



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ-ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

Βασίλειος Γκαράβελας (Α.Μ. 2619013)

Ανδριάννα Σκανδάλη (Α.Μ. 2619139)

Παπαχατζής Αλέξανδρος (Επιβλέπων καθηγητής)

ΛΑΡΙΣΑ, 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ - ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

Βασίλειος Γκαράβελας (Α.Μ. 2619013)
Ανδριάννα Σκανδάλη (Α.Μ. 2619139)

Παπαχατζής Αλέξανδρος (Επιβλέπων καθηγητής)

ΛΑΡΙΣΑ, 2025

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνουμε ότι είμαστε οι συγγραφείς της παρούσας ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ με τίτλο: «Θερμοκήπια και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)» που συντάχθηκε στα πλαίσια των υποχρεώσεων μας ως φοιτητές του Τμήματος Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας του ΠΘ.

Η αναφερόμενη Διπλωματική Εργασία δεν αποτελεί αντιγραφή από ηλεκτρονικές πηγές, έντυπες πηγές, μετάφραση από ξενόγλωσσες πηγές, αναπαραγωγή από άλλους ερευνητές/τριες ή φοιτητές/τριες, ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο κείμενο και στην βιβλιογραφία, κάθε εξωτερική βοήθεια αν υπήρξε, αναγνωρίζεται ρητά ακολουθώντας τα προβλεπόμενα περί αποφυγής της λογοκλοπής.

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΓΚΑΡΑΒΕΛΑΣ
ΑΝΔΡΙΑΝΑ ΣΚΑΝΔΑΛΗ

Πίνακα περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
1.Εισαγωγή	9
2. Θερμοκήπια: Ορισμός και λειτουργία.....	12
2.1 Έννοια των θερμοκηπίων και η λειτουργία τους	12
2.2 Πλεονεκτήματα της χρήσης θερμοκηπίων για την καλλιέργεια φυτών	14
2.3 Τύποι θερμοκηπίων: παραδοσιακά, σύγχρονα, και υπερσύγχρονα	16
2.4 Εφαρμογές θερμοκηπίων στον αγροτικό τομέα.....	18
3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).....	21
3.1 Ορισμός των ΑΠΕ και οι διάφοροι τύποι τους: ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, γεωθερμία, βιομάζα.....	21
3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ.....	26
3.3 Συμβολή των ΑΠΕ στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας.....	34
4. Σχέση Θερμοκηπίων και ΑΠΕ	36
4.1 Χρήση ΑΠΕ για τη λειτουργία των θερμοκηπίων	36
4.1.1 Ηλιακή ενέργεια: Θερμοκήπια με ηλιακά πάνελ ή θερμική ηλιακή ενέργεια για θέρμανση.....	36
4.1.2 Γεωθερμία: Χρήση γεωθερμικών συστημάτων για τη θέρμανση και ψύξη των θερμοκηπίων	37
4.1.3 Αιολική ενέργεια: Χρήση ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	39
4.1.4 Βιομάζα: Χρήση οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή θερμότητας ή ενέργειας.....	40
4.2 Οφέλη από τη χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια.....	41
4.2.1 Μείωση κόστους ενέργειας.....	41
4.2.2 Βελτίωση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας	42
4.2.3 Αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων (ρύπανση, κλιματική αλλαγή)	44
4.3 Περιβαλλοντικά οφέλη από την εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια.....	45
4.3.1 Μείωση εκπομπών CO ₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου	45
4.3.2 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της κυκλικότητας.....	46
4.3.3 Υποστήριξη της αειφορίας στη γεωργία.....	48
5. Προκλήσεις και Προοπτικές	50
6. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	61
Συμπεράσματα	71
Βιβλιογραφία	72

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία αφορά τα θερμοκήπια και τις ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της σύνδεσης μεταξύ των θερμοκηπίων και των ΑΠΕ, καθώς και η αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και προκλήσεων από την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στην αγροτική παραγωγή. Μέσα από την ανάλυση αυτή, στόχος είναι να αποσαφηνιστεί πώς οι ΑΠΕ, όπως ηλιακή ενέργεια, γεωθερμία, αιολική ενέργεια και βιομάζα, μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του ενεργειακού κόστους, την ενίσχυση της βιωσιμότητας και την προστασία του περιβάλλοντος στα θερμοκήπια. Επιπλέον, θα εξεταστούν οι τεχνολογικές δυνατότητες, οι γεωγραφικοί περιορισμοί, καθώς και οι πολιτικές και χρηματοδοτικές ευκαιρίες που επηρεάζουν την υιοθέτηση των ΑΠΕ στη γεωργία. Επίσης, σκοπός της είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών άλλων μελετητών, αναδεικνύοντας τα σημεία στα οποία συγκλίνουν και διαφέρουν. Πρόκειται για μία ενδιαφέρουσα εργασία που επιλέχθηκε για να διερευνήσει σε βάθος τη χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες, τα οφέλη και τις προκλήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή τους στη γεωργία.

Η εργασία αυτή διαρθρώνεται σε έξι (6) συνολικά κεφάλαια. Το 1^ο κεφάλαιο προβαίνει στην παράθεση εισαγωγικών στοιχείων για την μελέτη, ενώ το 2^ο κεφάλαιο προσδίδει πληροφορίες σχετικές με τα θερμοκήπια, ως προς την έννοια, τη λειτουργία, τα πλεονεκτήματα, τους τύπους και την εφαρμογή τους στον αγροτικό τομέα. Το 3^ο κεφάλαιο εστιάζει στις ΑΠΕ, προσδιορίζοντας το εννοιολογικό περιεχόμενο τους, τα οφέλη και τα μειονεκτήματά τους, αλλά και τη συμβολή τους στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ακολουθεί το 4^ο κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζεται η χρήση των ΑΠΕ για τη λειτουργία των θερμοκηπίων, τα οφέλη που προσδίδουν στα θερμοκήπια και στο περιβάλλον. Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τις προκλήσεις και τις προοπτικές της χρήσης των ΑΠΕ στα θερμοκήπια, ενώ στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών που σχετίζονται με τη χρήση των ΑΠΕ στα θερμοκήπια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς μας ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μας, Παπαχατζή Αλέξανδρο, για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την αμέριστη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα μέλη του ακαδημαϊκού προσωπικού που συνέβαλαν με τις γνώσεις και τις υποδείξεις τους, καθώς και τους συμφοιτητές μας για τη συνεργασία και την ανταλλαγή ιδεών.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας και στους φίλους μας, που μας στήριξαν αδιάκοπα σε όλη αυτή τη διαδρομή, προσφέροντάς μας δύναμη και ενθάρρυνση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή εργασία με τίτλο «*Θερμοκήπια και ΑΠΕ*» επικεντρώνεται στη μελέτη της αξιοποίησης ΑΠΕ για τη λειτουργία των θερμοκηπίων, καθώς και στην επίδραση που έχουν αυτές οι τεχνολογίες στην ενεργειακή απόδοση, τη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική προστασία στον αγροτικό τομέα. Η εργασία εστιάζει επίσης στην ανασκόπηση αποτελεσμάτων πειραματικών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί από άλλους μελετητές.

Η μεθοδολογία της εργασίας στηρίζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση μέσω της οποίας διεξάγεται ενδελεχής ανάλυση και επεξεργασία υπάρχουσας επιστημονικής και τεχνικής βιβλιογραφίας, άρθρων, μελετών και ερευνών που σχετίζονται με τη χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια. Η συλλογή δεδομένων επιτυγχάνεται μέσα από ηλεκτρονικές μηχανές αναζήτησης, όπως Google Scholar και Scopus με την συμβολή λέξεων - κλειδιών.

Από την εργασία αυτή προέκυψε ότι η χρήση ΑΠΕ συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του ενεργειακού κόστους, ιδιαίτερα σε θερμοκήπια με υψηλές απαιτήσεις θέρμανσης και φωτισμού. Η μετάβαση από συμβατικές πηγές ενέργειας στις ΑΠΕ μπορεί να μειώσει το κόστος λειτουργίας και να ενισχύσει την οικονομική βιωσιμότητα των καλλιεργειών.

Το γενικό συμπέρασμα είναι πως η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βιώσιμη γεωργία, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Με τη συνεχή τεχνολογική πρόοδο και την υποστήριξη κατάλληλων πολιτικών, τα θερμοκήπια που αξιοποιούν ΑΠΕ μπορούν να αποτελέσουν πρότυπο για το μέλλον της ενεργειακά αποδοτικής γεωργίας.

Λέξεις – κλειδιά: θερμοκήπια, ΑΠΕ, περιβάλλον, προστασία, εφαρμογή, αποτελέσματα

ABSTRACT

The thesis entitled "Greenhouses and RES" focuses on the study of the utilization of RES for the operation of greenhouses, as well as on the impact that these technologies have on energy efficiency, sustainability and environmental protection in the agricultural sector. The work also focuses on reviewing the results of experimental research carried out by other researchers.

The methodology of the work is based on a literature review through which a thorough analysis and processing of existing scientific and technical literature, articles, studies and research related to the use of RES in greenhouses is carried out. Data collection is achieved through electronic search engines, such as Google Scholar and Scopus with the contribution of keywords.

This work showed that the use of RES contributes substantially to reducing energy costs, especially in greenhouses with high heating and lighting requirements. The transition from conventional energy sources to RES can reduce operating costs and enhance the economic viability of crops. The overall conclusion is that the use of RES in greenhouses is an important step towards sustainable agriculture, offering significant environmental and economic benefits. With continued technological progress and the support of appropriate policies, greenhouses that utilize RES can become a model for the future of energy-efficient agriculture.

Keywords: greenhouses, RES, environment, protection, implementation, results

1. Εισαγωγή

Η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί ζωτικής σημασίας προσπάθεια για την διατήρηση της φυσικής ισορροπίας του πλανήτη. Περιλαμβάνει τη λήψη μέτρων που αποσκοπούν στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, στη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων και στην αποτροπή της κλιματικής αλλαγής (Mehboob et al., 2019; Dumitriu, 2021; Ermakova, 2022). Η διατήρηση της βιοποικιλότητας μέσω της προστασίας των ειδών και των οικοσυστημάτων είναι επίσης αναγκαία για τη διασφάλιση της οικολογικής ισορροπίας (Wang et al, 2024). Η κλιματική αλλαγή, από την άλλη, επιβάλλει την ανάληψη δράσεων για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με διεθνείς συμφωνίες όπως το Πρωτόκολλο του Κιότο και η Συμφωνία των Παρισίων (Hautereau-Boutonnet & Maljean-Dubois, 2022).

Η προστασία του περιβάλλοντος, όμως, δεν είναι ευθύνη μόνο των κυβερνήσεων ή των οργανισμών, αλλά αφορά και κάθε άτομο ξεχωριστά. Κάθε πολίτης μπορεί να συμβάλει με καθημερινές συνήθειες, όπως η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η χρήση οικολογικών προϊόντων, η αποφυγή της σπατάλης νερού, αλλά και η υιοθέτηση ενός πιο βιώσιμου τρόπου ζωής. Η εκπαίδευση και η ευαισθητοποίηση παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο, καθώς μέσα από τη σωστή ενημέρωση οι πολίτες αποκτούν την ικανότητα να κατανοήσουν τη σημασία της διατήρησης του φυσικού περιβάλλοντος και να λάβουν ενεργό μέρος στις προσπάθειες προστασίας του (Kulin & Sevä, 2019; Liu et al., 2023; Awewomom et al., 2024).

Επιπλέον, η συνεργασία σε τοπικό επίπεδο, όπως με πρωτοβουλίες καθαρισμού παραλιών ή ενίσχυσης της αναδάσωσης, μπορεί να δώσει μεγαλύτερη δυναμική στις προσπάθειες προστασίας του περιβάλλοντος. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η αλληλεγγύη και η συνεργασία μεταξύ κρατών είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση κοινών προκλήσεων, όπως η κλιματική αλλαγή, που επηρεάζει όλο τον πλανήτη. Είναι ένα ζήτημα που συνδέεται άρρηκτα με τη βιώσιμη ανάπτυξη, δηλαδή την ικανοποίηση των σημερινών αναγκών χωρίς να θέτουμε σε κίνδυνο τις μελλοντικές γενιές. Η προώθηση της αειφορίας σε όλους τους τομείς, από την οικονομία μέχρι την καθημερινότητα, είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση ενός καλύτερου μέλλοντος για τον πλανήτη (Ermakova, 2022; Wang et al, 2024).

Οι ΑΠΕ αποτελούν ένα κρίσιμο εργαλείο για τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο. Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν πηγές όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, οι οποίες δεν εξαντλούνται και δεν

επιβαρύνουν το περιβάλλον με ρύπους. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, που συνδέονται με την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ρύπων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο είναι υπεύθυνο για την κλιματική αλλαγή (Constante & Erazo, 2024; Saleh & Hassan, 2024).

Η μετάβαση σε ΑΠΕ απαιτεί επενδύσεις σε υποδομές, τεχνολογικές καινοτομίες, αλλά και πολιτικές στήριξης από τις κυβερνήσεις. Παράλληλα, η ενσωμάτωσή τους στο ενεργειακό σύστημα μπορεί να ενισχύσει την ενεργειακή ασφάλεια, να μειώσει το κόστος παραγωγής ενέργειας και να συμβάλει στην επίτευξη των στόχων για μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ, επομένως, δεν αποτελούν μόνο λύση για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά και στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την προστασία του περιβάλλοντος και την εξασφάλιση ενός καθαρού και υγιούς μέλλοντος (Lu et al., 2020; Bakhsh et al., 2024).

Τα θερμοκήπια αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιώσιμη γεωργία, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τις συμβατικές καλλιέργειες. Πρόκειται για κλειστούς χώρους που χρησιμοποιούν τον ήλιο για να δημιουργήσουν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη των φυτών. Η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση φυσικών μεθόδων για τη διατήρηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του φωτισμού, επιτρέποντας την καλλιέργεια φυτών ανεξάρτητα από τις εποχές και τις κλιματικές συνθήκες. Συνολικά, τα θερμοκήπια προσφέρουν έναν βιώσιμο τρόπο καλλιέργειας, που προστατεύει το περιβάλλον, εξοικονομεί φυσικούς πόρους και ενισχύει την παραγωγή, καθιστώντας τα έναν κρίσιμο παράγοντα για τη βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργίας (Karanisa et al., 2022; Maraveas et al., 2023; Castro et al., 2024).

Μέσα από την παρούσα εργασία, σκοπός είναι η διερεύνηση της χρήσης των ΑΠΕ στα θερμοκήπια. Αρχικά, εξετάζεται η σημασία των θερμοκηπίων, η οποία παρέχει τη δυνατότητα καλλιέργειας φυτών σε ελεγχόμενο περιβάλλον, προστατεύοντας το έδαφος και μειώνοντας την εξάρτηση από χημικά λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Ακόμη, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, συμβάλλουν στη μείωση των ρύπων και στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης, εξασφαλίζοντας έναν καθαρότερο και πιο φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο παραγωγής ενέργειας. Παράλληλα, σκοπός της εργασίας είναι να αναδείξει τη συμβολή ΑΠΕ στα θερμοκήπια, παρουσιάζοντας τα βασικά πλεονεκτήματα κάθε πρακτικής, καθώς και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται κατά τη χρήση τους. Η

ανάλυση της σημασίας των ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποσκοπεί στην κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στην ενέργεια, τη γεωργία και τη βιώσιμη περιβαλλοντική προστασία.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, αναμένεται να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την ανάγκη ενίσχυσης της χρήσης ΑΠΕ στα θερμοκήπια, καθώς και να επισημανθούν οι στρατηγικές που μπορούν να συμβάλλουν στην υιοθέτησή τους από περισσότερους φορείς, οργανισμούς και πολίτες.

2. Θερμοκήπια: Ορισμός και λειτουργία

2.1 Έννοια των θερμοκηπίων και η λειτουργία τους

Η έννοια των θερμοκηπίων αναφέρεται σε κλειστούς ή ημικλειστούς χώρους που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια φυτών, προστατεύοντάς τα από εξωτερικές συνθήκες και επιτρέποντας την ανάπτυξη τους σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Τα θερμοκήπια δημιουργούν συνθήκες που είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών, εστιάζοντας στη θερμοκρασία, την υγρασία και το φως, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών ή της εποχής. Η κύρια λειτουργία τους είναι να παρέχουν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για τη βλάστηση, την ανάπτυξη των φυτών και τη διατήρηση της παραγωγικότητας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (Dalai et al., 2020; Achour et al., 2021).

Τα θερμοκήπια χρησιμοποιούν φυσικά ή τεχνητά μέσα για τη διαχείριση του μικροκλίματος, όπως είναι τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, αερισμού και άρδευσης. Επιπλέον, τα σύγχρονα θερμοκήπια αξιοποιούν τη χρήση ΑΠΕ, όπως ηλιακά πάνελ ή γεωθερμικά συστήματα, για να μειώσουν την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα της καλλιέργειας (Badji et al., 2022).

Η έννοια των θερμοκηπίων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της βιώσιμης γεωργίας, καθώς συμβάλλουν στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, προστατεύουν το έδαφος από τη διάβρωση, εξοικονομούν νερό και μειώνουν τη χρήση χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Ταυτόχρονα, η καλλιέργεια σε θερμοκήπια παρέχει μεγαλύτερη απόδοση σε μικρότερη έκταση, κάτι που είναι κρίσιμο για την κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης τροφίμων με βιώσιμο τρόπο (Achour et al., 2021). Αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο που αξιοποιείται για την προστασία του περιβάλλοντος, τη μείωση της σπατάλης φυσικών πόρων και την ενίσχυση της παραγωγικότητας στη γεωργία, ενώ παράλληλα προσφέρουν τη δυνατότητα ανάπτυξης φυτών σε ελεγχόμενο και φιλικό προς το περιβάλλον (Zhang, et al., 2022; Singh et al., 2024).

Η λειτουργία των θερμοκηπίων στηρίζεται στη δημιουργία ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος για την καλλιέργεια φυτών, προστατεύοντάς τα από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως οι χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, οι βροχοπτώσεις, ο άνεμος και οι έντονες ηλιακές ακτίνες. Η λειτουργία τους βασίζεται στη σωστή διαχείριση της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του φωτισμού και του αέρα,

ώστε να παρέχεται ένα ιδανικό περιβάλλον ανάπτυξης για τα φυτά, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες (Iddio et al., 2020).

Τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας ενός θερμοκηπίου περιλαμβάνουν:

- **Θερμοκρασία:** Το θερμοκήπιο διατηρεί σταθερές θερμοκρασίες που ευνοούν την ανάπτυξη των φυτών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω συστημάτων θέρμανσης κατά τη διάρκεια των ψυχρών περιόδων ή με σκίαση και αερισμό στις θερμές μέρες.
- **Υγρασία:** Η υγρασία στο θερμοκήπιο ελέγχεται μέσω του αερισμού και της άρδευσης, ώστε να διατηρείται σε επίπεδα που ευνοούν την ανάπτυξη των φυτών, αποτρέποντας τη δημιουργία ασθενειών που προκαλούνται από την υγρασία.
- **Φως:** Το θερμοκήπιο αξιοποιεί φυσικό ή τεχνητό φως για να παρέχει στα φυτά την απαραίτητη φωτοσύνθεση. Τα σύγχρονα θερμοκήπια συχνά χρησιμοποιούν υαλοπίνακες ή πλαστικά φύλλα που μεταφέρουν το φυσικό φως ή ενσωματώνουν τεχνητό φωτισμό.
- **Άρδευση:** Το σύστημα άρδευσης στο θερμοκήπιο επιτρέπει την αποδοτική χρήση νερού, μέσω σταγόνας ή άλλων μεθόδων, εξοικονομώντας πολύτιμο πόρο.
- **Αερισμός:** Το φυσικό ή τεχνητό σύστημα αερισμού διασφαλίζει ότι υπάρχει επαρκής κυκλοφορία αέρα μέσα στο θερμοκήπιο, βοηθώντας στη μείωση της υγρασίας και στη βελτίωση της ποιότητας του μικροκλίματος (Dalai et al., 2020; Achour et al., 2021).

Η λειτουργία των θερμοκηπίων αποσκοπεί στην προστασία των καλλιεργειών από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες, την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση της εξάρτησης από χημικά λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Παράλληλα, συμβάλλει στη βιώσιμη γεωργία, εξοικονομώντας φυσικούς πόρους όπως το νερό, το έδαφος και την ενέργεια, ενώ επιτρέπει την καλλιέργεια προϊόντων υψηλής ποιότητας σε μικρότερη έκταση (Achour et al., 2021).

2.2 Πλεονεκτήματα της χρήσης θερμοκηπίων για την καλλιέργεια φυτών

Η χρήση θερμοκηπίων για την καλλιέργεια φυτών προσφέρει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα που ενισχύουν τη βιώσιμη γεωργία και τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (Savic & Ilin, 2022). Παρακάτω αναφέρονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης θερμοκηπίων:

- **Ελεγχόμενο περιβάλλον καλλιέργειας:** Τα θερμοκήπια παρέχουν τη δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη των φυτών, ανεξαρτήτως των εξωτερικών καιρικών συνθηκών. Αυτό περιλαμβάνει τη σταθερή θερμοκρασία, την υγρασία και το φως, που συμβάλλουν στην επιτυχή καλλιέργεια ακόμα και σε δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες.
- **Αυξημένη παραγωγικότητα:** Η καλλιέργεια σε θερμοκήπια μπορεί να έχει υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με την παραδοσιακή γεωργία, καθώς τα φυτά προστατεύονται από παράσιτα, ασθένειες και έντονες καιρικές μεταβολές. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή παραγωγή φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, χωρίς μεγάλες απώλειες λόγω φυσικών καταστροφών.
- **Προστασία από ασθένειες και παράσιτα:** Τα θερμοκήπια λειτουργούν ως φυσικό «φράγμα» απέναντι σε ασθένειες και παράσιτα που επηρεάζουν τις καλλιέργειες. Ο κλειστός χώρος, σε συνδυασμό με τη χρήση βιολογικών μεθόδων καλλιέργειας, μειώνει σημαντικά τη χρήση χημικών φυτοφαρμάκων, προστατεύοντας το περιβάλλον και τα προϊόντα.
- **Οικονομική εξοικονόμηση πόρων:** Η καλλιέργεια σε θερμοκήπια εξοικονομεί νερό μέσω αποδοτικότερης άρδευσης, όπως το σύστημα άρδευσης με σταγόνες. Επιπλέον, η χρήση συστημάτων θέρμανσης, σκίασης και ανανέωσης του αέρα επιτρέπει την αποφυγή σπατάλης ενέργειας και φυσικών πόρων.
- **Μειωμένη σπατάλη νερού:** Στα θερμοκήπια, η άρδευση γίνεται με μετρημένο τρόπο, συχνά μέσω συστημάτων άρδευσης στάγδην, που εξασφαλίζουν ότι το νερό χρησιμοποιείται αποδοτικά, αποφεύγοντας τη σπατάλη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε νερό.

