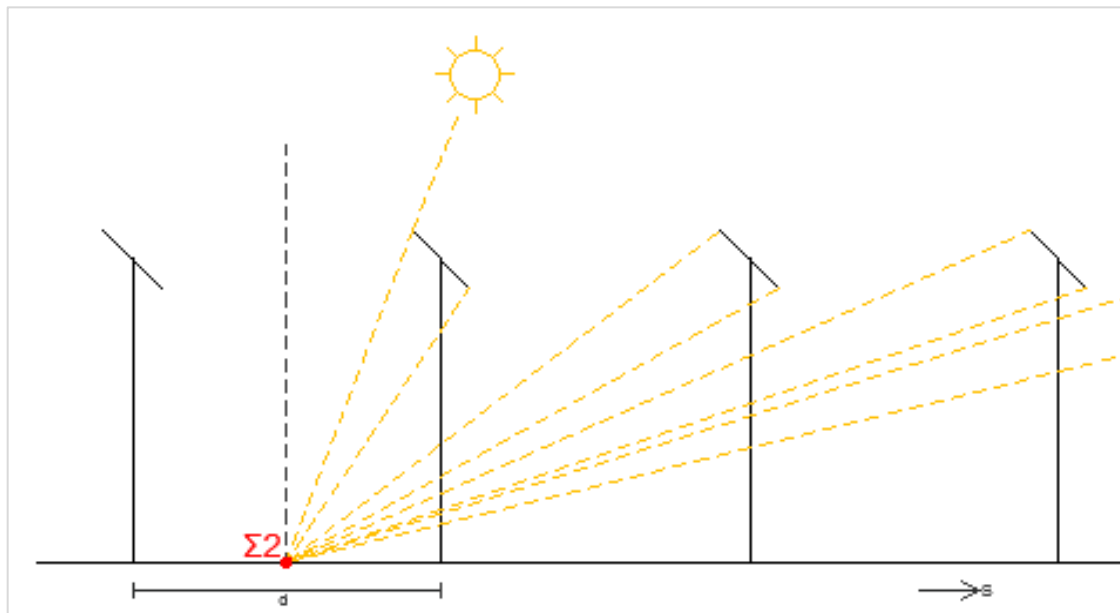
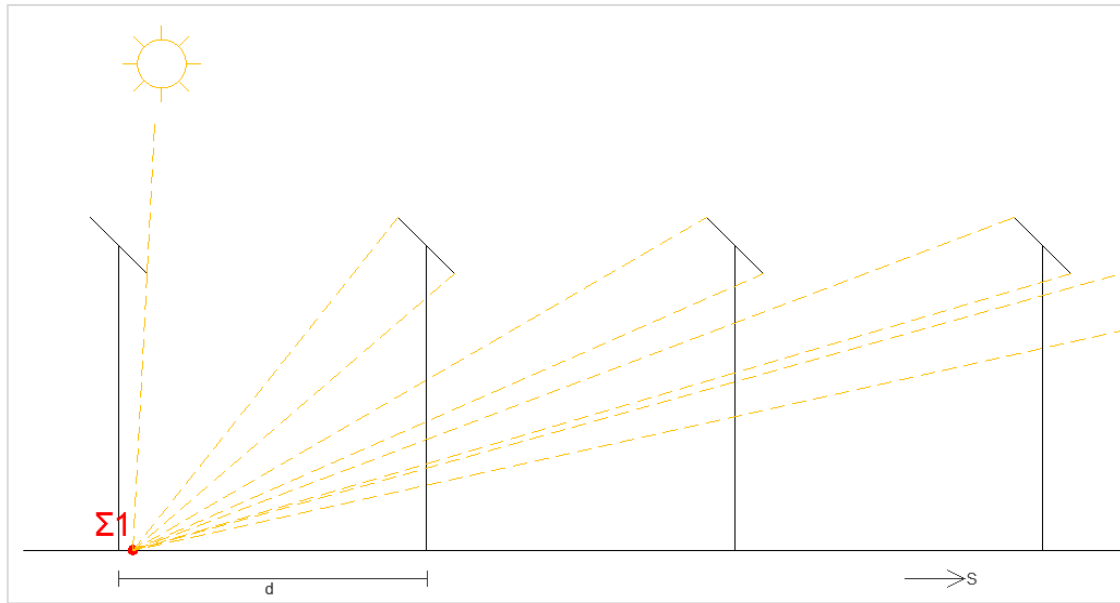
$$\frac{n}{N} = 0,5 * \left(\frac{S_{obs}}{S_o} - 0,25 \right) \quad (4.2)$$

Άρα η άμεση ακτινοβολία προκύπτει από τον τύπο:

$$S_{ΑΜΕΣΗ} = 0,5 * \frac{n}{N} * S_o \quad (4.3)$$

Επομένως, για το ποσοστό σκίασης σημείου Σ εξετάζεται αν μεταξύ του ήλιου και του σημείου παρεμβάλλεται κάποιο ηλιακό πάνελ για κάθε γωνία ύψους του ήλιου που αλλάζει κάθε ώρα. Εάν παρεμβάλλεται, η συνολική ακτινοβολία που λαμβάνει το σημείο για εκείνη την ώρα είναι $S_{ολ} = S_{ΔΙΑΧΥΤΗ}$. Αν δεν παρεμβάλλεται το σημείο θεωρείται ότι έχει $S_{ολ} = S_{ΑΜΕΣΗ} + S_{ΔΙΑΧΥΤΗ}$. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με την ολική ακτινοβολία που θα δεχόταν αυτό το σημείο χωρίς την ύπαρξη φωτοβολταϊκών.

Στη Εικόνα 4.3 φαίνονται τα δύο σημεία για τα οποία μελετήθηκε το ποσοστό σκίασης. Οι κίτρινες διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν την διεύθυνση της άμεσης ακτινοβολίας για διάφορες γωνίες ύψους του ήλιου.



Εικόνα 4. 3. Σημεία για τα οποία υπολογίστηκε το ποσοστό σκίασης

4.4 Παραγωγή Ενέργειας

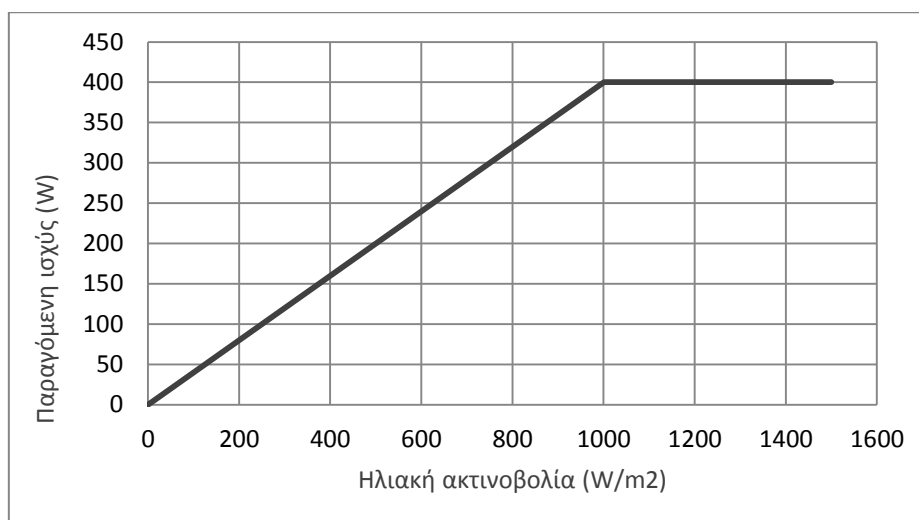
Για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. Τα χαρακτηριστικά τους, και η καμπύλη λειτουργίας τους δίνονται στον πίνακα 4.1 και στην Εικόνα 4.4

Τα φωτοβολταϊκά είναι σταθερής κλίσης με προσανατολισμό προς τον Νότο. Το ύψος των πάνελ δεν επηρεάζει την ακτινοβολία που φτάνει σε

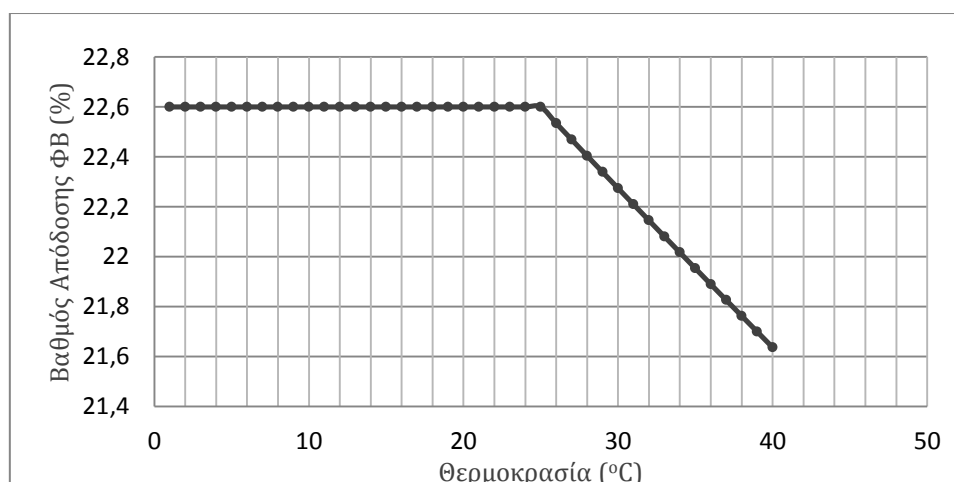
αυτά, άρα και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος όπως αναφέρεται και παρακάτω (Εικόνα 4.5) είναι $-0,29\%/^{\circ}\text{C}$. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε βαθμό Κελσίου άνω των 25°C ο συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών θα μειώνεται κατά $0,29\%$.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών (SunPower,2022)

SunPower Maxeon 3 SPR-MAX3-400	Μονοκρυσταλλικό
Μέγιστη Ισχύς (W)	400
Βαθμός απόδοσης (%)	22,6
Διαστάσεις (m)	1,69
	1,046
Θερμοκρασίες λειτουργίας	-40°C έως $+85^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος	$-0,29\%/^{\circ}\text{C}$

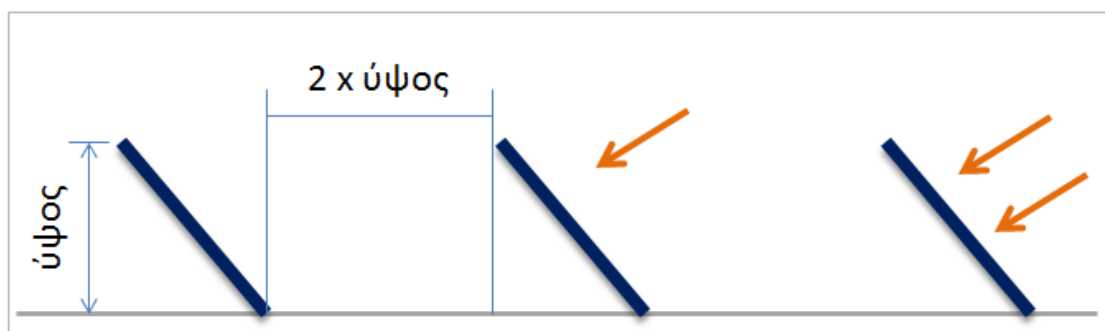


Εικόνα 4. 4. Καμπύλη λειτουργίας φωτοβολταϊκών



Εικόνα 4.5 Απόκριση βαθμού απόδοσης ΦΒ σε σχέση με τη θερμοκρασία

Ο υπολογισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έγινε για διαφορετικές πυκνότητες τοποθέτησης των ηλιακών πάνελ. Αρχικά υπολογίζεται το σενάριο το οποίο είναι βέλτιστο για την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή μια διάταξη φωτοβολταϊκών όπως σε ένα κλασικό φωτοβολταϊκό πάρκο. Ένας κανόνας τοποθέτησης φωτοβολταϊκών είναι η απόσταση των συστοιχιών να έχει τουλάχιστον την διπλάσιο μήκος από το ύψος του πάνελ (Εικόνα 4.6). Αυτή η απόσταση πρέπει να τηρείται έτσι ώστε να αποφεύγεται η αλληλοσκίαση μεταξύ των πάνελ διότι αυτό δημιουργεί απώλειες ενέργειας.



