

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μαρκάτος Ερρίκος Κωνσταντίνος**



**ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ
ΝΕΡΟΥ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΑΡΚΕΙΑ
ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**



Επιβλέπων: Γ. - Φοίβος Σαργέντης Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό ΕΜΠ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος εικόνων	6
Περίληψη	9
Summary	10
1 Εισαγωγή	11
1.1 Θέμα και στόχος της εργασίας	11
1.2 Διάρθρωση εργασίας	11
2 Το Πλέγμα νερού-ενέργειας-τροφίμων	13
2.1 Γενικά	13
2.2 Νερό	15
2.3 Ενέργεια	15
2.4 Τρόφιμα	16
3 Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία	18
3.1 Γενικά	18
3.2 Αναγκαιότητα	18
3.3 Βασικοί στόχοι και επιδιώξεις	19
3.3.1 Βιώσιμη παραγωγή τροφίμων	19
3.3.2 Κλιματική ανθεκτικότητα σε ακραία φαινόμενα (ξηρασίες, πλημμύρες, ακραίες θερμοκρασίες)	21
3.3.3 Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου	21
3.4 Έξυπνες τεχνολογίες και συστήματα στη γεωργία	23
3.4.1 Γενικά	23
3.4.2 Βασικές τεχνολογίες και εφαρμογές - Internet of Things (IoT) στη γεωργία	23
3.5 Συμπληρωματικές τεχνολογίες στη σύγχρονη γεωργία	23
3.6 Το Έξυπνο Θερμοκήπιο (Smart Greenhouse) και εφαρμογή των προηγμένων τεχνολογιών	24
3.7 Οφέλη - προκλήσεις και μελλοντικές τάσεις των έξυπνων τεχνολογιών	26
3.7.1 Οφέλη	26
3.7.2 Προκλήσεις	26
3.7.3 Προοπτικές και μελλοντικές τάσεις	26

3.8	Επίδραση στη διαχείριση νερού, τροφής και ενέργειας	27
3.8.1	Διαχείριση υδάτινων πόρων.....	27
3.8.2	Βιώσιμη παραγωγή τροφίμων.....	28
3.8.3	Ενεργειακή διαχείριση	28
3.8.4	Ολοκληρωμένη προσέγγιση του πλέγματος νερού-ενέργειας και τροφίμων	29
4	Υδροπονική καλλιέργεια	30
4.1	Γενικά	30
4.2	Ιστορία και σημασία της υδροπονικής καλλιέργειας	30
4.3	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	31
4.4	Διάφοροι μέθοδοι υδροπονίας.....	32
4.4.1	Σύστημα Θρεπτικού Φιλμ (Nutrient Film Technique - NFT).....	33
4.4.2	Βαθιά Ροή Θρεπτικών (Deep Flow Technique - DFT).....	33
4.4.3	Σύστημα Στάγδην (Drip Irrigation System).....	33
4.4.4	Αεροπονία (Aeroponics)	33
4.4.5	Σύστημα Παλίσρροιας και Απορροής (Ebb and Flow/ Flood and Drain).....	33
4.4.6	Υδατοκαλλιέργεια (Aquaponics)	34
4.4.7	Κάθετη Υδροπονία (Vertical Hydroponics).....	34
4.5	Σύγκριση μεταξύ υδροπονίας και εδαφικής καλλιέργειας	36
4.5.1	Διαχείριση Πόρων.....	36
4.5.2	Παραγωγικότητα - Απόδοση.....	36
4.5.3	Ποιοτικά Χαρακτηριστικά	36
4.5.4	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	37
4.5.5	Οικονομικά Στοιχεία.....	37
4.5.6	Κοινωνικοοικονομικές Προεκτάσεις	37
4.6	Διαχείριση της χρήσης γης	38
4.6.1	Αποδοτικότητα χρήσης γης.....	38
4.6.2	Αξιοποίηση μη συμβατικών χώρων	38
4.6.3	Μείωση της αποψίλωσης δασών.....	38
4.6.4	Ενσωμάτωση στον αστικό σχεδιασμό	39
4.6.5	Προκλήσεις στη διαχείριση γης	39
4.6.6	Μελλοντικές τάσεις.....	39
4.7	Προκλήσεις στην Εφαρμογή Υδροπονικών Συστημάτων Μεγάλης Κλίμακας	39
4.7.1	Οικονομικές προκλήσεις.....	39

4.7.2	Τεχνικές προκλήσεις	40
4.7.3	Ενεργειακές προκλήσεις	40
4.7.4	Προκλήσεις ανθρώπινου δυναμικού	40
4.7.5	Προκλήσεις αγοράς και ανταγωνιστικότητας	40
4.7.6	Περιβαλλοντικές προκλήσεις	41
4.7.7	Θεσμικές και ρυθμιστικές προκλήσεις	41
5	Υδροπονία - CSA και Πλέγμα νερού-ενέργειας και τροφίμων	42
5.1	Αλληλεπιδράσεις και συνέργειες υδροπονίας στο Πλέγμα	42
5.2	Κλιματικά έξυπνη γεωργία και πλέγμα νερού-ενέργειας και τροφίμων	42
5.2.1	Εφαρμογή του Πλέγματος στην CSA	42
5.3	Αντίκτυπο υδροπονίας και κλιματικά έξυπνης γεωργίας στο Πλέγμα	43
6	Μελέτη περίπτωσης	45
6.1	Περιοχή μελέτης	45
6.2	Προτερήματα περιοχής μελέτης	46
6.2.1	Γεωγραφική θέση και προσβασιμότητα	46
6.2.2	Εγγύτητα σε αγορές και δίκτυα διανομής	46
6.2.3	Διαθεσιμότητα προμηθευτών και πρώτων υλών	47
6.2.4	Υδάτινοι πόροι	47
6.2.5	Ενεργειακοί και φυσικοί πόροι	47
6.2.6	Οικονομικά πλεονεκτήματα	48
6.2.7	Γεωμορφολογικές συνθήκες	48
6.3	Υδροπονική καλλιέργεια θερμοκηπίων Μαρκάτου	48
6.3.1	Ιστορική εξέλιξη και ίδρυση	48
6.3.2	Τεχνολογία και καινοτομία	50
6.3.3	Εμπορική δραστηριότητα και διανομή	52
6.3.4	Προκλήσεις και προοπτικές	52
6.3.5	Κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα	52
6.4	Περιγραφή θερμοκηπίου	52
6.4.1	Γενικά	52
6.4.2	Περιγραφή εγκαταστάσεων	54
6.4.3	Περιγραφή συστήματος υδροπονίας με επίπλευση	56
6.4.4	Εγκαταστάσεις υδροπονίας	57
6.4.5	Περιγραφή καλλιέργειας	58

6.5	Φυτεύσεις – Πωλήσεις	60
6.6	Κατανάλωση ενέργειας	62
6.7	Κατανάλωση νερού	64
6.8	Ενέργεια των προϊόντων.....	65
6.9	Ενέργεια λιπασμάτων	66
7	Εξεταζόμενες λύσεις για την αυτάρκεια ενός κλειστού συστήματος υδροπονίας.	69
7.1	Αυτάρκεια σε ηλεκτρική ενέργεια.....	69
7.2	Μέθοδοι παραγωγής ενέργειας εντός των εγκαταστάσεων.....	70
7.2.1	Συστήματα ΣΗΘΥΑ.....	70
7.2.2	Φωτοβολταϊκά πάνελ αντί για νάilon κάλυψης θερμοκηπίου.....	71
7.2.3	Παραγωγή βιοαερίου	73
7.2.4	Θέρμανση και ψύξη με γεωθερμία	74
7.2.4.1	Αρχή λειτουργίας και τύποι συστημάτων	75
7.2.4.2	Εφαρμογή στα υδροπονικά συστήματα	76
7.2.4.3	Ενεργειακή απόδοση και οικονομικά οφέλη	76
7.2.5	Παραγωγή θερμού νερού με την απλή μέθοδο σωλήνων PVC	77
7.3	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών	80
8	Επίλυση του Πλέγματος στην υδροπονική μονάδα Markatos	81
8.1	Μεθοδολογία	81
8.2	Δεδομένα και υπολογισμοί.....	83
8.2.1	Νερό.....	83
8.2.2	Ενέργεια	85
8.2.3	Τρόφιμα.....	86
8.3	Αποτελέσματα και Συζήτηση	87
9	Συμπεράσματα	91
9.1	Κύρια Αποτελέσματα και Ποσοτικοποίηση Πόρων.....	91
9.2	Αλληλεπιδράσεις και Συνέργειες Πόρων	91
9.3	Τεχνικές Λύσεις και Ενεργειακή Αποδοτικότητα	92
9.4	Εποχικές Διακυμάνσεις και Δυναμική Διαχείριση.....	92
9.5	Προοπτικές και Εφαρμογές	93
9.6	Συνολική Αξιολόγηση	93
10	Βιβλιογραφικές αναφορές	94

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Σχηματική αναπαράσταση του Πλέγματος Νερού – Ενέργειας – Τροφίμων.....	14
Εικόνα 2 Έξυπνη διαχείριση αυτοματισμών θερμοκηπίου μέσω εφαρμογής σε κινητή συσκευή.	25
Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση μεθόδων υδροπονίας.....	35
Εικόνα 4 Σύγκριση Υδροπονικής και Εδαφικής Καλλιέργειας.	38
Εικόνα 5 Αλληλεξάρτηση πόρων σε Υδροπονικό Σύστημα.....	44
Εικόνα 6 Τοποθεσία μονάδας Markatos Hydroponics – Google Earth.	45
Εικόνα 7 Τοποθεσία μονάδας Markatos Hydroponics – Google Maps.	46
Εικόνα 8 Πρώιμο στάδιο καλλιέργειας μαρουλιού σε πλωτές πλάκες φελιζόλ (μέθοδος DFT).	49
Εικόνα 9 Πλήρως ανεπτυγμένα φυτά μαρουλιού σε λιμνοδεξαμενές υδροπονίας.	49
Εικόνα 10 Υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού (α) και ντομάτας (β) σε υπόστρωμα πετροβάμβακα με σύστημα στάγδην.....	50
Εικόνα 11 Κάθετη υδροπονία με μαρούλι πριν από 25 χρόνια.....	50
Εικόνα 12 Στιγμιότυπα της εφαρμογής openHAB για τον απομακρυσμένο έλεγχο των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων (μέσω κινητού τηλεφώνου).	51
Εικόνα 13 Πανοραμική εξωτερική όψη μέρους των θερμοκηπίων της μονάδας Markatos Hydroponics.	53
Εικόνα 14 Εσωτερική όψη θερμοκηπίου με λιμνοδεξαμενές υδροπονίας και καλλιέργεια μαρουλιού.....	55
Εικόνα 15 Αποθηκευτικός χώρος.....	56
Εικόνα 16 Χώρος σπορείου με κυλιόμενα τραπέζια και δίσκους ανάπτυξης σπορόφυτων σε πετροβάμβακα πριν την μεταφύτευση.	56
Εικόνα 17 Λιμνοδεξαμενές υδροπονίας.....	58
Εικόνα 18 Ριζικό σύστημα φυτών μέσα στο θρεπτικό διάλυμα.....	58
Εικόνα 19 Διαλογή και συσκευασία προϊόντων «Ζωντανή Σαλάτα» κατά τη συγκομιδή.	59
Εικόνα 20 Ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας με συσκευασμένο προϊόν στο χώρο του θερμοκηπίου.....	60
Εικόνα 21 Ποικιλίες καλλιέργειας μαρουλιού. Γαλλική σαλάτα (α), Λόλλο πράσινη (β), Λόλλο κόκκινη (γ), Ανάμεικτη (δ).	60
Εικόνα 22 Φυτεύσεις σπόρων και Παραγόμενα φυτά έτους 2024.....	61
Εικόνα 23 Απαιτούμενος χρόνος από την φύτευση έως την συγκομιδή.....	61
Εικόνα 24 Σύνολο φυτεύσεων και παραγωγής 2024.	62
Εικόνα 25 Κατανάλωση ενέργειας ανά ημέρα του έτους 2024 ΣΕ kWh και MJ.....	63
Εικόνα 26 Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας και παραγόμενων προϊόντων.....	64
Εικόνα 27 Συνολική κατανάλωση νερού ανά ημέρα του έτους 2024.	65

Εικόνα 28 Σύγκριση κατανάλωσης νερού και παραγόμενων προϊόντων.	65
Εικόνα 29 Απόδοση σε ενέργεια των προϊόντων ανά ημέρα του έτους 2024.....	66
Εικόνα 30 Απαιτούμενα λιπάσματα ανά ημέρα σε μορφή ενέργειας (MJ).....	67
Εικόνα 31 Συσχέτιση κατανάλωσης νερού και ενέργειας λιπασμάτων.	68
Εικόνα 32 Συσχέτιση παραγωγής και ενέργειας λιπασμάτων.....	68
Εικόνα 33 Σχηματική απεικόνιση ολοκληρωμένου συστήματος θερμοκηπίου με αξιοποίηση γεωθερμικού εναλλάκτη, βιοαερίου και ηλιακών συλλεκτών για την κάλυψη θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων [162].	69
Εικόνα 34 Συνδυασμένη λειτουργία συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης (CCHP) [163].	70
Εικόνα 35 Εύκαμπτο φωτοβολταϊκό πάνελ.	72
Εικόνα 36 Εφαρμογή ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πάνελ στην οροφή θερμοκηπίου, για ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και ρύθμιση της ηλιακής ακτινοβολίας [178].....	72
Εικόνα 37 Σχηματική απεικόνιση της παραγωγής βιοαερίου και των δυνατοτήτων αξιοποίησής του για θέρμανση, ηλεκτροδότηση και λίπανση[]	73
Εικόνα 38 Ροή θερμικής ενέργειας σε γεωθερμικό σύστημα κατά τη διάρκεια χειμώνα και καλοκαιριού. Πηγή: Marisa Larson, National Center for Appropriate Technology (NCAT). Τροποποιήθηκε για εκπαιδευτική χρήση. (Πρωτότυπος τίτλος: “Flow of Heat Energy in Geothermal System”) []	75
Εικόνα 39 Θερμοκηπιακή εφαρμογή θέρμανσης νερού με σωλήνες PVC, τοποθετημένους στον κορφιά της κατασκευής για μεγιστοποίηση της απορρόφησης ηλιακής ενέργειας (μονάδα Markatos Hydroponics).....	78
Εικόνα 40 Η κατανάλωση νερού και λιπασμάτων (σε ημερήσια βάση) και η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια του 2024.....	84
Εικόνα 41 Εισροές νερού από συλλογή βροχής (3 ha), απολήψεις νερού από δεξαμενή 1000 m ³ και συνολική κατανάλωση νερού (σε ημερήσια βάση).....	85
Εικόνα 42 Τα προφίλ της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά PVs (0.1 ha) και των ενεργειακών αναγκών της υδροπονικής καλλιέργειας (1 ha) (σε ημερήσια βάση).	86
Εικόνα 43 Η ανεκμετάλλευτη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και η χρήση μπαταριών με αποθηκευτικό χώρο 100 kWh και 200 kWh (σε ημερήσια βάση).	86
Εικόνα 44 Ο αριθμός των σπόρων που χρησιμοποιήθηκαν και των μαρουλιών που παράχθηκαν από την υδροπονική μονάδα σε τεμάχια και η ισοδυναμία τους σε ενέργεια (σε ημερήσια βάση).	87
Εικόνα 45 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες (λειτουργικές και λιπάσματα), λειτουργικές ενεργειακές ανάγκες, λιπάσματα και η παραγωγική ισοδυναμία σε ενέργεια (σε ημερήσια βάση).	87
Εικόνα 46 Ενεργειακές ανάγκες από τα λιπάσματα και το δίκτυο (μετά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, χωρίς μπαταρίες), παραγωγή σε ενεργειακές μονάδες και νερό ως ενέργεια για αφαλάτωση (σε ημερήσια βάση).....	88

Εικόνα 47 Οι σωρευτικές ενεργειακές ανάγκες (λειτουργικές και για αφαλατωμένο νερό για 365 ημέρες) σε σύγκριση με: (α) φωτοβολταϊκά 0.1 ha, 100 ημέρες το σύστημα δεν καλύπτει τις ανάγκες· (β) φωτοβολταϊκά 0.2 ha, 10 ημέρες το σύστημα δεν καλύπτει τις ανάγκες (σε ημερήσια βάση).....	88
Εικόνα 48 Ενεργειακοί δείκτες: ενεργειακός λόγος και καθαρό ενεργειακό κέρδος (σε ημερήσια βάση).	89
Εικόνα 49 Ενεργειακοί δείκτες: (α) ενεργειακός λόγος· (β) καθαρό ενεργειακό κέρδος (σε ετήσια βάση).	90

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναλύει τη λειτουργία του Πλέγματος Νερού–Ενέργειας–Τροφίμων WEF (Water–Energy–Food Nexus) στο πλαίσιο θερμοκηπιακής μονάδας υδροπονικής καλλιέργειας. Στόχος είναι η διερεύνηση τεχνικών επιλογών που ενισχύουν τη λειτουργική αυτονομία της μονάδας και μειώνουν την εξάρτησή της από εξωτερικές εισροές. Η προσέγγιση του Πλέγματος λειτουργεί ως μεθοδολογικό υπόβαθρο για την κατανόηση των συσχετίσεων μεταξύ της ενέργειας, του νερού και της παραγωγής τροφίμων, παρέχοντας ένα εργαλείο βελτιστοποίησης της διαχείρισης των πόρων.

Αναλύονται τα ποσοτικά δεδομένα μιας μονάδας υδροπονίας στα Οινόφυτα Βοιωτίας (Markatos Hydroponics), όπου συλλέγονται και επεξεργάζονται μετρήσεις κατανάλωσης νερού, ηλεκτρικής ενέργειας και παραγωγικότητας. Παράλληλα, διερευνώνται τεχνολογικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο εγκαταστάσεων: φωτοβολταϊκά πάνελ ενσωματωμένα στο θερμοκήπιο, γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης, παραγωγή βιοαερίου και συμπαραγωγή ενέργειας. Η εργασία προτείνει σενάρια ενεργειακής αυτάρκειας βασισμένα σε ημερήσια δεδομένα και προσομοιώσεις πλήρους ετήσιας λειτουργίας.

Η υδροπονική μέθοδος καλλιέργειας εξετάζεται τόσο ως τεχνικό σύστημα παραγωγής όσο και ως στρατηγική αξιοποίησης περιορισμένων φυσικών πόρων. Μελέτες αποδοτικότητας δείχνουν πολλαπλάσια παραγωγή ανά μονάδα εδάφους και σημαντική εξοικονόμηση υδατικών πόρων σε σχέση με την παραδοσιακή γεωργία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση έξυπνων τεχνολογιών (αισθητήρες, αυτοματισμοί, λογισμικά παρακολούθησης) για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμοκηπιακή υδροπονική μονάδα, όταν σχεδιάζεται με στόχο την βελτιστοποίηση του Πλέγματος WEF, μπορεί να επιτύχει ενεργειακή αυτονομία έως και 90% και μείωση της εξωτερικής ζήτησης νερού κατά 25–35%. Η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με τεχνολογίες ανάκτησης και ανακύκλωσης, ενισχύει τη λειτουργική ανθεκτικότητα του συστήματος. Η εργασία καταλήγει ότι αυτές οι υποδομές αποτελούν βιώσιμα μοντέλα παραγωγής τροφίμων, με εφαρμογές τόσο σε γεωργικές περιοχές όσο και σε αστικά περιβάλλοντα.

Summary

This thesis examines the operation of the Water–Energy–Food (WEF) Nexus within a hydroponic greenhouse facility, focusing on technical strategies aimed at enhancing the system's self-sufficiency and reducing dependency on external inputs. The WEF Nexus is adopted as a conceptual and analytical framework that highlights the interdependence of water, energy, and food systems, and serves as a decision-making tool for integrated resource management.

The study is based on real-world data collected from the “Markatos Hydroponics” unit located in Inofyta, Viotia. The facility's daily consumption of water, electricity, and nutrient inputs is analyzed alongside crop production data. Technical solutions are proposed and evaluated, including the installation of photovoltaic panels integrated into the greenhouse structure, geothermal heating and cooling systems, biogas generation, and combined heat and power (CHP) units. These interventions are tested through simulation models that explore energy autonomy scenarios over a full year of continuous operation.

Hydroponic cultivation is examined both as a production system and as a resource-efficient method suitable for non-conventional or urban spaces. The method offers significant advantages, such as up to 90% water savings and 10-fold increase in productivity per unit area compared to conventional agriculture. Furthermore, the study explores the role of smart technologies (e.g., sensors, automated control, and monitoring software) in optimizing system efficiency and responsiveness.

The results indicate that when a hydroponic greenhouse is designed following the WEF Nexus approach, it can achieve up to 90% energy autonomy and reduce external water needs by 25–35%. The integration of renewable energy systems and closed-loop solutions strengthens the operational resilience of the facility. This thesis concludes that such infrastructures represent viable, efficient food production models with high applicability in both rural and urban contexts.

1 Εισαγωγή

1.1 Θέμα και στόχος της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη λειτουργία του Πλέγματος Νερού–Ενέργειας–Τροφίμων WEF (Water–Energy–Food) σε θερμοκηπιακή μονάδα υδροπονικής καλλιέργειας, με σκοπό τη διερεύνηση τεχνικών λύσεων που ενισχύουν την αυτάρκεια του συστήματος. Το Πλέγμα WEF αποτελεί ένα εννοιολογικό και λειτουργικό εργαλείο ανάλυσης, το οποίο επισημαίνει τη στενή αλληλεξάρτηση των τριών αυτών κρίσιμων πόρων. Στο πλαίσιο της σύγχρονης γεωργίας, οι τομείς του νερού, της ενέργειας και της τροφής δεν μπορούν πλέον να εξετάζονται μεμονωμένα, καθώς κάθε διαχειριστική απόφαση ή τεχνολογική παρέμβαση σε έναν από αυτούς επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα τους υπόλοιπους.

Η επιλογή της υδροπονίας ως βασικό σύστημα μελέτης στηρίζεται στην ικανότητά της να επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις καλλιέργειας, περιορισμένη κατανάλωση πόρων και δυνατότητα ενσωμάτωσης σε αστικό ή μη παραδοσιακό χώρο. Ταυτόχρονα, η τεχνολογική της βάση ευνοεί την εφαρμογή έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης, γεγονός που την καθιστά ιδανική για ενσωμάτωση στο πλαίσιο του Πλέγματος. Σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η εξοικονόμηση νερού έως και 90%, η μείωση της ανάγκης για φυτοπροστατευτικά προϊόντα, η αύξηση της παραγωγικότητας έως και 10 φορές ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς και η δυνατότητα ετήσιας καλλιέργειας, καθιστούν τη μέθοδο αυτή ελκυστική σε σύγχρονες προσεγγίσεις βιώσιμης γεωργικής παραγωγής.

Η εργασία αξιοποιεί ως μελέτη περίπτωσης τη μονάδα “Markatos Hydroponics” στα Οινόφυτα Βοιωτίας. Η μονάδα επιλέχθηκε λόγω της γεωγραφικής της θέσης, της τεχνικής της συγκρότησης και της διαθεσιμότητας πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης νερού και ενέργειας, καθώς και παραγωγής τροφίμων. Μέσω της καταγραφής, επεξεργασίας και ανάλυσης αυτών των δεδομένων, επιχειρείται η αξιολόγηση της απόδοσης της μονάδας, καθώς και η αναζήτηση τεχνολογικών λύσεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ενεργειακή και υδατική αυτάρκεια.

Προτείνονται εφαρμογές όπως η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στην οροφή του θερμοκηπίου, η χρήση γεωθερμικών συστημάτων, η παραγωγή βιοαερίου, η συλλογή βρόχινου νερού και η αξιοποίηση συστημάτων συμπαραγωγής (ΣΗΘΥΑ). Τα δεδομένα συνδυάζονται μέσω μαθηματικών μοντέλων για να αξιολογηθεί η σταθερότητα του συστήματος σε βάθος χρόνου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα της συμβατικής γεωργίας, αναδεικνύοντας την υπεροχή της υδροπονίας ως προς την ενεργειακή απόδοση και την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων φυσικών πόρων.

Τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης πρότασης σχεδιασμού ενός αυτάρκους, τεχνολογικά υποστηριζόμενου θερμοκηπιακού συστήματος παραγωγής τροφίμων, που να αποτελεί βιώσιμο πρότυπο εφαρμογής τόσο σε αγροτικές όσο και σε αστικές περιοχές.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται σε εννέα κύρια κεφάλαια:

Στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο του Πλέγματος Νερού–Ενέργειας–Τροφίμων, με διαχωρισμένη ανάλυση των τριών πόρων και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Δίνεται έμφαση στην έννοια της διατομεακής διαχείρισης και στις συνέργειες που προκύπτουν από τον συγχρονισμό σχεδιασμό χρήσης τους.

Το 3ο κεφάλαιο αναφέρεται στην έννοια της Έξυπνης Γεωργίας και στις σύγχρονες τεχνολογίες που τη στηρίζουν, όπως αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη, γεωργία ακριβείας και αυτοματοποιημένα συστήματα. Εξετάζεται ιδιαίτερα η εφαρμογή τους στο πλαίσιο των “Έξυπνων Θερμοκηπίων”.

Το 4ο κεφάλαιο εστιάζει στην υδροπονία, τις βασικές της μεθόδους και τα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την παραδοσιακή γεωργία. Παρουσιάζονται ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της παραγωγής, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ζητήματα χρήσης γης.

Στο 5ο κεφάλαιο, συνδέεται η υδροπονική καλλιέργεια με το Πλέγμα, αναλύοντας πώς η επιλογή καλλιεργητικών τεχνικών επηρεάζει τη διαχείριση ενέργειας και νερού, καθώς και την αποδοτικότητα του συστήματος.

Το 6ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή της μονάδας Markatos Hydroponics, τις εγκαταστάσεις της, τις καλλιέργειες, τις εισροές και εκροές, καθώς και τον υπολογισμό ενεργειακών και υδατικών απαιτήσεων.

Στο 7ο κεφάλαιο παρουσιάζονται εναλλακτικές τεχνικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για την ενίσχυση της αυτάρκειας της μονάδας. Περιλαμβάνονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έξυπνα συστήματα θέρμανσης/ψύξης, καθώς και τρόποι αποθήκευσης ενέργειας.

Το 8ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση και την ποσοτική ανάλυση της λειτουργίας του Πλέγματος στην υπό εξέταση μονάδα, με στόχο την εκτίμηση της αποδοτικότητας διαφόρων σεναρίων αυτοδυναμίας.

Τέλος, το 9ο κεφάλαιο συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και προτείνει μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, όπως η εφαρμογή αυτών των μοντέλων σε αστικές καλλιέργειες και η αξιοποίηση νέων τεχνολογιών για την περαιτέρω ενίσχυση της αυτάρκειας.

2 Το Πλέγμα νερού-ενέργειας-τροφίμων

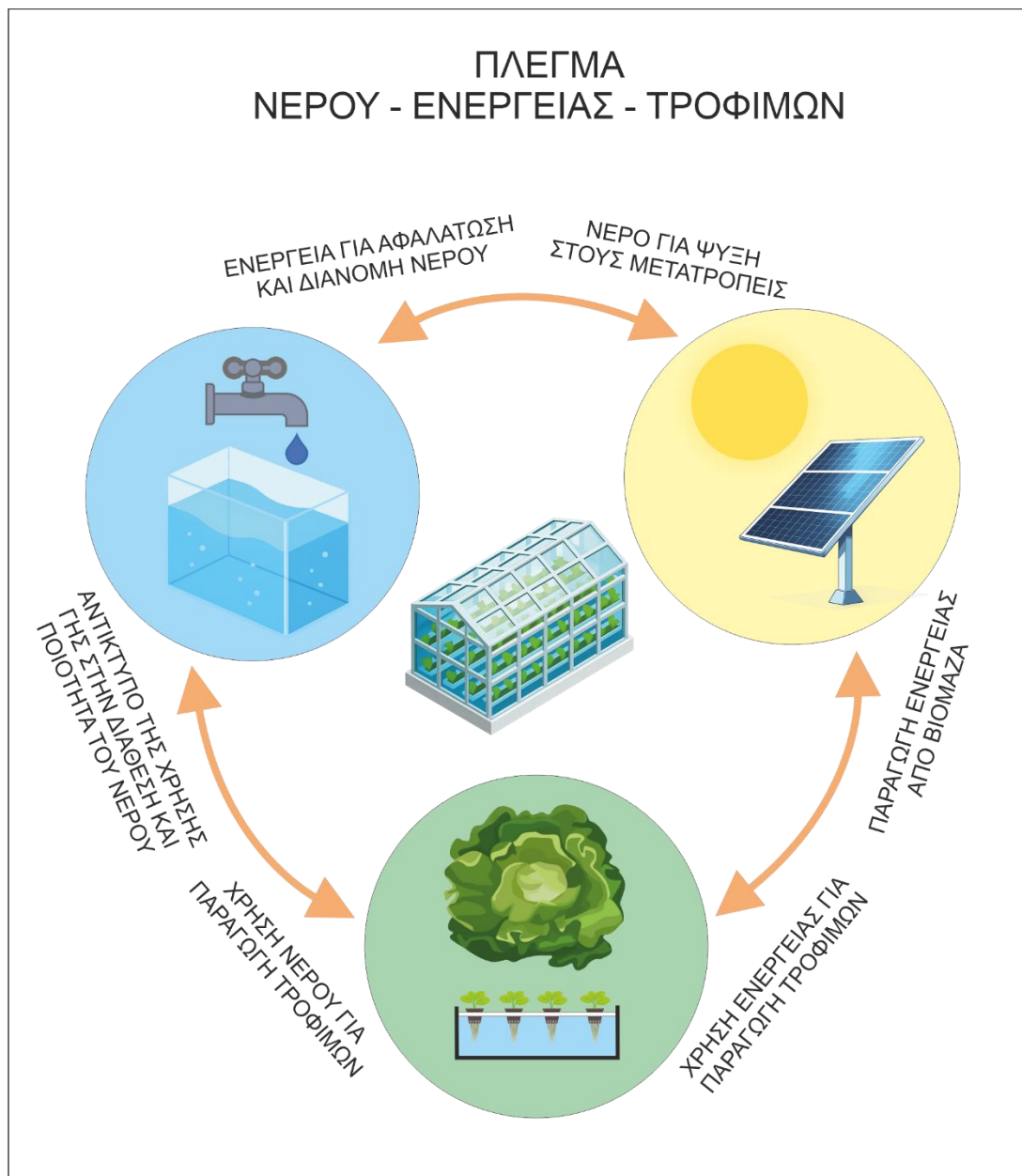
2.1 Γενικά

Το Πλέγμα νερού-ενέργειας-τροφίμων (Water-Energy-Food Nexus) αποτελεί ένα εννοιολογικό πλαίσιο που αναγνωρίζει τη θεμελιώδη διασύνδεση μεταξύ αυτών των τριών κρίσιμων πόρων. Η προσέγγιση του Πλέγματος (NEXUS) έγινε κατά την τελευταία δεκαετία ως απάντηση στις αυξανόμενες παγκόσμιες προκλήσεις της επισιτιστικής ασφάλειας, της λειψυδρίας και της ενεργειακής κρίσης. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της προσέγγισης είναι η αναγνώριση ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε έναν τομέα έχουν άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στους άλλους δύο[1-11].

Η συνειδητοποίηση της αλληλεξάρτησης μεταξύ των τριών αυτών πόρων οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης ολιστικών προσεγγίσεων διαχείρισης. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), η κατανόηση και η διαχείριση αυτών των περίπλοκων αλληλεπιδράσεων αποτελεί προϋπόθεση για την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης, ιδιαίτερα σε έναν κόσμο που χαρακτηρίζεται από αυξανόμενο πληθυσμό και περιορισμένους φυσικούς πόρους [12, 13].

Η προσέγγιση της διαχείρισης των πόρων μέσω του πλέγματος, δίνει έμφαση στην ανάγκη για συντονισμένες πολιτικές που βελτιστοποιούν τη χρήση τους χωρίς να θυσιάζουν την οικολογική ισορροπία κανενός τομέα. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση των αντισταθμίσεων (trade-offs) και των συνεργειών μεταξύ των τριών πόρων, με στόχο τη μεγιστοποίηση των οφελών για την κοινωνία και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η παρακάτω Εικόνα 1 αναπαριστά με απλό και κατανοητό τρόπο την έννοια του Πλέγματος Νερού – Ενέργειας – Τροφίμων, όπως αυτή εφαρμόζεται στον αγροδιατροφικό τομέα. Το διάγραμμα βασίζεται στην αρχή της αλληλεξάρτησης των τριών πόρων, καθώς κάθε παρέμβαση σε έναν από αυτούς επηρεάζει τους υπόλοιπους.



Εικόνα 1 Σχηματική αναπαράσταση του Πλέγματος Νερού – Ενέργειας – Τροφίμων.

Στο κέντρο του σχήματος βρίσκεται ένα θερμοκήπιο, ως ενδεικτική μονάδα ολοκληρωμένης παραγωγής, γύρω από την οποία αναπτύσσονται οι τρεις βασικές ροές:

Οι διπλές κατευθύνσεις των βελών τονίζουν τη δυναμική και κυκλική σχέση μεταξύ των πόρων: η ενέργεια απαιτείται για την άντληση και διαχείριση του νερού, το νερό είναι απαραίτητο για την παραγωγή τροφίμων, και η αγροτική παραγωγή επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας και υδάτων.

Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την κατανόηση ότι η βιώσιμη διαχείριση των πόρων δεν μπορεί να είναι αποσπασματική, αλλά οφείλει να βασίζεται σε ολοκληρωμένα και συνεργατικά μοντέλα.

2.2 Νερό

Το νερό αποτελεί έναν από τους πόρους του Πλέγματος, καθώς είναι απαραίτητο τόσο για την παραγωγή τροφίμων όσο και για την παραγωγή ενέργειας. Η διαθεσιμότητα γλυκού νερού σε παγκόσμιο επίπεδο είναι περιορισμένη, με λιγότερο από το 1% των υδάτινων πόρων του πλανήτη να είναι άμεσα προσβάσιμο για χρήση [14]. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Παγκόσμιου Ινστιτούτου Πόρων (World Resources Institute) [15], περίπου το 70% του γλυκού νερού που αντλείται παγκοσμίως χρησιμοποιείται για γεωργικούς σκοπούς, το 20% για βιομηχανική χρήση (συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας) και το 10% για οικιακή χρήση [16].

Στο πλαίσιο του Πλέγματος, η διαχείριση των υδάτινων πόρων αντιμετωπίζει πολλαπλές προκλήσεις:

1. **Αυξανόμενη ζήτηση:** Η πληθυσμιακή αύξηση, η αστικοποίηση και η οικονομική ανάπτυξη οδηγούν σε αυξημένη ζήτηση νερού και για τους τρεις τομείς του Πλέγματος.
2. **Εποχικές διακυμάνσεις:** Οι δομημένες αλλαγές του κλίματος, έχουν οδηγήσει σε περιόδους ξηρασίας αλλά και σε περιόδους αφθονίας που πολλές φορές οδηγούσαν σε αστοχία από πλημμύρες των χώρων καλλιέργειας [17].
3. **Ποιότητα νερού:** Η ρύπανση των υδάτων από γεωργικές, βιομηχανικές και αστικές πηγές περιορίζει περαιτέρω τη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων.
4. **Ανταγωνισμός χρήσεων:** Η αυξανόμενη ανάγκη νερού για παραγωγή τροφίμων και ενέργειας δημιουργεί ανταγωνιστικές συνθήκες, ιδιαίτερα σε περιοχές με λειψυδρία.

Οι καινοτόμες προσεγγίσεις για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων περιλαμβάνουν την ανάπτυξη αποδοτικότερων συστημάτων άρδευσης, την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, την αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εφαρμογή "έξυπνων" τεχνολογιών παρακολούθησης και διαχείρισης νερού [18]. Η ολοκληρωμένη διαχείριση υδάτινων πόρων (Integrated Water Resources Management - IWRM) αναγνωρίζεται ως βασική προσέγγιση που συνάδει με τις αρχές του Πλέγματος [19].

2.3 Ενέργεια

Η ενέργεια αποτελεί τον δεύτερο από τους υπό εξέταση πόρους του Πλέγματος, με κρίσιμες αλληλεπιδράσεις με το νερό και τα τρόφιμα. Η παραγωγή ενέργειας απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού για ψύξη θερμοηλεκτρικών σταθμών, για υδροηλεκτρική παραγωγή και για την εξόρυξη και επεξεργασία καυσίμων [20]. Παράλληλα, η διαχείριση του νερού (άντληση, επεξεργασία, μεταφορά) και η παραγωγή τροφίμων (καλλιέργεια, επεξεργασία, ψύξη) απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας.

Οι βασικές προκλήσεις στον τομέα της ενέργειας περιλαμβάνουν:

1. **Αυξανόμενη ζήτηση:** Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 50% έως το 2050, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης [21].
2. **Ένταση κατανάλωσης νερού:** Διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας έχουν διαφορετικό αποτύπωμα νερού, με κάποιες συμβατικές μεθόδους να απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού [22,23,24,25]. Ενδεικτικό είναι ότι απαιτούνται 50ml νερού για αλκαλικές μπαταρίες και ~2000 λίτρα αλμυρού μη πόσιμου ή κατάλληλου για άρδευση νερό το οποίο αποδίδει περίπου 1 κιλό λιθίου [26, 27, 28, 29, 30]

3. **Ανταγωνισμός για τις χρήσεις γης:** Η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι καλλιέργειες για βιοκαύσιμα, τα φωτοβολταϊκά πάρκα και τα αιολικά πάρκα, ανταγωνίζεται τη γεωργική γη και άλλες χρήσεις [31].

Οι βιώσιμες προσεγγίσεις στον τομέα της ενέργειας στο πλαίσιο του Πλέγματος περιλαμβάνουν:

1. **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:** Η μετάβαση σε ηλιακή, αιολική, γεωθερμική και άλλες ανανεώσιμες πηγές θεωρείται ανανεώσιμος φυσικός πόρος [32], αλλά υπάρχουν ερωτηματικά για το πόσο νερό (αφού περιέχουν μεταλλεύματα και σπάνιες γαίες που απαιτούν επεξεργασία με νερό) και ενέργεια (η οποία υπάρχει ερωτηματικό αν αποδίδεται όταν είναι χρήσιμη) χρειάζεται για να κατασκευαστούν.
2. **Ενεργειακή απόδοση:** Η βελτίωση της αποδοτικότητας σε όλη την αλυσίδα παραγωγής, διανομής και χρήσης ενέργειας μειώνει τη συνολική ζήτηση.
3. **Έξυπνα δίκτυα και αποκεντρωμένη παραγωγή:** Τεχνολογίες που βελτιστοποιούν τη διαχείριση ενέργειας και επιτρέπουν την καλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών.
4. **Συμπαγωγή ενέργειας:** Συστήματα που παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, αυξάνοντας τη συνολική αποδοτικότητα.

Στο πλαίσιο του Πλέγματος, η βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας απαιτεί την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων με τους τομείς του νερού και των τροφίμων και την ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών που βελτιστοποιούν τη χρήση όλων των πόρων.

2.4 Τρόφιμα

Τα τρόφιμα αποτελούν τον τρίτο από τους πόρους του Πλέγματος, καθώς η γεωργική παραγωγή είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής γλυκού νερού παγκοσμίως και ταυτόχρονα σημαντικός καταναλωτής ενέργειας σε όλη την αλυσίδα αξίας των τροφίμων, από την παραγωγή και επεξεργασία μέχρι τη διανομή και κατανάλωση.

Οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τομέας των τροφίμων στο πλαίσιο του Πλέγματος περιλαμβάνουν:

1. **Αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων:** Ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να φτάσει τα 9,7 δισεκατομμύρια έως το 2050, απαιτώντας αύξηση της παραγωγής τροφίμων κατά περίπου 50%, σύμφωνα με εκτιμήσεις του FAO [33,34].
2. **Περιορισμένη διαθεσιμότητα γης:** Η επέκταση των καλλιεργούμενων εκτάσεων περιορίζεται από την αστικοποίηση, την υποβάθμιση της γης και την ανάγκη διατήρησης της βιοποικιλότητας.
3. **Υδατικό αποτύπωμα:** Διαφορετικές καλλιέργειες και μέθοδοι παραγωγής έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε νερό, επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα των συστημάτων παραγωγής τροφίμων [35].
4. **Ενεργειακή ένταση:** Η σύγχρονη γεωργία είναι εξαρτημένη από την ενέργεια για μηχανήματα, παραγωγή λιπασμάτων, άντληση νερού, μεταφορά και επεξεργασία προϊόντων.
5. **Απώλειες και σπατάλη τροφίμων:** Περίπου το ένα τρίτο των παραγόμενων τροφίμων χάνεται ή σπαταλάται, αντιπροσωπεύοντας σημαντική απώλεια πόρων νερού και ενέργειας [36].