- **Αυξημένος έλεγχος στην καλλιέργεια:** Τα θερμοκήπια προσφέρουν τη δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών (θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμός). Αυτό καθιστά πιο εύκολη την προσαρμογή των συνθηκών στις ανάγκες των καλλιεργειών.
- **Δυνατότητα καλλιέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους:** Η χρήση θερμοκηπίων επιτρέπει την καλλιέργεια φυτών ανεξαρτήτως εποχής, δίνοντας τη δυνατότητα στους γεωργούς να παράγουν όλο τον χρόνο. Αυτό ενισχύει τη βιωσιμότητα και την ανταγωνιστικότητα των καλλιεργειών.
- **Προστασία από τις καιρικές συνθήκες:** Τα θερμοκήπια προστατεύουν τις καλλιέργειες από τις έντονες καιρικές συνθήκες, όπως οι βροχοπτώσεις, οι χαμηλές θερμοκρασίες, ο παγετός ή οι καύσωνες, που μπορεί να καταστρέψουν την παραγωγή στην ανοικτή γεωργία.
- **Δυνατότητα καλλιέργειας σε δύσκολες περιοχές:** Τα θερμοκήπια παρέχουν τη δυνατότητα καλλιέργειας σε περιοχές με περιορισμένες φυσικές συνθήκες, όπως άγονες ή άνυδρες περιοχές, ενισχύοντας την αυτονομία των τοπικών κοινωνιών και την ανάπτυξη βιώσιμων πρακτικών γεωργίας.
- **Προστασία του περιβάλλοντος:** Η χρήση θερμοκηπίων συμβάλλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, καθώς οι καλλιέργειες γίνονται με λιγότερη ανάγκη για χημικά λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Επιπλέον, οι ΑΠΕ μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων (Nemali, 2022; Chacha et al., 2023).

Τα θερμοκήπια, λοιπόν, προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα τόσο από την άποψη της παραγωγικότητας όσο και της προστασίας του περιβάλλοντος, αποτελώντας ένα σημαντικό εργαλείο για τη βιώσιμη γεωργία και τη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές μεθόδους καλλιέργειας (Robson et al., 2022).

2.3 Τύποι θερμοκηπίων: παραδοσιακά, σύγχρονα, και υπερσύγχρονα

Τα θερμοκήπια διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους, ανάλογα με τη σχεδίαση, την τεχνολογία και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους: τα παραδοσιακά, τα σύγχρονα και τα υπερσύγχρονα θερμοκήπια. Κάθε τύπος έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και εφαρμογές, ανάλογα με τις ανάγκες της καλλιέργειας και τις απαιτήσεις παραγωγής (Dalai et al., 2020; Zhang et al., 2022).

Παραδοσιακά θερμοκήπια

Τα παραδοσιακά θερμοκήπια είναι η πιο βασική μορφή θερμοκηπίων, που χρησιμοποιούν απλά υλικά και βασίζονται σε φυσικές μεθόδους για τη διαχείριση των συνθηκών καλλιέργειας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνά περιλαμβάνουν ξύλο, πέτρα και γυαλί ή πλαστικό για τη δημιουργία ενός προστατευμένου χώρου. Τα παραδοσιακά θερμοκήπια παρέχουν περιορισμένο έλεγχο στις παραμέτρους περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και το φως, γεγονός που τα καθιστά πιο κατάλληλα για μικρές καλλιέργειες ή τοπικές ανάγκες (Jameel et al., 2021).

Το κύριο πλεονέκτημα των παραδοσιακών θερμοκηπίων είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και η απλότητα στη χρήση. Δεν απαιτούν την ένταξη προηγμένων τεχνολογιών, όπως αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου ή προηγμένα υλικά, γεγονός που τα καθιστά προσιτά οικονομικά. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα πλήρους ελέγχου της θερμοκρασίας ή της υγρασίας. Παρόλα αυτά, τα παραδοσιακά θερμοκήπια είναι μια αξιόπιστη λύση για όσους επιθυμούν να καλλιεργούν φυτά με βασική προστασία από τις αντίξοες συνθήκες (Chacha et al., 2023).

Αν και δεν είναι τόσο προηγμένα όσο τα σύγχρονα ή υπερσύγχρονα θερμοκήπια, τα παραδοσιακά θερμοκήπια εξακολουθούν να προσφέρουν σημαντική αξία, ειδικά σε περιοχές όπου ο προϋπολογισμός είναι περιορισμένος ή σε τοπικό επίπεδο όπου απαιτείται χαμηλού κόστους λύση για την καλλιέργεια φυτών (Jameel et al., 2021).

Σύγχρονα θερμοκήπια

Τα σύγχρονα θερμοκήπια αποτελούν μια εξέλιξη των παραδοσιακών θερμοκηπίων, ενσωματώνοντας σύγχρονα υλικά και τεχνολογίες για την αποτελεσματικότερη καλλιέργεια φυτών. Αυτού του είδους τα θερμοκήπια αξιοποιούν προηγμένα υλικά, όπως θερμομονωτικά πλαστικά φύλλα ή υαλοπίνακες ειδικής τεχνολογίας, τα οποία

εξασφαλίζουν καλύτερη θερμομόνωση και ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον, χρησιμοποιούν αυτοματοποιημένα συστήματα, όπως αισθητήρες που παρακολουθούν την υγρασία, τη θερμοκρασία και το φως, τα οποία επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση του μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο (Ghoulem et al., 2019).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των σύγχρονων θερμοκηπίων είναι ο βελτιωμένος έλεγχος των συνθηκών καλλιέργειας. Με τη βοήθεια των αυτοματοποιημένων συστημάτων, οι αγρότες μπορούν να παρακολουθούν και να προσαρμόζουν τις συνθήκες σύμφωνα με τις ανάγκες των φυτών, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες αποδόσεις και καλύτερη ποιότητα προϊόντων. Επίσης, τα σύγχρονα θερμοκήπια συχνά διαθέτουν συστήματα άρδευσης στάγδην, που εξοικονομούν νερό και ενέργεια. Αυτή η τεχνολογία καθιστά τα σύγχρονα θερμοκήπια πιο αποδοτικά, τόσο σε επίπεδο παραγωγικότητας όσο και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (Karanisa et al., 2022).

Παρά το γεγονός ότι το κόστος κατασκευής και λειτουργίας ενός σύγχρονου θερμοκηπίου είναι υψηλότερο από εκείνο των παραδοσιακών θερμοκηπίων, η επένδυση αυτή είναι συμφέρουσα μακροπρόθεσμα, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα συνεχιζόμενης καλλιέργειας όλο το χρόνο, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Τα σύγχρονα θερμοκήπια είναι ιδανικά για επαγγελματική γεωργία, καθώς μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά κλίματα και να εξασφαλίσουν την παραγωγή υψηλής ποιότητας προϊόντων με μικρότερο κόστος και λιγότερες απώλειες (Achour et al., 2021).

Υπερσύγχρονα θερμοκήπια

Τα υπερσύγχρονα θερμοκήπια αποτελούν την πιο εξελιγμένη μορφή θερμοκηπίων, συνδυάζοντας τεχνολογία αιχμής, αυτοματοποιημένα συστήματα και προηγμένα υλικά για την εντατική καλλιέργεια φυτών. Αυτά τα θερμοκήπια εξοπλίζονται με προηγμένους αισθητήρες, υπολογιστές και αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου, που παρακολουθούν και ρυθμίζουν με ακρίβεια όλες τις παραμέτρους του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η φωτεινότητα και ο αερισμός. Επιπλέον, αξιοποιούν ΑΠΕ, όπως ηλιακά πάνελ ή γεωθερμία, για τη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές πηγές ενέργειας (Koukounaras, 2021).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των υπερσύγχρονων θερμοκηπίων είναι η άριστη διαχείριση όλων των συνθηκών καλλιέργειας, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή υψηλής ποιότητας προϊόντων ανεξαρτήτως κλιματολογικών συνθηκών. Τα

συστήματα αυτοματισμού προσαρμόζουν συνεχώς το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και τη μείωση των απωλειών λόγω καιρικών φαινομένων ή ασθενειών. Οι καλλιέργειες γίνονται πιο αποδοτικές, ενώ παράλληλα μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χάρη στη λιγότερη χρήση χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων (Costa et al., 2020; Guo et al., 2024).

Τα υπερσύγχρονα θερμοκήπια είναι ιδανικά για μεγάλες εκμεταλλεύσεις και επιχειρήσεις γεωργίας, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα για παραγωγή όλο το χρόνο, με ελάχιστες παρεμβάσεις. Παρά το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης, τα πλεονεκτήματά τους αποδεικνύονται μακροπρόθεσμα, καθώς διασφαλίζουν τη συνεχή και ποιοτική παραγωγή, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν τη σπατάλη ενέργειας και φυσικών πόρων (Paris et al., 2022).

2.4 Εφαρμογές θερμοκηπίων στον αγροτικό τομέα

Τα θερμοκήπια βρίσκουν πολυάριθμες εφαρμογές στον αγροτικό τομέα, προσφέροντας λύσεις για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, την προστασία των καλλιεργειών από τις καιρικές συνθήκες, και την αξιοποίηση των φυσικών πόρων με βιώσιμο τρόπο. Η χρήση θερμοκηπίων έχει επεκταθεί σε διάφορους τομείς γεωργίας, επιτρέποντας τη διαρκή καλλιέργεια φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ανεξαρτήτως εποχών (Maraveas et al., 2023).

Μια από τις βασικές εφαρμογές των θερμοκηπίων είναι η καλλιέργεια λαχανικών και φρούτων, που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες και προστασία από τις έντονες καιρικές συνθήκες (Squalli & Adamkiewicz, 2018). Τα θερμοκήπια παρέχουν τις ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης, μέσω ελεγχόμενης θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτισμού, γεγονός που αυξάνει την παραγωγικότητα και τη συνολική ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Επιπλέον, η καλλιέργεια σε θερμοκήπια ενδείκνυται για καλλιέργειες που έχουν υψηλές απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά και δεν μπορούν να ευδοκιμήσουν σε ανοικτό έδαφος (Sari et al., 2023).

Με άλλα λόγια, αυτό εξασφαλίζει ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης, ανεξαρτήτως εποχής, επιτρέποντας την παραγωγή όλο το χρόνο. Τα θερμοκήπια προστατεύουν τις καλλιέργειες από τις ακραίες θερμοκρασίες, τα έντονα καιρικά φαινόμενα, αλλά και τις ασθένειες που μπορούν να μεταδοθούν από το έδαφος ή την επαφή με τα εξωτερικά περιβάλλοντα. Αυτή η εφαρμογή καθιστά τα θερμοκήπια ιδανικά για την

καλλιέργεια ευαίσθητων φυτών που χρειάζονται σταθερές συνθήκες για να αναπτυχθούν υγιεινά και να αποδώσουν με τη μέγιστη δυνατή παραγωγικότητα (Maraveas et al., 2023).

Σημειώνεται επίσης πως τα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή φυτωρίων, δηλαδή μικρών φυτών που προορίζονται για μεταφύτευση σε μεγαλύτερους αγρούς. Η καλλιέργεια φυτωρίων σε ελεγχόμενο περιβάλλον εξασφαλίζει την ταχεία ανάπτυξη και την υψηλή ποιότητα των φυτών πριν από τη μεταφύτευση στο χωράφι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιβίωσης και της απόδοσης των καλλιεργειών, με λιγότερες πιθανότητες ασθενειών ή ζημιών από τις καιρικές μεταβολές (Squalli & Adamkiewicz, 2018).

Στα θερμοκήπια, παρέχονται ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης, όπως ελεγχόμενη θερμοκρασία, υγρασία και φωτισμός, που ενισχύουν την ταχεία και υγιή ανάπτυξη των φυτών. Με τη σωστή φροντίδα, τα φυτώρια που παράγονται σε θερμοκήπια είναι δυνατόν να αναπτυχθούν γρήγορα και να αποκτήσουν γερά φυτά πριν μεταφυτευτούν στο χωράφι. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη γεωργία, καθώς τα υγιή φυτά που προέρχονται από φυτώρια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν με επιτυχία στον αγρό, οδηγώντας σε αύξηση της παραγωγικότητας και της απόδοσης των καλλιεργειών (Maraveas et al., 2023).

Επιπλέον, τα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται επίσης για τη δοκιμή νέων ποικιλιών φυτών και την ανάπτυξη νέων τεχνικών καλλιέργειας. Οι αγρότες μπορούν να πειραματιστούν με διαφορετικές μεθόδους καλλιέργειας ή να αναπτύξουν νέες ποικιλίες, καθώς τα θερμοκήπια προσφέρουν τον ιδανικό χώρο για ελεγχόμενες συνθήκες ανάπτυξης. Η έρευνα και η καινοτομία στον αγροτικό τομέα έχουν επωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή θερμοκηπίων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανθεκτικών ποικιλιών που είναι καλύτερα προσαρμοσμένες στις σύγχρονες γεωργικές συνθήκες (Hosny et al., 2024).

Το ελεγχόμενο περιβάλλον των θερμοκηπίων επιτρέπει στους γεωργούς, ερευνητές και επιστήμονες να πειραματιστούν με διαφορετικά είδη σπόρων, να δοκιμάσουν νέες γενετικές ποικιλίες και να εξετάσουν την προσαρμογή τους σε διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης. Οι ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, φωτός και υγρασίας στα θερμοκήπια προσφέρουν ιδανικές συνθήκες για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των φυτών, την ανάλυση της απόδοσης και τη συγκέντρωση δεδομένων που οδηγούν σε βελτιώσεις της καλλιέργειας (Squalli & Adamkiewicz, 2018).

Επιπρόσθετα, τα θερμοκήπια δίνουν τη δυνατότητα δοκιμής νέων τεχνικών καλλιέργειας, όπως η χρήση διαφορετικών μεθόδων άρδευσης, η εναλλαγή καλλιεργειών ή η εφαρμογή διαφορετικών λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Αυτές οι πειραματικές διαδικασίες σε θερμοκήπια βοηθούν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των καλλιεργειών και στη δημιουργία καινοτόμων πρακτικών που μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία σε μεγαλύτερους αγρούς. Έτσι, τα θερμοκήπια γίνονται σημαντικά εργαλεία για την έρευνα και την ανάπτυξη νέων μεθόδων γεωργίας, συμβάλλοντας στη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων και στην προσαρμογή στις νέες γεωργικές απαιτήσεις (Hoseinzadeh & Garcia, 2024).

Τέλος, τα θερμοκήπια έχουν χρησιμοποιηθεί και για τη βιολογική καλλιέργεια, όπου τα φυτά καλλιεργούνται χωρίς τη χρήση χημικών φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων. Σε αυτά τα θερμοκήπια, εφαρμόζονται πρακτικές όπως η χρήση οργανικών λιπασμάτων, η κομποστοποίηση, η εφαρμογή εντομοπαραγόντων που βασίζονται σε φυσικές ουσίες και η ενσωμάτωση βιολογικών εχθρών για την καταπολέμηση των επιβλαβών οργανισμών (Tittarelli, 2020). Τα φυτά καλλιεργούνται μέσα σε ελεγχόμενο περιβάλλον, όπου οι συνθήκες παρακολουθούνται προσεκτικά, εξασφαλίζοντας την υγιή ανάπτυξή τους χωρίς την ανάγκη χημικών παρεμβάσεων. Αυτή η εφαρμογή των θερμοκηπίων στη βιολογική καλλιέργεια προάγει τη βιώσιμη γεωργία, προστατεύει το περιβάλλον, και παρέχει στους καταναλωτές προϊόντα υψηλής ποιότητας, χωρίς υπολείμματα χημικών. Τα θερμοκήπια αποτελούν ένα κρίσιμο εργαλείο για τη γεωργία με ελάχιστη παρέμβαση και συμβάλλουν στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και της υγιεινής διατροφής (Bergstrand, 2022).

3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

3.1 Ορισμός των ΑΠΕ και οι διάφοροι τύποι τους: ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, γεωθερμία, βιομάζα

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για την απεξάρτηση από τις μη ΑΠΕ, όπως τα ορυκτά καύσιμα, καθώς αυτές επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον και συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή (Arcelay et al., 2021). Η χρήση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου εκλύει μεγάλες ποσότητες ρύπων, ενώ ταυτόχρονα εξαντλούνται ως πηγές. Για το λόγο αυτό, έχει γίνει ιδιαίτερα σημαντική η μετάβαση στις ΑΠΕ (Al-Yasiri et al., 2020). Οι ΑΠΕ είναι φυσικές πηγές ενέργειας που προέρχονται από φυσικά φαινόμενα και διεργασίες, οι οποίες είναι πρακτικά ανεξάντλητες ή ανανεώνονται συνεχώς. Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν πηγές όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμία, και η βιομάζα. Αυτές οι πηγές δεν εξαντλούνται, καθώς η ενέργειά τους ανανεώνεται από φυσικά φαινόμενα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι κυματισμοί, και οι γεωλογικές διεργασίες (Kaartemo & Gonzalez-Perez, 2019; Lokkas et al., 2023).

Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση για τη βιώσιμη ανάπτυξη, καθώς παρέχουν ενέργεια με ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις ορυκτές πηγές ενέργειας, όπως ο λιγνίτης και το πετρέλαιο, που εκλύουν διοξείδιο του άνθρακα και άλλες ρυπογόνες ουσίες, οι ΑΠΕ συμβάλλουν στη μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και στην προστασία του περιβάλλοντος. Επομένως, ο ορισμός των ΑΠΕ περιλαμβάνει φυσικές πηγές που προσφέρουν καθαρή και ανανεώσιμη ενέργεια, χωρίς να εξαρτώνται από εξαντλήσιμους πόρους (Shinn, 2018; Neha & Joon, 2021).

Η ακριβής έννοια των ΑΠΕ αναφέρεται στις φυσικές πηγές ενέργειας που ανανεώνονται συνεχώς και δεν εξαντλούνται. Μπορεί να περιγραφεί συνολικά ή ανά κατηγορία, ανάλογα με τις πηγές και τον τρόπο αξιοποίησής τους (Μπόκας, 2019; Maradin, 2021; Romanova & Masalkova, 2021).

Σύμφωνα με το άρθρο 2 του Ν. 2773/1999, Άρθρο 2 ως ΑΠΕ νοούνται οι φυσικές πηγές ενέργειας που προέρχονται από διαδικασίες και φαινόμενα που επαναλαμβάνονται φυσικά και μπορούν να ανανεώνονται, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, τα ύδατα, η γεωθερμία και η βιομάζα. Αυτές οι πηγές παρέχουν ενέργεια με τρόπο που δεν εξαντλείται σε ανθρώπινο χρόνο και έχουν ως στόχο την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Το άρθρο αυτό αποσαφηνίζει ότι οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν την ηλιακή, την αιολική, την υδροηλεκτρική, την γεωθερμική ενέργεια και τη βιομάζα. Ο σκοπός της ανάπτυξης και αξιοποίησης των ΑΠΕ, όπως ορίζεται από το νόμο, είναι η ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας της χώρας, η προστασία του περιβάλλοντος και η μείωση των εκπομπών ρύπων, μέσω της αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων με καθαρές μορφές ενέργειας (Harjanne & Korhonen, 2019; Al-Yasiri et al., 2020).

Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές ΑΠΕ, καθώς προέρχεται από την ακτινοβολία του ήλιου, η οποία είναι συνεχώς διαθέσιμη και δεν εξαντλείται. Είναι μια καθαρή και άφθονη πηγή ενέργειας, που δεν παράγει ρύπους ή τοξικές ουσίες κατά την αξιοποίησή της. Αντίθετα, η χρήση της συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς δεν εκλύει διοξείδιο του άνθρακα ή άλλες επιβλαβείς εκπομπές (Dutta et al., 2022).

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους, όπως μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, ηλιακοί θερμοσίφωνες αξιοποιούν την ηλιακή θερμότητα για την παραγωγή ζεστού νερού στα νοικοκυριά. Οι εφαρμογές της είναι ευρύτατες και καλύπτουν τόσο οικιακές όσο και βιομηχανικές ανάγκες, ενώ η τοπική χρήση της επιτρέπει την ενεργειακή αυτονομία, ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς σύνδεση με το δίκτυο (Abdul et al., 2022).

Το πλεονέκτημα της ηλιακής ενέργειας είναι ότι παρέχει καθαρή ενέργεια με μηδενικές εκπομπές ρύπων, ενώ η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται, καθιστώντας την πιο αποδοτική και οικονομικά προσιτή. Παράλληλα, η δυνατότητα τοπικής παραγωγής μέσω ηλιακών πάνελ ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και αυτονομία, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αποτελεί, συνεπώς, μια βιώσιμη λύση για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει το περιβάλλον και προάγει τη βιώσιμη ανάπτυξη (Sebestyén, 2021).

Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια προέρχεται από τη μετακίνηση του αέρα, η οποία είναι μια φυσική, ανανεώσιμη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Αυτή η μορφή ενέργειας αξιοποιείται μέσω της χρήσης ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική

ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια είναι καθαρή και δεν παράγει εκπομπές ρύπων, όπως διοξείδιο του άνθρακα, συμβάλλοντας στη μείωση της κλιματικής αλλαγής και στη προστασία του περιβάλλοντος (Alrikabi, 2014; Li et al., 2022).

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας μπορεί να γίνει τόσο σε μεγάλα αιολικά πάρκα που εγκαθίστανται σε πεδιάδες ή κοντά σε θαλάσσιες περιοχές, όσο και μέσω μικρότερων ανεμογεννητριών που μπορούν να εγκατασταθούν σε οικιακά ή αγροτικά περιβάλλοντα (Erdiwansyah et al., 2021; Roga et al., 2022). Η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας εξελίσσεται διαρκώς, καθιστώντας τις ανεμογεννήτριες μεγαλύτερες και πιο αποδοτικές, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (Khaleefah & Jabir, 2012; Sadorsky, 2021).

Η αιολική ενέργεια προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η δημιουργία καθαρής ενέργειας χωρίς ρύπους, η τοπική παραγωγή ενέργειας που μπορεί να ενισχύσει την ενεργειακή ασφάλεια και αυτονομία, και η συμβολή στη βιώσιμη ανάπτυξη. Επίσης, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και στην προώθηση της μετάβασης σε μια πιο βιώσιμη ενεργειακή οικονομία. Η αιολική ενέργεια αποτελεί, συνεπώς, μια βιώσιμη λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Alrikabi, 2014).

Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο παλαιές και ευρέως χρησιμοποιούμενες ΑΠΕ. Προέρχεται από την εκμετάλλευση της δύναμης των υδάτων, είτε μέσω των ποταμών είτε μέσω τεχνητών ταμιευτήρων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη μετατροπή της κινητικής ή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδροηλεκτρικών σταθμών (Deshmukh et al., 2023). Επιπλέον, είναι μια αξιόπιστη και συνεχή πηγή ενέργειας, καθώς τα υδάτινα ρεύματα διαρκούν και επαναλαμβάνονται φυσικά. Ωστόσο, για την εκμετάλλευση της, απαιτείται η κατασκευή φραγμάτων ή ταμιευτήρων, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον και τις φυσικές οικοσυστημικές ισορροπίες (Bayazit, 2021).

Η υδροηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα όσο και σε μικρότερες υδροηλεκτρικές μονάδες που είναι εγκατεστημένες σε ποτάμια ή ρέματα. Τα πλεονεκτήματά της περιλαμβάνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης

ενέργειας, καθώς τα φράγματα επιτρέπουν την προσωρινή αποθήκευση του νερού για παραγωγή ενέργειας κατά τις περιόδους ζήτησης. Επίσης, συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή ασφάλεια, αφού εκμεταλλεύεται φυσικούς πόρους που δεν εξαντλούνται (Batel & Küpers, 2023).

Ωστόσο, η χρήση της υδροηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι χωρίς περιβαλλοντικές προκλήσεις. Τα φράγματα και τα ταμιευτήρια επηρεάζουν το φυσικό περιβάλλον, διαταράσσουν τα οικοσυστήματα και προκαλούν αλλαγές στη φυσική ροή των ποταμών. Παρόλα αυτά, παραμένει μια από τις πιο σημαντικές πηγές καθαρής ενέργειας, με σημαντική συνεισφορά στη βιώσιμη ανάπτυξη και στην προώθηση της ενεργειακής μετάβασης (Anakhov et al., 2022).

Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια προέρχεται από τη θερμότητα που βρίσκεται βαθιά κάτω από την επιφάνεια της Γης. Αυτή η πηγή ενέργειας αξιοποιεί τη θερμότητα που υπάρχει στα πετρώματα και το νερό κάτω από την επιφάνεια της Γης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας. Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια από τις πιο καθαρές μορφές ΑΠΕ, καθώς δεν παράγει εκπομπές ρύπων και δεν εξαντλείται, αφού η θερμότητα της Γης ανανεώνεται συνεχώς (Soltani et al., 2021).

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τη θερμοκρασία που υπάρχει στο σημείο εγκατάστασης. Σε ορισμένες περιοχές, όπου υπάρχει υψηλή γεωθερμική δραστηριότητα, χρησιμοποιούνται γεωθερμικοί σταθμοί που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας που αναβλύζει από το έδαφος. Σε άλλες περιοχές, η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για θέρμανση κτιρίων μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (Mott et al., 2022).

Παράλληλα, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Είναι μια αξιόπιστη και σταθερή πηγή ενέργειας, που λειτουργεί ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και τις εποχές. Επίσης, δεν παράγει ρύπους και συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, προάγοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη (Rahman et al., 2022a). Παρόλα αυτά, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας δεν είναι χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εκμετάλλευση μπορεί να προκαλέσει μικρές σεισμικές δονήσεις, καθώς και την απελευθέρωση φυσικών αερίων από το υπέδαφος. Παρ' όλα αυτά, παραμένει μια από τις πιο βιώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας, που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή μετάβαση και την προστασία του περιβάλλοντος (Soltani et al., 2021; Yilmaz, 2021).

Βιομάζα

Η βιομάζα είναι μια ΑΠΕ που προέρχεται από οργανικά υλικά, όπως φυτικά υπολείμματα, αγροτικά απόβλητα, ξύλο, κλαδέματα, φύλλα, αλλά και από απόβλητα από τη γεωργία και την κτηνοτροφία. Αυτά τα υλικά μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμη και βιοκαυσίμων. Η βιομάζα ανανεώνεται φυσικά μέσω της φωτοσύνθεσης, γι' αυτό και θεωρείται μια βιώσιμη και ΑΠΕ (Rahman et al., 2022a).

Χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες μορφές, όπως καύση σε ειδικούς σταθμούς παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, βιομεθάνωση για την παραγωγή βιοαερίου, αλλά και για την παραγωγή υγρών καυσίμων όπως το βιοντίζελ. Η χρήση της βιομάζας είναι σημαντική, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί σε τοπικό επίπεδο, μειώνοντας την ανάγκη για εισαγόμενα καύσιμα και ενισχύοντας την ενεργειακή αυτονομία των τοπικών κοινοτήτων. Είναι μια πηγή ενέργειας, που παράγει λιγότερους ρύπους συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης, συμβάλλει στη μείωση των απορριμμάτων, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί οργανικά υλικά που διαφορετικά θα κατέληγαν ως απόβλητα (Benti et al., 2021).

Ωστόσο, η εκμετάλλευση της βιομάζας δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Η κακή διαχείριση των γεωργικών και δασικών εκτάσεων μπορεί να προκαλέσει απώλεια βιοποικιλότητας, ενώ η εντατική χρήση της βιομάζας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των φυσικών πόρων, εφόσον δεν γίνεται με βιώσιμο τρόπο. Παρ' όλα αυτά, η βιομάζα αποτελεί μια σημαντική και καθαρή επιλογή για τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας στην ενεργειακή μετάβαση και τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα (Rahman et al., 2022a).

3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ

Οι ΑΠΕ προσφέρουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία συμβάλλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη, την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και στην οικονομική και ενεργειακή αυτονομία (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021). Ακολουθούν τα βασικά πλεονεκτήματα που συνδέονται με τις ΑΠΕ:

1. Δε εξαντλούνται

Οι ΑΠΕ δεν θα εξαντληθούν, καθώς βασίζονται σε φυσικούς πόρους που συνεχώς ανανεώνονται και υπάρχουν άφθονα στη φύση. Αντίθετα από τα ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, οι ΑΠΕ εκμεταλλεύονται πηγές ενέργειας που δεν εξαρτώνται από το χρόνο ή την εξάντληση, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, τα νερά και η βιομάζα (Freires et al., 2023). Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τη συνεχή ακτινοβολία του ήλιου, η οποία είναι απεριόριστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο άνεμος είναι επίσης μια ΑΠΕ, που προέρχεται από τη μετακίνηση του αέρα και είναι διαθέσιμος σε πολλές περιοχές του πλανήτη (Al-Yasiri et al., 2020). Τα υδάτινα ρεύματα και οι φυσικές πηγές, όπως τα ποτάμια και οι λίμνες, παρέχουν επίσης συνεχή ροή νερού, που μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Σε αντίθεση με τα μη ανανεώσιμα καύσιμα, οι ΑΠΕ είναι άφθονες και δεν πρόκειται να εξαντληθούν, αφού ανανεώνονται από τη φύση. Αυτό καθιστά τις ΑΠΕ μια βιώσιμη και μακροπρόθεσμη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, χωρίς τον κίνδυνο εξάντλησης φυσικών πόρων (Anakhov et al., 2022).

2. Χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ΑΠΕ είναι οι χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης που απαιτούν, συγκριτικά με τις συμβατικές ενεργειακές πηγές. Αυτό οφείλεται στη φύση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ. Για παράδειγμα, οι ηλιακοί συλλέκτες και οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς την ανάγκη συχνής συντήρησης. Οι ανεμογεννήτριες απαιτούν περιοδικό έλεγχο και λίπανση, ενώ τα ηλιακά πάνελ χρειάζονται κυρίως καθαρισμό για την απομάκρυνση της σκόνης και άλλων ακαθαρσιών, ώστε να διατηρείται η απόδοσή τους (Maradin, 2021).

Επιπλέον, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας από γεωθερμία ή υδροηλεκτρική ενέργεια έχουν λιγότερες κινούμενες μηχανικές μονάδες, με αποτέλεσμα να απαιτούν λιγότερες επισκευές και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μονάδες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (Anakhon et al., 2022; Freires et al., 2023).

Αντίθετα, οι μονάδες που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα χρειάζονται συχνή συντήρηση, καθώς περιλαμβάνουν πιο περίπλοκες διαδικασίες καύσης και εκτεθειμένα εξαρτήματα που υπόκεινται σε φθορά. Επίσης, η λειτουργία τους συνεπάγεται τη διαχείριση καυσίμων και αποβλήτων, κάτι που αυξάνει το κόστος και τις ανάγκες συντήρησης. Η χαμηλή ανάγκη συντήρησης για τις ΑΠΕ συνεπάγεται χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των συστημάτων και μειωμένες διακοπές λειτουργίας, καθιστώντας τις ιδιαίτερα ελκυστικές τόσο για ιδιώτες όσο και για επιχειρήσεις που επενδύουν στη βιώσιμη ενέργεια (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

3. Εξοικονόμηση χρημάτων

Η χρήση των ΑΠΕ συμβάλλει σημαντικά στην εξοικονόμηση χρημάτων, τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις επιχειρήσεις και τα κράτη. Παρόλο που η αρχική επένδυση σε εγκαταστάσεις ΑΠΕ μπορεί να είναι υψηλή, τα οφέλη που προκύπτουν σε βάθος χρόνου υπερκαλύπτουν αυτό το κόστος. Οι ΑΠΕ αξιοποιούν φυσικούς πόρους, όπως τον ήλιο, τον άνεμο, το νερό και τη βιομάζα, οι οποίοι είναι δωρεάν και ανεξάντλητοι. Αυτό σημαίνει ότι, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας, δεν υπάρχει ανάγκη για αγορές καυσίμων, όπως πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, κάτι που μειώνει δραστικά το λειτουργικό κόστος (Anakhon et al., 2022).

Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Για παράδειγμα, τα ηλιακά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν για χρόνια με ελάχιστες παρεμβάσεις, ενώ οι παραδοσιακές μονάδες απαιτούν συνεχή συντήρηση και αντικατάσταση εξαρτημάτων, που συνεπάγονται υψηλό κόστος. Οι τιμές των ορυκτών καυσίμων είναι ευμετάβλητες και επηρεάζονται από παράγοντες όπως γεωπολιτικές κρίσεις και αυξήσεις στη ζήτηση. Η στροφή στις ΑΠΕ προστατεύει από τέτοιες διακυμάνσεις, εξασφαλίζοντας σταθερό κόστος παραγωγής ενέργειας και προστατεύοντας τους καταναλωτές από αυξήσεις στις τιμές (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

Σε πολλές χώρες, οι κυβερνήσεις προσφέρουν οικονομικά κίνητρα, όπως επιδοτήσεις, φοροαπαλλαγές και προγράμματα χρηματοδότησης, για την εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ. Αυτά μειώνουν το αρχικό κόστος επένδυσης και ενισχύουν την εξοικονόμηση χρημάτων. Οι καταναλωτές που επενδύουν σε συστήματα ΑΠΕ, όπως τα ηλιακά πάνελ, μπορούν να παράγουν τη δική τους ενέργεια και να μειώσουν ή να μηδενίσουν τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας. Σε πολλές περιπτώσεις, οι πλεονάζουσες ποσότητες ενέργειας μπορούν να πωληθούν πίσω στο δίκτυο, αποφέροντας επιπλέον εισόδημα (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

Παρόλο που οι αρχικές επενδύσεις σε τεχνολογίες ΑΠΕ μπορεί να φαίνονται υψηλές, η μακροχρόνια χρήση τους οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση. Η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ έχει χαμηλότερο κόστος ανά κιλοβατώρα συγκριτικά με τις παραδοσιακές πηγές. Η μετάβαση στις ΑΠΕ αποτελεί όχι μόνο περιβαλλοντική αλλά και οικονομική επιλογή. Η δυνατότητα εξοικονόμησης χρημάτων, σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά οφέλη, καθιστά τις ΑΠΕ μια επένδυση που ωφελεί τόσο το άτομο όσο και την κοινωνία συνολικά (Kaartemo & Gonzalez-Perez, 2020; Anakhov et al., 2022).

4. Περιβαλλοντικά οφέλη

Οι ΑΠΕ προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, συμβάλλοντας στην προστασία του πλανήτη και στη βιώσιμη ανάπτυξη. Η χρήση τους μειώνει τη ρύπανση, διατηρεί τους φυσικούς πόρους και βοηθά στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Οι ΑΠΕ δεν παράγουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) ή άλλους ρύπους κατά την παραγωγή ενέργειας, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και περιορίζει τις αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, όπως η άνοδος της θερμοκρασίας και η τήξη των πάγων (Freires et al., 2023).

Οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, δεν εκπέμπουν τοξικούς ρύπους, όπως διοξείδιο του θείου (SO₂) και οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία ευθύνονται για την όξινη βροχή και την υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Έτσι, βελτιώνεται η υγεία του πληθυσμού, καθώς μειώνονται οι αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ προστατεύει τους περιορισμένους φυσικούς πόρους, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, που εξαντλούνται με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, πηγές όπως ο ήλιος, ο άνεμος και το νερό είναι ανεξάντλητες και διαθέσιμες σε αφθονία (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

Η εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων συχνά συνοδεύεται από περιβαλλοντικές καταστροφές, όπως η αποψίλωση των δασών και η μόλυνση του εδάφους και των υδάτων. Οι ΑΠΕ, όταν εγκαθίστανται με κατάλληλο σχεδιασμό, έχουν πολύ μικρότερες επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και προστατεύουν τα οικοσυστήματα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας, που παράγουν απόβλητα και τοξικές ουσίες, οι ΑΠΕ έχουν ελάχιστα ή μηδενικά παραπροϊόντα. Αυτό περιορίζει τη ρύπανση των υδάτων, του εδάφους και της ατμόσφαιρας (Neha & Joon, 2021).

Οι διαδικασίες εξόρυξης και μεταφοράς καυσίμων προκαλούν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως διαρροές πετρελαίου, καταστροφή οικοσυστημάτων και μόλυνση των υδάτων. Η μετάβαση στις ΑΠΕ μειώνει αυτές τις δραστηριότητες και τις επιπτώσεις τους. Η χρήση της βιομάζας, που βασίζεται στην αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων, ενισχύει την κυκλική οικονομία, προάγοντας την επαναχρησιμοποίηση και τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων (Freires et al., 2023).

Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν καθοριστικά στην προστασία του περιβάλλοντος, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής. Η ευρεία υιοθέτησή τους αποτελεί κρίσιμο βήμα για την αντιμετώπιση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προκλήσεων και τη διασφάλιση ενός υγιούς πλανήτη για τις επόμενες γενιές (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

5. Χαμηλότερη εξάρτηση από ξένες πηγές ενέργειας

Η αξιοποίηση των ΑΠΕ συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από ξένες πηγές ενέργειας, ενισχύοντας την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια των χωρών. Η μετάβαση στις ΑΠΕ επιτρέπει στις χώρες να αξιοποιούν τους δικούς τους φυσικούς πόρους, μειώνοντας την ανάγκη εισαγωγής ορυκτών καυσίμων (Alrikabi, 2014). Οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα, είναι άφθονες και διαθέσιμες σε πολλές χώρες. Με την κατάλληλη επένδυση σε αυτές τις πηγές, οι χώρες μπορούν να καλύψουν μεγάλο μέρος των ενεργειακών τους αναγκών από τοπικά αποθέματα, περιορίζοντας την ανάγκη εισαγωγής καυσίμων (Lu et al., 2020).

Η εξάρτηση από τις ξένες πηγές ενέργειας εκθέτει τις χώρες στις διεθνείς διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και άλλων καυσίμων. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ προστατεύει από αυτές τις αυξομειώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερό και προβλέψιμο κόστος ενέργειας. Η εισαγωγή ενέργειας συνεπάγεται εξάρτηση από άλλες χώρες, κάτι που μπορεί να είναι προβληματικό σε περιόδους

γεωπολιτικής αστάθειας. Οι ΑΠΕ μειώνουν αυτή την εξάρτηση, δίνοντας στις χώρες μεγαλύτερο έλεγχο επί της ενεργειακής τους πολιτικής και αποτρέποντας διακοπές στον ενεργειακό εφοδιασμό (Maradin, 2021; Freires et al., 2023).

Η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ μειώνει την ανάγκη εισαγωγής ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα να εξοικονομούνται σημαντικά ποσά συναλλάγματος. Αυτά τα κεφάλαια μπορούν να επενδυθούν σε άλλους τομείς της οικονομίας, όπως η εκπαίδευση, η υγεία και οι υποδομές. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ ενισχύει την τοπική οικονομία, καθώς δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας σε τομείς όπως η κατασκευή, η συντήρηση και η διαχείριση εγκαταστάσεων ΑΠΕ. Αυτό ενισχύει την αυτάρκεια της χώρας και περιορίζει την εξάρτηση από εξωτερικούς προμηθευτές (Neha & Joon, 2021).

Οι ΑΠΕ ευθυγραμμίζονται με τις παγκόσμιες προσπάθειες για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη ενεργειακής βιωσιμότητας. Επενδύοντας στις ΑΠΕ, οι χώρες μειώνουν την εξάρτησή τους από ενεργειακές πηγές που ενδέχεται να μην είναι συμβατές με μελλοντικές περιβαλλοντικές πολιτικές. Η μετάβαση στις ΑΠΕ προσφέρει στις χώρες την ευκαιρία να αποκτήσουν μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία, να μειώσουν την οικονομική τους εξάρτηση από τις παγκόσμιες αγορές καυσίμων και να ενισχύσουν την εθνική τους ασφάλεια. Με τον τρόπο αυτό, οι ΑΠΕ λειτουργούν ως πυλώνας βιωσιμότητας και σταθερότητας για το ενεργειακό μέλλον (Abdul et al., 2022).

6. Καθαρότητα

Η αξιοποίηση των ΑΠΕ συμβάλλει καθοριστικά στη διατήρηση του καθαρού νερού και αέρα, μειώνοντας τη ρύπανση που προκαλείται από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Η χρήση των ΑΠΕ προστατεύει το περιβάλλον και βελτιώνει την ποιότητα ζωής, περιορίζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Οι παραδοσιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν άνθρακα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως διοξείδιο του θείου (SO₂), οξείδια του αζώτου (NO_x) και αιωρούμενα σωματίδια (Lu et al., 2020). Αυτοί οι ρύποι ευθύνονται για τη δημιουργία όξινης βροχής, φωτοχημικού νέφους και αναπνευστικών προβλημάτων. Αντίθετα, οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, δεν

παράγουν ρύπους κατά τη λειτουργία τους, συμβάλλοντας σε καθαρότερο αέρα και σε βελτίωση της δημόσιας υγείας (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

Η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού για την ψύξη των σταθμών παραγωγής και τη λειτουργία των διαδικασιών εξόρυξης και διύλισης. Αυτές οι δραστηριότητες συχνά μολύνουν τα υδάτινα συστήματα με χημικές ουσίες και θερμική ρύπανση. Αντίθετα, οι ΑΠΕ έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε νερό και δεν παράγουν τοξικά απόβλητα, συμβάλλοντας στη διατήρηση της καθαρότητας των υδάτινων πόρων (Abdul et al., 2022; Freires et al., 2023).

Οι διαδικασίες εξόρυξης, μεταφοράς και αποθήκευσης πετρελαίου και φυσικού αερίου ενέχουν τον κίνδυνο περιβαλλοντικών ατυχημάτων, όπως πετρελαιοκηλίδες, που καταστρέφουν θαλάσσια οικοσυστήματα και μολύνουν τις πηγές νερού. Οι ΑΠΕ, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, εξαλείφουν αυτούς τους κινδύνους. Η ρύπανση του αέρα και του νερού από ορυκτά καύσιμα έχει σοβαρές συνέπειες για τη βιοποικιλότητα, καταστρέφοντας οικοσυστήματα και απειλώντας πολλά είδη φυτών και ζώων. Οι ΑΠΕ, με την καθαρή και βιώσιμη παραγωγή ενέργειας που προσφέρουν, συμβάλλουν στην προστασία των φυσικών οικοτόπων (Lu et al., 2020).

Η αξιοποίηση της βιομάζας ως πηγής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση οργανικών αποβλήτων, αποτρέποντας τη μόλυνση του εδάφους και των υδάτων (Al-Yasiri et al., 2020). Επιπλέον, η βιομάζα παράγει λιγότερους ρύπους σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, προάγοντας τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων. Η μείωση της καύσης ορυκτών καυσίμων μέσω της χρήσης ΑΠΕ μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), οι οποίες συμβάλλουν στην οξίνιση των ωκεανών και στη διαταραχή των οικοσυστημάτων του νερού και του αέρα. Με τον τρόπο αυτό, οι ΑΠΕ βοηθούν στη διατήρηση ενός υγιούς περιβαλλοντικού ισοζυγίου (Neha & Joon, 2021).

Η χρήση των ΑΠΕ αποτελεί καθοριστικό βήμα για την προστασία του καθαρού αέρα και νερού. Με τη μετάβαση σε αυτές, μειώνεται η ρύπανση, διασφαλίζεται η βιωσιμότητα των φυσικών πόρων και ενισχύεται η ποιότητα ζωής τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον (Maradin, 2021).

7. Νέες θέσεις εργασίας

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ συμβάλλει ουσιαστικά στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, ενισχύοντας την απασχόληση και την οικονομική ανάπτυξη. Οι ευκαιρίες εργασίας που προκύπτουν αφορούν πολλούς τομείς, όπως την κατασκευή, την έρευνα, την εγκατάσταση και τη συντήρηση τεχνολογιών ΑΠΕ. Αρχικά, οι ΑΠΕ δημιουργούν θέσεις εργασίας σε όλο το φάσμα της ενεργειακής βιομηχανίας. Στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης (R&D), επιστήμονες και μηχανικοί εργάζονται για την καινοτομία, την αναβάθμιση τεχνολογιών και τη βελτίωση της απόδοσης συστημάτων όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά. Στη βιομηχανική παραγωγή, εργοστάσια κατασκευάζουν τον εξοπλισμό που απαιτείται για την εγκατάσταση ΑΠΕ, όπως ηλιακά πάνελ, γεωθερμικές αντλίες και εξαρτήματα αιολικών πάρκων (Erdiwansyah, 2021; Maradin, 2021).

Επιπλέον, στον τομέα της εγκατάστασης και συντήρησης, απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την τοποθέτηση, τη ρύθμιση και την επισκευή των συστημάτων ΑΠΕ. Η λειτουργία και η συντήρηση αυτών των εγκαταστάσεων προσφέρουν συνεχή απασχόληση, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου λειτουργούν μεγάλα αιολικά πάρκα (Al-Yasiri et al., 2020). Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα είναι ότι οι θέσεις εργασίας που δημιουργούν οι ΑΠΕ είναι τοπικές. Οι εγκαταστάσεις, η συντήρηση και η διαχείριση των υποδομών συχνά απαιτούν εργαζόμενους που ζουν κοντά στις περιοχές αυτές, ενισχύοντας την τοπική οικονομία και μειώνοντας την ανεργία στις κοινότητες (Abdul et al., 2022).

Τέλος, οι ΑΠΕ οδηγούν στη δημιουργία νέων ειδικοτήτων και στην ανάγκη για εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό. Νέες κατευθύνσεις στην εκπαίδευση και την κατάρτιση αναδύονται, καθώς η ενεργειακή μετάβαση απαιτεί επαγγελματίες με γνώσεις σε τεχνολογίες αιχμής. Η επένδυση στις ΑΠΕ, λοιπόν, όχι μόνο προάγει τη βιώσιμη ανάπτυξη αλλά και ανοίγει τον δρόμο για ένα ευρύτερο φάσμα επαγγελματικών ευκαιριών (Freires et al., 2023).

Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ καθιστούν τις μορφές αυτές ενέργειας ως μία από τις πιο βιώσιμες και απαραίτητες επιλογές για το μέλλον, ενισχύοντας την προστασία του περιβάλλοντος, την οικονομική ανάπτυξη και την ενεργειακή αυτονομία. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, δεν είναι απαλλαγμένες από συγκεκριμένα μειονεκτήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την αποτελεσματική ενσωμάτωσή τους στο ενεργειακό σύστημα (Neha & Joon, 2021).

Πρώτο σημαντικό μειονέκτημα είναι η μεταβλητότητα της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ. Για παράδειγμα, η αιολική ενέργεια εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και την ταχύτητα του ανέμου, που δεν είναι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ή του έτους. Παρόμοια, η ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από την ηλιοφάνεια, η οποία μπορεί να μειωθεί λόγω νεφοκάλυψης ή περιορισμένης διάρκειας ηλιοφάνειας, κυρίως κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Αυτή η ασυνέχεια στη ροή της ενέργειας δημιουργεί ανάγκες για αποθήκευση ενέργειας ή για εφεδρικά συστήματα παραγωγής, που να καλύπτουν τις περιόδους χαμηλής παραγωγής (Al-Yasiri et al., 2020).

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα αφορά το υψηλό κόστος εγκατάστασης σε ορισμένες περιπτώσεις. Παρά την πρόοδο στην τεχνολογία, οι αρχικές επενδύσεις για την κατασκευή έργων ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά πάρκα ή ανεμογεννήτριες, εξακολουθούν να είναι υψηλές. Αυτό δημιουργεί οικονομικά προβλήματα, ιδίως σε χώρες με λιγότερους οικονομικούς πόρους ή σε αναπτυσσόμενες περιοχές, όπου η πρόσβαση σε κεφάλαια μπορεί να είναι περιορισμένη (Deshmukh et al., 2023).

Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση και τη λειτουργία κάποιων έργων ΑΠΕ δεν είναι αμελητέες. Για παράδειγμα, η κατασκευή μεγάλων αιολικών πάρκων ή φωτοβολταϊκών πεδίων μπορεί να επηρεάσει το φυσικό τοπίο, την άγρια ζωή, καθώς και τις γεωργικές εκτάσεις. Τα έργα αυτά απαιτούν εκτεταμένες εκχερσώσεις και αλλαγές στο τοπίο, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της βιοποικιλότητας (Maradin, 2021).

Ακόμη, η συντήρηση και επισκευή των υποδομών ΑΠΕ μπορεί να είναι δαπανηρή, ιδίως σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε θαλάσσια έργα όπως οι ανεμογεννήτριες. Η συχνή συντήρηση των εγκαταστάσεων, η αντικατάσταση εξαρτημάτων και οι επισκευές των βλαβών αυξάνουν το συνολικό κόστος λειτουργίας, καθιστώντας την οικονομική βιωσιμότητα των έργων δύσκολη, ιδίως αν τα έργα δεν λειτουργούν στο μέγιστο δυναμικό τους (Neha & Joon, 2021).

Επιπλέον, οι ΑΠΕ παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα ενέργειας συγκριτικά με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας, όπως ο άνθρακας ή το πετρέλαιο. Αυτό σημαίνει ότι για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας απαιτούνται περισσότερες εγκαταστάσεις ΑΠΕ, καταναλώνοντας περισσότερους πόρους και εκτείνοντας το χώρο που χρειάζεται για την τοποθέτησή τους (Deshmukh et al., 2023).

Ο συνδυασμός όλων αυτών των μειονεκτημάτων καθιστά απαραίτητη τη συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών ΑΠΕ και την ανάπτυξη λύσεων που θα ενισχύουν την αποδοτικότητα, τη βιωσιμότητα και την οικονομική ανταγωνιστικότητα αυτών των ενεργειακών πηγών (Maradin, 2021).

3.3 Συμβολή των ΑΠΕ στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας

Η συμβολή των ΑΠΕ στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι καθοριστική, καθώς προσφέρουν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των ορυκτών καυσίμων. Τα έργα ΑΠΕ, όπως ηλιακά, αιολικά, γεωθερμικά και υδροηλεκτρικά, δεν παράγουν ρύπους και περιορίζουν την εξάρτηση από τις περιορισμένες και μη ΑΠΕ (Constante & Erazo, 2024).

Η χρήση ΑΠΕ συμβάλλει άμεσα στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων ρύπων που προκαλούν κλιματική αλλαγή. Οι τεχνολογίες ΑΠΕ, όπως τα ηλιακά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες, λειτουργούν χωρίς να εκπέμπουν καυσαέρια, γεγονός που σημαίνει ότι η ενέργεια που παράγουν είναι καθαρή και δεν συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Αυτό περιορίζει την περιβαλλοντική ρύπανση σε χώρους όπου κυριαρχούν οι συμβατικές μορφές ενέργειας, όπως οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν άνθρακα ή φυσικό αέριο (Kulín & Sevä, 2019).

Επιπλέον, οι ΑΠΕ μειώνουν τη χρήση φυσικών πόρων που εξαντλούνται, όπως το πετρέλαιο και το κάρβουνο, προστατεύοντας έτσι τα οικοσυστήματα από τις εξορυκτικές δραστηριότητες που τα καταστρέφουν. Τα έργα ανανεώσιμης ενέργειας, όπως τα αιολικά πάρκα και οι ηλιακοί σταθμοί, συνήθως κατασκευάζονται σε περιοχές με μικρή οικολογική επιβάρυνση, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Algarni et al., 2023).

Οι ΑΠΕ αποτελούν πηγές ενέργειας που μπορούν να αξιοποιηθούν τοπικά, χωρίς να εξαρτώνται από εξωτερικές προμήθειες, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία και μειώνει τη σπατάλη ενέργειας που προκύπτει από τη μεταφορά καυσίμων σε μακρινές περιοχές. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και της αιολικής ενέργειας επιτρέπει τη μικρότερη εξάρτηση από τα συμβατικά

ενεργειακά δίκτυα, κάτι που μειώνει τις απώλειες που σχετίζονται με τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας (Kulin & Sevä, 2019).

Ακόμη, η χρήση ΑΠΕ ενθαρρύνει την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών έξυπνης ενέργειας και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες και οι υβριδικές μονάδες παραγωγής. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας και τη χρήση της σε περιόδους που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή άνεμος, μειώνοντας έτσι τη σπατάλη ενέργειας (Algarni et al., 2023).

Η ανάπτυξη ΑΠΕ όχι μόνο προστατεύει το περιβάλλον, αλλά δημιουργεί και σημαντικά οικονομικά οφέλη. Η εγκατάσταση έργων ΑΠΕ δημιουργεί θέσεις εργασίας σε τομείς όπως η κατασκευή, η συντήρηση και η παραγωγή εξοπλισμού. Επιπλέον, η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της χρήσης ΑΠΕ μειώνει το κόστος για νοικοκυριά και επιχειρήσεις, βοηθώντας στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Η συμβολή των ΑΠΕ στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι κρίσιμη για τη βιώσιμη ανάπτυξη, καθώς ενισχύει τη μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας που έχουν μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και προάγουν την αειφόρο ανάπτυξη (Constante & Erazo, 2024).

4. Σχέση Θερμοκηπίων και ΑΠΕ

4.1 Χρήση ΑΠΕ για τη λειτουργία των θερμοκηπίων

4.1.1 Ηλιακή ενέργεια: Θερμοκήπια με ηλιακά πάνελ ή θερμική ηλιακή ενέργεια για θέρμανση

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο βιώσιμες και αποδοτικές μορφές ενέργειας, που μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, όπως η χρήση θερμικής ηλιακής ενέργειας στα θερμοκήπια. Τα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν ηλιακά πάνελ ή θερμική ηλιακή ενέργεια για θέρμανση προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα τόσο για τη βελτίωση των συνθηκών ανάπτυξης των φυτών όσο και για την εξοικονόμηση ενέργειας (Hassan et al., 2021).

Τα θερμοκήπια με ηλιακά πάνελ αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει συστήματα φωτισμού, αντλιών για άρδευση ή εξοπλισμού ελέγχου μικροκλίματος. Επιπλέον, τα ηλιακά πάνελ μπορούν να μετατρέψουν τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερική κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Αυτό περιορίζει την εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο και συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των καλλιεργειών (Savytskyi et al., 2020).

Η θερμική ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως στα θερμοκήπια για τη θέρμανση των χώρων, ιδίως σε περιοχές με κρύες κλιματολογικές συνθήκες. Τα συστήματα αυτά απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε θερμότητα, η οποία αποθηκεύεται και διοχετεύεται στις εγκαταστάσεις των θερμοκηπίων για τη θέρμανση του περιβάλλοντος. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η μείωση της ανάγκης για καυστήρες ή άλλες πηγές θέρμανσης που καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα, ενώ παράλληλα ενισχύεται η βιώσιμη διαχείριση της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο, βελτιώνοντας τις συνθήκες ανάπτυξης των φυτών (Hassan et al., 2021).

Η χρήση ηλιακής ενέργειας στα θερμοκήπια προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα:

- **Εξοικονόμηση ενέργειας:** Με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας, μειώνεται σημαντικά το κόστος θέρμανσης, ενώ παράλληλα περιορίζεται η εξάρτηση από συμβατικά καύσιμα.

- **Μείωση εκπομπών ρύπων:** Η θερμική ηλιακή ενέργεια δεν παράγει ρύπους, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων που επιβαρύνουν το περιβάλλον.
- **Αυξημένη αποδοτικότητα καλλιεργειών:** Η σταθερή θέρμανση των θερμοκηπίων μέσω ηλιακής ενέργειας βελτιώνει το μικροκλίμα, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και την ποιότητα των καλλιεργειών.
- **Βιωσιμότητα:** Η ηλιακή ενέργεια είναι ανανεώσιμη και άφθονη, γεγονός που καθιστά τη χρήση της μια βιώσιμη λύση για τη μακροχρόνια ενεργειακή αυτονομία των καλλιεργειών (Savytskyi et al., 2020).

Η συνδυασμένη χρήση ηλιακών πάνελ και θερμικής ηλιακής ενέργειας στα θερμοκήπια ενισχύει τη βιωσιμότητα των γεωργικών πρακτικών, βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση και προστατεύει το περιβάλλον, παρέχοντας ταυτόχρονα υψηλότερες αποδόσεις στις καλλιέργειες (Kim et al., 2023).

4.1.2 Γεωθερμία: Χρήση γεωθερμικών συστημάτων για τη θέρμανση και ψύξη των θερμοκηπίων

Η γεωθερμία αποτελεί μια από τις πιο βιώσιμες και αποδοτικές τεχνολογίες για τη θέρμανση και ψύξη των θερμοκηπίων. Χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της γης, τα γεωθερμικά συστήματα προσφέρουν μια σταθερή, οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον λύση για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στα θερμοκήπια (Al-Helal et al., 2022).

Τα γεωθερμικά συστήματα λειτουργούν αξιοποιώντας τη θερμότητα που προέρχεται από το έδαφος, η οποία αποθηκεύεται σε βάθος. Τα συστήματα αυτά αντλούν ζεστό νερό από το υπέδαφος ή το χρησιμοποιούν απευθείας για να θερμάνουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου. Αντίστοιχα, όταν οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, τα γεωθερμικά συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα ψύξης του χώρου μέσω της απορρόφησης θερμότητας και της απελευθέρωσής της πίσω στο έδαφος (Rahnama et al., 2018).

Αυτό το σύστημα προσφέρει έναν αποδοτικό τρόπο διαχείρισης της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο, καθώς η θερμότητα από το γεωθερμικό πεδίο είναι διαθέσιμη καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες στην επιφάνεια (Ahsan et al., 2025).

Η χρήση γεωθερμικών συστημάτων για τη θέρμανση και ψύξη των θερμοκηπίων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- **Σταθερή θερμοκρασία:** Τα γεωθερμικά συστήματα διατηρούν τη θερμοκρασία σταθερή, χωρίς διακυμάνσεις που προκαλούνται από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, κάτι που είναι κρίσιμο για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας:** Τα γεωθερμικά συστήματα καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με άλλες συμβατικές πηγές θέρμανσης, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας.
- **Μείωση εκπομπών ρύπων:** Η χρήση γεωθερμίας δεν εκπέμπει ρύπους, καθώς η θέρμανση του χώρου γίνεται με φυσικά αποθέματα ενέργειας που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης, προστατεύοντας το περιβάλλον από την ατμοσφαιρική ρύπανση.
- **Αυξημένη βιωσιμότητα:** Η γεωθερμία είναι μια ΑΠΕ που παρέχει μακροχρόνια λύση για τη διαχείριση της ενέργειας στα θερμοκήπια, χωρίς την ανάγκη εξωτερικών καυσίμων.
- **Βελτίωση αποδοτικότητας καλλιέργειας:** Με την ομοιόμορφη και σταθερή θερμοκρασία, τα φυτά μεγαλώνουν σε ιδανικές συνθήκες, βελτιώνοντας την παραγωγικότητα και την ποιότητα της καλλιέργειας (Al-Helal et al., 2022).

Η γεωθερμία προσφέρει μια μακροπρόθεσμη και βιώσιμη λύση για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στα θερμοκήπια. Η εγκατάσταση γεωθερμικών συστημάτων απαιτεί αρχικές επενδύσεις, αλλά μακροπρόθεσμα αποδεικνύεται οικονομικά συμφέρουσα, μειώνοντας το κόστος θέρμανσης και ψύξης, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει το περιβάλλον (Al-Helal et al., 2022). Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη νέων γεωθερμικών τεχνολογιών ανοίγουν τον δρόμο για μεγαλύτερη αξιοποίηση αυτής της πηγής ενέργειας, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη του αγροτικού τομέα, προστατεύοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον (Rahnama et al., 2018).

4.1.3 Αιολική ενέργεια: Χρήση ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο δημοφιλείς μορφές ΑΠΕ, η οποία αξιοποιείται με τη χρήση ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική, παρέχοντας μια καθαρή, φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία θερμοκηπίων ή άλλων γεωργικών εφαρμογών (Shahbazi et al., 2023).

Οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευές που αξιοποιούν τη δύναμη του ανέμου για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Σε θερμοκήπια, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα τροφοδοτήσει τις εγκαταστάσεις, είτε για τη σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Οι ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, καθιστώντας τις κατάλληλες για γεωργικές περιοχές με συνεχή παρουσία ανέμου (Reza et al., 2024).

Η χρήση αιολικής ενέργειας στα θερμοκήπια προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα:

- **Καθαρή και ΑΠΕ:** Η αιολική ενέργεια δεν παράγει ρύπους, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και στην προστασία του κλίματος.
- **Αυτονομία και ενεργειακή ανεξαρτησία:** Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να παράγουν τοπικά την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των θερμοκηπίων, ελαχιστοποιώντας τη χρήση εξωτερικών πηγών ηλεκτρισμού.
- **Εξοικονόμηση κόστους:** Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος ενέργειας για την άρδευση, τη θέρμανση ή άλλες λειτουργίες στα θερμοκήπια.
- **Μείωση εκπομπών CO₂:** Η αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας από αιολική ενέργεια συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου (Shahbazi et al., 2023).

Η αιολική ενέργεια παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες αξιοποίησης στον αγροτικό τομέα, καθώς προσφέρει μια σταθερή και οικονομικά βιώσιμη λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τοποθέτηση ανεμογεννητριών σε στρατηγικά σημεία, όπως κοντά σε περιοχές θερμοκηπίων με συνεχή παρουσία ανέμου, επιτρέπει την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας για τη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές πηγές. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η απόδοση των ανεμογεννητριών βελτιώνεται, γεγονός που καθιστά την αιολική ενέργεια όλο και πιο ελκυστική για τη γεωργία και τη βιώσιμη ανάπτυξη των θερμοκηπίων (Reza et al., 2024).

4.1.4 Βιομάζα: Χρήση οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή θερμότητας ή ενέργειας

Η βιομάζα αναφέρεται σε οργανικά υλικά που προέρχονται από φυτά, ζώα και γεωργικά ή βιομηχανικά απόβλητα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας ή θερμότητας. Η αξιοποίηση της βιομάζας αποτελεί μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον λύση για την ενεργειακή κάλυψη των θερμοκηπίων, καθώς τα οργανικά απόβλητα μετατρέπονται σε χρήσιμη ενέργεια για τη θέρμανση των χώρων ή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Jamal-Uddin et al., 2022).

Η βιομάζα στα θερμοκήπια μπορεί να προέλθει από διάφορες πηγές, όπως υπολείμματα καλλιεργειών, κομπόστ, ξύλα, απορρίμματα τροφών ή άλλα οργανικά απόβλητα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Τα συστήματα που αξιοποιούν τη βιομάζα μετατρέπουν αυτά τα υλικά μέσω διαδικασιών όπως η καύση ή η αεριοποίηση, με σκοπό την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού (Ajaj et al., 2024).

Η βιομάζα προέρχεται από την παραγωγή φυτικών ή ζωικών οργανικών υλικών που μπορούν να ανανεώνονται μέσω της καλλιέργειας. Η αξιοποίηση της βιομάζας προσφέρει την δυνατότητα για οικονομική ενέργεια, ελαχιστοποιώντας το κόστος θέρμανσης ή παραγωγής ενέργειας στο θερμοκήπιο. Με τη χρήση της βιομάζας, τα οργανικά απόβλητα μετατρέπονται σε χρήσιμη ενέργεια, περιορίζοντας τη συσσώρευση απορριμμάτων και συμβάλλοντας στην ορθή διαχείριση των αποβλήτων. Τα θερμοκήπια που διαθέτουν συστήματα βιομάζας επιτυγχάνουν ενεργειακή αυτονομία, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές καυσίμων. Η καύση ή αεριοποίηση της βιομάζας απελευθερώνει λιγότερες εκπομπές ρύπων σε

σχέση με ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης (Jamal-Uddin et al., 2022).

Η βιομάζα αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για την παραγωγή ενέργειας στα θερμοκήπια, καθώς είναι διαθέσιμη σε πολλές γεωργικές περιοχές και μπορεί να αξιοποιηθεί τοπικά. Η χρήση της προσφέρει μια βιώσιμη και οικονομικά συμφέρουσα μέθοδο για τη θέρμανση, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμη και για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι μέθοδοι μετατροπής της βιομάζας γίνονται όλο και πιο αποδοτικές, γεγονός που καθιστά αυτή την πηγή ενέργειας ιδανική για την ενσωμάτωσή της στις γεωργικές πρακτικές και την προστασία του περιβάλλοντος (Ajaj et al., 2024).

4.2 Οφέλη από τη χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια

4.2.1 Μείωση κόστους ενέργειας

Η μείωση κόστους ενέργειας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα οφέλη από τη χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια. Οι τεχνολογίες ΑΠΕ όπως ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες, γεωθερμικά συστήματα και βιομάζα παρέχουν καθαρές και οικονομικά προσιτές λύσεις που συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού κόστους ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των θερμοκηπίων. Η χρήση ενέργειας αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά έξοδα για τη λειτουργία των θερμοκηπίων, καθώς απαιτείται ενέργεια για την θέρμανση, τον φωτισμό, την άρδευση, καθώς και για τον κλιματισμό του χώρου. Με την ενσωμάτωση ΑΠΕ, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι δυνατή, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές και τις τιμές του πετρελαίου ή του φυσικού αερίου (Ahamed et al., 2019).

Τα ηλιακά πάνελ που τοποθετούνται στις στέγες ή γύρω από τα θερμοκήπια μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, παρέχοντας ενέργεια για τις καθημερινές ανάγκες των θερμοκηπίων. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μειώνει το κόστος ηλεκτρισμού και επιτρέπει στα θερμοκήπια να παράγουν την ενέργεια που χρειάζονται για να λειτουργήσουν χωρίς να εξαρτώνται από εισαγόμενα καύσιμα (Savytskyi et al., 2020).

Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται για τη θέρμανση και ψύξη των θερμοκηπίων, παρέχοντας οικονομική λύση ενέργειας που δεν εξαρτάται από μεταβαλλόμενες τιμές καυσίμων. Τα γεωθερμικά συστήματα παρέχουν σταθερή θερμική ενέργεια όλο το

χρόνο, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους θέρμανσης, που αποτελεί ένα από τα πιο συχνά έξοδα στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις (Al-Helal et al., 2022).

Η αιολική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί μέσω ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται στα θερμοκήπια. Τα αιολικά συστήματα μπορούν να παράγουν τοπική ηλεκτρική ενέργεια, αντικαθιστώντας μέρος της ανάγκης για εξωτερικό ηλεκτρισμό. Αυτό οδηγεί σε μείωση του κόστους ενέργειας και αυξάνει την ενεργειακή αυτονομία των θερμοκηπίων (Shahbazi et al., 2023).

Η βιομάζα προέρχεται από οργανικά απόβλητα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή θερμότητας ή ενέργειας. Η καύση βιομάζας προσφέρει σταθερή και προσιτή πηγή ενέργειας για τα θερμοκήπια, εξοικονομώντας μεγάλο μέρος από το κόστος που δαπανάται για την προμήθεια καυσίμων όπως το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο (Ajaaj et al., 2024).

Η μείωση του κόστους ενέργειας μέσω της χρήσης ΑΠΕ αποτελεί κρίσιμο πλεονέκτημα για τα θερμοκήπια. Με την αξιοποίηση ηλιακής, γεωθερμικής, αιολικής ενέργειας ή βιομάζας, τα θερμοκήπια μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τα έξοδα που σχετίζονται με την ενέργεια, μειώνοντας ταυτόχρονα την εξάρτηση από εξωτερικούς προμηθευτές καυσίμων και ενισχύοντας την οικονομική βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής (Ahamed et al., 2019).

4.2.2 Βελτίωση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας

Η βελτίωση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας μέσω της χρήσης ΑΠΕ στα θερμοκήπια είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για την ενσωμάτωση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών. Οι ΑΠΕ συμβάλλουν στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, στη βελτίωση της χρήσης φυσικών πόρων και στην επίτευξη μιας πιο ισορροπημένης σχέσης ανάμεσα στην παραγωγή τροφίμων και την προστασία του περιβάλλοντος (Liantas et al., 2023).

Η χρήση ΑΠΕ, όπως η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η αιολική ενέργεια ή η βιομάζα, δεν παράγει άμεσα ρύπους που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αντικαθιστώντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας στα θερμοκήπια, οι ΑΠΕ μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων που επιβαρύνουν το περιβάλλον (Yakub et al., 2024).

Η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια ενισχύει την ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς προσφέρουν συνεχή και αξιόπιστη ενέργεια που προέρχεται από φυσικές πηγές. Αυτό

σημαίνει ότι λιγότερη ενέργεια χρειάζεται για να διατηρηθούν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών, βελτιώνοντας τη συνολική χρήση των φυσικών πόρων (Ghiasi et al., 2025).

Οι ΑΠΕ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, βασίζονται σε ανανεώσιμους φυσικούς πόρους (ήλιο, αέρα, γεωθερμία, βιομάζα), οι οποίοι ανανεώνονται φυσικά και δεν εξαντλούνται. Αυτό συμβάλλει στη διατήρηση φυσικών πόρων, αποτρέποντας την εξάντληση και προστατεύοντας το οικοσύστημα (Yakub et al., 2024).

Η αξιοποίηση της ηλιακής ή γεωθερμικής ενέργειας ελαχιστοποιεί την ανάγκη για ενέργεια που βασίζεται στο νερό, όπως η χρήση πετρελαίου ή φυσικού αερίου που συχνά περιλαμβάνει την άντληση και τη χρήση υδάτινων πόρων. Αυτό προστατεύει τα υδατικά αποθέματα και συμβάλλει στη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Επιτρέπει την καύση οργανικών αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας, μειώνοντας ταυτόχρονα τον όγκο των απορριμμάτων που καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτό μειώνει τη ρύπανση και προάγει τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων (Liantas et al., 2023).

Η εγκατάσταση ΑΠΕ στα θερμοκήπια μπορεί να συμβάλει στην προστασία της βιοποικιλότητας, καθώς αποφεύγεται η ρύπανση που προκαλούν οι εκπομπές συμβατικών καυσίμων. Επιπλέον, η αναζήτηση κατάλληλων τεχνολογιών ΑΠΕ μπορεί να ενσωματωθεί αρμονικά στο τοπικό περιβάλλον, προάγοντας τη διατήρηση του φυσικού τοπίου. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ στα θερμοκήπια παρέχει την ευκαιρία να εκπαιδευτούν οι αγρότες σχετικά με βιώσιμες πρακτικές παραγωγής, τη χρήση ενέργειας με περιβαλλοντικά υπεύθυνο τρόπο και τις δυνατότητες προστασίας του περιβάλλοντος (Ghiasi et al., 2025).