Εικόνα 4.6 Χωροθέτηση φωτοβολταϊκών

Πέρα από την πυκνότητα φωτοβολταϊκών που μεγιστοποιεί την ηλεκτροπαραγωγή υπολογίζονται και άλλες περιπτώσεις πιο αραιής τοποθέτησης. Σε αυτά τα σενάρια η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται φυσικά, ωστόσο η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος είναι περισσότερη και αυτό ευνοεί την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Οι αποστάσεις συστοιχιών για τις οποίες υπολογίστηκε η παραγωγή ρεύματος και ο αριθμός των φωτοβολταϊκών ανά στρέμμα σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Σενάρια πυκνότητας τοποθέτησης ΦΒ

Απόσταση συστοιχιών ΦΒ d(m)	Αριθμός ΦΒ/στρέμμα	Λόγος επιφάνειας πάνελ ανά στρέμμα
1,345	276	0,37
3	156	0,21
4	123	0,17
5	102	0,14
6	87	0,12
8	67	0,09
10	55	0,07

4.5 Η απόδοση των καλλιεργειών στο σύστημα αγροβολταιικών

Η απόδοση του συστήματος αγροβολταιικών υπολογίστηκε για τρεις καλλιέργειες. Για χειμερινό σιτάρι, που είναι χειμερινή καλλιέργεια, για αραβόσιτο, που αναπτύσσεται τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες και για μηδική που είναι πολυετής καλλιέργεια.

Ο αραβόσιτος ή καλαμπόκι προσαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα κλιματολογικών συνθηκών αν και ευνοείται σε ζεστό κλίμα. Έχει μεγάλες αρδευτικές απαιτήσεις και επομένως καλλιεργείται σε περιοχές με άφθονο νερό και αρδευτικά δίκτυο. Στην Ελλάδα σε περιοχές όπως η Θεσσαλία που το αρδευτικό νερό είναι αντλούμενο αποφεύγεται να καλλιεργηθεί. Το καλαμπόκι αξιοποιείται κυρίως για τον καρπό του, ως ζωτροφή και από τους ανθρώπους, καθώς επίσης και για παραγωγή βιομάζας. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται και για παραγωγή βιοαιθανόλης. Είναι ψηλό φυτό με χοντρό, όρθιο και συμπαγή βλαστό που φτάνει μέχρι και τα 3,5m (Εικόνα 4.7). Η σπορά του γίνεται την άνοιξη, όταν η θερμοκρασία του εδάφους φτάσει στους 10°C . Στην Ελλάδα η σπορά γίνεται κυρίως τον Απρίλιο. Η συγκομιδή του αραβόσιτου γίνεται στα μέσα προς τέλος του Σεπτεμβρίου. (Παπακώστα-Τασπούλου, 2012)



Εικόνα 4.7 Καλλιέργεια αραβόσιτου (agrifac.com/uk)

Το χειμερινό σιτάρι είναι το πιο διαδεδομένο σιτηρό στον κόσμο. Είναι καλλιέργεια κυρίως Εύκρατου κλίματος. Οι απαιτήσεις του σε νερό καλύπτονται κυρίως μέσω βροχόπτωσης και μπορεί να καλλιεργηθεί και σε μη αρδευόμενες εκτάσεις. Σε χρονιές με μεγάλη ξηρασία βέβαια η άρδευση ευνοεί την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Ο βλαστός του είναι κυλινδρικός και φτάνει έως και τα 1,5m (Εικόνα 4.8) Η σπορά του γίνεται κυρίως το φθινόπωρο λόγω της αντοχής που παρουσιάζει σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στην Ελλάδα γίνεται συνήθως τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο. Η συγκομιδή

γίνεται συνήθως κατά τον Ιούνιο όταν η υγρασία των καρπών είναι κάτω από 15%. (Παπακώστα-Τασπούλου, 2012)



Εικόνα 4.8 Χειμερινό σιτάρι (no-tillfarmer.com)

Η μηδική είναι ένα σανοδοτικό φυτό που ανήκει στην οικογένεια των ψυχανθών. Στην Ελλάδα αποτελεί περισσότερο από το 60% της συνολικής παραγωγής των κτηνοτροφικών φυτών. Καλλιεργείται κυρίως σε πεδινές περιοχές, σε εκτάσεις γόνιμες και αρδευόμενες. Είναι ένα πολυετές φυτό και έχει όρθια ανάπτυξη. Οι βλαστοί είναι λεπτοί και το ύψος τους κυμαίνεται στα 60-90cm (Εικόνα 4.9). Η μηδική καλλιεργείται είτε μόνη της, είτε συνκαλλιεργείται και με άλλα ψυχανθή ή αγρωστώδη. Η σπορά μπορεί να γίνει νωρίς το φθινόπωρο ή νωρίς την άνοιξη. Χρειάζεται τουλάχιστον έξι βδομάδες ανάπτυξης για να επιβιώσει τον χειμώνα. Η διαχείριση της μηδικής γίνεται με κοπή κατά διαστήματα και γίνεται συνήθως λίγο πριν την ανθοφορία. (Παπακώστα-Τασπούλου, 2012)



Εικόνα 4.9 Καλλιέργεια μηδικής (Britannica.com)

Οι περίοδοι ανάπτυξης για τις τρεις καλλιέργειες που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς δίνονται στον πίνακα 4.3.

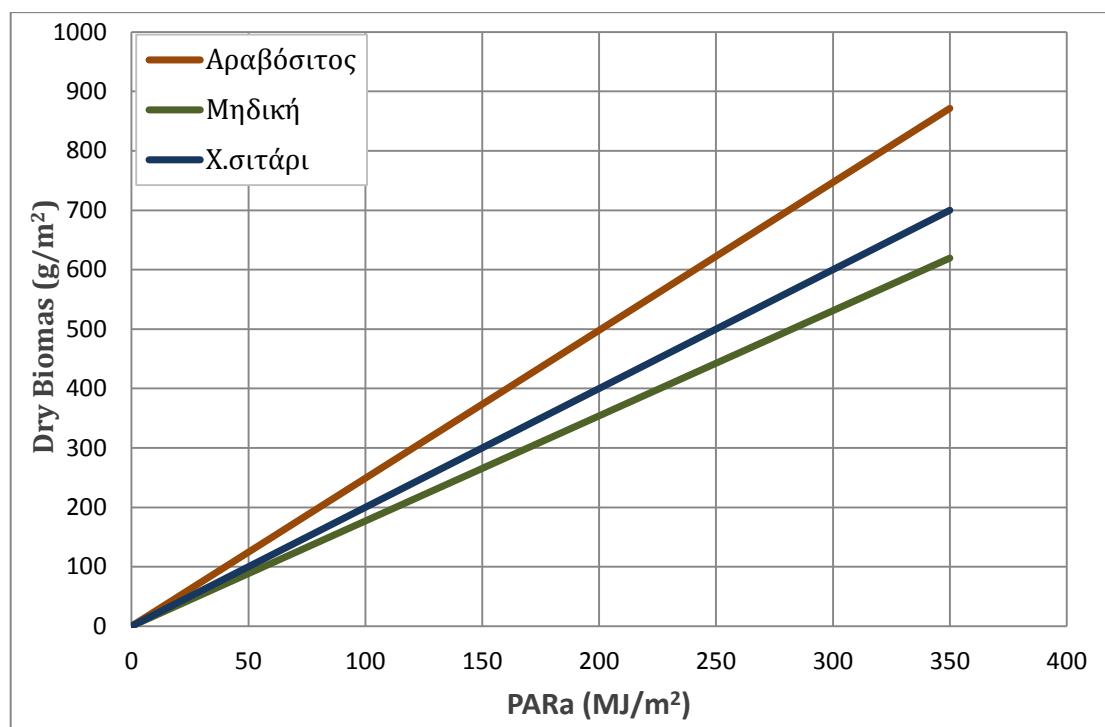
Πίνακας 4.3 Περίοδοι ανάπτυξης των καλλιεργειών που μελετήθηκαν

	Περίοδος ανάπτυξης	Μέρες ανάπτυξης
Καλαμπόκι C4	10/4-10/9	150
Μηδική C3	Πολυετής καλλιέργεια	-
Χειμερινό Σιτάρι C3	15/10 - 1/6	225

Για τον υπολογισμό την ξηρής βιομάζας κάθε καλλιέργειας χρησιμοποιείται η γραμμική σχέση βιομάζας-ακτινοβολίας (3.18) Οι τρεις καλλιέργειες έχουν δική τους αποδοτικότητα χρήσης ακτινοβολίας RUE (Εικόνα 4.10).

- Αραβόσιτος C4: RUE= 2,49
- Χειμερινό Σιτάρι C3: RUE=2
- Μηδική C3: RUE=1,77

Η μείωση ακτινοβολίας στην παραγόμενη ξηρή ύλη γίνεται περισσότερο αισθητή στον αραβόσιτο και λιγότερο αισθητή στην μηδική.



Εικόνα 4.10 Αποδοτικότητα μετατροπής ακτινοβολίας σε ξηρή βιομάζα για τον αραβόσιτο, την μηδική και το χειμερινό σιτάρι

Από τον συνολική ακτινοβολία που δέχεται κάθε καλλιέργεια, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, μπορεί να αξιοποιήσει ένα μέρος της. Το εύρος του μήκους κύματος που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα φυτά για τις

λειτουργίες τους ονομάζεται φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία PAR. Από την PAR ένα ποσοστό μετατρέπεται σε υδατάνθρακες για την παραγωγή βιομάζας (PAR_a).

$$PAR = 0,5 * S_{ολ} \quad \left[\frac{MJ}{m^2} \right] \quad (4.4)$$

-Σολ: Το σύνολο άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας

$$PAR_a = 0,1 * PAR \quad \left[\frac{MJ}{m^2} \right] \quad (4.5)$$

Η υπόλοιπη ακτινοβολία καταναλώνεται για τον μεταβολισμό του φυτού, ανακλάται στα φύλλα ή μετατρέπεται σε θερμότητα (Carlos Campillo et al, 2014).