Οι βιώσιμες προσεγγίσεις στην παραγωγή τροφίμων στο πλαίσιο του Πλέγματος περιλαμβάνουν:

- **Κλιματικά έξυπνη γεωργία (Climate-smart agriculture):** Πρακτικές που αυξάνουν την παραγωγικότητα ενώ ενισχύουν την ανθεκτικότητα σε κλιματικές μεταβολές (πλημμύρες και ξηρασίες).
- **Αγροοικολογία:** Εφαρμογή οικολογικών αρχών στη γεωργία για βελτιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ φυτών, ζώων, ανθρώπων και περιβάλλοντος.
- **Καινοτόμα συστήματα παραγωγής:** Υδροπονία, ενυδρειοπονία, καθετοποιημένη γεωργία και άλλα συστήματα που μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα χρήσης γης, νερού και ενέργειας.
- **Ψηφιακή γεωργία:** Χρήση τεχνολογιών όπως δορυφορική παρακολούθηση, γεωργία ακριβείας, αισθητήρες IoT (internet of things) και τεχνητή νοημοσύνη για βελτιστοποίηση των εισροών και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

3 Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία

3.1 Γενικά

Η κλιματικά έξυπνη γεωργία (Climate-Smart Agriculture, CSA) αποτελεί μια ολιστική προσέγγιση στην αγροτική παραγωγή που στοχεύει στην ανθεκτικότητα της παραγωγής από ενδεχόμενες κλιματικές αλλαγές (περιόδους ξηρασίας ή περιόδους πλημμύρας), ενισχύοντας την παραγωγικότητα και την επισιτιστική ασφάλεια [37]. Η έννοια αυτή αναδύθηκε ως απάντηση στην αυξανόμενη ανάγκη για προσαρμογή του αγροτικού τομέα στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και ταυτόχρονα για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των γεωργικών δραστηριοτήτων.

Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), η κλιματικά έξυπνη γεωργία στηρίζεται σε τρεις βασικούς πυλώνες [38, 39] :

1. Την αειφόρο αύξηση της γεωργικής παραγωγικότητας και των εισοδημάτων των παραγωγών
2. Την προσαρμογή και ενίσχυση της ανθεκτικότητας στις επιπτώσεις του κλίματος
3. Τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και, όπου είναι δυνατόν, την αύξηση της δέσμευσης άνθρακα

Η προσέγγιση αυτή απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ πολλών τομέων, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας, της κλιματολογίας, της οικολογίας και της κοινωνικής και οικονομικής επιστήμης. Ο συνδυασμός παραδοσιακών γνώσεων και σύγχρονων τεχνολογιών οδηγεί στην ανάπτυξη συστημάτων που είναι περισσότερο ανθεκτικά, παραγωγικά και φιλικά προς το περιβάλλον.

Η έννοια της κλιματικά έξυπνης γεωργίας εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2010, όταν ο FAO εισήγαγε τον όρο στη Διάσκεψη της Χάγης για τη Γεωργία, την Επισιτιστική Ασφάλεια και την Κλιματική Αλλαγή το 2010 [40]. Ωστόσο, οι βασικές αρχές που τη διέπουν έχουν τις ρίζες τους σε προηγούμενες προσεγγίσεις βιώσιμης γεωργίας, όπως η αγροοικολογία, η διατήρηση της γεωργίας και η γεωργία ακριβείας.

3.2 Αναγκαιότητα

Η κλιματικά έξυπνη γεωργία καθίσταται όλο και πιο απαραίτητη λόγω των πολλαπλών προκλήσεων που αντιμετωπίζει ο αγροτικός τομέας παγκοσμίως. Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν ακραία καιρικά φαινόμενα [41, 42], την αύξηση του πληθυσμού, την υποβάθμιση των φυσικών πόρων καθώς και κοινωνικοοικονομικές και γεωπολιτικές προκλήσεις [43- 49].

Περισσότερο αναλυτικά, οι επιπτώσεις της φυσικής μεταβλητότητας του κλίματος, όπως ακραίες θερμοκρασίες καύσωνα και παγετού, έντονες βροχοπτώσεις, άνεμοι και υγρασία απειλούν άμεσα την αγροτική παραγωγή. Επηρεάζουν τόσο τη διαθεσιμότητα νερού όσο και την καταλληλότητα των εδαφών για καλλιέργεια, ενώ ευνοείται η εξάπλωση εχθρικών οργανισμών και ασθενειών. Η εντατική γεωργία των τελευταίων δεκαετιών έχει οδηγήσει σε σοβαρή υποβάθμιση των εδαφών, εξάντληση των υδάτινων πόρων και μείωση της βιοποικιλότητας. Περίπου το 33% των παγκόσμιων εδαφών είναι μέτρια έως σοβαρά υποβαθμισμένα, ενώ η γεωργία καταναλώνει περίπου το 70% του γλυκού νερού παγκοσμίως [50]. Συμπληρωματικά, οι αγροτικές κοινότητες, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, είναι εξαιρετικά ευάλωτες στις επιπτώσεις των οικονομικών διακυμάνσεων. Η επισιτιστική

ανασφάλεια εξακολουθεί να επηρεάζει εκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως, ενώ η φτώχεια και η ανισότητα παραμένουν ενδημικές σε πολλές αγροτικές περιοχές[51].

Η υιοθέτηση πρακτικών κλιματικά έξυπνης γεωργίας επιτρέπει την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων με συντονισμένο τρόπο, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη σε περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο[52]. Αντί να αντιμετωπίζει μεμονωμένα προβλήματα, η κλιματικά έξυπνη γεωργία προσφέρει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την επίτευξη των βασικών της στόχων.

3.3 Βασικοί στόχοι και επιδιώξεις

Η κλιματικά έξυπνη γεωργία επιδιώκει να επιτύχει τρεις βασικούς στόχους που αλληλοσυμπληρώνονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η ισορροπημένη προσέγγιση αυτών των στόχων είναι καθοριστική για την επιτυχία της κλιματικά έξυπνης γεωργίας.

3.3.1 Βιώσιμη παραγωγή τροφίμων

Η βιώσιμη παραγωγή τροφίμων αποτελεί κεντρικό στόχο της κλιματικά έξυπνης γεωργίας και αναφέρεται στην ικανότητα παραγωγής επαρκών ποσοτήτων τροφίμων με τρόπο που διατηρεί ή βελτιώνει την ποιότητα των φυσικών πόρων, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι βασικές αρχές της βιώσιμης παραγωγής τροφίμων περιλαμβάνουν:

- **Οικολογική αποδοτικότητα:** Μεγιστοποίηση της παραγωγής ανά μονάδα εισροών (νερό, ενέργεια, λιπάσματα) και ελαχιστοποίηση των αποβλήτων
- **Διατήρηση φυσικών πόρων:** Προστασία και ενίσχυση της ποιότητας του εδάφους, του νερού και της βιοποικιλότητας
- **Ανθεκτικότητα:** Ικανότητα προσαρμογής σε κλιματικές διαταραχές και οικονομικές αλλαγές
- **Κοινωνική δικαιοσύνη:** Δίκαιη κατανομή των ωφελειών και πρόσβαση στους πόρους
- **Οικονομική βιωσιμότητα:** Εξασφάλιση ικανοποιητικού εισοδήματος για τους παραγωγούς

Στο πλαίσιο της κλιματικά έξυπνης γεωργίας, η βιώσιμη παραγωγή τροφίμων επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων πρακτικών και συστημάτων[19, 53, 54] όπως:

- **Αγροοικολογία:** Εφαρμογή οικολογικών αρχών στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των γεωργικών συστημάτων
- **Διατήρηση γεωργίας:** Τεχνικές όπως η μηδενική ή μειωμένη άροση, η μόνιμη εδαφοκάλυψη και η αμειψισπορά
- **Γεωργία ακριβείας:** Χρήση προηγμένων τεχνολογιών για τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων
- **Ολοκληρωμένη διαχείριση επιβλαβών οργανισμών:** Συνδυασμός βιολογικών, μηχανικών και χημικών μεθόδων με έμφαση στην ελαχιστοποίηση της χρήσης φυτοφαρμάκων
- **Αγροδασοκομία:** Συνδυασμός δέντρων με καλλιέργειες ή/και κτηνοτροφία
- **Βιώσιμη εντατικοποίηση:** Αύξηση της παραγωγής τροφίμων με τρόπους που διατηρούν ή βελτιώνουν την ποιότητα των φυσικών πόρων και ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η μετάβαση προς βιώσιμα συστήματα παραγωγής τροφίμων απαιτεί επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη, εκπαίδευση και κατάρτιση των παραγωγών, και υποστηρικτικές πολιτικές και θεσμικά πλαίσια. Παρά τις προκλήσεις, η βιώσιμη παραγωγή τροφίμων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της μακροπρόθεσμης επισιτιστικής ασφάλειας [55, 56].

3.3.1.1 Βιώσιμη αστική γεωργία

Απαραίτητο κομμάτι της βιώσιμης παραγωγής τροφίμων είναι η βιώσιμη αστική γεωργία, η οποία με τη σειρά της αποτελεί μια σημαντική εφαρμογή της κλιματικά έξυπνης γεωργίας στο αστικό περιβάλλον. Με την αυξανόμενη αστικοποίηση, περισσότερο από το 55% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σήμερα σε αστικές περιοχές, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί στο 68% μέχρι το 2050 [57,58]. Αυτή η τάση δημιουργεί την ανάγκη για ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής τροφίμων εντός του αστικού ιστού [59].

Η αστική γεωργία περιλαμβάνει διάφορες μορφές, όπως:

- Κοινοτικοί κήποι και καλλιέργειες σε ταράτσες και μπαλκόνια
- Κάθετες φάρμες και συστήματα υδροπονίας/αεροπονίας
- Αστικά θερμοκήπια και συστήματα ενυδρείοπονίας
- Αγροδοσκομία σε αστικά πάρκα και δημόσιους χώρους

Τα οφέλη της βιώσιμης αστικής γεωργίας είναι πολλαπλά[60,61] :

- Μείωση των "τροφοχιλιομέτρων" (food miles) και του σχετικού ανθρακικού αποτυπώματος
- Βελτίωση της πρόσβασης σε φρέσκα και θρεπτικά τρόφιμα σε αστικές περιοχές, ειδικά σε γειτονιές με περιορισμένη πρόσβαση (food deserts)
- Δημιουργία πράσινων χώρων που συμβάλλουν στη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα
- Ενίσχυση της κοινωνικής συνοχής και της ανθεκτικότητας των αστικών κοινοτήτων
- Διαχείριση των αστικών αποβλήτων μέσω κομποστοποίησης και ανακύκλωσης

Οι προκλήσεις για την ανάπτυξη της βιώσιμης αστικής γεωργίας περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα γης, την πιθανή ρύπανση του εδάφους, την πρόσβαση σε νερό και τη θεσμική υποστήριξη. Ωστόσο, με κατάλληλες πολιτικές και καινοτόμες λύσεις, η αστική γεωργία μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην επισιτιστική ασφάλεια και την αειφορία των αστικών περιοχών.

Η κλιματικά έξυπνη αστική γεωργία ενσωματώνει τεχνολογίες και πρακτικές που μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα των πόρων και ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως:

- **Συστήματα κλειστού κύκλου:** Ανακύκλωση νερού και θρεπτικών στοιχείων, χρήση αστικών οργανικών αποβλήτων για κομποστοποίηση, και αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από κτίρια.
- **Ενεργειακά αποδοτικά συστήματα παραγωγής:** Χρήση φωτισμού LED για φωτοσύνθεση σε εσωτερικούς χώρους, συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου για βελτιστοποίηση των συνθηκών ανάπτυξης, και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- **Καινοτόμα συστήματα παραγωγής:** Αναπτύσσονται τεχνολογίες όπως η αεροπονία, η ενυδρείοπονία και τα συστήματα κάθετης καλλιέργειας, που επιτρέπουν τη μεγιστοποίηση της παραγωγής σε περιορισμένο χώρο.

Η βιώσιμη αστική γεωργία αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της λύσης για την επισιτιστική ασφάλεια σε έναν ολοένα πιο αστικοποιημένο κόσμο, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη δημιουργία πιο ανθεκτικού, βιώσιμου και υγιούς αστικού περιβάλλοντος.

3.3.2 Κλιματική ανθεκτικότητα σε ακραία φαινόμενα (ξηρασίες, πλημμύρες, ακραίες θερμοκρασίες)

Η κλιματική ανθεκτικότητα αποτελεί τον δεύτερο βασικό πυλώνα της κλιματικά έξυπνης γεωργίας και αναφέρεται στην ενίσχυση της ικανότητας των γεωργικών συστημάτων να αντιμετωπίζουν και να ανακάμπτουν από τις επιπτώσεις των κλιματικών μεταβολών, διασφαλίζοντας τη συνέχιση της παραγωγής και την προστασία των αγροτικών κοινοτήτων.

Οι στρατηγικές προσαρμογής περιλαμβάνουν:

- **Ανάπτυξη και υιοθέτηση ανθεκτικών ποικιλιών:** Καλλιέργεια ποικιλιών που είναι ανθεκτικές στην ξηρασία, τις πλημμύρες, τις υψηλές θερμοκρασίες, την αλατότητα τους εχθρούς και τις ασθένειες.
- **Διαφοροποίηση συστημάτων παραγωγής:** Καλλιέργεια διαφορετικών ειδών και ποικιλιών, ενσωμάτωση της κτηνοτροφίας στη γεωργία, και ανάπτυξη εναλλακτικών πηγών εισοδήματος που μειώνουν την ευπάθεια σε κλιματικές διαταραχές.
- **Βελτιωμένη διαχείριση εδαφών και υδάτων:** Εφαρμογή πρακτικών διατήρησης του εδάφους και του νερού, όπως κατασκευή αναβαθμίδων, συλλογή βρόχινου νερού, μικροάρδευση και βελτίωση της δομής και της γονιμότητας του εδάφους.
- **Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και διαχείρισης κινδύνων:** Ανάπτυξη μηχανισμών πρόβλεψης, προειδοποίησης και αντιμετώπισης ακραίων καιρικών φαινομένων, εχθρών και ασθενειών.
- **Προσαρμογή των γεωργικών πρακτικών:** Αλλαγή των ημερομηνιών σποράς και συγκομιδής, προσαρμογή των συστημάτων καλλιέργειας και εισαγωγή νέων τεχνικών διαχείρισης.
- **Ενίσχυση των τοπικών θεσμών και δικτύων:** Ενδυνάμωση των κοινοτήτων, προώθηση της συνεργασίας και της ανταλλαγής γνώσεων, και ανάπτυξη δικτύων υποστήριξης για την αντιμετώπιση κοινών προκλήσεων.

Η αποτελεσματική προσαρμογή απαιτεί την κατανόηση των τοπικών συνθηκών, των τρωτών σημείων και των ικανοτήτων των αγροτικών κοινοτήτων. Πρέπει να βασίζεται τόσο στην επιστημονική γνώση όσο και στις παραδοσιακές πρακτικές που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση της κλιματικής μεταβλητότητας στο παρελθόν [62,63].

3.3.3 Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου

Ο τρίτος πυλώνας της κλιματικά έξυπνης γεωργίας αφορά τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τις γεωργικές δραστηριότητες και την αύξηση της δέσμευσης άνθρακα στο έδαφος και τη βιομάζα, μολονότι υπάρχει μεγάλη διαπραγμάτευση στην επιστημονική κοινότητα για το αν είναι ουσιαστικός αυτός ο στόχος [64, 65, 66].

Οι βασικές στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών περιλαμβάνουν [67-74] :

- **Βελτιωμένη διαχείριση αζώτου:** Βελτιστοποίηση της χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων, χρήση αναστολέων νιτροποίησης, εφαρμογή λιπασμάτων βραδείας απελευθέρωσης και προώθηση της βιολογικής δέσμευσης αζώτου μέσω ψυχανθών.

- **Βελτιωμένη διαχείριση κτηνοτροφίας:** Βελτίωση των σιτηρεσιών, χρήση πρόσθετων ζωοτροφών για τη μείωση των εκπομπών μεθανίου από την εντερική ζύμωση, και βελτιωμένη διαχείριση κοπριάς.
- **Αποδοτική χρήση ενέργειας:** Μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, χρήση ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού και αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- **Διατήρηση και αύξηση των αποθεμάτων άνθρακα:** Πρακτικές που αυξάνουν την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη, όπως η μειωμένη άρωση, η χρήση εδαφοκαλυπτικών φυτών, η προσθήκη κομποστ και η αγροδασοκομία.
- **Μείωση της αποψίλωσης και υποβάθμισης των δασών:** Προστασία των δασικών εκτάσεων, αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών και αποφυγή της επέκτασης των καλλιεργειών σε φυσικές εκτάσεις.
- **Μείωση απωλειών και σπατάλης τροφίμων:** Βελτίωση των συστημάτων συγκομιδής, αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής, καθώς και ευαισθητοποίηση των καταναλωτών για τη μείωση της σπατάλης τροφίμων[36].

Οι στρατηγικές μετριασμού πρέπει να προσαρμόζονται στις τοπικές συνθήκες και να λαμβάνουν υπόψη τις πιθανές συνέργειες και αντισταθμίσεις με τους άλλους στόχους της κλιματικά έξυπνης γεωργίας. Οι πρακτικές που μειώνουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου συχνά έχουν συνοδευτικά οφέλη όπως η βελτίωση της ποιότητας του εδάφους, η εξοικονόμηση πόρων και η αύξηση της παραγωγικότητας. Απαραίτητο ρόλο για τη μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου μέσα στα πλαίσια της έξυπνης γεωργίας, αποκτά το διοξείδιο του άνθρακα.

3.3.3.1 Χρήση του διοξειδίου του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αποτελεί βασικό στοιχείο της φωτοσύνθεσης και συνεπώς της ανάπτυξης των φυτών. Η αυξημένη συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα, μπορεί να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση της φωτοσύνθεσης και της απόδοσης των καλλιεργειών[75-78].

Στο πλαίσιο της κλιματικά έξυπνης γεωργίας, η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα στην καλλιέργεια αφορά κυρίως:

- **Εμπλουτισμό με CO_2 σε θερμοκήπια και κλειστά συστήματα καλλιέργειας:** Η αύξηση της συγκέντρωσης CO_2 στα θερμοκήπια (συνήθως στα 800-1000 ppm σε σύγκριση με τα περίπου 410 ppm της ατμόσφαιρας) μπορεί να αυξήσει την απόδοση των καλλιεργειών κατά 20-30%, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα χρήσης νερού και θρεπτικών στοιχείων.
- **Δέσμευση CO_2 από βιομηχανικές πηγές:** Η αξιοποίηση του CO_2 που παράγεται από βιομηχανικές διεργασίες (π.χ. από μονάδες παραγωγής ενέργειας ή βιοκαυσίμων) για εμπλουτισμό θερμοκηπίων αποτελεί μια κυκλική προσέγγιση που μειώνει τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα.
- **Καλλιέργειες με βελτιωμένη απόδοση χρήσης άνθρακα:** Η ανάπτυξη ποικιλιών με βελτιωμένη φωτοσυνθετική αποδοτικότητα και ικανότητα αξιοποίησης του CO_2 μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα σε συνθήκες αυξημένου ατμοσφαιρικού CO_2 .

Ωστόσο, η αξιοποίηση του CO_2 στη γεωργία πρέπει να γίνεται στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που λαμβάνει υπόψη τις ευρύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στοχεύει στη συνολική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του γεωργικού τομέα.

Η μέτρηση και παρακολούθηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τη γεωργία είναι πολύπλοκη λόγω της διαφορετικότητας των συστημάτων παραγωγής και των τοπικών

συνθηκών. Η ανάπτυξη αξιόπιστων μεθοδολογιών και εργαλείων για την αποτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος των γεωργικών προϊόντων είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική εφαρμογή στρατηγικών μετριασμού.

3.4 Έξυπνες τεχνολογίες και συστήματα στη γεωργία

3.4.1 Γενικά

Οι έξυπνες τεχνολογίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εφαρμογή της κλιματικά έξυπνης γεωργίας, παρέχοντας τα εργαλεία για την ακριβή παρακολούθηση, ανάλυση και διαχείριση των γεωργικών συστημάτων. Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας.

3.4.2 Βασικές τεχνολογίες και εφαρμογές - Internet of Things (IoT) στη γεωργία

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) αποτελεί το θεμέλιο της έξυπνης γεωργίας, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση, ανάλυση και αυτοματοποίηση των γεωργικών διεργασιών μέσω ενός δικτύου διασυνδεδεμένων συσκευών που συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα[79-82].

Βασικά στοιχεία του IoT στη γεωργία:

- **Αισθητήρες και συσκευές συλλογής δεδομένων:** Μετρούν παραμέτρους όπως θερμοκρασία, υγρασία, επίπεδα CO₂, ηλιακή ακτινοβολία, υγρασία εδάφους, pH και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Εγκαθίστανται στο έδαφος, στα φυτά, σε γεωργικά μηχανήματα ή σε σταθμούς παρακολούθησης.
- **Συστήματα επικοινωνίας:** Τεχνολογίες όπως WiFi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων από τους αισθητήρες σε κεντρικά συστήματα επεξεργασίας.
- **Πλατφόρμες διαχείρισης δεδομένων:** Λογισμικό και υποδομές cloud που αποθηκεύουν, επεξεργάζονται και αναλύουν τα δεδομένα, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες και συστάσεις στους χρήστες.
- **Συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού:** Συσκευές που εκτελούν συγκεκριμένες ενέργειες με βάση τα δεδομένα και τις οδηγίες από τις πλατφόρμες διαχείρισης.
- **Εφαρμογές και διεπαφές χρήστη:** Εργαλεία που επιτρέπουν στους αγρότες να αλληλεπιδρούν με το σύστημα, να παρακολουθούν τα δεδομένα και να λαμβάνουν αποφάσεις.

3.5 Συμπληρωματικές τεχνολογίες στη σύγχρονη γεωργία

Πέρα από το IoT, σημαντικές κατηγορίες έξυπνων τεχνολογιών περιλαμβάνουν:

- **Τεχνολογίες τηλεπισκόπησης:** Δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες και drones που παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση των καλλιεργειών, τη βιομάζα, την υγεία των φυτών και άλλες παραμέτρους σε διάφορες χωρικές κλίμακες [83].
- **Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS):** Εργαλεία για την ανάλυση και οπτικοποίηση χωρικών δεδομένων, που επιτρέπουν τη χαρτογράφηση της παραλλακτικότητας των εδαφών, των αποδόσεων και άλλων παραμέτρων εντός των αγροτεμαχίων.

- **Ρομποτική στη γεωργία:** Συστήματα για την αυτοματοποίηση γεωργικών εργασιών, όπως η φυτοπροστασία και η συγκομιδή, βελτιώνοντας την ακρίβεια και μειώνοντας τις απαιτήσεις σε εργατικό δυναμικό [84].
- **Τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση:** Εργαλεία για την επεξεργασία και ανάλυση μεγάλων όγκων δεδομένων, την αναγνώριση προτύπων, την πρόβλεψη αποδόσεων και την παροχή εξειδικευμένων συμβουλών διαχείρισης [85, 86].

3.6 Το Έξυπνο Θερμοκήπιο (Smart Greenhouse) και εφαρμογή των προηγμένων τεχνολογιών

Μια ιδιαίτερα σημαντική εφαρμογή των έξυπνων τεχνολογιών αποτελεί το "έξυπνο θερμοκήπιο" [87], όπου οι σύγχρονες τεχνολογίες ενσωματώνονται για τη δημιουργία ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος καλλιέργειας που βελτιστοποιεί την ανάπτυξη των φυτών, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί τη χρήση πόρων και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το έξυπνο θερμοκήπιο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα εφαρμογής των έξυπνων τεχνολογιών, ενσωματώνοντας πολλαπλές καινοτόμες λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα γεωργικά συστήματα.

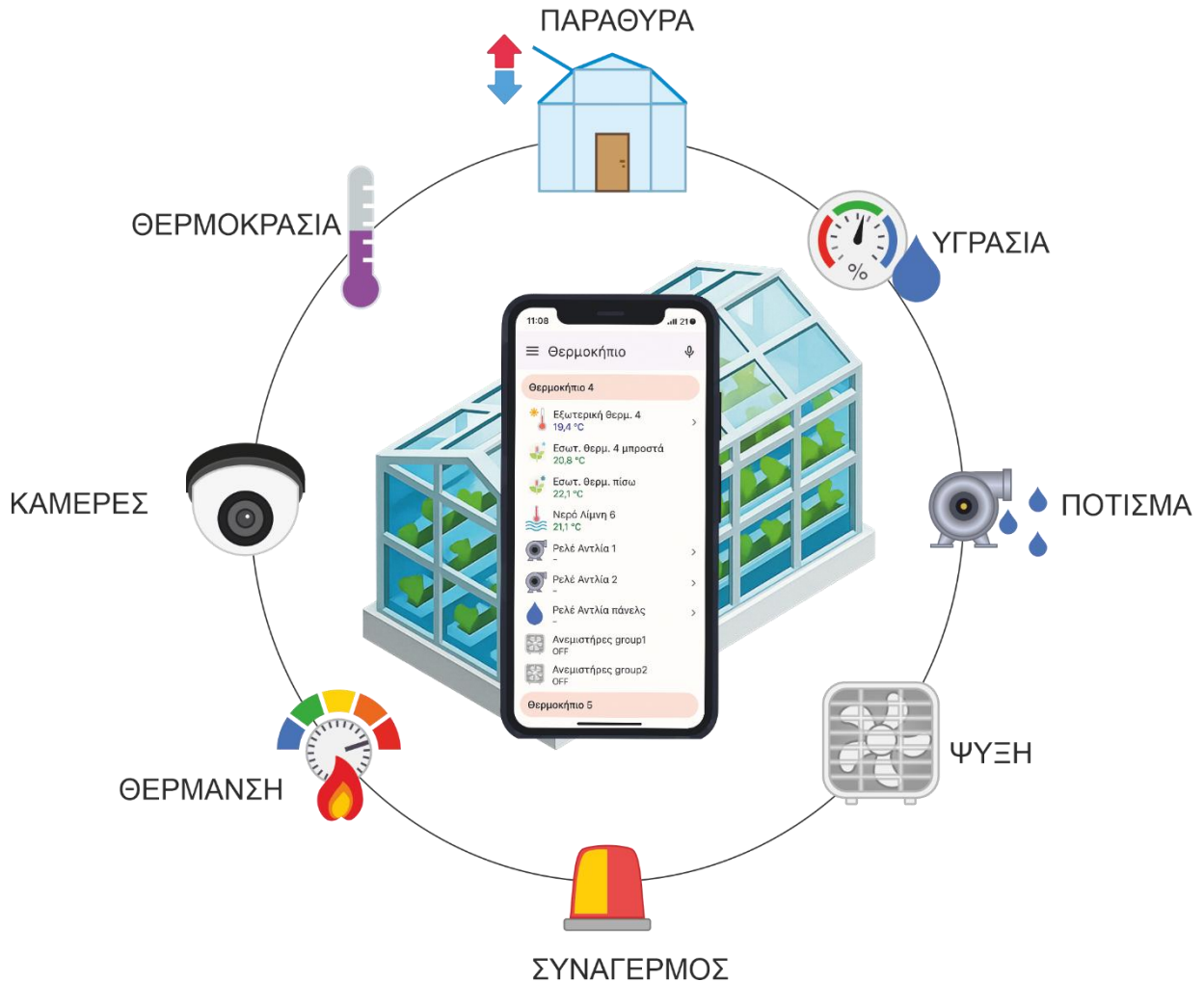
Κύρια χαρακτηριστικά ενός έξυπνου θερμοκηπίου:

- **Αυτοματοποιημένος έλεγχος περιβάλλοντος:** Συστήματα που ρυθμίζουν τη θερμοκρασία, την υγρασία, τον φωτισμό, τα επίπεδα CO₂ και τον αερισμό, δημιουργώντας τις βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών.
- **Έξυπνη άρδευση και διαχείριση υδάτινων πόρων:** Συστήματα που παρακολουθούν την υγρασία του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες και τις ανάγκες των φυτών σε νερό, και αυτοματοποιούν την άρδευση για βέλτιστη χρήση του νερού. Περιλαμβάνονται στάγδην άρδευση, υδροπονικά και αεροπονικά συστήματα που επιτυγχάνουν εξοικονόμηση νερού έως και 90% σε συγκριτικά με συμβατικές μεθόδους [88, 89].
- **Ακριβής λίπανση και θρέψη φυτών:** Συστήματα που αναλύουν τα επίπεδα θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος/υπόστρωμα και την κατάσταση των φυτών για να καθοδηγήσουν τη στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων, μειώνοντας τη σπατάλη και την περιβαλλοντική ρύπανση.
- **Παρακολούθηση καιρού και κλίματος:** Δίκτυα αισθητήρων IoT που παρέχουν λεπτομερή δεδομένα για τις συνθήκες εντός και εκτός του θερμοκηπίου, επιτρέποντας την πρόβλεψη και αντιμετώπιση ακραίων φαινομένων, καθώς και τη βέλτιστη διαχείριση του περιβάλλοντος καλλιέργειας.
- **Δίκτυα αισθητήρων IoT:** Παρακολουθούν συνεχώς τις συνθήκες εντός του θερμοκηπίου, την κατάσταση των φυτών και τα επίπεδα των θρεπτικών στοιχείων, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο [87].
- **Συστήματα τεχνητού φωτισμού:** Προηγμένα συστήματα LED που παρέχουν φως συγκεκριμένου φάσματος για τη βελτιστοποίηση της φωτοσύνθεσης και τον έλεγχο της ανάπτυξης των φυτών [90].
- **Ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός:** Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και βελτιωμένη μόνωση για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος [91].
- **Ολοκληρωμένη διαχείριση εχθρών και ασθενειών:** Συστήματα που παρακολουθούν τις συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη εχθρών και ασθενειών, επιτρέποντας την

έγκαιρη ανίχνευση και τη στοχευμένη επέμβαση, συμπεριλαμβανομένων βιολογικών μεθόδων καταπολέμησης.

- **Απομακρυσμένη παρακολούθηση και διαχείριση:** Προηγμένα συστήματα που επιτρέπουν στους παραγωγούς να παρακολουθούν και να ελέγχουν όλες τις παραμέτρους του θερμοκηπίου από απόσταση μέσω κινητών συσκευών, λαμβάνοντας ειδοποιήσεις και αναφορές σε πραγματικό χρόνο.

Το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2) απεικονίζει την έννοια της "κλιματικά έξυπνης γεωργίας" όπως εφαρμόζεται στο θερμοκήπιο της μονάδας Markatos. Μέσω μιας έξυπνης εφαρμογής στο κινητό τηλέφωνο, ο χειριστής έχει πρόσβαση σε πλήθος αισθητήρων και λειτουργιών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το pH του διαλύματος, ο φωτισμός, η ροή του νερού, καθώς και η ενεργειακή παρακολούθηση του συστήματος.



Εικόνα 2 Έξυπνη διαχείριση αυτοματισμών θερμοκηπίου μέσω εφαρμογής σε κινητή συσκευή.

Η χρήση συστημάτων παρακολούθησης όπως το openHAB επιτρέπει τον πλήρη αυτοματισμό και απομακρυσμένο έλεγχο της μονάδας, βελτιστοποιώντας την απόδοση και την απόκριση στις περιβαλλοντικές μεταβολές. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί βασικό πυλώνα της Κλιματικά Έξυπνης Γεωργίας (Climate Smart Agriculture).

Τα έξυπνα θερμοκήπια μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε αστικά περιβάλλοντα, συμβάλλοντας στη βιώσιμη αστική γεωργία και τη μείωση των "τροφοχιλιομέτρων". Καινοτόμες προσεγγίσεις όπως τα κάθετα θερμοκήπια (vertical farming) διευρύνουν περαιτέρω τις δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας.

3.7 Οφέλη - προκλήσεις και μελλοντικές τάσεις των έξυπνων τεχνολογιών

3.7.1 Οφέλη

Οι έξυπνες τεχνολογίες προσφέρουν βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης πόρων, με ακριβή εφαρμογή νερού, λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση νερού έως και 90% σε έξυπνα θερμοκήπια συγκριτικά με συμβατικές μεθόδους. Επιπλέον, συμβάλλουν στην αυξημένη παραγωγικότητα και ποιότητα, δημιουργώντας βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης που οδηγούν σε υψηλότερες αποδόσεις και παραγωγή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η πρόβλεψη και διαχείριση κινδύνων, με έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων όπως εχθροί, ασθένειες και θρεπτικές ελλείψεις. Οι τεχνολογίες αυτές διευκολύνουν την προσαρμογή στην κλιματική διακύμανση, παρέχοντας προστασία από ακραίες θερμοκρασίες, πλημμύρες και ξηρασίες. Παράλληλα, συμβάλλουν στο μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα μέσω της βελτιωμένης αποδοτικότητας και της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οδηγώντας σε μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Τέλος, προωθούν τη βελτιωμένη ασφάλεια τροφίμων, εξασφαλίζοντας σταθερή παραγωγή υψηλής ποιότητας τροφίμων, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους πόρους [92, 93].

3.7.2 Προκλήσεις

Παρά τα πολλαπλά οφέλη, οι έξυπνες τεχνολογίες αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις. Το κόστος υιοθέτησης αποτελεί σημαντικό εμπόδιο, καθώς το αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης μπορεί να είναι υψηλό, ιδιαίτερα για μικρούς παραγωγούς. Επιπρόσθετα, η πολυπλοκότητα των συστημάτων δημιουργεί τεχνικές δυσκολίες που απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις και συνεχή τεχνική υποστήριξη. Η συνδεσιμότητα αποτελεί επίσης σημαντική πρόκληση, καθώς πολλές αγροτικές περιοχές αντιμετωπίζουν προβλήματα με την κάλυψη διαδικτύου και τηλεπικοινωνιών.

Η διαλειτουργικότητα δυσχεραίνεται από την έλλειψη τυποποιημένων πρωτοκόλλων, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα συμβατότητας μεταξύ διαφορετικών συσκευών.

Ζητήματα ασφάλειας και προστασίας δεδομένων εγείρονται λόγω των απειλών κυβερνοασφάλειας και των ανησυχιών για την προστασία των ευαίσθητων γεωργικών δεδομένων. Τέλος, υπάρχει κίνδυνος διεύρυνσης του ψηφιακού χάσματος μεταξύ μεγάλων και μικρών παραγωγών, καθώς και μεταξύ αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών[94, 95].

3.7.3 Προοπτικές και μελλοντικές τάσεις

Παρά τις προκλήσεις, οι έξυπνες τεχνολογίες και το IoT αναμένεται να διαδραματίσουν ολοένα σημαντικότερο ρόλο στην κλιματικά έξυπνη γεωργία. Σύμφωνα με πρόσφατες επιστημονικές αναλύσεις, το μέλλον της γεωργίας θα χαρακτηρίζεται από ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις που θα επαναπροσδιορίσουν πλήρως τις γεωργικές πρακτικές [96, 97]. Οι μελλοντικές τάσεις περιλαμβάνουν:

- **Μείωση κόστους και αύξηση προσβασιμότητας:** Η συνεχής μείωση του κόστους των αισθητήρων και των συναφών τεχνολογιών θα καταστήσει τις έξυπνες λύσεις πιο προσιτές σε μικρότερους παραγωγούς.
- **Περαιτέρω ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης:** Εξελιγμένοι αλγόριθμοι που θα βελτιώνουν την ακρίβεια των προβλέψεων και των συστάσεων διαχείρισης [98].
- **Ανάπτυξη λύσεων χαμηλού κόστους για αναπτυσσόμενες χώρες:** Προσαρμοσμένες τεχνολογίες που ανταποκρίνονται στις ειδικές ανάγκες και περιορισμούς των μικροκαλλιεργητών.
- **Διεύρυνση των πρωτοβουλιών ανοιχτών δεδομένων:** Αύξηση της πρόσβασης σε γεωργικά δεδομένα για την ενίσχυση της έρευνας και της καινοτομίας [99].
- **Ενίσχυση της διασύνδεσης με άλλους τομείς:** Ολοκλήρωση με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διαχείρισης υδάτινων πόρων και κυκλικής οικονομίας.

3.8 Επίδραση στη διαχείριση νερού, τροφής και ενέργειας

Η Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία έχει σημαντικές επιδράσεις στον τρόπο διαχείρισης τριών κρίσιμων πόρων: του νερού, της τροφής και της ενέργειας. Η προσέγγιση αυτή προωθεί την ολοκληρωμένη διαχείριση αυτών των αλληλένδετων πόρων, στοχεύοντας στην αύξηση της αποδοτικότητας, της ανθεκτικότητας και της αειφορίας των γεωργικών συστημάτων.

3.8.1 Διαχείριση υδάτινων πόρων

Η αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων αποτελεί κεντρικό στοιχείο της Κλιματικά Έξυπνης Γεωργίας, καθώς το νερό αποτελεί έναν από τους πιο περιορισμένους και ευάλωτους πόρους στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει:

- **Αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού:** Εφαρμογή τεχνολογιών έξυπνου θερμοκηπίου, μικροάρδευσης (στάγδην άρδευση, υπόγεια άρδευση), προγραμματισμός άρδευσης με βάση δεδομένα από αισθητήρες υγρασίας εδάφους και μετεωρολογικές προβλέψεις, και χρήση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων για τον βέλτιστο χρονισμό και την ποσότητα της άρδευσης [100].
- **Συλλογή και αποθήκευση νερού:** Ανάπτυξη συστημάτων συλλογής βρόχινου νερού, κατασκευή μικρών ταμιευτήρων, και τεχνικές συγκράτησης του νερού στο έδαφος για μείωση της απορροής και αύξηση της διαθεσιμότητας νερού κατά τις ξηρές περιόδους [101].
- **Επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση νερού:** Αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση, εφαρμογή κλειστών συστημάτων ανακύκλωσης νερού σε θερμοκήπια και υδροπονικά συστήματα, και τεχνικές για την πρόληψη της ρύπανσης των υδάτων από γεωργικές εισροές.
- **Προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες υδρολογικές συνθήκες:** Επιλογή καλλιεργειών με χαμηλότερες απαιτήσεις σε νερό, βελτίωση της δομής του εδάφους για αύξηση της ικανότητας συγκράτησης νερού, και εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης του τοπίου που μειώνουν τον κίνδυνο πλημμυρών και ξηρασιών.

Η εφαρμογή αυτών των πρακτικών μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση νερού έως και 30-60% σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους, ενώ παράλληλα διατηρεί ή βελτιώνει τις αποδόσεις των καλλιεργειών [102,103].

3.8.2 Βιώσιμη παραγωγή τροφίμων

Η Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία προωθεί συστήματα παραγωγής τροφίμων που είναι ταυτόχρονα παραγωγικά, ανθεκτικά και περιβαλλοντικά βιώσιμα. Οι βασικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν:

- **Βελτιστοποίηση των συστημάτων παραγωγής:** Εφαρμογή τεχνικών όπως η αμειψισπορά, η συγκαλλιέργεια και τα ολοκληρωμένα συστήματα γεωργίας-κτηνοτροφίας που αυξάνουν την αποδοτικότητα των πόρων και την παραγωγικότητα ανά μονάδα έκτασης.
- **Μείωση των απωλειών και της σπατάλης τροφίμων:** Βελτίωση των μεθόδων συγκομιδής, αποθήκευσης, μεταφοράς και επεξεργασίας των τροφίμων, καθώς και εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας που μειώνουν τις απώλειες τροφίμων [36].
- **Ενίσχυση της ποιότητας και της θρεπτικής αξίας:** Προώθηση ποικιλιών και πρακτικών που βελτιώνουν τη θρεπτική αξία των τροφίμων, και υποστήριξη της διαφοροποίησης των διατροφικών συστημάτων για αυξημένη διατροφική ασφάλεια [104].
- **Βιώσιμη εντατικοποίηση:** Αύξηση της παραγωγής τροφίμων με τρόπους που διατηρούν ή βελτιώνουν την ποιότητα των φυσικών πόρων και ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η γεωργία ακριβείας και τα συστήματα καλλιέργειας διατήρησης [105,106].

Τα βιώσιμα συστήματα παραγωγής τροφίμων μπορούν να συμβάλουν στην επισιτιστική ασφάλεια, ενώ παράλληλα μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της γεωργίας και ενισχύουν την ανθεκτικότητα των αγροτικών κοινοτήτων [107].

3.8.3 Ενεργειακή διαχείριση

Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας αποτελεί σημαντική πτυχή της Κλιματικά Έξυπνης Γεωργίας, στοχεύοντας στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας των γεωργικών συστημάτων [20]. Οι κύριες στρατηγικές περιλαμβάνουν:

- **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Χρήση ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού και μηχανημάτων, βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, και εφαρμογή τεχνικών όπως η μειωμένη άροση που απαιτούν λιγότερη ενέργεια [108].
- **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:** Ενσωμάτωση ηλιακών, αιολικών, υδροηλεκτρικών και γεωθερμικών συστημάτων στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις, καθώς και αξιοποίηση της βιομάζας από γεωργικά υπολείμματα για την παραγωγή βιοενέργειας [109,32].
- **Παραγωγή βιοκαυσίμων:** Καλλιέργεια ενεργειακών φυτών σε περιθωριακές εκτάσεις ή στο πλαίσιο συστημάτων αμειψισποράς, και αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου [110].
- **Κυκλική χρήση ενέργειας:** Ανάπτυξη συστημάτων που επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας και άλλων μορφών ενέργειας εντός των γεωργικών συστημάτων, όπως η χρήση της θερμότητας από μονάδες βιοαερίου για θέρμανση θερμοκηπίων [111].

Η βελτιωμένη ενεργειακή διαχείριση μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, να περιορίσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να αυξήσει την ανθεκτικότητα σε ενεργειακές διαταραχές.