Η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της βιωσιμότητας και της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας. Με την αξιοποίηση ανανεώσιμων φυσικών πόρων, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία ή η βιομάζα, μειώνονται οι εκπομπές ρύπων, προστατεύονται φυσικοί πόροι, ενισχύεται η αποδοτική χρήση ενέργειας και προάγεται η αειφόρος ανάπτυξη. Αυτή η στρατηγική ενσωματώνει τη βιώσιμη γεωργία με τις σύγχρονες ενεργειακές ανάγκες, καθιστώντας τα θερμοκήπια περιβαλλοντικά υπεύθυνα και οικονομικά βιώσιμα (Yakub et al., 2024).

4.2.3 Αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων (ρύπανση, κλιματική αλλαγή)

Η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποτελεί μια αποτελεσματική στρατηγική για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων, όπως η ρύπανση και η κλιματική αλλαγή. Οι ΑΠΕ προσφέρουν καθαρές λύσεις που μειώνουν σημαντικά την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και συμβάλλουν στη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων. Η αξιοποίηση ΑΠΕ αντικαθιστά τη χρήση ορυκτών καυσίμων στα θερμοκήπια. Τα ορυκτά καύσιμα απελευθερώνουν ρύπους, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Με την ενσωμάτωση ηλιακών ή γεωθερμικών συστημάτων, οι εκπομπές ρύπων μειώνονται σημαντικά, προστατεύοντας την ατμόσφαιρα (Awewomom et al., 2024).

Η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια βοηθά στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς δεν παράγονται ρύποι που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Αυτό οδηγεί σε καθαρότερο αέρα γύρω από τα θερμοκήπια, με θετική επίδραση στην ποιότητα ζωής τόσο για τους αγρότες όσο και για την τοπική κοινότητα. Οι ΑΠΕ έχουν σημαντική συμβολή στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, καθώς περιορίζουν την κατανάλωση ενέργειας από μη ΑΠΕ που προκαλούν μεγάλες εκπομπές ρύπων. Η μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων θερμοκηπίου στα θερμοκήπια μέσω της χρήσης ΑΠΕ συμβάλλει στη σταθεροποίηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας (Ghiasi et al., 2025).

Η χρήση γεωθερμικών συστημάτων και ηλιακής ενέργειας, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, δεν απαιτεί τη χρήση μεγάλων ποσοτήτων νερού για την παραγωγή ενέργειας. Αυτό βοηθά στην προστασία των υδάτινων πόρων, οι οποίοι αποτελούν ζωτικό στοιχείο για τις γεωργικές καλλιέργειες και την τοπική διαβίωση (Al-Helal et al., 2022).

Η χρήση βιομάζας ως πηγής ενέργειας στα θερμοκήπια δίνει λύσεις στη διαχείριση των αποβλήτων. Οργανικά απόβλητα μετατρέπονται σε ενέργεια, ελαχιστοποιώντας τον όγκο των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτή η διαχείριση συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης του εδάφους και του νερού. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία πιο ανθεκτικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας και καλλιέργειας, προσαρμοσμένων στις αλλαγές του κλίματος (Ajaj et al., 2024).

Η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια παρέχει μια αποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής. Μέσω της μείωσης των εκπομπών ρύπων, της προστασίας φυσικών πόρων και της βιώσιμης διαχείρισης, οι ΑΠΕ συμβάλλουν καθοριστικά στη διατήρηση της περιβαλλοντικής ισορροπίας, την προστασία του κλίματος και την αειφόρο ανάπτυξη των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Awewomom et al., 2024).

4.3 Περιβαλλοντικά οφέλη από την εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια

4.3.1 Μείωση εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου

Η μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου μέσω της εφαρμογής ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποτελεί ένα από τα βασικά περιβαλλοντικά οφέλη. Τα θερμοκήπια που αξιοποιούν καθαρές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, περιορίζοντας έτσι την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων επικίνδυνων αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Liantas et al., 2023).

Τα θερμοκήπια συχνά χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες, όπως η θέρμανση των χώρων και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η αντικατάσταση αυτών των καυσίμων με ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η γεωθερμική και η αιολική ενέργεια, μειώνει άμεσα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Οι ΑΠΕ δεν εκπέμπουν ρύπους κατά την παραγωγή ενέργειας, καθιστώντας τα θερμοκήπια πιο φιλικά προς το περιβάλλον (Awewomom et al., 2024).

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση των θερμοκηπίων, είτε μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια είτε μέσω ηλιακών θερμοσιφώνων που παράγουν θερμότητα. Αυτή η εφαρμογή μειώνει την ανάγκη για τη χρήση πετρελαίου ή άλλων ορυκτών καυσίμων, περιορίζοντας έτσι τις εκπομπές CO₂ που προκαλούνται από την καύση ορυκτών καυσίμων (Savytskyi et al., 2020).

Η γεωθερμική ενέργεια παρέχει σταθερές θερμοκρασίες στα θερμοκήπια όλο τον χρόνο, χωρίς να χρειάζεται η καύση ορυκτών καυσίμων. Χρησιμοποιώντας γεωθερμικά συστήματα για τη θέρμανση ή ψύξη, τα θερμοκήπια περιορίζουν σημαντικά τις εκπομπές CO₂ που συνδέονται με τις συμβατικές μεθόδους ενέργειας (Al-Helal et al., 2022).

Η χρήση ανεμογεννητριών στα θερμοκήπια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια ακόμη τεχνική που βοηθά στη μείωση των εκπομπών CO₂. Αντικαθιστώντας το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, οι ανεμογεννήτριες παρέχουν καθαρή ενέργεια που δεν εκπέμπει ρύπους στην ατμόσφαιρα. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και ενέργειας από οργανικά απόβλητα που προέρχονται από τη γεωργία. Η μετατροπή αυτών των αποβλήτων σε ενέργεια είναι φιλική προς το περιβάλλον και περιορίζει την καύση ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας τις εκπομπές CO₂ (Ajaj et al., 2024)

Η χρήση ΑΠΕ μειώνει την τοπική ρύπανση από τα θερμοκήπια, καθώς οι ανανεώσιμες τεχνολογίες δεν εκπέμπουν σωματίδια ή άλλα επιβλαβή συστατικά, τα οποία συνδέονται με την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας και τον σχηματισμό των αερίων του θερμοκηπίου (Hassan et al., 2021).

Η εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Η χρήση ηλιακής, γεωθερμικής, αιολικής ενέργειας ή βιομάζας περιορίζει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας έτσι το αποτύπωμα άνθρακα της αγροτικής παραγωγής. Αυτό έχει θετική επίδραση στην ατμόσφαιρα, προστατεύοντας τον πλανήτη από την κλιματική αλλαγή και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την ενέργεια (Hassan et al., 2021; Al-Helal et al., 2022).

4.3.2 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της κυκλικότητας

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της κυκλικότητας μέσω της εφαρμογής ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργίας. Η χρήση ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μειώνει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, βελτιώνοντας την ενεργειακή αυτονομία των καλλιεργειών (Paris et al., 2022). Παράλληλα, τα γεωθερμικά συστήματα αξιοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια για τη σταθερή θέρμανση και ψύξη των θερμοκηπίων, προσφέροντας εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του κόστους. Η αιολική ενέργεια μέσω ανεμογεννητριών παρέχει καθαρή ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η χρήση βιομάζας από οργανικά απόβλητα ολοκληρώνει τη διαδικασία κυκλικότητας, ανακυκλώνοντας τα απόβλητα σε πηγή ενέργειας. Επιπλέον, η υιοθέτηση γεωθερμικών και ηλιακών συστημάτων για τη διαχείριση του νερού επιτρέπει τη βιώσιμη άρδευση με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, η

αναβάθμιση των συστημάτων με ΑΠΕ ενισχύει τη συνολική ενεργειακή απόδοση και προάγει τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων στα θερμοκήπια (Castro et al., 2024).

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της κυκλικότητας μέσα από τη χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια, δεν μόνο συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος. Η μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων μέσω των ανανεώσιμων τεχνολογιών βοηθά στη μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων ρύπων, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διατήρηση ενός πιο ισορροπημένου φυσικού οικοσυστήματος. Τα συστήματα που βασίζονται στην κυκλικότητα, όπως η ανακύκλωση οργανικών αποβλήτων σε βιομάζα, ενισχύουν την αυτονομία των θερμοκηπίων και περιορίζουν την ανάγκη για εξωτερικούς πόρους (Engler & Krarti, 2021).

Η χρήση ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας για θέρμανση και παραγωγή ενέργειας στα θερμοκήπια συνδυάζεται επίσης με την αποτελεσματική διαχείριση του νερού. Τα θερμοκήπια που εφαρμόζουν γεωθερμικές λύσεις για τη θέρμανση του νερού μπορούν να αξιοποιήσουν το φυσικό γεωθερμικό πεδίο, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας για άρδευση και ενισχύοντας την κυκλικότητα των φυσικών πόρων. Επιπλέον, η αξιοποίηση ΑΠΕ στα θερμοκήπια μπορεί να προσφέρει λύσεις σε τοπικό επίπεδο, βελτιώνοντας τις συνθήκες καλλιέργειας και διασφαλίζοντας την παραγωγή αγροτικών προϊόντων με μεγαλύτερη περιβαλλοντική ανθεκτικότητα (Castro et al., 2024).

Με τον τρόπο αυτό, τα θερμοκήπια δεν γίνονται μόνο πηγή παραγωγής τροφής αλλά και ένα πρότυπο βιώσιμης αγροτικής ανάπτυξης, όπου η ενέργεια, το νερό και τα υλικά κυκλοφορούν σε ένα συνεχές σύστημα, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικούς πόρους και προάγοντας την περιβαλλοντική ισορροπία. Οι νέες τεχνολογίες ΑΠΕ στα θερμοκήπια προσφέρουν ευκαιρίες όχι μόνο για την οικονομική επιβίωση των καλλιεργητών αλλά και για την προστασία του περιβάλλοντος, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργίας (Li et al., 2022).

4.3.3 Υποστήριξη της αειφορίας στη γεωργία

Η υποστήριξη της αειφορίας στη γεωργία μέσω της εφαρμογής ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα για την ενίσχυση της βιώσιμης γεωργικής παραγωγής. Οι ΑΠΕ παρέχουν λύσεις που όχι μόνο εξοικονομούν ενέργεια, αλλά επίσης διατηρούν το περιβάλλον, διασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα και ανθεκτικότητα των αγροτικών εκτάσεων (Hu & You, 2022).

Η εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια, όπως ηλιακών και γεωθερμικών συστημάτων, μειώνει την εξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Αυτές οι τεχνολογίες συμβάλλουν στη διατήρηση των φυσικών πόρων, ενώ μειώνουν τη χρήση ορυκτών καυσίμων και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενισχύοντας έτσι τη βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Ponkratov et al., 2022).

Η χρήση γεωθερμικών συστημάτων στα θερμοκήπια προσφέρει σταθερότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θέρμανση και η ψύξη. Με αυτόν τον τρόπο, διατηρούνται ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης για τα φυτά, ενώ μειώνεται η ανάγκη για εξωτερικά καύσιμα και περιορίζεται η επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Τα γεωθερμικά συστήματα παρέχουν επίσης τη δυνατότητα διαχείρισης των απορριμμάτων και της θερμότητας με πιο φυσικό τρόπο (Liantas et al., 2023).

Ηλιακά συστήματα στα θερμοκήπια επιτρέπουν τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας, ενώ παράλληλα μειώνουν το ενεργειακό κόστος. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση, τον φωτισμό και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζει την ανάγκη για εξωτερική ενέργεια και αυξάνει την αυτονομία των καλλιεργητών. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και ενισχύει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα (Rahnama et al., 2018).

Η χρήση της βιομάζας από οργανικά απορρίμματα ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στα θερμοκήπια προάγει την κυκλική οικονομία. Τα απόβλητα από καλλιέργειες μετατρέπονται σε πηγή ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικούς πόρους και συνδέοντας την παραγωγή τροφής με την παραγωγή ενέργειας, με στόχο τη διατήρηση των φυσικών πόρων (Ajaj et al., 2024).

Η χρήση ανεμογεννητριών στα θερμοκήπια βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, παρέχοντας καθαρή και ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό, η αιολική ενέργεια συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού

αποτυπώματος, ενώ ενισχύει την ενεργειακή αυτονομία και βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Shahbazi et al., 2023; Reza et al., 2024).

Η αξιοποίηση της ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας στα θερμοκήπια για τη θέρμανση και την ψύξη του νερού επιτρέπει τη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Αυτό μειώνει την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές νερού και συμβάλλει στη μακροπρόθεσμη διατήρηση του υδάτινου αποθέματος, διασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα της καλλιέργειας (Hassan et al., 2021; Al-Helal et al., 2022).

Η εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια υποστηρίζει την αειφόρο ανάπτυξη στον αγροτικό τομέα, προάγοντας τη διατήρηση των φυσικών πόρων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Μέσω της ηλιακής, γεωθερμικής και αιολικής ενέργειας, καθώς και της αξιοποίησης της βιομάζας, τα θερμοκήπια καταφέρνουν να συνδυάσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα με τη βιωσιμότητα της παραγωγής, προστατεύοντας το περιβάλλον και εξασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη παραγωγική τους ικανότητα (Hu & You, 2022).

5. Προκλήσεις και Προοπτικές

5.1 Αρχικό κόστος εγκατάστασης

Η εγκατάσταση ΑΠΕ στα θερμοκήπια απαιτεί ένα αρχικό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει την προμήθεια και τοποθέτηση των απαραίτητων τεχνολογιών όπως ηλιακών πάνελ, ανεμογεννητριών, γεωθερμικών συστημάτων ή βιομάζας. Το κόστος αυτό ποικίλλει ανάλογα με τη τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί, το μέγεθος του θερμοκηπίου, καθώς και τις συνθήκες εγκατάστασης στην κάθε περιοχή (Costa et al., 2020; Lee et al., 2021; Jamal-Uddin et al., 2022). Ειδικότερα, για κάθε περίπτωση το κόστος έχει ως εξής:

- **Ηλιακά πάνελ:** Η εγκατάσταση ηλιακών πάνελ στα θερμοκήπια απαιτεί αρχικό κόστος για την αγορά και τοποθέτηση των ηλιακών συστημάτων. Το κόστος εξαρτάται από την ισχύ των πάνελ και το μέγεθος του θερμοκηπίου. Παρόλο που το αρχικό κόστος μπορεί να είναι υψηλό, η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση ενέργειας και το μειωμένο κόστος λειτουργίας το καθιστούν μια βιώσιμη επένδυση.
- **Γεωθερμικά συστήματα:** Η εγκατάσταση γεωθερμικών συστημάτων περιλαμβάνει την κατασκευή γεωθερμικών αντλιών και σωληνώσεων. Το αρχικό κόστος αυτής της τεχνολογίας είναι σχετικά υψηλό, λόγω της ανάγκης γεωτρήσεων και της επένδυσης σε εξειδικευμένα υλικά και τεχνολογικό εξοπλισμό. Ωστόσο, η εξοικονόμηση ενέργειας και το χαμηλότερο κόστος θέρμανσης και ψύξης δικαιολογούν αυτήν την αρχική επένδυση.
- **Ανεμογεννήτριες:** Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα θερμοκήπια απαιτεί αρχικό κόστος για την αγορά και εγκατάσταση του εξοπλισμού. Το κόστος εξαρτάται από τη δυναμικότητα της ανεμογεννήτριας και την τοποθέτησή της. Το αρχικό κόστος είναι υψηλό, αλλά με την παραγωγή καθαρής ενέργειας, μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση μακροπρόθεσμα.
- **Βιομάζα:** Η εγκατάσταση συστημάτων που αξιοποιούν τη βιομάζα από οργανικά απόβλητα απαιτεί αρχικό κόστος για την αγορά του εξοπλισμού μετατροπής των απορριμμάτων σε ενέργεια. Το κόστος περιλαμβάνει την αγορά των μηχανημάτων και την κατασκευή των απαραίτητων υποδομών. Αν και το αρχικό κόστος μπορεί να είναι υψηλό, το χαμηλό λειτουργικό κόστος

της βιομάζας καθιστά την επένδυση βιώσιμη μακροπρόθεσμα (Savytskyi et al., 2020; Erdiwansyah et al., 2021; Hassan et al., 2021; Liantas et al., 2023).

Στα θερμοκήπια μπορεί να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός ΑΠΕ, όπως ηλιακά και γεωθερμικά συστήματα ή ανεμογεννήτριες με ηλιακά πάνελ. Αυτό συνεπάγεται υψηλότερο αρχικό κόστος, αλλά προσφέρει μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία και εκμετάλλευση πολλαπλών πηγών ενέργειας. Το αρχικό κόστος εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης και τις απαιτήσεις του έργου. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης ΑΠΕ στα θερμοκήπια μπορεί να είναι σημαντικό, εξαρτώμενο από την τεχνολογία που θα επιλεγεί. Ωστόσο, με την αξιοποίηση αυτών των πηγών ενέργειας, τα θερμοκήπια όχι μόνο μειώνουν το κόστος λειτουργίας τους μακροπρόθεσμα, αλλά ταυτόχρονα προάγουν τη βιώσιμη ανάπτυξη και μειώνουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Lee et al., 2021; Jamal-Uddin et al., 2022).

5.2 Τεχνικές και γεωγραφικές περιορισμοί

Η εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια συναντά διάφορους τεχνικούς και γεωγραφικούς περιορισμούς που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης και την αποδοτικότητα της παραγωγής. Ένας σημαντικός τεχνικός περιορισμός είναι η ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό που να αντέχει στις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον των θερμοκηπίων, όπως οι υψηλές θερμοκρασίες και η αυξημένη υγρασία. Επιπλέον, η λειτουργία των ΑΠΕ απαιτεί τεχνογνωσία για τη σωστή συντήρηση, κάτι που μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε θερμοκήπια που δεν διαθέτουν έμπειρο προσωπικό (Shokri & Fard, 2022; Castro et al., 2024).

Από την άλλη πλευρά, γεωγραφικοί περιορισμοί, όπως η διαθεσιμότητα ηλιακής ή αιολικής ενέργειας, επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης. Στις περιοχές με χαμηλό επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας ή ασταθείς ανέμους, η αποδοτικότητα της παραγωγής ενέργειας από τις αντίστοιχες ΑΠΕ μειώνεται σημαντικά. Η γεωθερμία επίσης συναντά περιορισμούς, καθώς δεν είναι παντού διαθέσιμη και η απόσταση από την κατάλληλη πηγή μπορεί να καθυστερήσει την εγκατάσταση (Jamal-Uddin et al., 2022).

Επιπλέον, η διαθεσιμότητα του νερού αποτελεί ακόμα έναν περιοριστικό παράγοντα, καθώς τα γεωθερμικά συστήματα και τα ηλιακά πάνελ μπορεί να χρειάζονται επαρκείς ποσότητες νερού για την ψύξη ή τη λειτουργία τους. Τέλος, η εγκατάσταση ΑΠΕ απαιτεί προσεκτική επιτόπια ανάλυση, προκειμένου να αξιολογηθούν οι τοπικές

συνθήκες και να επιλεγεί η καταλληλότερη τεχνολογία, αποφεύγοντας την σπατάλη πόρων σε ακατάλληλες επιλογές (Lachheb et al., 2024).

Η γεωθερμική ενέργεια επίσης αντιμετωπίζει περιορισμούς εξαιτίας της διαθεσιμότητας των γεωθερμικών πεδίων, τα οποία δεν βρίσκονται σε κάθε περιοχή. Επομένως, περιοχές που απέχουν μακριά από πηγές γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να μην είναι κατάλληλες για τη χρήση αυτής της τεχνολογίας. Το αρχικό κόστος για τη γεωθερμία είναι επίσης υψηλότερο λόγω της ανάγκης για γεωτρήσεις και κατάλληλα γεωλογικά πεδία (Hamdane et al., 2023).

Η διαθεσιμότητα νερού είναι επίσης ένας περιοριστικός παράγοντας, καθώς πολλές τεχνολογίες ΑΠΕ, όπως τα γεωθερμικά συστήματα και τα ηλιακά πάνελ, απαιτούν επαρκή ποσότητα νερού για τη σωστή λειτουργία τους. Στις περιοχές με περιορισμένες υδάτινες πηγές, αυτό μπορεί να είναι ανασταλτικός παράγοντας για την εγκατάσταση ΑΠΕ (Shokri & Fard, 2022).

Τέλος, για την αποτελεσματική εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή εκτενούς τοπικής ανάλυσης. Η σωστή αξιολόγηση των συνθηκών της περιοχής – συμπεριλαμβανομένης της ηλιοφάνειας, των ανέμων, της γεωγραφίας και της δυνατότητας πρόσβασης σε γεωθερμικές πηγές – είναι κρίσιμη για την επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας. Σε διαφορετική περίπτωση, η εφαρμογή ΑΠΕ μπορεί να αποδειχθεί ασύμφορη ή μη βιώσιμη (Hamdane et al., 2023).

5.3 Τεχνολογικές δυσκολίες και συντήρηση

Η εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια ενδέχεται να συναντήσει διάφορες τεχνολογικές δυσκολίες, που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης και απαιτούν συνεχόμενη προσοχή στη συντήρηση (Rahman et al., 2022b).

Αρχικά, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ΑΠΕ, όπως τα ηλιακά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες και τα γεωθερμικά συστήματα, μπορεί να συναντήσει προβλήματα λόγω της έκθεσής τους σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως ισχυρούς ανέμους ή έντονες βροχοπτώσεις. Οι ηλιακοί συλλέκτες, για παράδειγμα, μπορεί να χρειάζονται τακτική καθαριότητα για να διατηρήσουν την αποδοτικότητα της ενέργειας που συλλέγουν, ενώ οι ανεμογεννήτριες μπορεί να απαιτούν συχνές επιθεωρήσεις για τη διασφάλιση της σταθερότητας τους απέναντι σε δυνατούς ανέμους. Η εγκατάσταση γεωθερμικών συστημάτων, επίσης, μπορεί να περιλαμβάνει

τεχνικές δυσκολίες λόγω της ανάγκης για γεωτρήσεις σε συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες (Saleh & Hassan, 2024).

Επιπλέον, η λειτουργία και συντήρηση των ΑΠΕ απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό, το οποίο να διαθέτει τη γνώση για την ορθή εγκατάσταση, λειτουργία και επισκευή των τεχνολογιών. Η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο, καθώς τα προβλήματα που προκύπτουν χρειάζονται άμεση αντιμετώπιση για να αποφευχθούν σοβαρές βλάβες που θα επηρεάσουν τη συνολική λειτουργία των θερμοκηπίων (Castro et al., 2024).

Η τακτική συντήρηση είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής λειτουργίας των ΑΠΕ. Χρειάζεται συνεχής επιθεώρηση των εξαρτημάτων, έλεγχος της απόδοσης, καθαρισμός του εξοπλισμού και αντικατάσταση φθαρμένων μερών. Η έλλειψη κατάλληλης υποστήριξης ή συστηματικής συντήρησης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης και, εν τέλει, στην αστοχία του συστήματος (Rahman et al., 2022b).

Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνολογικές δυσκολίες και οι απαιτήσεις συντήρησης των ΑΠΕ στα θερμοκήπια πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τη φάση της εγκατάστασης. Μόνο με σωστή συντήρηση και προγραμματισμένες επιθεωρήσεις θα διασφαλιστεί η μακροχρόνια απόδοση και βιωσιμότητα των ΑΠΕ, συμβάλλοντας στην αποτελεσματική και οικονομική λειτουργία των θερμοκηπίων (Karanisa et al., 2022; Guo et al., 2024).

