



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ,
ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ & ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»**

**Συγκριτική μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Συμβατικής
και Εναλλακτικής Παραγωγής Σίτου**

Παναγιώτης Ανδρικόπουλος

Πειραιάς, Φεβρουάριος 2024



**UNIVERSITY OF PIRAEUS
SCHOOL OF ECONOMICS, BUSINESS AND INTERNATIONAL STUDIES
DEPARTMENT OF ECONOMICS**

**MSc in Bioeconomy, Circular Economy & Sustainable
Development**

**Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and
Alternative Wheat Production**

By Panagiotis Andrikopoulos

Piraeus, Greece, February 2024



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι το έργο που εκπονήθηκε και παρουσιάζεται στην υποβαλλόμενη διπλωματική εργασία, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, στη «*Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη*» με τίτλο: «*Συγκριτική μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Συμβατικής και Εναλλακτικής Παραγωγής Σίτου*»

έχει γραφτεί από εμένα αποκλειστικά στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντάς πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Υπογραφή Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Ανδρικόπουλος Παναγιώτης

Συγκριτική μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Συμβατικής και Εναλλακτικής Παραγωγής Σίτου

Σημαντικοί όροι: Ανάλυση κύκλου ζωής, καλλιέργεια σιταριού, λίπανση ακριβείας, εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ReCiPe (2016)

Περίληψη

Η ανάλυση των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή σιταριού δεν έχει λάβει αρκετή προσοχή μέχρι σήμερα, ειδικά στην Ελλάδα. Η σημασία αυτής της αξιολόγησης γίνεται επιτακτική, δεδομένης της ταχείας ανάπτυξης της καλλιέργειας σιτηρών παγκοσμίως και των εντατικών πρακτικών που συχνά εφαρμόζονται. Η συγκεκριμένη εργασία αφορά την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) της παραγωγής σιταριού στην περιοχή του Κρόκου Κοζάνης με στόχο την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού σε σύγκριση με την εφαρμογή δύο εναλλακτικών γεωργικών πρακτικών, τη λίπανση ακριβείας και την ακαλλιέργεια. Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται στη συλλογή πρωτογενών δεδομένων από τον παραγωγό μέσω ερωτηματολογίου. Τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν όλη τη γεωργική παραγωγή, ξεκινώντας από την προετοιμασία του αγρού και καταλήγοντας στη συγκομιδή του τελικού προϊόντος ακολουθώντας την προσέγγιση «από την κούνια στην πύλη». Η λειτουργική μονάδα είναι το 1 εκτάριο καλλιέργειας σιταριού. Η μελέτη υλοποιήθηκε με το λογισμικό SimaPro, καταγράφοντας αναλυτικά τις πρώτες ύλες, τις διαδικασίες καλλιέργειας, τις μεταφορές και τις καταναλώσεις διαφόρων εισροών. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ReCiPe 2016, τόσο σε επίπεδο μέσου σημείου όσο και τελικού σημείου. Διαπιστώθηκε ότι η λίπανση, η φυτοπροστασία και η σπορά, είναι οι διεργασίες με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση στις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συγκρίνοντας τις τρεις μεθόδους καλλιέργειας, η διαδικασία με τη μικρότερη επιβάρυνση είναι η καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους, ακολουθούμενη από τη λίπανση ακριβείας, ενώ η συμβατική καλλιέργεια παρουσιάζει τη σημαντικότερη επιβάρυνση. Η ολοκλήρωση της μελέτης περιλαμβάνει τη διεξαγωγή μιας ανάλυσης ευαισθησίας, με σκοπό να αξιολογηθεί πώς οι διαφορετικές ποσότητες λιπασμάτων επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση μεταξύ της αρχικής ποσότητας λιπάσματος που χρησιμοποιούσε ο γεωργός και πιθανών μειώσεων αυτής κατά 20%, 30% και 50% προβάλλοντας την ανάλογη επίπτωση στην περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Alternative Wheat Production

Keywords: Life Cycle Analysis (LCA), wheat cultivation, precision fertilization, no-tillage farming, environmental impact assessment, ReCiPe (2016)

Abstract

The potential environmental impacts of wheat production have not been studied enough, especially in Greece. This assessment is crucial due to the rapid development of cereal cultivation worldwide and the intensive practices often applied. The focus of this thesis is to apply Life Cycle Analysis (LCA) to evaluate wheat production in the Krokos Kozani area. The methodology used involves collecting primary data from the producer through a questionnaire with the aim to assess the environmental impacts of wheat cultivation using conventional farming methods, precision fertilization, and no-till farming. The system boundaries included agricultural production, starting from land preparation to the harvest of the final product, following a "cradle-to-gate" approach. The functional unit is 1 hectare of wheat cultivation. The study uses SimaPro software to record raw materials, cultivation processes, transportation, and consumption of different inputs in detail. The analysis was conducted using the ReCiPe 2016 method, at both midpoint and endpoint levels. The results showed that fertilization, crop protection, and sowing have the most substantial environmental impact. The least burdensome process is no-till farming, followed by precision fertilization, while conventional farming has the most significant burden. Finally, a sensitivity analysis was conducted to compare the results with various quantities of fertilizers. The original quantity of fertilizers used by the farmer and reductions of 20%, 30%, and 50% were compared, showing the respective environmental impact.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	1-iv
Abstract	1-v
Πίνακας Περιεχομένων.....	1-vi
Κατάλογος Διαγραμμάτων	1-viii
Κατάλογος Εικόνων	1-ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1. Γενικά	11
1.2. Αντικείμενο και στόχοι.....	22
1.3. Δομή	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	24
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Καλλιέργεια Σίτου και Μέθοδοι Καλλιέργειας	24
2.3 Ανάλυση Κύκλου ζωής.....	35
2.4 Μεθοδολογικά εργαλεία και πηγές άντλησης δεδομένων.....	45
2.5 Το λογισμικό SimaPro.....	45
2.6 Η βάση δεδομένων Ecoinvent.....	45
2.7 Μέθοδος εκτίμησης των επιπτώσεων	46
2.8 Προηγούμενες μελέτες για την ΑΚΖ στην παραγωγή σίτου.....	55
2.9 Κενά και ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα.....	57
2.10 Ανακεφαλαίωση.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	58
3.1 Εισαγωγή	58
3.2 Διαμόρφωση μελέτης περίπτωσης και σεναρίων.....	58
3.3 Καθορισμός σκοπού - πεδίου εφαρμογής.....	61
3.4 Λειτουργική μονάδα	61
3.5 Όρια του συστήματος.....	62
3.6 Απογραφή δεδομένων.....	63

3.7	Ανάλυση ευαισθησίας.....	64
3.8	Παραδοχές και περιορισμοί.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ		66
4.1	Εισαγωγή.....	66
4.2	Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων AKZ παραδοσιακής καλλιέργειας σιταριού	66
4.2.1	Midpoint συμβατικής καλλιέργειας.....	66
4.2.2	Endpoint συμβατικής καλλιέργειας.....	68
4.3	Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σίτου	70
4.3.1	Midpoint διαφορετικών μεθόδων	70
4.3.2	Endpoint διαφορετικών μεθόδων	74
4.3.3	Ανάλυση ευαισθησίας.....	76
4.4	Συζήτηση και σύγκριση αποτελεσμάτων με προηγούμενες μελέτες	79
4.5	Συστάσεις προς μελλοντική έρευνα.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		104
<i>Βασικές πληροφορίες</i>		<i>104</i>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		108

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού ανά κατηγορία επίπτωσης σε midpoint επίπεδο.....	67
Διάγραμμα 4.2 Σταθμισμένα αποτελέσματα της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού σε endpoint επίπεδο ανά δραστηριότητα στη συμβατική καλλιέργεια σιταριού	69
Διάγραμμα 4.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού σε "endpoint" επίπεδο της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού	70
Διάγραμμα 4.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις χαρακτηρισμού σε midpoint επίπεδο αναφορικά με τις τρεις μεθόδους καλλιέργειας σιταριού.....	74
Διάγραμμα 4.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού σε endpoint επίπεδο αναφορικά με τη σύγκριση των τριών διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας	75
Διάγραμμα 4.6 Σύγκριση των σταθμισμένων αποτελεσμάτων των τριών διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σε endpoint επίπεδο.....	76
Διάγραμμα 4.7 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού midpoint επιπέδου της ανάλυσης ευαισθησίας σε διαφορετικές ποσότητες λιπάσματος.	78
Διάγραμμα 4.8 Σταθμισμένα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σε endpoint επίπεδο.	79

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Οι επιπτώσεις της γεωργίας στο περιβάλλον (Πηγή: European Environment Agency, 2019).....	15
Εικόνα 1.2 Χάρτης αναγκών λίπανσης.....	21
Εικόνα 2.1 Στάδια ανάπτυξης σίτου (Μαραζάς & Μαργαρίτης, 2012).....	25
Εικόνα 2.2 Διαργασία κύκλου ζωής του προϊόντος και οι εναλλακτικές επιλογές (Ανδρής, 2021).....	37
Εικόνα 2.3 Τα τέσσερα στάδια της μεθοδολογίας της AKZ με βάση το πρότυπο ISO 14040:2006.....	39
Εικόνα 2.4 Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Πηγή: US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice).	40
Εικόνα 2.5 Όρια του συστήματος και Διάγραμμα ροής (US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice, 2006).....	42
Εικόνα 2.6 Διάγραμμα ροής επιπτώσεων της Μεθόδου ReCiPe 2016.	47
Εικόνα 2.7 Ανασκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 (Pre Sustainability)	47
Εικόνα 2.8 Στάδια Κύκλου Ζωής στις καλλιέργειες και στα τρόφιμα (Πηγή: Dijkman et al, 2018).....	54
Εικόνα 3.1 Πειραματική περιοχή.....	58
Εικόνα 3.2 Όρια του Συστήματος	63

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Η σειρά των πρότυπων του ISO 14040(iso.org/standard).....	38
Πίνακας 2.2 Οι κατηγορίες επίδρασης στο ενδιάμεσο επίπεδο της ReCiPe 2016 (Pre Sustainability).....	48
Πίνακας 2.3 Κατηγορίες επιπτώσεων τελικού σημείου ReCiPe 2016.....	51
Πίνακας 3.1 Τύποι κατεργασίας εδάφους και ημερομηνίες που έλαβαν χώρα σύμφωνα με τον γεωργό	59
Πίνακας 3.2 Εφαρμογές και τύποι λιπάσματος που χρησιμοποίησε ο γεωργός.....	60
Πίνακας 3.3 Γενικές πληροφορίες σχετικά με τη φυτοπροστασία.	61
Πίνακας 3.4 Απογραφή δεδομένων σχετικά με τη μελέτη.....	63
Πίνακας 3.5 Παραδοχές σχετικά με τα δεδομένα της Μελέτης.....	64
Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού των τριών διαφορετικών διεργασιών καλλιέργειας σιταριού σε midpoint επίπεδο με τη μέθοδο ReCiPe 2016	72
Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας σε διαφορετικές ποσότητες λιπάσματος.	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχει καταγραφεί ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Από το 1950, όταν ο πληθυσμός αριθμούσε περίπου 2,54 δισεκατομμύρια ανθρώπους, στην πιο πρόσφατη απογραφή του 2022 έχει ανέλθει στα 8 δισεκατομμύρια. Ένα εξίσου σημαντικό φαινόμενο που συνοδεύει αυτή την αύξηση είναι η αστικοποίηση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το 2018, το 55,3% του πληθυσμού κατοικούσε σε αστικές περιοχές, ενώ το 1950 το αντίστοιχο ποσοστό ήταν μόλις 29,6%. Το 2007 συντελέστηκε μία ιστορική αλλαγή, καθώς ο αστικός πληθυσμός ξεπέρασε για πρώτη φορά αυτόν των αγροτικών περιοχών, σύμφωνα με τα δεδομένα του ΟΗΕ (United Nations, 2022).

Με την αυξημένη ζήτηση για τρόφιμα, λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού, η γεωργία και η επισιτιστική ανασφάλεια αναδεικνύονται ως κεντρικά θέματα πολιτικής των κρατών. Η παραγωγή τροφίμων διπλασιάστηκε μέσα σε τριάντα πέντε χρόνια, αλλάζοντας δραστικά τη χρήση των φυσικών πόρων για γεωργική εκμετάλλευση ((FAO, 2021).

Παρόλα αυτά, ένα σοβαρό ζήτημα που προκύπτει είναι η υποκατανάλωση των τροφίμων, καθώς ένα μεγάλο μέρος τους δεν καταλήγει να καταναλώνεται (FAO, 2021· United Nations Environment Programme, 2022). Αυτή η υπερπαραγωγή τροφίμων, που εκτιμάται ότι θα υπερβεί κατά 60% τις ανάγκες του πληθυσμού μέχρι το 2050 (Lipinski et al., 2013), συνδυάζεται με την αυξημένη ανισότητα στην πρόσβαση στα τρόφιμα. Το 2020, περίπου το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού (2,3 δισεκατομμύρια άνθρωποι) δεν είχαν επαρκή πρόσβαση σε τροφή (FAO, 2021).

Η γεωργία αποτελεί έναν ζωτικής σημασίας τομέα, ο οποίος συνδέεται άμεσα με το φυσικό περιβάλλον, δημιουργώντας μια συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Από τη μία πλευρά, η γεωργία εξαρτάται από τους φυσικούς πόρους για την παραγωγή της, ενώ από την άλλη, επηρεάζει το περιβάλλον μέσω της ρύπανσης που προκαλεί. Οι σύγχρονες γεωργικές τεχνολογίες έχουν οδηγήσει σε αυξημένη εντατικοποίηση της φυτικής και ζωικής παραγωγής. Αυτή η εξέλιξη βελτίωσε την παραγωγικότητα, αλλά ταυτόχρονα αύξησε την πίεση στο φυσικό περιβάλλον. Η μετάβαση από τις παραδοσιακές σε πιο εντατικές γεωργικές πρακτικές προκαλεί πολλαπλά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως διάβρωση εδαφών, ρύπανση υδάτων, υπερεκμετάλλευση υδάτινων πόρων, απώλεια βιοποικιλότητας και συνακόλουθους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, οδηγώντας, έτσι, σε υποβάθμιση των

οικοσυστημάτων και σε οικολογικές ανισορροπίες (Vinyes et al., 2017). Παράλληλα, η γεωργία συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή, μέσω της αλλαγής χρήσης γης, της χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, καθώς και της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπροσθέτως, η επεξεργασία, συσκευασία και μεταφορά των τροφίμων απαιτούν επιπλέον ενέργεια και πόρους (Ingrao et al., 2015).

Οι Pau Vall και Vidal (1999) στην έρευνά τους διαπίστωσαν ότι το 43% της ευρωπαϊκής γης (περίπου 138 εκατομμύρια εκτάρια) χρησιμοποιούνταν για γεωργικούς σκοπούς το 1995. Αν και η καλλιεργήσιμη έκταση μειώθηκε κατά 2,7% από το 1985, η γεωργική παραγωγή αυξήθηκε κατά 5%. Η ενίσχυση της παραγωγικότητας συνδέεται με την εντατικοποίηση της γεωργίας, η οποία σε μεγάλο βαθμό επιτεύχθηκε μέσω της αυξημένης χρήσης χημικών λιπασμάτων.

Αυτή η τάση εντατικοποίησης προκάλεσε, επίσης, την ανάπτυξη μεγαλύτερης εξειδίκευσης και τη μείωση της ποικιλίας στα καλλιεργητικά συστήματα, με την προώθηση των μονοκαλλιεργειών. Αυτές οι αλλαγές αποτελούν μακροπρόθεσμες οικονομικές και κοινωνικές τάσεις στην ευρωπαϊκή γεωργία και απηχούν τους βασικούς στόχους της αγροτικής πολιτικής για υψηλή απόδοση καλλιεργειών και βαθμό αυτάρκειας. Η πολιτική τιμών και αγορών, όπως ορίζεται από την Κοινή Οργάνωση Αγορών (ΚΟΑ), οδήγησε σε μια στροφή προς τις μονοκαλλιέργειες και την εντατικοποίηση, επιδεινώνοντας τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και την απώλεια της βιοποικιλότητας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάστηκαν αφορούσαν στην υποβάθμιση των πόρων, όπως το έδαφος και το νερό (Λοΐζου, 2001).

Η γεωργία χρησιμοποιεί το 70% του γλυκού νερού παγκοσμίως και συμβάλλει στην αποψίλωση των δασών. Αυτό καθιστά τον τομέα των τροφίμων δεύτερο σε εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gases - GHG), αποτελώντας το 25% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών (FAO, 2017· Ellen MacArthur Foundation, 2019). Το Ellen MacArthur Foundation (2019) υπολογίζει ότι, από τα 7,1 δισεκατομμύρια τόνους τροφίμων που παράγονται κάθε χρόνο, το 40% καταναλώνεται στις πόλεις, που είναι επίσης ο κύριος παραγωγός οργανικών αποβλήτων. Με τον πληθυσμό στις πόλεις να αυξάνεται συνεχώς μέχρι το 2050, επισημαίνεται, παράλληλα, η απαίτηση αλλαγής του τρόπου παραγωγής, κατανάλωσης και διαχείρισης των τροφίμων και απορριμμάτων.

Σήμερα, μία από τις βασικές προκλήσεις για παραγωγούς και κυβερνήσεις εστιάζεται στην ανάπτυξη βιώσιμων μεθόδων παραγωγής τροφίμων. Οι αυξανόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μη βιώσιμης γεωργίας απαιτούν εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τις εκπομπές GHG και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από γεωργικές δραστηριότητες (Romero-Gómez et al., 2014).

Για να ανταποκριθεί στις ανάγκες του αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού ως προς τα τρόφιμα, η γεωργία υιοθέτησε πιο εντατικές μεθόδους. Οι έρευνες (Tabatabaeefar et al., 2009) αποκαλύπτουν τη στενή σύνδεση μεταξύ ενέργειας και γεωργικών συστημάτων, καθώς και την αλληλεπίδραση της κατανάλωσης ενέργειας με την ποιότητα του περιβάλλοντος (Nabavi-Pelesaraei et al., 2022). Ειδικότερα, η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζει το περιβάλλον με επιπτώσεις, όπως περιβαλλοντική ρύπανση και εκπομπές GHG. Η αποτελεσματική χρήση ενέργειας αντιστοιχεί σε οικονομία κόστους, μείωση των εκπομπών GHG και προστασία φυσικών πόρων (Nabavi-Pelesaraei et al., 2018).

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της βιώσιμης γεωργίας και να βελτιωθεί η ενεργειακή αποδοτικότητά της, απαιτείται λεπτομερής ενεργειακή και οικονομική ανάλυση (Naderloo et al., 2012). Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να διερευνηθούν τα μοτίβα ενεργειακής χρήσης στη γεωργία, προκειμένου να επιλεγεί ένα βιώσιμο και αποτελεσματικό πρότυπο καλλιέργειας, να μειωθούν οι λειτουργικές δαπάνες και να περιοριστεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Από το 1970, η παγκόσμια παραγωγή δημητριακών καλλιεργειών τριπλασιάστηκε, ενώ η εκτιμώμενη έκταση καλλιεργήσιμης γης αυξήθηκε συγκριτικά κατά μόλις 30% (Pingali, 2012). Ωστόσο, η αύξηση της παραγωγικότητας έχει συνοδευτεί από σημαντικά αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έτσι, η γεωργία κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο στην κατανάλωση νερού, αποτελεί την κύρια πηγή νιτρικής ρύπανσης στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα και συμβάλλει καίρια στη ρύπανση από αμμωνία (FAO, 2003).

Οι γεωργικές δραστηριότητες μπορούν να έχουν πολλαπλά περιβαλλοντικά αποτελέσματα, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες (Canals, 2003):

- Επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας (όπως η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας και η όξινη βροχή).
- Ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από τη χρήση νιτρικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων.
- Επιπτώσεις που σχετίζονται με τη χρήση αγροχημικών προϊόντων.
- Υποβάθμιση του εδάφους.
- Εξάντληση αποθεμάτων νερού.
- Μείωση της βιοποικιλότητας στις καλλιεργούμενες εκτάσεις.