3.8.4 Ολοκληρωμένη προσέγγιση του πλέγματος νερού-ενέργειας και τροφίμων

Η Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία υιοθετεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση του πλέγματος νερού-ενέργειας και τροφίμων, αναγνωρίζοντας τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ αυτών των πόρων και επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση των συνεργειών [1]:

- **Συστήματα κλειστού κύκλου:** Ανάπτυξη συστημάτων όπου τα υποπροϊόντα και τα απόβλητα από μια διαδικασία γίνονται εισροές για άλλες διαδικασίες, όπως η χρήση αποβλήτων κτηνοτροφίας για την παραγωγή βιοαερίου και λιπασμάτων [112].
- **Συν-παραγωγή τροφής και ενέργειας:** Εφαρμογή συστημάτων όπως η αγροδασοκομία και τα συστήματα γεωργίας-κτηνοτροφίας που παράγουν ταυτόχρονα τρόφιμα, ζωοτροφές και βιομάζα για ενέργεια.
- **Βελτιστοποίηση της χρήσης γης:** Στρατηγικός σχεδιασμός της χρήσης γης με βάση την καταλληλότητα για διαφορετικούς σκοπούς, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα νερού, την προστασία των οικοσυστημάτων και τις ανάγκες των τοπικών κοινοτήτων [113].
- **Αξιοποίηση νέων τεχνολογιών:** Εφαρμογή τεχνολογιών όπως το IoT, τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και η τεχνητή νοημοσύνη για τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Η ολοκληρωμένη διαχείριση του πλέγματος νερού-ενέργειας και τροφίμων απαιτεί διατομεακή συνεργασία, καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις και υποστηρικτικά θεσμικά πλαίσια. Η Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία, με την έμφασή της στην αειφορία, την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα, παρέχει ένα πλαίσιο για την επίτευξη αυτού του στόχου και τη διασφάλιση της βιώσιμης διαχείρισης των κρίσιμων πόρων ανθεκτικών σε κλιματικές μεταβολές [114].

4 Υδροπονική καλλιέργεια

4.1 Γενικά

Η υδροπονική καλλιέργεια αποτελεί μια σύγχρονη μέθοδο γεωργικής παραγωγής, όπου τα φυτά αναπτύσσονται χωρίς τη χρήση εδάφους, σε ένα υδατικό διάλυμα πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία. Ο όρος "υδροπονία" προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις "ύδωρ" (νερό) και "πόνημα" (έργο), υποδηλώνοντας την καλλιέργεια που βασίζεται στο νερό [115,116].

Στα υδροπονικά συστήματα, οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται είτε απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα είτε σε αδρανή υποστρώματα, όπως περλίτης, πετροβάμβακας ή κοκκοφοίνικας. Τα βασικά στοιχεία ενός υδροπονικού συστήματος περιλαμβάνουν το σύστημα στήριξης των φυτών, το δίκτυο παροχής θρεπτικού διαλύματος και το σύστημα ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η λειτουργία της υδροπονικής καλλιέργειας βασίζεται στην ακριβή ρύθμιση των παραμέτρων ανάπτυξης των φυτών. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Τη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος
- Το pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Τη θερμοκρασία του διαλύματος
- Τα επίπεδα οξυγόνωσης των ριζών

Τα υδροπονικά συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα ανοικτά και τα κλειστά συστήματα. Στα ανοικτά συστήματα, το θρεπτικό διάλυμα μετά τη χρήση του απορρίπτεται, ενώ στα κλειστά συστήματα ανακυκλώνεται μετά από κατάλληλη επεξεργασία και επαναχρησιμοποιείται [88].

4.2 Ιστορία και σημασία της υδροπονικής καλλιέργειας

Οι ρίζες της σύγχρονης υδροπονικής καλλιέργειας στη μορφή της απλής καλλιέργειας χωρίς έδαφος, ανάγονται σε αρχαίους πολιτισμούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας [117], όπου τα φυτά αναπτύσσονταν σε πολύπλοκα συστήματα ανύψωσης και άρδευσης. Στην αρχαία Αίγυπτο, επίσης, υπάρχουν αρχαιολογικές ενδείξεις καλλιέργειών σε συστήματα κοντά στον Νείλο ποταμό που θύμιζαν πρώιμες μορφές υδροπονίας [118].

Η σύγχρονη επιστημονική προσέγγιση της υδροπονίας ξεκίνησε στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν οι επιστήμονες άρχισαν να μελετούν τις θρεπτικές απαιτήσεις των φυτών. Σημαντικοί σταθμοί ήταν:

- Το 1859, όπου ο Julius von Sachs και ο Wilhelm Knor κατέγραψαν τις πρώτες πλήρεις χημικές απαιτήσεις των φυτών και έθεσαν τις επιστημονικές βάσεις της υδροπονίας [119,120].
- Το 1929, όπου ο William Frederick Gericke από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια πραγματοποίησε τα πρώτα μεγάλης κλίμακας πειράματα υδροπονικής καλλιέργειας [121,122].

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η υδροπονική καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκε σε απομακρυσμένες στρατιωτικές βάσεις, όπου ήταν δύσκολη η παραδοσιακή γεωργική παραγωγή. Στα νησιά του Ειρηνικού, οι Αμερικανοί στρατιώτες κατάφεραν να παράγουν φρέσκα λαχανικά χρησιμοποιώντας υδροπονικές τεχνικές.

Στις σύγχρονες εφαρμογές, η υδροπονική καλλιέργεια έχει κρίσιμη σημασία σε περιοχές με περιορισμένους γεωργικούς πόρους. Για παράδειγμα:

- Στο Ισραήλ, καλύπτει πάνω από 80% της παραγωγής λαχανικών
- Στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ερημικής τοπογραφίας
- Σε απομακρυσμένες αρκτικές κοινότητες της Αλάσκας και της Γροιλανδίας, υδροπονικά θερμοκήπια επιτρέπουν την παραγωγή φρέσκων λαχανικών κατά τη διάρκεια σκληρών χειμώνων με θερμοκρασίες κάτω από -40°C[123,124].
- Στους διαστημικούς σταθμούς, η υδροπονική καλλιέργεια είναι η μοναδική μέθοδος παραγωγής φρέσκων τροφίμων. Ειδικά υδροπονικά συστήματα επιτρέπουν στους αστροναύτες να καλλιεργούν μαρούλι, ραπανάκι και άλλα φυλλώδη λαχανικά σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας [125].

Αυτά τα παραδείγματα καταδεικνύουν πώς η υδροπονική καλλιέργεια προσφέρει βιώσιμες λύσεις σε περιβάλλοντα με ακραίους περιορισμούς, συμβάλλοντας στην επισιτιστική ασφάλεια και την αειφόρο γεωργία [126].

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), λόγω της αύξησης του πληθυσμού, η γεωργική παραγωγή πρέπει να αυξηθεί κατά 70%[127]. Η υδροπονική καλλιέργεια προσφέρει μια καινοτόμο προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, καθώς [128]:

- Επιτυγχάνει έως και 10 φορές μεγαλύτερη παραγωγικότητα ανά τετραγωνικό μέτρο σε σύγκριση με την παραδοσιακή γεωργία
- Μειώνει την κατανάλωση νερού κατά 90%
- Εξαλείφει την ανάγκη χρήσης φυτοφαρμάκων
- Επιτρέπει καλλιέργεια σε περιοχές όπου η παραδοσιακή γεωργία είναι αδύνατη

Με αυτόν τον τρόπο, η υδροπονική καλλιέργεια αναδεικνύεται ως μια κρίσιμη τεχνολογία για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της επισιτιστικής ανασφάλειας, της περιβαλλοντικής υποβάθμισης και τις κλιματικής ανθεκτικότητας.

4.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Η υδροπονική καλλιέργεια παρουσιάζει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας της για διάφορες γεωργικές εφαρμογές.[88,126, 129,130,131,132,133,134]

Πλεονεκτήματα:

- Μειωμένος κίνδυνος ασθενειών εδάφους: Απουσία παθογόνων οργανισμών που συνήθως βρίσκονται στο έδαφος.
- Τα φυτά μεγαλώνουν στο νερό χωρίς ζιζάνια ως φυσικούς εχθρούς οπότε και δεν απαιτείται χρήση ζιζανιοκτόνων και θεωρούνται ως ο νούμερο ένα κίνδυνος για τον άνθρωπο.
- Η λίπανση είναι απόλυτα ελεγχόμενη καθώς τα θρεπτικά συστατικά βρίσκονται μέσα στο διάλυμα σε ιδανικές αναλογίες οπότε η ανάπτυξη είναι η καλύτερη δυνατή, τα φυτά υγιή και όμορφα στην εμφάνιση.

- Εξοικονόμηση νερού: Τα υδροπονικά συστήματα χρησιμοποιούν έως και 90% λιγότερο νερό συγκριτικά με τις συμβατικές καλλιέργειες, καθώς το νερό ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται.
- Αυξημένη παραγωγικότητα: Οι υδροπονικές καλλιέργειες μπορούν να αποδώσουν έως και 10 φορές μεγαλύτερη παραγωγή ανά μονάδα επιφάνειας σε σύγκριση με τις συμβατικές.
- Μειωμένη εποχικότητα: Επιτρέπει την παραγωγή τροφίμων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες.
- Καλύτερος έλεγχος παρασίτων: Τα κλειστά συστήματα καλλιέργειας μειώνουν την έκθεση στα παράσιτα, περιορίζοντας την ανάγκη για φυτοφάρμακα.

Μειονεκτήματα:

- Χαμηλή ανοχή σε σφάλματα: Η μέθοδος απαιτεί υψηλή ακρίβεια στους χειρισμούς, καθώς ένα λάθος μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην καλλιέργεια.
- Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης: Τα συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας απαιτούν σημαντική αρχική επένδυση σε εξοπλισμό και υποδομές.
- Τεχνική εξειδίκευση: Απαιτείται εξειδικευμένη γνώση για τη διαχείριση των παραμέτρων του συστήματος (pH, EC, θερμοκρασία).
- Εξάρτηση από ηλεκτρική ενέργεια: Διακοπές ρεύματος μπορούν να διαταράξουν την παροχή νερού και θρεπτικών συστατικών, θέτοντας σε κίνδυνο ολόκληρη την καλλιέργεια.
- Ταχεία εξάπλωση ασθενειών: Σε κλειστά συστήματα, ένα παθογόνο μπορεί να διαδοθεί γρήγορα σε όλα τα φυτά μέσω του θρεπτικού διαλύματος.
- Περιορισμοί σε ορισμένες καλλιέργειες: Μεγάλα φυτά με εκτεταμένο ριζικό σύστημα (π.χ. δέντρα) είναι δύσκολο να καλλιεργηθούν υδροπονικά.

Παρά τα μειονεκτήματα, η υδροπονική καλλιέργεια προσφέρει μια βιώσιμη και αποδοτική εναλλακτική λύση στη συμβατική γεωργία, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους φυσικούς πόρους ή ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα μειονεκτήματα τείνουν να εξalλειφθούν τη σύγχρονη εποχή καθότι έχουμε τεράστιο όγκο γνώσεων πάνω στο κομμάτι της υδροπονίας ώστε να μην υπάρχουν σφάλματα και ασθένειες κατά την παραγωγή. Το κόστος εγκαταστάσεων μπορεί πια να αποσβεστεί λόγω της εμπορικής υπεραξίας του υδροπονικού παραγόμενου προϊόντος και της ποιότητάς του, καθώς και του αυξημένου όγκου παραγωγής λόγω της μεθόδου υδροπονίας. Επίσης και η ενέργεια που μπορεί να παράγεται από φωτοβολταϊκά ή άλλες μεθόδους, μπορεί να αξιοποιείται αποτελεσματικότερα μέσα στο σύστημα της υδροπονίας όπως θα εμβαθύνουμε περισσότερο σε άλλη παράγραφο.

Η αναθεώρηση των μειονεκτημάτων τοποθετεί την υδροπονική καλλιέργεια όχι μόνο ως μια εναλλακτική λύση αλλά ως μια προηγμένη μέθοδο παραγωγής τροφίμων που συνεχώς εξελίσσεται και προσαρμόζεται στις σύγχρονες τεχνολογικές δυνατότητες και απαιτήσεις.

4.4 Διάφοροι μέθοδοι υδροπονίας

Η υδροπονική καλλιέργεια περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και εφαρμογές [116,135,136].

4.4.1 Σύστημα Θρεπτικού Φιλμ (Nutrient Film Technique - NFT)

Το σύστημα NFT βασίζεται στη συνεχή ροή ενός λεπτού στρώματος θρεπτικού διαλύματος μέσω καναλιών ή σωλήνων όπου αναπτύσσονται οι ρίζες των φυτών. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Συνεχής κυκλοφορία θρεπτικού διαλύματος με πάχος 2-3 χιλιοστών
- Μικρή κλίση των καναλιών (1-3%) για διασφάλιση της ροής
- Χαμηλή κατανάλωση νερού λόγω της συνεχούς ανακύκλωσης
- Ιδανικό για φυλλώδη λαχανικά και μικρά φυτά (μαρούλι, βασιλικός, ρόκα)

Η μέθοδος NFT είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε εμπορικές εφαρμογές λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς της.

4.4.2 Βαθιά Ροή Θρεπτικών (Deep Flow Technique - DFT)

Στο σύστημα DFT, γνωστό επίσης ως "Deep Water Culture", τα φυτά υποστηρίζονται από πλωτές πλατφόρμες, ενώ οι ρίζες τους βυθίζονται απευθείας σε δεξαμενές με θρεπτικό διάλυμα:

- Βάθος διαλύματος 15-30 εκατοστά
- Μεγάλη θερμική αδράνεια του συστήματος
- Εξαιρετικά αποτελεσματικό για μεγάλης κλίμακας παραγωγή πράσινων λαχανικών

4.4.3 Σύστημα Στάγδην (Drip Irrigation System)

Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο υδροπονικής καλλιέργειας παγκοσμίως:

- Το θρεπτικό διάλυμα παρέχεται μέσω σταγόνων κοντά στη βάση κάθε φυτού
- Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με υποστρώματα όπως περλίτης, κοκκοφοίνικας ή πετροβάμβακας
- Μεγάλη ευελιξία στον έλεγχο της ποσότητας και της συχνότητας άρδευσης
- Κατάλληλο για μεγαλύτερα φυτά όπως τομάτες, αγγούρια, πιπεριές και μελιτζάνες

Το σύστημα στάγδην διακρίνεται σε ανοικτό και κλειστό, ανάλογα με το αν το πλεονάζον διάλυμα συλλέγεται και επαναχρησιμοποιείται.

4.4.4 Αεροπονία (Aeroponics)

Πρόκειται για την πιο προηγμένη τεχνολογικά μέθοδο υδροπονικής καλλιέργειας:

- Οι ρίζες των φυτών αιωρούνται στον αέρα εντός σκοτεινών θαλάμων
- Το θρεπτικό διάλυμα ψεκάζεται περιοδικά με τη μορφή νέφους σταγονιδίων
- Μέγιστη οξυγόνωση του ριζικού συστήματος
- Εξοικονόμηση νερού έως και 95% σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους
- Ταχύτερη ανάπτυξη φυτών λόγω της βέλτιστης απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων

Η αεροπονία χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα προηγμένης τεχνολογίας και στην έρευνα λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης.

4.4.5 Σύστημα Παλίρροιας και Απορροής (Ebb and Flow/ Flood and Drain)

Σε αυτό το σύστημα:

- Τα φυτά τοποθετούνται σε δίσκους ή τραπέζια με υπόστρωμα
- Περιοδικά, το θρεπτικό διάλυμα πλημμυρίζει τη ριζική ζώνη και στη συνέχεια αποστραγγίζεται
- Ο κύκλος πλήρωσης και αποστράγγισης ρυθμίζεται με χρονοδιακόπτες
- Επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ υγρής και αεριζόμενης κατάστασης στο ριζικό σύστημα
- Ιδανικό για διακοσμητικά φυτά και μικρής έως μεσαίας κλίμακας παραγωγή

4.4.6 Υδατοκαλλιέργεια (Aquaponics)

Πρόκειται για έναν συνδυασμό υδροπονίας και ιχθυοκαλλιέργειας:

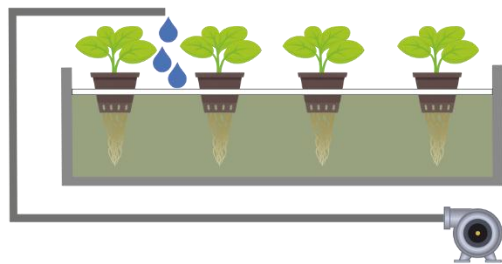
- Τα απόβλητα των ψαριών, πλούσια σε άζωτο, παρέχουν θρεπτικά συστατικά στα φυτά
- Τα φυτά φιλτράρουν το νερό που επιστρέφει στις δεξαμενές των ψαριών
- Δημιουργείται ένα συμβιωτικό οικοσύστημα
- Εξαιρετικά βιώσιμο σύστημα παραγωγής τροφίμων
- Ελαχιστοποίηση χρήσης εξωτερικών εισροών

4.4.7 Κάθετη Υδροπονία (Vertical Hydroponics)

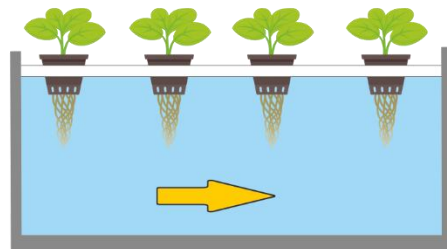
Αποτελεί μια προσαρμογή των παραπάνω μεθόδων για αξιοποίηση του κατακόρυφου χώρου:

- Τα φυτά αναπτύσσονται σε πολλαπλά επίπεδα ή κατακόρυφες επιφάνειες
- Μεγιστοποίηση της παραγωγής ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους
- Συχνά συνδυάζεται με τεχνητό φωτισμό LED
- Ιδανικό για αστικές περιοχές και περιορισμένους χώρους
- Εφαρμόζεται σε εσωτερικές φάρμες και "κατακόρυφα αγροκτήματα"

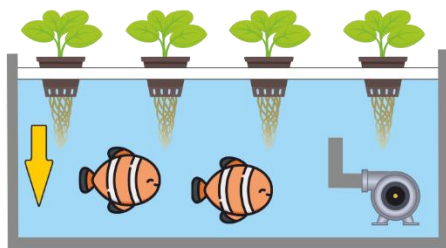
Στο παρακάτω σύνολο σχεδίων στην Εικόνα 3 απεικονίζονται οι κυριότερες μέθοδοι υδροπονίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται διεθνώς σε συστήματα παραγωγής τροφίμων. Κάθε μέθοδος διακρίνεται ως προς τον τρόπο κυκλοφορίας των θρεπτικών διαλυμάτων, τον τρόπο στήριξης των φυτών και την τεχνική εφαρμογής της ρίζας. Οι επεξηγηματικές απεικονίσεις επιτρέπουν στον αναγνώστη να κατανοήσει τις λειτουργικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων και να τις συγκρίνει με τη μέθοδο επίπλευσης που εφαρμόζεται στη μονάδα Markatos.



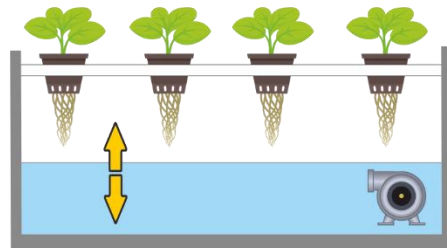
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΓΔΗΝ



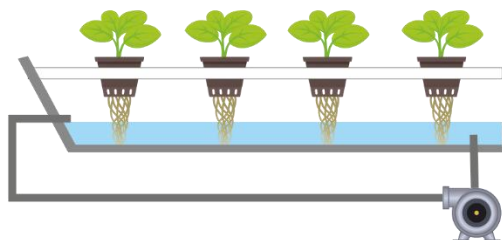
ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΒΑΘΙΑ ΡΟΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ



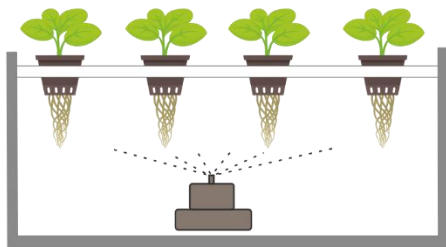
ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ



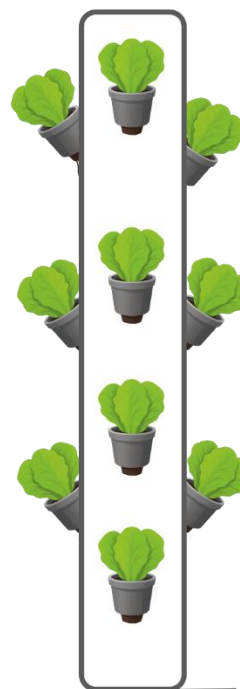
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ & ΑΠΟΡΡΟΗΣ



ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΦΙΛΜ



ΑΕΡΟΠΟΝΙΑ



ΚΑΘΕΤΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ

Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση μεθόδων υδροπονίας.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου υδροπονίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος της καλλιέργειας, το διαθέσιμο κεφάλαιο, την τεχνογνωσία, τους περιορισμούς χώρου και τους επιχειρηματικούς στόχους. Κάθε σύστημα προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και απαιτεί διαφορετικό επίπεδο τεχνικής εξειδίκευσης για την επιτυχή λειτουργία του.

Παράλληλα, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι κάθε σύστημα αντιμετωπίζει διαφορετικές προκλήσεις και παρουσιάζει μοναδικά μειονεκτήματα στην παραγωγική διαδικασία. Τα συστήματα NFT, για παράδειγμα, είναι περισσότερο ευάλωτα σε διακοπές ρεύματος, ενώ τα συστήματα με υπόστρωμα μπορεί να παρουσιάσουν διακυμάνσεις στη συγκράτηση υγρασίας.

Η κλιματική ανθεκτικότητα των συστημάτων διαφέρει σημαντικά. Ενώ τα συστήματα βαθιάς ροής παρουσιάζουν θερμική σταθερότητα, τα συστήματα αεροπονίας είναι πιο ευαίσθητα σε μεταβολές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις σε φωτισμό και λίπανση ποικίλλουν σημαντικά, με ορισμένα συστήματα να απαιτούν πιο συχνή προσαρμογή της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος ή ιδιαίτερους φωτισμούς LED με συγκεκριμένα φάσματα για βέλτιστη φωτοσύνθεση.

4.5 Σύγκριση μεταξύ υδροπονίας και εδαφικής καλλιέργειας

Η υδροπονική και η εδαφική καλλιέργεια αποτελούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στη γεωργική παραγωγή, καθεμία με τα δικά της χαρακτηριστικά. Η συγκριτική τους ανάλυση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς αναδεικνύει τα ισχυρά σημεία και τις αδυναμίες της κάθε μεθόδου[128,137,138,139,140].

Λαμβάνοντας υπόψη ότι πολλές πτυχές θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες, εδώ η εστιασμένη σύγκριση παρέχει μια συμπληρωματική οπτική, χωρίς να επικαλύπτει σημαντικά το περιεχόμενο που αφορά την εξοικονόμηση πόρων, την παραγωγή τροφίμων, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη διαχείριση γης που θα αναλυθούν εκτενώς σε άλλα κεφάλαια.

4.5.1 Διαχείριση Πόρων

Στον τομέα της διαχείρισης των υδάτινων πόρων, η υδροπονία καταναλώνει 70-90% λιγότερο νερό συγκριτικά με την εδαφική καλλιέργεια, με σημαντική ανακύκλωση στα κλειστά συστήματα. Αντίθετα, στην εδαφική καλλιέργεια, μεγάλο μέρος του νερού άρδευσης χάνεται λόγω διήθησης και απορροής. Όσον αφορά τα θρεπτικά στοιχεία, στην υδροπονία αυτά παρέχονται σε ακριβείς ποσότητες με φανερά λιγότερη σπατάλη σε σχέση με την εδαφική καλλιέργεια.

4.5.2 Παραγωγικότητα - Απόδοση

Τα φυτά στην υδροπονία αναπτύσσονται ταχύτερα σε σύγκριση με την υπαίθρια εδαφική καλλιέργεια λόγω ελεγχόμενων συνθηκών όπως θερμοκρασία, υγρασία, διαπερατότητα φωτός, διοξείδιο άνθρακα και άλλων παραμέτρων. Η απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας είναι 3-10 φορές μεγαλύτερη στην υδροπονία, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα φύτευσης και αξιοποίηση του κατακόρυφου χώρου. Επιπλέον, η ομοιομορφία των προϊόντων λόγω του συστήματος υδροπονίας επιφέρει μείωση στις τεράστιες απώλειες μιας εδαφικής καλλιέργειας, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση.

4.5.3 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά

Η υδροπονία προσφέρει πιο συνεπή γεύση, υφή και εμφάνιση, ενώ στην εδαφική καλλιέργεια χάνεται η ομοιομορφία του προϊόντος. Οι ακραίες κλιματολογικές συνθήκες θερμοκρασιών, ανέμων και άλλων παραγόντων κάνουν τα φυτά ξυλώδη και σκληρά στην εδαφική καλλιέργεια.

Επιπρόσθετα, η υδροπονία απαιτεί 70-90% λιγότερα φυτοφάρμακα λόγω της απουσίας εδαφογενών παθογόνων. Νεότερες προσεγγίσεις στην υδροπονία επιδιώκουν την εισαγωγή ωφέλιμων μικροοργανισμών στο θρεπτικό διάλυμα, δημιουργώντας "βιο-υδροπονικά" συστήματα που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων.

4.5.4 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Από περιβαλλοντική άποψη, η υδροπονία απαιτεί λιγότερη έκταση γης για την ίδια παραγωγή και επιτρέπει την αξιοποίηση μη παραδοσιακών χώρων όπως ταράτσες, εγκαταλελειμμένα κτίρια και αστικές περιοχές. Ωστόσο, η υδροπονία καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, ενώ η εδαφική καλλιέργεια έχει υψηλότερο αποτύπωμα από γεωργικά μηχανήματα. Η συνολική περιβαλλοντική επίδραση εξαρτάται από τις πηγές ενέργειας και τις εφαρμοζόμενες πρακτικές σε κάθε περίπτωση.

4.5.5 Οικονομικά Στοιχεία

Από οικονομική σκοπιά, η υδροπονία απαιτεί 2-3 φορές υψηλότερο αρχικό κεφάλαιο και μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος συγκριτικά με την εδαφική καλλιέργεια. Συνεπώς, η εδαφική καλλιέργεια παραμένει πιο προσιτή για μικρούς παραγωγούς με περιορισμένους πόρους, παρά την υψηλότερη απόδοση που προσφέρει η υδροπονία μακροπρόθεσμα.

4.5.6 Κοινωνικοοικονομικές Προεκτάσεις

Η επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, τους διαθέσιμους πόρους και τους στρατηγικούς στόχους του παραγωγού.

Η υδροπονία απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις για την εφαρμογή και διαχείρισή της, ενώ η εδαφική καλλιέργεια βασίζεται σε παραδοσιακές πρακτικές που είναι ευρύτερα γνωστές και εφαρμόσιμες. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υδροπονίας είναι η μεγαλύτερη ανθεκτικότητα που παρουσιάζει στην κλιματική μεταβλητότητα, καθώς προσφέρει προστασία από ακραία καιρικά φαινόμενα και μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, τους διαθέσιμους πόρους και τους στρατηγικούς στόχους του παραγωγού. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς, και η καταλληλότητά τους καθορίζεται από το συγκεκριμένο πλαίσιο εφαρμογής.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται συνοπτικά η σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών της υδροπονικής και της παραδοσιακής (εδαφικής) καλλιέργειας. Η υδροπονία υπερτερεί σε κρίσιμες παραμέτρους όπως η κατανάλωση νερού, η ταχύτητα ανάπτυξης και η παραγωγικότητα ανά τετραγωνικό μέτρο, ενώ προσφέρει σημαντικά καλύτερο έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Αντιθέτως, η εδαφική καλλιέργεια παρουσιάζει χαμηλότερες ενεργειακές ανάγκες, αλλά εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες (καιρικές συνθήκες, ποιότητα εδάφους).

Παράμετρος	Υδροπονία	Εδαφική Καλλιέργεια
 Κατανάλωση νερού	Μικρή	Μεγάλη
 Ανάγκη σε φυτοφάρμακα	Ελάχιστη	Συνήθως υψηλή
 Παραγωγή ανά m ²	Υψηλή	Χαμηλότερη
 Ταχύτητα ανάπτυξης	Ταχύτερη	Πιο αργή
 Κατανάλωση ενέργειας	Μέτρια (αντλίες)	Χαμηλή (παραδοσιακή)
 Ποιότητα ελέγχου	Απόλυτος έλεγχος	Εξαρτάται από έδαφος

Εικόνα 4 Σύγκριση Υδροπονικής και Εδαφικής Καλλιέργειας.

4.6 Διαχείριση της χρήσης γης

Η υδροπονική καλλιέργεια προσφέρει καινοτόμες προσεγγίσεις στη διαχείριση της χρήσης γης, επαναπροσδιορίζοντας τη σχέση μεταξύ γεωργικής παραγωγής και χώρου [141].

4.6.1 Αποδοτικότητα χρήσης γης

Η υδροπονία επιτυγχάνει εξαιρετικά υψηλή αποδοτικότητα στη χρήση γης. Τα υδροπονικά συστήματα μπορούν να αποδώσουν έως και 10 φορές περισσότερη παραγωγή ανά μονάδα επιφάνειας συγκριτικά με τη συμβατική γεωργία. Η δυνατότητα κάθετης ανάπτυξης επιτρέπει την πολλαπλασιαστική αξιοποίηση της επιφάνειας. Ένα τετραγωνικό μέτρο υδροπονικής καλλιέργειας μπορεί να αντιστοιχεί σε 4-10 τετραγωνικά μέτρα συμβατικής καλλιέργειας, ανάλογα με το είδος των φυτών, γεγονός που καθιστά την υδροπονία σημαντικά πιο αποδοτική ως προς την αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου [142].

4.6.2 Αξιοποίηση μη συμβατικών χώρων

Η υδροπονία επιτρέπει την καλλιέργεια σε περιοχές όπου η παραδοσιακή γεωργία είναι αδύνατη. Αυτό περιλαμβάνει αστικά περιβάλλοντα όπως ταράτσες, εγκαταλελειμμένα κτίρια και υπόγειους χώρους, περιοχές με υποβαθμισμένα ή μολυσμένα εδάφη που δεν είναι κατάλληλα για συμβατική καλλιέργεια, άγονες περιοχές όπως έρημοι και βραχώδεις εκτάσεις, καθώς και παράκτιες ή νησιωτικές περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα γης. Η δυνατότητα αυτή διευρύνει σημαντικά το φάσμα των περιοχών που μπορούν να συμβάλουν στην παραγωγή τροφίμων [143].

4.6.3 Μείωση της αποψίλωσης δασών

Η υψηλή παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας συμβάλλει στην προστασία των δασών και των φυσικών οικοσυστημάτων. Μειώνει την ανάγκη αποψίλωσης για τη δημιουργία νέων καλλιεργήσιμων εκτάσεων, καθώς η αυξημένη παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί σε μικρότερες εκτάσεις. Περιορίζει την πίεση στα φυσικά οικοσυστήματα, δίνοντας τη δυνατότητα διατήρησης ή και αποκατάστασης εκτάσεων που θα μπορούσαν διαφορετικά να μετατραπούν σε αγροτικές εκτάσεις. Έτσι συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, προστατεύοντας τους φυσικούς βιοτόπους και τα είδη που εξαρτώνται από αυτούς [144].

4.6.4 Ενσωμάτωση στον αστικό σχεδιασμό

Η υδροπονική καλλιέργεια μπορεί να αποτελέσει οργανικό στοιχείο του αστικού σχεδιασμού με πολλαπλά οφέλη. Κάθετες φάρμες ενσωματωμένες σε κτίρια (building-integrated agriculture) προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής τροφίμων μέσα στον αστικό ιστό. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή τροφίμων σε κοντινή απόσταση από τα σημεία κατανάλωσης, μειώνοντας σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τη μεταφορά τροφίμων. Επιπλέον, οι υδροπονικές εγκαταστάσεις μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της αισθητικής και του μικροκλίματος αστικών περιοχών, δημιουργώντας χώρους πρασίνου και συμβάλλοντας στη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας [145].

4.6.5 Προκλήσεις στη διαχείριση γης

Παρά τα οφέλη, η μετάβαση σε υδροπονικά συστήματα παρουσιάζει προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Το υψηλό κόστος απόκτησης γης σε αστικές περιοχές αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για τη δημιουργία υδροπονικών εγκαταστάσεων εντός του αστικού ιστού. Υπάρχει επίσης ανταγωνισμός με άλλες χρήσεις γης υψηλής αξίας, όπως η κατοικία και οι εμπορικές χρήσεις. Θεσμικοί περιορισμοί και πολεοδομικοί κανονισμοί μπορεί να δυσχεραίνουν την ανάπτυξη υδροπονικών μονάδων σε ορισμένες περιοχές, καθιστώντας αναγκαία την ανάγκη για επαναπροσδιορισμό των ζωνών χρήσης γης ώστε να συμπεριληφθεί η αστική γεωργία ως αποδεκτή χρήση [146].

4.6.6 Μελλοντικές τάσεις

Η εξέλιξη των υδροπονικών συστημάτων ανοίγει νέες προοπτικές για τη διαχείριση της γης. Αναπτύσσονται ολοκληρωμένα συστήματα που συνδυάζουν παραγωγή τροφίμων με άλλες λειτουργίες, όπως διαχείριση αποβλήτων και παραγωγή ενέργειας [31], μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα των διαθέσιμων πόρων. Παράλληλα, η ανάπτυξη πλωτών υδροπονικών συστημάτων σε υδάτινες επιφάνειες προσφέρει τη δυνατότητα αξιοποίησης χώρων που παραδοσιακά δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για γεωργική παραγωγή. Επιπλέον, η διασύνδεση με έξυπνα συστήματα διαχείρισης πόρων στο πλαίσιο των "έξυπνων πόλεων" επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των υδροπονικών συστημάτων και την ενσωμάτωσή τους στον αστικό σχεδιασμό με ολιστικό τρόπο [147].

Η διαχείριση της χρήσης γης μέσω της υδροπονικής καλλιέργειας αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση που μπορεί να συμβάλει στην αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων της επισιτιστικής ασφάλειας, και της αστικοποίησης.

4.7 Προκλήσεις στην Εφαρμογή Υδροπονικών Συστημάτων Μεγάλης Κλίμακας

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα της υδροπονικής καλλιέργειας, η μετάβαση σε συστήματα μεγάλης κλίμακας παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή και βιώσιμη εφαρμογή τους [148].

4.7.1 Οικονομικές προκλήσεις

Το υψηλό κόστος αποτελεί βασικό εμπόδιο για την εφαρμογή συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Το αρχικό κεφάλαιο για την εγκατάσταση υδροπονικών μονάδων είναι 2-5 φορές υψηλότερο συγκριτικά με τα συμβατικά θερμοκήπια, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα επένδυσης πολλών ενδιαφερομένων.

Η απόσβεση της επένδυσης απαιτεί συνήθως 5-7 έτη, ανάλογα με την τεχνολογία και τα καλλιεργούμενα είδη, δημιουργώντας μια μακροπρόθεσμη δέσμευση που ενέχει ρίσκο. Το υψηλό λειτουργικό κόστος, που περιλαμβάνει δαπάνες ενέργειας, εργατικά και συντήρηση

εξοπλισμού, επηρεάζει σημαντικά την κερδοφορία και απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση. Επιπλέον, η υψηλή εξάρτηση από εξειδικευμένο εξοπλισμό αυξάνει το ρίσκο σε περίπτωση βλαβών, καθώς μια αστοχία μπορεί να επηρεάσει ολόκληρη την παραγωγή [149].

4.7.2 Τεχνικές προκλήσεις

Η διατήρηση σταθερών συνθηκών σε όλο το σύστημα, όπως θερμοκρασία, υγρασία και ποιότητα νερού, καθίσταται δυσκολότερη όσο αυξάνεται το μέγεθος της εγκατάστασης. Η διαχείριση μεγάλων όγκων θρεπτικού διαλύματος χωρίς διακυμάνσεις στη σύνθεση απαιτεί προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου. Ιδιαίτερη πρόκληση αποτελεί η έγκαιρη ανίχνευση και αντιμετώπιση ασθενειών που μπορούν να διαδοθούν ταχύτατα σε κλειστά συστήματα, απειλώντας ολόκληρη την παραγωγή. Τέλος, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση εφεδρικών συστημάτων και η ανάπτυξη πρωτοκόλλων διαχείρισης κρίσεων, όπως σε περιπτώσεις διακοπών ρεύματος, για την αποφυγή καταστροφικών απωλειών [150].

4.7.3 Ενεργειακές προκλήσεις

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα βιωσιμότητας των υδροπονικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Οι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και λειτουργία αντλιών αυξάνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος λειτουργίας. Υπάρχει επιτακτική ανάγκη για βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω καινοτόμων τεχνολογιών, όπως συστήματα ανάκτησης θερμότητας και έξυπνα συστήματα διαχείρισης. Σημαντικές προκλήσεις παρουσιάζει επίσης η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, καθώς απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις και τεχνογνωσία. Επιπλέον, οι εποχιακές διακυμάνσεις στις ενεργειακές απαιτήσεις επηρεάζουν το κόστος παραγωγής και καθιστούν δύσκολη τη διατήρηση σταθερών τιμών στα παραγόμενα προϊόντα [151].

4.7.4 Προκλήσεις ανθρώπινου δυναμικού

Η επιτυχής λειτουργία των υδροπονικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από εξειδικευμένο προσωπικό.

Στην αγορά εργασίας, παρατηρείται συχνά έλλειψη επαρκώς καταρτισμένου προσωπικού με γνώσεις υδροπονίας και τεχνολογίας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η υδροπονία δεν είναι διαδεδομένη. Υπάρχει συνεχής ανάγκη για εκπαίδευση και κατάρτιση του προσωπικού στις νέες τεχνολογίες και μεθόδους καλλιέργειας. Το υψηλό κόστος απασχόλησης εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού επιβαρύνει περαιτέρω το λειτουργικό κόστος. Τέλος, η μετάβαση από παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές σε υψηλής τεχνολογίας συστήματα αποτελεί πρόκληση για πολλούς παραγωγούς, απαιτώντας αλλαγή νοοτροπίας και προσέγγισης στην καλλιέργεια [137].

4.7.5 Προκλήσεις αγοράς και ανταγωνιστικότητας

Η οικονομική ανάπτυξη των μονάδων μεγάλης κλίμακας εξαρτάται κυρίως από εμπορικούς παράγοντες. Ο ανταγωνισμός με φθηνότερα εισαγόμενα προϊόντα συμβατικής γεωργίας δημιουργεί πιέσεις στις τιμές και περιορίζει τα περιθώρια κέρδους. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, υπάρχει ανάγκη για διαφοροποίηση προϊόντων και προσέγγιση εξειδικευμένων αγορών που εκτιμούν την ποιότητα και την περιβαλλοντική υπευθυνότητα. Επιπλέον, υπάρχει περιορισμένη ποικιλία καλλιεργειών με επιχειρησιακή συνέχεια σε υδροπονικά συστήματα, καθώς δεν είναι όλα τα είδη εξίσου κατάλληλα ή οικονομικά αποδοτικά. Σημαντικές προκλήσεις παρουσιάζονται επίσης στην αλυσίδα εφοδιασμού και

διανομής των προϊόντων, ιδιαίτερα για μονάδες που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές[128].

4.7.6 Περιβαλλοντικές προκλήσεις

Η οικολογική ισορροπία είναι κρίσιμη για τη μακροπρόθεσμη αποδοχή των υδροπονικών συστημάτων [88].

Η διαχείριση και ανακύκλωση αποβλήτων, όπως πλαστικά, υποστρώματα και θρεπτικά διαλύματα, αποτελεί σημαντική πρόκληση που απαιτεί καινοτόμες λύσεις. Η εξισορρόπηση του αυξημένου ενεργειακού αποτυπώματος με τα περιβαλλοντικά οφέλη, όπως η εξοικονόμηση νερού και η μειωμένη χρήση φυτοφαρμάκων, παραμένει ένα σύνθετο ζήτημα. Επιπλέον, είναι σημαντική η αντιμετώπιση των ανησυχιών του κοινού σχετικά με την "τεχνητή" παραγωγή τροφίμων, μέσω εκπαίδευσης και διαφάνειας. Τέλος, η βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, ιδιαίτερα σε περιοχές με λειψυδρία, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και εφαρμογή αποτελεσματικών συστημάτων ανακύκλωσης [88].

4.7.7 Θεσμικές και ρυθμιστικές προκλήσεις

Το θεσμικό πλαίσιο συχνά δεν είναι προσαρμοσμένο στις ιδιαιτερότητες της υδροπονίας, δημιουργώντας πρόσθετες προκλήσεις.