Η συντήρηση των ΑΠΕ απαιτεί, επίσης, την ύπαρξη σωστής υποδομής και εξοπλισμού για την αποθήκευση και την μεταφορά των αναγκαίων υλικών, όπως τα ανταλλακτικά ή τα εργαλεία για τις επισκευές. Επιπλέον, πολλές φορές η απομακρυσμένη τοποθεσία των θερμοκηπίων καθιστά δύσκολη τη γρήγορη πρόσβαση σε εξειδικευμένους τεχνικούς ή συνεργεία, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση στην επίλυση προβλημάτων (Singh et al., 2024).

Ένας άλλος τεχνικός περιορισμός είναι η πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης διαφορετικών τύπων ΑΠΕ, καθώς οι απαιτήσεις σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, οι ρυθμίσεις για τη σωστή απορρόφηση ενέργειας και η αρμονική συνεργασία των συστημάτων αποτελούν πρόκληση που απαιτεί προσεκτική μελέτη και σωστό σχεδιασμό. Μια λανθασμένη εγκατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες ενέργειας ή και σε βλάβες του εξοπλισμού (Karanisa et al., 2022; Guo et al., 2024).

Σε όλη αυτή την διαδικασία, η συνεχής ενημέρωση και εκπαίδευση του προσωπικού είναι απαραίτητη, ώστε να είναι ικανοί να ανταπεξέλθουν σε κάθε τεχνολογική

πρόκληση που προκύπτει κατά τη χρήση και λειτουργία των ΑΠΕ στα θερμοκήπια. Η έλλειψη επαρκούς εκπαίδευσης μπορεί να οδηγήσει σε κακή χρήση των τεχνολογιών ή σε αβλεψίες που προκαλούν επιπλοκές στην απόδοση των συστημάτων (Castro et al., 2024).

Συνολικά, οι τεχνολογικές δυσκολίες και οι απαιτήσεις συντήρησης που συνδέονται με τις ΑΠΕ απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό, τακτικές επιθεωρήσεις και σωστή εκπαίδευση. Μόνο μέσα από συστηματική παρακολούθηση και αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων θα είναι δυνατή η μακροχρόνια βιώσιμη χρήση των ΑΠΕ στα θερμοκήπια, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η απόδοση ή η ασφάλεια των καλλιεργειών (Singh et al., 2024).

5.4 Τεχνολογικές εξελίξεις στις ΑΠΕ και τις εφαρμογές τους στη γεωργία

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στις ΑΠΕ έχουν φέρει σημαντικές καινοτομίες που ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στον αγροτικό τομέα, προσφέροντας νέες λύσεις για τη βιώσιμη γεωργία και την ενίσχυση της παραγωγικότητας των θερμοκηπίων. Μερικές από αυτές τις εξελίξεις περιλαμβάνουν τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας των ηλιακών και αιολικών συστημάτων, καθώς και την ανάπτυξη προηγμένων γεωθερμικών και τεχνολογιών βιομάζας (Erdiwansyah et al., 2021).

Τα νέα ηλιακά πάνελ έχουν εξελιχθεί σε μεγαλύτερη απόδοση, χάρη στη χρήση πιο προηγμένων υλικών όπως τα φωτοβολταϊκά κελί, τα οποία αυξάνουν την αποδοτικότητα της ηλιακής ενέργειας ακόμα και υπό περιορισμένη ηλιοφάνεια. Παράλληλα, η ενσωμάτωση μπαταριών αποθήκευσης ενέργειας καθιστά δυνατή τη χρήση της ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Αυτή η τεχνολογική πρόοδος καθιστά την ηλιακή ενέργεια μια πιο αξιόπιστη λύση για τη θέρμανση και τον φωτισμό θερμοκηπίων, αυξάνοντας την ενεργειακή αυτονομία των καλλιεργειών (Tittarelli, 2020; Karanisa et al., 2022).

Από την άλλη, οι ανεμογεννήτριες έχουν γίνει πιο αποδοτικές και λιγότερο ογκώδεις, επιτρέποντας την εγκατάστασή τους σε περισσότερες αγροτικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των θερμοκηπίων. Οι μικρές και μεσαίου μεγέθους

ανεμογεννήτριες μπορούν πλέον να παρέχουν καθαρή ενέργεια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των θερμοκηπίων, μειώνοντας το κόστος παραγωγής και εξασφαλίζοντας τη συνεχή λειτουργία των αντλιών και των συστημάτων άρδευσης (Sari et al., 2023).

Η γεωθερμική τεχνολογία έχει επίσης εξελιχθεί, με τη δημιουργία πιο αποδοτικών και οικονομικά προσιτών συστημάτων που μπορούν να παρέχουν θέρμανση και ψύξη στα θερμοκήπια. Οι καινοτόμοι γεωθερμικοί εναλλάκτες μπορούν να μεταφέρουν θερμότητα από το υπέδαφος στα θερμοκήπια, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση της εξάρτησης από εξωτερικούς πόρους και περιορίζοντας την κατανάλωση ενέργειας (Guo et al., 2024).

Επιπλέον, η τεχνολογία της βιομάζας έχει εξελιχθεί προς την κατεύθυνση της χρήσης οργανικών αποβλήτων, όπως τα φυτικά υπολείμματα ή τα απόβλητα τροφίμων, για την παραγωγή θερμότητας και ενέργειας. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση ενισχύει την αειφορία, μειώνει το κόστος των θερμοκηπίων και παράλληλα αξιοποιεί τους πόρους που διαφορετικά θα κατέληγαν σε απόρριψη. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στις ΑΠΕ δημιουργούν νέες ευκαιρίες για τη γεωργία, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση της ενέργειας και την ενίσχυση της παραγωγής, ενώ παράλληλα προάγουν τη βιώσιμη ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος (Sari et al., 2023).

Η τεχνολογία της βιομάζας, για παράδειγμα, έχει ανοίξει νέους δρόμους στη γεωργία, καθώς πλέον είναι δυνατό να αξιοποιηθούν τα οργανικά απόβλητα από τις καλλιέργειες για την παραγωγή ενέργειας. Οι εξελίξεις στη διαδικασία της βιομάζας επιτρέπουν τη μετατροπή φυτικών υπολειμμάτων, ζωικών αποβλήτων ή υπολειμμάτων τροφίμων σε βιοενέργεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση θερμοκηπίων ή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μειώνει την ανάγκη για εξωτερικούς πόρους και μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των καλλιεργειών, συμβάλλοντας στην αειφορία (Koukounaras, 2021; Karanisa et al., 2022).

Επιπλέον, η χρήση των τεχνολογιών ΑΠΕ στα θερμοκήπια έχει ενσωματωθεί σε έξυπνα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, τα οποία μπορούν να παρακολουθούν και να ρυθμίζουν αυτόματα τη χρήση της ενέργειας. Αυτά τα συστήματα αξιοποιούν προηγμένα αισθητήρια και λογισμικά, επιτρέποντας την παρακολούθηση της κατανάλωσης και της αποδοτικότητας της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Τα έξυπνα θερμοκήπια με τη χρήση ΑΠΕ είναι πλέον σε θέση να προσαρμόζουν τη χρήση ενέργειας βάσει των συνθηκών του περιβάλλοντος, των καιρικών συνθηκών και των

αναγκών των καλλιεργειών, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα και μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας (Guo et al., 2024).

Οι τεχνολογίες αυτές, σε συνδυασμό με τη χρήση των ΑΠΕ, προσφέρουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία και βιωσιμότητα στα θερμοκήπια. Ταυτόχρονα, παρέχουν ένα ευρύτερο περιθώριο ευελιξίας στις καλλιέργειες, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικούς προμηθευτές ενέργειας, ενώ παράλληλα προάγουν τη βιώσιμη ανάπτυξη και την αειφορία. Η ενσωμάτωση των εξελιγμένων ΑΠΕ, λοιπόν, δεν περιορίζεται μόνο στη μείωση του ενεργειακού κόστους, αλλά παρέχει και σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον, βελτιώνοντας την ποιότητα της παραγωγής και στηρίζοντας τη γεωργία στο δρόμο προς την αειφόρο ανάπτυξη (Ghoulem et al., 2019; Castro et al., 2024).

5.5 Εξελίξεις στις πολιτικές και επιδοτήσεις για τη χρήση ΑΠΕ

Τα τελευταία χρόνια, οι πολιτικές και οι επιδοτήσεις που σχετίζονται με τις ΑΠΕ έχουν εξελιχθεί σημαντικά, προσφέροντας κίνητρα για την υιοθέτηση βιώσιμων ενεργειακών λύσεων, ειδικά στον αγροτικό τομέα. Οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς οργανισμοί ενισχύουν τη χρήση ΑΠΕ μέσω προγραμμάτων επιδοτήσεων, φορολογικών απαλλαγών, και χρηματοδοτήσεων που αποσκοπούν στην ενίσχυση της ενεργειακής μετάβασης, ενώ παράλληλα υποστηρίζουν τη βιώσιμη γεωργία (Yang et al., 2019).

Οι εξελίξεις στις πολιτικές περιλαμβάνουν την εφαρμογή στρατηγικών που ενθαρρύνουν την εγκατάσταση ηλιακών, αιολικών, γεωθερμικών και συστημάτων βιομάζας στα θερμοκήπια. Οι επιδοτήσεις αυτές μπορεί να αφορούν την επιδότηση της αρχικής εγκατάστασης των ΑΠΕ, τη χρηματοδότηση της έρευνας και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, ή την παροχή κινήτρων για τη μείωση του κόστους ενέργειας. Επιπλέον, πολλές χώρες προσφέρουν κίνητρα μέσω φορολογικών ελαφρύνσεων ή επιδοτήσεων που καλύπτουν ένα μέρος των δαπανών για την αναβάθμιση των θερμοκηπίων με σύγχρονα συστήματα ΑΠΕ (Shen et al., 2020).

Σε διεθνές επίπεδο, οργανισμοί όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν θέσει στόχους για την αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, με τη θέσπιση κανονισμών και δεσμεύσεων για τη μείωση των εκπομπών CO₂ και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Οι πολιτικές αυτές προωθούν την καινοτομία στον τομέα των ΑΠΕ και

παρέχουν επιδοτήσεις που καθιστούν τις επενδύσεις στα θερμοκήπια με ΑΠΕ πιο προσιτές και βιώσιμες (Rokicki, 2016).

Επιπλέον, σε εθνικό επίπεδο, πολλές κυβερνήσεις αναγνωρίζουν τη σημασία της γεωργίας στην τοπική οικονομία και θέτουν προγράμματα επιδότησης που εστιάζουν στη μετάβαση προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέτοιες πολιτικές όχι μόνο ενισχύουν τη βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, αλλά και συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος, μέσω της προώθησης καθαρών ενεργειακών λύσεων (Gromada et al., 2019).

Οι πολιτικές και οι επιδοτήσεις για τη χρήση ΑΠΕ συμβάλλουν επίσης στην αύξηση της ενημέρωσης και της εκπαίδευσης των αγροτών σχετικά με τα οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την παροχή χρηματοδοτικών εργαλείων, οι αγρότες έχουν τη δυνατότητα να συμμετάσχουν σε σεμινάρια, ημερίδες και εκπαιδευτικά προγράμματα που τους παρέχουν τις απαραίτητες γνώσεις για τη σωστή εφαρμογή και τη μακροπρόθεσμη λειτουργία των ΑΠΕ στα θερμοκήπιά τους (Bórawski et al., 2019).

Επιπλέον, οι πολιτικές αυτές συμβάλλουν στη δημιουργία ενός πιο ευνοϊκού περιβάλλοντος για την έρευνα και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ΑΠΕ που μπορούν να εφαρμοστούν στη γεωργία. Στόχος είναι η ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων που θα βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση, θα μειώσουν το κόστος και θα αυξήσουν την παραγωγικότητα των θερμοκηπίων, ενώ παράλληλα θα προστατεύσουν το περιβάλλον. Τέτοιες τεχνολογικές εξελίξεις περιλαμβάνουν τη χρήση πιο αποδοτικών φωτοβολταϊκών, τη βελτίωση της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών ή την εφαρμογή πιο αποδοτικών γεωθερμικών συστημάτων (Gromada et al., 2019).

Οι εξελίξεις αυτές έχουν ήδη αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα στη γεωργία, καθώς η ενσωμάτωση των ΑΠΕ βοηθά στην μείωση του ενεργειακού κόστους, στην ενίσχυση της αυτονομίας και στην εξοικονόμηση πόρων, ενώ παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των γεωργικών πρακτικών. Επιπλέον, η ευαισθητοποίηση που προκύπτει από τις πολιτικές αυτές οδηγεί σε μια πιο υπεύθυνη προσέγγιση της γεωργίας, όπου οι αγρότες προσαρμόζονται στις ανάγκες της κλιματικής αλλαγής, εφαρμόζουν στρατηγικές για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και προάγουν την κυκλική οικονομία (Shen et al., 2020).

Συνολικά, οι εξελίξεις στις πολιτικές και οι επιδοτήσεις για τη χρήση ΑΠΕ ενισχύουν τη γεωργία με καθαρά και οικονομικά βιώσιμες ενεργειακές λύσεις, που διασφαλίζουν όχι μόνο την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και την οικονομική

ανθεκτικότητα των αγροτικών εκμεταλλεύσεων. Με αυτές τις πολιτικές, ο αγροτικός τομέας αποκτά ένα ισχυρό εργαλείο για να προχωρήσει προς την αειφόρο ανάπτυξη, αξιοποιώντας τη δύναμη των ΑΠΕ (Bórawski et al., 2019).

5.6 Η εξέλιξη της «πράσινης» γεωργίας και η αειφορία

Η εξέλιξη της «πράσινης» γεωργίας αποτυπώνει τη μετάβαση από τις παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές σε πιο βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους παραγωγής. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει τη χρήση των ΑΠΕ με τη στρατηγική εφαρμογή πρακτικών που αποσκοπούν στη διατήρηση των φυσικών πόρων, στη μείωση των εκπομπών CO₂, στη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των καλλιεργειών απέναντι στις κλιματικές αλλαγές (Fenibo et al., 2021).

Η χρήση ΑΠΕ όπως ηλιακή, αιολική, γεωθερμική και βιομάζα στα θερμοκήπια έχει συμβάλει καθοριστικά στην υλοποίηση της πράσινης γεωργίας. Οι ανανεώσιμες αυτές πηγές ενέργειας προσφέρουν καθαρή ενέργεια που δεν εξαντλείται, μειώνουν τη ρύπανση, εξοικονομούν πόρους και συμβάλλουν στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της γεωργικής παραγωγής. Παράλληλα, η ενσωμάτωσή τους στα θερμοκήπια επιτρέπει τη δημιουργία αυτοτελών ενεργειακών συστημάτων που προσφέρουν οικονομική αυτονομία στις αγροτικές εκμεταλλεύσεις, αποδεσμεύοντας τους παραγωγούς από τις συχνές μεταβολές των τιμών των συμβατικών καυσίμων (Mentes, 2023).

Η πράσινη γεωργία προωθεί επίσης την υιοθέτηση τεχνικών που ενισχύουν τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων, όπως η διαχείριση των υδάτινων πόρων, η προστασία του εδάφους από την διάβρωση, και η εφαρμογή βιολογικών λιπασμάτων και φυσικών μεθόδων ελέγχου των ζιζανίων και των εχθρών των φυτών. Αυτές οι πρακτικές όχι μόνο συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά επίσης ενισχύουν την υγεία των καλλιεργειών, αυξάνοντας την ανθεκτικότητά τους στις ξηρασίες, στις πλημμύρες και στις ασθένειες (Fenibo et al., 2021).

Επιπλέον, η εξέλιξη της πράσινης γεωργίας εστιάζει στη συνεχή καινοτομία, όπως η ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας και η εφαρμογή ακριβών καλλιεργητικών μεθόδων που βασίζονται στη χρήση τεχνολογιών όπως αισθητήρες και τηλεμετρία. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την καλύτερη διαχείριση των φυσικών πόρων, τη βελτιστοποίηση της καλλιεργητικής διαδικασίας και την αύξηση

της απόδοσης, μειώνοντας παράλληλα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Mentes, 2023).

Η πράσινη γεωργία, μέσα από την αειφορία, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για τη διατήρηση της γεωργικής παραγωγής μακροπρόθεσμα, εξασφαλίζοντας τη διαχείριση των φυσικών πόρων με τρόπο που να ικανοποιεί τις ανάγκες της σημερινής γενιάς χωρίς να υπονομεύει τις δυνατότητες των μελλοντικών γενιών. Τα θερμοκήπια που ενσωματώνουν ΑΠΕ και εφαρμόζουν πρακτικές αειφορίας αποτελούν το εφαλτήριο για μια πιο βιώσιμη και ανθεκτική γεωργία, προάγοντας τη διατήρηση του περιβάλλοντος και την ανάπτυξη των καλλιεργειών με σεβασμό στις φυσικές διεργασίες (Chen et al., 2024).

Η εξέλιξη της πράσινης γεωργίας δεν περιορίζεται μόνο στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά συνδέεται άμεσα και με την οικονομική βιωσιμότητα των αγροτικών εκμεταλλεύσεων. Οι αγρότες που επιλέγουν να στραφούν σε πρακτικές πράσινης γεωργίας μπορούν να μειώσουν το κόστος παραγωγής μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας, της αξιοποίησης των φυσικών πόρων, αλλά και της μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα λιπάσματα και καύσιμα. Οι επιδοτήσεις που παρέχονται για την εγκατάσταση ΑΠΕ και οι φορολογικές ελαφρύνσεις δίνουν το οικονομικό κίνητρο στους γεωργούς να επενδύσουν σε αυτές τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις (Fenibo et al., 2021).

Επιπλέον, η πράσινη γεωργία ενθαρρύνει τη συνεργασία μεταξύ των γεωργών, των επιστημόνων και των φορέων χάραξης πολιτικής, προάγοντας τη δικτύωση για την ανταλλαγή τεχνογνωσίας και την καλύτερη διαχείριση των καλλιεργειών. Οι αγρότες συμμετέχουν σε προγράμματα που τους επιτρέπουν να μοιράζονται τις εμπειρίες τους, να συνεργάζονται σε κοινά έργα, και να μοιράζονται τεχνολογικές λύσεις που βελτιώνουν την αποδοτικότητα των εκμεταλλεύσεών τους. Ταυτόχρονα, ενδυναμώνουν τις τοπικές κοινότητες, καθώς η πράσινη γεωργία ενισχύει την τοπική παραγωγή και μειώνει την εξάρτηση από τις εισαγόμενες πρώτες ύλες (Chen et al., 2024).

Η πράσινη γεωργία, με την εφαρμογή ΑΠΕ και τη χρήση τεχνολογιών αιχμής, επιδιώκει τη δημιουργία συστημάτων που όχι μόνο αυξάνουν την παραγωγικότητα, αλλά και διασφαλίζουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Η ανάπτυξη θερμοκηπίων που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της προσπάθειας αυτής, καθώς συνδυάζει την παραγωγή καθαρής ενέργειας με την προστασία των φυσικών πόρων,

ενώ προσφέρει νέες ευκαιρίες στους αγρότες να ενισχύσουν τις καλλιέργειές τους (Mentes, 2023).

Επιπλέον, η πράσινη γεωργία προάγει την ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση του αγροτικού τομέα, που περιλαμβάνει την προστασία του εδάφους, της βιοποικιλότητας και της ποιότητας του νερού. Οι καλλιέργειες που καλλιεργούνται με σεβασμό στις φυσικές διαδικασίες επιδρούν θετικά στην αποκατάσταση των οικοσυστημάτων, δημιουργώντας ένα βιώσιμο περιβάλλον για τα φυτά, τα ζώα και τους μικροοργανισμούς. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση συμβάλλει στη μείωση της διάβρωσης του εδάφους, στη διατήρηση της υγρασίας και στην προστασία των υδάτινων αποθεμάτων, γεγονός που αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μακροχρόνια γεωργική ανάπτυξη (Fenibo et al., 2021).

Συνοψίζοντας, η εξέλιξη της πράσινης γεωργίας και η εφαρμογή ΑΠΕ στα θερμοκήπια προάγουν τη βιώσιμη γεωργική παραγωγή, ενισχύουν την τοπική ανάπτυξη και την αειφορία, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνουν την οικονομική βιωσιμότητα. Οι τεχνολογικές εξελίξεις, οι ευνοϊκές πολιτικές και οι περιβαλλοντικές δράσεις συνεργάζονται για να δημιουργήσουν έναν αγροτικό τομέα που είναι όχι μόνο αποδοτικός, αλλά και προσανατολισμένος στη μακροχρόνια προστασία του περιβάλλοντος (Chen et al., 2024).

6. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών ως προς την χρήση των ΑΠΕ στα θερμοκήπια σε διεθνές και εγχώριο επίπεδο.

Η μελέτη των Cuce et al. (2016) αποτελεί μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση που επικεντρώνεται σε στρατηγικές τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και κλιματικού ελέγχου για θερμοκήπια. Μετά την αξιολόγηση των υφιστάμενων συστημάτων θερμοκηπίου ως προς τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, αναλύονται λεπτομερώς οικονομικά αποδοτικές, ενεργειακά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες. Η έρευνα εξετάζει λύσεις βασισμένες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά (PV), υβριδικούς συλλέκτες PV/T, ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες (T), υλικά αλλαγής φάσης (PCM), τεχνικές αποθήκευσης θερμότητας, αντλίες θερμότητας και καινοτόμα υλικά πρόσοψης όπως αερογέλη και μονωτικά πάνελ κενού. Επιπλέον, μελετώνται τεχνολογίες αερισμού με προθέρμανση και ψύξη και αποδοτικά συστήματα φωτισμού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μετασκευή συμβατικών θερμοκηπίων με αυτές τις τεχνολογίες μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση έως και 80%, με περίοδο απόσβεσης 4-8 ετών, ανάλογα με το κλίμα και τον τύπο καλλιέργειας, συμβάλλοντας στη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα της γεωργικής παραγωγής.

Η μελέτη του Vourdoubas (2016) διερεύνησε τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός υδροπονικού θερμοκηπίου στην Κρήτη μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνδυάζοντας στερεά βιομάζα από πυρήνα ελιάς και ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών. Για θερμοκήπιο 1.000 m² με ετήσια κατανάλωση ενέργειας 245,5 KWh/m², υπολογίστηκε ότι το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος με 17 KWp φωτοβολταϊκής ισχύος και ετήσια κατανάλωση 66,87 τόνων πυρηνόξυλου ανέρχεται σε 42.380 €, ενώ η μείωση εκπομπών CO₂ φτάνει τα 104.725 kg ετησίως. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αξιοποίηση αυτών των ώριμων και αξιόπιστων τεχνολογιών προσφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, προωθώντας τη βιωσιμότητα στη γεωργική παραγωγή και μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ως εκ τούτου, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προτείνεται ως βιώσιμη λύση για τη γεωργία της περιοχής.

Η εργασία των Aschilean et al. (2018) επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας καινοτόμου ιδέας ανθεκτικού θερμοκηπίου που ενσωματώνει ένα πολύπλοκο ενεργειακό σύστημα βασισμένο σε κυψέλες καυσίμου και ηλιακούς συλλέκτες. Η προσέγγιση αυτή επιδιώκει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που σχετίζονται με την τοπική εφαρμογή θερμοκηπίων, κυρίως όσον αφορά την εξασφάλιση επαρκούς ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από συμβατικές πηγές για τη δημιουργία ιδανικών κλιματικών συνθηκών για την καλλιέργεια φυτών. Το έργο κατέληξε στον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός βιώσιμου ενεργειακού συστήματος για θερμοκήπια, που εκμεταλλεύεται τη συνδυασμένη χρήση κυψελών καυσίμου και ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη και ανθεκτική λύση για την ενεργειακή αυτονομία.