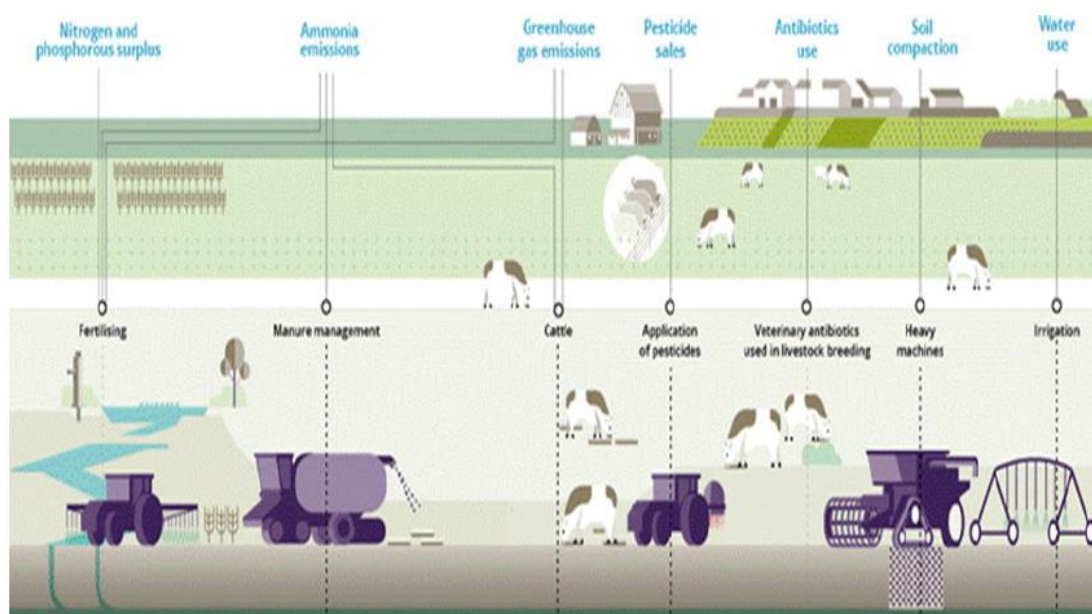
Κλιματική αλλαγή και Γεωργία

Είναι πλέον σαφές πως τα GHG, που προέρχονται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, συμβάλουν σημαντικά στην επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής. Κατά τον τελευταίο αιώνα, η παγκόσμια μέση θερμοκρασία αυξήθηκε κατά περίπου 0,74 βαθμούς Κελσίου, ακολουθώντας μια συνεχώς ανοδική τάση. Ταυτόχρονα, η στάθμη της θάλασσας, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO), έχει ανέβει περίπου 20 εκατοστά από το 1880 έως και σήμερα. Η δραματική αύξηση στις εκπομπές αερίων πηγάζει από τους τομείς της ενεργειακής παραγωγής, των μεταφορών και της βιομηχανίας. Ωστόσο, οι τομείς των κατασκευών, της δασοκομίας και της γεωργίας συνέβαλαν λιγότερο σε αυτήν την αύξηση. Δύο βασικοί παράγοντες που επηρέασαν αυτήν την εκρηκτική μεταβολή είναι η αύξηση του παγκόσμιου εισοδήματος (κατά 77%) και η ταχεία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού (κατά 69%) (IPCC Sixth Assessment Report [AR6], 2022).

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες εκπέμπουν τέσσερα βασικά αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου: το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), το υποοξείδιο του αζώτου (N₂O) και τους χλωροφθοράνθρακες (CFCs). Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ οφείλεται, κυρίως, στη χρήση ορυκτών καυσίμων, με τις αλλαγές στη χρήση της γης να έχουν, επίσης, κάποιον αντίκτυπο, αν και όχι τόσο σημαντικό. Οι πηγές του CH₄ περιλαμβάνουν τη γεωργία και τη χρήση ορυκτών καυσίμων, ενώ το N₂O συνδέεται, κυρίως, με τη γεωργία (IPCC Sixth Assessment Report [AR6], 2022).

Ο γεωργικός τομέας συμβάλλει, σύμφωνα με τον IPCC (2022), στο 24% των συνολικών παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών GHG. Ωστόσο, στις χώρες μέλη του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), η γεωργία παράγει το 8% των συνολικών εκπομπών GHG με μείωση μεταξύ 2000 και 2010 κατά μέσο όρο 0,4% ετησίως με ταυτόχρονη αύξηση της γεωργικής παραγωγής 1,6% ετησίως, η οποία ερμηνεύεται σε μείωση της έντασης των εκπομπών GHG κατά 1,97%. Επομένως, οι ανεπτυγμένες χώρες μέλη του ΟΟΣΑ προσπαθούν να επιτύχουν συγχρονισμένο μετριασμό των GHG και αύξηση της παραγωγικότητας, που είναι η ιδανική κατάσταση και ορίζεται ως η «απόλυτη αποσύνδεση» (Lobell et al. (2011)). Στην Εικόνα 1.1 φαίνονται με σαφήνεια οι ποικίλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλεί η γεωργική δραστηριότητα, εκτυλισσόμενες κατά τη διάρκεια διαφόρων σταδίων της

γεωργικής παραγωγής. Κάθε στάδιο, από τη χρήση λιπασμάτων μέχρι την άρδευση, συνεπάγεται διαφορετικές συνέπειες για το οικοσύστημα.



Εικόνα 1.1 Οι επιπτώσεις της γεωργίας στο περιβάλλον (Πηγή: European Environment Agency, 2019)

Οι μεγαλύτερες γεωργικές οικονομίες παράγουν γενικά υψηλότερα επίπεδα εκπομπών GHG, αλλά δεν ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Για παράδειγμα, η Γαλλία και η Γερμανία από κοινού αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τρίτο των γεωργικών εκπομπών GHG της ΕΕ-28, ενώ ο συνδυασμός του Ηνωμένου Βασιλείου, της Ισπανίας, της Πολωνίας και της Ιταλίας καλύπτει το επιπλέον ένα τρίτο του συνόλου. Για να μειωθεί ο αντίκτυπος της γεωργίας της ΕΕ στις εκπομπές GHG, ο οδικός χάρτης της ΕΕ για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα συνιστά στόχο μείωσης των γεωργικών εκπομπών GHG κατά 36–37% έως το 2030 και έναν πιο φιλόδοξο στόχο (42–49%) για το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.

Το N_2O αποτελεί το κύριο GHG από το γεωργικό έδαφος, με την εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων και τη διασπορά κοπριάς να αυξάνει τις εκπομπές του. Το CH_4 παράγεται κυρίως από την εντερική ζύμωση των μηρυκαστικών και την αποσύνθεση της κοπριάς, ενώ η καλλιέργεια ρυζιού και η αερόβια διαχείριση των εδαφών, επίσης, συμβάλλουν στις εκπομπές του. Το CO_2 παράγεται, κυρίως, μέσω της καύσης υδρογονανθράκων και της αποσύνθεσης βιομάζας, καθώς και από τις γεωργικές εργασίες και εισροές.

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει διαφορετικά τη γεωργική παραγωγικότητα ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, μικρή αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών, ενώ χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη και τροπικές περιοχές ακόμα και μικρές αυξήσεις μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις. Η γεωργία, ενώ συνεισφέρει στις εκπομπές των GHG, μπορεί, επίσης, να παίζει ρόλο στη μείωση αυτών των εκπομπών μέσω της βελτιωμένης διαχείρισης των πόρων και της αποφυγής υπερβολικής εφαρμογής λιπασμάτων.

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής στον γεωργικό τομέα απαιτεί μια προσεκτική ισορροπία μεταξύ της μείωσης των εκπομπών και της διατήρησης ή αύξησης της παραγωγικότητας. Οι προκλήσεις είναι πολύπλοκες και ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και τις τοπικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η αύξηση των θερμοκρασιών και οι αλλαγές στο μοτίβο βροχοπτώσεων ενδέχεται να μειώσει την απόδοση σιταριού έως και 30% σε ορισμένες περιοχές έως το 2050 (Lobell et al., 2011). Ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες και ξηρασίες, επίσης απειλούν τη βιώσιμη καλλιέργεια και την οικονομική σταθερότητα των αγροτών.

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) (2014) προειδοποιεί ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα γίνονται πιο συχνά και πιο έντονα, ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, προκαλώντας σημαντικές οικονομικές απώλειες για τους γεωργούς.

Γεωργικός τομέας στην Ελλάδα

Ο γεωργικός τομέας παίζει έναν σημαντικό ρόλο που υπερβαίνει την απλή συμβολή του στα βασικά μακροοικονομικά στοιχεία. Αυτός ο τομέας βοηθά στη διαμόρφωση σημαντικών δομικών χαρακτηριστικών και διαδικασιών της οικονομίας, όπως οι διακλαδικές σχέσεις και η περιφερειακή ανάπτυξη, ενώ παράλληλα επηρεάζει σημαντικά την κοινωνία και το περιβάλλον.

Με την οικονομική ανάπτυξη, ο άμεσος ρόλος του γεωργικού τομέα (συνεισφορά στο ΑΕΠ, απασχόληση, εξαγωγές, επενδύσεις) μειώνεται, ενώ, αντιθέτως, αυξάνεται ο έμμεσος ρόλος του, μέσω της ενίσχυσης διακλαδικών σχέσεων (βιομηχανία γεωργικών εισροών, βιομηχανία τροφίμων, υπηρεσίες).

Στην Ελλάδα, ο γεωργικός τομέας διαδραματίζει κεντρικό ρόλο ως πηγή πρώτων υλών, παράγοντας το 13,8% της συνολικής αξίας των ενδιάμεσων εισροών που χρησιμοποιούνται στο παραγωγικό σύστημα της χώρας. Πιο συγκεκριμένα, το 72,6% της παραγωγής του αγροτικού τομέα χρησιμοποιείται από άλλους κλάδους, το 19,1%

αφορά στην τελική εγχώρια κατανάλωση και το 7,1% διοχετεύεται στις εξαγωγές (Νικολαΐδης, 2010).

Τέλος, το 2017, η ακαθάριστη προστιθέμενη αξία του γεωργικού τομέα στην Ελλάδα έφτασε τα 6,2 δισεκατομμύρια ευρώ, το υψηλότερο επίπεδο από το 2005. Επιπλέον, το 2017, 438 χιλιάδες άνθρωποι εργάζονταν στον τομέα αυτό, με το ποσοστό συμμετοχής τους στην απασχόληση να μειώνεται από 15,2% το 2000 σε 10,6% το 2017. Αυτό το ποσοστό παραμένει σημαντικά υψηλότερο από τον μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (4,4% το 2017), υπογραμμίζοντας τη συνεισφορά του τομέα στις ευκαιρίες απασχόλησης στην ελληνική οικονομία (Eurostat, 2023).

Σίτος

Όσον αφορά τον σίτο, ο οποίος αποτελεί το επίκεντρο της παρούσας μελέτης, κατέχει σημαντική θέση μεταξύ των καλλιεργειών δημητριακών, καθώς χρησιμεύει ως κύρια πηγή τροφής για εκατομμύρια άτομα παγκοσμίως. Σύμφωνα με τον FAO (2020), το σιτάρι αντιπροσωπεύει περίπου το 20% της συνολικής θερμιδικής πρόσληψης των ανθρώπων διεθνώς. Η παραγωγή του αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες και προβλέπεται ότι θα συνεχίσει την ανοδική του πορεία, λόγω της αύξησης του πληθυσμού και των μεταβαλλόμενων διατροφικών συνηθειών (FAOSTAT, 2021). Η καλλιέργεια του σιταριού αναδεικνύεται σε μια από τις πιο βασικές για την ανθρώπινη διατροφή. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, πάνω από 2.150 εκατομμύρια εκτάρια ανά τον κόσμο έχουν αφιερωθεί στην καλλιέργειά του, με το μαλακό σιτάρι να καταλαμβάνει το 90% και το σκληρό το υπόλοιπο 10%. Το σιτάρι, μαζί με τον αραβόσιτο και το ρύζι, είναι ζωτικής σημασίας για τη διατροφή σε όλο τον κόσμο, τόσο σε ανεπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες χώρες. Οι κυριότερες περιοχές καλλιέργειας του σιταριού βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο. Η λεκάνη της Μεσογείου, το βόρειο τμήμα των ΗΠΑ και του Καναδά, καθώς και οι ερημικές περιοχές στις νοτιοδυτικές ΗΠΑ και στο βόρειο Μεξικό, καθώς και η Ρωσία αποτελούν τους κυριότερους παραγωγούς. Σημειώνεται ότι το 68% της παραγωγής σιταριού χρησιμοποιείται για ανθρώπινη διατροφή και το 21% για ζωτροφές.

Αναλύοντας τα παγκόσμια δεδομένα, παρατηρείται ότι η ετήσια παραγωγή του σκληρού σίτου έχει υποχωρήσει από 37 Mt το 2018 στα 33,6 Mt το 2020, επισημαίνοντας ένα ποσοστό μείωσης 9% (Sicilian Wheat Bank. World Wheat Report 2021). Αυτό αντιστοιχεί στο περίπου 4% της συνολικής παραγωγής σίτου (895 Mt το 2020), όπως καταγράφει ο FAOstat (2022). Υπολογίζεται ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση παράγαγε 7,3 Mt σκληρού σίτου το 2020, σε έναν καλλιεργητικό χώρο 2.199.000

εκτάρια, με μέση απόδοση 4 t/ha (European Commission. Cereals Market Situation, 2022)

Η Ιταλία, ως μεγαλύτερος παραγωγός σκληρού σίτου στην ΕΕ, παρήγαγε περίπου 4 Mt, καλλιεργώντας το σε μια έκταση 1.210.415 εκτάρια. Στην Ελλάδα, από τα 32,35 εκατομμύρια στρέμματα που καλλιεργούνται, το 21,5% αντιπροσωπεύεται από το σιτάρι, με το σκληρό να καλλιεργείται σε 5,25 εκατομμύρια στρέμματα και το μαλακό σε 1,73 εκατομμύρια στρέμματα FAOSTAT (2022). Η παραγωγή σιταριού στη χώρα μας για το έτος 2022, σύμφωνα με τον USDA, έφτασε τους 1.3 Mt (USDA.gov 2022).

Μέθοδοι καλλιέργειας

Οι συμβατικές γεωργικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην καλλιέργεια του σιταριού μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο έδαφος, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα (Khan et al., 2019). Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη να υιοθετηθούν πιο βιώσιμες μέθοδοι καλλιέργειας σιταριού. Η εντατική κατεργασία του εδάφους και η χρήση χημικών εισροών που συνδέονται με τις παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση του εδάφους, εξάντληση των θρεπτικών στοιχείων και μειωμένη γονιμότητα του εδάφους (Follett et al., 2001), με αποτέλεσμα μειωμένη παραγωγή, αλλά και πιθανές άλλες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως αυξημένες εκπομπές GHG και ρύπανση των υδάτων (Carr et al., 2019).

Παρά το γεγονός ότι η άροση απαιτεί πολλές ώρες εργασίας και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, οι περισσότεροι γεωργοί τη θεωρούν την καλύτερη μέθοδο για να προετοιμάσουν το έδαφος, δημιουργώντας ιδανικές συνθήκες για τη φύτευση/σπορά και ανάπτυξη των φυτών. Ωστόσο, τα αυξανόμενα κόστη της γεωργίας και η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος έχουν οδηγήσει σε μεγαλύτερη εστίαση σε συστήματα χωρίς βαθιά άροση, όπως η ελαφρά άροση και η πλήρης αποφυγή της άροσης. Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τις επιπτώσεις της έντασης και του βάθους της άροσης στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους (Romaneckas, 2016· Gajda, 2017· Woźniak, 2019· Nunes, 2020).

Στην παραδοσιακή άροση, η αναστροφή του εδάφους ενσωματώνει τα υπολείμματα καλλιέργειας και τα λιπάσματα στο έδαφος, προσφέρει καλύτερη κατανομή των θρεπτικών ουσιών, ελέγχει τα ζιζάνια και τις μυκητιακές ασθένειες, ενώ χαλαρώνει και αερίζει το έδαφος. Ωστόσο, αυτός ο αυξημένος αερισμός μπορεί επίσης να εντατικοποιήσει τη διαδικασία ανοργανοποίησης, οδηγώντας στην απώλεια οργανικής ύλης στο έδαφος, η οποία είναι σημαντική για τη δομή, τη γονιμότητα και την υδατική

ικανότητα του εδάφους. Η τελευταία μάλιστα αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο για τη βελτίωση της υδατικής χωρητικότητας του εδάφους που σήμερα έχει γίνει ακόμα πιο σημαντική λόγω των ακραίων κλιματικών φαινομένων, όπως η ξηρασία. Η αύξηση της οργανικής ύλης στο έδαφος, μέσω της ελαφριάς ή καθόλου άροσης, έχει προταθεί ως μέσο για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του εδάφους στην ξηρασία. Η μακροχρόνια εφαρμογή αυτών των συστημάτων μπορεί να ευνοήσει την αύξηση της υγρασίας του εδάφους, τη χαμηλή πυκνότητα και τη μείωση της χωρητικότητας του τριχοειδούς νερού (Khan et al., 2019).

Από την άλλη μεριά, υπάρχει ανάγκη για βιώσιμες και καινοτόμες προσεγγίσεις στην παραγωγή σιταριού. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η Γεωργία Ακριβείας (ΓΑ), η οποία χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των καλλιεργειών, όπως η τηλεπισκόπηση και χαρτογράφηση των επιμέρους χαρακτηριστικών του εδάφους και των καλλιεργειών εντός του κάθε αγροτεμαχίου, η ακριβής εφαρμογή γεωργικών εισροών βάσει των δεδομένων χαρτογράφησης με τη χρήση δεκτών GNSS και άλλων αισθητήρων, και οι διάφορες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (π.χ. αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης) για βελτιστοποίηση της εκάστοτε απόφασης. Η ΓΑ μπορεί να βοηθήσει τους γεωργούς να μειώσουν το κόστος, να βελτιώσουν την παραγωγή και να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εφαρμόζοντας με ακρίβεια εισροές, όπως νερό, λιπάσματα και φυτοφάρμακα μόνο εκεί και όταν χρειάζονται (Lobell et al., 2019). Μια άλλη προσέγγιση είναι η αμειψισπορά, η οποία περιλαμβάνει την εναλλαγή των καλλιεργειών που καλλιεργούνται σε ένα συγκεκριμένο αγροτεμάχιο για τη βελτίωση της υγείας του εδάφους και τη μείωση της εμφάνισης παρασίτων και ασθενειών. Με την εναλλαγή του σιταριού με άλλες καλλιέργειες, όπως τα ψυχανθή ή οι ελαιούχοι σπόροι, οι γεωργοί μπορούν να βελτιώσουν τη γονιμότητα του εδάφους, να μειώσουν την ανάγκη για χημικές εισροές και να σπάσουν τους κύκλους των παρασίτων και των ασθενειών (Lithourgidis et al., 2011).

Λίπανση Ακριβείας

Η λίπανση ακριβείας αποτελεί μια κεντρική εφαρμογή στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ), μέσω της χρήσης συστημάτων όπως η VRI (Variable Rate Inputs). Αυτή η τεχνική επιτρέπει την εφαρμογή διαφορετικών ποσοτήτων λιπασμάτων στις διάφορες περιοχές ενός χωραφίου, ανταποκρινόμενη άμεσα στις ειδικές ανάγκες της κάθε ζώνης. Σύμφωνα με τους Pedersen et al., (2017), η διαφοροποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους.

1. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από προηγούμενα έτη σχετικά με τα αγροτεμάχια, διαπιστώνεται η παραγωγική ανάγκη κάθε ζώνης μέσα στο χωράφι και προσαρμόζεται αναλόγως η ποσότητα του λιπάσματος που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στην ανάλυση των ιστορικών δεδομένων, που περιλαμβάνουν μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και άλλες σχετικές παραμέτρους, για την εκτίμηση των αναγκών σε λίπασμα. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία χαρτών εφαρμογής που καθοδηγούν τον λιπασματοδιανομέα για την ακριβή εφαρμογή των καθορισμένων δόσεων, χάρη στην άμεση μετάδοση των δεδομένων από τους αισθητήρες στον εξοπλισμό. Η προσέγγιση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τον εντοπισμό περιοχών με διαφορετικά επίπεδα παραγωγής, είτε αυτές είναι με ελάχιστη είτε με μέγιστη απόδοση, και τον εντοπισμό περιοχών με σημαντικές μεταβλητότητες, που απαιτούν περαιτέρω ανάλυση για την κατανόηση των αιτιών των μεταβολών αυτών (Kokkonis et al., 2016).
2. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός λιπασματοδιανομέα, γίνεται αυτοματοποιημένη αξιολόγηση ορισμένων χαρακτηριστικών του εδάφους ή των φυτών, ρυθμίζοντας έτσι τη δόση του λιπάσματος επιτόπου, δηλαδή "on the go". Μία από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές περιλαμβάνει τη μέτρηση του πράσινου χρώματος των φυτών, δεδομένου ότι το χρώμα αποτελεί δείκτη της υγείας τους και της παρουσίας αζώτου, βασικού συστατικού για την ανάπτυξή τους. Σε θεωρητικό επίπεδο, αφού αποκλειστούν άλλες πηγές ασθένειας, η εφαρμογή λιπάσματος εστιάζεται σε φυτά με ανοιχτότερο πράσινο χρώμα, κάτι που συνηθίζεται κυρίως σε καλλιέργειες όπως ο σίτος και το βαμβάκι. Οι συσκευές άμεσης ρύθμισης, όπως επισημαίνει ο Maguire το 2009, δεν απαιτούν τη χρήση GPS για τη λειτουργία τους, καθιστώντας τα πιο εύκολα στη χρήση από τους γεωργούς. Αυτή η προσέγγιση υιοθετείται, διότι δεν είναι απαραίτητη προηγουμένως η χρήση καταρτισμένων χαρτών εφαρμογής ή άλλων συλλεγμένων δεδομένων, απλοποιώντας σημαντικά τη διαδικασία εφαρμογής λιπασμάτων.

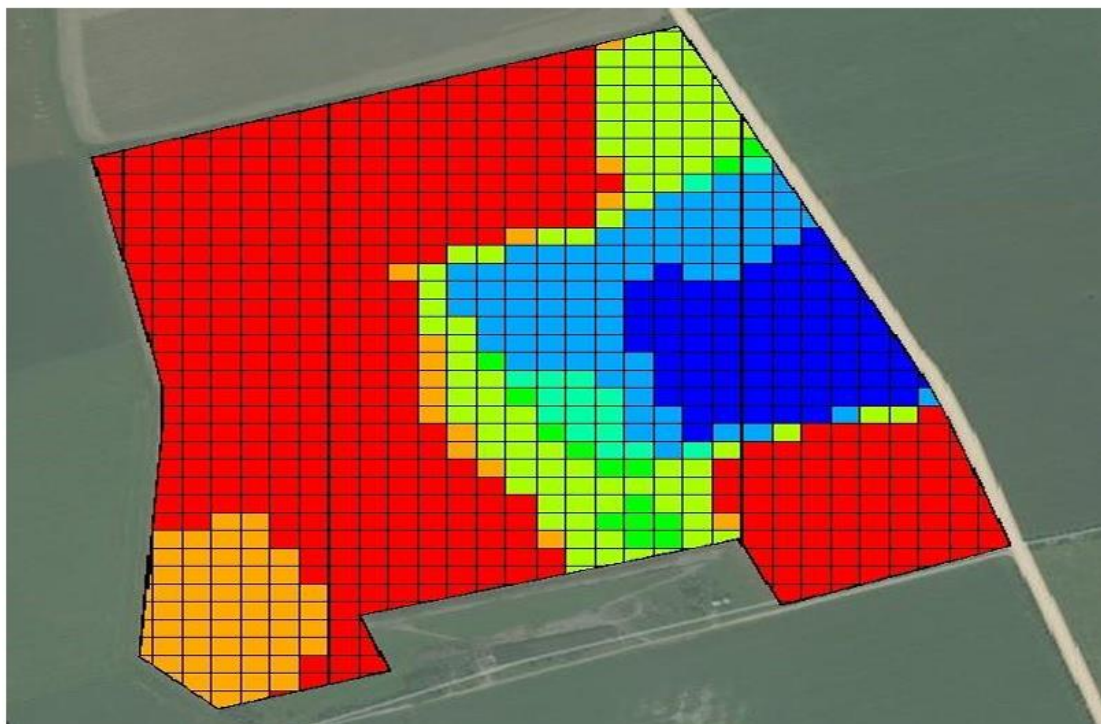
Ο σκοπός της δημιουργίας ενός χάρτη λίπανσης είναι να παρέχει μια αναπαράσταση των αναγκών λίπανσης για κάθε ζώνη ενός αγροτεμαχίου, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 1.2. Αυτή η αναπαράσταση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες.

- Σύσταση εδάφους
- Δειγματοληψία

- Είδος καλλιέργειας
- Κοκκομετρική σύνθεση εδάφους

Από παράγοντες που αφορούν προηγούμενα έτη

- Προηγούμενη απόδοση
- Προηγούμενο είδος καλλιέργειας
- Νομοθεσία
- Απαγόρευση λίπανσης



Εικόνα 1.2 Χάρτης αναγκών λίπανσης.

Η εφαρμογή λίπανσης ακριβείας έχει διάφορα πλεονεκτήματα τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Μείωση του κόστους παραγωγής
- Υψηλότερη απόδοση
- Μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον
- Διατήρηση της ποιότητας του εδάφους μέσω της ισορροπημένης προσθήκης θρεπτικών στοιχείων
- Εξαλείφονται οι περιττές επικαλύψεις κατά την εφαρμογή λιπάσματος

Συνοπτικά, η παραγωγή του σίτου αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις που απειλούν τη βιωσιμότητά της, όπως η κλιματική αλλαγή, η υποβάθμιση του εδάφους

και η πίεση από παράσιτα και ασθένειες. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτούνται βιώσιμες και καινοτόμες προσεγγίσεις, όπως η μείωση ή εξάλειψη της καλλιέργειας του εδάφους, η γεωργία ακριβείας (ΓΑ) και η αμειψισπορά, για τη βελτίωση των αποδόσεων, τη μείωση του κόστους και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

1.2. Αντικείμενο και στόχοι

Καθώς η καλλιέργεια σιταριού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομία της Ελλάδας, η παρούσα εργασία έχει ως κεντρικό στόχο την παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), μία τεχνική που εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της καλλιέργειας σιταριού με τρεις διαφορετικές πρακτικές καλλιέργειας (1-συμβατική, 2-ακαλλιέργεια, 3-λίπανση ακριβείας) στην περιοχή του Κρόκου Κοζάνης στην Ελλάδα. Η ΑΚΖ περιλαμβάνει τη λεπτομερή καταγραφή και ανάλυση των εισροών και εκροών σε όλες τις καλλιεργητικές πρακτικές του σιταριού.

Η μελέτη επικεντρώνεται στον καθορισμό και την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκύπτει από τις διάφορες μεθόδους καλλιέργειας σιταριού στην περιοχή. Στόχος είναι να αναδείξει τα σημαντικά περιβαλλοντικά σημεία και να προτείνει βελτιώσεις στις διαφορετικές φάσεις της καλλιέργειας, ώστε να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων για τη βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργικής παραγωγής στην περιοχή. Ο πρωταρχικός σκοπός της μελέτης είναι να καταγράψει και να προσδιορίσει τις διαδικασίες που εμπλέκονται στην καλλιέργεια σιταριού, από την προετοιμασία του εδάφους μέχρι και τον θερισμό του τελικού προϊόντος, εξετάζοντας την ενεργειακή κατανάλωση, τη χρήση πόρων και τη συνεισφορά τους στην καλλιέργεια, με βάση τη μεθοδολογία της ΑΚΖ.

1.3. Δομή

Στο **Κεφάλαιο 1** (παρόν κεφάλαιο), με τίτλο *Εισαγωγή*, γίνεται συνοπτική παρουσίαση του αντικειμένου της έρευνας, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Ακόμα παρουσιάζονται οι στόχοι της παρούσας μελέτης καθώς και η δομή της.

Στο **Κεφάλαιο 2** με τίτλο *Βιβλιογραφική ανασκόπηση*, περιγράφεται εν συντομία η καλλιέργεια σίτου, οι μέθοδοι καλλιέργειας, μια συνοπτική ανάλυση του κύκλου ζωής. Παράλληλα, περιγράφονται τα εργαλεία και οι πηγές δεδομένων που

χρησιμοποιήθηκαν και δίνεται έμφαση στις συναφείς μελέτες. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την επισήμανση των κενών που υπάρχουν στην τρέχουσα έρευνα και των ερευνητικών ευκαιριών που προκύπτουν, στοχεύοντας στην περαιτέρω ανάπτυξη του εν λόγω τομέα.

Στο **Κεφάλαιο 3** με τίτλο *Καθορισμός και Παραδοχές Περιβαλλοντικής Ανάλυσης*, αποτυπώνεται και αναλύεται ο στόχος και ο σκοπός (πεδίο εφαρμογής) της παρούσας μελέτης, όπως και τα σενάρια που μελετήθηκαν. Εδώ περιλαμβάνονται τόσο η λειτουργική μονάδα της μελέτης όσο και τα όρια του συστήματος που μελετήθηκε, καθώς και οι παραδοχές που ελήφθησαν υπόψιν. Επιπλέον παρουσιάζεται η απογραφή των δεδομένων για την παρούσα μελέτη και περιλαμβάνονται όλες οι ροές που εντάσσονται στα όρια του υπό μελέτη συστήματος (εισροές πρώτων υλών/ενέργειας/χημικών/προϊόντων, εκροές αποβλήτων και τελικών προϊόντων, εκπομπές στον αέρα, το χώμα και το νερό). Τέλος, παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της ΑΚΖ που πραγματοποιήθηκε στην υπό εξέταση μελέτη περίπτωσης.

Στο **Κεφάλαιο 4** με τίτλο *Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων* αποτυπώνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ΑΚΖ των διαφορετικών διεργασιών καλλιέργειας σιταριού και τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας.

Στο **Κεφάλαιο 5**, με τίτλο *Συμπεράσματα*, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της προβλεπόμενης περιβαλλοντικής ανάλυσης. Επιπροσθέτως, παρατίθενται προβληματισμοί και θέματα προς συζήτηση αλλά και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Η **Βιβλιογραφία** αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο του κύριου κορμού της μελέτης.

Στο κεφάλαιο των **Παραρτημάτων**, παρουσιάζονται εκτενώς οι πίνακες με τα ευρήματα της έρευνας, καθώς και το ερωτηματολόγιο που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων από τον γεωργό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της εν λόγω μελέτης. Ξεκινά με την εξέταση της σίτου ως αγροτικού προϊόντος και των τεχνικών καλλιέργειάς του. Στη συνέχεια, παρέχεται μια διεξοδική περιγραφή της Μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), με βάση τα διεθνή πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006 του Διεθνούς Οργανισμού για την Πιστοποίηση και τα τέσσερα στάδια που καθορίζουν την ΑΚΖ. Καταλήγει με μια σύντομη αναφορά στα εργαλεία και τις πηγές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση της έρευνας.

2.2 Καλλιέργεια Σίτου και Μέθοδοι Καλλιέργειας

Ο σίτος αποτελεί ένα σημαντικό χειμερινό σιτηρό, το οποίο υπάρχει σε τρεις διακριτούς τύπους – το χειμερινό, το ανοιξιάτικο και το ενδιάμεσο – με διαφορετικές απαιτήσεις υγρασίας για την ενεργοποίηση της ανθοφορίας του. Ανάλογα με το κλίμα, ο σίτος μπορεί να καλλιεργηθεί σε ποικίλες γεωγραφικές ζώνες, από εύκρατες μέχρι και τροπικές, και σε διάφορα υψόμετρα. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου σιταριού για κάθε περιοχή εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τις διαθέσιμες ποικιλίες και την προσαρμοστικότητά του στο τοπικό περιβάλλον (Κορπέτης, 2014).

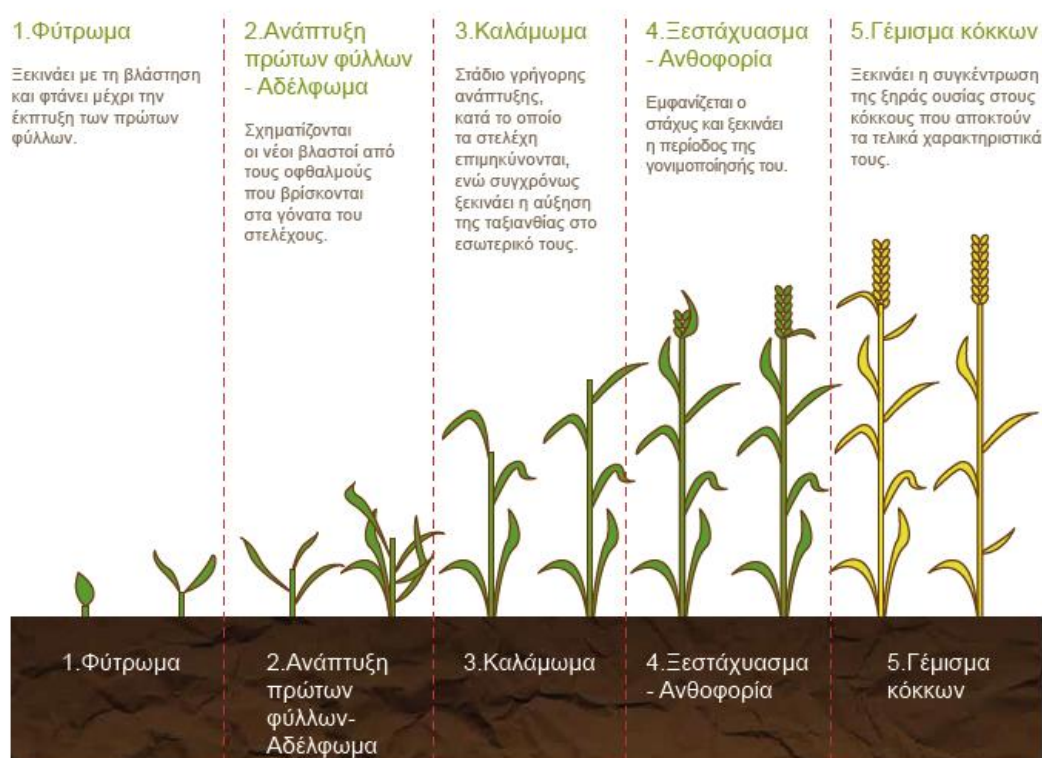
Στην Ελλάδα, ο χειμερινός σίτος δεν καλλιεργείται ευρέως, καθώς οι ήπιοι χειμώνες της χώρας δεν είναι ευνοϊκοί για την ανάπτυξή του. Οι βέλτιστες θερμοκρασίες για τη βλάστηση του σιταριού κυμαίνονται μεταξύ 20-22°C, και αυτό αναπτύσσεται καλύτερα σε περιοχές με ετήσιες βροχοπτώσεις από 250 έως 1750 χιλιοστά. Παραδοσιακά στην Ελλάδα προτιμώνται οι ανοιξιάτικοι τύποι σιταριού, οι οποίοι σπέρνονται το φθινόπωρο, περνούν τον χειμώνα σε αδρανή κατάσταση και ανθίζουν την άνοιξη, με τη συγκομιδή τους να πραγματοποιείται στις αρχές του καλοκαιριού. Εναλλακτικά, μπορούν να φυτευτούν και την άνοιξη, αν και αυτό, συνήθως, οδηγεί σε χαμηλότερη απόδοση παραγωγής (Κορπέτης, 2014).

Στις αρχές του 20ού αιώνα, οι αυξημένες ανάγκες της Ελλάδας για σίτο οδήγησαν τους επιστήμονες στην αναζήτηση καινοτόμων φυτοπροστατευτικών και λιπαντικών μεθόδων, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής μαλακού σίτου. Η ένταξη της Ελλάδας στην ΕΟΚ και οι επιδοτήσεις στον σκληρό σίτο είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στην καλλιέργειά του, με την καλλιέργεια του σκληρού σιταριού να γνωρίζει αύξηση (Κορπέτης, 2014).

Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Τα σιτηρά διαθέτουν ριζικό σύστημα με τυπική θυσανώδη ρίζα. Αυτό το σύστημα ξεκινά με την πρωτογενή εμβρυακή ρίζα, προχωρά στις δευτερογενείς εμβρυακές ρίζες που αναπτύσσονται από το μεσοκοτύλιο και τελειώνει με τις μόνιμες ρίζες που βγαίνουν από τον λαιμό. Οι τελευταίες είναι δυνατότερες και παχύτερες και προέρχονται από έναν κόμβο του στελέχους, γνωστού ως σταυρό, βρίσκοντας τον κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το στέλεχος των σιτηρών περιγράφεται ως καλάμι με άλλοτε κοίλες και άλλοτε γεμάτες περιοχές. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του στελέχους είναι ουσιαστικά για την αντοχή της ποικιλίας σε διάφορες συνθήκες.



Εικόνα 2.1 Στάδια ανάπτυξης σίτου (Μαραζάς & Μαργαρίτης, 2012)

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1, παρουσιάζονται τα στάδια ανάπτυξης του σίτου, ένα φυτό που είναι θεμελιώδες για τη γεωργική παραγωγή παγκοσμίως. Η ανάπτυξη αρχίζει από το φύτρωμα, όπου το νεαρό φυτό εμφανίζει τα πρώτα φύλλα και εκτείνεται μέχρι την εμφάνιση των κόκκων. Σταδιακά, καθώς το φυτό αναπτύσσεται, ξεδιπλώνονται και αναπτύσσονται τα φύλλα (στάδιο ανάπτυξης πρώτων φύλλων - αδελφώματα), και ακολουθεί το καλάμωμα, όπου το στέλεχος γίνεται πιο στιβαρό και

υψηλό. Το επόμενο στάδιο είναι το ξεστάχιασμα - ανθοφορία, στο οποίο το φυτό αρχίζει να ανθίζει και προετοιμάζεται για την παραγωγή σπόρων. Το τελευταίο στάδιο, γέμισμα κόκκων, είναι όπου τα φυτά παρουσιάζουν την ωρίμανση των σπόρων, καθορίζοντας την ποιότητα και την ποσότητα της τελικής συγκομιδής (Μαραζάς & Μαργαρίτης 2012).

Φύλλωμα

Τα σιτηρά διαθέτουν φύλλα που διατάσσονται δίστιχα. Συνήθως, σε κάθε στέλεχος υπάρχουν 7-9 φύλλα. Το πιο υψηλό φύλλο είναι γνωστό ως φύλλο σημαία, το οποίο είναι κρίσιμο για την παροχή φωτοσυνθετικών πόρων στον καρπό. Επιπλέον, τα φύλλα έχουν διάφορες δομές, όπως ο κολεός και το έλασμα, προσφέροντας προστασία στο φυτό.

Μορφολογική Περιγραφή Άνθους

Ο σίτος αποτελείται από ατελή άνθη που δεν έχουν κάλυκα ή στεφάνη. Ενώνονται σε ομάδες, γνωστές ως ταξιανθίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο τα εξωτερικά άνθη είναι γόνιμα. Αυτά τα άνθη, όταν ενώνονται σε έναν κοινό άξονα, δημιουργούν το γνωστό στάχυ. Τα στοιχεία του άνθους, όπως η ωθήκη και το στίγμα, είναι βασικά για την αναπαραγωγική του διαδικασία (Μαραζάς & Μαργαρίτης, 2012).

Οικολογικές απαιτήσεις

Όπως αναφέρουν οι Μαραζάς και Μαργαρίτης (2012), ο σίτος είναι ικανό να προσαρμοστεί σε διάφορες συνθήκες εδάφους και κλίματος. Η βέλτιστη θερμοκρασία για την καλλιέργειά του είναι περίπου 20°C. Τυχόν ζημιές στην κορυφή του φυτού μπορούν να έχουν επιπτώσεις στην επιβίωσή του. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διαφορές στην αντοχή των ποικιλιών του σιταριού στο κρύο, με τις χειμερινές ποικιλίες να δείχνουν μεγαλύτερη αντοχή σε αρνητικές θερμοκρασίες συγκριτικά με τις εαρινές.