Η έλλειψη εξειδικευμένων κανονισμών και προτύπων για υδροπονικά συστήματα οδηγεί σε αβεβαιότητα και ασυνέπεια στην εφαρμογή. Σημαντικοί περιορισμοί υπάρχουν στον πολεοδομικό σχεδιασμό για αστικές υδροπονικές μονάδες, καθώς οι υφιστάμενοι κανονισμοί συχνά δεν προβλέπουν τέτοιες χρήσεις. Σε ορισμένες περιοχές, υπάρχουν προκλήσεις στην πιστοποίηση των υδροπονικών προϊόντων ως "βιολογικά", παρά τη μειωμένη χρήση φυτοφαρμάκων. Τέλος, παρατηρείται περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδοτικούς μηχανισμούς και κίνητρα που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη του τομέα[142].

Παρά τις προκλήσεις, η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη, η αυξανόμενη περιβαλλοντική συνείδηση και η ανάγκη για βιώσιμα συστήματα παραγωγής τροφίμων ωθούν την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων που σταδιακά καθιστούν τα υδροπονικά συστήματα μεγάλης κλίμακας περισσότερο προσιτά και εφαρμόσιμα.

5 Υδροπονία - CSA και Πλέγμα νερού-ενέργειας και τροφίμων

Τα συστήματα υδροπονίας και η κλιματικά έξυπνη γεωργία (Climate-Smart Agriculture, CSA) αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της προσέγγισης του Πλέγματος, καθώς ενσωματώνουν και βελτιστοποιούν τη διαχείριση νερού, ενέργειας και παραγωγής τροφίμων. Η ανάλυση αυτών των συστημάτων με βάση την προσέγγιση του Πλέγματος υπολογίζει τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τριών στοιχείων και αναδεικνύει τη χρυσή τομή στη διασύνδεσή τους.

5.1 Αλληλεπιδράσεις και συνέργειες υδροπονίας στο Πλέγμα

Τα υδροπονικά συστήματα επιδεικνύουν εξαιρετική αποδοτικότητα στη χρήση πόρων, με σημαντικές επιπτώσεις στους τρεις πυλώνες του Πλέγματος. Οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις στο Πλέγμα αναδεικνύονται όπως παρακάτω:

- Η εξοικονόμηση νερού μπορεί να απαιτεί αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για συστήματα ανακύκλωσης
- Η αυξημένη παραγωγή τροφίμων μπορεί να συνδυαστεί με μειωμένη χρήση νερού και γης
- Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας συνδυάζεται με αυξημένη παραγωγή τροφίμων
- Η βελτιστοποίηση στοιχείου του Πλέγματος μπορεί να επηρεάσει τα άλλα δύο, απαιτώντας ολιστική προσέγγιση σχεδιασμού

5.2 Κλιματικά έξυπνη γεωργία και πλέγμα νερού-ενέργειας και τροφίμων

Η κλιματικά έξυπνη γεωργία (Climate-Smart Agriculture - CSA) αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που στοχεύει στην ταυτόχρονη αντιμετώπιση της επισιτιστικής ασφάλειας και της κλιματικής ανθεκτικότητας (προστασία από πλημμύρες και ξηρασίες). Η προσέγγιση αυτή συνάδει με τις αρχές του Πλέγματος, καθώς επιδιώκει τη βελτιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ νερού, ενέργειας και παραγωγής τροφίμων.

5.2.1 Εφαρμογή του Πλέγματος στην CSA

Η ολοκληρωμένη αξιολόγηση και εφαρμογή των αρχών του Πλέγματος στην κλιματικά έξυπνη γεωργία περιλαμβάνει:

- Αναγνώριση των αλληλεπιδράσεων και των συνεργειών μεταξύ των τριών στοιχείων του Πλέγματος
- Ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών που βελτιστοποιούν τη χρήση όλων των πόρων
- Εφαρμογή συστημικής προσέγγισης που λαμβάνει υπόψη τις τοπικές συνθήκες και ανάγκες
- Ανάπτυξη κατάλληλων δεικτών για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των επιδόσεων

- Ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τομέων και ενδιαφερόμενων φορέων [152]

5.3 Αντίκτυπο υδροπονίας και κλιματικά έξυπνης γεωργίας στο Πλέγμα

Η συγκριτική αξιολόγηση των υδροπονικών συστημάτων και της κλιματικά έξυπνης γεωργίας στο πλαίσιο του Πλέγματος (NEXUS) αναδεικνύει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε προσέγγισης, καθώς και τις δυνατότητες συμπληρωματικής εφαρμογής τους:

Αποδοτικότητα χρήσης νερού:

- Η υδροπονία προσφέρει εξαιρετικά υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού (70-95% μείωση) μέσω κλειστών συστημάτων
- Η CSA βελτιστοποιεί τη χρήση νερού στη συμβατική γεωργία (20-50% μείωση) μέσω βελτιωμένων πρακτικών διαχείρισης

Ενεργειακό αποτύπωμα:

- Η υδροπονία μπορεί να έχει υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, ειδικά σε πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον
- Η CSA στοχεύει στη μείωση των εισροών ενέργειας μέσω βελτιστοποιημένων γεωργικών πρακτικών

Παραγωγικότητα:

- Η υδροπονία επιτυγχάνει πολύ υψηλές αποδόσεις ανά μονάδα επιφάνειας για συγκεκριμένες καλλιέργειες
- Η CSA επιδιώκει τη βιώσιμη αύξηση της παραγωγικότητας σε ευρύτερο φάσμα καλλιεργειών και συστημάτων

Κλίμακα εφαρμογής:

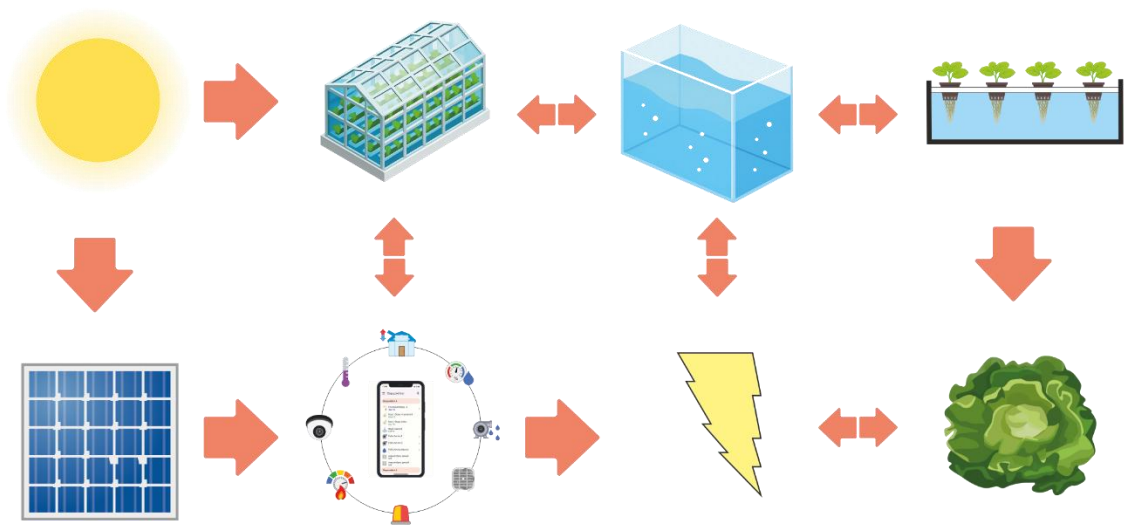
- Η υδροπονία είναι πιο κατάλληλη για εντατική παραγωγή συγκεκριμένων καλλιεργειών (κυρίως λαχανικών και αρωματικών φυτών)
- Η CSA μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρύτερη κλίμακα και σε διαφορετικά αγροοικοσυστήματα

Κόστος και τεχνολογικές απαιτήσεις:

- Η υδροπονία απαιτεί υψηλότερες αρχικές επενδύσεις και τεχνογνωσία
- Η CSA προσφέρει επιλογές διαφορετικής έντασης τεχνολογίας και κεφαλαίου, προσαρμοσμένες στις τοπικές συνθήκες

Στην παρακάτω Εικόνα 5 παρουσιάζεται η λειτουργική διασύνδεση των βασικών πόρων νερού, ενέργειας και τροφής, όπως εφαρμόζεται σε ένα υδροπονικό σύστημα επίπλευσης. Μέσω της ανακυκλοφορίας του νερού, της αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας (φωτοβολταϊκά) και της παρακολούθησης των συνθηκών μέσω αισθητήρων, επιτυγχάνεται ένας κλειστός βρόχος παραγωγής με ελαχιστοποιημένες απώλειες και αυξημένη αποδοτικότητα. Το σχήμα αποτυπώνει την ολιστική εφαρμογή του Πλέγματος σε επίπεδο θερμοκηπιακής μονάδας.

ΠΛΕΓΜΑ ΝΕΡΟΥ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΜΑΡΚΑΤΟΣ



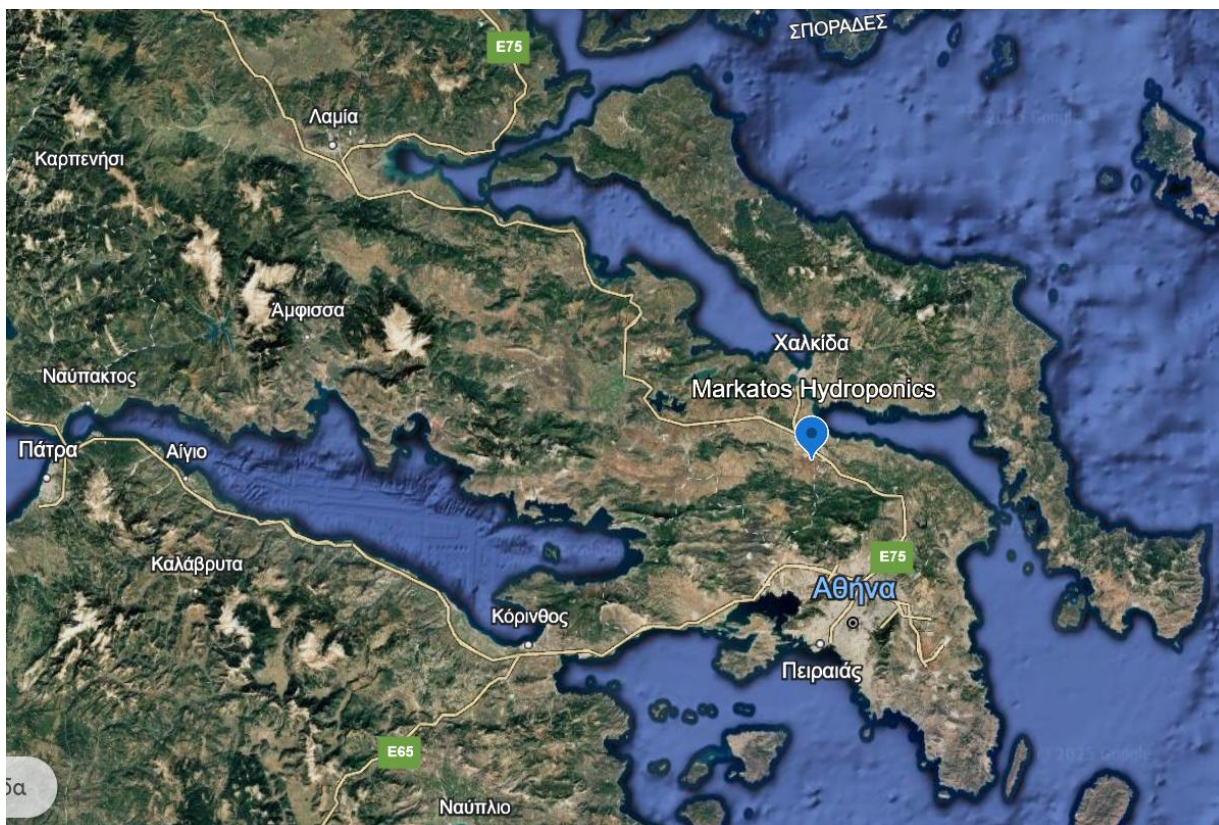
Εικόνα 5 Αλληλεξάρτηση πόρων σε Υδροπονικό Σύστημα

Στο πλαίσιο του Πλέγματος WEF, τόσο τα υδροπονικά συστήματα όσο και η κλιματικά έξυπνη γεωργία προσφέρουν σημαντικές ευκαιρίες για βελτιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ νερού, ενέργειας και παραγωγής τροφίμων. Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης ή του συνδυασμού προσεγγίσεων εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, τις διαθέσιμες τεχνολογίες και πόρους, καθώς και τους συγκεκριμένους στόχους βιωσιμότητας που τίθενται [153,154].

6 Μελέτη περίπτωσης

6.1 Περιοχή μελέτης

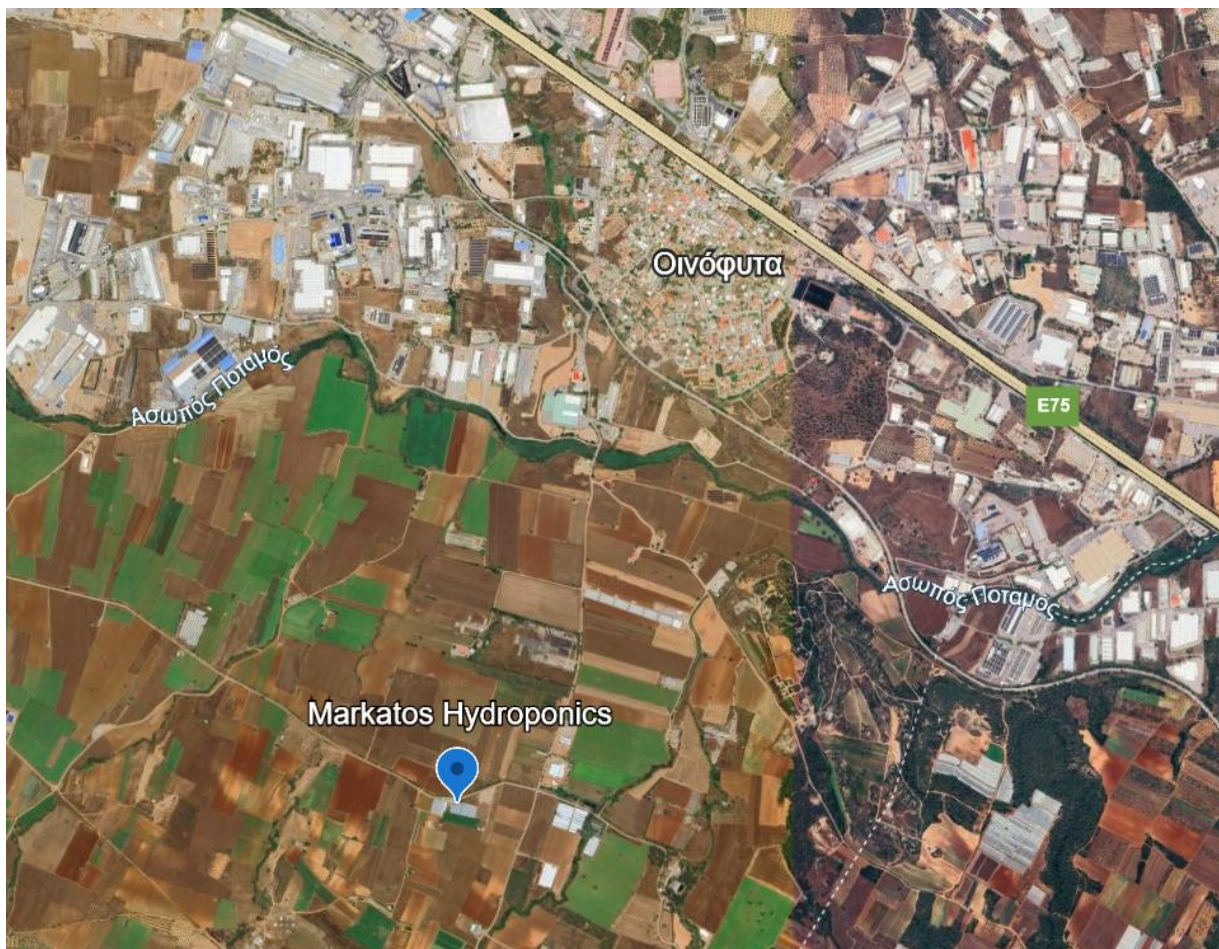
Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη σύγχρονη θερμοκηπιακή μονάδα υδροπονίας Μαρκάτου, η οποία βρίσκεται στην περιοχή των Οиноφύτων Βοιωτίας στην Στερεά Ελλάδα. Η θέση της μονάδας απέχει απόσταση περίπου 50 χιλιομέτρων από την Αθήνα και 25 χιλιομέτρων από την Χαλκίδα. Στην Εικόνα 6 (Google Earth) απεικονίζεται με ακρίβεια η τοποθεσία της υδροπονικής μονάδας με ειδική σήμανση (πινέζα), παρέχοντας μια συνολική θέαση της γεωγραφικής της ένταξης στην ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 6 Τοποθεσία μονάδας Markatos Hydroponics – Google Earth.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται μέσω του Google maps μια λεπτομερέστερη απεικόνιση της ευρύτερης περιοχής των Οиноφύτων, όπου διακρίνεται με σαφήνεια η μονάδα υδροπονίας, επισημασμένη με ειδική σήμανση (πινέζα), προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική οπτική της

τοποθεσίας και των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της. Οι συντεταγμένες της πινέζας είναι: 38°17'25.0"N 23°37'43.3"E .



Εικόνα 7 Τοποθεσία μονάδας Markatos Hydroponics – Google Maps.

6.2 Προτερήματα περιοχής μελέτης

6.2.1 Γεωγραφική θέση και προσβασιμότητα

Η στρατηγική γεωγραφική θέση των Οиноφύτων αποτελεί αναμφισβήτητο το σημαντικότερο προτέρημα της περιοχής. Η σχετικά μικρή απόσταση τόσο από την Αθήνα (50 χλμ.) όσο και από τη Χαλκίδα (25 χλμ.) εξασφαλίζει άμεση πρόσβαση σε δύο μεγάλα αστικά κέντρα, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη γρήγορη μεταφορά προϊόντων. Η εθνική οδός και η κεντρική γραμμή τρένων που διασχίζει την περιοχή προσφέρει εξαιρετική συνδεσιμότητα με την υπόλοιπη χώρα, ενώ η εύκολη πρόσβαση σε σημαντικά λιμάνια, όπως ο Πειραιάς και η Χαλκίδα, ανοίγει δυνατότητες για εξαγωγές των προϊόντων και συνεργασίες με κρουαζιερόπλοια.

Η θέση αυτή συμβάλλει στο μειωμένο κόστος μεταφοράς και στο χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της εφοδιαστικής αλυσίδας, σύμφωνα με τις σύγχρονες απαιτήσεις για βιώσιμες επιχειρηματικές πρακτικές.

6.2.2 Εγγύτητα σε αγορές και δίκτυα διανομής

Ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα για τη θερμοκηπιακή μονάδα αποτελεί η άμεση πρόσβαση σε μεγάλα καταναλωτικά κέντρα και δίκτυα διανομής. Οι κεντρικές αποθήκες των μεγαλύτερων αλυσίδων σουπερμάρκετ βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των πέντε

χιλιομέτρων, γεγονός που διευκολύνει την άμεση διάθεση των παραγόμενων προϊόντων στην αγορά. Αυτή η εγγύτητα επιτρέπει στα ευπαθή νωπά προϊόντα να φτάνουν στον καταναλωτή σε ελάχιστο χρόνο, διατηρώντας τη μέγιστη θρεπτική αξία και γευστική ποιότητά τους. Η παρουσία πολλών μεταφορικών επιχειρήσεων που έχουν την έδρα τους στην περιοχή εξασφαλίζει επιπλέον αποτελεσματικές και οικονομικές λύσεις για τη διακίνηση των προϊόντων, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο από την παραγωγή ως το ράφι.

6.2.3 Διαθεσιμότητα προμηθευτών και πρώτων υλών

Η περιοχή μελέτης συνδυάζει και φημίζεται για δύο διαφορετικά υπόβαθρα που συνυπάρχουν αρμονικά: αφενός τη βιομηχανική ζώνη, η οποία αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη στην Ελλάδα, και αφετέρου την αγροτική ζώνη, γνωστή ως κάμπος των Οινοφύτων.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση βιομηχανικών επιχειρήσεων που λειτουργούν συμπληρωματικά προς τη θερμοκηπιακή μονάδα, διασφαλίζοντας την απρόσκοπτη προμήθεια όλων των απαραίτητων εισροών του συστήματος παραγωγής. Το διασυνδεδεμένο αυτό επιχειρηματικό οικοσύστημα επιτρέπει την άμεση κάλυψη των αναγκών σε πρώτες ύλες, εξοπλισμό και υπηρεσίες υποστήριξης, μειώνοντας σημαντικά τους χρόνους αναμονής, το κόστος συναλλαγών και τους κινδύνους εφοδιαστικής αλυσίδας.

6.2.4 Υδάτινοι πόροι

Καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία μιας καλλιέργειας είναι η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των υδάτινων πόρων. Η περιοχή των Οινοφύτων χαρακτηρίζεται από επάρκεια υδάτινων πόρων σε διάφορες μορφές. Υπάρχουν διαθέσιμα υπόγεια ύδατα που μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω γεωτρήσεων, ενώ σε απόσταση μικρότερη των χιλίων μέτρων από τη μονάδα διέρχεται ο ποταμός Ασωπός, ο οποίος με την κατάλληλη διαχείριση και επεξεργασία του νερού μπορεί να αποτελέσει επιπλέον πηγή άρδευσης. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι επίσης το ανεκμετάλλευτο κανάλι της ΕΥΔΑΠ που συνδέεται με τη λίμνη της Υλίκης και είχε σχεδιαστεί για την υδροδότηση της Αθήνας. Αυτό το κανάλι, το οποίο διέρχεται ακριβώς δίπλα από τη μονάδα θερμοκηπίων αλλά δεν βρίσκεται επί του παρόντος σε λειτουργία, αντιπροσωπεύει μια μελλοντική δυνατότητα για την εξασφάλιση άφθονου νερού υψηλής ποιότητας, εφόσον αξιοποιηθεί κατάλληλα.

6.2.5 Ενεργειακοί και φυσικοί πόροι

Πλεονέκτημα της περιοχής μελέτης αποτελεί η διαθεσιμότητα και η εύκολη πρόσβαση σε ενεργειακούς πόρους, στοιχείο καθοριστικό για τη βιωσιμότητα μιας θερμοκηπιακής μονάδας με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Στην περιοχή και συγκεκριμένα στη μονάδα μελέτης φτάνει αγωγός φυσικού αερίου, ο οποίος μπορεί να αξιοποιηθεί ως οικονομική πηγή ενέργειας για τη θέρμανση του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου, τη θέρμανση του υδροπονικού συστήματος και για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η χρήση φυσικού αερίου μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος της μονάδας και παράλληλα συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε σύγκριση με συμβατικά καύσιμα.

Επιπλέον, η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας για σημαντικό μέρος του έτους, γεγονός που προσφέρει τη δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Μέρος των διαθέσιμων εκτάσεων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, εξασφαλίζοντας παραγωγή καθαρής ενέργειας που θα κάλυπτε μέρος των αναγκών της μονάδας και θα μείωνε περαιτέρω την εξάρτηση από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Κλιματολογικές συνθήκες

Οι κλιματολογικές συνθήκες στην περιοχή των Οиноφύτων προσφέρουν ένα ιδανικό περιβάλλον για θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Το ήπιο μεσογειακό κλίμα, με τους ήπιους χειμώνες και τα θερμά, ηλιόλουστα καλοκαίρια, δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η περιορισμένη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως ισχυροί άνεμοι, χαλαζοπτώσεις ή έντονες χιονοπτώσεις, μειώνει τον κίνδυνο καταστροφών στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ασφάλεια για την επένδυση και σταθερότητα στην παραγωγή [155].

6.2.6 Οικονομικά πλεονεκτήματα

Από οικονομική άποψη, η περιοχή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για την εγκατάσταση επιχειρηματικών αγροτικών μονάδων. Το κόστος γης στα Οινόφυτα παραμένει σχετικά χαμηλό συγκριτικά με περιοχές που βρίσκονται πλησιέστερα στην Αθήνα, επιτρέποντας την απόκτηση μεγαλύτερων εκτάσεων με χαμηλότερο κόστος επένδυσης. Παράλληλα, το λειτουργικό κόστος της επιχείρησης μειώνεται σημαντικά λόγω της εγγύτητας τόσο σε προμηθευτές όσο και σε αγορές, περιορίζοντας τα έξοδα μεταφοράς και αποθήκευσης. Επιπρόσθετα, η περιοχή προσφέρει πρόσβαση σε εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό με εμπειρία τόσο στον βιομηχανικό όσο και στον αγροτικό τομέα, καλύπτοντας τις ανάγκες μιας σύγχρονης υδροπονικής μονάδας.

6.2.7 Γεωμορφολογικές συνθήκες

Οι γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής είναι ιδανικές για την εγκατάσταση θερμοκηπιακών υποδομών. Το έδαφος χαρακτηρίζεται από μεγάλες εκτάσεις πεδιάδας με ήπιες κλίσεις, γεγονός που διευκολύνει την κατασκευή θερμοκηπίων και μειώνει το κόστος θεμελίωσης και διαμόρφωσης του χώρου. Το επαρκές οδικό δίκτυο διασφαλίζει την εύκολη πρόσβαση στις εγκαταστάσεις για προσωπικό, προμηθευτές και οχήματα μεταφοράς, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη διανομή των προϊόντων στις αγορές.

6.3 Υδροπονική καλλιέργεια θερμοκηπίων Μαρκάτου

Η παρουσία των θερμοκηπίων υδροπονίας Markatos Hydroponics στην περιοχή των Οиноφύτων Βοιωτίας αντιπροσωπεύει μια αξιοσημείωτη περίπτωση επιχειρηματικής καινοτομίας στον αγροτικό τομέα της Ελλάδας. Η πορεία της επιχείρησης αντικατοπτρίζει τις προκλήσεις και τις δυνατότητες εφαρμογής σύγχρονων γεωργικών τεχνικών σε μια χώρα με παράδοση στον αγροτικό χαρακτήρα.

6.3.1 Ιστορική εξέλιξη και ίδρυση

Η ιστορία των θερμοκηπίων ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του ενενήντα, όταν ο Ευστράτιος Μαρκάτος ξεκίνησε την πρώτη εγκατάσταση, έκτασης τεσσάρων στρεμμάτων. Αποτέλεσε το πρώτο πειραματικό στάδιο εφαρμογής της υδροπονικής μεθόδου, επικεντρωμένης κυρίως στην καλλιέργεια ντομάτας.

Κατά τα πρώτα αυτά χρόνια, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλοί πειραματισμοί με ποικίλα είδη καλλιέργειας μεταξύ των οποίων η ντομάτα, το αγγούρι και το μαρούλι αλλά και με διάφορες τεχνικές υδροπονίας. Δοκιμάστηκαν μεταξύ άλλων:

- Κάθετη υδροπονία (Vertical Hydroponics), ήδη από τη δεκαετία του 1990,
- Υδροπονία στάγδην άρδευσης σε πετροβάμβακα,
- Καθώς και οι μέθοδοι NFT (Nutrient Film Technique) και DFT (Deep Flow Technique).

Η επιχείρηση αναβίωσε κατά το 2011 με την εισαγωγή νέων καλλιεργειών, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων ειδών μαρουλιού και άλλων προϊόντων όπου γνώρισε σταδιακή ανάπτυξη μετά το 2015 με την ενασχόληση του γιού του (συγγραφέα της παρούσας εργασίας). Η εγκατάσταση επεκτάθηκε στα 14 στρέμματα ενώ παράλληλα έγιναν ενέργειες για τον εκσυγχρονισμό του εξοπλισμού και την εφαρμογή προηγμένων συστημάτων ελέγχου του περιβάλλοντος και της καλλιέργειας.

Η ετήσια παραγωγή ξεπερνά σήμερα τους 300 τόνους προϊόντων, με τη δυναμικότητα να αυξάνεται σταθερά καθώς βελτιστοποιείται η μέθοδος καλλιέργειας και επεκτείνονται οι εγκαταστάσεις.

Οι παρακάτω φωτογραφίες (Εικόνα 8, Εικόνα 9, Εικόνα 10, Εικόνα 11) αποτυπώνουν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από την πρώιμη φάση της μονάδας, τα πειραματικά συστήματα που εφαρμόστηκαν, καθώς και την εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής.



Εικόνα 8 Πρώιμο στάδιο καλλιέργειας μαρουλιού σε πλωτές πλάκες φελιζόλ (μέθοδος DFT).



Εικόνα 9 Πλήρως ανεπτυγμένα φυτά μαρουλιού σε λιμνοδεξαμενές υδροπονίας.



(α)



(β)

Εικόνα 10 Υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού (α) και ντομάτας (β) σε υπόστρωμα πετροβάμβακα με σύστημα στάγδην.



Εικόνα 11 Κάθετη υδροπονία με μαρούλι πριν από 25 χρόνια.

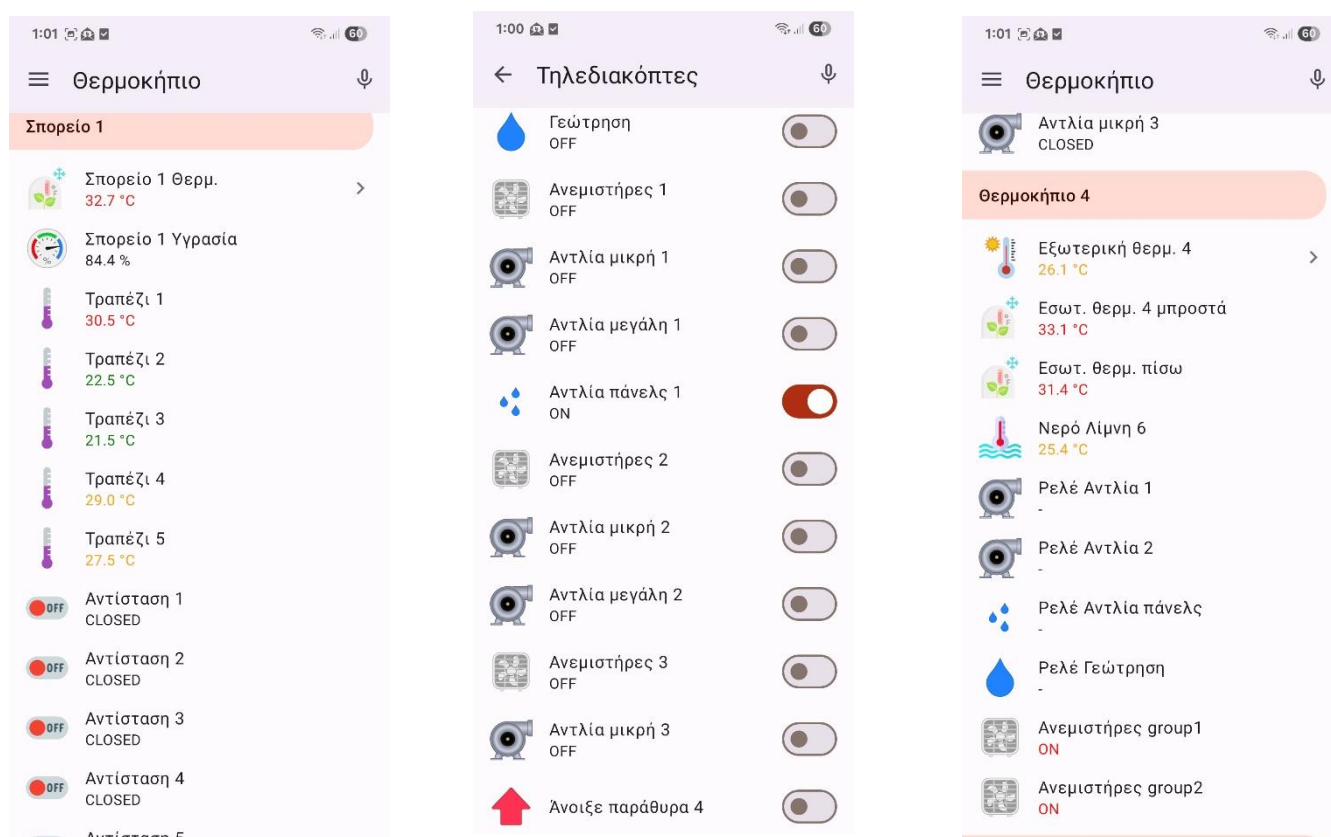
6.3.2 Τεχνολογία και καινοτομία

Τα θερμοκήπια ξεχωρίζουν για την ανάπτυξη και εφαρμογή πρωτοποριακών τεχνολογιών υδροπονίας. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται αποτελούν καρπό της έρευνας και της πειραματικής

εφαρμογής που πραγματοποιήθηκε από το 1990 έως σήμερα, συνδυάζοντας θεωρητική γνώση και πρακτική εμπειρία. Η μονάδα αξιοποιεί κυρίως προσαρμοσμένα συστήματα γνωστά πιά ως DFT (βαθιά ροή θρεπτικών) και καλλιέργειας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα με τις ρίζες των φυτών βυθισμένες απευθείας σε δεξαμενές θρεπτικού διαλύματος.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των εγκαταστάσεων αποτελεί το αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου των περιβαλλοντικών παραμέτρων και των μηχανημάτων, το οποίο εγκαταστάθηκε το 2015. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την παρακολούθηση και ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου και του νερού, της υγρασίας και της φωτοπερίοδου. Μέσω απομακρυσμένου ελέγχου διευκολύνεται η πρόσβαση σε όλα τα συστήματα των εγκαταστάσεων ελέγχοντας τη λειτουργία των παραθύρων οροφής, των ανεμιστήρων, των αντλιών, του ψυγείου, της θέρμανσης κ.α., εξασφαλίζοντας βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης των φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Στιγμιότυπα από την εφαρμογή openHAB που χρησιμοποιείται για την απομακρυσμένη διαχείριση παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 12.



Εικόνα 12 Στιγμιότυπα της εφαρμογής openHAB για τον απομακρυσμένο έλεγχο των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων (μέσω κινητού τηλεφώνου).

Το σύστημα επιτρέπει την παρακολούθηση και τη ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο όλων των βασικών περιβαλλοντικών και λειτουργικών μεταβλητών της μονάδας, είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα. Μέσω του περιβάλλοντος χρήστη, ο χειριστής μπορεί να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί αντλίες, μοτέρ, παράθυρα, ανεμιστήρες, μονάδες θέρμανσης ή ψύξης, να ελέγχει τη θερμοκρασία και την υγρασία σε πολλαπλά σημεία (όπως στις δεξαμενές, στο σπορείο, στον ψυκτικό θάλαμο ή στο εξωτερικό περιβάλλον), και να εποπτεύει το PH και την αγωγιμότητα του διαλύματος. Επιπλέον, το σύστημα είναι εφοδιασμένο με συναγερμό ασφαλείας σε περίπτωση υπέρβασης κρίσιμων θερμοκρασιών, συμβάλλοντας στην αποφυγή απωλειών και τη διατήρηση της καλλιεργητικής σταθερότητας. Συνολικά, προσφέρει πλήρη

ευελιξία στη διαχείριση του μικροκλίματος και εξασφαλίζει τις βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Σε μελλοντικά σχέδια, η επιχείρηση θα επενδύσει σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία, με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής και το λειτουργικό κόστος.

6.3.3 Εμπορική δραστηριότητα και διανομή

Η διάθεση των προϊόντων της επιχείρησης ακολουθεί διάφορα μοτίβα και ευρύ πελατολόγιο, περιλαμβάνοντας:

- Απευθείας συνεργασίες με αλυσίδες σουπερμάρκετ (Σκλαβενίτης, My Market)
- Πώληση σε κεντρικές λαχαναγορές (Αθηνών, Χαλκίδας, Λαμίας)
- Τροφοδοσία κρουαζιερόπλοιων
- Εξαγωγές σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές αγορές (Γερμανία, Βουλγαρία, Ρουμανία)

6.3.4 Προκλήσεις και προοπτικές

Παρά την επιτυχημένη πορεία, η επιχείρηση αντιμετώπισε σημαντικές προκλήσεις, κυρίως σχετικές με:

- Το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης σε εξοπλισμό [156]
- Την εξεύρεση εξειδικευμένου προσωπικού
- Τον ανταγωνισμό από υπαίθρια προϊόντα χαμηλότερου κόστους
- Τις διακυμάνσεις στο κόστος ενέργειας

Ωστόσο, οι προοπτικές για το μέλλον εμφανίζονται θετικές. Τα σχέδια της επιχείρησης περιλαμβάνουν:

- Περαιτέρω επέκταση των εγκαταστάσεων κατά 15 στρέμματα την επόμενη τριετία
- Εφαρμογή τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής
- Ανάπτυξη διαφόρων συστημάτων για καλλιέργεια εναλλακτικών προϊόντων
- Ενίσχυση της εξαγωγικής δραστηριότητας με στόχευση στις αγορές της Βόρειας Ευρώπης

6.3.5 Κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Η Markatos Hydroponics έχει αναπτύξει σημαντική δραστηριότητα εταιρικής κοινωνικής ευθύνης στην περιοχή των Οиноφύτων. Η επιχείρηση απασχολεί πάνω από 20 εργαζόμενους, συμβάλλοντας στην τοπική απασχόληση ενώ ταυτόχρονα στοχεύει στην εξάλειψη των παραπροϊόντων της καλλιέργειας και στη μείωση των φυτοφαρμάκων συμβάλλοντας στην πρόληψη περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη περιοχή.

6.4 Περιγραφή θερμοκηπίου

6.4.1 Γενικά

Το θερμοκήπιο εκτείνεται σε έκταση 14 στρεμμάτων, αποτελώντας μια αξιόλογη μονάδα παραγωγής. Η αρχιτεκτονική του, ακολουθεί το πολύριχτο τοξωτό μοτίβο, εξοπλισμένο με στρατηγικά τοποθετημένα παράθυρα οροφής που διασφαλίζουν τον αποτελεσματικό αερισμό. Ο σκελετός, κατασκευασμένος από γαλβανισμένο χάλυβα εν θερμώ, προσφέρει εξαιρετική ανθεκτικότητα και μεγάλη αντοχή στον χρόνο [157].

Η δομή αναπτύσσεται σε τμήματα (τολλ) πλάτους 6,40 μέτρων, μεταβλητού μήκους με βήμα 2,5 μέτρων και ύψος 3 μέτρα στην υδρορροή και 4,30 μέτρα στον κορφή, εξασφαλίζοντας επαρκή χώρο για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη διευκόλυνση των καλλιεργητικών εργασιών.

Η κάλυψη του θερμοκηπίου αποτελείται από μονό διαφανές νάιλον με ειδικές προδιαγραφές διαπερατότητας φωτός, βελτιστοποιώντας τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών. Περιμετρικά η κατασκευή περικλείεται από ημιδιαφανές plexiglass, συνδυάζοντας τη μηχανική αντοχή με την ελεγχόμενη διάχυση του φωτός.

Η χωροθέτηση του θερμοκηπίου ακολουθεί τον άξονα Βορρά-Νότου, μια στρατηγική επιλογή που μεγιστοποιεί την αξιοποίηση του ηλιακού φωτός. Αυτός ο προσανατολισμός επιτρέπει την ομοιόμορφη διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα φυτά, ανεξαρτήτως θέσης στο εσωτερικό της καλλιεργητικής μονάδας, λαμβάνουν ισόποση πρόσβαση στο φυσικό φως.

Το σύστημα κλιματισμού του θερμοκηπίου έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τόσο την αποτελεσματικότητα όσο και την περιβαλλοντική υπευθυνότητα. Στη μία πλευρά της κατασκευής, έχουν εγκατασταθεί εξειδικευμένα πάνελ δροσισμού που λειτουργούν με ανακυκλώσιμο νερό, αξιοποιώντας τις αρχές της εξάτμισης για τη μείωση της θερμοκρασίας. Η τεχνολογία αυτή όχι μόνο μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μονάδας, αλλά συμβάλλει και στην οικονομική ανθεκτικότητα της επιχείρησης μέσω της εξοικονόμησης υδάτινων πόρων.

Στην αντιδιαμετρική πλευρά, ένα σύστημα ανεμιστήρων υψηλής απόδοσης δημιουργεί μια ελεγχόμενη ροή αέρα διαμέσου ολόκληρης της έκτασης του θερμοκηπίου. Οι ανεμιστήρες αυτοί επιτελούν διπλή λειτουργία: αφενός απομακρύνουν τον θερμό αέρα από το εσωτερικό της καλλιεργητικής μονάδας, και αφετέρου δημιουργούν υποπίεση που διευκολύνει την εισροή φρέσκου, δροσερού και εμπλουτισμένου με οξυγόνο αέρα μέσω των πάνελ δροσισμού. Αυτό το ολοκληρωμένο σύστημα κυκλοφορίας εξασφαλίζει ιδανικές μικροκλιματικές συνθήκες για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στον περιορισμό της ανάπτυξης παθογόνων οργανισμών που ευνοούνται από στάσιμες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Στην παρακάτω Εικόνα 13 παρουσιάζεται η εξωτερική όψη ενός από τα θερμοκήπια της μονάδας Markatos Hydroponics. Αποτελεί ένα τμήμα του συνολικού συγκροτήματος, το οποίο περιλαμβάνει συνολικά τρία παρόμοια θερμοκήπια.



Εικόνα 13 Πανοραμική εξωτερική όψη μέρους των θερμοκηπίων της μονάδας Markatos Hydroponics.