Η παραγωγή βιομάζας υπολογίστηκε για ποσοστά σκίασης που προκαλούνται από διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των συστοιχιών.

4.6 Υδατικές Ανάγκες του συστήματος αγροβολταϊκών

Εφόσον υπάρχει μείωση της ακτινοβολίας, άρα και περισσότερη σκίαση, αναμένεται η εξατμισοδιαπνοή να είναι μειωμένη. Αυτό είναι σημαντικό διότι η εξατμισοδιαπνοή καθορίζει τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών.

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο του Penman-Monteith (Σχέση 3.30) υπολογίστηκε η τιμή της εξατμισοδιαπνοής για καλλιέργεια αναφοράς. Αυτός ο υπολογισμός έγινε για διαφορετικά ποσοστά ακτινοβολίας που φτάνουν στο έδαφος, δηλαδή διαφορετικές αποστάσεις των συστοιχιών φωτοβολταϊκών. Στον Πίνακα 4.4 δίνονται τα μηνιαία δεδομένα θερμορασίας, υγρασίας, σχετικής ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

Αφού υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ET_r για να βρεθεί η πραγματική εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών πρέπει να πολλαπλασιάσει με τον φυτικό συντελεστή κάθε καλλιέργειάς K_φ.

Το καλαμπόκι κατά την διάρκεια της ανάπτυξής του έχει αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις στις απαιτήσεις του σε νερό, επομένως ο φυτικός συντελεστής μεταβάλλεται ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης:

- 1^ο Στάδιο: 25 μέρες K_φ=0,45

- 2^ο Στάδιο: 40 μέρες $K_{\phi}=0,7$
- 3^ο Στάδιο: 60 μέρες $K_{\phi}=1,05$
- 4^ο Στάδιο: 25 μέρες $K_{\phi}=0,6$

Για την μηδική ο φυτικός συντελεστής θεωρείται σταθερό σε όλα τα στάδια της ανάπτυξης της και είναι ίσος με $K_{\phi}=0,85$. Το χειμερινό σιτάρι θεωρείται μη αρδευόμενη καλλιέργεια, επομένως δεν υπολογίστηκαν οι υδατικές απαιτήσεις του.

Πίνακας 4.4 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής

	T _o C	U(%)	n/N (%)	u(m/s)
Ιανουάριος	8,68	0,86	0,48	0,68
Φεβρουάριος	12,29	0,85	0,45	0,82
Μάρτιος	11,66	0,85	0,43	0,99
Απρίλιος	16,64	0,80	0,65	1,00
Μάιος	17,94	0,81	0,61	1,06
Ιούνιος	23,53	0,80	0,67	1,08
Ιούλιος	26,31	0,76	0,79	1,11
Αύγουστος	26,08	0,73	0,75	1,10
Σεπτέμβριος	21,66	0,82	0,61	0,68
Οκτώβριος	17,52	0,85	0,52	0,58
Νοέμβριος	12,59	0,89	0,48	0,61
Δεκέμβριος	6,85	0,74	0,67	0,60

5. Αποτελέσματα

5.1 Μείωση της ακτινοβολίας

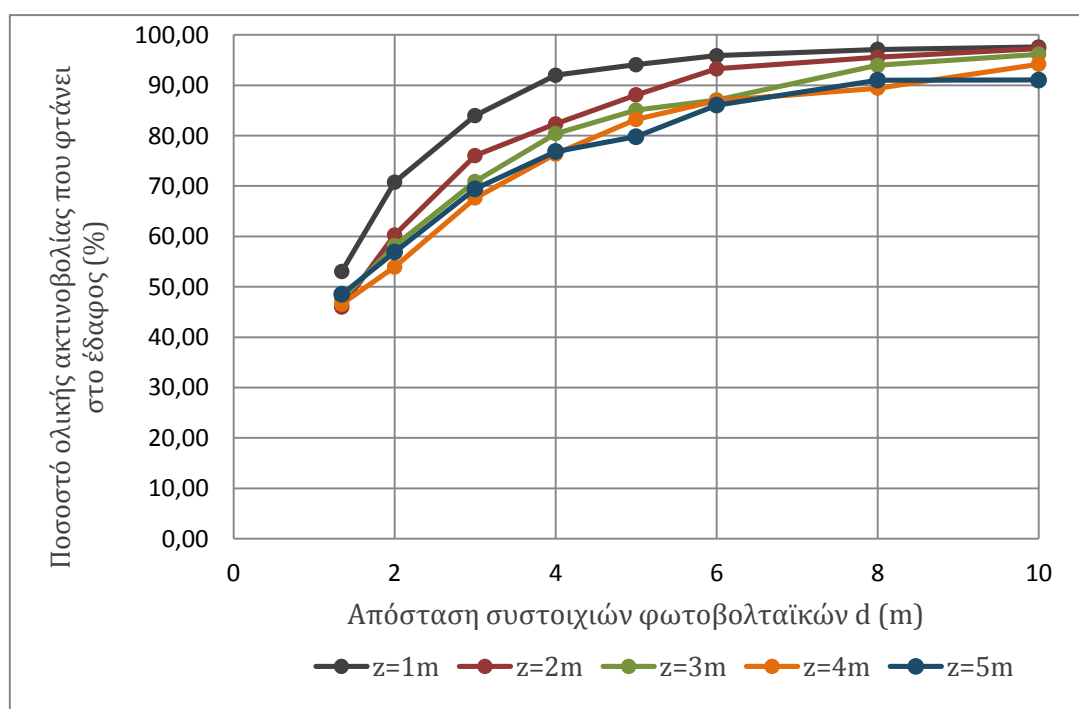
Η μείωση της ακτινοβολίας υπολογίστηκε σε ένα σημείο κάτω από τα φωτοβολταϊκά Σ1 και σε ένα σημείο ενδιάμεσα από δύο συστοιχίες φωτοβολταϊκών Σ2 (Εικόνα 4.3). Τα φωτοβολταϊκά είναι τοποθετημένα σε ύψος z , σε σειρές με απόσταση d .

Η μεταβολές της ακτινοβολίας μελετήθηκαν ως προς:

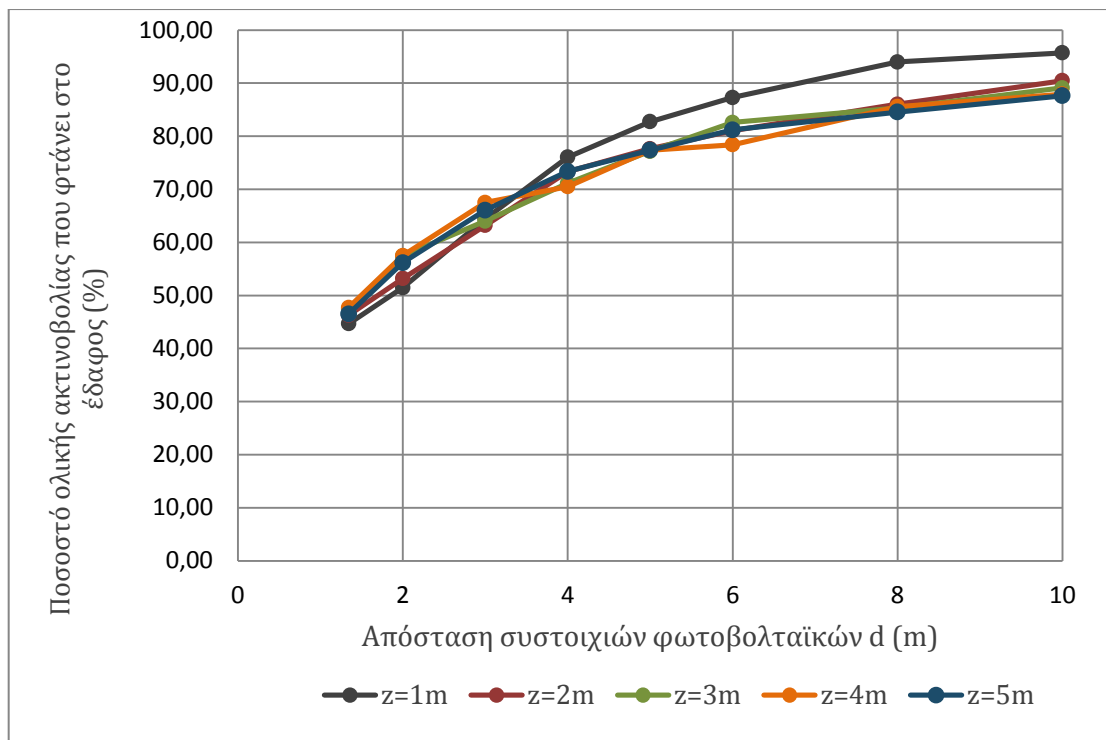
- Το ύψος και την πυκνότητα των φωτοβολταϊκών
- Την κλίση του ηλιακού πάνελ

5.1.1 Σκίαση σε σχέση με το ύψος και την πυκνότητα των φωτοβολταϊκών

Το ποσοστό της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος κάτω από τα πάνελ σε σχέση με την ακτινοβολία που θα έφτανε στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αγροβολταϊκά δίνεται στην Εικόνα 5.1 (α) για το σημείο Σ1 και την Εικόνα 5.1 (β) για το σημείο Σ2.