Το άρθρο των Mostefaoui & Amara (2018) εξετάζει βιώσιμες λύσεις για την κάλυψη των ενεργειακών και υδάτινων αναγκών ενός πιλοτικού θερμοκηπίου, συνδυάζοντας αποθήκευση θερμικής ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και φωτοβολταϊκά συστήματα (PV). Οι μηνιαίες απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης υπολογίστηκαν σε 2,25 kW και 2 kW, αντίστοιχα, ενώ η κατανάλωση νερού κυμαίνεται από 3,5 m³ έως 38 m³, ανάλογα με την καλλιέργεια (ντομάτα, μοσχοκάρπι, καρπούζι). Οι προτεινόμενες τεχνολογίες καλύπτουν πλήρως αυτές τις ανάγκες, ενώ η οικονομική ανάλυση αναδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών σε σχέση με τα συστήματα ντίζελ. Συγκεκριμένα, το ισοπεδωμένο κόστος ενέργειας (LCOE) των PV είναι 0,068 \$/kWh, σημαντικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο κόστος του ντίζελ (0,230 \$/kWh), ενώ το κόστος νερού ανέρχεται σε 1,48 \$ με PV έναντι 2,68 \$ με ντίζελ. Το άρθρο καταλήγει ότι η χρήση των προτεινόμενων τεχνολογιών είναι πιο οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά βιώσιμη, παρέχοντας μια πολλά υποσχόμενη λύση για θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Η έρευνα των Al-Mezeini et al. (2019) αποσκοπεί στην αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας (EEE) για την παραγωγή θερμοκηπίου αγγουριού στο Ομάν. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν μέσω προσωπικών συνεντεύξεων με αγρότες της περιοχής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συνολικές εισροές ενέργειας για την παραγωγή θερμοκηπίου αγγουριού ήταν κυρίως η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί στο 88% της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την κυρίαρχη μορφή ενέργειας στην παραγωγή αγγουριών θερμοκηπίου, με το 99% αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας να προορίζεται αποκλειστικά για ψύξη του θερμοκηπίου. Όταν οι εισροές ενέργειας διαχωρίζονται στις διάφορες κατηγορίες τους, δηλαδή άμεση (D) και έμμεση (ID), καθώς επίσης και ανανεώσιμη (R) και μη

ανανεώσιμη (NR), το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη παραγωγή είναι από άμεση ενέργεια και μη ανανεώσιμες πηγές. Η ενεργειακή αποδοτικότητα (EUE) και η ενεργειακή παραγωγικότητα (EP) βρέθηκαν να είναι 0,08 και 0,10 τόνοι GJ-1, αντίστοιχα. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η χρήση ενέργειας στην παραγωγή αγγουριού σε θερμοκήπια είναι αναποτελεσματική και επιβάλλεται να εξεταστεί η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη βελτίωση της βιώσιμης παραγωγής θερμοκηπίου αγγουριού στο Ομάν.

Η μελέτη των Mirzamohammadi et al. (2020) εστιάζει στον σχεδιασμό ενεργειακού εφοδιασμού για τη γεωργία θερμοκηπίου, δίνοντας έμφαση στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρουσιάζεται η βέλτιστη αξιοποίηση μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης ενέργειας μέσω μαθηματικού προγραμματισμού σε δύο σενάρια λειτουργίας: μικροδίκτυο και σύνδεση στο δίκτυο. Για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας στην ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, χρησιμοποιείται η προσέγγιση ισχυρής βελτιστοποίησης βασισμένη σε σενάρια, με στόχο τη μεγιστοποίηση του εισοδήματος στη λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο και την ελαχιστοποίηση του κόστους στη λειτουργία μικροδικτύου. Η περιοχή Makran στο Ιράν χρησιμοποιείται ως μελέτη περίπτωσης, ενώ αναπτύσσεται αλγόριθμος για την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων και τη βέλτιστη λύση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στη λειτουργία μικροδικτύου, το χαμηλότερο κόστος επένδυσης προκύπτει όταν το κόστος των συστημάτων συμπαραγωγής (ΣΗΘ) είναι μισό από το αντίστοιχο της ηλιακής ενέργειας και τετραπλάσιο από αυτό των μπαταριών. Επιπλέον, σε συνδυασμένη χρήση ηλιακών και αιολικών πηγών, οι αιολικοί πόροι συμβάλλουν περισσότερο στην ενεργειακή παραγωγή. Στη λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο, παρατηρείται ότι αν οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας είναι ίσες, η ενέργεια καταναλώνεται αποκλειστικά στο θερμοκήπιο, ενώ σε περιπτώσεις υψηλότερου κόστους ενός εκ των πόρων, δεν συμφέρει η πώληση ενέργειας στο δίκτυο.

Η μελέτη των Lee et al. (2021) εξέτασε την εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη θέρμανση θερμοκηπίων στη Δημοκρατία της Κορέας, κατασκευάζοντας και αξιολογώντας τρία υβριδικά συστήματα θέρμανσης: λέβητα pellet (σύστημα 1), υδροθερμική αντλία θερμότητας (σύστημα 2) και σύστημα συλλογής ηλιακής θερμότητας (σύστημα 3). Η σύγκριση των συστημάτων βασίστηκε στις επιδόσεις θέρμανσης, στη συνδυασμένη θερμική απόδοση, στην κατανάλωση ενέργειας και στο

κόστος ανά ανύψωση θερμοκρασίας. Αν και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στις θερμικές αποδόσεις, το σύστημα 1 παρουσίασε εξοικονόμηση ενέργειας κατά 25,7% και κόστους κατά 24,1% σε σύγκριση με τα άλλα συστήματα. Επιπλέον, από την οικονομική ανάλυση με τις μεθόδους καθαρής παρούσας αξίας και κόστους κύκλου ζωής, το σύστημα 1 μείωσε το κόστος κατά 29,2% και 27,7%, αντίστοιχα, σε σχέση με τους συμβατικούς λέβητες ορυκτών καυσίμων. Συνεπώς, το υβριδικό σύστημα 1 κρίθηκε ως η πιο οικονομική και αποδοτική επιλογή.

Η έρευνα των Abedrabboh et al. (2022) προτείνει ένα καινοτόμο, ανθεκτικό και βιώσιμο σύστημα θερμοκηπίου, σχεδιασμένο να ελέγχει το εσωτερικό κλίμα εντός του ιδανικού εύρους καλλιέργειας. Το σύστημα αυτό ενσωματώνει συμπυκνωμένο φωτοβολταϊκό θερμικό σύστημα με τεχνολογία μεταφοράς θερμότητας, αποθήκευση θερμικής ενέργειας με υλικό αλλαγής φάσης, σύστημα ψύξης απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου, εναλλάκτη θερμότητας εδάφους γεωτρήσεων και επιλεκτική οροφή θερμοκηπίου. Λειτουργεί αποκλειστικά με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή ακτινοβολία, ατμοσφαιρικό αέρα και γεωθερμική ψύξη, παρέχοντας ηλεκτρισμό, ψύξη, κλιματισμό και νερό άρδευσης. Η θερμοδυναμική ανάλυση του συστήματος αποκάλυψε ενεργειακή απόδοση 43,36% και απόδοση ενέργειας 19,19%. Η επιλεκτική οροφή μείωσε το μέγιστο ψυκτικό φορτίο κατά 29,2% σε σχέση με τη συμβατική οροφή θερμοκηπίου. Σε θερμό και ξηρό κλίμα, το σύστημα παρήγαγε 33,28 kW ψύξης, 29,3 kW ηλεκτρικής ενέργειας, 8,36 L/h αφυγρανθέν νερό άρδευσης και 250 m³/h ξηρό αέρα εξαερισμού. Η οικονομική ανάλυση με βάση το κόστος κύκλου ζωής έδειξε ανταγωνιστικά κόστη: 0,021 USD/kWh για ψύξη, 0,0366 USD/kWh για ηλεκτρική ενέργεια και 8,8 USD/m³ για νερό, καθιστώντας το σύστημα οικονομικά βιώσιμο και αυτόνομο.

Η μελέτη των Ponkratov et al. (2022) εξετάζει τον αντίκτυπο της ανάπτυξης σύγχρονων εγκαταστάσεων και τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εστιάζοντας στις δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ βιώσιμης ανάπτυξης, κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Bayesian Vector Auto Regression (BVAR), η έρευνα ανέλυσε το Μοτίβο Βιώσιμης Ενέργειας-Ενεργειακής Ανάπτυξης, με τον δείκτη Τροποποιημένης Καθαρής Ρύθμισης (GS) να χρησιμοποιείται ως βασικός δείκτης βιώσιμης ανάπτυξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θετική ώθηση στην κατανάλωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενισχύει τη βιώσιμη ανάπτυξη στην Ουγκάντα, ενώ παράλληλα αυξάνει τις εκπομπές CO₂ σε διαφορετικό βαθμό.

Ωστόσο, η αύξηση του δείκτη βιώσιμης ανάπτυξης φαίνεται να έχει αρνητική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας, τόσο από ανανεώσιμες όσο και μη ανανεώσιμες πηγές. Με βάση το κριτήριο RMSE, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση SSVS-Full για τη διερεύνηση του αντίκτυπου της κατανάλωσης ανανεώσιμης ενέργειας στη βιώσιμη ανάπτυξη, ενώ η ανεξάρτητη συνάρτηση Normal-Wishart παρείχε πρόσθετα ευρήματα. Συνολικά, η έρευνα επισημαίνει τη σύνθετη σχέση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας, βιώσιμης ανάπτυξης και εκπομπών CO₂, υπογραμμίζοντας την ανάγκη στρατηγικού σχεδιασμού για την προώθηση της βιωσιμότητας.

Στην εργασία των Liantas et al. (2023), συγκρίθηκαν δύο διαφορετικές ενεργειακές λύσεις για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης στη ριζική ζώνη των μωρών φυλλωδών λαχανικών που καλλιεργούνται σε υδροπονικές δεξαμενές. Στην πρώτη περίπτωση, οι ενεργειακές ανάγκες καλύφθηκαν μέσω του δημόσιου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε φωτοβολταϊκό σύστημα. Το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με φωτοβολταϊκά πάνελ, μετατροπέα, ελεγκτή φόρτισης και σύστημα αποθήκευσης. Σκοπός ήταν η διατήρηση της θερμοκρασίας της ριζικής ζώνης σταθερή στους 22 °C. Καταγράφηκαν δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία της ριζικής ζώνης, τη θερμοκρασία του αέρα και την υγρασία από τον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο του θερμοκηπίου. Η μελέτη αξιολόγησε την ενεργειακή απόδοση, το αποτύπωμα άνθρακα καθώς και την απόδοση της καλλιέργειας για διαφορετικές εποχές του έτους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες κάλυψαν το 58,0% της ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη της ριζικής ζώνης κατά την άνοιξη, το 83,3% το καλοκαίρι και το 9,6% το χειμώνα. Σε ό, τι αφορά το αποτύπωμα άνθρακα, το σύστημα με φωτοβολταϊκά είχε σημαντικά χαμηλότερη τιμή σε σύγκριση με το σύστημα που βασιζόταν στην καύση ορυκτών καυσίμων. Συγκεκριμένα, το αποτύπωμα άνθρακα του συστήματος φωτοβολταϊκών υπολογίστηκε σε 1,6 kg CO₂-eq/kg, ενώ το σύστημα με καύση PPG είχε αποτύπωμα 49,9 kg CO₂-eq/kg. Αυτό καταδεικνύει τη σημαντική περιβαλλοντική ωφέλεια που προσφέρει η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα θερμοκήπια, μειώνοντας δραστικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Η μελέτη των Behroozeh et al. (2024) επικεντρώνεται στη μέτρηση και τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης βασισμένης στις συνιστώσες της βιωσιμότητας της χρήσης ενέργειας, όπως είναι τα Περιβαλλοντικά Πρότυπα, οι Περιβαλλοντικές Πεποιθήσεις, οι Περιβαλλοντικές Αξίες, η Τεχνική Διαχείριση, η Τεχνική Γνώση, το Επίπεδο

Εκπαίδευσης, η Εργασιακή Εμπειρία Θερμοκηπίου, το Κόστος-Αποτελεσματικότητα και οι Υπηρεσίες Εκπαιδευτικής Επέκτασης, μεταξύ των καλλιεργητών αγγουριών θερμοκηπίου. Ο στατιστικός πληθυσμός της μελέτης περιλαμβάνει ιδιοκτήτες θερμοκηπίων παραγωγής αγγουριού στην επαρχία Κερμάν του Ιράν. Από το σύνολο του πληθυσμού, επιλέχθηκαν 356 περιπτώσεις μέσω της μεθόδου της ομαδικής δειγματοληψίας δύο σταδίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση ενεργειακή απόδοση στις υπό μελέτη μονάδες ήταν 0,72 (σε μια κλίμακα από 0 έως 1), με 21 θερμοκήπια να χρησιμοποιούν ενεργειακά αποδοτικά μέσα και 335 θερμοκήπια να χρησιμοποιούν μη αποδοτικά μέσα. Σύμφωνα με τις συνιστώσες της βιωσιμότητας της χρήσης ενέργειας, παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ αποδοτικών και μη αποδοτικών θερμοκηπίων, με τα ενεργειακά αποδοτικά θερμοκήπια να έχουν υψηλότερο επίπεδο στα σχετικά στοιχεία (Περιβαλλοντικές Αξίες, Εκπαίδευση, Εμπειρία κ.λπ.). Η μελέτη προτείνει ότι οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, τα ενδιαφερόμενα μέρη και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής στον τομέα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όλες τις συνιστώσες της βιωσιμότητας της χρήσης ενέργειας. Οι αναπτυγμένες πολιτικές και τα προγράμματα θα πρέπει να καλύπτουν όλες τις διαστάσεις και να λαμβάνουν υπόψη διαφορετικές πτυχές της βιωσιμότητας, ώστε να επιτευχθεί μια πιο ολοκληρωμένη και αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας στον τομέα της γεωργίας θερμοκηπίου.

Η έρευνα των Hosseini et al. (2024) προσφέρει μια καινοτόμο προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της ενέργειας στα θερμοκήπια του Ιράν, εστιάζοντας στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μέσα από τη μελέτη πέντε διαφορετικών πόλεων - Τεχεράνης, Ταμπρίζ, Ραστ, Μπαντάρ Αμπάς και Γιαζντ - εντοπίζει τις καταλληλότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση θερμοκηπίων βασισμένων σε ΑΠΕ. Χρησιμοποιώντας θερμική μοντελοποίηση για περιβαλλοντικό έλεγχο, η μελέτη καθορίζει το απαραίτητο φορτίο θέρμανσης και ψύξης μέσα στο θερμοκήπιο, αξιοποιώντας εξαρτήματα που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι επιστημονικές μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων εφαρμόζονται για να αξιολογήσουν κάθε περιοχή σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας και νερού, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν τη Γιαζντ, μια πόλη με ζεστό και ξηρό κλίμα, ως την πιο ενεργειακά αποδοτική τοποθεσία, με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 190,9 MWh και τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων που φτάνει τα 18,32 τόνοι. Αντίθετα, το Μπαντάρ Αμπάς, όπου το κλίμα είναι ζεστό και υγρό, ξεχωρίζει για τη χαμηλότερη κατανάλωση νερού,

μόλις 2,76 m³. Αυτό καταδεικνύει ότι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε θερμοκήπια θα ήταν ιδιαίτερα κατάλληλη για πόλεις με ζεστές και ξηρές καιρικές συνθήκες, προσφέροντας ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτικές και περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις.

Η έρευνα των Godlonton et al. (2024) παρουσιάζει μια εκτενή μελέτη για τη σύνθεση και τη βελτιστοποίηση ενός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας ΑΠΕ και πόρων (SCN), με στόχο την ικανοποίηση των γεωργικών αναγκών ενέργειας και πόρων στα θερμοκήπια. Το SCN περιλαμβάνει τη βιομάζα από γεωργικά απόβλητα, η οποία μεταφέρεται σε έναν κόμβο κοινής ωφέλειας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω λέβητα, ατμοστρόβιλου-γεννήτριας και ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV). Οι στόχοι της μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους (TAC) και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (EI), οι οποίες υπολογίζονται με βάση τις εκπομπές CO₂ του δικτύου. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε μια μελέτη περίπτωσης στην αγροτοβιομηχανική ζώνη της επαρχίας Kwa-Zulu Natal (KZN) στη Νότια Αφρική. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το δίκτυο μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των θερμοκηπίων με ελάχιστο TAC που ανέρχεται στα 8.052 R/y και EI στα 14.370 tCO₂e/y. Η βιομάζα από γεωργικά απόβλητα συνεισφέρει σημαντικά στο TAC, καλύπτοντας το 43,7% του συνολικού κόστους, ενώ η καύση βιομάζας αντιπροσωπεύει το 99,8% των εκπομπών CO₂. Οι 26.560 MWh/έτος που παρέχονται στα θερμοκήπια αποτελούνται κατά 71,4% από ενέργεια που παράγεται μέσω λέβητα και γεννήτριας στρόβιλου, ενώ το υπόλοιπο 28,6% προέρχεται από ηλιακά φωτοβολταϊκά.

Η μελέτη των Jamroen et al. (2024) επικεντρώνεται στη βελτίωση της καλλιέργειας θερμοκηπίου στην Ταϊλάνδη, όπου οι υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία καθιστούν την καλλιέργεια ποικιλιών πεπονιού υψηλής ποιότητας ενεργοβόρα. Η έρευνα έχει δύο κύριους στόχους: (1) την εισαγωγή μιας νέας προσαρμοστικής μεθόδου ελέγχου της θερμοκρασίας και (2) την αξιολόγηση του δυναμικού ανανεώσιμης ενέργειας (RE) για θερμοκηπιακή χρήση. Για τον πρώτο στόχο, η μέθοδος βασισμένη στο droop αποδείχθηκε ανεπαρκής λόγω έλλειψης ευελιξίας στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Η ενσωμάτωση συστήματος ασαφούς λογικής βελτίωσε τη δυναμική ρύθμιση του συντελεστή πτώσης, λαμβάνοντας υπόψη την απόκλιση θερμοκρασίας και τον ρυθμό μεταβολής της. Με χρήση δεδομένων από θερμοκήπιο στο Rayong της Ταϊλάνδης, η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίθηκε με άλλες προσεγγίσεις, όπως αυτές του προγραμματισμού και της αναλογικής-ολοκληρωτικής-παράγωγης (PID) ρύθμισης. Η

μέθοδος μείωσε το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος (MAPE) και το ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) έως 84,65% και 66,57%, αντίστοιχα. Επίσης, μείωσε την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 58,78% και του νερού κατά 68,90%. Στον δεύτερο στόχο, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Homer Pro για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υιοθέτηση ΑΠΕ, σε συνδυασμό με την προτεινόμενη μέθοδο, μείωσε το καθαρό παρόν κόστος έως και 51,3%, καθιστώντας το σύστημα θερμοκηπίου βιώσιμο, αποδοτικό και οικονομικό.

Η μελέτη των Joensuu et al. (2024) διερευνά την παραγωγή μαρουλιού σε κάθετη γεωργία και συμβατική παραγωγή θερμοκηπίου στις συνθήκες της Βόρειας Ευρώπης, αξιολογώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και τη βιωσιμότητα. Σκοπός της είναι να προσδιορίσει τις πρακτικές που μπορούν να μετριάσουν τις αρνητικές συνέπειες και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της χρήσης πόρων, ώστε να οδηγήσουν σε πιο βιώσιμα συστήματα παραγωγής. Η μελέτη χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA) για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής μαρουλιού. Οι επιπτώσεις που αξιολογήθηκαν περιλαμβάνουν την κλιματική αλλαγή, τη σωρευτική κατανάλωση ενέργειας, τη χρήση ορυκτών πηγών ενέργειας, τη χρήση ορυκτών και μετάλλων, τη χρήση γης και την λειψυδρία. Το σύστημα παραγωγής καλύπτει την αλυσίδα από το "λίκνο μέχρι το αγρόκτημα", εξετάζοντας τις εισροές παραγωγής, τις εκπομπές που προκύπτουν από τη χρήση λιπασμάτων, καθώς και την επιτόπια διαχείριση των οργανικών αποβλήτων. Η ανάλυση δείχνει ότι η κάθετη γεωργία με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ανάκτηση απορριμμάτων θερμότητας παρουσιάζει χαμηλότερες επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε σύγκριση με την παραγωγή θερμοκηπίου με μέση κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, για τη χρήση ενέργειας και ενεργειακών πόρων, η κάθετη γεωργία καταγράφει χαμηλότερες επιπτώσεις από τα θερμοκήπια, ενώ για τη χρήση ορυκτών και μετάλλων, καθώς και τη λειψυδρία, οι επιπτώσεις είναι υψηλότερες στην κάθετη γεωργία με μέση κατανάλωση ενέργειας χωρίς ανάκτηση θερμότητας. Οι άμεσες επιπτώσεις από τη χρήση γης και νερού άρδευσης στις φινλανδικές συνθήκες είναι μικρότερες, τόσο για τις δύο μεθόδους παραγωγής.

Η μελέτη των Lachheb et al. (2024) εξετάζει τη βιωσιμότητα της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, για την τροφοδοσία ενός υδροπονικού θερμοκηπίου, με στόχο την ενεργειακή αυτονομία. Η έρευνα ξεκινά με την αξιολόγηση της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του

θερμοκηπίου, για να προσδιοριστούν οι ενεργειακές του ανάγκες σε καθημερινή βάση. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να καλύψει αυτές τις ανάγκες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το κύριο αντικείμενο της έρευνας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης δύο τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: φωτοβολταϊκών πάνελ και ανεμογεννητριών, με στόχο τη βελτίωση της ενσωμάτωσής τους στο γεωργικό περιβάλλον. Η μελέτη περιλαμβάνει δύο σενάρια, το πρώτο βασίζεται σε έναν φωτοβολταϊκό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής συνδεδεμένο στο δίκτυο με αποθηκευτικό χώρο, ενώ το δεύτερο εξετάζει έναν αιολικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής επίσης συνδεδεμένο στο δίκτυο. Η ανάλυση συμπληρώνεται από πειραματική μελέτη, η οποία περιλαμβάνει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ συνδεδεμένων στο δίκτυο, με αποθηκευτικό χώρο, για έναν χρόνο. Στο θερμοκήπιο αναπτύχθηκε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ελεγκτή ασαφούς λογικής, το οποίο στοχεύει στην επίτευξη ενεργειακής ισορροπίας και στην εξασφάλιση συνεχούς παροχής ενέργειας.

Σύνοψη

Οι μελέτες που εξετάστηκαν επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και βιωσιμότητας θερμοκηπίων, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και καινοτόμες τεχνολογίες. Οι Mirzamohammadi et al. (2020) διερεύνησαν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μικροδίκτυα και δίκτυα σύνδεσης, με έμφαση στη μείωση κόστους και τη μεγιστοποίηση εισοδήματος. Η έρευνα των Aschilean et al. (2018) πρότεινε την ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου και ηλιακών συλλεκτών για την ανάπτυξη ανθεκτικών θερμοκηπίων. Οι Lee et al. (2021) ανέλυσαν τρία υβριδικά συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων στη Νότια Κορέα, καταδεικνύοντας την οικονομική υπεροχή ενός συστήματος με λέβητα pellet.