6.4.2 Περιγραφή εγκαταστάσεων

Εσωτερικά του θερμοκηπίου βρίσκονται:

- οι αποθηκευτικοί χώροι
- οι χώροι συσκευασίας
- τα ψυγεία
- ειδικά διαμορφωμένοι χώροι σπορείων
- οι κεντρικές δεξαμενές λίπανσης
- οι λιμνοδεξαμενές υδροπονίας
- Διάδρομοι μετακίνησης κ.α.

Οι εγκαταστάσεις του θερμοκηπίου έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και της λειτουργικότητας. Οι αποθηκευτικοί χώροι είναι στρατηγικά τοποθετημένοι για την άμεση πρόσβαση στα απαραίτητα υλικά και εξοπλισμό, ενώ διαθέτουν κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης που διασφαλίζουν την τάξη και την προστασία των αποθηκευμένων προϊόντων.

Οι χώροι συσκευασίας είναι εξοπλισμένοι με σύγχρονα μηχανήματα και ειδικούς πάγκους εργασίας που επιτρέπουν την αποτελεσματική προετοιμασία και συσκευασία των προϊόντων για την αγορά.

Τα ψυγεία αποτελούν κρίσιμο στοιχείο των εγκαταστάσεων, καθώς εξασφαλίζουν τη διατήρηση της φρεσκάδας και της ποιότητας των προϊόντων μετά τη συγκομιδή. Είναι εξοπλισμένα με συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας και υγρασίας, επιτρέποντας τη ρύθμιση των ιδανικών συνθηκών για κάθε τύπο προϊόντος. Η χωρητικότητα και η διαρρύθμιση των ψυγείων έχουν σχεδιαστεί με βάση τις ανάγκες της παραγωγής και της διανομής.

Οι ειδικά διαμορφωμένοι χώροι σπορείων διαθέτουν ελεγχόμενες συνθήκες για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών. Είναι εξοπλισμένοι με προηγμένα συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας και υγρασίας που προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε καλλιέργειας. Επιπλέον, διαθέτουν ειδικά διαμορφωμένους πάγκους και υποστρώματα για την υποστήριξη της ανάπτυξης των νεαρών φυτών.

Οι κεντρικές δεξαμενές λίπανσης αποτελούν το νευραλγικό κέντρο του συστήματος θρέψης των φυτών. Περιλαμβάνουν δεξαμενές αποθήκευσης θρεπτικών διαλυμάτων, συστήματα ανάμειξης και δοσομέτρησης, καθώς και συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου της ποιότητας του θρεπτικού διαλύματος.

Οι διάδρομοι μετακίνησης είναι σχεδιασμένοι με επαρκές πλάτος και κατάλληλη επιφάνεια για την εύκολη και ασφαλή κίνηση του προσωπικού και των μηχανημάτων. Είναι στρατηγικά τοποθετημένοι ώστε να συνδέουν όλους τους χώρους του θερμοκηπίου, διευκολύνοντας τη ροή της εργασίας και μειώνοντας τους χρόνους μετακίνησης.

Επιπρόσθετα, το θερμοκήπιο διαθέτει ολοκληρωμένα συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου που επιτρέπουν την παρακολούθηση και ρύθμιση όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, ο φωτισμός και η άρδευση. Τα συστήματα αυτά είναι συνδεδεμένα με κεντρικό σύστημα διαχείρισης που παρέχει πλήρη εποπτεία και έλεγχο της λειτουργίας του θερμοκηπίου.

Η συνολική διάταξη των εγκαταστάσεων έχει σχεδιαστεί με βάση τις αρχές της εργονομίας και της αποτελεσματικότητας, εξασφαλίζοντας την ομαλή ροή της παραγωγικής διαδικασίας από το στάδιο της σποράς μέχρι τη συσκευασία και αποθήκευση των τελικών προϊόντων.



Εικόνα 15 Αποθηκευτικός χώρος.



Εικόνα 16 Χώρος σπορείου με κυλιόμενα τραπέζια και δίσκους ανάπτυξης σπορόφυτων σε πετροβάμβακα πριν την μεταφύτευση.

6.4.3 Περιγραφή συστήματος υδροπονίας με επίπλευση

Η υδροπονική καλλιέργεια με επίπλευση εφαρμόζει μια εκλεπτυσμένη μέθοδο που αποδεσμεύει πλήρως την παραγωγή από την εξάρτηση του εδάφους. Η διαδικασία ξεκινά στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο βλάστησης, όπου τα σπορόφυτα αναπτύσσονται εντός κύβων ανάπτυξης υπό αυστηρά ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτή η πρόιμη φάση

γευστική μπατάβια, καθώς και την εκλεπτυσμένη όκλιφ, μεταξύ άλλων ποικιλιών που συμπληρώνουν το εμπορικό χαρτοφυλάκιο.

Η παραγωγική διαδικασία χαρακτηρίζεται από τον αδιάλειπτο κύκλο καλλιέργειας, ο οποίος παραμένει ενεργός καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, υπερβαίνοντας τους εποχικούς περιορισμούς που διέπουν τις συμβατικές καλλιέργειες. Αυτή η συνεχής παραγωγική ροή επιτυγχάνεται μέσω ενός συστηματικού προγράμματος φυτεύσεων και συγκομιδών που λαμβάνουν χώρα σε σχεδόν καθημερινή βάση, διασφαλίζοντας τη σταθερή τροφοδοσία της αγοράς με προϊόντα σταθερής ποιότητας και φρεσκάδας.

Το εμβληματικό προϊόν της επιχείρησης, που αποτελεί και το κατατεθέν σήμα της στην αγορά, είναι η καινοτόμος "ζωντανή σαλάτα". Πρόκειται για μια πρωτοποριακή προσέγγιση στη συσκευασία και εμπορία των φυλλωδών λαχανικών, όπου το προϊόν διατίθεται ολόκληρο, συμπεριλαμβανομένης της γλάστρας και του πλήρους ριζικού συστήματος. Αυτή η μέθοδος διάθεσης μεγιστοποιεί τη διατήρηση της φρεσκάδας και των θρεπτικών συστατικών, παρέχοντας στον καταναλωτή τη δυνατότητα να απολαμβάνει ένα πραγματικά φρέσκο προϊόν για παρατεταμένο χρονικό διάστημα στο οικιακό του περιβάλλον. Η καινοτομία αυτή αποτελεί ταυτόχρονα μια στρατηγική διαφοροποίησης από τον ανταγωνισμό και ένα ισχυρό εμπορικό πλεονέκτημα που ενισχύει την αναγνωρισιμότητα του προϊόντος στα ράφια των καταστημάτων.

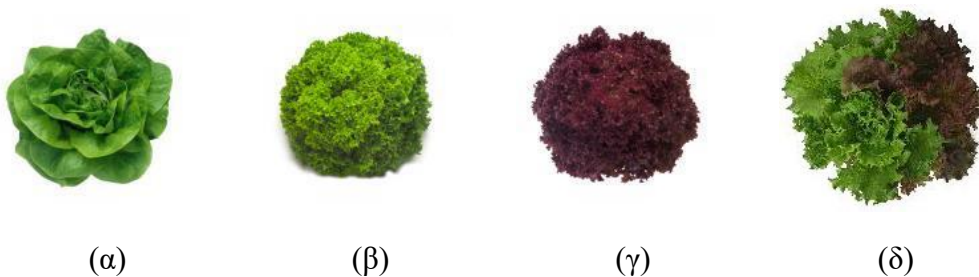
Στις παρακάτω φωτογραφίες (Εικόνα 19, 20, 21) παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φάση της συγκομιδής, εντός του θερμοκηπίου της επιχείρησης, όπως επίσης και φωτογραφίες από τα βασικά προϊόντα.



Εικόνα 19 Διαλογή και συσκευασία προϊόντων «Ζωντανή Σαλάτα» κατά τη συγκομιδή.



Εικόνα 20 Ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας με συσκευασμένο προϊόν στο χώρο του θερμοκηπίου.



Εικόνα 21 Ποικιλίες καλλιέργειας μαρουλιού. Γαλλική σαλάτα (α), Λόλλο πράσινη (β), Λόλλο κόκκινη (γ), Ανάμεικτη (δ).

6.5 Φυτεύσεις – Πωλήσεις

Η παρούσα αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων φύτευσης και παραγωγής της μονάδας Markatos Hydroponics, προσφέρει μια εμπεριστατωμένη εικόνα της παραγωγικής δυναμικότητας της επιχείρησης. Η συστηματική καταγραφή των ημερήσιων φυτεύσεων σπόρων και των παραγόμενων φυτών που προκύπτουν από αυτές αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του υδροπονικού συστήματος.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν καλύπτουν μια εκτεταμένη χρονική περίοδο λειτουργίας της μονάδας, επιτρέποντας την αναγνώριση εποχικών διακυμάνσεων καθώς και την αποτύπωση της συνολικής παραγωγικής τάσης. Η παρουσίαση των στοιχείων αυτών γίνεται μέσω διαγραμμάτων που απεικονίζουν με παραστατικό τρόπο:

- Την ημερήσια ροή φύτευσης σπόρων το έτος 2024 Εικόνα 22.

- Τον όγκο των παραγόμενων φυτών ανά ημέρα του έτους Εικόνα 22.
- Την εποχικότητα στην παραγωγή. Αναδεικνύοντας την συσχέτιση μεταξύ των φυτεύσεων και του απαιτούμενου χρόνου μέχρι την συγκομιδή Εικόνα 23.
- Τη συσχέτιση μεταξύ σπόρων και τελικών προϊόντων, αναδεικνύοντας το ποσοστό επιτυχούς ανάπτυξης Εικόνα 24.

Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν μια ξεκάθαρη απεικόνιση των ποσοτικών στοιχείων, διευκολύνοντας την κατανόηση των παραγωγικών διαδικασιών της επιχείρησης και αποτελώντας τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση του Πλέγματος και των πτυχών που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, νερού, τροφίμων στις επόμενες ενότητες.



Εικόνα 22 Φυτεύσεις σπόρων και Παραγόμενα φυτά έτους 2024.



Εικόνα 23 Απαιτούμενος χρόνος από την φύτευση έως την συγκομιδή.

Το παραπάνω εικονιζόμενο διάγραμμα (Εικόνα 23) αναδεικνύει τον εποχιακό χαρακτήρα της καλλιέργειας, καταγράφοντας τις ημέρες που απαιτούνται από τη φύτευση έως τη συγκομιδή του φυτού. Η ανάλυση αφορά τη συγκεκριμένη καλλιέργεια μαρουλιού και επιβεβαιώνει ότι οι απαιτούμενες ημέρες ανάπτυξης ποικίλλουν σημαντικά μέσα στο έτος.

Παρατηρείται ότι κατά τους χειμερινούς μήνες, η διάρκεια της καλλιέργειας φτάνει έως και τις 100 ημέρες, ενώ κατά τους θερινούς μήνες μειώνεται σημαντικά, φτάνοντας ακόμα και τις 45 ημέρες. Η διακύμανση αυτή οφείλεται κυρίως στη διαφορά στη φωτοπερίοδο (δηλαδή στις διαθέσιμες ώρες ηλιοφάνειας για φωτοσύνθεση) καθώς και στις επικρατούσες θερμοκρασίες και τα καιρικά φαινόμενα (όπως συννεφιά ή λιακάδα).

Η εποχικότητα αυτή αναδεικνύει την ανάγκη για προσεκτικό προγραμματισμό των φυτεύσεων. Στόχος είναι η διατήρηση σταθερής ροής παραγωγής, αποφεύγοντας τόσο την ύπαρξη κενών (αφύτευτων) λιμνοδεξαμενών υδροπονίας όσο και την υπερπαραγωγή φυτών στο στάδιο μεταφύτευσης, που ενδέχεται να μην μπορούν να ενταχθούν εγκαίρως στο παραγωγικό σύστημα. Το στοιχείο αυτό αποτελεί βασικό παράγοντα βελτιστοποίησης της παραγωγής και της εκμετάλλευσης των υποδομών.



Εικόνα 24 Σύνολο φυτεύσεων και παραγωγής 2024.

Η απόκλιση μεταξύ των φυτεύσεων και των παραγόμενων προϊόντων οφείλεται σε απώλειες στα διάφορα στάδια ανάπτυξης. Η συνολικές απώλειες του έτους ανέρχονται περίπου στο 8%.

6.6 Κατανάλωση ενέργειας

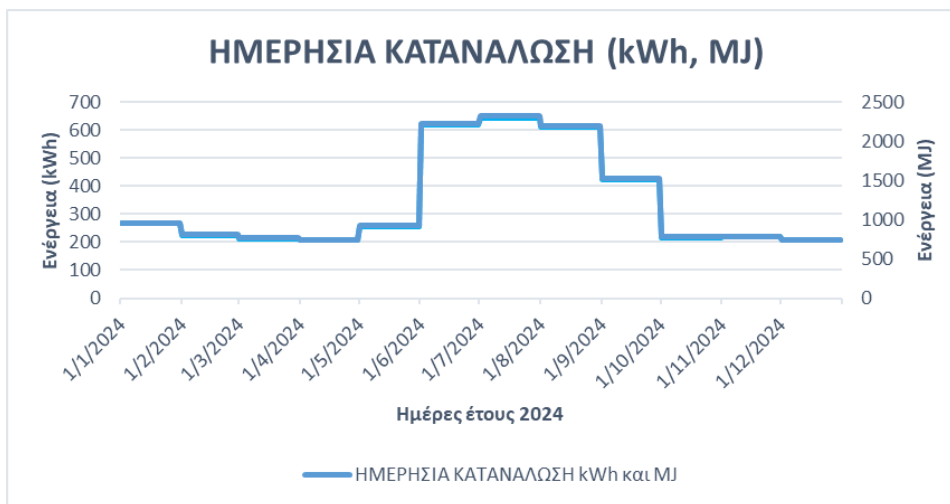
Η ενεργειακή αποτύπωση της υδροπονικής μονάδας Markatos Hydroponics αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και της περιβαλλοντικής επίδρασης της παραγωγικής διαδικασίας. Στην παρούσα ενότητα καταγράφεται και αναλύεται λεπτομερώς η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των εγκαταστάσεων σε ημερήσια βάση, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα του ενεργειακού προφίλ της επιχείρησης.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα αποτυπώνουν τη συνολική ηλεκτρική κατανάλωση, η οποία προκύπτει από το σύνολο των επιμέρους ενεργοβόρων διεργασιών και συστημάτων της μονάδας. Συγκεκριμένα, στις μετρήσεις περιλαμβάνονται:

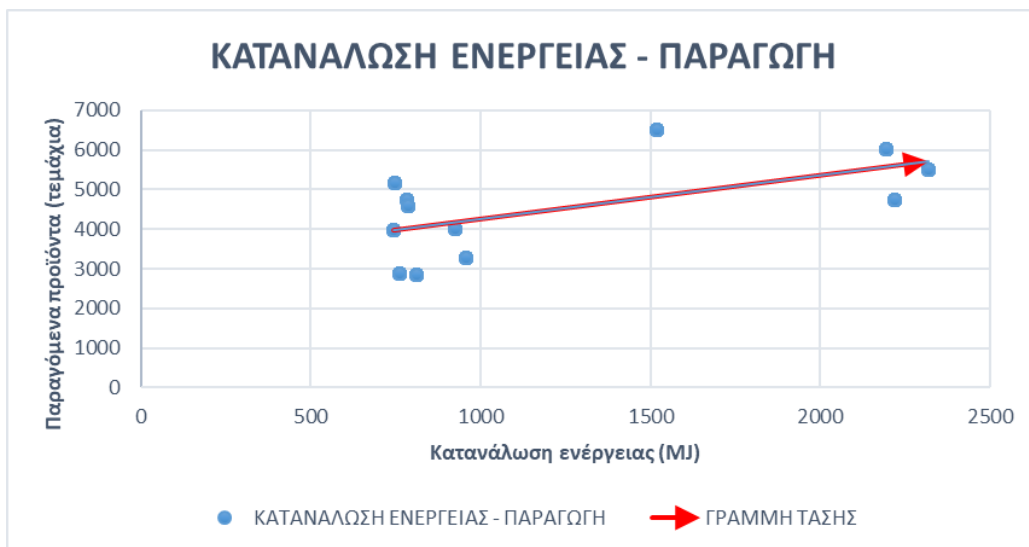
- Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των συστημάτων άντλησης και κυκλοφορίας του νερού εντός του υδροπονικού συστήματος
- Η κατανάλωση των συστημάτων εξαερισμού και των ανεμιστήρων που διασφαλίζουν τη βέλτιστη κυκλοφορία του αέρα
- Η λειτουργία των ψυκτικών εγκαταστάσεων για τη συντήρηση των τελικών προϊόντων
- Η ενέργεια που απορροφάται από διάφορες μηχανολογικές εγκαταστάσεις υποστήριξης της παραγωγής

Η διαχρονική παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης επιτρέπει την αναγνώριση μοτίβων και τάσεων που σχετίζονται με εποχικές διακυμάνσεις, κλιματολογικές συνθήκες (Εικόνα 25) και επίπεδα παραγωγής (Εικόνα 26). Τα διαγράμματα που ενσωματώνονται παρέχουν τη δυνατότητα οπτικοποίησης αυτών των δεδομένων, διευκολύνοντας την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση της μονάδας.

Η εις βάθος ανάλυση των ενεργειακών καταγραφών θα αποτελέσει τη βάση για την αξιολόγηση της τρέχουσας ενεργειακής αποδοτικότητας, καθώς και για τον εντοπισμό πιθανών σημείων βελτιστοποίησης. Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα για τον υπολογισμό των δεικτών του Πλέγματος νερού-ενέργειας-τροφίμων, συμβάλλοντας έτσι στην ολιστική αποτίμηση της αειφορίας του υδροπονικού συστήματος.



Εικόνα 25 Κατανάλωση ενέργειας ανά ημέρα του έτους 2024 ΣΕ kWh και MJ.



Εικόνα 26 Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας και παραγόμενων προϊόντων.

Σε αυτό το διάγραμμα, κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα ζεύγος τιμών (κατανάλωση ενέργειας, παραγωγή). Η κόκκινη γραμμή τάσης αναδεικνύει την θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Δηλαδή όσο μεγαλώνει η κατανάλωση ενέργειας, τόσο αυξάνεται η παραγωγή (και αντίστροφα).

6.7 Κατανάλωση νερού

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων αποτελεί άλλη μια θεμελιώδη παράμετρο για τη λειτουργία και τη βιωσιμότητα του υδροπονικού συστήματος της μονάδας Markatos Hydroponics. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η ημερήσια κατανάλωση νερού των εγκαταστάσεων, παρέχοντας μια λεπτομερή αποτύπωση του υδατικού αποτυπώματος της παραγωγικής διαδικασίας.

Τα διαγράμματα που ενσωματώνονται αποτυπώνουν με ακρίβεια τις ημερήσιες καταγραφές κατανάλωσης νερού, οι οποίες περιλαμβάνουν δύο κύριες κατηγορίες χρήσης. Πρώτον, την ποσότητα νερού που διοχετεύεται στις δεξαμενές υδροπονίας, όπου λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη των φυτών, και δεύτερον, το νερό που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των πάνελ δροσισμού, τα οποία συμβάλλουν καθοριστικά στη διατήρηση των βέλτιστων κλιματολογικών συνθηκών εντός του θερμοκηπίου.

Στους μηχανισμούς απώλειας νερού που χαρακτηρίζουν το σύστημα προσμετράται αρχικά η προσρόφηση νερού από τα φυτά ως αναπόσπαστο μέρος της φυσιολογικής τους ανάπτυξης, όπως και η φυσική εξάτμιση που λαμβάνει χώρα τόσο από τις επιφάνειες των υδροπονικών δεξαμενών όσο και από τα πάνελ δροσισμού.

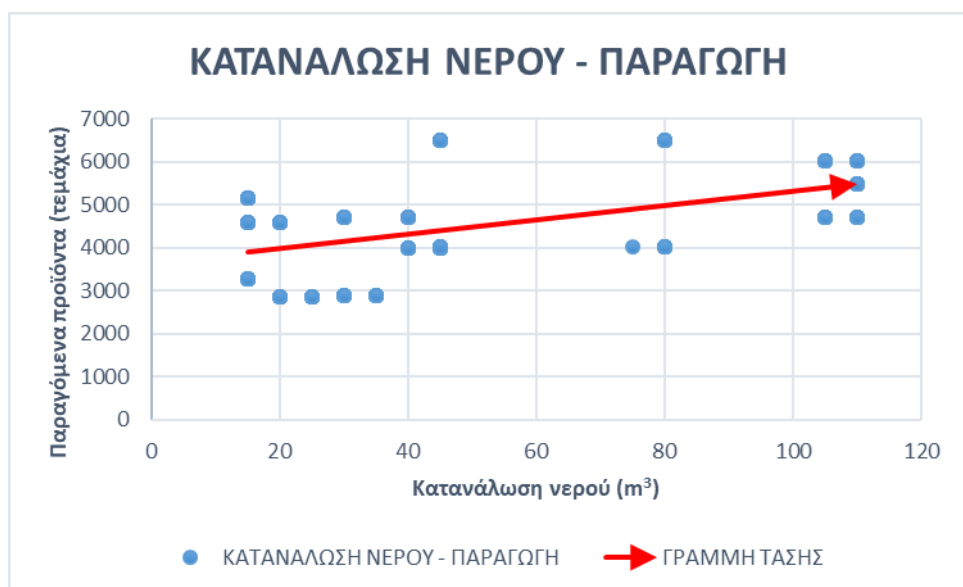
Η συστηματική παρακολούθηση και καταγραφή της κατανάλωσης νερού επιτρέπει την αναγνώριση εποχικών διακυμάνσεων (Εικόνα 27) και τάσεων που επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, τα επίπεδα παραγωγής (Εικόνα 28) και οι διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης των καλλιεργειών.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού του συστήματος και θα αξιοποιηθούν περαιτέρω στην ανάλυση του Πλέγματος νερού-ενέργειας-τροφίμων. Μέσω αυτής της διεξοδικής καταγραφής και

ανάλυσης, δημιουργείται η βάση για τον εντοπισμό πιθανών βελτιώσεων στην υδατική διαχείριση, που θα ενισχύσουν περαιτέρω την σταθερότητα της μονάδας.



Εικόνα 27 Συνολική κατανάλωση νερού ανά ημέρα του έτους 2024.



Εικόνα 28 Σύγκριση κατανάλωσης νερού και παραγόμενων προϊόντων.

Σε αυτό το διάγραμμα, κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα ζεύγος τιμών (κατανάλωση νερού, παραγωγή). Η κόκκινη γραμμή τάσης αναδεικνύει την θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Δηλαδή όσο μεγαλώνει η κατανάλωση νερού, τόσο αυξάνεται η παραγωγή (και αντίστροφα).

6.8 Ενέργεια των προϊόντων

Η ενότητα αυτή εστιάζει στην ενεργειακή αξιολόγηση της παραγωγής, μέσω του προσδιορισμού του ενεργειακού περιεχομένου των παραγόμενων τροφίμων της μονάδας Markatos Hydroponics. Παρουσιάζεται μέσω διαγραμμάτων η ημερήσια ενεργειακή απόδοση

των προϊόντων, εκφρασμένη σε μονάδες Megajoule, παρέχοντας μια ποσοτική αποτίμηση της διατροφικής ενέργειας που παράγεται μέσω του υδροπονικού συστήματος.

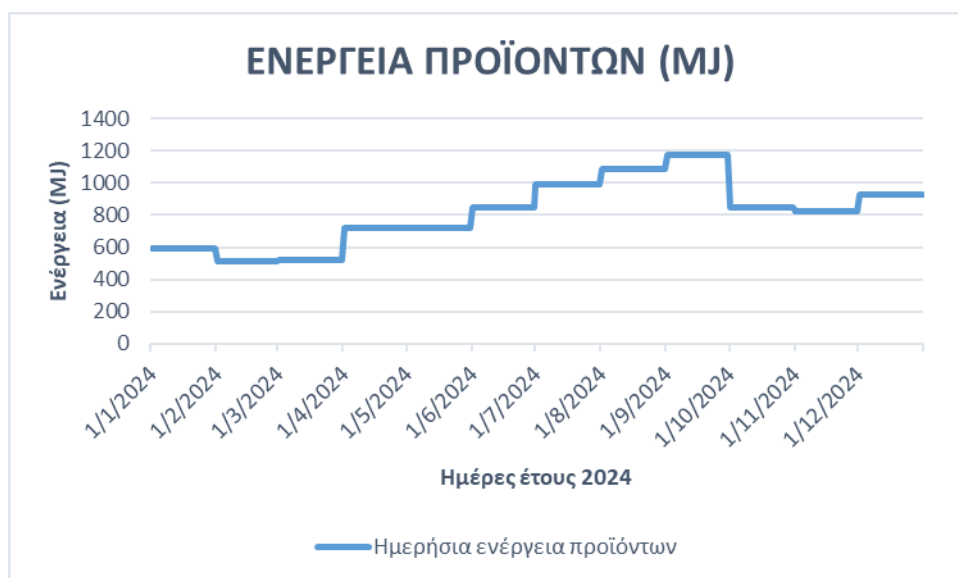
Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται στον προσδιορισμό της θερμιδικής αξίας ανά τεμάχιο παραγόμενου προϊόντος, λαμβάνοντας υπόψη τη διατροφική σύσταση των διαφόρων ποικιλιών μαρουλιού που καλλιεργούνται. Για τη μετατροπή των θερμίδων (kcal) σε Megajoule (MJ) εφαρμόζεται ο κατάλληλος συντελεστής μετατροπής, εξασφαλίζοντας τη συμβατότητα των μεγεθών με διεθνή πρότυπα ενεργειακής ανάλυσης.

Τα διαγράμματα που ενσωματώνονται μεταξύ άλλων απεικονίζουν:

- Την διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας που περιέχεται στα τρόφιμα (Εικόνα 29).
- Τη συσχέτιση μεταξύ της ενεργειακής απόδοσης και την εποχικότητα (Εικόνα 29).

Η ποσοτικοποίηση της παραγόμενης διατροφικής ενέργειας αποτελεί καίριο στοιχείο για την ολοκληρωμένη ανάλυση του Πλέγματος νερού-ενέργειας-τροφίμων, καθώς επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ της ενέργειας που καταναλώνεται για την παραγωγή και της διατροφικής ενέργειας που παράγεται ως τελικό προϊόν. Αυτή η συσχέτιση προσφέρει ένα ουσιαστικό μέτρο της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος από μια ολιστική προοπτική, ενσωματώνοντας τόσο τις εισροές όσο και τις εκροές σε ένα κοινό πλαίσιο ενεργειακής ανάλυσης.

Τα ευρήματα αυτής της ενότητας θα αποτελέσουν τη βάση για τον προσδιορισμό δεικτών αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας που θα αναδείξουν τη συνολική επίδοση του υδροπονικού συστήματος στο πλαίσιο της αειφόρου διαχείρισης πόρων.



Εικόνα 29 Απόδοση σε ενέργεια των προϊόντων ανά ημέρα του έτους 2024.

6.9 Ενέργεια λιπασμάτων

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται διεξοδικά η ενεργειακή αποτίμηση των λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται στο υδροπονικό σύστημα της μονάδας Markatos Hydroponics. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται αποτυπώνουν την ημερήσια ενσωματωμένη ενέργεια των

λιπασμάτων, εκφρασμένη σε Megajoule (MJ), προσφέροντας μια σαφή εικόνα της ενεργειακής επένδυσης που απαιτείται για τη θρεπτική υποστήριξη των καλλιεργειών.

Η μεθοδολογία υπολογισμού βασίστηκε στη λεπτομερή καταγραφή και ανάλυση όλων των τύπων λιπασμάτων που εφαρμόζονται στο σύστημα υδροπονίας σε ημερήσια βάση, για ολόκληρο το ημερολογιακό έτος 2024. Οι ποσότητες προσδιορίστηκαν με ακρίβεια, εκφραζόμενες σε κιλά λιπάσματος ανά κυβικό μέτρο νερού άρδευσης, διασφαλίζοντας τη συνέπεια των μετρήσεων και την αξιοπιστία των εξαγόμενων συμπερασμάτων.

Για τη μετατροπή των ποσοτήτων λιπάσματος σε ενεργειακά ισοδύναμα, εφαρμόστηκαν οι κατάλληλοι συντελεστές ενσωματωμένης ενέργειας για κάθε τύπο θρεπτικού στοιχείου. Αυτοί οι συντελεστές αντιπροσωπεύουν τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή, συσκευασία, μεταφορά και εφαρμογή των λιπασμάτων, παρέχοντας έτσι μια ολιστική προσέγγιση στον ενεργειακό υπολογισμό [158].

Τα διαγράμματα απεικονίζουν με παραστατικό τρόπο:

- Τις διακυμάνσεις στην κατανάλωση ενέργειας λιπασμάτων (Εικόνα 30).
- Την συσχέτιση μεταξύ των λιπασμάτων αναλογικά με τις εποχές (Εικόνα 30).
- Την συσχέτιση μεταξύ της χρήσης νερού και των λιπασμάτων (Εικόνα 31).
- Τη συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων παραγωγής και της απαιτούμενης ενέργειας λιπασμάτων (Εικόνα 32).

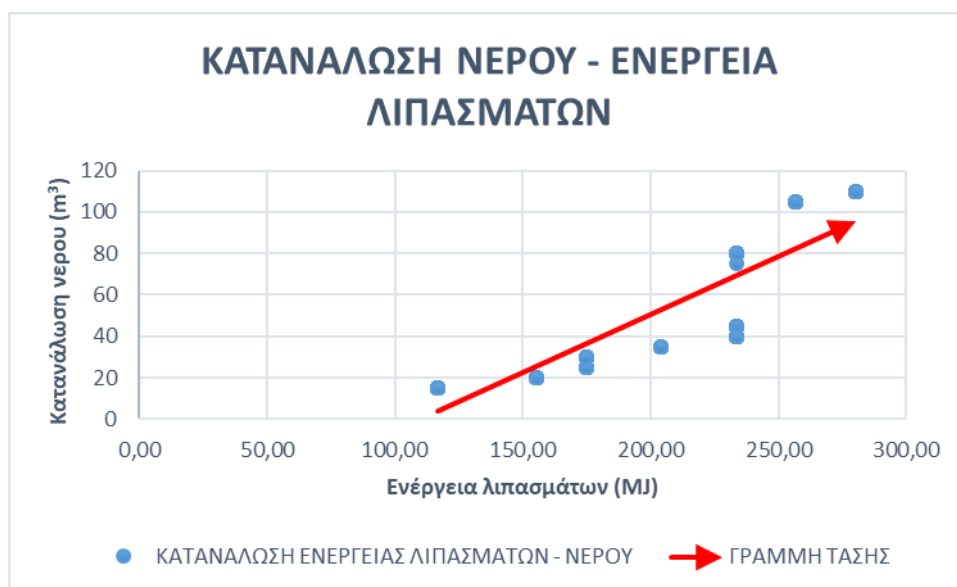
Η αποτίμηση της ενέργειας των λιπασμάτων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος. Σε συνδυασμό με τα δεδομένα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, νερού και παραγωγής τροφίμων, συμβάλλει καθοριστικά στην κατανόηση των αλληλεξαρτήσεων του Πλέγματος νερού-ενέργειας-τροφίμων και στην αναγνώριση πιθανών σημείων βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας.



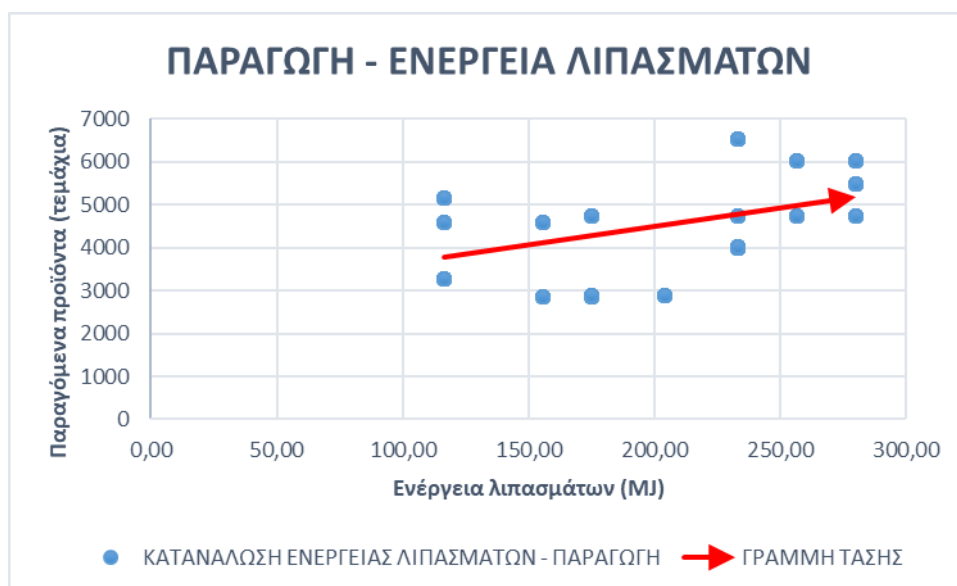
Εικόνα 30 Απαιτούμενα λιπάσματα ανά ημέρα σε μορφή ενέργειας (MJ).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ των θρεπτικών συστατικών και της υδατικής κατανάλωσης στις δεξαμενές υδροπονίας. Παρατηρείται μια αξιοσημείωτη

εποχική διακύμανση της αναλογίας αυτής, με χαρακτηριστική απόκλιση κατά τους θερινούς μήνες, όπου η αυξημένη θερμοκρασία επιφέρει δυσανάλογη μεταβολή μεταξύ των δύο παραμέτρων. Συγκεκριμένα, η σημαντική αύξηση της κατανάλωσης νερού δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση στην προσθήκη λιπασμάτων, καθώς τα φυτά σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες σε νερό, ενώ παράλληλα απαιτούν χαμηλότερη συγκέντρωση αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται με σαφήνεια στην Εικόνα 31, όπου η έντονη κλίση της γραμμής τάσης υποδηλώνει την ποσοτική έκφραση αυτής της εποχικής διαφοροποίησης στην αραίωση των θρεπτικών στοιχείων εντός του υδατικού διαλύματος.



Εικόνα 31 Συσχέτιση κατανάλωσης νερού και ενέργειας λιπασμάτων.



Εικόνα 32 Συσχέτιση παραγωγής και ενέργειας λιπασμάτων.

7 Εξεταζόμενες λύσεις για την αυτάρκεια ενός κλειστού συστήματος υδροπονίας.

7.1 Αυτάρκεια σε ηλεκτρική ενέργεια

Η ενεργειακή αυτονομία αποτελεί θεμέλιο λίθο για τη λειτουργική αειφορία των σύγχρονων υδροπονικών συστημάτων, δεδομένου ότι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχής λειτουργία κρίσιμων υποσυστημάτων, όπως οι αντλίες νερού, τα συστήματα περιβαλλοντικού ελέγχου, ο φωτισμός και τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή καλλιέργεια και την αποτροπή ενδεχόμενων καταστροφικών αστοχιών. Όπως αναδείχθηκε στην ανάλυση της μονάδας Markatos Hydroponics, η ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζει διακυμάνσεις που συσχετίζονται άμεσα με την παραγωγή και τις εποχικές συνθήκες, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για αξιόπιστη ενεργειακή τροφοδοσία.

Η επιδίωξη ενεργειακής αυτονομίας μπορεί να υποστηριχθεί μέσω της ενσωμάτωσης πολλαπλών τεχνολογιών, όπως γεωθερμία, βιοαέριο και ηλιακή ενέργεια. Στην παρακάτω σχηματική αναπαράσταση (Εικόνα 33) αποτυπώνεται ένα ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα θερμοκηπίου, στο οποίο αξιοποιούνται διάφορες ανανεώσιμες πηγές για τη θέρμανση, την ψύξη και την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της μονάδας.

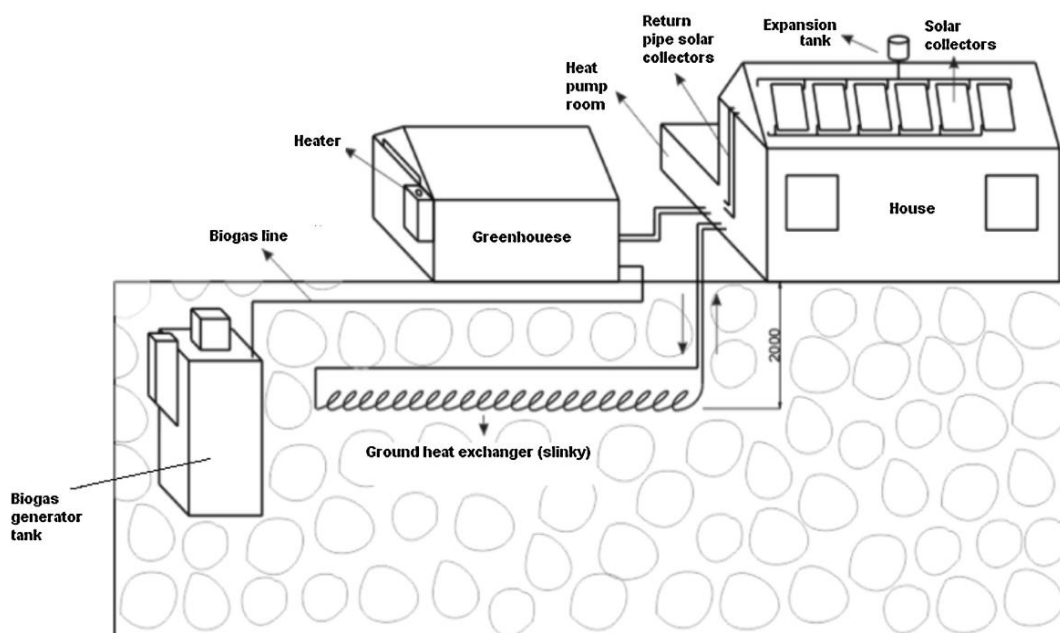


Fig. 1. Schematic representation of the greenhouse heating system.

Εικόνα 33 Σχηματική απεικόνιση ολοκληρωμένου συστήματος θερμοκηπίου με αξιοποίηση γεωθερμικού εναλλάκτη, βιοαερίου και ηλιακών συλλεκτών για την κάλυψη θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων [162].

Η ενεργειακή αυτονομία προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα στο πλαίσιο του Πλέγματος νερού-ενέργειας-τροφίμων. Πρωτίστως, θωρακίζει το σύστημα έναντι διακοπών ρεύματος ή διακυμάνσεων στην τάση του δικτύου, προστατεύοντας την επένδυση και διασφαλίζοντας τη συνέχεια της παραγωγής. Επιπρόσθετα, μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος μακροπρόθεσμα, καθιστώντας την υδροπονική μονάδα περισσότερο ανταγωνιστική σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο οικονομικό περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από αυξανόμενες τιμές ενέργειας. Η ενεργειακή αυτάρκεια συμβάλλει επίσης καθοριστικά στη μείωση του

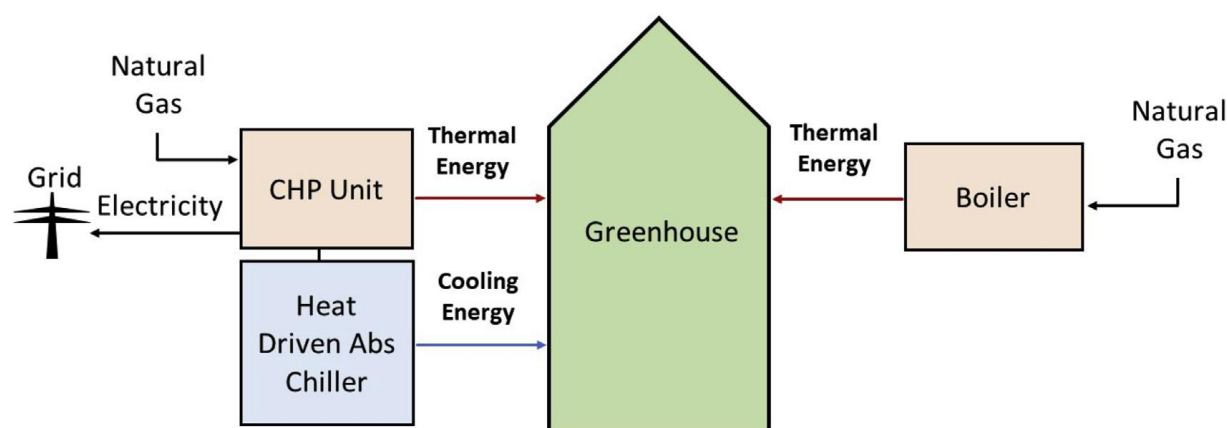
περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής, ιδιαίτερα όταν βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές, ενισχύοντας την αειφορία του συστήματος και τη συμμόρφωση με τους αυξανόμενους περιβαλλοντικούς κανονισμούς [159,160,161].

7.2 Μέθοδοι παραγωγής ενέργειας εντός των εγκαταστάσεων

7.2.1 Συστήματα ΣΗΘΥΑ

Η τεχνολογία Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ) προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην ενεργειακή αυτονομία των υδροπονικών συστημάτων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από την ίδια πρωτογενή πηγή ενέργειας, επιτυγχάνοντας συνολικό βαθμό απόδοσης που μπορεί να υπερβεί το 80%[164], σε αντίθεση με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρισμού που συνήθως χαρακτηρίζεται από αποδόσεις της τάξης του 30-40%[169]. Ένα τυπικό σύστημα ΣΗΘΥΑ αποτελείται από μια μονάδα που παράγει ηλεκτρική ενέργεια (συνήθως γεννήτρια με μηχανή εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλος ή κυσέλη καυσίμου) και εξοπλισμό ανάκτησης θερμότητας που αξιοποιεί την απορριπτόμενη θερμική ενέργεια.