(α)



(β)

Εικόνα 5.1 Ποσοστό ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος για διάφορα ύψη z και αποστάσεις d για το σημείο Σ1 (α) και Σ2 (β)

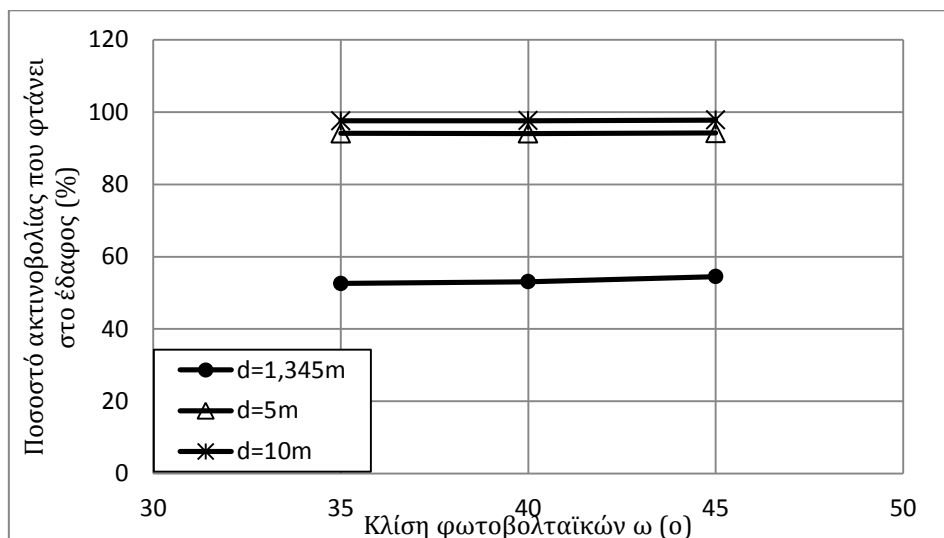
Όπως είναι λογικό, όσο πιο μεγάλη απόσταση έχουν οι σειρές φωτοβολταϊκών μεταξύ τους, δηλαδή όσο πιο αραιή είναι η τοποθέτηση τους, τόσο πιο πολλή ακτινοβολία φτάνει στο έδαφος. Με οποιαδήποτε διαμόρφωση, σε όλα τα σημεία του εδάφους για απόσταση σειρών φωτοβολταϊκών από 4m και άνω η μείωση της ακτινοβολίας δεν είναι μεγαλύτερη από 30%. Σε περίπτωση αραιής τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών, δηλαδή για $d > 6m$, η διαθέσιμη ακτινοβολία δεν έχει μεγάλες μεταβολές για διαφορετικές τιμές του d .

Για τις περισσότερες τιμές d και στα δύο σημεία Σ1 και Σ2 αυξάνοντας το ύψος των φωτοβολταϊκών μειώνεται η ακτινοβολία που καταλήγει στις καλλιέργειες. Οι διαφορές βέβαια είναι μικρές και δεν ξεπερνούν το 10% με εξαίρεση τα φωτοβολταϊκά ύψους $z=1m$ που έχουν και μεγαλύτερες αποκλίσεις στο ποσοστό σκίασης σε σχέση με άλλα ύψη.

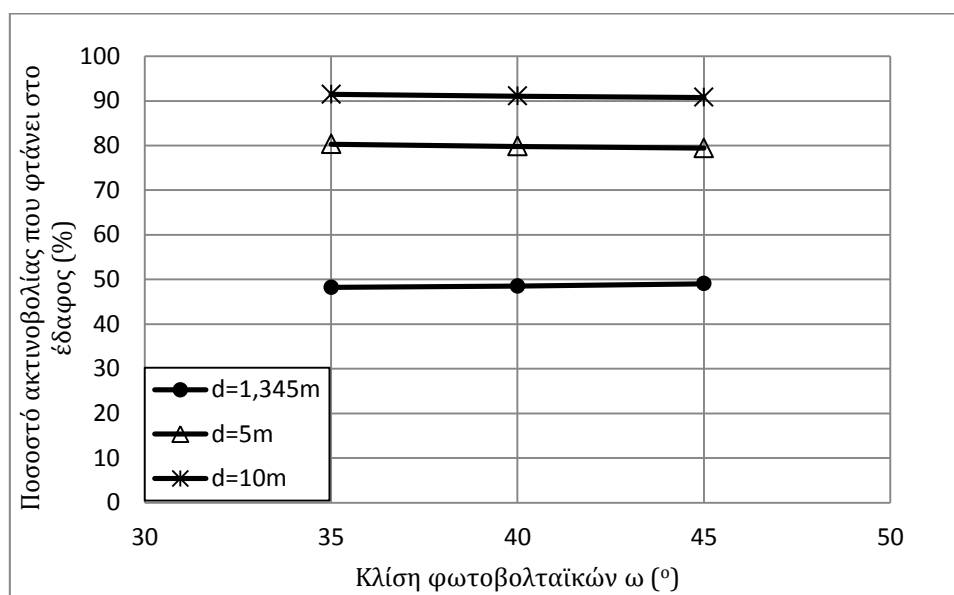
Γενικά, για την επιλογή του ύψους δε θα πρέπει να είναι καθοριστικός παράγοντας το μέρος την ακτινοβολίας που καταλήγει στο έδαφος. Σημασία έχει η καλλιέργεια στην οποία τοποθετείται το αγροβολταϊκό σύστημα, δηλαδή το ύψος της και το μέγεθος των γεωργικών μηχανημάτων που απαιτούνται για την διαχείριση της.

5.1.2 Μείωση ακτινοβολίας σε σχέση με την κλίση των φωτοβολταϊκών

Η επίδραση που έχει η μεταβολή της κλίσης των φωτοβολταϊκών στην σκίαση του εδάφους, δίνεται για ύψος $z=1\text{m}$ στην Εικόνα 5.2(α) και για ύψος 5m στην Εικόνα 5.2 (β). Η μεταβολή της διαθέσιμης ακτινοβολίας είναι ανεπαίσθητη σε κάθε περίπτωση, επομένως δεν λαμβάνεται υπόψιν στην επιλογή κλίσης. Η επιλογή άρα γίνεται με βάση την μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την περιοχή μελέτης των υπολογισμών στην παρούσα εργασία θεωρείται $\omega=40^\circ$



(α)

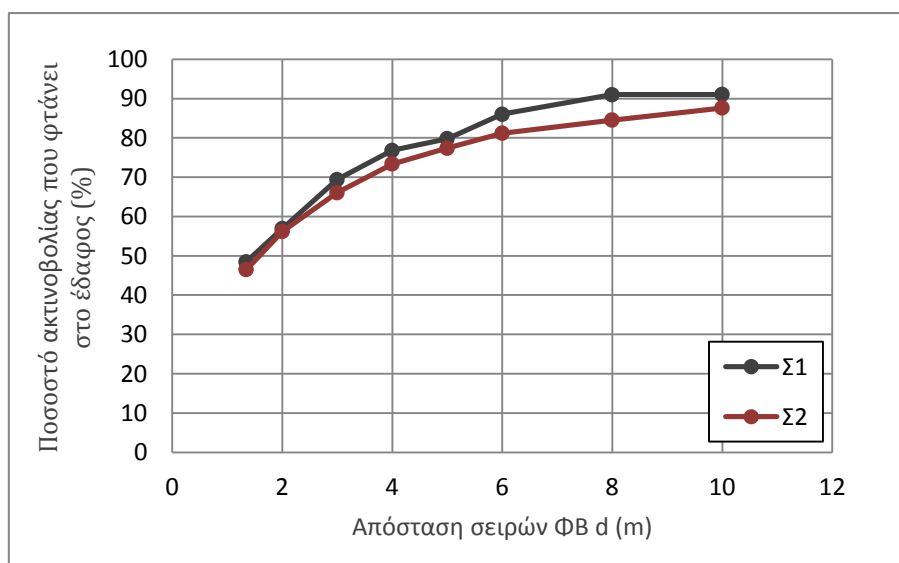


(β)

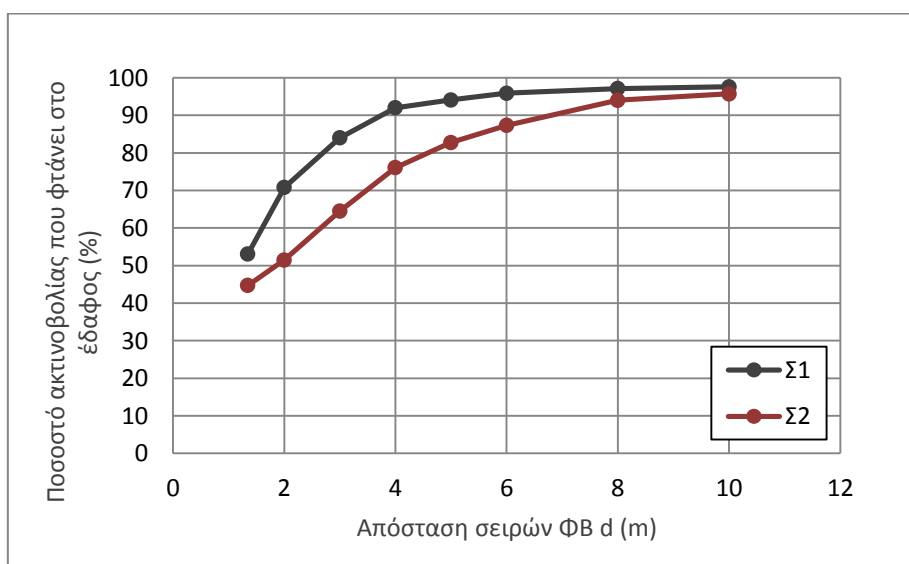
Εικόνα 5.2 Ποσοστό ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος σε σχέση με την κλίση των φωτοβολταϊκών για ύψος $z=1\text{m}$ (α) και $z=4\text{m}$ (β)

5.1.3 Ομοιομορφία σκίασης

Για την μελέτη της ομοιομορφίας της ακτινοβολίας που φτάνει στις καλλιέργειες παρατηρείται η διαφορά μεταξύ των τιμών στα σημεία Σ1 και Σ2. Στην περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται σε ύψος $z=5\text{m}$ (Εικόνα 5.3 α) η διαφορά της ακτινοβολίας που φτάνει στα δύο σημεία είναι μικρότερη από την διαφορά που παρατηρείται όταν το ύψος των φωτοβολταϊκών είναι χαμηλότερο. (Εικόνα 5.3 β).



(α)

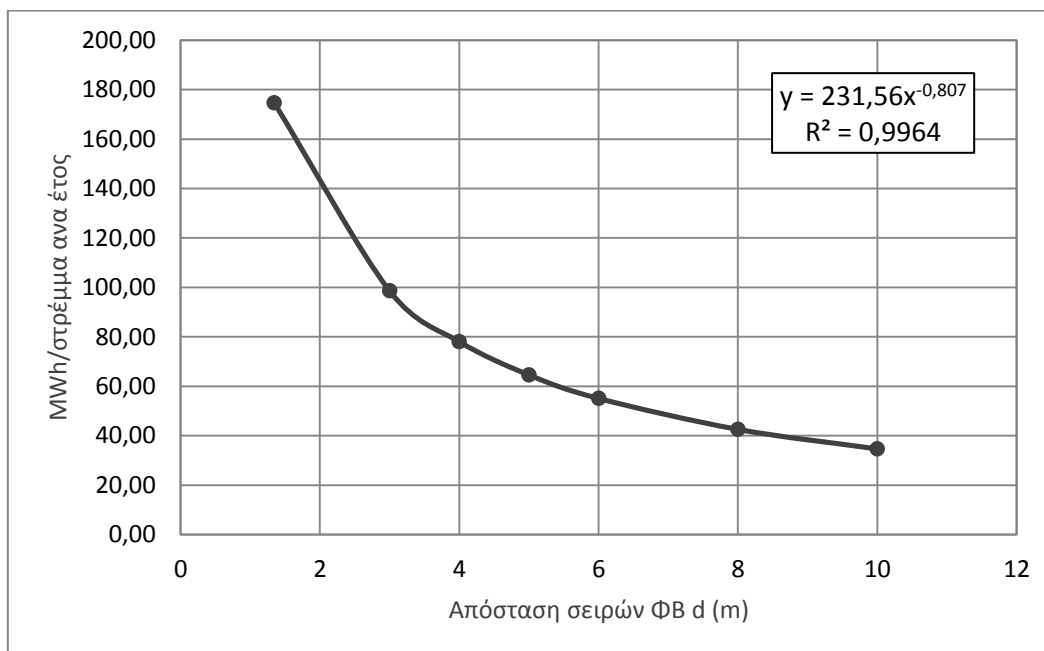


(β)

Εικόνα 5.3 Ποσοστό ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος για αποστάσεις ΦΒ d και ύψος $z=5\text{m}$ (α) και $z=1\text{m}$ (β)

5.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας των αγροβολταιικών υπολογίστηκαν οι μεγαβατώρες ανά στρέμμα για διάφορες πυκνότητες τοποθέτησης των ηλιακών πάνελ. Η σχέση ανάμεσα στην απόσταση d και την παραγωγή ενέργειας φαίνεται στην Εικόνα 5.4 και αναλυτικά για κάθε μήνα στον Πίνακα 5. 1.