Οι Abedrabboh et al. (2022) πρότειναν ένα ολοκληρωμένο σύστημα θερμοκηπίου που βασίζεται σε καινοτόμες τεχνολογίες, όπως επιλεκτική οροφή και αποθήκευση θερμικής ενέργειας, παρουσιάζοντας σημαντική βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα και μείωση κόστους. Οι Ponkratov et al. (2022) ανέλυσαν τη σχέση μεταξύ κατανάλωσης ανανεώσιμης ενέργειας και βιώσιμης ανάπτυξης μέσω μεθόδων οικονομετρικής μοντελοποίησης, υπογραμμίζοντας τη θετική επίδραση της κατανάλωσης ανανεώσιμων πόρων. Η μελέτη των Jamroen et al. (2024) επικεντρώθηκε σε ένα προσαρμοστικό σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας θερμοκηπίων

στην Ταϊλάνδη, ενσωματώνοντας συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας για την ελαχιστοποίηση των πόρων που καταναλώνονται.

Τέλος, οι Mostefaoui & Amara (2018) πρότειναν τη χρήση φωτοβολταϊκών και συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, ψύξης και άρδευσης θερμοκηπίων, επιτυγχάνοντας χαμηλότερο κόστος ενέργειας και νερού σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Συνολικά, οι μελέτες δείχνουν ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι καινοτόμες τεχνολογίες αποτελούν πολλά υποσχόμενες λύσεις για βιώσιμες και αποδοτικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε τη σημασία της αξιοποίησης ΑΠΕ στη λειτουργία των θερμοκηπίων, με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την ενίσχυση της βιωσιμότητας της γεωργικής παραγωγής. Η ανάλυση κατέδειξε ότι η χρήση ΑΠΕ συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του ενεργειακού κόστους, ιδιαίτερα σε θερμοκήπια με υψηλές απαιτήσεις θέρμανσης και φωτισμού. Η μετάβαση από συμβατικές πηγές ενέργειας στις ΑΠΕ μπορεί να μειώσει το κόστος λειτουργίας και να ενισχύσει την οικονομική βιωσιμότητα των καλλιεργειών.

Ένα από τα βασικά περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης ΑΠΕ είναι η σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας έτσι στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, η ενεργειακή αυτονομία που προσφέρουν οι ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες, μειώνει την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας, καθιστώντας τα θερμοκήπια πιο ανθεκτικά στις διακυμάνσεις της αγοράς ενέργειας.

Παρόλα αυτά, η μελέτη αποκάλυψε ότι υπάρχουν προκλήσεις που συνδέονται με την υιοθέτηση των ΑΠΕ. Το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, οι γεωγραφικοί περιορισμοί, όπως η περιορισμένη ηλιοφάνεια ή η έλλειψη γεωθερμικών πόρων, και οι τεχνικές δυσκολίες στη συντήρηση των συστημάτων αποτελούν βασικά εμπόδια. Παρά τις δυσκολίες, οι τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η ανάπτυξη πιο αποδοτικών φωτοβολταϊκών και γεωθερμικών συστημάτων, ανοίγουν νέους δρόμους για την ευρύτερη εφαρμογή των ΑΠΕ στα θερμοκήπια.

Τέλος, η υποστήριξη μέσω πολιτικών κινήτρων, επιδοτήσεων και χρηματοδοτικών προγραμμάτων αναδείχθηκε ως καθοριστικός παράγοντας για την ενίσχυση της χρήσης ΑΠΕ στον αγροτικό τομέα. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών προωθεί την αειφόρο ανάπτυξη, ενισχύει την κυκλική οικονομία και καθιστά τη γεωργία πιο ανθεκτική και περιβαλλοντικά φιλική.

Συνοψίζοντας, η χρήση ΑΠΕ στα θερμοκήπια αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βιώσιμη γεωργία, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Με τη συνεχή τεχνολογική πρόοδο και την υποστήριξη κατάλληλων πολιτικών, τα θερμοκήπια που αξιοποιούν ΑΠΕ μπορούν να αποτελέσουν πρότυπο για το μέλλον της ενεργειακά αποδοτικής γεωργίας.

Βιβλιογραφία

1. Μπόκας, Ν. (2019). Η σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την εθνική ασφάλεια. *Pro Justitia*, 50-61
2. Ν. 2773/1999. Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας-Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις. ΦΕΚ Α' 286
3. Abdul, D., Wenqi, J. & Tanveer, A. (2022). Prioritization of renewable energy source for electricity generation through AHP-VIKOR integrated methodology. *Renewable Energy*, 184, 1018-1032
4. Abedrabboh, O., Κοç, M. & Biçer, Y. (2022). Modelling and analysis of a renewable energy-driven climate-controlled sustainable greenhouse for hot and arid climates. *Energy Conversion and Management*, 273, 116412
5. Achour, Y., Ouammi, A. & Zejli, D. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111251
6. Ahamed, S., Guo, H. & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 178, 9-33
7. Ahsan, A., Rahman, S. & Ahamed, S. (2025). Geothermal energy application for greenhouse microclimate management: A review. *Geothermics*, 127, 103209
8. Ajaj, Y., Ali, A., Kumar, A. et al. (2024). Innovative biomass waste heat utilization for green hydrogen production: A comparative and optimization study of steam and organic rankine cycles. *Process Safety and Environmental Protection*, 190, 148-174
9. Al-Helal, I., Alsadon, A., Marey, S. et al. (2022). Geothermal Energy Potential for Cooling/Heating Greenhouses in Hot Arid Regions. *Atmosphere*, 13, 105
10. Algarni, S., Tirth, V., Alqahtani, T. et al. (2023). Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103098
11. Al-Mezeini, N.K., Al-Ismaili, A. & Tabook, S. (2018). Evaluation of energy use efficiency for greenhouse cucumber production in Barka, Oman. *Journal of Agricultural and Marine Sciences*, 24, 24– 29

12. Alrikabi, A. (2014). Renewable Energy Types. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(1)
13. Al-Yasiri, A., Abood Ali, M., Saiad Ali, R. & Nima Bekheet, H. (2020). Renewable Energy Sources in International Energy Markets: Reality and Prospects. *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 11(3)
14. Anakhov, P., Zhebka, V., Koretska, V., Sokolov, V.Y. & Skladannyi, P. (2022). Increasing the Functional Network Stability in the Depression Zone of the Hydroelectric Power Station Reservoir. *Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things*, 3149, 169-176
15. Arcelay, I., Goti, A., Oyarbide-Zubillaga, A., Akyazi, T., Alberdi, E. & Garcia-Bringas, P. (2021). Definition of the Future Skills Needs of Job Profiles in the Renewable Energy Sector. *Energies*, 14
16. Aschilean, I., Rasoi, G., Raboaca, M.S. et al. (2018). Design and Concept of an Energy System Based on Renewable Sources for Greenhouse Sustainable Agriculture. *Energies*, 11, 1201
17. Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y.D. et al. (2024). Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: a focus on environmental policy and preventive environmental management. *Discover Environment*, 2(8)
18. Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133753
19. Bakhsh, S., Zhang, W., Ali, K. & Olah, J. (2024). Strategy towards sustainable energy transition: The effect of environmental governance, economic complexity and geopolitics. *Energy Strategy Reviews*, 52, 101330
20. Batel, S. & Küpers, S. (2023). Politicizing hydroelectric power plants in Portugal: spatio-temporal injustices and psychosocial impacts of renewable energy colonialism in the Global North. *Globalizations*, 20(6), 887-906
21. Bayazit, Y. (2021). The effect of hydroelectric power plants on the carbon emission: An example of Gokcekaya dam, Turkey. *Renewable Energy*, 170, 181-187
22. Behroozeh, S., Hayati, D., Karami, E., Nassiri, S.M. & Rezaei-Moghaddam, K. (2024). Evaluation and comparison of energy use efficiency among cucumber greenhouses. *Front. Sustain. Food Syst.* 8, 1427530

23. Benti, N.E., Gurmesa, G.S., Argaw, T. et al. (2021). The current status, challenges and prospects of using biomass energy in Ethiopia. *Biotechnol Biofuels*, 14, 209
24. Bergstrand, K.J. (2022). Organic fertilizers in greenhouse production systems – a review. *Scientia Horticulturae*, 295, 110855
25. Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Szymańska, E.J., Jankowski, K.J., Dubis, B., & Dunn, J.W. (2019). Development of renewable Energy sources market and biofuels in the European Union. *J. Clean. Prod.*, 228, 467–484
26. Castro, R.P., Dinho da Silva, P. & Pires, L.C.C. (2024). Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review. *Appl. Sci.*, 14, 6158
27. Chacha, J., Thirumalai, M., Idawa, O. et al. (2023). Greenhouse and open-field farming: A comparison through yield and growth parameters investigated in Dar es Salaam, Tanzania. *Innovations in Agriculture*
28. Chen, Y., Sun, Z., Zhou, Y., Yang, W. & Ma, Y. (2024). The future of sustainable farming: An evolutionary game framework for the promotion of agricultural green production technologies. *Journal of Cleaner Production*, 460, 142606
29. Constante, D.M.A. & Erazo, C.R.R. (2024). The role of renewable energies in the transition to a sustainable energy model: Challenges and opportunities. *Journal of Business and entrepreneurial*, 8(3), 38-48
30. Costa, E., Martins, M.B., Vendruscolo, E.P. et al. (2020). Greenhouses within the Agricultura 4.0 interface. *Revista Ciência Agronômica*, 51
31. Cuce, E., Harjunowibowo, D. & Cuce, P.M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34-59
32. Dalai, S., Tripathy, B., Mohanta, S. et al. (2020). Green-houses: Types and Structural Components. Types and Structural Components. In: Protected Cultivation and Smart Agriculture edited by Sagar Maitra, Dinkar J Gaikwad and Tanmoy Shankar, New Delhi Publishers, New Delhi, 09-17
33. Deshmukh, K.G., Sameeroddin, M., Abdul, D. & Sattar, M.A. (2023). Renewable energy in the 21st century: A review. *Materials Today Proceedings*, 80(30), 1756-1759

34. Dutta, R., Chanda, K. & Maity, R. (2022). Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis. *Renewable Energy*, 188, 819-829
35. Dumitriu, M.-L. I. (2021). The Principles of Environmental Protection. *Perspective Politice*, 14(1-2), 125-133
36. Engler, N. & Krarti, M. (2021). Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110786
37. Erdiwansyah, Mahidin, Husin, H., Nasaruddin, Zaki, M. & Muhibbuddin (2021). A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(3)
38. Ermakova, A.M. (2022). Environmental protection as a mechanism for the sustainable development of the region. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 979, 012144
39. Fenibo, E.O., Ijoma, G.N. & Matambo, T. (2021). Biopesticides in Sustainable Agriculture: A Critical Sustainable Development Driver Governed by Green Chemistry Principles. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:619058
40. Freires, F.J., Damasceno, V.N., Machado, A.L.S. et al. (2023). Advantages and disadvantages of renewable energy: a review of the scientific literature. *Revista Gestão e Secretariado (GeSec)*, São Paulo, 14(11), 20221-20240
41. Ghiasi, M., Wang, Z., Mehrandezh, M. & Paranjape, R. (2025). Enhancing efficiency through integration of geothermal and photovoltaic in heating systems of a greenhouse for sustainable agriculture. *Sustainable Cities and Society*, 118, 106040
42. Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E. et al. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, 183, 121-150
43. Gromada, A., Trebska, P. & Wysokinski, M. (2019). Use of renewable energy in the European Union – Trends of change. Proceedings of the 2019 International Conference Economic Science for Rural Development, No 51 Jelgava, LLU ESAF, 122-128
44. Guo, B., Zhou, B, Zhang, Z. et al. (2024). A Critical Review of the Status of Current Greenhouse Technology in China and Development Prospects. *Appl. Sci.*, 14, 5952

45. Hamdane, S., Pires, L.C.C., Silva, P.D. & Gaspar, P.D. (2023). Evaluating the Thermal Performance and Environmental Impact of Agricultural Greenhouses Using Earth-to-Air Heat Exchanger: An Experimental Study. *Appl. Sci.*, 13, 1119
46. Harjanne, A. & Korhonen, J. (2019). Abandoning the Concept of Renewable Energy. *Energy Policy*, 127, 330-340
47. Hassan, S., Jadallah, A., Bilal, G. & Iraq, B. (2021). Smart Greenhouse Powered by Solar Energy: A Review. *Solid State Technology*, 64(2)
48. Hautereau-Boutonnet, M. & Maljean-Dubois, S. (2022). The Paris Agreement on Climate Change: A Subtle Combination of Tools and Actors for Better Enforcement?. *Environmental Policy and Law*, 52, 389 - 398
49. Hosseini, M., Shahverdian, M.H., Sayyaadi, H. & Javadijam, R. (2024). Renewable energy supplying strategy for a greenhouse based on the water-energy-economy nexus. *Journal of Cleaner Production*, 457, 142388
50. Hoseinzadeh, S. & Garcia, D.A. (2024). Ai-driven innovations in greenhouse agriculture: Reanalysis of sustainability and energy efficiency impacts. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100701
51. Hosny, K., El-Hady, W. & Samy, F. (2024). Technologies, Protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse Farming: A survey of recent advances. *Information Processing in Agriculture*
52. Hu, G. & You, F. (2022). Renewable energy-powered semi-closed greenhouse for sustainable crop production using model predictive control and machine learning for energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112790
53. Godlonton, A., Borain, C., Isafade, A. et al. (2024). Synthesis and Optimisation of an Integrated Renewable Energy and Greenhouse Network. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 8, 791–811
54. Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorro, G. & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109480
55. Jamal-Uddin, A.-T., Salaudeen, S.A., Dutta, A. & Zytner, R.G. (2022). Hydrothermal Conversion of Waste Biomass from Greenhouses into Hydrochar

- for Energy, Soil Amendment, and Wastewater Treatment Applications. *Energies*, 15, 3663
56. Jameel, M.M., Khessro, M.K. & AL-Bayati, H.J. (2021). Effect traditional greenhouse (high tunnel) in the characteristics of growth and yield of the cucumber. *Plant Archives*, 21(1), 781-784
 57. Jamroen, C., Jirayus, P., Saneseepon, P. & Suttikul, T. (2024). Toward sustainable greenhouses: Self-tuning adaptive temperature control and its renewable energy potential. *Energy Reports*, 12, 1608-1622
 58. Joensuu, K., Kotilainen, T., Räsänen, R. et al. (2024). Assessment of climate change impact and resource-use efficiency of lettuce production in vertical farming and greenhouse production in Finland: a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29, 1932–1944
 59. Kaartemo, V. & Gonzalez-Perez, M.A. (2020). Renewable energy in international business. *Critical perspectives on international business*, 16(4), 325-336
 60. Karanisa, T., Achour, Y., Ouammi, A. & Sayadi, S. (2022). Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar. *Environment Systems and Decisions*, 42, 521–546
 61. Khaleefah, N. & Jabir, S. (2012). *The use of solid waste to produce energy*. Proc.3ed Conference of Planning, Dohok & Dortmund University, 12-15
 62. Kim, M.H., Kim, D.W., Lee, D.W. & Heo, J. (2023). Energy conservation performance of a solar thermal and seasonal thermal energy storage-based renewable energy convergence system for glass greenhouses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 44, 102895
 63. Koukounaras, A. (2021). Advanced Greenhouse Horticulture: New Technologies and Cultivation Practices. *Horticulturae*, 7(1)
 64. Kulin, J. & Sevä, I.J. (2019). The Role of Government in Protecting the Environment: Quality of Government and the Translation of Normative Views about Government Responsibility into Spending Preferences. *International Journal of Sociology*, 49(2), 110-129
 65. Lachheb, A., Marouani, R., Mahamat, C., Skouri, S. & Bouadila, S. (2024). Fostering Sustainability through the Integration of Renewable Energy in an Agricultural Hydroponic Greenhouse. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 14(2), 13398–13407

66. Lee, C.-G., Cho, L.-H., Kim, S.-J., Park, S.-Y. & Kim, D.-H. (2021). Comparative Analysis of Combined Heating Systems Involving the Use of Renewable Energy for Greenhouse Heating. *Energies*, 14, 6603
67. Li, J., Song, G., Cai, M. et al. (2022). Green environment and circular economy: A state-of-the-art analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(2), 102106
68. Li, G., Li, M., Taylor, R., Hao, Y., Besagni, G. & Markides, C.N. (2022). Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential. *Applied Thermal Engineering*, 209, 118285
69. Liantas, G., Chatzigeorgiou, I., Ravani, M. et al. (2023). Energy Use Efficiency and Carbon Footprint of Greenhouse Hydroponic Cultivation Using Public Grid and PVs as Energy Providers. *Sustainability*, 15, 1024
70. Liu, N., Liu, Y. & Yu, X. (2023). The impact of public environmental concern on environmental pollution: The moderating effect of government environmental regulation. *PLoS ONE*, 18(8): e0290255
71. Lokkas, P., Alamanis, N., Xafoulis, N. et al. (2023). An Approach on the Renewable Energy Sources. *Operations Research Forum*, 3(26)
72. Lu, Y., Khan, Z., Alvarez-Alvarado, M. et al. (2020). A Critical Review of Sustainable Energy Policies for the Promotion of Renewable Energy Sources. *Sustainability*, 12, 5078
73. Maradin, D. (2021). Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176-183
74. Maraveas, C., Karavas, C.-S., Loukatos, D. et al. (2023). Agricultural Greenhouses: Resource Management Technologies and Perspectives for Zero Greenhouse Gas Emissions. *Agriculture*, 13, 1464
75. Mehboob, A., Kizee, R.A. & Farooq, B. (2019). An Overview of Environmental Protection and Sustainable Development under: International Economic Law. *North American Academic Research*, 2(11): 344-358
76. Mentis, M. (2023). Sustainable development economy and the development of green economy in the European Union. *Energy, Sustainability and Society*, 13, 32

77. Mirzamohammadi, S., Jabarzadeh, A. & Shahrabi, M.S. (2020). Long-term planning of supplying energy for greenhouses using renewable resources under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121611
78. Mostefaoui, Z. & Amara, S. (2018). Renewable energy analysis in the agriculture–greenhouse farms: A case study in the mediterranean region (sidi bel abbes, algeria). *Sustainable Energy*, 38(3)
79. Mott, A., Baba, A., Hadi Mosleh, M., Ökten, H.E. et al. (2022). Boron in geothermal energy: Sources, environmental impacts, and management in geothermal fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112825
80. Neha & Joon, R. (2021). Renewable Energy Sources: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1979, 012023
81. Nemali, K. (2022). History of Controlled Environment Horticulture: Greenhouses. *Horts Cience*, 57(2), 239–246
82. Paris, B., Vadorou, F., Balafoutis, A.T. et al. (2022). Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption. *Appl. Sci.*, 12, 5150
83. Ponkratov, V.V., Kuznetsov, A.S., Muda, I. et al. (2022). Investigating the Index of Sustainable Development and Reduction in Greenhouse Gases of Renewable Energies. *Sustainability*, 14, 14829
84. Rahman, A., Farrok, O. & Haque, M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112279
85. Rahman, M., Khan, I., Field, D.L., Techato, K. & Alameh, K. (2022b). Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications. *Renewable Energy*, 188, 731-749
86. Rahnema, M., Kazemi, N., Godarzi, B. & Taki, M. (2018). Geothermal energy for heating and cooling in agricultural greenhouses. *AgricEngInt: CIGR Journal Open*, 20(4), 97-107
87. Reza, K., Ting, D. & Cariveau, R. (2024). Wind-coupled hydrogen integration for commercial greenhouse food and power production: A case study. *Energy Conversion and Management*, 322, 119182

88. Robson, M., Pieristè, M., Durand, M. et al. (2022). The benefits of informed management of sunlight in production greenhouses and polytunnels. *Plants People Planet.*, 4, 314–325
89. Roga, S., Bardhan, S., Kumar, Y. & Dubey, S. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(3), 102239
90. Rokicki, T. (2016). Sustainable Development in Energy Sector in the European Union Countries. Economic Science for Rural Development. *Proceedings of the International Scientific Conference, Jelgava*, No 43, 108-116
91. Romanova, E. & Masalkova, A. (2021). Risks of switching to renewable energy sources. *SHS Web of Conferences*
92. Sadorsky, P. (2021). Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125779
93. Saleh, H. & Hassan, A. (2024). The challenges of sustainable energy transition: A focus on renewable energy. *Applied Chemical Engineering*, 7(2), 1-24
94. Sari, M.W., Hardyanto, H., Ciptadi, P.W. et al. (2023). Developing A Smart Farming Greenhouse Monitoring System based on Internet of Things Technology. In: A. Kusuma Wardana (ed.), *Proceedings of the 2023 International Conference on Information Technology and Engineering (ICITE 2023)*, Advances in Intelligent Systems Research, 179
95. Savic, D. & Ilin, Z. (2022). *Advantages of Growing Vegetable Crops in Modern Greenhouses*. In: We are IntechOpen, the world's leading publisher of Open Access books Built by scientists, for scientists
96. Savitskyi, M., Danishevskyy, V. & Bordun, M. (2020). Accumulation of solar energy to heat greenhouses. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 985, 012013
97. Sebestyén, V. (2021). Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact networks of renewable energy power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111626
98. Shahbazi, R., Kouravand, S. & Hassan-Beygi, R. (2023). Analysis of wind turbine usage in greenhouses: wind resource assessment, distributed generation of electricity and environmental protection. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(3), 7846-7866

99. Shen, N., Deng, R., Liao, H. & Shevchuk, O. (2020). Mapping renewable energy subsidy policy research published from 1997 to 2018: A scientometric review. *Utilities Policy*, 64, 101055
100. Shokri, A. & Fard, M.S. (2022). A sustainable approach in water desalination with the integration of renewable energy sources: Environmental engineering challenges and perspectives. *Environmental Advances*, 9, 100281
101. Singh, K.A.P., Goutam, P.K., Xaxa, S. et al. (2024). The Role of Greenhouse Technology in Streamlining Crop Production. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(6), 776–798
102. Soltani, M., Kashkooli, F.M., Souri, M. et al. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110750
103. Squalli, J. & Adamkiewicz, G. (2018). Organic farming and greenhouse gas emissions: A longitudinal U.S. state-level study. *Journal of Cleaner Production*, 192, 30-42
104. Tittarelli, F. (2020). Organic Greenhouse Production: Towards an Agroecological Approach in the Framework of the New European Regulation—A Review. *Agronomy*, 10, 72
105. Vourdoubas, J. (2016). Possibilities of Using Renewable Energy Sources for Covering All the Energy Needs of Hydroponic Greenhouses. A Case Study in Crete, Greece. *Journal of Agriculture and Crops, Academic Research Publishing Group*, 2(11), 107-112
106. Wang, Z., Wang, T., Zhang, X. et al. (2024). Biodiversity conservation in the context of climate change: Facing challenges and management strategies. *Science of The Total Environment*, 937, 173377
107. Yakub, A.O., Adesanya, M.A., Same, N.N. et al. (2024). Enhancing sustainable and climate-resilient agriculture: Optimization of greenhouse energy consumption through microgrid systems utilizing advanced meta-heuristic algorithms. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101440
108. Yang, X., He, L., Xia, Y. & Chen, Y. (2019). Effect of government subsidies on renewable energy investments: The threshold effect. *Energy Policy*, 132, 156-166

109. Yilmaz, F. (2021). Performance and environmental impact assessment of a geothermal-assisted combined plant for multi-generation products. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101291
110. Zhang, M., Yan, T., Wang, W., Jia, X., Wang, J. & Klemeš, J.J. (2022). Energy-saving design and control strategy towards modern sustainable greenhouse: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112602
111. Shinn, L. (2018). *Renewable Energy: The Clean Facts*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts>, με ημερομηνία ανάκτησης 15/12/2023