Η γενική δομή ενός συστήματος συμπααραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης αποτυπώνεται σχηματικά στην παρακάτω Εικόνα 34, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη οπτική της ενεργειακής ροής και των εσωτερικών διεργασιών του συστήματος.



Εικόνα 34 Συνδυασμένη λειτουργία συστήματος συμπααραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης (CCHP) [163].

Στο πλαίσιο ενός υδροπονικού θερμοκηπίου, η εφαρμογή της τεχνολογίας ΣΗΘΥΑ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να τροφοδοτήσει τα συστήματα άντλησης, φωτισμού και ελέγχου, ενώ παράλληλα η θερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για τη θέρμανση των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων κατά τους χειμερινούς μήνες και για τη διατήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας στις δεξαμενές του υδροπονικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση γεννητριών παραγωγής ενέργειας από φυσικό αέριο προϋποθέτει την ψύξη του συστήματος με νερό. Το νερό που περνάει μέσα από τα συστήματα ψύξης και ζεσταίνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου, ή ακόμα πιο άμεσα για τη θέρμανση του συστήματος υδροπονίας όπου οι απώλειες ενέργειας θα είναι συνολικά πολύ μικρότερες.

Επιδιώκεται λοιπόν η απώλεια ενέργειας λόγω του συστήματος ψύξης να απορροφηθεί σε μεγάλο ποσοστό άμεσα από το σύστημα υδροπονίας, που με τη σειρά του θα επιφέρει αύξηση στην ανάπτυξη των φυτών. Η διοχέτευση του θερμού νερού από το σύστημα ψύξης μέσα από το δίκτυο σωληνώσεων θέρμανσης του θερμοκηπίου ή απευθείας στις δεξαμενές υδροπονίας, δημιουργεί ένα κλειστό κύκλωμα όπου η θερμική ενέργεια που συμβατικά θα χανόταν κατά την παραγωγή ηλεκτρισμού επαναχρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών

ανάπτυξης των φυτών. Η θερμοκρασία του νερού αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την υγιή ανάπτυξη των φυτών και την αποδοτική απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων, καθιστώντας τη διττή αξιοποίηση της ενέργειας από τα συστήματα ΣΗΘΥΑ ιδιαίτερα ελκυστική για τις υδροπονικές μονάδες.

Η χρήση φυσικού αερίου ως καυσίμου για τη λειτουργία των συστημάτων ΣΗΘΥΑ παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα, καθώς χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αέριων ρύπων. Στην περίπτωση της μονάδας Markatos Hydroponics, η εγγύτητα στον αγωγό φυσικού αερίου προσφέρει μια αξιόπιστη και αποδοτική λύση για την τροφοδοσία ενός συστήματος ΣΗΘΥΑ. Επιπλέον, μέρος του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται κατά την καύση του φυσικού αερίου, μπορεί να διοχετευθεί στο εσωτερικό του θερμοκηπίου για τον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.3.3.1, η αυξημένη συγκέντρωση CO₂ ενισχύει σημαντικά τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών, οδηγώντας σε ταχύτερη ανάπτυξη και αυξημένη παραγωγικότητα. Αυτή η πρακτική μετατρέπει ένα παραπροϊόν που συμβατικά θεωρείται ρύπος σε πολύτιμη εισροή για το παραγωγικό σύστημα, αποτελώντας χαρακτηριστικό παράδειγμα κυκλικής οικονομίας.

Οι σύγχρονες τεχνολογίες ΣΗΘΥΑ περιλαμβάνουν εξελιγμένα συστήματα ελέγχου που βελτιστοποιούν τη λειτουργία της μονάδας ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, εξασφαλίζοντας μέγιστη αποδοτικότητα και ελαχιστοποίηση του κόστους. Η ικανότητα προσαρμογής στις διακυμάνσεις της ζήτησης, τόσο σε ηλεκτρική όσο και σε θερμική ενέργεια, αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τις υδροπονικές μονάδες, όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με την εποχή, τις καιρικές συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης των καλλιεργειών.[162, 163, 164]

Η οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης σε συστήματα ΣΗΘΥΑ εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος της μονάδας, το κόστος του καυσίμου, η διάρκεια λειτουργίας και οι εκάστοτε επιδοτήσεις ή φορολογικά κίνητρα. Με βάση τα τρέχοντα δεδομένα, η περίοδος απόσβεσης για μια εγκατάσταση μεσαίου μεγέθους εκτιμάται μικρότερη της δεκαετίας, καθιστώντας την επένδυση ελκυστική και οικονομικά βιώσιμη για μονάδες με μακροπρόθεσμο σχεδιασμό όπως η Markatos Hydroponics.

7.2.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ αντί για νάilon κάλυψης θερμοκηπίου

Τα εύκαμπτα φωτοβολταϊκά πάνελ (flexible photovoltaic solar panels) αποτελούν μια καινοτόμο λύση για την ενσωμάτωση συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ίδιες τις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις, αντικαθιστώντας μέρος της παραδοσιακής κάλυψης με νάilon. Η τεχνολογία αυτή παρέχει τη δυνατότητα διπλής αξιοποίησης της επιφάνειας του θερμοκηπίου, επιτρέποντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράλληλα με την καλλιέργεια των φυτών.

Τα σύγχρονα εύκαμπτα φωτοβολταϊκά στοιχεία διαθέτουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών άκαμπτων πάνελ. Το μειωμένο βάρος τους επιτρέπει την εγκατάσταση σε ελαφριές κατασκευές όπως τα θερμοκήπια, χωρίς την ανάγκη ενίσχυσης του σκελετού, ενώ η ευκαμψία τους διευκολύνει την προσαρμογή τους στις καμπύλες επιφάνειες των τοξωτών θερμοκηπίων. Η τεχνολογία κατασκευής τους, βασισμένη κυρίως σε λεπτά φιλμ πυριτίου ή πολυμερή υλικά με φωτοβολταϊκές ιδιότητες, παρέχει επίσης τη δυνατότητα επιλεκτικής διαπερατότητας στα διάφορα μήκη κύματος του φωτός, επιτρέποντας τη διέλευση των απαραίτητων για τη φωτοσύνθεση φασμάτων και την απορρόφηση των υπολοίπων για παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η στρατηγική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψη τόσο τις ενεργειακές προοπτικές όσο και

τις απαιτήσεις φωτισμού των καλλιέργειών. Μια βέλτιστη προσέγγιση περιλαμβάνει την κάλυψη μέρους της οροφής, κυρίως στη νότια πλευρά όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι εντονότερη, ενώ διατηρούνται διαφανείς ζώνες που επιτρέπουν την επαρκή διέλευση του φυσικού φωτός. Εναλλακτικά, τα εξελιγμένα ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερες επιφάνειες, καθώς επιτρέπουν τη μερική διέλευση του φωτός.

Κλασσικού τύπου φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στέγες όλων των αποθηκευτικών χώρων και βοηθητικών χώρων, των ψυγείων αλλά και στα πλαϊνά μέρη του θερμοκηπίου. Αυτοί οι χώροι δεν είναι καθόλου αμελητέοι αφού καταλαμβάνουν περίπου το 30% των συνολικών εγκαταστάσεων.

Μελέτες έχουν δείξει ότι ένα σύστημα ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πάνελ που καλύπτει περίπου το 30% της οροφής ενός τυπικού θερμοκηπίου 1 στρέμματος μπορεί να παράγει ετησίως 40-50 MWh ηλεκτρικής ενέργειας, καλύπτοντας σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών της μονάδας [165]. Παράλληλα, η μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους θερινούς μήνες συνεισφέρει στη διατήρηση χαμηλότερων θερμοκρασιών εντός του θερμοκηπίου, μειώνοντας τις ανάγκες ψύξης και την κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμό.

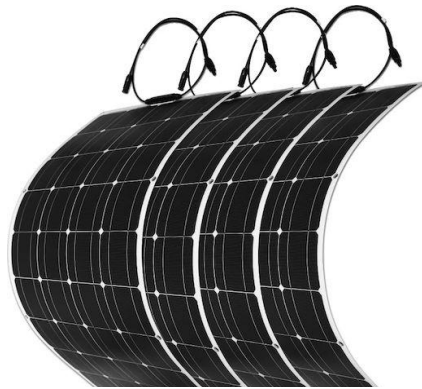
Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων στα θερμοκήπια παρουσιάζει και προκλήσεις που απαιτούν προσεκτική αντιμετώπιση. Η μείωση του διαθέσιμου φωτός μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των καλλιέργειών, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, συνιστάται η εκπόνηση λεπτομερούς μελέτης φωτισμού που θα καθορίσει τη βέλτιστη διάταξη βάσει των συγκεκριμένων απαιτήσεων των καλλιεργούμενων ειδών και των τοπικών κλιματολογικών συνθηκών. Επιπλέον, η επιλογή φωτοβολταϊκών με κατάλληλο φάσμα διαπερατότητας μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις επιπτώσεις στη φωτοσύνθεση των φυτών.

Το αρχικό κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά κάλυψης, αλλά η διαφορά αντισταθμίζεται από τα μακροπρόθεσμα οφέλη της παραγωγής ενέργειας. Με βάση τις τρέχουσες τιμές της αγοράς και τις διαθέσιμες επιδοτήσεις για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ο χρόνος απόσβεσης εκτιμάται στα 5-7 έτη, ενώ η διάρκεια ζωής των συστημάτων υπερβαίνει τα 20 έτη. Συνεπώς, η εφαρμογή φωτοβολταϊκών πάνελ στο θερμοκήπιο αποτελεί μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση με σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, συμβάλλοντας στην ενεργειακή αυτονομία της μονάδας και στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της παραγωγής [166].

Για την πληρέστερη κατανόηση της τεχνολογίας, παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής φωτοβολταϊκών πάνελ σε θερμοκηπιακή κατασκευή, όπου η οροφή λειτουργεί ταυτόχρονα ως επιφάνεια συλλογής ηλιακής ενέργειας και ως φίλτρο φωτός για τις καλλιέργειες (Εικόνα 35, Εικόνα 36).



Εικόνα 36 Εφαρμογή ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πάνελ στην οροφή θερμοκηπίου, για ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και ρύθμιση της ηλιακής ακτινοβολίας [178].



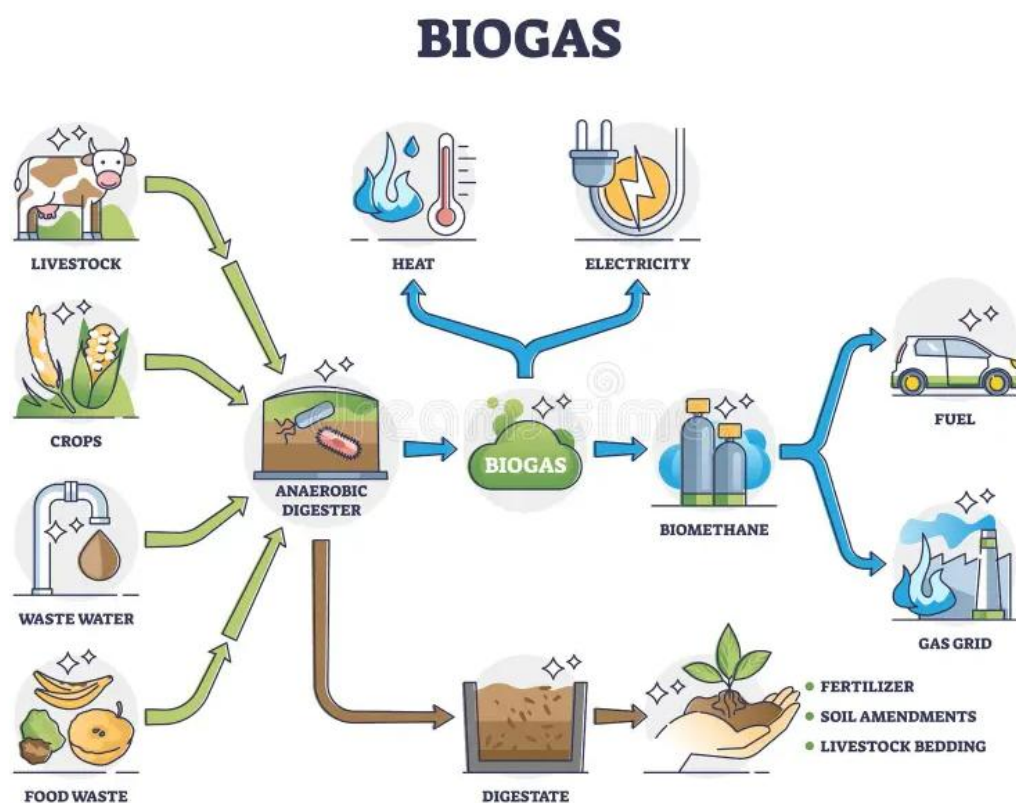
Εικόνα 35 Εύκαμπτο φωτοβολταϊκό πάνελ.

7.2.3 Παραγωγή βιοαερίου

Η παραγωγή βιοαερίου αποτελεί μια αειφόρο προσέγγιση στην ενεργειακή αυτονομία του υδροπονικού συστήματος, αξιοποιώντας οργανικά υπολείμματα και απόβλητα της γύρω περιοχής. Η μέθοδος αυτή εναρμονίζεται πλήρως με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, μετατρέποντας αυτό που θεωρείται συμβατικά ως απόβλητο σε πολύτιμο ενεργειακό πόρο, ενώ παράλληλα μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγικής διαδικασίας.

Η τεχνολογία παραγωγής βιοαερίου βασίζεται στην αναερόβια χώνευση, μια βιολογική διεργασία κατά την οποία μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν οργανικό υλικό απουσία οξυγόνου, παράγοντας ένα μείγμα αερίων που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, ή να αναβαθμιστεί μέσω καθαρισμού σε βιομεθάνιο ποιότητας φυσικού αερίου.

Για την υποστήριξη της ανάλυσης που προηγήθηκε, ακολουθεί μία σχηματική αναπαράσταση (Εικόνα 37) του τρόπου με τον οποίο ενσωματώνεται η παραγωγή βιοαερίου σε ένα κυκλικό αγροδιατροφικό σύστημα, από τη συλλογή των πρώτων υλών έως την τελική αξιοποίησή του.



Εικόνα 37 Σχηματική απεικόνιση της παραγωγής βιοαερίου και των δυνατοτήτων αξιοποίησής του για θέρμανση, ηλεκτροδότηση και λίπανση[167].

Αντίστοιχα με την παραγωγή ενέργειας από φυσικό αέριο, η τεχνολογία του βιοαερίου προσφέρει εξίσου επιπρόσθετα οφέλη αφού ενισχύει περαιτέρω την παραγωγικότητα του υδροπονικού συστήματος αξιοποιώντας το CO_2 που παράγεται κατά την διαδικασία.

Για την περίπτωση της υδροπονικής μονάδας Markatos Hydroponics, μια εγκατάσταση βιοαερίου μικρής κλίμακας θα μπορούσε να αξιοποιήσει διάφορες πηγές οργανικών υλικών όπως τα φυτικά υπολείμματα της ίδιας της μονάδας. Αν και η υδροπονική καλλιέργεια παράγει λιγότερα στερεά απόβλητα συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους, η συστηματική συλλογή

και επεξεργασία τους μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην τροφοδοσία του συστήματος βιοαερίου.

Άλλες πηγές, περιλαμβάνουν οργανικά απόβλητα από γειτονικές αγροτικές και κτηνοτροφικές μονάδες, όπως κοπριά, υπολείμματα σοδειών και αγροτοβιομηχανικά απόβλητα. Η περιοχή των Οινοφύτων, με την έντονη αγροτική δραστηριότητα στον περιβάλλοντα χώρο, προσφέρει σημαντικές δυνατότητες συνεργειών για τη συλλογή και αξιοποίηση τέτοιων υλικών.

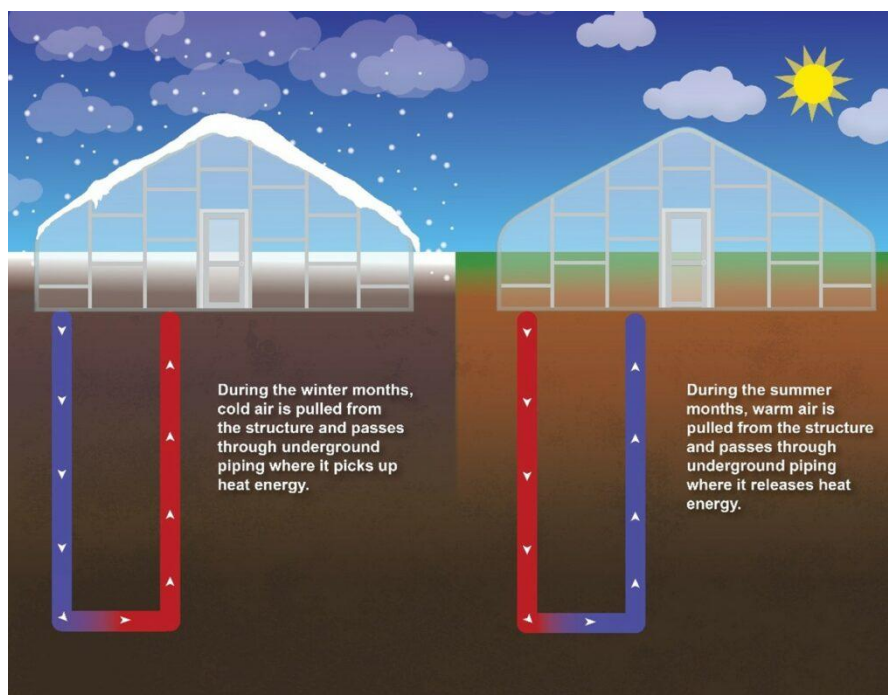
Το μέγεθος της εγκατάστασης βιοαερίου θα πρέπει να σχεδιαστεί ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της οργανικής πρώτης ύλης και τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας. Με βάση τα δεδομένα απόδοσης των σύγχρονων συστημάτων αναερόβιας χώνευσης, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την ποιότητα και σύσταση των οργανικών αποβλήτων, καθώς διαφορετικά υποστρώματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στην παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου. Έτσι, μια μονάδα μεσαίας κλίμακας με δυναμικότητα επεξεργασίας αρκετών τόνων οργανικών αποβλήτων ημερησίως θα μπορούσε να παράγει εκατοντάδες kWh ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλοντας σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου.

Η εγκατάσταση και λειτουργία μιας μονάδας βιοαερίου απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία και αρχική επένδυση, καθώς και συνεχή παρακολούθηση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα ώριμων τεχνολογιών και η αυξανόμενη εμπειρία από παρόμοιες εφαρμογές καθιστούν την επιλογή αυτή εφικτή και οικονομικά βιώσιμη, ιδιαίτερα στο πλαίσιο μιας μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την ενεργειακή αυτονομία της υδροπονικής μονάδας [168,169].

7.2.4 Θέρμανση και ψύξη με γεωθερμία

Τα γεωθερμικά συστήματα αντλιών θερμότητας (Geothermal Heat Pump Systems - GHPs) αποτελούν μια εξαιρετικά αποδοτική τεχνολογία για τη θέρμανση και ψύξη των υδροπονικών θερμοκηπίων, αξιοποιώντας τη σταθερή θερμοκρασία του υπεδάφους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο γεγονός ότι σε βάθος περίπου 3-5 μέτρων, η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σχετικά σταθερή (περίπου 17-18°C στην περιοχή μελέτης), ανεξάρτητα από τις εποχιακές διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας [170].

Η παρακάτω Εικόνα 38 παρουσιάζει σχηματικά τον τρόπο με τον οποίο η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας σε ένα θερμοκήπιο. Ανάλογα με την εποχή, το σύστημα λειτουργεί είτε απορροφώντας θερμότητα από το υπέδαφος για να θερμάνει τον εσωτερικό χώρο (χειμώνα), είτε αποβάλλοντας τη θερμότητα του θερμοκηπίου στο υπέδαφος (καλοκαίρι), διατηρώντας έτσι ένα σταθερό θερμικό περιβάλλον για τις καλλιέργειες.



Εικόνα 38 Ροή θερμικής ενέργειας σε γεωθερμικό σύστημα κατά τη διάρκεια χειμώνα και καλοκαιριού. Πηγή: Marisa Larson, National Center for Appropriate Technology (NCAT). Τροποποιήθηκε για εκπαιδευτική χρήση. (Πρωτότυπος τίτλος: "Flow of Heat Energy in Geothermal System") [171].

7.2.4.1 Αρχή λειτουργίας και τύποι συστημάτων

Ένα τυπικό γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το υπόγειο δίκτυο σωληνώσεων (γεωεναλλάκτης), την αντλία θερμότητας και το σύστημα διανομής εντός του θερμοκηπίου. Ο γεωεναλλάκτης περιλαμβάνει ένα κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων που περιέχει νερό ή διάλυμα νερού-αντιψυκτικού, το οποίο κυκλοφορεί στο υπέδαφος απορροφώντας (χειμώνας) ή αποβάλλοντας (καλοκαίρι) θερμότητα.

Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι γεωθερμικών συστημάτων. Στα κλειστά κυκλώματα, η διαμόρφωση μπορεί να είναι κατακόρυφη, οριζόντια ή σπειροειδής. Τα κατακόρυφα συστήματα περιλαμβάνουν γεωτρήσεις βάθους 50-150 μέτρων, όπου τοποθετούνται ζεύγη σωλήνων σε σχήμα U, προσφέροντας υψηλή απόδοση και σταθερότητα λόγω του μεγάλου βάθους, αλλά με υψηλότερο κόστος εγκατάστασης. Στα οριζόντια συστήματα, οι σωληνώσεις τοποθετούνται σε οριζόντια διάταξη σε βάθος 1,5-3 μέτρων, απαιτώντας μεγαλύτερη επιφάνεια εδάφους αλλά με χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Τα σπειροειδή συστήματα (Slinky) αποτελούν παραλλαγή των οριζόντιων συστημάτων, όπου οι σωλήνες τοποθετούνται σε σπειροειδή διάταξη, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε μικρότερη έκταση[172, 173].

Τα ανοικτά κυκλώματα λειτουργούν διαφορετικά, καθώς αντλούν υπόγειο νερό από γεώτρηση, το χρησιμοποιούν για την ανταλλαγή θερμότητας και στη συνέχεια το επανεισάγουν στον υδροφόρο ορίζοντα μέσω δεύτερης γεώτρησης. Προσφέρουν υψηλή απόδοση αλλά απαιτούν επαρκείς υδάτινους πόρους και ειδικές άδειες [174].

7.2.4.2 Εφαρμογή στα υδροπονικά συστήματα

Στο πλαίσιο ενός υδροπονικού θερμοκηπίου, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Η θέρμανση χώρου αποτελεί την πιο προφανή εφαρμογή, όπου το ζεστό νερό που παράγεται από την αντλία θερμότητας κυκλοφορεί μέσω σωληνώσεων ενδοδαπέδιας θέρμανσης ή μέσω αερόθερμων μονάδων fan-coil, διατηρώντας τη βέλτιστη θερμοκρασία για την ανάπτυξη των φυτών κατά τους χειμερινούς μήνες. Επίσης, η θέρμανση του νερού υδροπονίας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την υγιή ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, καθώς η θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος επηρεάζει άμεσα την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων. Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία του νερού στις δεξαμενές και στο σύστημα κυκλοφορίας, βελτιστοποιώντας τις συνθήκες ανάπτυξης.

Η ψύξη αποτελεί εξίσου σημαντική λειτουργία, ιδιαίτερα σε μεσογειακά κλίματα όπως της Ελλάδας, όπου οι υψηλές θερινές θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την καλλιέργεια. Κατά τους θερινούς μήνες, το γεωθερμικό σύστημα λειτουργεί αντίστροφα, απάγοντας θερμότητα από το θερμοκήπιο και διοχετεύοντάς την στο υπέδαφος. Το ψυχρό νερό που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δροσισμό μέσω fan-coil ή συστημάτων υδρονέφωσης, διατηρώντας τη θερμοκρασία εντός των βέλτιστων ορίων ακόμα και κατά τις περιόδους καύσωνα. Επιπλέον, η αφύγρανση του αέρα είναι μια πρόσθετη λειτουργία που μπορεί να επιτευχθεί με τα γεωθερμικά συστήματα, καθώς η ψύξη του αέρα κάτω από το σημείο δρόσου οδηγεί στη συμπύκνωση της υγρασίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τον έλεγχο των συνθηκών υγρασίας εντός του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην πρόληψη μυκητιακών ασθενειών [175].

7.2.4.3 Ενεργειακή απόδοση και οικονομικά οφέλη

Τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση, με συντελεστή απόδοσης (COP - Coefficient of Performance) που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 4 και 5, γεγονός που σημαίνει ότι για κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται, παράγονται 4-5 μονάδες θερμικής ή ψυκτικής ενέργειας. Αυτό αντιπροσωπεύει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 70-80% συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Η σταθερότητα της θερμοκρασίας του υπεδάφους εξασφαλίζει σταθερή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, σε αντίθεση με τις αερόψυκτες αντλίες θερμότητας που επηρεάζονται σημαντικά από τις διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας [176, 177].

Στην περίπτωση της μονάδας μελέτης Markatos Hydroponics, η εφαρμογή γεωθερμικού συστήματος θα πρέπει να σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και τις ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης. Με βάση τη διαθέσιμη έκταση γύρω από το θερμοκήπιο, θα μπορούσε να εξεταστεί η εγκατάσταση οριζόντιου συστήματος, το οποίο παρουσιάζει χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης συγκριτικά με το κατακόρυφο σύστημα. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να εξεταστεί η εγκατάσταση κατακόρυφου συστήματος, το οποίο απαιτεί μικρότερη επιφάνεια αλλά υψηλότερο αρχικό κόστος λόγω των γεωτρήσεων. Είτε η χρήση της μεθόδου ανοικτού κυκλώματος χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα γεώτρηση.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή γεωθερμικών συστημάτων για θέρμανση και ψύξη σε υδροπονικές μονάδες αποτελεί μια τεχνολογικά ώριμη, ενεργειακά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική λύση, που συμβάλλει καθοριστικά στην ενεργειακή αυτονομία και τη βιωσιμότητα του συστήματος. Η ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων στο σχεδιασμό νέων

μονάδων ή στον εκσυγχρονισμό υφιστάμενων, αντικατοπτρίζει τη σύγχρονη τάση προς πιο αειφόρες μεθόδους παραγωγής τροφίμων, εναρμονισμένες με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της περιβαλλοντικής υπευθυνότητας.

7.2.5 Παραγωγή θερμού νερού με την απλή μέθοδο σωλήνων PVC

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση του νερού που χρησιμοποιείται στις υδροπονικές καλλιέργειες αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά βιώσιμη προσέγγιση. Στη μονάδα Markatos Hydroponics εφαρμόζεται ένα απλό αλλά αποτελεσματικό σύστημα παθητικής ηλιακής θέρμανσης νερού, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα χαμηλού κόστους παρέμβασης με σημαντικά ενεργειακά οφέλη.

Το σύστημα αποτελείται από δίκτυο μαύρων σωλήνων PVC μικρής διαμέτρου (Φ10), στρατηγικά τοποθετημένων στον κορφιά κάθε τολ του θερμοκηπίου, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη. Οι σωλήνες διατάσσονται οριζόντια σε παράλληλη διάταξη, επαπτόμενοι μεταξύ τους, καλύπτοντας συνολικό πλάτος περίπου 30 εκατοστών. Αυτή η συμπαγής διάταξη μεγιστοποιεί την επιφάνεια έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, βελτιστοποιώντας τη θερμική απόδοση.

Στην παρακάτω Εικόνα 39 αποτυπώνεται τμήμα της εφαρμογής του εν λόγω συστήματος στη μονάδα, όπου διακρίνονται οι σωλήνες PVC στον κορφιά του θερμοκηπίου, όπως περιγράφονται παραπάνω.



Εικόνα 39 Θερμοκηπιακή εφαρμογή θέρμανσης νερού με σωλήνες PVC, τοποθετημένους στον κορφιά της κατασκευής για μεγιστοποίηση της απορρόφησης ηλιακής ενέργειας (μονάδα Markatos Hydroponics).

Η λειτουργία του συστήματος ενσωματώνεται πλήρως στο υφιστάμενο κύκλωμα άρδευσης της μονάδας. Το νερό από την κεντρική παροχή διοχετεύεται μέσω αντλίας στο δίκτυο των σωλήνων στον κορφιά του θερμοκηπίου, όπου κατά τη διέλευσή του απορροφά θερμική ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία. Στη συνέχεια, το προθερμασμένο πλέον νερό επιστρέφει στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας των λιμνοδεξαμενών υδροπονίας, μεταφέροντας τη θερμική ενέργεια απευθείας στο καλλιεργητικό σύστημα.

Η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες, με τη μέγιστη απόδοση να επιτυγχάνεται κατά τις ηλιόλουστες ημέρες, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς, φθινοπωρινούς και εαρινούς μήνες όταν η θέρμανση του νερού είναι περισσότερο επιθυμητή χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης. Σύμφωνα με μετρήσεις στη μονάδα Markatos Hydroponics, το σύστημα μπορεί να επιτύχει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού κατά 4-7°C σε σχέση με την αρχική θερμοκρασία κατά τις ώρες υψηλής ηλιοφάνειας, συμβάλλοντας σημαντικά στη διατήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας στο περιβάλλον της ρίζας των φυτών.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνουν:

- Εξαιρετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης συγκριτικά με άλλα συστήματα θέρμανσης νερού
- Σχεδόν μηδενικό λειτουργικό κόστος, καθώς αξιοποιείται αποκλειστικά η ηλιακή ενέργεια και οι υπάρχουσες αντλίες
- Απλότητα κατασκευής και ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
- Εύκολη ενσωμάτωση σε υφιστάμενα συστήματα άρδευσης
- Μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη λειτουργία

Οι περιορισμοί του συστήματος σχετίζονται κυρίως με την εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες και την αδυναμία αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας για χρήση κατά τις νυχτερινές ώρες ή τις συννεφιασμένες ημέρες. Επιπλέον, η θερμική απόδοση είναι σημαντικά χαμηλότερη συγκριτικά με τα εξειδικευμένα ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούν επιλεκτικούς απορροφητές και μόνωση, αλλά το κόστος εγκατάστασης των τελευταίων είναι πολλαπλάσιο.

Η εφαρμογή αυτού του απλού συστήματος στη μονάδα Markatos Hydroponics αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πρακτικής λύσης χαμηλής τεχνολογίας που συμβάλλει στην ενεργειακή αποδοτικότητα, αποδεικνύοντας ότι ακόμα και οι απλούστερες παρεμβάσεις μπορούν να έχουν ουσιαστική συμβολή στη λειτουργική αειφορία των υδροπονικών συστημάτων. Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να συμπληρωθεί με πιο προηγμένες τεχνολογίες για μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, όπως η προσθήκη συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας ή η ενσωμάτωση αυτοματισμών για τη βελτιστοποίηση της ροής του νερού ανάλογα με τις συνθήκες ηλιοφάνειας [178].

Το σύστημα βέβαια επιδέχεται πολλές τροποποιήσεις, μετατροπές και βελτιώσεις. Αξιόλογη παρέμβαση θα αποτελούσε η επέκταση του συστήματος με την τοποθέτηση λεπτών μαύρων σωλήνων PVC ανάλογης διάταξης στα πλαϊνά μέρη του θερμοκηπίου ή σε άλλα σημεία των εγκαταστάσεων με σημαντική ηλιακή έκθεση. Αυτή η διάταξη θα μπορούσε να αξιοποιήσει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε διαφορετικές γωνίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, αυξάνοντας το συνολικό χρόνο αποτελεσματικής λειτουργίας του συστήματος χωρίς να δεσμεύει παραγωγικό χώρο.

Περαιτέρω βελτίωση θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αισθητήρων θερμοκρασίας και αυτοματισμών που ρυθμίζουν τη ροή του νερού ανάλογα με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό θα επέτρεπε τη βελτιστοποίηση της απορρόφησης θερμικής ενέργειας και την αποφυγή υπερθέρμανσης του νερού κατά τις περιόδους έντονης ηλιοφάνειας.

Η απλότητα και η οικονομική αποδοτικότητα αυτής της μεθόδου την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για μικρές και μεσαίες υδροπονικές μονάδες, ενώ παράλληλα αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της φιλοσοφίας "χαμηλής τεχνολογίας - υψηλής επίδρασης" (low-tech, high-impact) που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία των συστημάτων υδροπονίας. Η εμπειρία από την εφαρμογή του συστήματος στη μονάδα Markatos Hydroponics καταδεικνύει ότι ακόμα και οι απλούστερες παρεμβάσεις, όταν σχεδιάζονται με γνώμονα τις τοπικές συνθήκες και τις συγκεκριμένες ανάγκες της καλλιέργειας, μπορούν να αποφέρουν ουσιαστικά οφέλη στο πλαίσιο του Πλέγματος νερού-ενέργειας-τροφίμων.

7.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων αποτελεί μια στρατηγική επιλογή για την ενεργειακή αυτονομία αγροτικών μονάδων, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια όπως η Βοιωτία. Σε αντίθεση με τις εναλλακτικές τεχνολογίες που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μοναδικά πλεονεκτήματα όπως η αθόρυβη λειτουργία, η μηδενική εκπομπή ρύπων κατά τη λειτουργία, η ελάχιστη απαίτηση συντήρησης και η δυνατότητα κλιμακωτής εγκατάστασης ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες.

Ανάλυση των δεδομένων από φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε γειτονική περιοχή παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την αναμενόμενη απόδοση αντίστοιχων συστημάτων στην περιοχή της μονάδας Markatos Hydroponics. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση, για την οποία διατίθενται ωριαίες μετρήσεις παραγωγής από το 2012, αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη του τοπικού ηλιακού δυναμικού και της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών στην περιοχή.

Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι η μέση ετήσια παραγωγή ανέρχεται σε περίπου 187 MWh ανά στρέμμα εγκατάστασης PV, απόδοση ιδιαίτερα ικανοποιητική που κατατάσσει την περιοχή μεταξύ των πλέον ευνοϊκών για φωτοβολταϊκές εφαρμογές στην Ελλάδα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εποχική κατανομή της παραγωγής, με τα υψηλότερα επίπεδα να καταγράφονται κατά τους μήνες Απρίλιο-Σεπτέμβριο, περίοδος που συμπίπτει με την αυξημένη ζήτηση ενέργειας για ψύξη και άντληση νερού στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις υδροπονίας. Αυτή η συσχέτιση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ενισχύει περαιτέρω την καταλληλότητα της επιλογής των φωτοβολταϊκών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της υδροπονικής μονάδας.

8 Επίλυση του Πλέγματος στην υδροπονική μονάδα Markatos

8.1 Μεθοδολογία

Η παρούσα μελέτη ανέλυσε τις αρχές του Πλέγματος (Νερού- Ενέργειας- Τροφίμων) εντός της θερμοκηπιακής μονάδας Markatos Hydroponics ΘΜΥ (Θερμοκηπιακή Μονάδα Υδροπονίας) για την παραγωγή μαρουλιού στην Κεντρική Ελλάδα, τυποποιώντας όλες τις μετρήσεις σε βάση ανά εκτάριο (per-hectare) για λόγους επεκτασιμότητας. Χρησιμοποιήθηκε μια συστηματική προσέγγιση για την αξιολόγηση της δυναμικής των πόρων και την πρόταση βελτιστοποίησης τους, όπως περιγράφεται παρακάτω:

1. Συλλογή Δεδομένων (1 Ιαν. – 31 Δεκ. 2024, 365 ημέρες): Καθημερινά λειτουργικά δεδομένα από τη ΘΜΥ συλλέχθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του 2024, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης νερού (π.χ. όγκοι θρεπτικού διαλύματος), της χρήσης ενέργειας (π.χ. φωτισμός, έλεγχος κλίματος) και της παραγωγής τροφίμων (π.χ. αποδόσεις καλλιεργειών σε τόνους) [179]. Αυτές οι μετρήσεις παρείχαν μια βάση για τις ροές πόρων της ΘΜΥ εντός του Πλέγματος.
2. Απόκτηση Περιβαλλοντικών Δεδομένων: Τοπικά κλιματικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας αέρα και των κατακρημνίσεων, λήφθηκαν από έναν κοντινό μετεωρολογικό σταθμό σε καθημερινή ανάλυση. Αυτά τα δεδομένα πλαισίωσαν τις περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις της ΘΜΥ.
3. Αξιολόγηση Αναγκών Ψύξης: Τα δεδομένα θερμοκρασίας αέρα συσχετίστηκαν με τις απαιτήσεις ψύξης (χρήσης πάνελ δροσισμού) της ΘΜΥ. Αυτή η χαρτογράφηση ποσοτικοποίησε τις ενεργειακές απαιτήσεις για τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών.
4. Ανάλυση Ζήτησης Νερού: Τα καθημερινά δεδομένα κατακρημνίσεων συγκρίθηκαν με την κατανάλωση νερού της μονάδας. Υποθέτοντας μια επιφάνεια συλλογής όμβριων υδάτων επαρκή για την κάλυψη των βασικών αναγκών σε νερό, λήφθηκε υπόψη ο διαλείπων χαρακτήρας της βροχόπτωσης. Για τη ρύθμιση της ροής του νερού στη ΘΜΥ, ένα μοντέλο προσομοίωσης ταμιευτήρα καθόρισε τη λειτουργία της βέλτιστης χωρητικότητας αποθήκευσης για να αντισταθμίσει εν μέρει τις απαιτήσεις της μονάδας, βελτιώνοντας τη διάρκεια της διαθεσιμότητας του νερού και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα στις ημέρες χωρίς κατακρημνίσεις.
5. Αξιολόγηση Ενεργειακής Τροφοδοσίας: Για τη διατήρηση πολλαπλών λειτουργιών (κυκλοφορία νερού, ψύξη κ.λπ.), η ΘΜΥ είναι καταναλωτής ενέργειας. Τα δεδομένα παραγωγής ενέργειας από ένα τοπικό φωτοβολταϊκό (PV) πάρκο συγκρίθηκαν με τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας. Ένα σενάριο μοντελοποίησε μερική κάλυψη της οροφής του θερμοκηπίου με φωτοβολταϊκά πάνελ, αξιολογώντας τις δυνατότητές τους να καλύψουν τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ανθεκτικότητα στις εισροές ενέργειας.
6. Τυποποίηση βάσει Ενέργειας: Η παραγωγή τροφίμων μετατράπηκε σε μονάδες ενέργειας (kcal) για την ποσοτικοποίηση της θρεπτικής παραγωγής. Όλες οι εισροές και εκροές πόρων – ενέργεια (ηλεκτρική ενέργεια, θέρμανση), λιπάσματα, νερό και τρόφιμα – εκφράστηκαν σε μονάδες ενέργειας (MJ) για μια ολοκληρωμένη ανάλυση εντός του πλαισίου του Πλέγματος WEF. Σε αυτό το πλαίσιο, υποθέτουμε ότι η κύρια πηγή νερού είναι μια μονάδα αφαλάτωσης, η οποία καταναλώνει πολλή ενέργεια ανά m^3 για την αφαλάτωση του νερού και μετατρέπουμε το νερό σε ενεργειακές μονάδες.

7. Δείκτες Αξιολόγησης: Η αξιολόγηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν, επικεντρώθηκε στη σύγκριση των δεικτών ενεργειακής απόδοσης (Net Energy Gain, Energy Ratio) για τη ΘΜΥ με και χωρίς την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ.

Το Energy Ratio (ER) είναι η ενέργεια που κερδίζουμε από την παραγόμενη καλλιέργεια προς την ενέργεια που παρέχεται στην καλλιέργεια κατά την διαδικασία παραγωγής.

Υπολογίζεται από την εξίσωση 1:

$$ER = \frac{\text{Output Energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Input Energy (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

Το Net Energy Gain (NEG) (σε MJ/ha) είναι η ενέργεια που κερδίζουμε από την παραγόμενη καλλιέργεια που περιέχεται στα τρόφιμα μείον την ενέργεια που καταναλώθηκε.

Υπολογίζεται από την εξίσωση 2:

$$NEG = \text{Output Energy (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{Input Energy (MJ ha}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Ανθεκτικότητα (R): Αξιολογήθηκε ως το ποσοστό των ημερών που το σύστημα καλύπτει τις ανάγκες σε νερό και ενέργεια χωρίς εξωτερικές εισροές.

Υπολογίζεται από την εξίσωση 3:

$$R = \frac{D_{met}}{D_{total}} \times 100 \quad (3)$$

όπου D_{met} είναι οι ημέρες με επαρκείς πόρους και D_{total} είναι οι συνολικές ημέρες της μελετώμενης περιόδου (ένα έτος, 365 ημέρες).

Η ΘΜΥ αναβαθμίστηκε θεωρητικά με τεχνικές λύσεις για τη βελτιστοποίηση της ανθεκτικότητας R, μοντελοποιώντας:

- ο Νερό: μια περιοχή συλλογής για κατακρημνίσεις και έναν ταμιευτήρα συλλογής όμβριων υδάτων.
- ο Ενέργεια: φωτοβολταϊκά πάνελ με δυναμική αποθήκευσης μπαταριών.