Εικόνα 5.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αγροβολταιικών συναρτήσει της απόστασης των σειρών τους

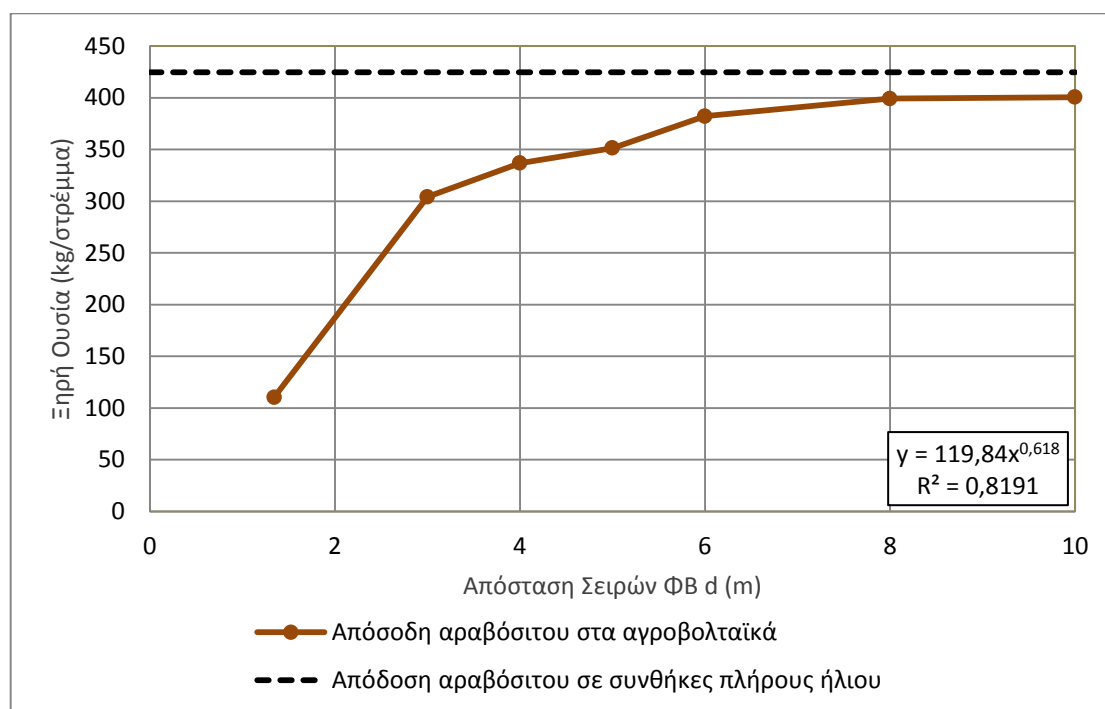
Πίνακας 5.1 Παραγωγή ενέργειας (kWh/στρέμμα) για απόσταση συστοιχιών φωτοβολταιικών d (m)

	P(kWh)/στρέμμα						
	d=1,345	d=3	d=4	d=5	d=6	d=8	d=10
Ιανουάριος	6863,9	3875,0	3067,9	2539,1	2165,7	1673,6	1363,7
Φεβρουάριος	8105,4	4575,9	3622,8	2998,3	2557,5	1976,3	1610,4
Μάρτιος	12017,8	6784,6	5371,5	4445,6	3792,0	2930,3	2387,7
Απρίλιος	18326,7	10346,2	8191,3	6779,3	5782,6	4468,5	3641,1
Μάιος	19595,8	11062,7	8758,6	7248,8	6183,0	4778,0	3893,3
Ιούνιος	22303,2	12591,2	9968,7	8250,3	7037,3	5438,1	4431,2
Ιούλιος	24815,2	14009,3	11091,5	9179,6	7829,9	6050,6	4930,3
Αύγουστος	21594,0	12190,8	9651,7	7988,0	6813,5	5265,2	4290,3
Σεπτέμβριος	14990,3	8462,7	6700,1	5545,2	4729,9	3655,0	2978,3
Οκτώβριος	10895,9	6151,2	4870,1	4030,6	3438,0	2656,7	2164,8
Νοέμβριος	7263,5	4100,6	3246,5	2686,9	2291,8	1771,0	1443,1
Δεκέμβριος	7856,6	4435,4	3511,6	2906,3	2479,0	1915,6	1560,9
Λόγος απόδοσης	1,000	0,565	0,447	0,370	0,316	0,244	0,199

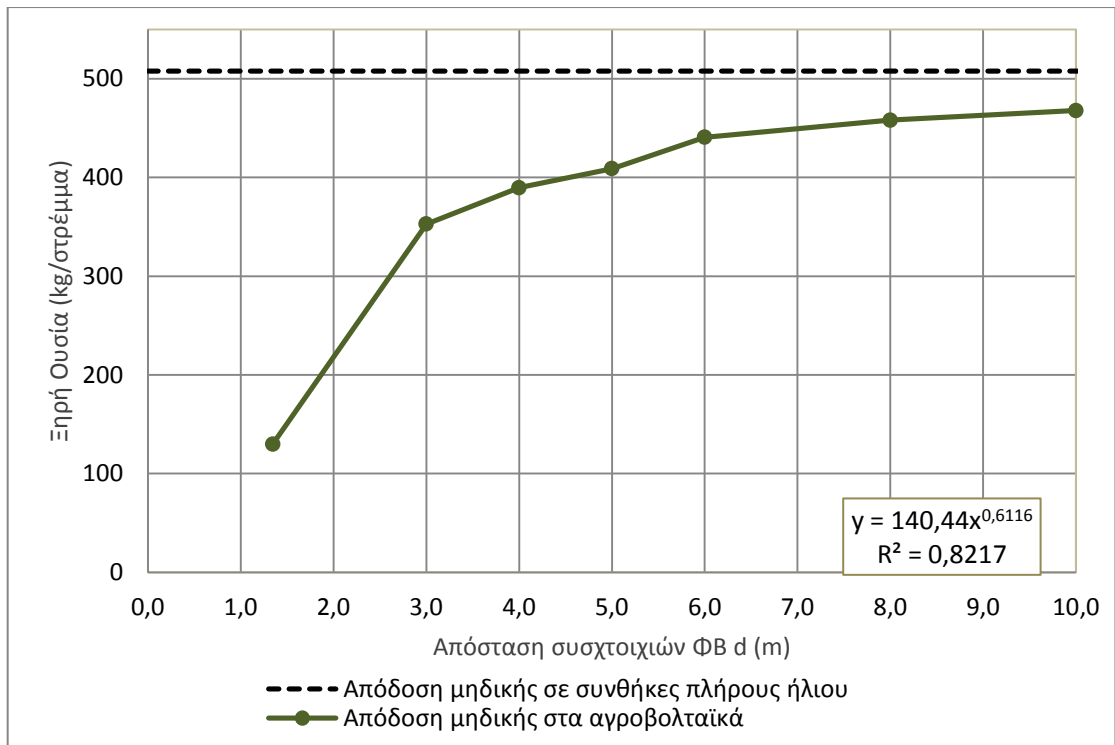
5.3 Απόδοση καλλιεργειών

Για τις καλλιέργειες υπολογίστηκε η παραγόμενη βιομάζα (kg/στρέμμα) για τις διαφορετικές πυκνότητες τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών. Η σχέση της απόδοσης των καλλιεργειών με την απόσταση d δίνεται για τον αραβόσιτο στην Εικόνα 5.5, για την μηδική στην Εικόνα 5.6 και για το χειμερινό σιτάρι στην Εικόνα 5.6. Οι τρεις καλλιέργειες έχουν μεταξύ τους διαφορετική περίοδο και διάστημα ανάπτυξης. Επομένως το ποσοστό σκίασης για κάθε απόσταση d δεν είναι το ίδιο στις καλλιέργειες. Ως εκ τούτου, τα αγροβολταϊκά έχουν μέγιστη απόδοση για διαφορετική απόσταση d σε κάθε καλλιέργεια.

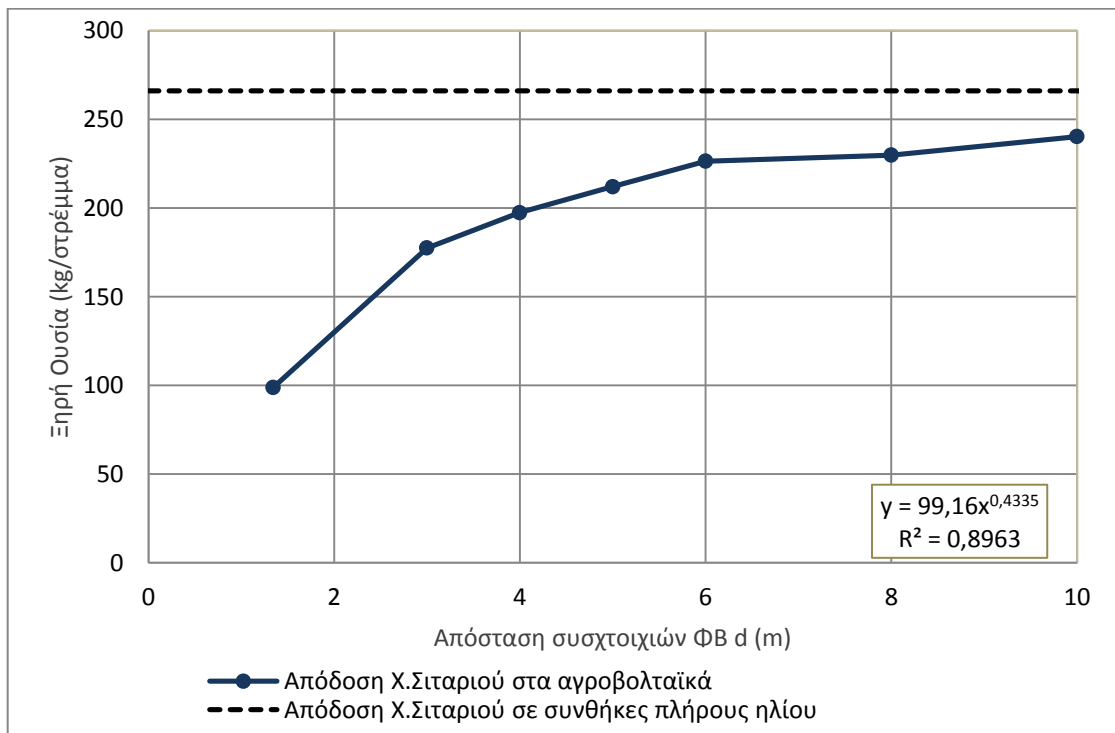
Οι υπολογισμοί έγιναν για ύψος αγροβολταϊκών $z=5\text{m}$, διότι ο αραβόσιτος είναι καλλιέργεια που μπορεί να φτάσει μέχρι και αυτό το ύψος.