Το σιτάρι μπορεί να αντέξει σε ξηρασία, αλλά έχει αυξημένες ανάγκες σε νερό κατά τη φάση της ανάπτυξης του καλαμιού και της άνθησης. Η υπερβολική υγρασία μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην επιβίωση του φυτού. Παρόλο που το σιτάρι μπορεί να καλλιεργηθεί σε διάφορα εδάφη, τα γόνιμα και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη με pH μεταξύ 7,0 και 8,5 είναι τα ιδανικότερα.

Παραδοσιακή καλλιέργεια σίτου

Η παραδοσιακή γεωργία, γνωστή και ως συμβατική γεωργία, είναι μια μέθοδος καλλιέργειας που βασίζεται στην κατεργασία του εδάφους και στη χρήση χημικών εισροών, όπως λιπάσματα και φυτοφάρμακα, για την ενίσχυση της παραγωγής. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες και έχει βελτιωθεί με την πρόοδο της τεχνολογίας και την ανάπτυξη νέων χημικών εισροών. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση χημικών εισροών και η κατεργασία του εδάφους στη συμβατική γεωργία έχει οδηγήσει σε διάφορες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία του εδάφους (Μαραζιάς & Μαργαρίτης, 2012).

Μία από τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις της συμβατικής γεωργίας είναι η διάβρωση του εδάφους. Οι πρακτικές κατεργασίας του εδάφους μπορούν επίσης να προκαλέσουν συμπίεση του εδάφους, μειώνοντας την ικανότητα του εδάφους να απορροφά νερό και θρεπτικά συστατικά, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση (Montgomery, 2007). Η χρήση χημικών εισροών μπορεί, επίσης, να υποβαθμίσει την υγεία του εδάφους με τη θανάτωση των ωφέλιμων μικροοργανισμών που συμβάλλουν στη γονιμότητα και τη δομή του εδάφους (Tilman et al., 2002). Επιπλέον, η υπερβολική χρήση χημικών λιπασμάτων μπορεί να προκαλέσει οξίνιση του εδάφους και να μειώσει την ικανότητά του να συγκρατεί το νερό, οδηγώντας σε χαμηλότερη απόδοση των καλλιεργειών (Malakouti, 2019).

Παρά τις αρνητικές αυτές επιπτώσεις, η παραδοσιακή γεωργία έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως η ικανότητα παραγωγής υψηλής απόδοσης βραχυπρόθεσμα. Επιπλέον, είναι μια οικεία και καθιερωμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως από τους γεωργούς σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της παραδοσιακής γεωργίας αμφισβητείται και υπάρχει ανάγκη να διερευνηθούν πιο βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις (Κορπέτης, 2014).

Συμβατική λίπανση σίτου

Η θρέψη των σιτηρών επηρεάζεται έντονα από το είδος του λιπάσματος, τη χρονική στιγμή της εφαρμογής, τη συχνότητα και τη θέση εφαρμογής (Mikkelsen, 2011). Τα φυτά προτιμούν διαφορετικές μορφές αζώτου ανάλογα με το είδος τους και το στάδιο ανάπτυξης (Raven, 1985· Engels, 1995). Για παράδειγμα, νεαρά φυτά επωφελούνται περισσότερο από λιπάσματα πλούσια σε αμμωνιακό άζωτο σε σχέση με νιτρικό (Horchani et al., 2010), αν και τα περισσότερα φυτά χρειάζονται και τις δύο μορφές (Errebhi & Wilcox, 1990). Η ποσότητα του λιπάσματος προσαρμόζεται βάσει των

εδαφολογικών αναλύσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές συνθήκες, το μικροκλίμα της περιοχής και τις προσδοκίες για την παραγωγή. Τα τυπικά λιπάσματα πολλές φορές έχουν υψηλή απώλεια σε άζωτο, αυξάνοντας το κόστος καλλιέργειας και την διήθησή του στον υδροφόρο ορίζοντα (Mikkelsen, 2011).

Στην καλλιέργεια σιτηρών, η λίπανση συνήθως διαιρείται σε δύο δόσεις. Η πρώτη, κατά τη σπορά, περιλαμβάνει το μισό της προτεινόμενης ποσότητας αζώτου καθώς και όλο το φωσφόρο και το κάλιο. Η δεύτερη δόση παρέχεται κατά το αδέλφωμα και περιλαμβάνει το υπόλοιπο άζωτο. Το άζωτο θα πρέπει να παρέχεται ως αμμωνιακό, για να αποφευχθούν απώλειες λόγω βροχοπτώσεων. Η συνολική πρόταση για το άζωτο βασίζεται στην προβλεπόμενη απόδοση, με 12-15 μονάδες αζώτου για παραγωγή 400-500 κιλών ανά στρέμμα και 9 μονάδες για παραγωγή κάτω των 400 κιλών (Μαραζάς & Μαργαρίτης, 2012).

Σύμφωνα με τους Tilman et al. (2001), για την αποτελεσματική απορρόφηση του καλίου από τα φυτά, είναι σημαντικό να προστεθεί στο έδαφος κατά τη σπορά, καθώς είναι δυσδιάλυτο. Οι βροχές του φθινοπώρου και του χειμώνα βοηθούν στη διάλυσή του. Παρόλο που τα εδάφη στη χώρα μας είναι γενικά πλούσια σε κάλιο, σε στεγνές συνθήκες μπορεί να παρατηρηθεί έλλειψη καλίου στα φυτά. Το άζωτο είναι απαραίτητο για την παραγωγή περισσότερων και μεγαλύτερων σταχύων και κόκκων. Σε εδάφη με όξινο pH, το άζωτο πρέπει να προστεθεί με τη μορφή ασβεστούχου νιτρικής αμμωνίας. Για την αποτελεσματική απορρόφηση του αζώτου, χρειάζεται επαρκής υγρασία στο έδαφος. Το να διαχωρίζουμε τη λίπανση σε δύο δόσεις μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του προϊόντος, αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη πάνω από 13%. Τέλος, οι συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η ένταση της ακτινοβολίας, η φωτοπερίοδος και η θρεπτική κατάσταση του φυτού επηρεάζουν την ανάπτυξη των φύλλων και το μέγεθος του φυτού. Για βέλτιστα αποτελέσματα, η θερμοκρασία πρέπει να είναι περίπου 20°C, όπως διαπιστώθηκε από τον Καραμάνο (1992).

Το άζωτο (N) αποτελεί ουσιώδες στοιχείο των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων (DNA και RNA) και των ενζύμων. Στα φυτά, το βέλτιστο επίπεδο περιεκτικότητας σε N είναι γύρω στο 3%. Σε περιεκτικότητες κάτω του 2,75%, τα φυτά εμφανίζουν σημάδια έλλειψης N, γεγονός που μπορεί να μειώσει την ποιότητα και την ποσότητα της συγκομιδής τους. Ακόμα και μικρές αλλαγές στην περιεκτικότητα N μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών και την ποιότητα των προϊόντων τους. Γι' αυτό, είναι κρίσιμη η σωστή διαχείριση των επιπέδων N στο έδαφος (Tilman et al., 2001).

Το 1804, ο De Saussure ερεύνησε την απορρόφηση του αζώτου από τα φυτά και διαπίστωσε τη ζωτική του σημασία για τη φυτική ανάπτυξη. Το άζωτο είναι από τα πιο

σημαντικά στοιχεία για τη γεωργική παραγωγή, με τα αζωτούχα λιπάσματα να αυξάνουν δραματικά την παραγωγή τροφίμων. Είναι κρίσιμο στοιχείο για την απόδοση και ποιότητα των καλλιεργειών, όπως στην περίπτωση του σιταριού.

Ωστόσο, η αυξανόμενη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων έχει επιφέρει και περιβαλλοντικά προβλήματα. Στο πλαίσιο αυτό, οι γεωργοί πρέπει να εξισορροπήσουν την ανάγκη για αυξημένη παραγωγή με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Ο υπερβολικός όγκος αζώτου (N) μπορεί να είναι επιβλαβής για το περιβάλλον, όπως έχει αποδειχθεί από πολλές επιστημονικές έρευνες (π.χ., Zhang et al., 1996· Howarth, 1998). Η ανεπαρκής διαχείριση και η υπερβολική παρουσία αζώτου έχουν οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές απώλειες. Αυτές οι απώλειες έχουν αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον, προκαλώντας προβλήματα, όπως η οξίνιση των εδαφών, η ρύπανση των υδάτων και ακόμη και η μείωση της βιοποικιλότητας.

Η εντατική γεωργία οφείλει να τοποθετήσει στο επίκεντρό της την ανθρώπινη υγεία, ειδικά σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού. Για την καλύτερη διαχείριση του αζώτου στη γεωργία, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη παράγοντες, όπως το κλίμα, η τοπογραφία και οι γεωργικές πρακτικές. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να καθορίσουν τον ιδανικό ρυθμό εφαρμογής αζώτου στο έδαφος, βασιζόμενες σε τεχνολογικά εργαλεία και μοντέλα.

Για την επίτευξη των περιβαλλοντικών και γεωργικών στόχων, πρέπει να οριστούν οι ποσότητες αζώτου που εξασφαλίζουν την προστασία του περιβάλλοντος, χωρίς να επηρεάζουν την παραγωγικότητα. Η ορθή διαχείριση των λιπασμάτων, όπως η ενσωμάτωσή τους στο έδαφος πριν την άρδευση, μπορεί να μειώσει τις απώλειες αζώτου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε την ανάγκη για περισσότερη έρευνα στον τομέα, καθώς η υπερβολική χρήση αζώτου μπορεί να έχει μακροπρόθεσμες συνέπειες για το περιβάλλον.

Γενικότερα στον κόσμο, η αυξημένη και αλόγιστη χρήση του αζώτου διακυβεύει την παγκόσμια βιωσιμότητα, όπως έχει διαπιστώσει η επιστημονική κοινότητα (π.χ. Steffen et al., 2015· Liu et al., 2015). Παρόλα που η χρήση αζώτου βελτίωσε την απόδοση στην παραγωγή σιτηρών (Tilman et al., 2002· FAO, 2016b· Fader et al., 2013), η υπερβολική χρήση μπορεί να μειώσει την ποιότητα σε εδάφη με έλλειψη αζώτου (Cassman et al., 2003). Παράλληλα, μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση του αζώτου, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, έχει παραγάγει εντυπωσιακά θετικά αποτελέσματα (Limaux et al., 1999· Cassman et al., 2002· Mohammed et al., 2013) σε ό,τι αφορά τόσο την απόδοση όσο και την περιεκτικότητα πρωτεΐνης στα σιτάρια (Zebarth et al., 2007· Meynard et al., 2002).

Όσον αφορά τον **φωσφόρο (P)**, αποτελεί βασικό στοιχείο των νουκλεϊκών οξέων και των μορίων που μεταφέρουν ενέργεια, όπως το ATP και το ADP. Η τροφопενία φωσφόρου που προκύπτει είτε από έλλειψη στο έδαφος είτε από περιορισμούς του ριζικού συστήματος, είναι ιδιαίτερα έντονη στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των φυτών. Ο φωσφόρος είναι κρίσιμος για την άνθηση, την καρποφορία, την ωρίμανση και την προστασία από διάφορες ασθένειες, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την ποιότητα των καλλιεργειών και την ανθεκτικότητα των φυτών (Μαραζάς & Μαργαρίτης, 2012).

Το **κάλιο (K)**, στη μορφή του κατιόντος K^+ , εντοπίζεται στους φυτικούς ιστούς, κυρίως στο πρωτόπλασμα, ενώ μικρή ποσότητα βρίσκεται στον πυρήνα. Αυτό το στοιχείο είναι κεντρικό για πληθώρα χημικών αντιδράσεων μέσα στο φυτό, με τις ανάγκες σε κάλιο να διαφέρουν ανά είδος φυτού. Το κάλιο παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ηλεκτρικής ισορροπίας του κυτταροπλάσματος, ενώ ταυτόχρονα βοηθά στη σταθερότητα της υδατικής ισορροπίας των κυττάρων. Επίσης, ρυθμίζει το άνοιγμα των στομάτων στα φύλλα, επηρεάζοντας την εξατμισοδιαπνοή, διευκολύνει τη μεταφορά προϊόντων της φωτοσύνθεσης, βοηθά στην παραγωγή πρωτεϊνών και διευκολύνει την απορρόφηση του αζώτου. Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι το κάλιο βελτιώνει την ποιότητα των γεωργικών προϊόντων. Μια έλλειψη σε κάλιο στη διατροφή των φυτών μπορεί να οδηγήσει σε χαρακτηριστικές φυτικές διαταραχές, όπως η εμφάνιση κηλίδων ή περιφερειακή νέκρωση, ιδίως στα παλαιότερα φύλλα (Μαραζάς & Μαργαρίτης, 2012).

Επιδράσεις των λιπασμάτων στο περιβάλλον

Τα θρεπτικά στοιχεία που βρίσκονται στο έδαφος έχουν έναν συγκεκριμένο κύκλο κίνησης και αλληλεπίδρασης με τις καλλιεργείες. Όταν τα φυτά αντλούν αυτά τα στοιχεία, συμβαίνει μια φυσική απομάκρυνση από το έδαφος. Αυτή η απορρόφηση βοηθά την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών (Σμπυράκος, 2021).

Ωστόσο, τα θρεπτικά στοιχεία στο έδαφος είναι επίσης εκτεθειμένα σε διαφορετικούς τρόπους απώλειας. Μεγάλο μέρος των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να εκλυθεί προς τα βαθύτερα στρώματα του εδάφους, με το N (άζωτο) να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε αυτή τη διαδικασία. Ειδικά, η νιτρική μορφή του αζώτου διαπερνά εύκολα το έδαφος, ενώ η αμμωνιακή μορφή παραμένει σταθερότερη, δεσμευόμενη από τα εδαφικά κolloειδή και εκλύεται πιο αργά, ειδικά μετά τη νιτροποίηση των αμμωνιακών λιπασμάτων (Στεργιοπούλου, 2021).

Επιπλέον, η απώλεια θρεπτικών στοιχείων μπορεί να προκληθεί από λανθασμένες αρδευτικές πρακτικές ή την επίδραση του νερού της βροχής, που οδηγούν στη

διάβρωση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους. Τέλος, τα θρεπτικά στοιχεία μπορεί να ακινητοποιηθούν στο έδαφος, καθώς δεσμεύονται στα κolloειδή, δημιουργώντας μια φόρμα προστασίας από την έκλυση προς τα βαθύτερα στρώματα (Σμπυράκος, 2021).

Αμειψισπορά

Η αμειψισπορά περιλαμβάνει τη φύτευση διαφορετικών καλλιεργειών στον ίδιο αγρό με μια προγραμματισμένη σειρά, συνήθως για μια περίοδο αρκετών ετών (Lammerts van Bueren et al., 2011). Η πρακτική αυτή είναι γνωστό ότι παρέχει πολυάριθμα οφέλη, όπως βελτίωση της δομής και της γονιμότητας του εδάφους, μείωση της πίεσης από ασθένειες και παράσιτα που μεταδίδονται από το έδαφος και περιορισμό του πληθυσμού των ζιζανίων (Ryan et al., 2020). Η αμειψισπορά μπορεί, επίσης, να οδηγήσει σε αυξημένη απόδοση παραγωγής, ιδίως σε συστήματα όπου η πίεση ασθενειών ή οι περιορισμοί θρεπτικών στοιχείων αποτελούν πρόβλημα (Fageria & Baligar, 2019).

Τα οφέλη της αμειψισποράς πιστεύεται ότι προκύπτουν από διάφορους μηχανισμούς. Για παράδειγμα, με την εναλλαγή των καλλιεργειών, οι γεωργοί μπορούν να μειώσουν τη συσσώρευση εδαφογενών παρασίτων και ασθενειών που μπορούν να μειώσουν την παραγωγή των καλλιεργειών (Huang et al., 2022). Επιπλέον, οι διάφορες καλλιέργειες έχουν διαφορετικά ριζικά συστήματα που μπορούν να βοηθήσουν στη διάσπαση της συμπίεσης του εδάφους και στη βελτίωση της δομής του εδάφους, οδηγώντας σε καλύτερη συγκράτηση νερού και θρεπτικών στοιχείων (Fageria & Baligar, 2019). Τα ψυχανθή, όπως η σόγια, ο αρακάς και τα φασόλια, μπορούν επίσης να δεσμεύσουν άζωτο από την ατμόσφαιρα στο ριζικό τους σύστημα, μειώνοντας την ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα (Lammerts van Bueren et al., 2011).

Συνολικά, η αμειψισπορά είναι μια βιώσιμη και αποτελεσματική μέθοδος καλλιέργειας σιταριού που προσφέρει πολλά οφέλη στους γεωργούς και το περιβάλλον. Μειώνοντας την εξάρτηση από συνθετικές εισροές και βελτιώνοντας την υγεία του εδάφους, η πρακτική αυτή μπορεί να συμβάλει στη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης παραγωγικότητας και της βιωσιμότητας των γεωργικών συστημάτων.

Ακαλλιέργεια ή Μηδέν καλλιέργεια

Σύμφωνα με τους Holka και Bieńkowski (2020), η συγκεκριμένη μέθοδος αναφέρεται σε μια γεωργική τεχνική, όπου η σπορά γίνεται απευθείας σε ακαλλιέργητο έδαφος, χωρίς προηγούμενη επεξεργασία. Αυτή η μέθοδος μπορεί να περιλαμβάνει τη

διαμόρφωση λεπτών λωρίδων εδάφους για την τοποθέτηση των σπόρων, ενώ το υπόλοιπο έδαφος παραμένει ανέγγιχτο. Στην πρακτική αυτή, χρησιμοποιούνται ειδικές σπαρτικές μηχανές με δίσκους που κόβουν τα φυτικά υπολείμματα και στη συνέχεια δημιουργούν μια σειρά για την απόθεση των σπόρων.

Τα οφέλη αυτής της τεχνικής περιλαμβάνουν την εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω της απουσίας κατεργασίας του εδάφους. Επιπλέον, τα φυτικά υπολείμματα που παραμένουν στην επιφάνεια βοηθούν στην πρόληψη της διάβρωσης του εδάφους, ενώ προκαλείται μικρή συμπίεση του εδάφους, διότι μειώνονται τα περάσματα του ελκυστήρα σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές καλλιέργειας. Η γεωργία χωρίς άροση συμβάλλει στη διατήρηση του εδάφους και στην προστασία της γονιμότητάς του. Η άροση παρεμβαίνει στην ισορροπία της χλωρίδας και της πανίδας του εδάφους. Με τη μέθοδο χωρίς άροση, ορισμένοι μικροοργανισμοί του εδάφους στους φυσικούς τους βιότοπους είναι ικανοί να βελτιώσουν τη γονιμότητα του εδάφους με τις δραστηριότητές τους. Παρόλα αυτά, στα ακαλλιέργητα εδάφη παρατηρούνται σημαντικά μειονεκτήματα που επηρεάζουν τη γεωργία. Αρχικά, η ανάπτυξη των σπόρων είναι προβληματική, καθώς η έλλειψη κατάλληλης εδαφοκάλυψης τους αυξάνει την πιθανότητα απώλειας, λόγω των πτηνών, και απαιτεί τη χρήση μεγαλύτερης ποσότητας σπόρου. Δεύτερον, η αύξηση των ζιζανίων σε ακαλλιέργητα εδάφη οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάγκη για ζιζανιοκτόνα ή σε μειωμένη απόδοση. Τρίτον, τα ακαλλιέργητα εδάφη παρουσιάζουν πτώση της θερμοκρασίας κατά την άνοιξη, πράγμα που επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, η μη ενσωμάτωση των υπολειμμάτων στο έδαφος οδηγεί σε πιο αργούς ρυθμούς διάσπασης. Τέλος, τα ακαλλιέργητα εδάφη έχουν συχνά μεγαλύτερο ειδικό βάρος και μικρότερη πορώδη δομή, περιορίζοντας τον αερισμό και την υγρασία (Holka & Bieńkowski, 2020).