Δεδομένου του μη ανανεώσιμου χαρακτήρα των υπόγειων υδάτων – που αποδίδεται στην υπεράντληση που ξεπερνά τους φυσικούς ρυθμούς αναπλήρωσης – η παροχή νερού μοντελοποιήθηκε ως προερχόμενη από αφαλάτωση, ευθυγραμμισμένη με βιώσιμες πρακτικές σε περιβάλλοντα με έλλειψη νερού. Για την κάλυψη αυτών των συνδυασμένων αναγκών – λειτουργική ενέργεια συν αφαλάτωση – υπολογίστηκε μια αναθεωρημένη χωρητικότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, διασφαλίζοντας επαρκή παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας για την αντιστάθμιση τόσο των βασικών όσο και των πρόσθετων φορτίων.

8.2 Δεδομένα και υπολογισμοί

Η θερμοκηπιακή μονάδα υδροπονίας στα Οινόφυτα έκτασης 1.4 ha, στην Κεντρική Ελλάδα, λειτουργεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 σε μια ημιάνυδρη περιοχή με ετήσιες βροχοπτώσεις 450-500 mm και υψηλές καλοκαιρινές θερμοκρασίες, δημιουργώντας προκλήσεις για τη διαχείριση νερού και ενέργειας. Η εγγύτητά της στον ποταμό Ασωπό και σε έναν αγωγό φυσικού αερίου παρέχει πρόσβαση σε πόρους, αλλά η εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων απαιτεί βιώσιμες στρατηγικές προμήθειας νερού, όπως η αφαλάτωση ή η συλλογή όμβριων υδάτων.

- **Διαχείριση Νερού:** Η μονάδα Markatos Hydroponics καταναλώνει περίπου 13,725 m³ (9,804 m³/ha) νερού ετησίως για διαλύματα θρεπτικών ουσιών και 5,560 m³ (3,970 m³/ha) για τα πάνελ ψύξης.
- **Κατανάλωση Ενέργειας:** Οι λειτουργικές ενεργειακές ανάγκες είναι 125,000 kWh (89,300 kWh/ha) και οφείλονται στον φωτισμό, τον έλεγχο κλίματος, την άντληση νερού από υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και την κυκλοφορία του νερού. Η σημερινή εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου αναδεικνύει την ανάγκη για ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών.
- **Λιπάσματα ως Ενέργεια:** Η παραγωγή λιπασμάτων είναι μια διαδικασία υψηλής ενεργειακής έντασης. Οι Kirkmalis et al. [180] υποστήριξαν ότι τα λιπάσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως αποθήκευση ενέργειας. Ως εκ τούτου, τα λιπάσματα θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως πρόσθετη πηγή ενέργειας και, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της παραγωγής τους, εκτιμώνται ως ισοδύναμα με 74,531 MJ (53,235 MJ/ha) ενέργειας.
- **Παραγωγή Τροφίμων:** Η εγκατάσταση παράγει μαρούλια, μια καλλιέργεια υψηλής απόδοσης, με ελάχιστη χρήση γης, επιτυγχάνοντας ρυθμό παραγωγικότητας περίπου 300 τόνους/ha/έτος.

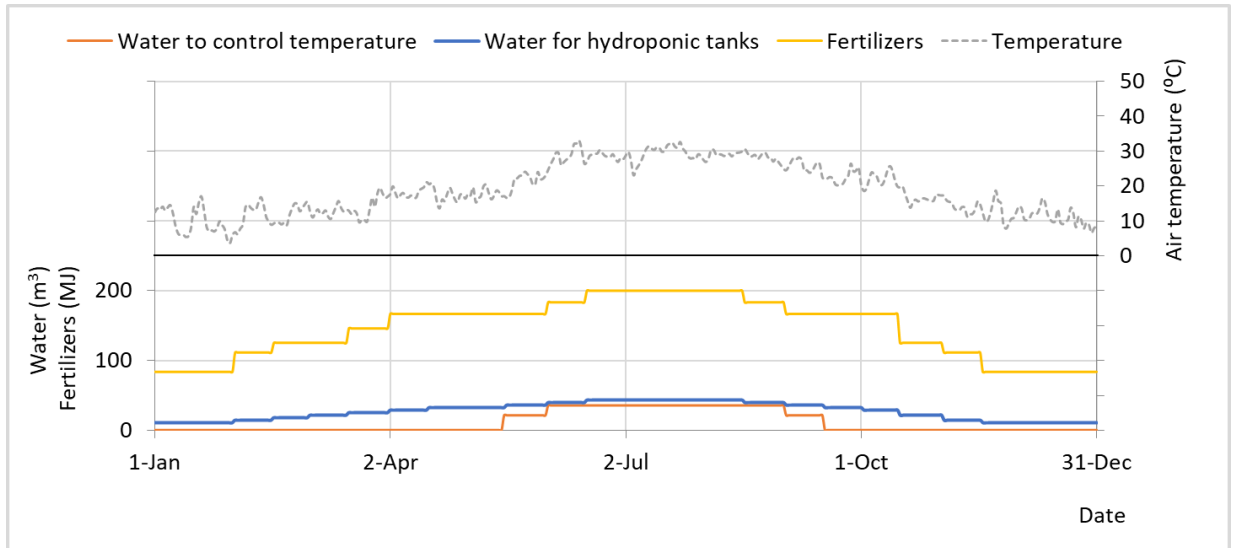
Για να επιτύχει την αυτάρκεια, η μονάδα πρέπει να ελαχιστοποιήσει την εξάρτηση από εξωτερικούς πόρους. Οι ακόλουθες λύσεις αφορούν την αποδοτικότητα του νερού, την ενεργειακή αυτονομία και την παραγωγικότητα τροφίμων εντός του πλαισίου του Πλέγματος WEF.

8.2.1 Νερό

Η κατανάλωση νερού (13,725 m³/ha) αφορά δύο κύριες λειτουργίες:

- Νερό για τις δεξαμενές υδροπονίας (9,805 m³/ha)
- Νερό για τα πάνελ ψύξης (3,970 m³/ha)

Η Εικόνα 40 απεικονίζει τις εισροές νερού και λιπασμάτων μαζί με τη θερμοκρασία του αέρα για την περιοχή της μελέτης περίπτωσης το 2024. Το επάνω μέρος του διαγράμματος παρουσιάζει το ετήσιο προφίλ θερμοκρασίας, αναδεικνύοντας τις εποχιακές διακυμάνσεις. Το κάτω μέρος απεικονίζει τα προφίλ κατανάλωσης νερού για τις δεξαμενές υδροπονίας και τα συστήματα ψύξης. Είναι αξιοσημείωτο ότι η ζήτηση νερού για ψύξη συσχετίζεται με ημέρες αυξημένων θερμοκρασιών, αντανακλώντας τις αυξημένες ανάγκες εξατμιζόμενου νερού για ψύξη. Επιπλέον, το διάγραμμα αποτυπώνει την κατανάλωση λιπασμάτων (εκφρασμένη σε MJ), η οποία παρουσιάζει σαφή συσχέτιση με τη χρήση νερού στις δεξαμενές υδροπονίας, υπογραμμίζοντας τις αλληλεξαρτήσεις εντός του Πλέγματος WEF.



Εικόνα 40 Η κατανάλωση νερού και λιπασμάτων (σε ημερήσια βάση) και η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια του 2024.

Οι κατακρημνίσεις στην περιοχή είναι 450-500 mm ετησίως [181] (Εικόνα 41). Για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στο νερό, για μια μονάδα με έκταση 1 ha, χρειαζόμαστε περισσότερα από 3 ha για τη συλλογή νερού από βροχή (περίπου 13,630 m³) ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό [182-186]. Ωστόσο, χωρίς δεξαμενή για τη ρύθμιση της ροής του νερού, μόνο τα 880 m³ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Με μια δεξαμενή εξισορρόπησης για τη ροή του νερού χωρητικότητας 1000 m³, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν 4,234 m³ (Εικόνα 41), μειώνοντας την εξωτερική χρήση νερού κατά 31%.

Προκειμένου να περιγράψουμε τη λειτουργία της δεξαμενής, χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο, θεωρώντας ότι η κατανάλωση νερού εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της αποθήκευσης [187]. Η διαδικασία περιγράφεται στις εξισώσεις 4 και 5.

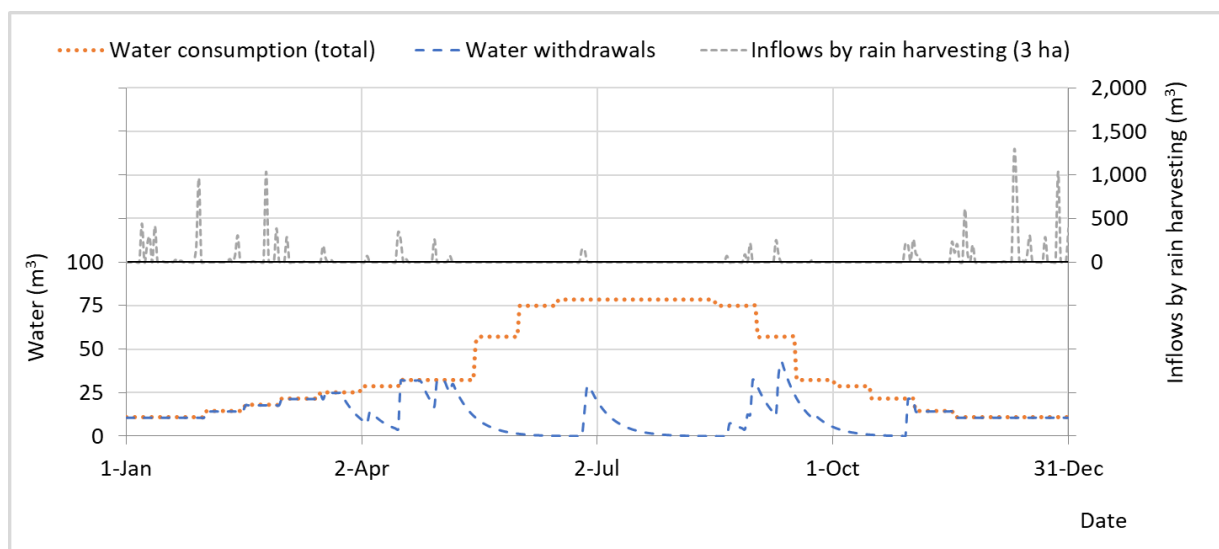
$$\underline{S}_T = \max(0, \min(K, \underline{S}_{T-1} + \underline{x}_T - \underline{R}_T)) \quad (4)$$

$$\underline{R}_T = a\underline{S}_{T-1} \quad (5)$$

όπου:

- T είναι ο χρόνος.
- S_T είναι το απόθεμα στην δεξαμενή τη χρονική στιγμή t .
- x_T είναι η εισροή (inflow) τη χρονική στιγμή t .
- R_T είναι η απόληψη (withdrawal), η οποία θεωρείται ανάλογη του αποθέματος.
- a είναι μια σταθερά που καθορίζει το ποσοστό της απόληψης.
- K είναι η χωρητικότητα αποθήκευσης.

Σύμφωνα με την εξίσωση 3, η Ανθεκτικότητα (R) εκτιμάται στο 13% με συλλογή βρόχινου νερού από 3 ha, η οποία αυξάνεται στο 43% με συλλογή βρόχινου νερού και δεξαμενή 1000m³. Δεδομένου ότι το προφίλ ζήτησης νερού δεν συσχετίζεται με τη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων (δηλαδή τις βροχοπτώσεις), η επίτευξη κάλυψης 100% των αναγκών οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλες και προφανώς μη εφικτές υποδομές.



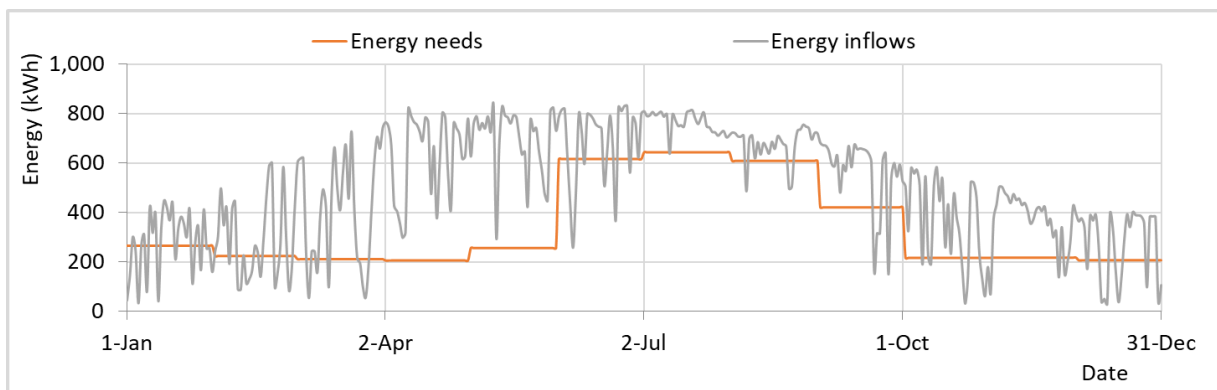
Εικόνα 41 Εισροές νερού από συλλογή βροχής (3 ha), απολήψεις νερού από δεξαμενή 1000 m³ και συνολική κατανάλωση νερού (σε ημερήσια βάση).

8.2.2 Ενέργεια

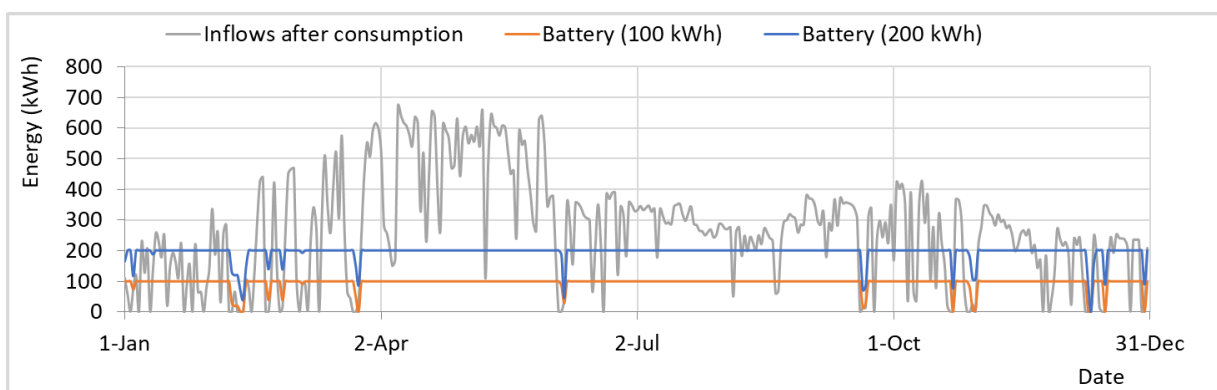
Η υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού καταναλώνει συνήθως σημαντική ποσότητα ενέργειας, ανάλογα με τον τύπο του υδροπονικού συστήματος – αν είναι εσωτερικού χώρου, θερμοκηπίου ή εξωτερικού χώρου – καθώς και το επίπεδο αυτοματισμού, φωτισμού και ελέγχου κλίματος που χρησιμοποιείται. Οι ενεργειακές ανάγκες της υδροπονικής καλλιέργειας της μελέτης περίπτωσης καλύπτονται από το δίκτυο (89.3 MWh/ha ανά έτος).

Εύκαμπτα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να αντικαταστήσουν τις νάιλον καλύψεις, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια ενώ επιτρέπουν τη διείσδυση φωτός για τη φωτοσύνθεση. Σύμφωνα με δεδομένα από ένα υπάρχον φωτοβολταϊκό πάρκο στην περιοχή [188], η κάλυψη του 10% της οροφής ενός θερμοκηπίου 1 εκταρίου με ημι-διαφανή φωτοβολταϊκά ονομαστικής ισχύος ~150 kWp, παράγει 183 MWh ετησίως, καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες της ΘΜΥ. Σημαντικό είναι ότι το προφίλ παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά πάνελ συγχρονίζεται με τις ημερήσιες ανάγκες (καθώς η κατανάλωση συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ημέρας), ενώ δεν προσαρμόζεται στο προφίλ κατανάλωσης για 40 ημέρες (Εικόνα 42, η γκρι γραμμή – εισροές από φωτοβολταϊκά – είναι κάτω από την πορτοκαλί γραμμή – ανάγκες για 40 ημέρες). Η εξίσωση 3 δείχνει ότι η Ανθεκτικότητα (R) είναι ίση με 90.

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 4, 5, λαμβάνοντας υπόψη ότι η δεξαμενή είναι η μπαταρία των 100 kWh και οι εισροές είναι η ενέργεια, οι ανάγκες δεν καλύπτονται για περίπου 8 ημέρες (η εξίσωση 3 δείχνει ότι η Ανθεκτικότητα (R) είναι ίση με 97), και για να είναι ένα πλήρως αξιόπιστο σύστημα (η εξίσωση 3 δείχνει ότι το R πρέπει να είναι ίσο με 100), θα χρειαζόταν μια μπαταρία 200 kWh. Χωρίς μπαταρίες, η μη χρησιμοποιούμενη ενέργεια θα είναι 183 MWh (παραγωγή) – 89,3 MWh (κατανάλωση) ίση με 93,7 MWh, και για τη ρύθμιση της κατανάλωσης σε μπαταρίες 100 kWh και 200 kWh, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν 2385 kWh και 2948 kWh ετησίως αντίστοιχα (Εικόνα 43).



Εικόνα 42 Τα προφίλ της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά PVs (0.1 ha) και των ενεργειακών αναγκών της υδροπονικής καλλιέργειας (1 ha) (σε ημερήσια βάση).

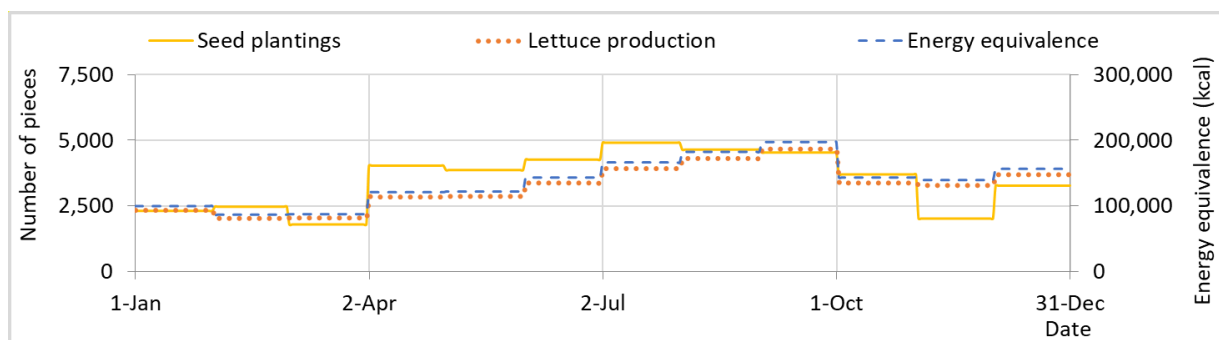


Εικόνα 43 Η ανεκμετάλλευτη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και η χρήση μπαταριών με αποθηκευτικό χώρο 100 kWh και 200 kWh (σε ημερήσια βάση).

8.2.3 Τρόφιμα

Η παραγωγή εξαρτάται από την εποχή, επομένως η παραγόμενη ποσότητα ποικίλλει στη διάρκεια του έτους. Το τυπικό προϊόν είναι ένα μαρούλι με βάρος 0.25 kg/τεμάχιο, το οποίο περιέχει 42 kcal ή 0.18 MJ ενέργειας [189].

Η Εικόνα 44 παρουσιάζει την εξέλιξη της ανάπτυξης και της απόδοσης της καλλιέργειας με την πάροδο του χρόνου, παράλληλα με την αντίστοιχη παραγωγή εκφρασμένη σε ενεργειακές μονάδες (kcal). Αυτή η οπτικοποίηση αναδεικνύει την ενέργεια που ενσωματώνεται στα τρόφιμα που παράγονται, αντισταθμίζοντας την παραγωγικότητα της ΘΜΥ εντός του πλαισίου του Πλέγματος.

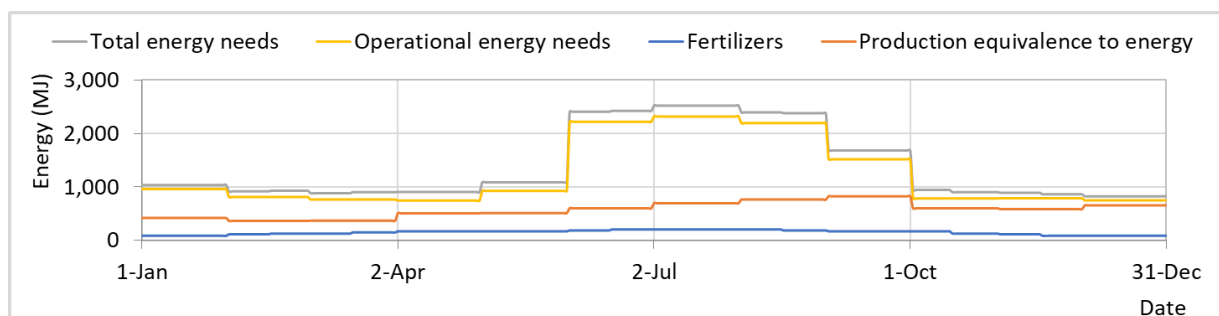


Εικόνα 44 Ο αριθμός των σπόρων που χρησιμοποιήθηκαν και των μαρουλιών που παράχθηκαν από την υδροπονική μονάδα σε τεμάχια και η ισοδυναμία τους σε ενέργεια (σε ημερήσια βάση).

8.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Η μέση ενέργεια που απαιτείται για να αναπτυχθεί κάθε σπόρος εκτιμάται σε περίπου 0.3 MJ, ενώ η ενσωματωμένη ενέργεια κάθε μαρουλιού είναι περίπου 0.2 MJ.

Η Εικόνα 45 συσχετίζει τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις της ΘΜΥ, αναλυόμενες σε λειτουργικές ανάγκες (π.χ. φωτισμός, έλεγχος κλίματος, κυκλοφορία νερού) και την ενέργεια που περιέχεται στα λιπάσματα. Επιπλέον, παρουσιάζει την παραγωγή τυποποιημένη σε μονάδες ενέργειας (MJ), επιτρέποντας μια άμεση σύγκριση μεταξύ των ενεργειακών εισροών και εκροών. Αυτές οι συσχετίσεις υπογραμμίζουν τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ της κατανάλωσης πόρων και της αποδοτικότητας στην παραγωγή τροφίμων.

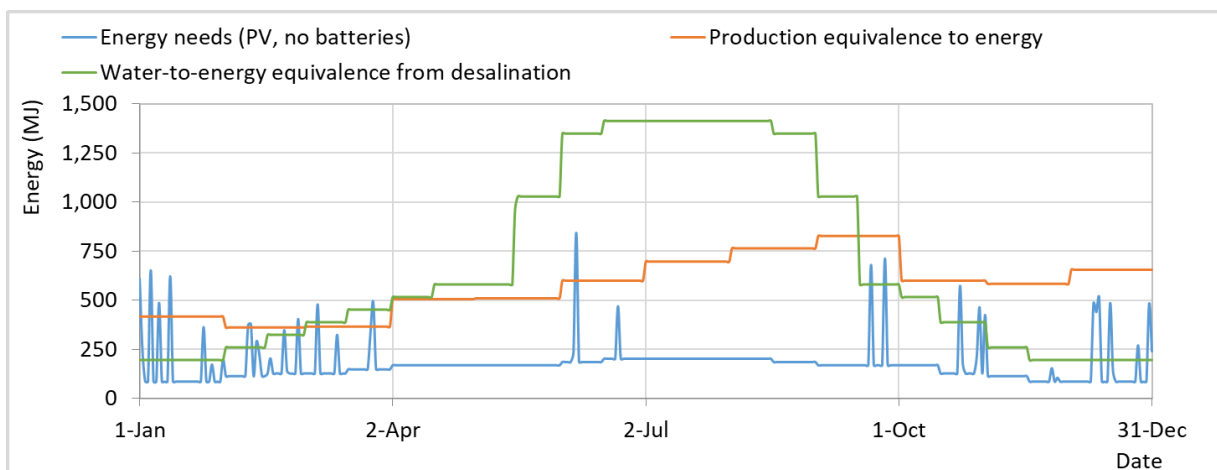


Εικόνα 45 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες (λειτουργικές και λιπάσματα), λειτουργικές ενεργειακές ανάγκες, λιπάσματα και η παραγωγική ισοδυναμία σε ενέργεια (σε ημερήσια βάση).

Η Εικόνα 46 ποσοτικοποιεί τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις της ΘΜΥ ενός εκταρίου, στο σενάριο όπου είναι εγκατεστημένα 0.1 εκτάρια φωτοβολταϊκών συστημάτων χωρίς μπαταρίες. Οι ενεργειακές εισροές που εκτιμώνται είναι η ενσωματωμένη ενέργεια των λιπασμάτων και η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, που συμπληρώνει τη ζήτηση όταν η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι ανεπαρκής. Επιπλέον, παρουσιάζεται η παραγωγή τυποποιημένη σε ενεργειακές μονάδες (MJ) και σε συσχέτιση με την Εικόνα 45, οπτικοποιείται και αναδεικνύεται η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στην λειτουργική βιωσιμότητα.

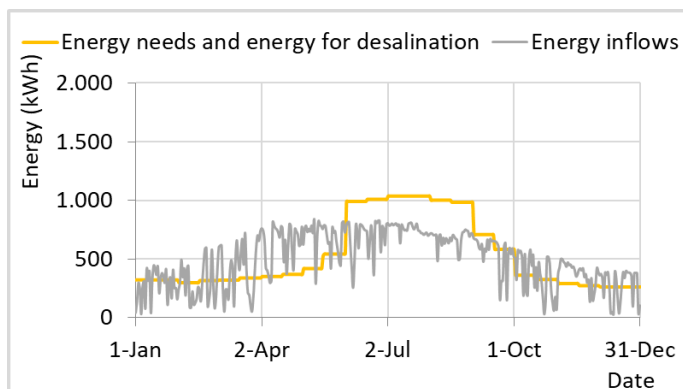
Δεδομένου ότι τα υπόγεια ύδατα θεωρούνται μη ανανεώσιμος πόρος λόγω της υπερεκμετάλλευσης που υπερβαίνει τους φυσικούς ρυθμούς αναπλήρωσης [190], έγινε η υπόθεση μιας εναλλακτικής στρατηγικής προμήθειας νερού. Η παροχή νερού μοντελοποιήθηκε ως προερχόμενη από αφαλάτωση (ένα φανταστικό σενάριο καθώς η περιοχή της μελέτης περίπτωσης είναι μακριά από τη θάλασσα), για να αντικατοπτρίζει βιώσιμες πρακτικές σε περιβάλλον με έλλειψη νερού. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση νερού εκφράζεται

ως η ισοδύναμη ενέργεια που απαιτείται για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, εκτιμώμενη σε 3-5 kWh/m³ [191].

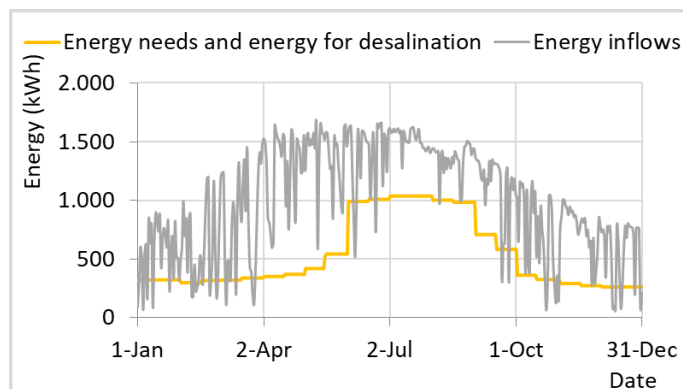


Εικόνα 46 Ενεργειακές ανάγκες από τα λιπάσματα και το δίκτυο (μετά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, χωρίς μπαταρίες), παραγωγή σε ενεργειακές μονάδες και νερό ως ενέργεια για αφαλάτωση (σε ημερήσια βάση).

Για να καλυφθούν οι συνδυασμένες ανάγκες —λειτουργική ενέργεια συν αφαλάτωση— υπολογίζεται μια αναθεωρημένη δυναμικότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών (PV), διασφαλίζοντας επαρκή παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας για την αντιστάθμιση τόσο των βασικών όσο και των πρόσθετων φορτίων. Η ανάλυση δείχνει ότι με 0.1 ha φωτοβολταϊκών, το σύστημα δεν θα κάλυπτε τις ανάγκες σε περίπου 100 ημέρες (Εικόνα 47α) και με 0.2 ha φωτοβολταϊκών, το σύστημα δεν θα κάλυπτε τις ανάγκες σε περίπου 10 ημέρες (Εικόνα 47β). Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι το προφίλ της παραγωγής ενέργειας των φωτοβολταϊκών, αντιστοιχεί στο προφίλ των λειτουργικών αναγκών υπογραμμίζοντας τις αντισταθμίσεις εντός του Πλέγματος, εξισορροπώντας τη διαχείριση του νερού με τις αυξημένες ενεργειακές εισροές που μετριάζονται από την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών.



(α)

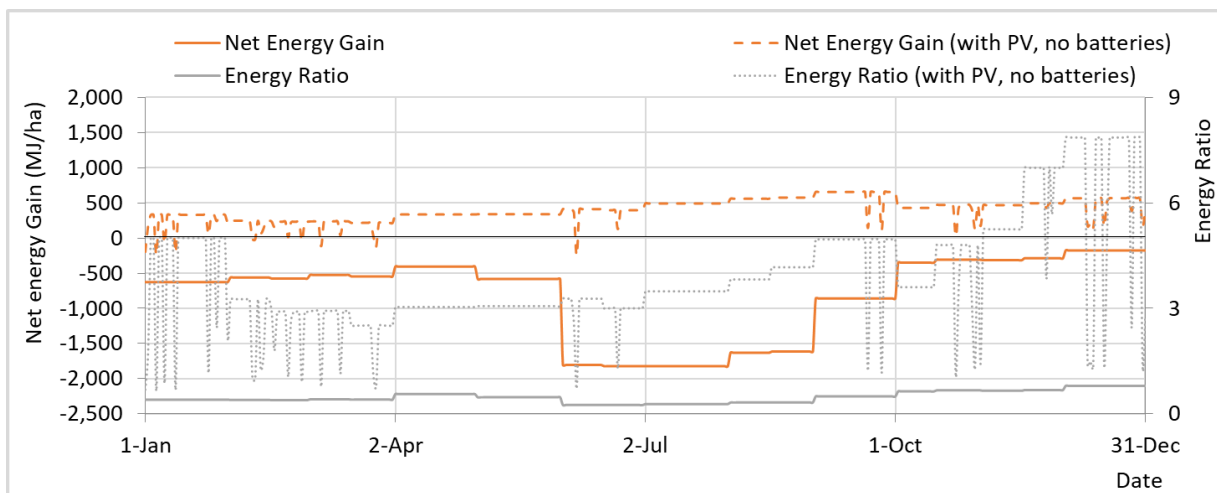


(β)

Εικόνα 47 Οι σωρευτικές ενεργειακές ανάγκες (λειτουργικές και για αφαλατωμένο νερό για 365 ημέρες) σε σύγκριση με: (α) φωτοβολταϊκά 0.1 ha, 100 ημέρες το σύστημα δεν καλύπτει τις ανάγκες· (β) φωτοβολταϊκά 0.2 ha, 10 ημέρες το σύστημα δεν καλύπτει τις ανάγκες (σε ημερήσια βάση).

Το σιτάρι αποτελεί ένα αξιόπιστο σημείο αναφοράς, δεδομένου ότι είναι βασική τροφή για τον άνθρωπο και έχει ιστορικά χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της τεχνολογικής προόδου, της αποδοτικότητας, της ποιότητας ζωής, της ευημερίας και του πλούτου [6, 192]. Ως εκ τούτου, η καλλιέργεια σιταριού θα χρησιμεύσει ως αναφορά για τη σύγκριση των τεχνικών λύσεων που αξιολογούνται.

Οι ενεργειακοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για αυτή τη μελέτη είναι ο ενεργειακός λόγος (energy ratio) και το καθαρό ενεργειακό κέρδος (net energy gain) [193, 194, 195]. Για την εκτίμηση αυτών των δεικτών στην παρούσα λειτουργία σε σύγκριση με την υποστηριζόμενη λειτουργία από 0.1 ha φωτοβολταϊκών (PV), μετατρέπουμε την ενεργειακή εισροή σε MJ και την ενεργειακή εκροή επίσης σε MJ (Εξισώσεις 1 και 2). Καθώς οι ενεργειακές ανάγκες και η παραγωγή έχουν ημερήσια μεταβολή, οι δείκτες επίσης θα μεταβάλλονται (Εικόνα 48).

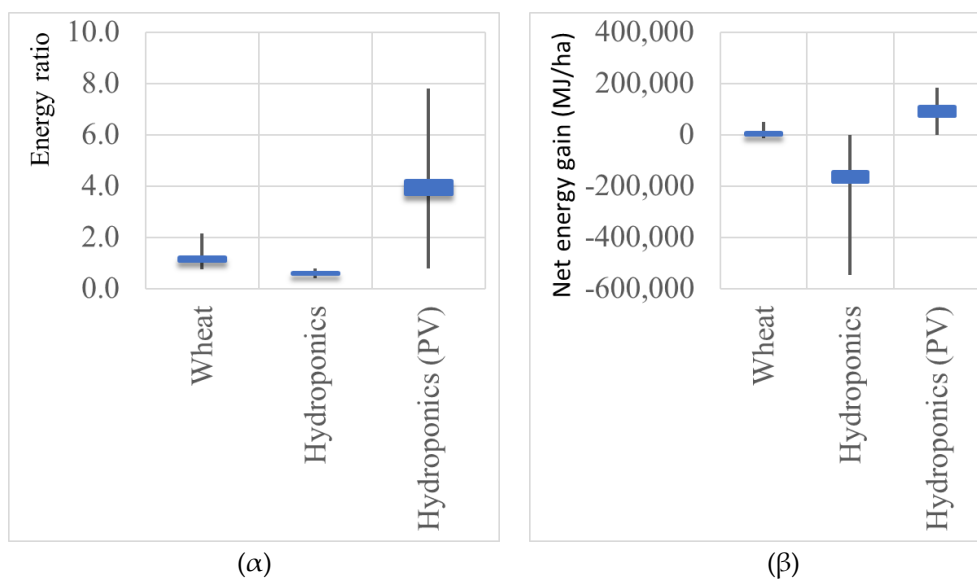


Εικόνα 48 Ενεργειακοί δείκτες: ενεργειακός λόγος και καθαρό ενεργειακό κέρδος (σε ημερήσια βάση).

Τα διαγράμματα στην Εικόνα 48 αποκαλύπτουν μια εποχιακή διακύμανση στους ενεργειακούς δείκτες, με ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και βελτιωμένα αποτελέσματα τον χειμώνα. Επίσης, απεικονίζει ότι το Καθαρό Ενεργειακό Κέρδος (NEG) αυξήθηκε από έναν ημερήσιο μέσο όρο -800 MJ/ha σε 400 MJ/ha, ενώ ο Ενεργειακός Λόγος (ER) βελτιώθηκε από μέσο όρο 0.5 σε 3.9, αναδεικνύοντας τον αντίκτυπο της ανανεώσιμης ενέργειας εντός του Πλέγματος WEF.

Η ανάλυση των μέσων δεικτών απόδοσης αποκαλύπτει ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων, τους ενισχύει σημαντικά, καθιστώντας τη μονάδα Markatos Hydroponics με φωτοβολταϊκά πολύ πιο αποδοτική από την παραδοσιακή καλλιέργεια σιταριού (Εικόνα 49). Ένα εκτάριο καλλιέργειας σιταριού παράγει τρόφιμα ισοδύναμα με 49,000–56,000 MJ, ενώ ένα εκτάριο υδροπονικής καλλιέργειας με φυλλώδη λαχανικά, όπως το μαρούλι, παράγει τρόφιμα ισοδύναμα με 210,000 MJ.

Οι θερμιδικές ανάγκες επιβίωσης για έναν ενήλικα είναι 1800–3000 kcal/ημέρα ή 7.53–12.5 MJ/ημέρα [196, 197]. Ενώ οι άνθρωποι δεν καταναλώνουν ενέργεια, θεωρητικά, ένα εκτάριο καλλιέργειας σιταριού παράγει τρόφιμα επαρκή για τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 10–20 ατόμων, ενώ ένα εκτάριο ΘΜΥ με μαρούλια παράγει τρόφιμα επαρκή για τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 50–80 ατόμων.



Εικόνα 49 Ενεργειακοί δείκτες: (α) ενεργειακός λόγος· (β) καθαρό ενεργειακό κέρδος (σε ετήσια βάση).

Αυτό καταδεικνύει σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας στην υδροπονία σε σύγκριση με την παραδοσιακή γεωργία, αντικατοπτρίζοντας τις δυνατότητές της για ενισχυμένη παραγωγή τροφίμων χωρίς χρήση γης. Ωστόσο, απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, ενεργειακές εισροές, παροχή θρεπτικών συστατικών και διαχείριση νερού, καθιστώντας απαραίτητη την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την επίτευξη αυτάρκειας.

9 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέλυσε τη λειτουργία του Πλέγματος Νερού–Ενέργειας–Τροφίμων (Water–Energy–Food Nexus) σε μία πραγματική θερμοκηπιακή μονάδα υδροπονικής καλλιέργειας, τη Markatos Hydroponics στα Οινόφυτα Βοιωτίας, αξιοποιώντας εμπειρικά δεδομένα καθημερινής λειτουργίας για ένα πλήρες έτος. Η μελέτη αποκαλύπτει τις διασυνδέσεις του Πλέγματος WEF σε ένα κλειστό σύστημα υδροπονικής μονάδας θερμοκηπίων στην Κεντρική Ελλάδα, καταδεικνύοντας ότι η έλλειψη ή η αφθονία οποιουδήποτε από αυτούς τους τρεις κρίσιμους πόρους επηρεάζει τους άλλους, είτε υπονομεύοντας είτε ενισχύοντας την ανθεκτικότητα.

9.1 Κύρια Αποτελέσματα και Ποσοτικοποίηση Πόρων

Η ανάλυση των δεδομένων από τη μονάδα Markatos ανέδειξε με σαφήνεια τις λειτουργικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κρίσιμων πόρων που συνθέτουν το Πλέγμα, επιβεβαιώνοντας τόσο τη δυνατότητα ενδογενούς εξισορρόπησης όσο και την ύπαρξη συστημικών περιορισμών.

Κατανάλωση Νερού: Η συνολική χρήση νερού ανήλθε σε $13.725 \text{ m}^3/\text{ha}$ ετησίως, ποσότητα σημαντική για τις ανάγκες ενός συστήματος επίπλευσης που βασίζεται σε συνεχή κυκλοφορία υδατικού διαλύματος. Η ποσότητα αυτή, αν καλυπτόταν πλήρως μέσω διεργασιών αφαλάτωσης, θα αντιστοιχούσε σε ενεργειακό κόστος περίπου 68 MWh. Μέρος αυτής της ποσότητας, περίπου 35%, δύναται να καλυφθεί από όμβρια ύδατα που συλλέγονται από στέγες και σκληρές επιφάνειες μέσω δεξαμενών χωρητικότητας 1.000 m^3 και επιφάνεια συλλογής 3 ha. Η υπόλοιπη ποσότητα προέρχεται από γεώτρηση, με αντίστοιχο ενεργειακό κόστος άντλησης και μεταφοράς.

Ενεργειακή Κατανάλωση: Η ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας καταγράφηκε στις $125.000 \text{ kWh}/\text{ha}$ για τις βασικές λειτουργίες (κυκλοφορία, θέρμανση-ψύξη, αντλίες, φωτισμός, εξαερισμός), με συμπληρωματικές εισροές ύψους $74.531 \text{ MJ}/\text{ha}$ ($20.703 \text{ kWh}/\text{ha}$) από θρεπτικά διαλύματα και λιπάσματα. Το σύνολο των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων παρουσιάζει σαφή εποχική διακύμανση, με κορύφωση το καλοκαίρι, όπου λειτουργούν εντατικά τα συστήματα ψύξης, οι αντλίες ανακυκλοφορίας και η υδροληψία από τη γεώτρηση.

Παραγωγή Τροφίμων: Η συνολική παραγωγή τροφίμων αποτιμήθηκε σε $210.000 \text{ MJ}/\text{ha}$ ($58.333 \text{ kWh}/\text{ha}$) σε ενεργειακές μονάδες (ή $50.250.000 \text{ kcal}$), με βάση την καλλιέργεια μαρουλιού και έξι ετήσιους καλλιεργητικούς κύκλους. Ο αριθμός των τεμαχίων/ha/έτος προσέγγισε τα 1.182.000, με αξιοσημείωτα υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα.

9.2 Αλληλεπιδράσεις και Συνέργειες Πόρων

Η υδροπονική καλλιέργεια αποτελεί ένα εξαιρετικά ελεγχόμενο περιβάλλον, όπου οι βασικές εισροές –νερό, ενέργεια, θρεπτικά διαλύματα– ρυθμίζονται τεχνητά, δίνοντας τη δυνατότητα για ποσοτικοποιημένη αποτύπωση της σχέσης μεταξύ τους. Στη μονάδα Markatos, οι ροές των τριών πόρων αποδείχθηκαν όχι απλώς παράλληλες, αλλά αλληλοεξαρτώμενες σε καθημερινή βάση, τόσο λειτουργικά όσο και ενεργειακά.