Εικόνα 5.5 Παραγωγή ξηρής ουσίας αραβόσιτου για διάφορες αποστάσεις τοποθέτησης ΦΒ



Εικόνα 5.6 Παραγωγή ξηρής ουσίας μηδικής για διάφορες αποστάσεις τοποθέτησης ΦΒ



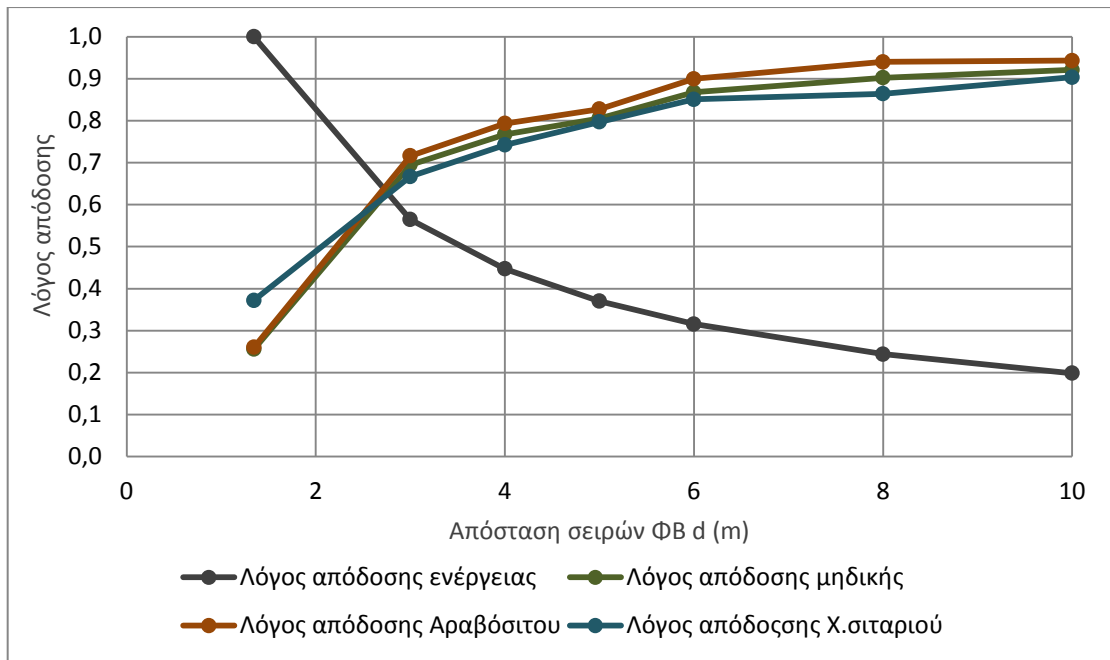
Εικόνα 5.7 Παραγωγή ξηρής ουσίας χειμερινού σίτου για διάφορες αποστάσεις τοποθέτησης ΦΒ

Για την αξιολόγηση της απόκρισης των δύο λειτουργιών των αγροβολταϊκών, υπολογίζεται ο λόγος απόδοσης ενέργειας και ο λόγος απόδοσης των καλλιεργειών (Πίνακας 5.2). Ως λόγος απόδοσης ενέργειας ορίζεται η ηλεκτροπαραγωγή για το σύστημα αγροβολταϊκών προς την ηλεκτροπαραγωγή για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε απόσταση $d=1,345m$, δηλαδή την απόσταση που μεγιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας. Αντίστοιχα, ως λόγος απόδοσης καλλιέργειας ορίζεται η βιομάζα στο σύστημα των αγροβολταϊκών προς την βιομάζα που θα παραχθεί σε συνθήκες πλήρους ήλιου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8 ο λόγος απόδοσης ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον λόγο απόδοσης των τριών καλλιεργειών. Όσο αυξάνεται η απόσταση των σειρών φωτοβολταϊκών το ποσοστό σκίασης μειώνεται άρα και η παραγωγή βιομάζας είναι περισσότερη ενώ η παραγωγή ενέργειας είναι μικρότερη εφόσον τοποθετούνται λιγότερες φωτοβολταϊκές μονάδες.

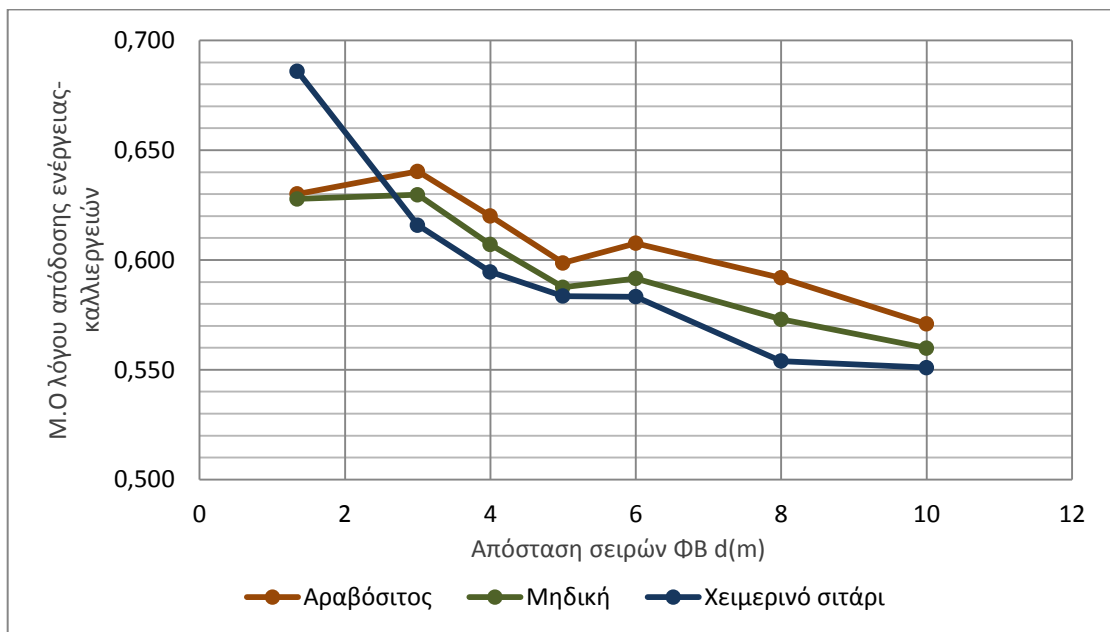
Για την εύρεση της απόστασης d , που μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα των αγροβολταϊκών, ως προς την ενέργεια και την καλλιέργεια ταυτόχρονα, υπολογίζεται ο μέσος όρος του λόγου απόδοσης ενέργειας και καλλιέργειας (Εικόνα 5.9)

Πίνακας 5.2 Λόγοι απόδοσης ενέργειας και καλλιεργειών για απόσταση $d(m)$

d (m)	Λόγος Απόδοσης Ενέργειας	Λόγος Απόδοσης Αραβόσιτου	Λόγος Απόδοσης Μηδικής	Λόγος Απόδοσης Χ. Σίτου
1,345	1,000	0,260	0,256	0,372
3	0,565	0,716	0,695	0,667
4	0,447	0,793	0,767	0,742
5	0,370	0,827	0,805	0,797
6	0,316	0,900	0,868	0,851
8	0,244	0,940	0,902	0,864
10	0,199	0,943	0,921	0,903
-	0,000	1,000	1,000	1,000



Εικόνα 5.8 Λόγος απόδοσης ενέργειας και καλλιεργειών συναρτήσει της απόστασης των φωτοβολταϊκών d(m)



Εικόνα 5.9 Μέσος όρος λόγων απόδοσης ενέργειας και καλλιεργειών συναρτήσει της απόστασης των φωτοβολταϊκών d(m)

Για πλήρη πυκνότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών, δηλαδή απόσταση $d=1,345m$, πιο αποδοτικό είναι το σύστημα αγροβολταϊκών με την καλλιέργεια του χειμερινού σιταριού. Αυτή είναι η καλλιέργεια με περίοδο ανάπτυξης τους χειμερινούς μήνες. Αυξάνοντας την απόσταση d στα 3m και παραπάνω, η αποδοτικότητα του συστήματος είναι μεγαλύτερη για τον