Γεωργία ακριβείας

Η Γεωργία Ακριβείας (ΓΑ) αποτελεί μια εξελισσόμενη τεχνολογία που έχει βρει εφαρμογή σε πολλές χώρες με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Εφαρμόζεται σε φυτά μεγάλης καλλιέργειας, αλλά και σε οπωρώνες και αμπελώνες. Η ΓΑ αναζητά νέες προσεγγίσεις στον τρόπο διαχείρισης των γεωργικών εκτάσεων, βοηθώντας τους γεωργούς να αξιοποιούν καλύτερα τους πόρους τους (Sundmaecker, 2022).

Ο όρος ΓΑ, αναφέρεται στην προσαρμοσμένη διαχείριση των διαφοροποιήσεων του εδάφους, των κλιματικών συνθηκών και των καλλιεργειών με στόχο την αυξημένη παραγωγικότητα, τη μείωση της περιβαλλοντικής καταπόνησης και την ανεξέλεγκτη χρήση των φυσικών πόρων (ISPA, 2019).

Η εν λόγω τεχνολογία στοχεύει στην ιδανική διαχείριση των αγρών, διακρίνοντάς τους σε περιοχές με παρόμοιες γεωργικές ιδιότητες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της λήψης μετρήσεων διάφορων γεωργικών παραμέτρων και της επεξεργασίας των δεδομένων αυτών, δημιουργώντας έτσι οριοθετημένες ζώνες διαχείρισης. Ο πυρήνας της ΓΑ βασίζεται στη συγκέντρωση και ανάλυση αυτών των πληροφοριών, προκειμένου να λαμβάνονται σωστές αποφάσεις για τη διαχείριση κάθε αγρού (Sundmaeker, 2022).

Η ΓΑ είναι μια σχετικά νέα προσέγγιση στη γεωργία που χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των καλλιεργειών. Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει τη χρήση αποφάσεων, βάσει δεδομένων για την παρακολούθηση και την προσαρμογή των εισροών στις καλλιέργειες, όπως το νερό, τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα, ώστε να μεγιστοποιούνται οι αποδόσεις και να μειώνεται το κόστος.

Ένα από τα κύρια οφέλη της ΓΑ είναι η δυνατότητα προσαρμογής των εισροών των καλλιεργειών σε συγκεκριμένες περιοχές ενός αγρού για την αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων και τις υψηλότερες αποδόσεις (Liu et al., 2021). Η ΓΑ μειώνει, επίσης, τη χρήση χημικών εισροών, οδηγώντας σε περιβαλλοντικά οφέλη, όπως τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων και τη μείωση των εκπομπών GHG (Liu et al., 2018) και μειώνοντας τα απόβλητα (Duan et al., 2019).

Παρά τα οφέλη αυτά, υπάρχουν επίσης ορισμένες προκλήσεις που συνδέονται με τη ΓΑ, όπως η υψηλή αρχική επένδυση που απαιτείται για την υιοθέτηση της τεχνολογίας και η ανάγκη για εξειδικευμένη κατάρτιση για την αποτελεσματική χρήση της. Επίσης, απαιτούνται αναλύσεις που διεξάγονται ετησίως καθόλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου των φυτών για να χρησιμοποιηθούν στην ορθολογική διαχείριση των καλλιεργειών και χρήση πληροφοριών από προηγούμενες αξιολογήσεις για να επιτύχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τους Τανό κ.ά. (2007), τα βασικά οφέλη της ΓΑ περιλαμβάνουν:

- την πιο αποδοτική χρήση αγροχημικών, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- τη βελτίωση της απόδοσης των φυτών,
- την εξοικονόμηση ενέργειας και
- τη μεγιστοποίηση του εισοδήματος του γεωργού.

Στην Ελλάδα, η υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών γεωργίας εμφανίζει καθυστερήσεις, λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως:

- Η ύπαρξη πολλών μικροκαλλιεργητών,
- Η έλλειψη τεχνολογικής γνώσης,

- Η ανεπαρκής οργάνωση σε συνεταιριστικό επίπεδο,
- Η υψηλή ηλικία πολλών γεωργών που προτιμούν παραδοσιακές μεθόδους, και
- Τα αυξημένα κόστη επένδυσης σε σχετικά περιορισμένες εκτάσεις.

Οι πρώτες δοκιμαστικές εφαρμογές της ΓΑ πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1980 σε σιτηρά, σύμφωνα με τον Stafford (2000). Δημιουργήθηκαν χάρτες παραγωγής με βάση τις μετρήσεις ροής σπόρων και υγρασίας κατά τη συγκομιδή, όπως επίσης και τη γεωγραφική θέση και την ταχύτητα των μηχανημάτων. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή χαρτών παραγωγής.

Σύμφωνα με τις πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της ΓΑ, οι χώρες με μεγάλες γεωργικές εκτάσεις, όπου το κόστος της γης είναι χαμηλό, το εργατικό δυναμικό έχει υψηλό κόστος και υπάρχει διαθέσιμος γεωργικός εξοπλισμός υψηλού κόστους, έχουν υιοθετήσει ευρέως τις τεχνολογίες αυτές. Παραδείγματα τέτοιων χωρών είναι οι ΗΠΑ, η Αυστραλία, ο Καναδάς, καθώς και κάποιες περιοχές της Βραζιλίας και της Αργεντινής. Σε αντίθεση με αυτές, πολλές ανεπτυγμένες χώρες της Δυτικής Ευρώπης, που χαρακτηρίζονται από περιορισμένες γεωργικές εκτάσεις, υιοθετούν αυτές τις τεχνολογίες με πιο αργούς ρυθμούς.

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχει παρατηρηθεί μια σημαντική επένδυση από τον τομέα των γεωργικών μηχανημάτων και των κατασκευαστών αισθητήρων. Ειδικότερα, έχουν αναπτυχθεί συστήματα αισθητήρων που στοχεύουν στη μέτρηση των χαρακτηριστικών του εδάφους και στην παρακολούθηση της κατάστασης των φυτών. Το ζητούμενο είναι να βελτιώνεται η διαχείριση των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο, με στόχο τόσο την αύξηση της παραγωγής, όσο και την αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων. Όπως επισημαίνουν οι McCloud και Gronwald (2007) αλλά και η μελέτη του Peteinatos κ.ά. (2014), το κύριο πλεονέκτημα της υιοθέτησης των τεχνολογιών αυτών είναι η βελτίωση της παραγωγικότητας και η βιώσιμη διαχείριση των γεωργικών εκτάσεων.

Σύμφωνα με τον Γιουρούκα (2016), έχουν κατασκευαστεί αισθητήρες για την εκτίμηση των δεικτών βλάστησης. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να παρακολουθούν την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βιωσιμότητα και την ευρωστία τους. Τα δεδομένα που αφορούν τη βλάστηση μπορούν να προέρχονται είτε από δορυφορικές λήψεις είτε από επίγειες μετρήσεις χρησιμοποιώντας αισθητήρες. Ένας από τους πλέον γνωστούς δείκτες στον τομέα αυτό είναι το NDVI (Normalized difference vegetation index - Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης). Αυτός ο δείκτης αξιοποιεί τις ερυθρές και υπέρυθρες φασματικές περιοχές για μετρήσεις. Στόχος του NDVI είναι η αξιολόγηση

των φωτοσυνθετικών ικανοτήτων των φυτών, η εκτίμηση της επιφάνειας των φύλλων και των χαρακτηριστικών της πράσινης βλάστησης. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, εκπέμπεται φωτεινή δέσμη και καταγράφεται η ανάκλαση των NIR και Red φασμάτων. Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται μεταξύ 0,00 και 0,99, όπου οι αυξημένες τιμές σημαίνουν πιο εύρωστη και υγιή βλάστηση (Gutiérrez-Soto et al., 2011).

Ο NDVI αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο δείκτη για τη βλάστηση. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, οι έρευνες είχαν επικεντρωθεί στην κατανόηση των δεικτών βλάστησης για την εκτίμηση του επιπέδου του αζώτου (N) στα φυτά (Feng et al., 2008· Yao et al., 2010· Wang et al., 2012· Cao et al., 2013· Diacono et al., 2013). Μετά από περαιτέρω έρευνα, η ομάδα του Zhu το 2007 διαπίστωσε ότι ο δείκτης NDVI αποτελεί τον πιο σχετιζόμενο με το επίπεδο αζώτου (N) στα φύλλα των φυτών. Ο NDVI χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την αξιολόγηση της παραγωγικότητας των σιτηρών (Raun et al., 2001· Prasad et al., 2007), ενώ ταυτόχρονα λειτουργεί ως δείκτης της φυτικής ανάπτυξης, όπως αναφέρουν οι Dorigo et al. (2007). Σύμφωνα με τις έρευνες των Trotter et al. (2008) και του Fitzgerald (2010), στην καλλιέργεια των σιτηρών, η λήψη τιμών NDVI μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη συσκευή Crop Circle, η οποία είναι ένας ενεργός αισθητήρας. Αυτός ο αισθητήρας δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης της υγείας και της ανθεκτικότητας των φυτών, της ανίχνευσης της πράσινης βιομάζας, της φυλλικής κάλυψης και της γενικότερης ανάπτυξης των φυτών, με στόχο την εφαρμογή πρακτικών, όπως η αζωτούχα λίπανση.

2.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η βιώσιμη ανάπτυξη ορίζει ότι οι δραστηριότητες πρέπει να διεξάγονται με οικολογική συνείδηση, διασφαλίζοντας οικονομική και κοινωνική δικαιοσύνη για τις μελλοντικές γενιές. Κεντρικό στοιχείο αυτού είναι η δημιουργία μεθοδολογιών που μπορούν να μετρήσουν αποτελεσματικά και να συγκρίνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής αγαθών και της παροχής υπηρεσιών. Κάθε προϊόν ή υπηρεσία διανύει έναν κύκλο ζωής που περιλαμβάνει διάφορα στάδια, από τη δημιουργία του έως το τέλος του. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) αποτελεί το κορυφαίο εργαλείο για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια αυτής της ζωής. Η δημιουργία οποιουδήποτε αντικειμένου ή υπηρεσίας απαιτεί τη χρήση πρώτων υλών και ενέργειας σε στάδια, όπως η κατασκευή, μεταφορά, επεξεργασία, αποθήκευση, διανομή, χρήση, ανακύκλωση και τελική διάθεση. Αυτά τα στάδια συνεπάγονται πληθώρα περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Ανδρής, 2021). Η ουσία της AKZ είναι η συλλογή και η ανάλυση των σχετικών δεδομένων, η δημιουργία ενός ισοζυγίου ενέργειας και

υλικών και η εξέταση των σχετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ο κύριος στόχος της ΑΚΖ είναι η αξιολόγηση των συνεπειών της χρήσης ενέργειας και πόρων, η αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων και ταυτόχρονα η παροχή βιώσιμων οικολογικών βελτιώσεων (Ανδρής, 2021).

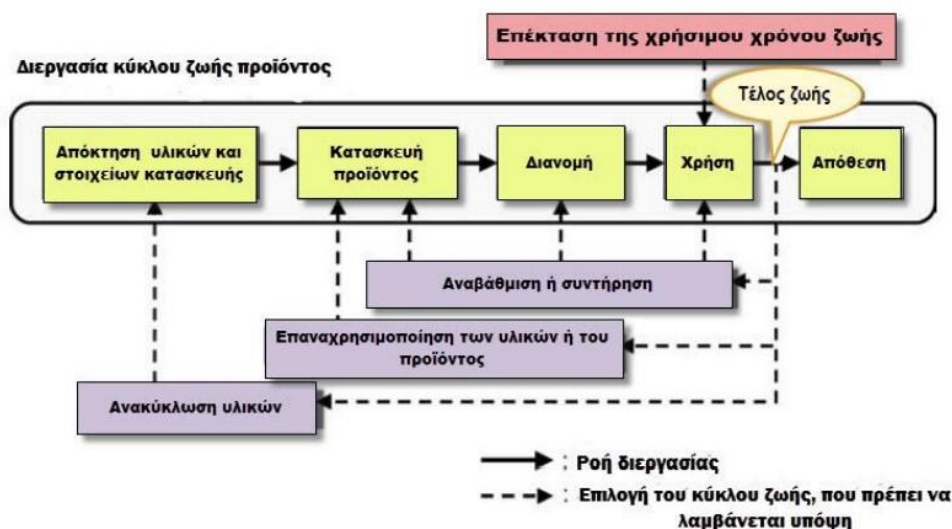
Ιστορική επισκόπηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Στις αρχές του 1960, ξεκίνησαν οι πρώτες συζητήσεις για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διεργασιών για την εξόρυξη πρώτων υλών και της βιομηχανικής παραγωγής, με έμφαση στα μεγάλα κατασκευαστικά έργα. Με την πρόοδο της δεκαετίας, η ανησυχία για την υπερβολική κατανάλωση φυσικών πόρων και ενέργειας αυξήθηκε, προσελκύοντας την προσοχή επιστημόνων και πολιτικών στην Ευρώπη και την Αμερική. Περίπου την ίδια περίοδο, η Coca Cola διεξήγαγε μία έρευνα για την εξεύρεση φιλικότερων προς το περιβάλλον υλικών συσκευασίας, δημιουργώντας τη μέθοδο Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). Παράλληλα, στην Ευρώπη, πραγματοποιήθηκαν ανάλογες μελέτες με τον όρο "οικολογικό ισοζύγιο" (Στεργιοπούλου, 2021).

Η πετρελαϊκή κρίση του 1970 επιτάχυνε την ανάπτυξη αυτής της μεθοδολογίας, αλλά το ενδιαφέρον υποχώρησε μετά την κρίση. Όμως, τη δεκαετία του 1980, η ανησυχία για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων επανέφερε τη σημασία της ΑΚΖ. Αυτό ενθαρρύνθηκε περαιτέρω από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα, που επικεντρώθηκε στη συσκευασία τροφίμων (Στεργιοπούλου, 2021).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η Society for Environmental Toxicology (SETAC) προσπάθησε να εναρμονίσει αυτές τις μεθοδολογίες, δημιουργώντας ένα κοινό κώδικα για την ΑΚΖ. Αυτή η προσέγγιση ενισχύθηκε περαιτέρω από τον International Standardization Organization (ISO) που ανέπτυξε διεθνή πρότυπα για την ΑΚΖ ως μέρος του ISO 14000, βοηθώντας στην ευρεία αποδοχή και εφαρμογή της μεθοδολογίας.

Η εικόνα 2.2 παρουσιάζει τη διαδικασία της ανάλυσης κύκλου ζωής (ΑΚΖ) ενός προϊόντος, απεικονίζοντας τα κύρια στάδια από την απόκτηση των αρχικών υλικών μέχρι την τελική απόρριψη ή ανακύκλωση. Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μία επιστημονικά τεκμηριωμένη μεθοδολογία, που καταγράφει τις περιβαλλοντικές συνέπειες που δημιουργούνται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας υπηρεσίας, από την εξόρυξη των αρχικών υλικών, τη διαδικασία παραγωγής, τη χρήση και μέχρι την τελική επεξεργασία του προϊόντος (Guinee, 2002).



Εικόνα 2.2 Διεργασία κύκλου ζωής του προϊόντος και οι εναλλακτικές επιλογές (Ανδρής, 2021)

Το πρότυπο ISO 14040

Το πρότυπο ISO 14040 είναι ένα διεθνές πρότυπο, το οποίο παρέχει ένα αυστηρό και σταθερό πλαίσιο για τη διεξαγωγή μελετών ΑΚΖ. Αυτή η εναρμόνιση τεχνικών μεθόδων και διαδικασιών έχει συμβάλει σημαντικά στην αυξημένη διεθνή αποδοχή της ΑΚΖ, όπως φαίνεται από τον αυξανόμενο αριθμό σχετικών μελετών που δημοσιεύονται με την υιοθέτηση αυτού του προτύπου.

Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 2.1, με την κυκλοφορία των νέων προτύπων ISO 14040 και ISO 14044, τα παλαιότερα πρότυπα ISO 14040:1997, ISO 14041:1999, ISO 14042:2000 και ISO 14043:2000 είτε υπέστησαν τεχνικές αναθεωρήσεις ή καταργήθηκαν και αντικαταστάθηκαν. Οι βασικές τεχνικές πληροφορίες παραμένουν σταθερές, ενώ η αναθεώρηση εστιάζει στην ενίσχυση της κατανόησης και στην εξάλειψη σφαλμάτων και ασυνεπειών. Τεχνικές αλλαγές περιλαμβάνουν την εισαγωγή αρχών για την ΑΚΖ, ένα παράρτημα για εφαρμογές, διευκρινίσεις για τη χρήση της ΑΚΖ σε συγκριτικούς ισχυρισμούς που θα κοινοποιούνται δημόσια, καθώς και την κριτική ανασκόπηση και τα όρια του συστήματος, όπως αναφέρεται από τους Finkbeiner et al. (2006).

Πίνακας 2.1 Η σειρά των πρότυπων του ISO 14040(iso.org/standard)

Σειρά προτύπων ISO 14040	Εφαρμογή
ISO 14040:2006	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Ανάλυση Κύκλου Ζωής – Αρχές και πλαίσιο
ISO 14041:1998	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Ανάλυση κύκλου ζωής – Καθορισμός στόχου και αντικειμένου και απογραφική ανάλυση
ISO/CD 14042:2000	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Ανάλυση κύκλου ζωής – Αποτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής
ISO/DIS 14043:2000	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Ανάλυση κύκλου ζωής – Ερμηνεία κύκλου ζωής
ISO 14044:2006	Περιβαλλοντική Διαχείριση – Αποτίμηση του Κύκλου Ζωής – Απαιτήσεις και Οδηγίες
ISO/TR 14047:2003	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Αποτίμηση του Κύκλου Ζωής – Παραδείγματα εφαρμογής του ISO 14042
ISO/TS 14048:2002	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Ανάλυση κύκλου ζωής – Τύπος τεκμηρίωσης των δεδομένων της ανάλυσης κύκλου ζωής
ISO/TR 14049:2000	Πρότυπο Περιβαλλοντικής Διαχείρισης – Ανάλυση κύκλου ζωής – Παραδείγματα για την εφαρμογή του προτύπου ISO 14041

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης

Η AKZ αποτελεί ένα κρίσιμο μέσο στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγής των προϊόντων. Αυτή η μελέτη καλύπτει όλα τα στάδια, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την τελική διάθεση και απόρριψη.

Σε συμφωνία με τις κατευθυντήριες γραμμές που καθορίστηκαν από το SETAC το 1993, οι στόχοι της AKZ είναι τρεις:

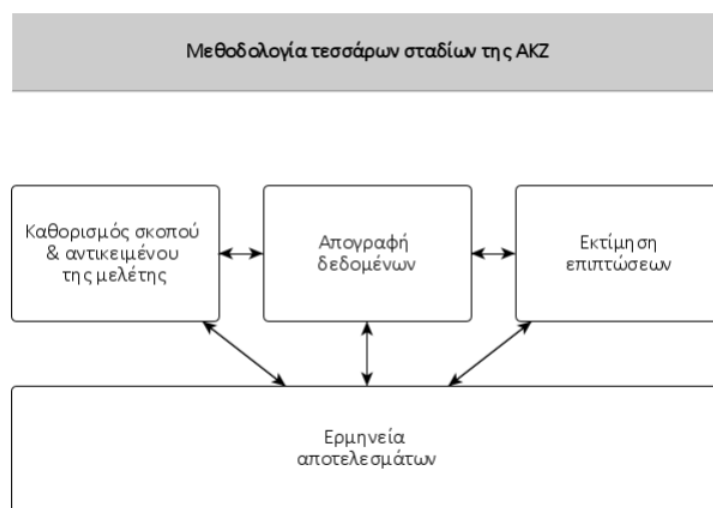
- Απεικόνιση των σχέσεων μεταξύ μιας δραστηριότητας και του περιβάλλοντος.
- Ανάδειξη της συνολικής φύσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις ανθρώπινες ενέργειες.
- Παροχή απαραίτητων δεδομένων στους αρμόδιους για τη λήψη αποφάσεων, προκειμένου να εντοπίσουν ευκαιρίες για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των δραστηριοτήτων τους.

Συνοπτικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα στάδια που περιλαμβάνει η μεθοδολογία της AKZ με βάση το πρότυπο ISO 14040:2006 είναι τα ακόλουθα:

- Καθορισμός στόχου και σκοπού της μελέτης (Goal and scope definition)

- Απογραφή δεδομένων (Inventory analysis)
- Εκτίμηση επιπτώσεων (Impact assessment)
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)

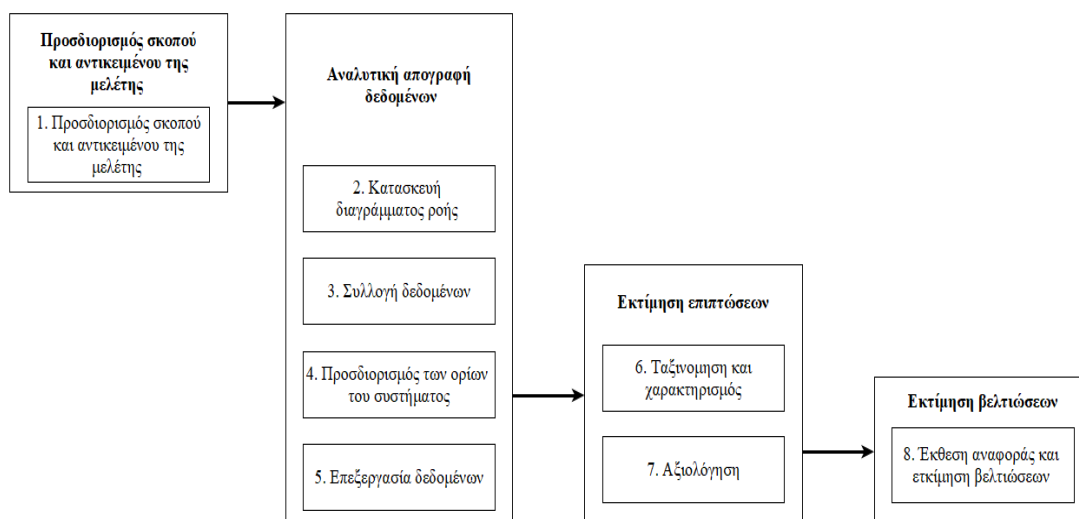
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3, τα διπλά βέλη στο διάγραμμα υποδηλώνουν ότι η ΑΚΖ αποτελεί μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Κάθε στάδιο της ανάλυσης βασίζεται στα αποτελέσματα των άλλων σταδίων ωστόσο όλα τα στάδια είναι αλληλοσυνδεδεμένα. Για παράδειγμα, μπορεί να ανακύψει η ανάγκη προσαρμογής των στόχων ή του πεδίου εφαρμογής της έρευνας, εάν συναντηθούν δυσκολίες στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων.



Εικόνα 2.3 Τα τέσσερα στάδια της μεθοδολογίας της ΑΚΖ με βάση το πρότυπο ISO 14040:2006

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, το πρώτο και καθοριστικής σημασίας στάδιο σε μια ΑΚΖ αφορά τον **καθορισμό σκοπού και πεδίου εφαρμογής** (Goal and scope definition) της μελέτης. Το στάδιο αυτό απαιτεί τη λεπτομερή απάντηση σε όλα τα σημαντικά ερωτήματα, προκειμένου τα τελικά αποτελέσματα να είναι εξίσου χρήσιμα και αξιόπιστα. Επίσης, στη φάση αυτή, προσδιορίζεται το πόσο αναλυτική θα είναι η μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο, τους διαθέσιμους πόρους και τον ανθρώπινο παράγοντα. Είναι αναμενόμενο μια τέτοια μελέτη να περιλαμβάνει ορισμένες απλοποιήσεις, αλλά αυτές δεν πρέπει να παρεκκλίνουν από τα βασικά αποτελέσματα. Τα πραγματικά αποτελέσματα της μελέτης θα πρέπει να συνδέονται με τις αποφάσεις που θα ληφθούν με βάση αυτά και τις απαιτούμενες πληροφορίες για την υλοποίηση της έρευνας. Είναι σημαντικό αυτοί οι στόχοι να είναι ξεκάθαροι από την αρχή. Ο

λόγος για την υλοποίηση μιας τέτοιας μελέτης και η προσδοκία από τα αποτελέσματα πρέπει να περιγράφονται διεξοδικά. Ένας βασικός παράγοντας είναι εάν τα συμπεράσματα θα αξιοποιηθούν για τη βελτίωση των παραγωγικών διαδικασιών μιας εταιρείας ή για να οδηγήσουν σε πολιτικές αποφάσεις σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση ενός προϊόντος σε σχέση με άλλα (Koroneos et al., 2008).



Εικόνα 2.4 Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Πηγή: US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice).

Τα ζητήματα που τίθενται αφορούν στη μονάδα μέτρησης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, τα υλικά και τις πρώτες ύλες, τις διεργασίες που θα αξιολογηθούν καθώς και το εύρος και η έκταση της μελέτης που θα πραγματοποιηθεί. Όλα αυτά τα ερωτήματα θα καθορίσουν τον σκοπό της μελέτης.

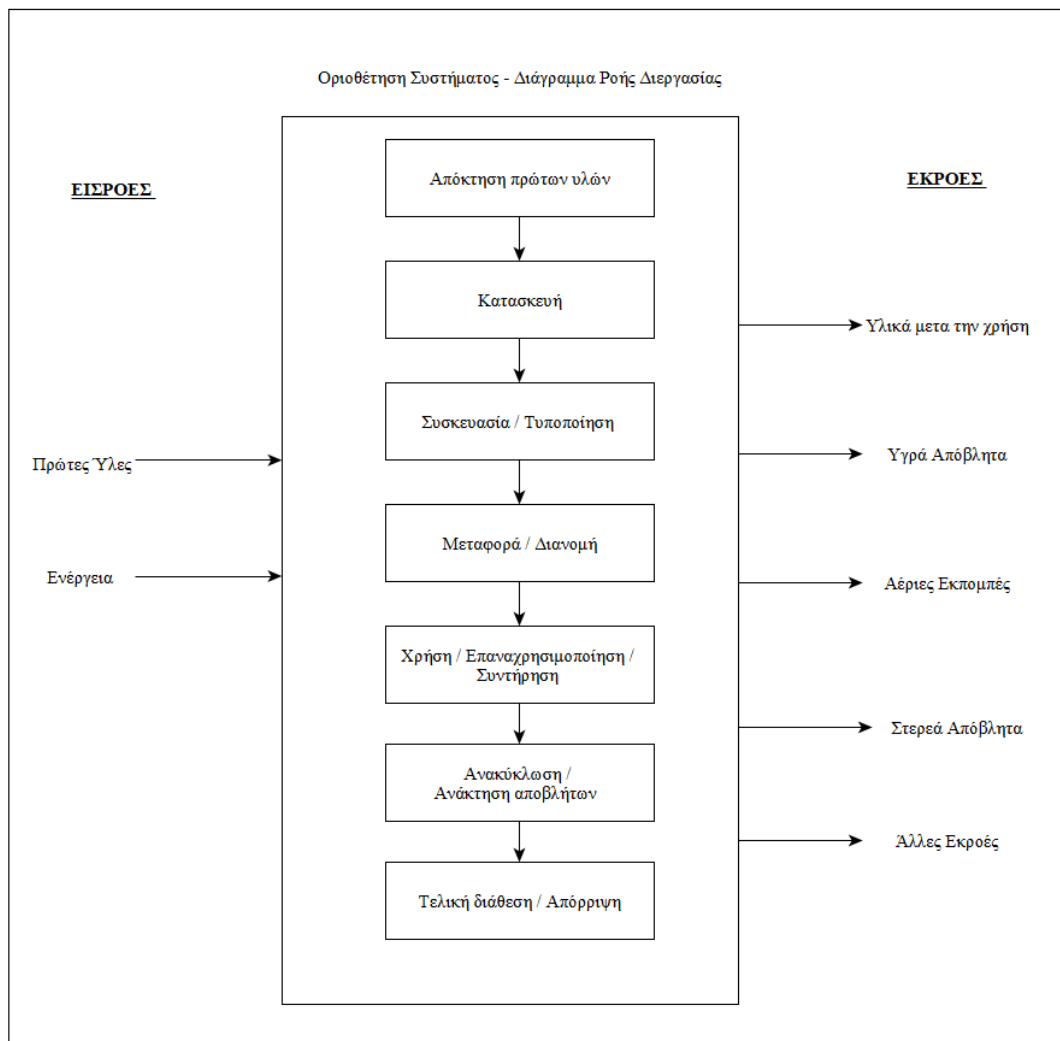
Αυτό το στάδιο μιας ΑΚΖ είναι αυτό που θα καθορίσει τον λόγο για τη διεξαγωγή της έρευνας, τι σκοπεύει να υπολογίσει και ποια θα είναι τα όριά της. Υπάρχουν έξι βασικά ζητήματα που σχετίζονται με τη διαμόρφωση του στόχου και του πεδίου εφαρμογής μιας ΑΚΖ, τα οποία είναι τα εξής:

- Η σαφής και ακριβής αποτύπωση του σκοπού για τον οποίο διεξάγεται η ΑΚΖ
- Ο λεπτομερής καθορισμός του κύκλου ζωής και της χρήσης του προϊόντος
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας (functional unit)
- Ο ορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος
- Ο καθορισμός των ποιοτικών προδιαγραφών για τα εν χρήσει στοιχεία
- Οι υποθέσεις, οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις για την ερμηνεία εν συνεχεία.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, σε μια AKZ η ποιοτική γραφική απεικόνιση των διεργασιών που εντάσσονται στον κύκλο ζωής του προς μελέτη συστήματος πραγματοποιείται με τη χρήση διαγράμματος ροής (Flow Diagram) των διεργασιών. Στο διάγραμμα ροής πρέπει να περιλαμβάνονται μόνο εκείνα τα στάδια του κύκλου ζωής που έχουν ενταχθεί εντός των ορίων του συστήματος. Σε αυτό το σημείο, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται έτσι ώστε όλες οι αναφορές να γίνονται ως προς τη λειτουργική μονάδα, ούτως ώστε να διατηρούνται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας (Koroneos et al., 2008).

Στάδιο 2: Απογραφή δεδομένων

Το δεύτερο στάδιο μιας AKZ είναι η απογραφή των δεδομένων (Life Cycle Inventory Analysis). Το στάδιο αυτό αφορά στη συλλογή δεδομένων και τη διαδικασία υπολογισμού, έτσι ώστε να εξαχθούν ποσοτικά δεδομένα για τις σχετικές εισροές και εκροές των εκάστοτε υποσυστημάτων (ISO 14040,14044:2006). Κατ' ουσία, η απογραφή των δεδομένων είναι μια ποσοτική περιγραφή των ροών μάζας και ενέργειας εντός των ορίων τόσο του συστήματος όσο και των υποσυστημάτων. Κάθε ένα υποσύστημα έχει ως είσοδο την έξοδο μιας προηγούμενης διεργασίας, ενώ κατ' αντιστοιχία η έξοδος κάθε υποσυστήματος αποτελεί και υπολογίζεται ως η είσοδος της διεργασίας που έπεται αυτού. Όπως για παράδειγμα καταγράφονται οι πρακτικές και οι λειτουργίες που απαιτούνται για να καλλιεργηθεί μια μονάδα παραγωγής (για παράδειγμα, 1 εκτάριο καλλιέργειας σιταριού) και μετρούνται, εκτιμώνται ή υπολογίζονται οι άμεσες εκπομπές (για παράδειγμα, N, P, βαρέα μέταλλα που προέρχονται από λιπάσματα, φυτοφάρμακα και κατανάλωση πετρελαίου). Η εικόνα 2.5 παρουσιάζει τα όρια του συστήματος όπως και το διάγραμμα ροής που αποτελούν τη θεμελιώδη βάση για την ανάλυση κύκλου ζωής.



Εικόνα 2.5 Όρια του συστήματος και Διάγραμμα ροής (US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice, 2006)

Στάδιο 3: Εκτίμηση επιπτώσεων

Το τρίτο στάδιο, στο πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, αφορά την αξιολόγηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment). Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τόσο την ποσοτική όσο και την ποιοτική εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στο περιβάλλον, είτε αυτές είναι θετικές είτε αρνητικές, όπως έχουν καθοριστεί στη φάση της συλλογής δεδομένων. Κύριος στόχος του συγκεκριμένου σταδίου είναι να διερευνήσει και να ερμηνεύσει τη σημασία των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο της συλλογής δεδομένων. Σε αυτό το στάδιο, τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί συνδέονται όχι μόνο με συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά και με διάφορες κατηγορίες δεικτών, προσπαθώντας ταυτόχρονα να κατανοήσει τις εν λόγω

κατηγορίες. Το συγκεκριμένο στάδιο σύμφωνα με τους Baumann και Tillman (2004) αποτελείται από:

1. **Ταξινόμηση:** Σε αυτό το στάδιο, οι διάφορες επιπτώσεις κατατάσσονται βάσει της φύσης τους. Για παράδειγμα, η εξάντληση φυσικών πόρων χωρίζεται σε μη ανανεώσιμους, ανανεώσιμους και βιοτικούς πόρους. Οι επιπτώσεις που αφορούν την ανθρώπινη υγεία μπορούν να είναι οξείες, όπως οι εκρήξεις, ή μακροχρόνιες, όπως οι ασθένειες. Επίσης, προστατεύονται τα οικοσυστήματα μέσω της ανάλυσης της δομής, της λειτουργίας και της ανθεκτικότητάς τους.
2. **Χαρακτηρισμός:** Σε αυτό το στάδιο, πραγματοποιείται η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων και συνδυάζονται αυτές που ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Ωστόσο, εξαρτάται από διάφορες μεθοδολογίες, όπως η μοντελοποίηση των επιπτώσεων ή η χρήση συγκρίσιμων μονάδων μέτρησης για διαφορετικές επιπτώσεις.
3. **Αξιολόγηση:** Σε αυτό το στάδιο, η προσπάθεια επικεντρώνεται στον συνδυασμό των διαφόρων τύπων επιπτώσεων για να διευκολυνθεί η σύγκριση ανάμεσά τους. Ο κυρίως στόχος είναι να συγκρίνουμε διάφορα σενάρια, προκειμένου να βοηθηθούμε στις αποφάσεις μας. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, διεξάγεται μια διαδικασία βαθμολόγησης των επιπτώσεων, με σκοπό τη σύγκριση, για παράδειγμα, ενός συστήματος που προκαλεί οξίνιση με ένα άλλο που συμβάλλει στην άνοδο της θερμοκρασίας της Γης.
4. **Κανονικοποίηση - (Προαιρετική):** Η κανονικοποίηση περιγράφει το πόσο σημαντικός είναι ο δείκτης κάθε κατηγορίας επιπτώσεων σε σχέση με μια αναφορική τιμή, η οποία διαφέρει για κάθε κατηγορία. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς, οι τιμές που αφορούν τη μέση ετήσια επίπτωση στο περιβάλλον για έναν Ευρωπαίο πολίτη. Με την κανονικοποίηση γίνεται εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων. Είναι, όμως, σημαντικό να τονιστεί ότι τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν απευθείας μόνο εντός μιας κατηγορίας επιπτώσεων, καθώς οι τιμές των διάφορων κατηγοριών εξαρτώνται από τις επιλεγμένες τιμές αναφοράς για κάθε μία από αυτές.
5. **Ομαδοποίηση - (Προαιρετική):** Μετά τη διαδικασία του χαρακτηρισμού και, αν απαιτείται, την κανονικοποίηση, οι κατηγορίες επιπτώσεων μπορούν να οργανωθούν σε ευρύτερες ομάδες. Αυτό μπορεί να γίνει είτε βασιζόμενο σε χαρακτηριστικά, όπως την επίδραση που έχουν σε διεθνές ή τοπικό επίπεδο, είτε βασιζόμενο σε μία δεδομένη ιεραρχία, όπως μία υποκειμενικά καθορισμένη ιεραρχία προτεραιότητας των επιπτώσεων σε υψηλή, μέση και χαμηλή

προτεραιότητα. Καθώς η ομαδοποίηση βασίζεται σε συγκεκριμένες επιλογές για την αξιολόγηση της προτεραιότητας των επιπτώσεων, πρόκειται για μια υποκειμενική διαδικασία που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την έρευνα, βάσει των επιλογών που έχει κάνει ο εκάστοτε ερευνητής. Ωστόσο, ιδιαίτερα όταν έχουν επιλεγεί πολλές κατηγορίες επιπτώσεων, η ομαδοποίηση μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των αποτελεσμάτων από τον αναγνώστη ή τον ενδιαφερόμενο.

6. **Στάθμιση - (Προαιρετική):** Η στάθμιση είναι το πιο υποκειμενικό βήμα στη διαδικασία εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σε αυτό το βήμα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε κατηγορίας πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή, ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε κατηγορία, προκειμένου να προκύψουν σταθμισμένα αποτελέσματα/επιπτώσεις (Baumann, 2004). Έτσι, τα αποτελέσματα της AKZ για ένα προϊόν μπορούν να παρουσιαστούν ως μία μοναδική βαθμολογία (σκορ) περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Όσον αφορά τη στάθμιση, ο κανονισμός ISO 14044 αναφέρει πως δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε συγκριτικούς ισχυρισμούς και οι οποίες προορίζονται για δημοσίευση.

Στάδιο 4: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία (Interpretation) των αποτελεσμάτων αποτελεί το τελικό στάδιο μιας AKZ, όπου οι πληροφορίες που προκύπτουν από τα προηγούμενα στάδια συγκεντρώνονται, εξετάζονται και αναλύονται, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τα δεδομένα και τις υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην ευρύτερη έρευνα. Αυτή η σημαντική διαδικασία περιλαμβάνει την αναγνώριση ζητημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των προηγούμενων φάσεων, όπως η καθορισμένη εφαρμογή και στόχος της μελέτης, η συλλογή δεδομένων και η αξιολόγηση των επιπτώσεων.

Το πρώτο βήμα στην ερμηνεία είναι εντοπισμός των ζητημάτων και να αξιολογηθεί η βαρύτητά τους. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιούνται για να ενημερώσουν τα προηγούμενα στάδια σχετικά με την ανάγκη για περαιτέρω ενίσχυση της συλλογής δεδομένων της έρευνας, και όταν αυτό δεν είναι εφικτό, γίνεται επανεξέταση του καθορισμένου σκοπού και πεδίου της έρευνας. Στο τέλος, παρέχονται οδηγίες για το πώς θα αντληθούν συμπεράσματα και χαρακτηρίζονται ποιοτικά τα αποτελέσματα με βάση την αξιοπιστία τους, ενώ παράλληλα παρέχονται συστάσεις με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης (Hauschild et al., 2013).

2.4 Μεθοδολογικά εργαλεία και πηγές άντλησης δεδομένων

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της AKZ, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό για τη μοντελοποίηση των διεργασιών και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για την άντληση δευτερογενών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μοντελοποίησης SimaPro 9.4.0.2 Analyst και η βάση δεδομένων Ecoinvent v3.9.

Η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μέσω ερωτηματολογίων, (βλέπε Παράρτημα Α, Πίνακας Π.Α1) και αφορούσε όλα τα χαρακτηριστικά της γεωργικής εκμετάλλευσης (πάγια και μεταβλητά).

2.5 Το λογισμικό SimaPro

Το λογισμικό SimaPro έχει αναπτυχθεί από την PRé Consultant και επιλέχθηκε ως το κύριο εργαλείο για τη διεξαγωγή της ανάλυσης κύκλου ζωής στις τρεις μελέτες περίπτωσης. Το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον του και τα ισχυρά χαρακτηριστικά του επιτρέπουν τη συστηματική μοντελοποίηση πολύπλοκων κύκλων ζωής, επιτρέποντας ακριβείς υπολογισμούς του περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος.

2.6 Η βάση δεδομένων Ecoinvent

Στις περιπτώσεις που τα πρωτογενή δεδομένα είτε δεν είναι διαθέσιμα είτε δεν είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικά για να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη, χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων για την απόκτηση δευτερογενών δεδομένων. Οι βάσεις δεδομένων περιέχουν δεδομένα για ένα ευρύ φάσμα υλικών και διεργασιών, τα οποία συλλέγονται με τη μορφή πινάκων απογραφής. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις ροές υλικών και ενέργειας που εισέρχονται και εξέρχονται από μια διεργασία, καθώς και τις εκπομπές στον αέρα, το έδαφος και το νερό (Wernet et al., 2016).