Η αλληλεπίδραση των τριών βασικών πόρων αποτυπώθηκε σε πολλαπλά επίπεδα: το νερό λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θρεπτικών και θερμικής ενέργειας εντός ενός κυκλικού συστήματος DFT (Deep Flow Technique), η ενέργεια υποστηρίζει την κυκλοφορία και τη ρύθμιση συνθηκών, ενώ η παραγωγή τροφής εξαρτάται ταυτόχρονα από τη σταθερότητα των δύο πρώτων. Κατά συνέπεια, η λειτουργία της μονάδας δεν μπορεί να αξιολογηθεί ανά πόρο μεμονωμένα, αλλά μόνο ολιστικά, ως ενιαίο σύστημα μετασχηματισμού ενέργειας, ύλης και πληροφορίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συσχέτιση κατανάλωσης νερού με ενέργεια για λίπανση, καθώς η αύξηση θερμοκρασιών κατά το καλοκαίρι συνδέεται με ταχύτερο ρυθμό πρόσληψης θρεπτικών και συχνότερες ανανεώσεις του διαλύματος, αυξάνοντας έτσι τις απαιτήσεις άντλησης και κυκλοφορίας.

9.3 Τεχνικές Λύσεις και Ενεργειακή Αποδοτικότητα

Η διερεύνηση της συνέργειας μεταξύ των πόρων κατέδειξε ότι το Πλέγμα δεν αποτελεί ένα απλό σχήμα τριών πόρων σε ισορροπία, αλλά ένα σύστημα κυκλοφορίας και μετασχηματισμού ενέργειας, ύλης και πληροφορίας. Η ενσωμάτωση 0.1 εκταρίων φωτοβολταϊκών (PV) πάνελ και η συλλογή βρόχινου νερού με δεξαμενή 1.000 m³ θα μπορούσαν να μειώσουν την εξωτερική ενεργειακή εξάρτηση κατά 90% και τη χρήση νερού κατά 25-35%, αντίστοιχα.

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε επιφάνεια 0.1 ha αποδείχθηκε καθοριστικής σημασίας, καθώς η παραγωγή ενέργειας από αυτά κάλυψε το 90% των ημερήσιων ενεργειακών αναγκών για τουλάχιστον 265 ημέρες του έτους. Τις υπόλοιπες ημέρες, ιδίως κατά τους χειμερινούς μήνες, καταγράφηκε ενεργειακό έλλειμμα, το οποίο μπορεί να μετριαστεί μόνο με συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες 100–200 kWh). Το ποσοστό της ανεκμετάλλευτης ενέργειας από τα PVs, λόγω απουσίας αποθήκευσης, ανέρχεται στο 18% σε ετήσια βάση.

Το ενεργειακό ισοζύγιο, ως λόγος παραγόμενης προς καταναλισκόμενη ενέργεια, κυμαίνεται κοντά στη μονάδα (0,94), υποδεικνύοντας ότι το σύστημα είναι σχεδόν ισοβαρές από πλευράς ενεργειακής καθαρής απόδοσης. Τα βασικά ευρήματα υπογραμμίζουν την ανώτερη ενεργειακή απόδοση της υδροπονίας (210.000 MJ/ha) σε σύγκριση με την παραδοσιακή καλλιέργεια σιταριού (49.000–56.000 MJ/ha), αναδεικνύοντας την ικανότητά της να ενισχύει την επισιτιστική ασφάλεια σε περιβάλλον με περιορισμένους πόρους.

9.4 Εποχικές Διακυμάνσεις και Δυναμική Διαχείριση

Μια κρίσιμη συμβολή της παρούσας ανάλυσης ήταν η αποκάλυψη του ρόλου των εποχικών διακυμάνσεων στη διαμόρφωση της κατανάλωσης ενέργειας και νερού. Οι μεταβολές στη φωτοπερίοδο, τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία επηρεάζουν τα φορτία θέρμανσης/ψύξης, τον ρυθμό εξάτμισης και την ανάγκη για φωτισμό, διαμορφώνοντας ένα σύνθετο ενεργειακό και υδατικό προφίλ. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει τη σημασία της δυναμικής, χρονικά ευαίσθητης διαχείρισης πόρων.

Τα δεδομένα καταδεικνύουν επίσης ότι η παραγωγικότητα των φυτών είναι πιο σταθερή στις μεταβατικές περιόδους (άνοιξη-φθινόπωρο), με χαμηλότερες ανάγκες θέρμανσης/ψύξης και σταθερή φωτοσυνθετική απόδοση. Καθώς οι ενεργειακές ανάγκες συγχρονίζονται με τα

προφίλ των πόρων (π.χ. παραγωγή φωτοβολταϊκών με λειτουργικές ανάγκες), ο ενεργειακός λόγος και το καθαρό ενεργειακό κέρδος υποδεικνύουν σημαντική αποδοτικότητα.

9.5 Προοπτικές και Εφαρμογές

Αν και τα εξεταζόμενα συστήματα επικεντρώνονται σε οικονομίες μεγάλης κλίμακας, αξίζει να διερευνηθεί σε περαιτέρω έρευνα κατά πόσον η μικρής κλίμακας υδροπονική καλλιέργεια θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε αστικούς ανοιχτούς χώρους. Για παράδειγμα, αν το 10% της συνολικής έκτασης της Αθήνας (34.500 εκτάρια) αποτελείται από στέγες κατάλληλες για υδροπονικά συστήματα, μια τέτοια καλλιέργεια θα μπορούσε να παράγει αρκετή τροφή για να καλύψει τις διατροφικές ενεργειακές ανάγκες περίπου 170.000–275.000 κατοίκων, ή περίπου το 5% του πληθυσμού. Ενώ αυτό δεν θα αντιμετώπιζε πλήρως τις ανάγκες τροφίμων της πόλης, θα ενίσχυε σημαντικά την αστική ανθεκτικότητα με τον μετριασμό των επιπτώσεων πιθανών διαταραχών στις αλυσίδες εφοδιασμού.

Ωστόσο, οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις για τον έλεγχο του κλίματος καθιστούν αναγκαία την υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τον μετριασμό των αντισταθμίσεων εντός του Πλέγματος.

9.6 Συνολική Αξιολόγηση

Η εργασία καταδεικνύει ότι η αυτονομία ενός συστήματος υδροπονίας μπορεί να επιτευχθεί από την εξισορρόπηση μεταξύ εισροών και αποδόσεων και επιλογής του κατάλληλου τρόπου διαχείρισης. Η αυτάρκεια προκύπτει όχι ως δεδομένη κατάληξη, αλλά ως δυναμική με προϋποθέσεις που μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τεχνικές επιλογές, περιβαλλοντικές παραμέτρους και διαχειριστικές πρακτικές.

Η μονάδα Markatos, ως μικρογραφία ενός λειτουργικά αυτάρκους και τεχνολογικά εντατικοποιημένου αγροτικού συστήματος, απέδειξε ότι η ενσωμάτωση του Πλέγματος Νερού–Ενέργειας–Τροφίμων είναι εφικτή και αποδοτική, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ακριβής σχεδιασμός, χρονική πρόβλεψη των απαιτήσεων και συνεχής παρακολούθηση αφού δεν πρόκειται για στατικό μοντέλο, αλλά για δυναμικό σύστημα που απαιτεί καθημερινή εξισορρόπηση μεταξύ εισροών και εκροών.

Συνολικά, αυτή η μελέτη περίπτωσης καταδεικνύει ότι οι θερμοκηπιακές μονάδες υδροπονίας, όταν καθοδηγούνται από προσεγγίσεις βασισμένες στο Πλέγμα, μπορούν να λειτουργήσουν ως ανθεκτικά, αποδοτικά μοντέλα παραγωγής τροφίμων, συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες της βελτιστοποίησης χρήσης των πόρων. Η τεκμηριωμένη ποσοτικοποίηση των πόρων και η καταγραφή των ενεργειακών, υδρολογικών και παραγωγικών μεταβολών μέσα στον ετήσιο κύκλο, καταδεικνύουν την πολυπλοκότητα αλλά και τη δυνατότητα τεχνικά ολοκληρωμένης αγροτικής διαχείρισης, με ελεγχόμενο ρίσκο και προβλέψιμη παραγωγικότητα. Σε περιβάλλοντα με περιορισμένους φυσικούς πόρους, τέτοιου είδους μονάδες μπορούν να αποτελέσουν βάση για παραγωγικά και λειτουργικά σταθερά συστήματα τροφής, με ισορροπημένη χρήση ενέργειας και νερού.

10 Βιβλιογραφικές αναφορές

- 1.** Hoff, H. (2011). "Understanding the Nexus: Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus." Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- 2.** Sargentis, G.-F., Ioannidis, R. The impacts of altering biodiversity to the Water–Energy–Food nexus: case study North Euboea, Greece. *Discover Water* 4, 105 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s43832-024-00165-y>
- 3.** Sargentis G.-F.; Mamassis N.; Kitsou O.; Koutsoyiannis D. The role of technology in the water–energy–food nexus. A case study: Kerinthos, North Euboea, Greece. *Front. Water* 6 (2024). <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1343344>
- 4.** Sargentis, G.-F.; Koutsoyiannis, D. The Function of Money in Water–Energy–Food and Land Nexus. *Land* 2023, 12, 669. <https://doi.org/10.3390/land12030669>
- 5.** Sargentis, G.F.; Lagaros, N.D.; Cascella, G.L.; Koutsoyiannis, D. Threats in Water–Energy–Food–Land Nexus by the 2022 Military and Economic Conflict. *Land* 2022, 11, 1569. <https://doi.org/10.3390/land11091569>
- 6.** Sargentis, G.-F.; Defteraios, P.; Lagaros, N.D.; Mamassis, N. Values and Costs in History: A Case Study on Estimating the Cost of Hadrianic Aqueduct's Construction. *World* 2022, 3, 260-286. <https://doi.org/10.3390/world3020014>
- 7.** Sargentis, G.-F.; Siamparina, P.; Sakki, G.-K.; Efstratiadis, A.; Chiotinis, M.; Koutsoyiannis, D. Agricultural Land or Photovoltaic Parks? The Water–Energy–Food Nexus and Land Development Perspectives in the Thessaly Plain, Greece. *Sustainability* 2021, 13, 8935. <https://doi.org/10.3390/su13168935>
- 8.** Markantonis, D., Kougia, M., K., Koutsoyiannis, D., and Sargentis, G.-F.: Causality in Water-Energy and Food nexus: A toy-model multitasking stochastic synthesis, highlighting the complexity and randomness in decision making, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 2024, EGU24-6102, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-6102>
- 9.** Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R.S.J. & Yumkella, K.K. (2011). "Considering the Energy, Water and Food Nexus: Towards an Integrated Modelling Approach." *Energy Policy*, 39(12), 7896-7906.
- 10.** Biggs, E.M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J.M.A., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., Van Ogtrop, F., Curnow, J., Haworth, B., Duce, S. & Imanari, Y. (2015). "Sustainable Development and the Water-Energy-Food Nexus: A Perspective on Livelihoods." *Environmental Science & Policy*, 54, 389-397.
- 11.** Rasul, G. & Sharma, B. (2016). "The Nexus Approach to Water–Energy–Food Security: An Option for Adaptation to Climate Change." *Climate Policy*, 16(6), 682-702.

-
- 12.** FAO. (2014). "The Water-Energy-Food Nexus: A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture." Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- 13.** Sargentis G-F. Issues of Prosperity: Stochastic Evaluation of Data Related to Environment, Infrastructures, Economy and Society. Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2022.
- 14.** Grey, D. & Sadoff, C.W. (2007). "Sink or Swim? Water Security for Growth and Development." *Water Policy*, 9(6), 545-571. Available online at: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/4573ceaa-3a43-5e7e-8804-57f856fe3e0d>
- 15.** Kuzma, S., M.F.P. Bierkens, S. Lakshman, T. Luo, L. Saccoccia, E. H. Sutanudjaja, R. Van Beek. 2023. "Aqueduct 4.0: Updated decision-relevant global water risk indicators." Technical Note. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at: <https://doi.org/10.46830/writn.23.00061>
- 16.** FAO. (2021). "Water use". AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. Ανακτήθηκε από: <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>
- 17.** Koutsoyiannis, D.; Iliopoulou, T.; Koukouvinos, A.; Malamos, N.; Mamassis, N.; Dimitriadis, P.; Tepetidis, N.; Markantonis, D. In Search of Climate Crisis in Greece Using Hydrological Data: 404 Not Found. *Water* 2023, 15, 1711. <https://doi.org/10.3390/w15091711>
- 18.** WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2019). "The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind." UNESCO, Paris.
- 19.** Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. & Zaks, D.P.M. (2011). "Solutions for a Cultivated Planet." *Nature*, 478, 337-342.
- 20.** Rodriguez, D.J., Delgado, A., DeLaquil, P. & Sohns, A. (2013). "Thirsty Energy." *Water Papers*, World Bank, Washington, DC.
- 21.** IEA (International Energy Agency). (2021). "World Energy Outlook 2021." OECD Publishing, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 22.** Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G., & Macknick, J. (2013). Life cycle water use for electricity generation: A review and harmonization of literature estimates. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015031>
- 23.** Macknick, J., Newmark, R., Heath, G. & Hallett, K.C. (2012). "Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies: A Review of Existing Literature." *Environmental Research Letters*, 7(4), 045802.
- 24.** Mekonnen, M.M., Gerbens-Leenes, P.W. & Hoekstra, A.Y. (2015). "The Consumptive Water Footprint of Electricity and Heat: A Global Assessment." *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1, 285-297.

-
- 25.** Fthenakis, V. & Kim, H.C. (2010). "Life-Cycle Uses of Water in U.S. Electricity Generation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2039-2048.
- 26.** Wetlands International Europe. (2023, March 22). World Water Day: The water impacts of lithium extraction. <https://europe.wetlands.org/blog/world-water-day-the-water-impacts-of-lithium-extraction/>
- 27.** Agusdinata, D. B., Liu, W., Eakin, H., & Romero, H. (2018). Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda. *Environmental Research Letters*, 13(12), 123001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae9b1>
- 28.** Wanger, T.C. (2011), The Lithium future—resources, recycling, and the environment. *Conservation Letters*, 4: 202-206. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2011.00166.x>
- 29.** Dehghani-Sani, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B., & Fraser, R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 192–208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>
- 30.** MIT Climate Portal Writing Team. (2024, February 12). *How is lithium mined?* MIT Climate Portal. <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-lithium-mined>
- 31.** Smil, V. (2015). "Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses." MIT Press, Cambridge, MA.
- 32.** IRENA (International Renewable Energy Agency). (2021). "Renewable Capacity Statistics 2021." IRENA, Abu Dhabi.
- 33.** FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO. (2021). "The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All." FAO, Rome.
- 34.** Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C. & Ranganathan, J. (2019). "Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050." World Resources Institute, Washington, DC.
- 35.** Hoekstra, A.Y. & Mekonnen, M.M. (2012). "The Water Footprint of Humanity." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237.
- 36.** Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R. & Meybeck, A. (2011). "Global Food Losses and Food Waste: Extent, Causes and Prevention." FAO, Rome.
- 37.** Sargentis G.-F.; Koukia M. Vulnerabilities of water-energy and food nexus in cities of digital era. *Insight - Civil Engineering*. 2024; 7(1): 608. Available online at: <https://doi.org/10.18282/ice.v7i1.608>
- 38.** FAO. (2013). *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/>
- 39.** Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, L., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T., ... Torquebiau, E. F. (2014). 96

Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4(12), 1068-1072.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2437>

40. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). "Climate-Smart" Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation. FAO. <http://www.fao.org/3/i1881e/i1881e00.htm>

41. Sargentis G.-F.; Moraiti K.; Benekos I.; Ioannidis R.; Mamassis N. Fast-Track Documentation of the Alterations on the Landscape, before and after a Natural Hazard—Case Study: North Euboea Greece before and after Storms Daniel and Elias. *Rural and Regional Development*. 2024, 2, 10016. <https://doi.org/10.70322/rrd.2024.10016>

42. Moraiti K.; Sigourou S.; Dimitriadis P.; Ioannidis R.; Benekos I.; Iliopoulou T.; Kitsou O.; Mamassis N.; Koutsoyiannis D.; Sargentis G.-F. Documenting the Changing Floodplain of Nileas Basin in North Euboea (Greece) before and after Storms Daniel and Elias. *Rural and Regional Development*. 2024, 2(3):10013. <https://doi.org/10.35534/rrd.2024.10013>

43. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

44. Sargentis G.-F. Entropy and War, Toy Models. *Recent Prog Sci Eng* 2025; 1(2): 007; <https://doi.org/10.21926/rpse.2502007>

45. Sargentis, G.-F.; Iliopoulou, T.; Dimitriadis, P.; Mamassis, N.; Koutsoyiannis, D. Stratification: An Entropic View of Society's Structure. *World* 2021, 2, 153-174. <https://doi.org/10.3390/world2020011>

46. Koutsoyiannis, D.; Sargentis, G.-F. Entropy and Wealth. *Entropy* 2021, 23, 1356. <https://doi.org/10.3390/e23101356>

47. Sargentis, G.-F.; Koutsoyiannis, D.; Angelakis, A.; Christy, J.; Tsonis, A.A. Environmental Determinism vs. Social Dynamics: Prehistorical and Historical Examples. *World* 2022, 3, 357-388. <https://doi.org/10.3390/world3020020>

48. Sargentis G.-F.; Ioannidis R.; Mamassis N.; Zoukos V.; Koutsoyiannis D. A Review of the Energy Policy in Greece in the Last 50 Years and Its Implications for Prosperity. *Clean Energy and Sustainability* 2024, 2, 10021. <https://doi.org/10.70322/ces.2024.10021>

49. Κουτσογιάννης Δ., Σαργέντης Γ.-Φ., Αδιέξοδα της αυτοκρατορίας της αγοράς, Ακηδεμόνευτοι Στοχασμοί – Στη Μνήμη του Θεμιστοκλή Ξανθόπουλου, Πρύτανη ΕΜΠ 1997-2003, επιμέλεια Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Λαγαρός και Α.Γ. Μπουντουβής, 99–123, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2024.

50. FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>

51. OECD/FAO. (2021). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/19428846-en>

52. World Bank. (2015). *Future of Food: Shaping a Climate-Smart Global Food System*. World Bank Group, Washington, DC.

-
- 53.** Garnett, T., Appleby, M. C., Balmford, A., Bateman, I. J., Benton, T. G., Bloomer, P., Burlingame, B., Dawkins, M., Dolan, L., Fraser, D., Herrero, M., Hoffmann, I., Smith, P., Thornton, P. K., Toulmin, C., Vermeulen, S. J., & Godfray, H. C. J. (2013). Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science*, 341(6141), 33-34. <https://doi.org/10.1126/science.1234485>
- 54.** HLPE. (2019). Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Rome.
- 55.** Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P. V. V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
- 56.** Sargentis G.-F.; Ioannidis R.; Dimitriadis,P.; Malamos N.; Lyra O.; Kitsou O.; Koukia M.; Mamassis N.; Koutsoyiannis D. Energy Self-Sufficiency in Rural Areas, Case Study: North Euboea, Greece. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 2024, 2766-6190. <https://doi.org/10.21926/aeer.2404025>
- 57.** Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 695-720. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0143-z>
- 58.** Mok, H. F., Williamson, V. G., Grove, J. R., Burry, K., Barker, S. F., & Hamilton, A. J. (2014). Strawberry fields forever? Urban agriculture in developed countries: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 21-43. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0156-7>
- 59.** Sargentis, G.-F.; Iliopoulou, T.; Sigourou, S.; Dimitriadis, P.; Koutsoyiannis, D. Evolution of Clustering Quantified by a Stochastic Method—Case Studies on Natural and Human Social Structures. *Sustainability* 2020, 12, 7972. <https://doi.org/10.3390/su12197972>
- 60.** Artmann, M., & Sartison, K. (2018). The Role of Urban Agriculture as a Nature-Based Solution: A Review for Developing a Systemic Assessment Framework. *Sustainability*, 10(6), 1937. <https://doi.org/10.3390/su10061937>
- 61.** Clinton, N., Stuhlmacher, M., Miles, A., Uludere Aragon, N., Wagner, M., Georgescu, M., Herwig, C., & Gong, P. (2018). A Global Geospatial Ecosystem Services Estimate of Urban Agriculture. *Earth's Future*, 6(1), 40-60. <https://doi.org/10.1002/2017EF000536>
- 62.** Vermeulen, S. J., Challinor, A. J., Thornton, P. K., Campbell, B. M., Eriyagama, N., Vervoort, J. M., Kinyangi, J., Jarvis, A., Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Nicklin, K. J., Hawkins, E., & Smith, D. R. (2013). Addressing uncertainty in adaptation planning for agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(21), 8357-8362. <https://doi.org/10.1073/pnas.1219441110>

-
- 63.** Bizikova, L., Larkin, P., Mitchell, S., & Waldick, R. (2019). An indicator set to track resilience to climate change in agriculture: A policy-maker's perspective. *Land Use Policy*, 82, 444-456. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.057>
- 64.** Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, T. V. d., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics. *Sustainability*, 9(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- 65.** Searchinger, T. D., Wiersenius, S., Beringer, T., & Dumas, P. (2018). Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564(7735), 249-253.
- 66.** Davidson, E. A. (2009). The contribution of manure and fertilizer-N to atmospheric N₂O and CO₂ emissions: a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3), 5-16.
- 67.** Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2013). "Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities." Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. <http://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>
- 68.** Paris, B., Vadorou, F., Balafoutis, A. T., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakos, D., & Papadakis, G. (2022). Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption. *Applied Sciences*, 12(10), 5150. <https://doi.org/10.3390/app12105150>
- 69.** Campiotti, C., Viola, C., Alonzo, G., Bibbiani, C., Giagnacovo, G., Scoccianti, M. & Tumminelli, G. (2012). "Sustainable Greenhouse Horticulture in Europe." *Journal of Sustainable Energy*, 3(3), 57-66.
- 70.** Balafoutis, A. T., & Paris, B. (2024). How can Fossil-Energy-Free Technologies and Strategies (FEFTS) be adopted in European Farming? *Energies*, 17(19), 4857. <https://doi.org/10.3390/en17194857>
- 71.** Lal, R. (2004). "Soil carbon sequestration to mitigate climate change." *Geoderma*, 123(1-2), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- 72.** Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49-57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- 73.** Foley, J.A. et al. (2011). "Solutions for a cultivated planet." *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- 74.** Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R. & Meybeck, A. (2011). "Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention." FAO, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e.pdf>
- 75.** Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2021). 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27(1), 27-49. <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- 76.** Taub, D. R., Miller, B., & Allen, H. (2008). Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 14(3), 565-575. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01511.x>

-
- 77.** Li, X., Ulfat, A., Shokat, S., Liu, S., Zhu, X., & Liu, F. (2019). Responses of carbohydrate metabolism enzymes in leaf and spike to CO₂ elevation and nitrogen fertilization and their relations to grain yield in wheat. *Environmental and Experimental Botany*, 164, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.05.008>
- 78.** Kimball, B. A. (2016). Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology*, 31, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.03.006>
- 79.** Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31-48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>
- 80.** Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. *IEEE Access*, 7, 156237-156271. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949703>
- 81.** Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218-231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>
- 82.** Vasisht, D., Kapetanovic, Z., Won, J., Jin, X., Chandra, R., Sinha, S., Kapoor, A., Sudarshan, M., & Stratman, S. (2017). FarmBeats: An IoT Platform for Data-Driven Agriculture. In *14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation* (pp. 515-529).
- 83.** Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- 84.** Shamshiri, R. R., Weltzien, C., Hameed, I. A., Yule, I. J., Grift, T. E., Balasundram, S. K., Pitonakova, L., Ahmad, D., & Chowdhary, G. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1-14. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
- 85.** Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- 86.** Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- 87.** Hemming, S., de Zwart, F., Elings, A., Petropoulou, A., & Righini, I. (2020). Cherry Tomato Production in Intelligent Greenhouses—Sensors and AI for Control of Climate, Irrigation, Crop Yield, and Quality. *Sensors*, 20(22), 6430. <https://doi.org/10.3390/s20226430>
- 88.** Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280-293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>

-
- 89.** Mohapatra, A. G., & Lenka, S. K. (2016). Neural Network Pattern Classification and Weather Dependent Fuzzy Logic Model for Irrigation Control in WSN Based Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*, 78, 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.02.094>
- 90.** Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., & Shinohara, Y. (2012). Effects of Supplemental Lighting within the Canopy at Different Developing Stages on Tomato Yield and Quality of Single-Truss Tomato Plants Grown at High Density. *Environmental Control in Biology*, 50(1), 1-11. <https://doi.org/10.2525/ecb.50.1>
- 91.** Ntinas, G. K., Neumair, M., Tsadilas, C. D., & Meyer, J. (2017). Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3617-3626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.106>
- 92.** Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6148-6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- 93.** Gangurde, P. A., & Bhende, M. H. (2015). A Review on Precision Agriculture Using Wireless Sensor Networks. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 23(9), 426-431. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V23P282>
- 94.** Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., & Tisserye, B. (2015). Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
- 95.** Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>
- 96.** King, A. (2017). Technology: The Future of Agriculture. *Nature*, 544(7651), S21-S23. <https://doi.org/10.1038/544S21a>
- 97.** Bacco, M., Barsocchi, P., Ferro, E., Gotta, A., & Ruggeri, M. (2019). The Digitisation of Agriculture: a Survey of Research Activities on Smart Farming. *Array*, 3-4, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.array.2019.100009>
- 98.** Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- 99.** Barrett, C. B., Benton, T. G., Cooper, K. A., Fanzo, J., Gandhi, R., Herrero, M., James, S., Kahn, M., Mason-D'Croz, D., Mathys, A., Nelson, R. J., Shen, J., Thornton, P., Bageant, E., Fan, S., Mude, A. G., Sibanda, L. M., & Wood, S. (2020). Bundling innovations to transform agri-food systems. *Nature Sustainability*, 3(12), 974-976. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00661-8>

-
- 100.** Savenije, H. H., & Van der Zaag, P. (2002). Water as an economic good and demand management paradigms. *Water International*, 27(1), 98-115.
- 101.** Molden, D. (2007). *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. Earthscan.
- 102.** Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237.
- 103.** Siebert, S., & Döll, P. (2010). Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. *Journal of Hydrology*, 384(3-4), 198-217.
- 104.** El Bilali, H. (2019). Research on agro-food sustainability transitions: A systematic review of research themes and an analysis of research gaps. *Journal of Cleaner Production*, 221, 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.232>
- 105.** Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- 106.** Tittone, P. (2014). Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.08.006>
- 107.** Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- 108.** Sohal, T., Al-Ansari, N., & Panigrahi, S. (2020). Energy-efficient agricultural practices and technologies: A review. *Energy Reports*, 6, 156-166.
- 109.** Poggi, F., Firmino, A., & Amado, M. (2018). Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use. *Energy*, 155, 630-640. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.009>
- 110.** Mekhilef, S., et al. (2019). Biomass energy production from agricultural waste in Malaysia: Potential and prospects. *Biomass and Bioenergy*, 122, 405-418.
- 111.** Kirchherr, J., et al. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232
- 112.** Albrecht, T. R., Crootof, A., & Scott, C. A. (2018). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>
- 113.** Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M. A., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., Van Ogtrop, F., Curnow, J., Haworth, B., Duce, S., & Imanari, Y. (2015).

Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>

114. Liu, J., Hull, V., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., Pahl-Wostl, C., Xu, Z., Chung, M. G., Sun, J., & Li, S. (2018). Nexus approaches to global sustainable development. *Nature Sustainability*, 1(9), 466-476. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0135-8>

115. J. Benton Jones, J. (2004). *Hydroponics A Practical Guide for the Soilless Grower* 2nd ed. CRC Press.

116. Savvas, D. (2011). *Soilless culture, hydroponics, substrates* [Καλλιέργειες εκτός εδάφους, υδροπονία, υποστρώματα]. Athens, Greece: Agrotipos SA.

117. Stein, L. (2016). "Origins of Hydroponic Agriculture". *Agricultural History Review*, 42(1), 25-47.

118. Bartz, H. (2014). *Hydroponic Food Production*. CRC Press.

119. Sachs, J. (1860). Über die Ernährung der Pflanzen durch Wasser [On the nutrition of plants through water]. *Landwirtschaftliche Versuchs-Stationen*, 2, 280-320.

120. Knop, W. (1865). Quantitative Untersuchungen über die Ernährung der Pflanzen [Quantitative investigations on plant nutrition]. *Landwirtschaftliche Versuchs-Stationen*, 7, 93-109.

121. Gericke, W.F. (1940). "Complete Guide to Soilless Gardening". Prentice-Hall.

122. Jensen, M.H. (2004). "Controlled Environment Agriculture". *Acta Horticulturae*, 641, 45-52.

123. Despommier, D. (2010). "The Vertical Farm". Picador Press.

124. Al-Kodmany, K. (2018). "The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Urban Environment". *Buildings*, 8(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>

125. National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2018). "Plant Growth in Space Environments".

126. Resh, H. M. (2012). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* 7th ed. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12500>.

127. Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). "Innovation in Agriculture: Hydroponic Systems".

128. Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879-6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>

129. Roupael, Y., & Kyriacou, M.C. (2018). "Quality and safety of fresh fruits and vegetables at harvest". *Scientia Horticulturae*, 239, 78-93.

-
- 130.** Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O.P. (2018). "Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview". *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371.
- 131.** Bugbee, B. (2004). "Effects of radiation quality, intensity, and duration on photosynthesis and growth". *Acta Horticulturae*, 662, 39-50.
- 132.** Brechner, M., & Both, A.J. (2014). "Hydroponic Lettuce Handbook". Cornell Controlled Environment Agriculture. Cornell University.
- 133.** Benke, K., & Tomkins, B. (2017). "Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture". *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26.
- 134.** Lakhari, I.A., Gao, J., Syed, T.N., Chandio, F.A., & Buttar, N.A. (2018). "Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics". *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 338-352.
- 135.** Τσουτσουλόπουλος, Ι. (2015). *Συστήματα Υδροπονικής Καλλιέργειας*. Εκδόσεις Έμβρυο.
- 136.** Jones Jr, J.B. (2014). *Complete Guide for Growing Plants Hydroponically*. CRC Press.
- 137.** AlShrouf, A. (2017). "Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming". *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 27(1), 247-255.
- 138.** Putra, P.A., & Yuliando, H. (2015). "Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: A review". *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 283-288.
- 139.** Gruda, N. (2009). "Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?". *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(2), 141-147.
- 140.** Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R.E. (2015). "Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey". *Aquaculture*, 435, 67-74.
- 141.** Pinstup-Andersen, P. (2018). "Is it time to take vertical indoor farming seriously?". *Global Food Security*, 17, 233-235.
- 142.** Toulaitos, D., Dodd, I.C., & McAinsh, M. (2016). "Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics". *Food and Energy Security*, 5(3), 184-191.
- 143.** Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U.B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H., & Dierich, A. (2014). "Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings". *Agriculture and Human Values*, 31(1), 33-51.

-
- 144.** Lambin, E.F., & Meyfroidt, P. (2011). "Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(9), 3465-3472.
- 145.** Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U.B., & Sawicka, M. (2015). "Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming)". *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(1), 43-54.
- 146.** Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J., & Birkved, M. (2016). "Urban versus conventional agriculture, taxonomy of resource profiles: a review". *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 9.
- 147.** Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G.M. (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.
- 148.** Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press
- 149.** Banerjee, C., & Adenaeuer, L. (2014). Up, up and away! The economics of vertical farming. *Journal of Agricultural Studies*, 2(1), 40-60.
- 150.** Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.). (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.
- 151.** Graamans, L., Baeza, E., Van Den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43.
- 152.** Albrecht, T.R., Crootof, A. & Scott, C.A. (2018). "The Water-Energy-Food Nexus: A Systematic Review of Methods for Nexus Assessment." *Environmental Research Letters*, 13(4), 043002.
- 153.** Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W. & Fu, G. (2018). "Water-Energy-Food Nexus: Concepts, Questions and Methodologies." *Journal of Cleaner Production*, 195, 625-639.
- 154.** Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A.K., Hoff, H., Lawford, R., Qi, J., de Strasser, L., Yillia, P.T. & Zheng, C. (2017). "Challenges in Operationalizing the Water–Energy–Food Nexus." *Hydrological Sciences Journal*, 62(11), 1714-1720.
- 155.** Sargentis, G.-F.; Ioannidis, R.; Bairaktaris, I.; Frangedaki, E.; Dimitriadis, P.; Iliopoulou, T.; Koutsoyiannis, D.; Lagaros, N.D. Wildfires vs. Sustainable Forest Partitioning. *Conservation* 2022, 2, 195-218. <https://doi.org/10.3390/conservation2010013>
- 156.** Markantonis, D.; Sargentis, G.-F.; Dimitriadis, P.; Iliopoulou, T.; Siganou, A.; Moraiti, K.; Nikolinakou, M.; Meletopoulos, I.T.; Mamassis, N.; Koutsoyiannis, D. Stochastic Evaluation of the Investment Risk by the Scale of Water Infrastructures—Case Study: The Municipality of West Mani (Greece). *World* 2023, 4, 1-20. <https://doi.org/10.3390/world4010001>

-
- 157.** Sargentis, G.-F.; Bartsioka, K.; Symeonidis, N.; Hadjibiros, K. Evaluation method regarding the effect of building design in the context of sustainable development, 10th International Conference on Environmental Science and Technology, Kos island, Department of Environmental Studies, University of the Aegean, 2007.
- 158.** Σαργέντης Γ.-Φ., Ενσωματωμένη ενέργεια, το υλικό ως ενεργειακή αποθήκη, τεχνικό περιοδικό ΚΤΙΠΙΟ, Ιούνιος 2014.
- 159.** Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G., & Macknick, J. (2013). Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015031>
- 160.** Rodriguez, D. J., Delgado, A., DeLaquil, P., & Sohns, A. (2013). Thirsty Energy. Water Papers (78923). Washington, DC: World Bank Group, Water Unit, Transport, Water and ICT Department, Sustainable Development Vice Presidency. Retrieved from <http://www.worldbank.org/water>
- 161.** Sun, T., Lu, J., Li, Z., Lubkeman, D., & Lu, N. (2017). Modeling Combined Heat and Power Systems for Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 2686-2696. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2652723>
- 162.** Esen, M., & Yuksel, T. (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*, 65, 340-351.
- 163.** Tataraki, K.G., Kavvadias, K.C., & Maroulis, Z.B. (2019). Combined cooling heating and power systems in greenhouses. Grassroots and retrofit design. *Energy*, 189, 116283.
- 164.** Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- 165.** Yano, A., Onoe, M., & Nakata, J. (2014). Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. *Biosystems Engineering*, 122, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.04.003>
- 166.** Tong, X., Sun, Z., Sigrimis, N., & Li, T. (2018). Energy sustainability performance of a sliding cover solar greenhouse: Solar energy capture aspects. *Biosystems Engineering*, 176, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.008>
- 167.** Dreamstime, "Biogas energy consumption outline diagram", ID: 236890312. Διαθέσιμη στο: <https://www.dreamstime.com/biogas-bio-gas-division-energy-consumption-sources-outline-diagram-biogas-bio-gas-division-energy-consumption-image236890312> (τελευταία πρόσβαση: Ιούνιος 2025).
- 168.** Compennolle, T., Witters, N., Van Passel, S., & Thewys, T. (2011). Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO₂-emissions. *Energy*, 36(4), 1940-1947.
- 169.** Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- 170.** Kavanaugh, S. P., & Rafferty, K. (2014). Geothermal heating and cooling: Design of ground-source heat pump systems. ASHRAE.

-
- 171.** Larson, M. (n.d.). Flow of heat energy in geothermal system [Graphic]. National Center for Appropriate Technology (NCAT). Retrieved June 21, 2025, from <https://attra.ncat.org/publication/geothermal-greenhouses-exploring-the-potential/>
- 172.** Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32(15), 2461-2478.
- 173.** Benli, H. (2013). A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump systems for a greenhouse heating in the mild climate Elazig, Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 197-206.
- 174.** Omer, A. M. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344-371.
- 175.** Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2005). Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: An experimental study. *Building and Environment*, 40(8), 1040-1050.
- 176.** Karytsas, C., Mendrinou, D., & Goldbrunner, J. (2003). Low enthalpy geothermal energy utilisation schemes for greenhouse and district heating at Traianoupolis Evros, Greece. *Geothermics*, 32(1), 69-78.
- 177.** Tong, Y., Kozai, T., Nishioka, N., & Ohyama, K. (2010). Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosystems Engineering*, 106(4), 405-411.
- 178.** Hassanien, R. H. E., Li, M., & Lin, W. D. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989-1001.
- 179.** Markatos E. (2025) Markatos Hydroponics. Operational Data Logs, 2024.
- 180.** Kirkmalis, G.; Sargentis, G.-F.; Ioannidis, R.; Markantonis, D.; Iliopoulou, T.; Dimitriadis, P.; Mamasis, N.; Koutsoyiannis, D. Fertilizers as batteries and regulators in the global Water-Energy-Food equilibrium, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-11915, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-11915>, 2023.
- 181.** Meteorological data <https://oinofytaweather.gr/datasummary.html>
- 182.** Iliopoulou, T.; Dimitriadis, P.; Siganou, A.; Markantonis, D.; Moraiti, K.; Nikolinakou, M.; Meletopoulos, I.T.; Mamassis, N.; Koutsoyiannis, D.; Sargentis, G.-F. Modern Use of Traditional Rainwater Harvesting Practices: An Assessment of Cisterns' Water Supply Potential in West Mani, Greece. *Heritage* 2022, 5, 2944-2954. <https://doi.org/10.3390/heritage5040152>
- 183.** Sargentis, G.-F.; Dimitriadis, P.; Ioannidis, R.; Iliopoulou, T.; Frangedaki, E.; Koutsoyiannis, D. Optimal utilization of water resources for local communities in mainland Greece (case study of Karyes, Peloponnese), *Procedia Manufacturing*, Volume 44, 2020, Pages 253-260, ISSN 2351-9789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.229>.
- 184.** Hadjibiros, K.; Katsiri, A.; Andreadakis, A.; Koutsoyiannis, D.; Stamou, A.; Christofides, A.; Efstratiadis, A.; Sargentis, G.-F. Multi-criteria reservoir water management, *Global NEST Journal*, 7(3), 386-394, 2005. <https://doi.org/10.30955/gnj.000394>
- 185.** Hadjibiros, K.; Katsiri, A.; Andreadakis, A.; Koutsoyiannis, D.; Stamou, A.; Christofides, A.; Efstratiadis, A.; Sargentis, G.-F. Multi-Criteria Reservoir Water Management, 9th

International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes island, Department of Environmental Studies, University of the Aegean, 2005.

186. Σαργέντης Γ.-Φ. και Ν. Μαμάσης, Συλλογή νερού σε συγκροτήματα & κατοικίες—σχεδιασμός για μικρές κλίμακες, ΚΤΙΠΙΟ 6/2021, 75–80, 2021.

187. Nikolinakou, M.; Moraiti, K.; Siganou, A.; Markantonis, D.; Sargentis, G.-F.; Iliopoulou, T.; Dimitriadis, P.; Meletopoulos, I.T.; Mamassis, N.; Koutsoyiannis, D. Investigating the water supply potential of traditional rainwater harvesting techniques used—A case study for the Municipality of Western Mani. In Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 223–227 May 2022; EGU22-3063.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3063>

188. Malamos N. (2025). Photovoltaic Park, Operational Data Logs, 2012-2024.

189. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Download Food Data Central Data. Available online: <https://fdc.nal.usda.gov/download-datasets.html>

190. D. Koutsoyiannis, Scale of water resources development and sustainability: Small is beautiful, large is great, Hydrological Sciences Journal, 56 (4), 553–575,
<https://doi.org/10.1080/02626667.2011.579076>

191. Ghaffour, N., et al. (2013). Technical review and evaluation of desalination systems. Desalination, 309, 23-41. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015>

192. Xu Tan, Mahyar Abedi, James F. Klausner, André Bénard, Modeling and experimental validation of light-splitting semi-transparent solar water heater using NIR cut-off film as the rooftop of a greenhouse for arid regions, Applied Energy, Volume 368, 2024, 123489, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123489>

193. Ansari, R., Liaqat, M. U., Khan, H. I., & Mushtaq, S. (2018). Energy Efficiency Analysis of Wheat Crop under Different Climate- and Soil-Based Irrigation Schedules. Proceedings, 2, 184. <https://doi.org/10.3390/ecws-2-04953>

194. Moradi, M., Nematollahi, M. A., Mousavi Khaneghah, A., Pishgar-Komleh, S. H., & Rajabi, M. R. (2018). Comparison of energy consumption of wheat production in conservation and conventional agriculture using DEA. Environmental Science and Pollution Research, 25, 35200–35209. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3424-x>

195. Ziaei, S. M., Mazlounzadeh, S. M., & Jabbary, M. (2015). A comparison of energy use and productivity of wheat and barley (case study). Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 14(1), 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.04.002>

196. Berners-Lee M, Kennelly C, Watson R, Hewitt CN. Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. Elementa Sci Anthropocene. 2018;6:52. <https://doi.org/10.1525/elementa.310>

197. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Download Food Data Central Data. Available online: <https://fdc.nal.usda.gov/download-datasets.html>1 (accessed on 28 May 2025).