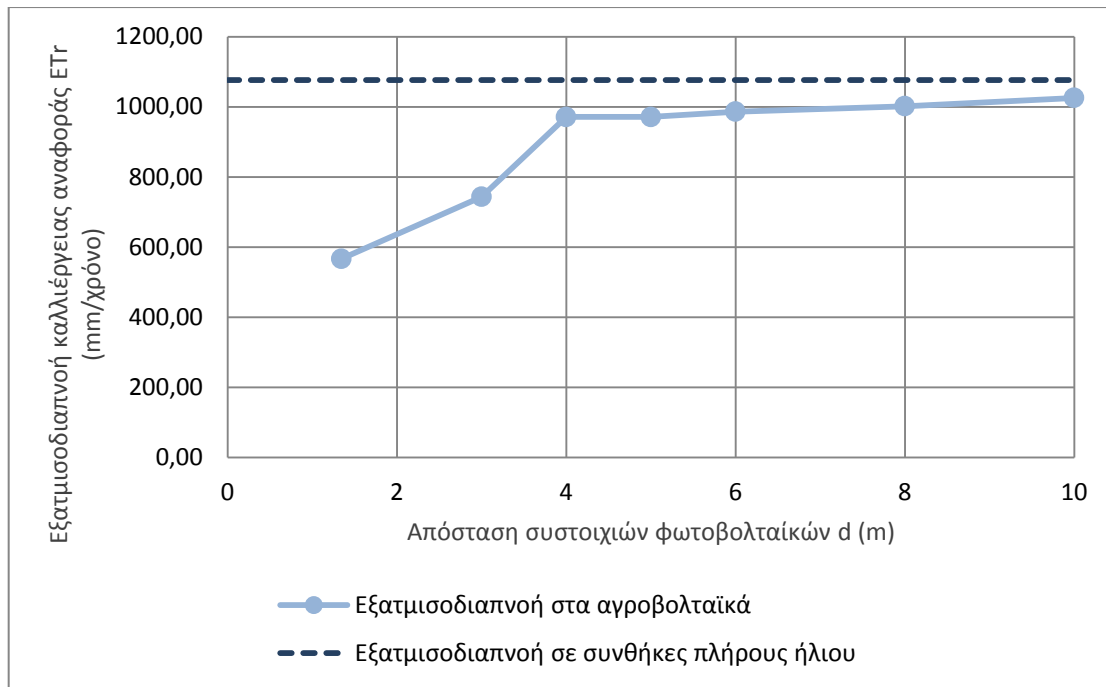
αραβόσιτο που είναι καλλιέργεια με περίοδο ανάπτυξης την άνοιξη και το καλοκαίρι, έπειτα για την μηδική που είναι ετήσια καλλιέργεια και τέλος για το χειμερινό σιτάρι. Μάλιστα, στην περίπτωση του αραβόσιτου η μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών δεν παρατηρείται για πλήρη πυκνότητα φωτοβολταϊκών, όπως στις άλλες περιπτώσεις, αλλά για $d=3m$. Πέρα από αυτή την περίπτωση του αραβόσιτου, η συνολική απόδοση του συστήματος είναι ανάλογη με την απόδοση των φωτοβολταϊκών, δηλαδή η μείωση της απόδοσης παραγωγής ενέργειας συνεπάγεται και με μείωση της απόδοσης των αγροβολταϊκών. Βέβαια επιλέγοντας πολύ μικρές τιμές του d , αν και η συνολική απόδοση του συστήματος φαίνεται να είναι υψηλή, οι καλλιέργειες δέχονται πολύ μεγάλη μείωση της τάξης του 70%. Επιλέγοντας λίγο μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών, για παράδειγμα $d=4m$, οι καλλιέργειες μειώνονται το πολύ 25%. Αυτή η μείωση θα μπορούσε να είναι αποδεκτή και εξυπηρετεί καλύτερα τον σκοπό των αγροβολταϊκών.

5.4 Υδατικές ανάγκες

Η μεταβολή της εξατμισοδιαπνοής στο σύστημα των αγροβολταϊκών για διάφορες τιμές της απόστασης d δίνεται στον Πίνακα 5.3 και στην Εικόνα 5.10. Για μικρές αποστάσεις d , η σκίαση που προκαλείται στις καλλιέργειες είναι μεγαλύτερη άρα και η εξατμισοδιαπνοή μικρότερη.

Πίνακας 5.3 Τιμές εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς E_{Tr} ανά μήνα για τιμές $d(m)$

	E(mm)							
	d=1,345	d=3	d=4	d=5	d=6	d=8	d=10	d>>
Ιανουάριος	18,4	22,0	41,3	41,5	41,8	42,5	42,3	42,9
Φεβρουάριος	27,0	31,5	48,4	52,3	51,5	52,1	51,9	53,6
Μάρτιος	36,8	43,5	62,5	60,5	62,9	61,5	63,9	64,4
Απρίλιος	58,0	85,5	98,7	91,3	100,1	95,7	102,2	103,5
Μάιος	57,4	78,1	80,1	95,1	89,6	94,7	97,9	103,5
Ιούνιος	83,5	98,8	89,0	119,9	122,3	130,3	126,1	144,3
Ιούλιος	82,1	108,2	109,8	137,4	135,2	144,2	144,6	160,2
Αύγουστος	81,1	123,1	131,6	132,8	135,5	135,8	145,7	148,6
Σεπτέμβριος	49,5	63,4	94,8	86,8	95,2	90,4	95,6	97,1
Οκτώβριος	33,9	45,2	61,9	67,4	65,2	66,7	67,7	69,6
Νοέμβριος	21,1	25,5	45,9	46,9	47,3	48,0	47,8	48,6
Δεκέμβριος	17,7	18,5	39,5	39,4	39,3	39,7	39,9	40,2
E_{Tr} (mm/year)	566,5	743,3	903,6	971,1	985,9	1001,6	1025,6	1076,6

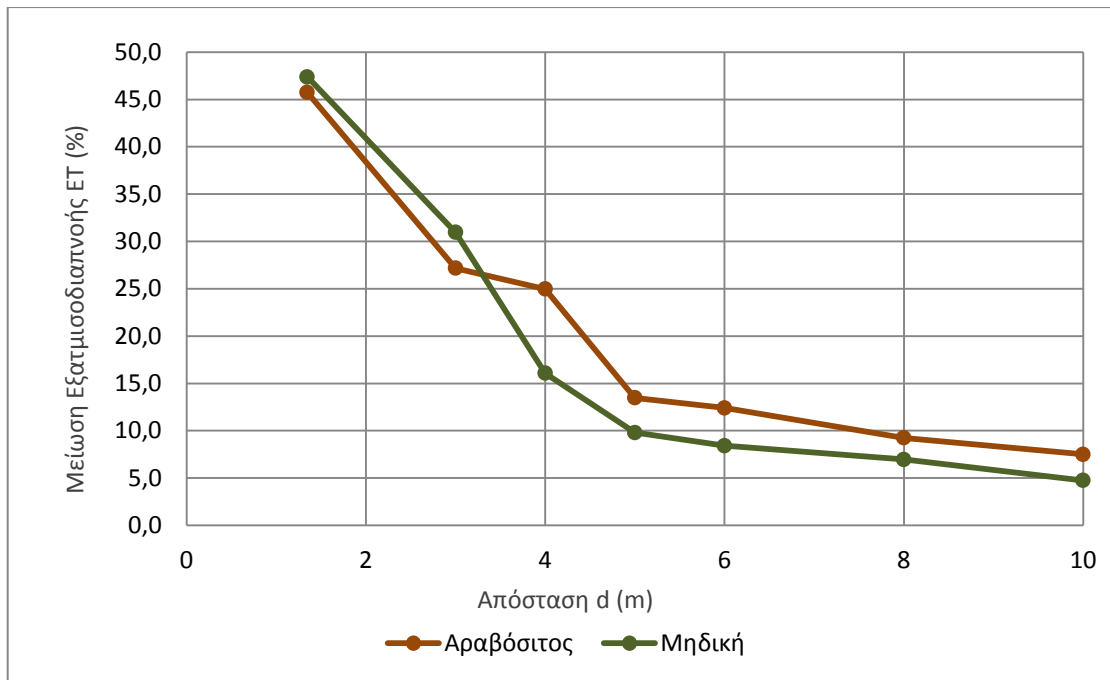


Εικόνα 5.10 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς σε σχέση με την απόσταση συστοιχιών αγροβολταϊκών d (m)

Πολλαπλασιάζοντας με τους φυτικούς συντελεστές για τις αντίστοιχες περιόδους ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας προκύπτει η εξατμισοδιαπνοή για την καλλιέργεια του αραβόσιτου και μηδικής (Πίνακα 5.4). Το χειμερινό σιτάρι θεωρείται μη αρδευόμενη καλλιέργεια. Στην Εικόνα 5.11 δίνεται το ποσοστό μείωσης της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας. Για απόσταση $d=1,345m$ η μείωση της εξατμισοδιαπνοής είναι σχεδόν 50%. Για πυκνή τοποθέτηση των πάνελ για αυξάνοντας λίγο της απόσταση d, το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής μειώνεται σημαντικά. Σε πιο αρα το ποσοστό μείωσης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας δεν διαφέρει τόσο πολύ για διαφορετικά d

Πίνακας 5.4 Εξατμισοδιαπνοή αραβόσιτου και μηδικής ανά έτος συναρτήσει της απόστασης d

d (m)	E (mm/year)	
	Αραβόσιτος	Μηδική
1,345	264,43	481,51
3	354,94	631,80
4	365,73	768,04
5	421,73	825,47
6	426,96	838,05
8	442,35	851,37
10	450,88	871,75
>>	487,40	915,08



Εικόνα 5.11 Μείωση εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας για διάφορες αποστάσεις d (m)

6. Συμπεράσματα και προοπτικές για περαιτέρω έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Κάνοντας μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στα συστήματα των αγροβολταϊκών προκύπτει ότι τα φωτοβολταϊκά και οι καλλιέργειες μπορούν να λειτουργήσουν συνεργατικά με τους εξής τρόπους:

- Προστασία καλλιεργειών από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως παγετός, χιόνι, χαλάζι και υπερβολική ζέστη.
- Μείωση εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας άρα και μείωση αρδευτικών απαιτήσεων.
- Η εξατμισοδιπνοής των καλλιεργειών ευνοεί την λειτουργία των φωτοβολταϊκών μειώνοντας την επίδραση του συντελεστή θερμικής απόδοσης, διότι διατηρεί το μικροκλίμα δροσερό.

Για κατάλληλη διαμόρφωση του συστήματος και επαρκή ποσότητα ακτινοβολίας να φτάνει στο έδαφος η παραγωγή της καλλιέργειας μπορεί να διατηρηθεί ίδια ή ακόμα και να αυξηθεί. Ωστόσο βασικό χαρακτηριστικό των αγροβολταϊκών, ως προς την μελέτη τους, είναι η δυσκολία γενίκευσης των κανόνων για την διαμόρφωση των τεχνικών χαρακτηριστικών τους και την διαχείριση της καλλιέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι οι καλλιέργειες δρουν διαφορετικά ανάλογα με το κλίμα, τις συνθήκες εδάφους, τις καιρικές συνθήκες ανά έτος, τις συνθήκες άρδευσης κ.α.

Μελετώντας την απόδοση ήδη υπάρχοντων συστημάτων, αποδεικνύεται ότι οι καλλιέργειες σε αγροβολταϊκά έχουν καλύτερη απόδοση από αυτές που αναπτύσσονται σε συνθήκες πλήρους ηλίου αν πρόκειται για περιοχές άνυδρες με υψηλές θερμοκρασίες και όταν οι υδατικές ανάγκες των φυτών καλύπτονται από την βροχόπτωση.

Πέραν της αποτύπωσης της διεθνούς εμπειρίας, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε η ανάλυση της απόδοσης ενός συστήματος αγροβολταϊκών στην πεδιάδα της Άρτας. Επιλέχθηκαν να μελετηθούν μια χειμερινή (χειμερινό σιτάρι), μια καλοκαιρινή (αραβόσιτος) και μια ετήσια καλλιέργεια (μηδική)

Ως παράμετρος που αλλάζει με την παρουσία των αγροβολταϊκών θεωρήθηκε μόνο η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος. Άλλες παράμετροι του μικροκλίματος, δηλαδή θερμοκρασία ανέμου και εδάφους,

υγρασία ατμόσφαιρας και εδάφους και η ταχύτητα ανέμου θεωρήθηκαν σταθερές.