Για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Ecoinvent (έκδοση 3.9). Η συγκεκριμένη βάση αποτελεί ένα ολοκληρωμένο και ποικίλο αποθετήριο, το οποίο καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τομέων τόσο σε παγκόσμια όσο και σε περιφερειακή κλίμακα. Η εν λόγω βάση δεδομένων διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην παροχή αξιόπιστων και λεπτομερών πληροφοριών για την αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Με περισσότερες από 18.000 δραστηριότητες ή "σύνολα δεδομένων", η βάση δεδομένων Ecoinvent προσφέρει μια εκτεταμένη συλλογή πληροφοριών που καλύπτει διάφορους τομείς. Αυτά τα σύνολα δεδομένων περιλαμβάνουν ποικίλες βιομηχανίες, όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία, οι κατασκευές και η μεταποίηση, τα χημικά και τα συνθετικά, η ενέργεια, η δασοκομία και η ξυλεία, η μεταλλουργία, η

κλωστοϋφαντουργία, η ναυτιλία, ο τουρισμός, η επεξεργασία και η ανακύκλωση αποβλήτων και το νερό.

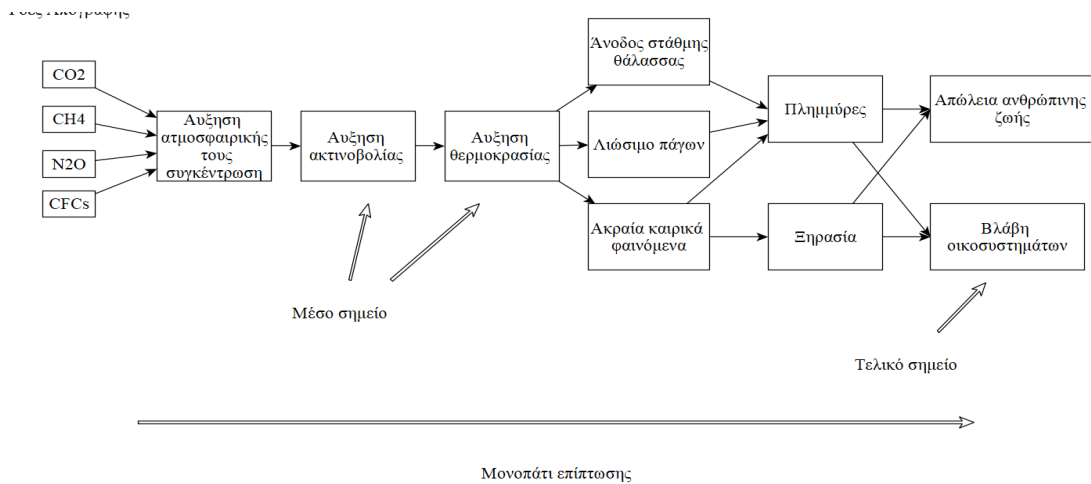
2.7 Μέθοδος εκτίμησης των επιπτώσεων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου ReCiPe 2016, η οποία επιλέχθηκε για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων κατά τη διαδικασία ανάλυσης του κύκλου ζωής της καλλιέργειας σιταριού.

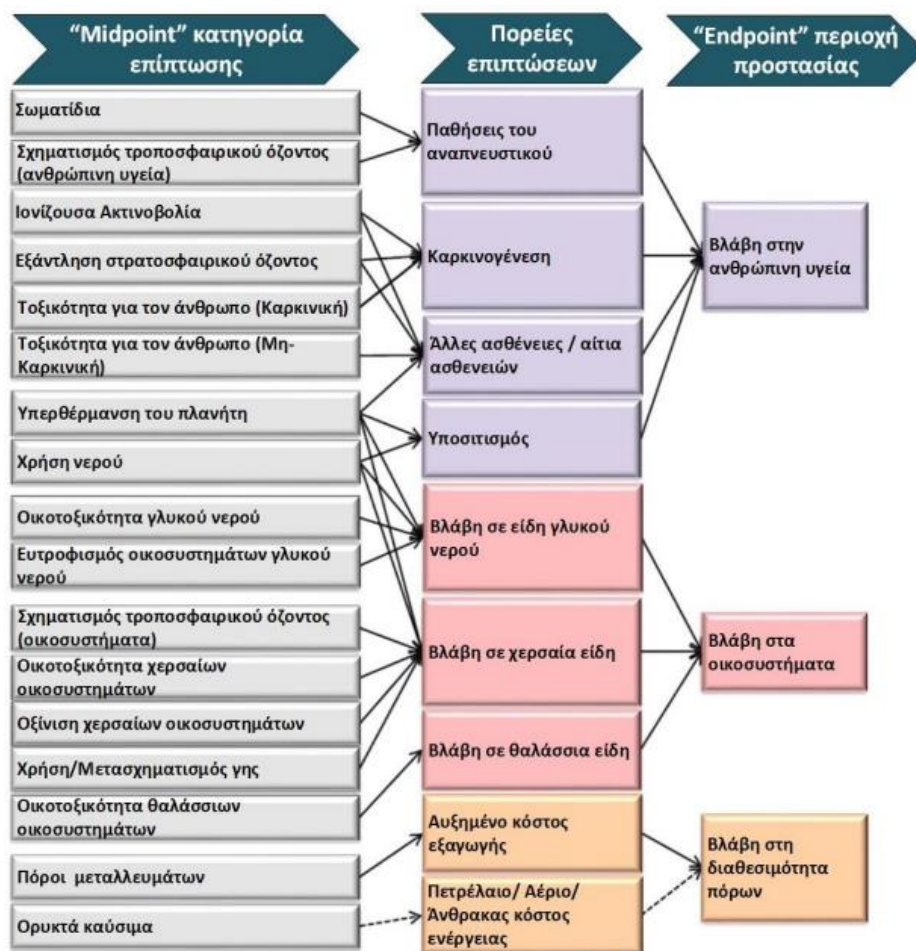
Η μεθοδολογία ReCiPe (2016) αναπτύχθηκε σε συνεργασία με τα ινστιτούτα RIVM και Radboud University, καθώς και τις εταιρείες CML και Pré Consultants (Bernaset al., 2021). Η μεθοδολογία ReCiPe 2016 αποτελεί μια εξελιγμένη έκδοση της προηγούμενης ReCiPe 2008, με τους ερευνητές να έχουν αναθεωρήσει τους συντελεστές χαρακτηρισμού σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων, για να ανταποκρίνονται ακριβώς σε παγκόσμιο επίπεδο, αντί για τους προηγούμενους συντελεστές που εστίαζαν κυρίως σε ευρωπαϊκό πλαίσιο.

Όπως αναφέρουν οι Huijbregts et al. (2017) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4, η μέθοδος ReCiPe, όπως και άλλες παρόμοιες προσεγγίσεις, επιτρέπει την ανάλυση των μελετών AKZ μετατρέποντας τις εκπομπές και την εκμετάλλευση πόρων σε ένα περιορισμένο αριθμό δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μέσω των λεγόμενων παραγόντων χαρακτηρισμού. Η εν λόγω μεθοδολογία διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες αξιολόγησης των επιπτώσεων: τις κατηγορίες μέσου σημείου (Midpoint), οι οποίες αφορούν σε άμεσες επιδράσεις, και τις κατηγορίες τελικού σημείου (Endpoint), που σχετίζονται με τις τελικές επιπτώσεις, καθεμία από αυτές με τους δικούς της μοναδικούς συντελεστές.

Οι δύο βασικές αυτές κατηγορίες επιπτώσεων συμπληρώνουν η μία την άλλη, καθώς οι επιπτώσεις Midpoint συνδέονται άμεσα με τα βασικά στοιχεία της απογραφής δεδομένων ενός κύκλου ζωής, προσφέροντας λιγότερη αβεβαιότητα. Ωστόσο, η απλοποίηση που παρέχουν οι επιπτώσεις Midpoint μπορεί να μην αποκαλύπτει πλήρως την πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων που είναι απαραίτητα για μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση σε μια μελέτη εκτίμησης κύκλου ζωής.



Εικόνα 2.6 Διάγραμμα ροής επιπτώσεων της Μεθόδου ReCiPe 2016.



Εικόνα 2.7 Ανασκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 (Pre Sustainability)

Η μέθοδος ReCiPe έχει 18 κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου και 3 κατηγορίες επιπτώσεων τελικού σημείου και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.7 και πιο αναλυτικά στους πίνακες (Πίνακας 2.2 και Πίνακας 2.3) παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο midpoint και endpoint επίπεδο.

Πίνακας 2.2 Οι κατηγορίες επίδρασης στο ενδιάμεσο επίπεδο της ReCiPe 2016 (Pre Sustainability)

Κατηγορία	Δείκτης	Ενδείξεις CFM	Μονάδα	Κύριες παραπομπές
<i>Κλιματική αλλαγή</i>	Αυξανόμενη υπέρυθη ακτινοβολία επιβολής	Δυναμικό παγκόσμιας κλιματικής επίδρασης (GWP- Global Warming Potential)	Kg CO ₂ -ισοδύναμο στον αέρα	IPCC (2013)· Joos et al. (2013)
<i>Καταστροφή του όζοντος</i>	Μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος	Δυναμικό καταστροφής του όζοντος (ODP -Global Warming Potential)	Kg CFC-11-ισοδύναμο στον αέρα	WMO - World Meteorological Organization (2011)
<i>Ιονίζουσα ακτινοβολία</i>	Αυξανόμενη δόση απορρόφησης	Δυναμικό ιονίζουσας ακτινοβολίας (IRP- Ionizing Radiation Potential)	Kbq CO-60-ισοδύναμο στον αέρα	Frischknecht et al. (2000)
<i>Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων</i>	Αυξανόμενη πρόσληψη PM2.5 από τον πληθυσμό	Δυναμικό σχηματισμού λεπτών σωματιδίων (PMFP-Particulate Matter Formation Potential)	Kg PM2.5-ισοδύναμο στον αέρα	Van Zelm et al. (2016)
<i>Σχηματισμός φωτοχημικής οξείδωσης: οικοσυστήματα</i>	Αύξηση τροποσφαιρικού όζοντος	Δυναμικό σχηματισμού φωτοχημικού οξειδωτικού: οικοσύστημα	Kg NO _x -ισοδύναμο στον αέρα	Van Zelm et al. (2016)
<i>Σχηματισμός φωτοχημικής οξείδωσης: υγεία ανθρώπου</i>	Αύξηση πρόσληψης τροποσφαιρικού όζοντος από τον πληθυσμό	Δυναμικό σχηματισμού φωτοχημικού οξειδωτικού: υγεία ανθρώπου	Kg NO _x -ισοδύναμο στον αέρα	Van Zelm et al. (2016)
<i>Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων</i>	Αύξηση πρωτονίων σε φυσικά εδάφη	Δυναμικό οξίνιση της ξηράς (TAP- Terrestrial Acidification Potential)	Kg SO ₂ -ισοδύναμο στον αέρα	Roy et al. (2014)
<i>Ευτροφισμός γλυκού νερού</i>	Αύξηση φωσφόρου σε γλυκό νερό	Δυναμικό γλυκού ευτροφισμού (FEP -Freshwater Eutrophication Potential)	Kg p-ισοδύναμο στο γλυκό νερό	Helmes et al. (2012)
<i>Ανθρώπινη τοξικότητα: καρκινογόνος</i>	Αύξηση κινδύνου για καρκίνο	Δυναμικό τοξικότητας για τον άνθρωπο: καρκίνος (HTPC - Human Toxicity Potential for Cancer)	Kg 1,4-dcb-ισοδύναμο στον αέρα	Van Zelm et al. (2009)

<i>Ανθρώπινη τοξικότητα: μη καρκινογόνος</i>	Αύξηση κίνδυνου για μη καρκινογενής παθήσεις	Δυναμικό τοξικότητας για τον άνθρωπο: μη καρκινογενής (HTPNC - Human Toxicity Potential for Non-Cancer)	Kg 1,4-dcb-ισοδυναμο στον αέρα	Van Zelm et al. (2009)
<i>Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων</i>	Αύξηση κίνδυνου σε φυσικά εδάφη	Δυναμικό τοξικότητας ξηράς (TETP - Terrestrial Ecotoxicity Potential)	Kg 1,4-DCB-ισοδυναμο σε βιομηχανικό έδαφος	Van Zelm et al. (2009)
<i>Οικοτοξικότητα γλυκού νερού</i>	Αύξηση κίνδυνου σε γλυκά νερά	Δυναμικό τοξικότητας γλυκού νερού (FETP -Freshwater Ecotoxicity Potential)	Kg 1,4- DCB -ισοδύναμο σε γλυκό νερό	Van Zelm et al. (2009)
<i>Οικοτοξικότητα θαλάσσιου νερού</i>	Αύξηση κίνδυνου σε θαλάσσιο νερό	Δυναμικό τοξικότητας θαλασσιού νερού (METP - Marine Ecotoxicity Potential)	Kg 1,4- DCB-ισοδύναμο σε θαλάσσιο νερό	Van Zelm et al. (2009)
<i>Χρήση γης</i>	Κατοχή και χρονομετρημένη μετατροπή της γης	Δυναμικό κατοχής γεωργικής γης (LOP -Land Occupation Potential)	M ₂ × χρόνος ετήσιας γεωργικής γης	de Baan et al. (2013)
<i>Εξάντληση υδάτων</i>	Αύξηση κατανάλωσης νερού	Δυναμικό κατανάλωσης νερού (WCP -Water Consumption Potential)	M ₃ νερό- καταναλωμένο	Döll & Siebert (2002)· Hoekstra & Mekonnen (2012)
<i>Χρήση Ορυκτών πόρων</i>	Αύξηση εξαγωγής ορυκτών	Δυναμικό πλεονάζοντος μεταλλεύματος (SOP - Surplus Ore Potential)	Kg Cu	Huijbregts et al. (2017)
<i>Χρήση Ορυκτών Καυσίμων</i>	Ανώτατη θερμική αξία	Δυναμικό ορυκτών καυσίμων (FFP -Fossil Fuel Potential)	Kg πετρελαίου	Jungbluth & Frischknecht (2010)

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 2.2) παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο midpoint:

Κλιματική Αλλαγή: Ένας από τους κύριους δείκτες της κλιματικής αλλαγής είναι η δυνατότητα αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας, βασισμένη στην αξιολόγηση από το IPCC του 2013. Ωστόσο, για ιεραρχικές και συστημικές προεκτάσεις, χρησιμοποιούνται χρονικά πλαίσια 100 και 1000 ετών αντίστοιχα. Η τυπική μονάδα αναφοράς είναι τα κιλά CO₂ που αντιστοιχούν στον αέρα.

Εξάντληση του Όζοντος: Για την περιγραφή της εξάντλησης του στρατοσφαιρικού όζοντος χρησιμοποιείται η Δυνατότητα Εξάντλησης Όζοντος. Αυτή η μετρική, που παρουσιάζεται σε ισοδύναμα κιλά CFC-11, δείχνει τη μακροχρόνια μείωση στη στρωματοσφαιρική συγκέντρωση όζοντος (βάσει WMO 2011).

Ιονίζουσα Ακτινοβολία: Ο χαρακτηριστικός παράγοντας για την ιονίζουσα ακτινοβολία σχετίζεται με τα επίπεδα έκθεσης του παγκόσμιου πληθυσμού. Η μονάδα αναφοράς είναι τα kBq ισοδύναμα του κοβαλτίου-60 στον αέρα.

Σχηματισμός Λεπτών Σωματιδίων: Ο κύριος παράγοντας για τη δημιουργία λεπτών σωματιδίων είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{2.5}. Η μονάδα αναφοράς είναι τα κιλά ισοδύναμα των σωματιδίων PM_{2.5}.

Φωτοχημικός σχηματισμός Όζοντος χερσαίων οικοσυστημάτων: Αυτός ο παράγοντας προέρχεται από τη δημιουργία όζοντος λόγω των εκπομπών προδρομικών ουσιών - οξειδίων του αζώτου (NO_x) και πτητικών οργανισμών που δεν περιλαμβάνουν το μεθανίου (NMVOC). Η μονάδα αναφοράς για τη δυνατότητα παραγωγής όζοντος στο οικοσύστημα είναι τα κιλά ισοδύναμα του NO_x.

Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, υγεία ανθρώπου: Οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου και των οργανικών ενώσεων που δεν περιλαμβάνουν το μεθάνιο προκαλούν τον σχηματισμό του όζοντος. Η μονάδα αναφοράς για αυτή τη διαδικασία είναι kg NO_x.

Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων: Αντικατοπτρίζει την αλλαγή στην οξύτητα των εδαφών, κυρίως λόγω της συμπεριφοράς του διοξειδίου του θείου. Η μονάδα αναφοράς είναι ισοδύναμο kg SO₂.

Ευτροφισμός γλυκού νερού: Ο φωσφόρος αποτελεί τον βασικό παράγοντα περιγραφής για τον ευτροφισμό των γλυκών νερών. Η δυνατότητα ευτροφισμού γλυκού νερού (FEP) εκφράζεται σε κιλά φωσφόρου για το γλυκό νερό. Επίσης, υποτίθεται ότι το 10% του φωσφόρου μεταφέρεται από τα γεωργικά εδάφη στα επιφανειακά νερά.

Θαλάσσιος ευτροφισμός: Τα θαλασσινά νερά ρυπαίνονται από ρυπαντές που περιέχουν φωσφόρο. Η μονάδα αναφοράς είναι ισοδύναμο kg αζώτου σε θαλασσινό νερό.

Τοξικότητα στον Άνθρωπο και οικοτοξικότητα: Αυτό σχετίζεται με τα χημικά που παραμένουν στις διατροφικές αλυσίδες μας. Η μονάδα αναφοράς είναι οι εκπομπές kg 1,4-διχλωροβενζόλιο.

Χρήση Γης: Αυτό αναφέρεται στη χρήση ή τη μετατροπή της γης για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Η μονάδα αναφοράς είναι τα τετραγωνικά μέτρα.

Χρήση Νερού: Αυτό σχετίζεται με τον όγκο του γλυκού νερού που καταναλώνεται. Η μονάδα αναφοράς είναι τα κυβικά μέτρα.

Χρήση Ορυκτών Πόρων: Αυτό αναφέρεται στην κατανάλωση ορισμένων ορυκτών. Η μονάδα αναφοράς είναι σε ισοδύναμο kg χαλκού.

Χρήση Ορυκτών Καυσίμων: Αυτό σχετίζεται με την ποσότητα των ορυκτών καυσίμων που καταναλώνεται με βάση την ενεργειακή τους περιεκτικότητα. Η μονάδα αναφοράς είναι σε ισοδύναμο kg πετρελαίου.

Χαρακτηρισμός στο endpoint επίπεδο

Πίνακας 2.3 Κατηγορίες επιπτώσεων τελικού σημείου ReCiPe 2016

Περιοχή προστασίας	Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα
Ανθρώπινη Υγεία	Βλάβη στην Ανθρώπινη Υγεία- HH (Damage to Human Health)	Αναπροσαρμοσμένα λόγω αναπηρίας έτη ζωής (σε έτη)
Οικοσύστημα	Βλάβη στην ποιότητα των Οικοσυστημάτων- ED (Damage to Ecosystem Diversity)	Απώλεια ειδών κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (σε είδη* έτη)
Διαθεσιμότητα Πόρων	Βλάβη στη Διαθεσιμότητα Πόρων – RA (Damage to Resource Availability)	Κόστος πλεονάσματος (δολάρια)

Βλάβη στην Ανθρώπινη Υγεία (Damage to Human Health- HH): Η βλάβη στην ανθρώπινη υγεία αξιολογείται με βάση την έννοια των «αναπροσαρμοσμένων λόγω αναπηρίας», χρησιμοποιώντας το κριτήριο των ετών ζωής που προσαρμόζονται βάσει αναπηρίας (DALYs). Τα DALYs ενός ατόμου προκύπτουν από στατιστικά δεδομένα σχετικά με την υγεία του, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα χαμένα χρόνια ζωής όσο και τα χρόνια που έζησε με αναπηρία. Ένα (1) DALY σημαίνει "απώλεια ενός χρόνου ζωής ενός ατόμου ή τέσσερα χρόνια ζωής με αναπηρία, η οποία έχει βαρύτητα 0,25".