Για την επίδραση των αγροβολταϊκών στο ποσοστό σκίασης υπολογίστηκαν τα εξής:

- Καθοριστικός παράγοντας μείωσης ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι η απόσταση τοποθέτησης των σειρών των φωτοβολταϊκών
- Η κλίση των ηλιακών πάνελ δεν επηρεάζει το ποσοστό σκίασης
- Το ύψος τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών έχει μικρή επιρροή στο ποσοστό σκίασης του εδάφους αλλά παίζει σημαντικό ρόλο στην ομοιογένεια της ακτινοβολίας που φτάνει στις καλλιέργειες.

Για την επίδραση της σκίασης στις καλλιέργειες προέκυψε ότι:

- Για πλήρη τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ η απόδοση των καλλιεργειών μειώνεται πάνω από 50%
- Για πυκνή τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πιο αποδοτικό ήταν το σύστημα με το χειμερινό σιτάρι ενώ για αραιή το καλαμπόκι.
- Η μέγιστη απόδοση του συστήματος δεν παρατηρείται για ίδια απόσταση μεταξύ των συστοιχιών στις τρεις καλλιέργειες. Για το χειμερινό σιτάρι η μέγιστη απόδοση του συστήματος αγροβολταϊκών επιτυγχάνεται για $d=1,345m$ ενώ για τις άλλες δύο καλλιέργειες για $d=3m$.
- Οι αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών μειώνονται όσο πιο πυκνή είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η μελέτη διάφορων παραμέτρων των αγροβολταϊκών έχει μεγάλο ενδιαφέρον και τα τελευταία χρόνια οι έρευνες που ασχολούνται με αυτό το θέμα έχουν πολλαπλασιαστεί.

Συγκεκριμένα, σε συνέχεια της μελέτης των τεχνικών χαρακτηριστικών των αγροβολταϊκών που εκπονήθηκε στην παρούσα εργασία προτείνεται:

- Οικονομική ανάλυση του αγροβολταϊκού συστήματος με σκοπό την εκτίμηση κόστους για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και εύρεση της κατάλληλης διαρρύθμισης που θα προσφέρει ικανοποιητικά έσοδα χωρίς μια από τις δυο λειτουργίες των αγροβολταϊκών να επισκιάζεται σε μεγάλο βαθμό.
- Μελέτη της επίδρασης των αγροβολταϊκών και σε άλλες παραμέτρους του μικροκλίματος πέρα από την ακτινοβολία ώστε η απόδοση της καλλιέργειας να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψιν περισσότερα στοιχεία.
- Δοκιμή αγροβολταϊκών για καλλιέργειες στις οποίες η Ελλάδα έχει ειδικό ενδιαφέρον όπως η ελιά ή τα εσπεριδοειδή
- Μελέτη του συστήματος αγροβολταϊκών και σε άλλες περιοχές διαφορετικού κλίματος για να βρεθεί σε ποια συνθήκη τα αγροβολταϊκά μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα τους.
- Χρήση άλλης τεχνολογίας φωτοβολταϊκών που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των αγροβολταϊκών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 2030 climate & energy framework. (n.d.). Europa. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en
- A. Büchel, & R. Bartholet. (2008). SOLAR WINGS A NEW LIGHTWEIGHT PV TRACKING SYSTEM. *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia, Spain*, 2790–2794. <https://doi.org/10.4229/23rdeupvsec2008-4do.9.5>
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Angström, A., (1956) On the computation of global radiation from records of sunshine, *Ark. Geofys.*, 2, 471–479.
- Bellini, E. (2020, October 2). *Agrivoltaics for pear orchards*. *Pv Magazine International*. <https://www.pv-magazine.com/2020/10/02/agrivoltaics-for-pear-orchards/>
- Boland, J., Huang, J., & Ridley, B. (2013). Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.023>
- Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2021). Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
- Campillo, C., Fortes, R., & Henar Prieto, M. D. (2012). Solar Radiation Effect on Crop Production. *Solar Radiation*. <https://doi.org/10.5772/34796>
- Cho, J., Park, S. M., Park, A. R., Lee, O. C., Nam, G., & Ra, I. H. (2020). Application of Photovoltaic Systems for Agriculture: A Study on the Relationship between Power Generation and Farming for the Improvement of Photovoltaic Applications in Agriculture. *Energies*, 13(18), 4815. <https://doi.org/10.3390/en13184815>
- Curl, L. (2022, March 12). *Shade-Tolerant Vegetables and Herbs*. Seattle's Favorite Garden Store Since 1924 - Swansons Nursery. <https://www.swansonsnursery.com/blog/shade-tolerant-vegetables-herbs>
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, 33, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>

Enel Green Power. (2022, November 3). Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/el/%CF%87%CF%8E%CF%81%CE%B5%CF%82/%CE%B5%CF%85%CF%81%CF%8E%CF%80%CE%B7/%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1>

EUR-Lex - I28060 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved November 4, 2022, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=LEGISSUM:I28060>

Eurostat. (2022, January 26). *Renewable energy on the rise: 37% of EU's electricity*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220126-1>

Fthenakis, V., & Kim, H. C. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1465–1474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.017>

Gallagher, J. N., & Biscoe, P. V. (1978). Radiation absorption, growth and yield of cereals. *The Journal of Agricultural Science*, 91(1), 47–60. <https://doi.org/10.1017/s0021859600056616>

GOETZBERGER, A., & ZASTROW, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>

Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Z. E., Trommsdorff, M., Kumar, N. M., Anand, A., Kant, K., & Chopra, S. S. (2022). Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>

GOSSE, G., VARLET-GRANCHER, C., BONHOMME, R., CHARTIER, M., ALLIRAND, J. M., & LEMAIRE, G. (1986). Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6(1), 47–56. <https://doi.org/10.1051/agro:19860103>

Hassanien, R. H. E., Li, M., & Yin, F. (2018). The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production. *Renewable Energy*, 121, 377–388. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.044>

Hassanpour Adeh, E., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>

Hussain, A., Batra, A., & Pachauri, R. (2017). An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>

- Jiang, S., Tang, D., Zhao, L., Liang, C., Cui, N., Gong, D., Wang, Y., Feng, Y., Hu, X., & Peng, Y. (2022). Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under “agrivoltaic” system in Southwest China. *Agricultural Water Management*, 269, 107675. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107675>
- Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., & Vercambre, G. (2022). Shading apple trees with an agrivoltaic system: Impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield determinants. *Scientia Horticulturae*, 306, 111434. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434>
- Lempriere, M. (2020, June 3). *Solar PV costs fall 82% over the last decade*. Solar Power Portal. https://www.solarpowerportal.co.uk/news/solar_pv_costs_fall_82_over_the_last_decade_says_irena
- Mag, S. (2022, May 9). [Comparison] Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels. Solar Magazine. <https://solarmagazine.com/solar-panels/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
- Mamassis, N., Efstratiadis, A., & Apostolidou, I. G. (2012). Topography-adjusted solar radiation indices and their importance in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 756–775. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.670703>
- Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? *European Journal of Agronomy*, 50, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>
- Matich, B. (2021, January 15). *Orchardvoltaics – it’s just ripe*. Pv Magazine International. <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/orchardvoltaics-its-just-ripe/>
- Organic Photovoltaics Research*. (n.d.). Energy.gov. Retrieved November 4, 2022, from <https://www.energy.gov/eere/solar/organic-photovoltaics-research>
- Padilla, J., Toledo, C., & Abad, J. (2022). Enovoltaics: Symbiotic integration of photovoltaics in vineyards. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1007383>
- R. Bartholet, A. Büchel, & F.P. Baumgartner. (2012). Solar Ski Lift PV Carport and Other Solar Wings Cable Based Solutions. *World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 4343–4347. <https://doi.org/10.4229/27theupvsec2012-5bv.1.60>

Reker, S., Schneider, J., & Gerhards, C. (2022). Integration of vertical solar power plants into a future German energy system. *Smart Energy*, 7, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>

Sakharkar, A. (2021, September 17). *First agrivoltaic research facility for carbon-neutral orcharding in Germany*. Inceptive Mind. <https://www.inceptivemind.com/first-agrivoltaic-research-facility-carbon-neutral-orcharding-germany/21217/>

Sinclair, D. A., Ruddell, A. A., Brock, J. K., Clegg, N. J., Lloyd, V. K., & Grigliatti, T. A. (1992). A cytogenetic and genetic characterization of a group of closely linked second chromosome mutations that suppress position-effect variegation in *Drosophila melanogaster*. *Genetics*, 130(2), 333–344. <https://doi.org/10.1093/genetics/130.2.333>

Staff, F. (2022, August 8). What is Photosynthetically Active Radiation? Environmental Monitor. <https://www.fondriest.com/news/photosyntheticradiation.htm>

SunPower SPR-MAX3-400 solar panel | SunPower Solar Module | Europe Solar Store. (n.d.). Retrieved November 5, 2022, from <https://www.europe-solarstore.com/sunpower-spr-max3-400.html>

Tajima, M., & Iida, T. (2021). Evolution of agrivoltaic farms in Japan. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0054674>

Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns). *Sustainability*, 13(12), 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>

Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., & Oberfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>

Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M., & Christophe, A. (2017). Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*, 206, 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>

van de Ven, D. J., Capellan-Peréz, I., Arto, I., Cazcarro, I., de Castro, C., Patel, P., & Gonzalez-Eguino, M. (2021). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>

Wang, C., Guo, L., Li, Y., & Wang, Z. (2012). Systematic Comparison of C3 and C4 Plants Based on Metabolic Network Analysis. *BMC Systems Biology*, 6(Suppl 2), S9. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-6-s2-s9>

Water, Food and Energy. (n.d.). UN-Water. Retrieved November 4, 2022, from <https://www.unwater.org/water-facts/water-food-and-energy>

Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5).

<https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>

Weselek, A., Bauerle, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System. *Agronomy*, 11(4), 733.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11040733>

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4). <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

Younas, R., Imran, H., Riaz, M. H., & Butt, N. Z. (2019). Agrivoltaic Farm Design: Vertical Bifacial vs. Tilted Monofacial Photovoltaic Panels. *ResearchGate*.

<https://arxiv.org/pdf/1910.01076>

Zisis, C., Pechlivani, E., Tsimikli, S., Mekeridis, E., Laskarakis, A., & Logothetidis, S. (2019). Organic Photovoltaics on Greenhouse Rooftops: Effects on Plant Growth. *Materials Today: Proceedings*, 19, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.658>

Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (1999). *Τεχνική Υδρολογία* (3rd ed.).

<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4856.0888>

Μπαλάρας, Κ., Αργυρίου, Α., & Καραγιάννης, Φ. (2006). *ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ & ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*.

Μπαλτάς, Ε. (n.d.). *ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΡΔΕΥΣΗΣ - ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΣΕ ΝΕΡΟ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ*.

Παπακώστα-Τασπούλου, Δ. (2012). <https://openhi.net>.