Βλάβη στην ποιότητα των Οικοσυστημάτων (Damage to Ecosystem Diversity – ED): Σύμφωνα με το ReCiPe, υπάρχει η παραδοχή ότι η ποιότητα των οικοσυστημάτων μπορεί να περιγραφεί επαρκώς μέσα από την ποικιλία των ειδών. Κατά συνέπεια, η επίπτωση στην ποικιλότητα των οικοσυστημάτων μπορεί να εκφραστεί ως η απώλεια ειδών σε μια συγκεκριμένη περιοχή (είτε χερσαία είτε υδάτινη) κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

Βλάβη στη Διαθεσιμότητα Πόρων (Damage to Resource Availability – RA): Η επίδραση στη διαθεσιμότητα των πόρων στηρίζεται στη γεωλογική κατανομή των μεταλλευμάτων και των ορυκτών καυσίμων, καθώς και στην αξιολόγηση της αύξησης του οριακού κόστους για τη μελλοντική εξόρυξη πόρων (λαμβάνοντας υπόψη ένα απεριόριστο χρονικό ορίζοντα), λόγω της συνεχούς εξόρυξης. Αυτό συνεπάγεται την εξάντληση των αποθεμάτων για τα μεταλλεύματα και την ανάγκη για την εκμετάλλευση λιγότερο συμβατικών καυσίμων σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Το κόστος προσδιορίζεται σε δολάρια (USD2013) με ένα υποτιθέμενο επιτόκιο 3%.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της AKZ

Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών αντικτύπων ποικίλων συστημάτων ή προϊόντων, έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία. Μερικά από αυτά τα εργαλεία περιλαμβάνουν τη Στρατηγική Περιβαλλοντική Αξιολόγηση (SEA - Strategic Environmental Assessment), την Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (EIA - Environmental Impact Assessment), την Εκτίμηση Περιβαλλοντικού Κινδύνου (ERA - Environmental Risk Assessment), την Ανάλυση Κόστους-Οφέλους (CBA - Cost-Benefit Analysis), την Ανάλυση Ροής Υλικών (MFA - Material Flow Analysis), το οικολογικό αποτύπωμα, και την απλοποιημένη AKZ (Finnveden et al., 2009).

Αυτά τα εργαλεία χωρίζονται σε ποσοτικά ή/και ποιοτικά, ανάλογα με τη φύση των απαιτούμενων πληροφοριών. Οι ποσοτικές πληροφορίες προσφέρουν αριθμητικές τιμές με βάση αντικειμενικές μεθόδους, ενώ οι ποιοτικές πληροφορίες βασίζονται σε προκαθορισμένες παραμέτρους για την ανάλυση.

Τα κυριότερα οφέλη της AKZ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (Ζουμπούλης et al., 2015):

- α. Αλλαγές για βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης:
 - Καταγραφή δεδομένων και μείωση των επιπτώσεων
 - Συστηματική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
 - Ευκαιρίες βελτίωσης διαδικασιών και προϊόντων

- Σύγκριση και καταγραφή της απόδοσης εναλλακτικών διαδικασιών και προϊόντων.

β. Βελτίωση της επικοινωνίας με τα ενδιαφερόμενα μέρη:

- Παροχή ποσοτικών πληροφοριών
- Δημιουργία εμπιστοσύνης και παραγωγικού πλαισίου επικοινωνίας

Συνοψίζοντας, τα πρακτικά πλεονεκτήματα που απορρέουν από μια ΑΚΖ μπορούν να καταγραφούν ως εξής:

- Παρέχει ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς για την αξιολόγηση και σύγκριση διαφόρων εναλλακτικών προϊόντων και δραστηριοτήτων, βάσει των περιβαλλοντικών τους αποτελεσμάτων, ενθαρρύνοντας έτσι την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και διεργασιών με χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιδράσεις.
- Επισημαίνει τα κρίσιμα σημεία στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος που προκαλούν τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για στοχευμένες βελτιώσεις.
- Συμβάλλει σημαντικά στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας περιβαλλοντικών πολιτικών και δράσεων σχετικά με θέματα, όπως η εξοικονόμηση πρώτων υλών, η ανακύκλωση, η μείωση εκπομπών ρύπων και γενικότερα η πρόληψη ή μείωση της ρύπανσης.

Ωστόσο, η ΑΚΖ διαθέτει και περιορισμούς, όπως (Guinée et al., 2002):

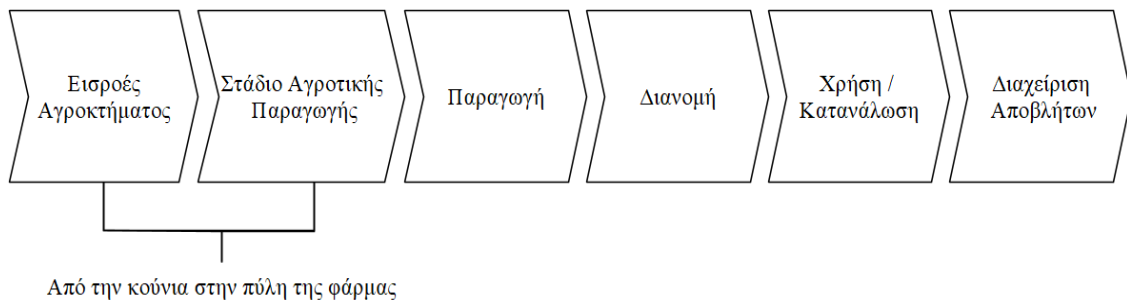
- Δυσκολία στην αντιμετώπιση εντοπισμένων γεωγραφικών επιπτώσεων.
- Περιορισμένη δυναμική προσέγγιση ως προς τον χρόνο.
- Έμφαση μόνο σε περιβαλλοντικές πτυχές και όχι σε κοινωνικές ή οικονομικές.
- Υποθέσεις και παραδοχές που πρέπει να γίνουν.
- Περιορισμένη πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων.
- Απαίτηση μεγάλου όγκου δεδομένων και πόρων.

Ανάλυση Κύκλου Ζωής στα τρόφιμα και τη γεωργία

Ο κύκλος ζωής ενός γεωργικού προϊόντος μέχρι να φτάσει στην κατανάλωση ως είδος διατροφής αποτελείται από τα παρακάτω στάδια (Dijkman et al, 2018):

- α. Παραγωγή και μεταφορά των πρώτων υλών στο χωράφι
- β. Καλλιέργεια

- γ. Παραγωγή και επεξεργασία (τα προϊόντα υπόκεινται σε διαδικασίες επεξεργασίας για την παραγωγή τροφίμων)
- δ. Διανομή των τελικών προϊόντων
- ε. Κατανάλωση από τους τελικούς χρήστες
- στ. Διαχείριση των τελικών προϊόντων



Εικόνα 2.8 Στάδια Κύκλου Ζωής στις καλλιέργειες και στα τρόφιμα (Πηγή: Dijkman et al, 2018)

Αναλυτικότερα, βάσει της Moreno (2018), το πρώτο στάδιο της διαδικασίας περιλαμβάνει την παραγωγή και μεταφορά διαφόρων γεωργικών εισροών, όπως λιπάσματα, παρασιτοκτόνα και άλλες πρώτες ύλες, που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες. Επιπλέον, σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται και η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή αυτών των πρώτων υλών.

Το δεύτερο στάδιο εστιάζεται στην εφαρμογή των λιπασμάτων και των παρασιτοκτόνων, στην άρδευση και τη χρήση καυσίμων από γεωργικά μηχανήματα για όλες τις απαιτούμενες εργασίες.

Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τις διεργασίες που απαιτούνται πριν και μετά τη συγκομιδή, πριν το προϊόν φτάσει στον καταναλωτή. Αυτό περιλαμβάνει επεξεργασίες, όπως το πλύσιμο, η ψύξη, ο τεμαχισμός και η συσκευασία, που είναι σημαντικές ειδικά για ευαίσθητα προϊόντα, όπως οι έτοιμες σαλάτες. Οι διεργασίες αυτές ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο των τροφίμων και τον τρόπο κατανάλωσής τους.

Το τέταρτο στάδιο της διαδικασίας περιλαμβάνει τη μεταφορά των γεωργικών προϊόντων σε αποθήκες και σε τόπους λιανικής πώλησης. Αυτό σχετίζεται με τη χρήση οχημάτων, τη μεταφορά των προϊόντων από αυτά, καθώς και τη χρήση ενέργειας, η οποία μπορεί να συνδέεται με τη διατήρηση των προϊόντων (π.χ. ψύξη).

Το πέμπτο στάδιο, που σχετίζεται με την κατανάλωση των γεωργικών προϊόντων, καλύπτει τη μεταφορά και την τελική επεξεργασία τους από το σημείο λιανικής

πώλησης στον χώρο κατανάλωσης, καθώς και τη χρήση ενέργειας για την αποθήκευση και την τελική επεξεργασία των τροφίμων (π.χ. μαγείρεμα).

Το τελευταίο στάδιο αφορά τη διαχείριση των τροφίμων που απορρίπτονται.

Στα προαναφερθέντα στάδια και εντός του πλαισίου των μελετών AKZ, ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει είναι η διαχείριση του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού κατά τη διεξαγωγή αυτών των μελετών. Αυτό αφορά, κυρίως, τα μηχανήματα και τις υποδομές που, όπως αναφέρθηκε, εντάσσονται στο πρώτο στάδιο (Kan et al, 2020).

Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει καθιερωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα προϊόντων (PEF - Product Environmental Footprint), μια διαδικασία που στοχεύει στη δημιουργία ενός κοινού μεθοδολογικού πλαισίου. Αυτό το πλαίσιο επιτρέπει στα κράτη μέλη και στις επιχειρήσεις να αξιολογούν και να συγκρίνουν τις περιβαλλοντικές επιδόσεις των προϊόντων και των υπηρεσιών τους, με βάση τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (EU, 2013). Πρόσφατα, υπό αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκαν ειδικοί κανόνες για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα συγκεκριμένων κατηγοριών προϊόντων, όπως φρούτα, λαχανικά, λουλούδια, βολβοί και σπόροι. Αυτοί οι κανόνες στοχεύουν στην παροχή τεχνικής καθοδήγησης για την εφαρμογή της AKZ στα προαναφερθέντα προϊόντα (Helmes et al, 2020).

Στον τομέα των μελετών AKZ, παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των μελετών εστιάζει κυρίως στα δύο πρώτα στάδια, δηλαδή στην παραγωγή και μεταφορά των αναγκαίων υλικών στο αγρόκτημα και στη διαδικασία της καλλιέργειας (Dijkman et al, 2018). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται το ενδιαφέρον για τη διερεύνηση των επιπτώσεων και των σταδίων της επεξεργασίας και διανομής των προϊόντων μέχρι τα σημεία λιανικής πώλησης. Αυτό γίνεται με σκοπό να εξεταστούν πιθανές βελτιώσεις και εναλλακτικές λύσεις τόσο στην εφοδιαστική αλυσίδα όσο και στην επεξεργασία, μέσω μιας καλύτερης κατανόησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτών των σταδίων (Moreno et al, 2018).

2.8 Προηγούμενες μελέτες για την AKZ στην παραγωγή σίτου

Πρόσφατες επιστημονικές έρευνες έχουν αξιοποιήσει τη μεθοδολογία της AKZ, στοχεύοντας στην ολοκληρωμένη βελτίωση των διαδικασιών διαχείρισης εταιρειών που συμμετέχουν στην παραγωγή ολικής αλέσεως ζυμαρικών από σκληρό σίτο, ενώ, επίσης, εξετάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνεπάγεται η παραγωγή του αντίστοιχου ψωμιού (Zingale et al., 2022). Από αυτές τις μελέτες αναδεικνύεται πως το κύριο περιβαλλοντικό φορτίο προκύπτει κατά το στάδιο της καλλιέργειας του σίτου,

ενώ παραμένει ανοικτό το θέμα της σύγκρισης των επιδράσεων ανάμεσα σε συμβατικές και βιολογικές γεωργικές πρακτικές. Η έρευνα των Todorović et al. (2018) έχει καταδείξει τον ρόλο της κατανάλωσης νερού και της χρήσης αζώτου στην περιβαλλοντική απόδοση της καλλιέργειας σκληρού σίτου στη Μεσόγειο. Επισημαίνει την αναγκαιότητα υιοθέτησης γεωργικών πρακτικών που εξαρτώνται λιγότερο από την κατανάλωση πόρων, προωθώντας την αυξημένη οικολογική αποδοτικότητα. Στο ίδιο πλαίσιο, οι Alhajj Ali et al. (2017) έχουν υπολογίσει τις εκπομπές GHG που συνδέονται με την καλλιέργεια σίτου, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι με την εφαρμογή βελτιωμένων τεχνικών καλλιέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά το ανθρακικό αποτύπωμα της καλλιέργειας.

Το ζήτημα της σύγκρισης αναφορικά με την καλλιέργεια σίτου είναι πολυδιάστατο και έχει προσελκύσει πολλούς ερευνητές. Οι περισσότεροι ερευνητές εστιάζουν στην ποιότητα του προϊόντος και τις προτιμήσεις των καταναλωτών (Drugova et al., 2020· Draghici et al., 2011). Ωστόσο, λιγότεροι έχουν διερευνήσει τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε διαφορετικές μορφές καλλιέργειας. Οι Montemurro και Maiorana (2015) υποστηρίζουν ότι πρακτικές, όπως η αμειψισπορά, η ρηχή άροση και τα οργανικά λιπάσματα μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να συμβάλουν στην αειφόρο γεωργία. Επιπλέον, οι Fagnano et al. (2012) προέβησαν σε ευρύτερες συγκρίσεις, αναζητώντας τις διαφορές σε αγρονομικά, τεχνολογικά, και υγειονομικά θέματα, χωρίς, όμως, να εξετάσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Επικεντρώνοντας στην παραγωγή σιτηρών, έχουν διεξαχθεί μελέτες που συγκρίνουν την παραδοσιακή με τη βιολογική καλλιέργεια. Ειδικότερα, οι Holka και Bieńkowski (2020) αναφέρουν ότι οι περισσότερες προηγούμενες μελέτες για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής της παραγωγής σιταριού αφορούσαν το συμβατικό σύστημα καλλιέργειας και επικεντρώνονταν, κυρίως, στις εκπομπές GHG. Στην έρευνά τους σχετικά με την καλλιέργεια σίτου, οι Van Stappen κ.ά. (2015) ανακάλυψαν ότι η επιλογή της λειτουργικής μονάδας (Functional Unit - FU) έχει σημαντικό ρόλο στα ευρήματα. Όταν χρησιμοποιήθηκε ένα κιλό σπόρων ως FU, οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή και τη συνολική ενεργειακή απαίτηση δεν ήταν σημαντικά διαφορετικές συγκριτικά με τη χρήση ενός εκταρίου γης ως FU. Ωστόσο, οι επιπτώσεις στη βιολογική παραγωγή ήταν πιο έντονες, κυρίως λόγω της οξίνισης του εδάφους και του ευτροφισμού, και ακόμη περισσότερο στην περίπτωση της κατάληψης γεωργικής γης, εξαιτίας της υψηλότερης αποδοτικότητας της συμβατικής καλλιέργειας (8,5 τόνοι ανά εκτάριο) σε σύγκριση με τη βιολογική (4,5 τόνοι ανά εκτάριο). Αντίθετα, όταν χρησιμοποιήθηκε ένα εκτάριο ως

FU, η βιολογική καλλιέργεια παρουσίασε λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις σε σχέση με τη συμβατική, με εξαίρεση τους τομείς της οξίνισης του εδάφους και του ευτροφισμού.

2.9 Κενά και ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα

Παρά το γεγονός ότι ορισμένες μελέτες έχουν εξετάσει τις περιβαλλοντικές συνέπειες της παραδοσιακής καλλιέργειας σίτου, υπάρχει ανάγκη για πιο λεπτομερή αξιολόγηση των επιπτώσεων από την άποψη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, της χρήσης νερού και της απώλειας βιοποικιλότητας. Υπάρχουν, επίσης, περιορισμένα δεδομένα για την ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αξιολόγηση του κύκλου ζωής της παραγωγής χειμερινού σίτου σε σχέση με διάφορα συστήματα καλλιέργειας στη γεωργική οικονομία της Ελλάδας. Έτσι, η έρευνα για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής σιταριού ανάλογα με τις πρακτικές καλλιέργειας είναι σημαντική για την ανάπτυξη πιο βιώσιμων συστημάτων παραγωγής τροφίμων.

2.10 Ανακεφαλαίωση

Η τεχνική της AKZ αναδύθηκε μέσα από την αναζήτηση λύσεων για ζητήματα σχετικά με την αξιοποίηση υλικών πόρων, την κατανάλωση ενέργειας και τον έλεγχο αποβλήτων, καθώς και τις δυνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες αυτών. Η εξέλιξη της ενισχύθηκε από πολιτικές πρωτοβουλίες, την επιχειρηματική δράση και τον ακαδημαϊκό τομέα, όπου μέσα από κοινές προσπάθειες επεξεργάστηκαν ένα συμφωνημένο πλαίσιο προτύπων για την κοινή εφαρμογή και προσέγγιση της μεθοδολογίας.

Η μεθοδολογία της AKZ είναι το επίκεντρο της παρούσας μελέτης και το θεμέλιο επάνω στο οποίο στηρίχθηκε η έρευνά μας για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής συνεισφοράς της καλλιέργειας σίτου, τόσο ως αυτοτελές φαινόμενο όσο και σε σύγκριση με άλλες αγροκαλλιεργητικές πρακτικές.

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 3 : ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

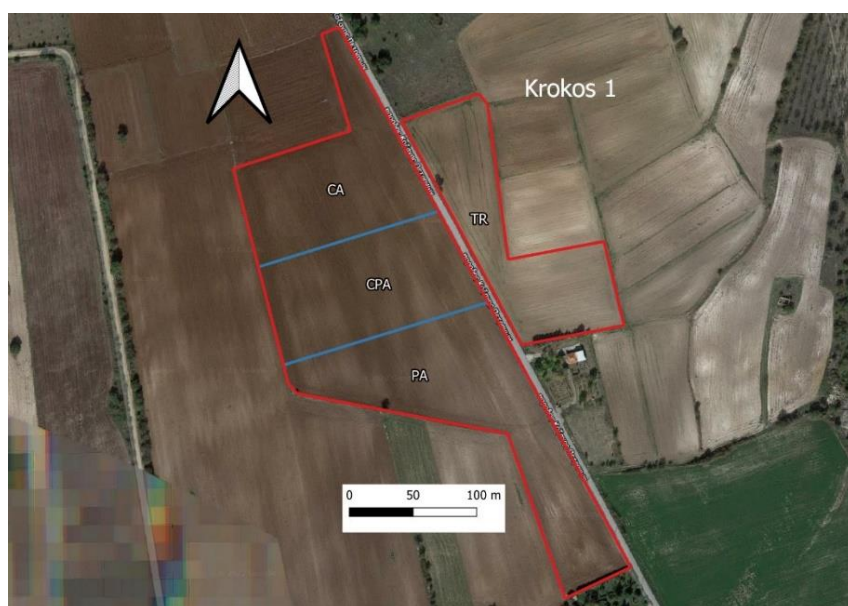
3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται μια λεπτομερής παρουσίαση και ανάλυση της μελέτης περίπτωσης που αφορά την καλλιέργεια σίτου στον Κρόκο Κοζάνης, με έμφαση στις διαφορετικές διαδικασίες και τεχνικές που εφαρμόζονται στην αγροτική παραγωγή. Η ανάλυση αυτή καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής της καλλιέργειας, από την προετοιμασία του εδάφους μέχρι τη συγκομιδή, παρέχοντας έναν σαφή ορισμό του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, καθώς της λειτουργικής μονάδας και των όριων του συστήματος.

Επιπλέον, περιλαμβάνεται η απογραφή των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τον παραγωγό και αφορούν τις λεπτομέρειες της καλλιέργειας ανά στρέμμα, καθώς και την ανάλυση ευαισθησίας που εξετάζει τον αντίκτυπο των διαφορετικών ποσοτήτων λιπάσματος στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής. Τέλος, καταγράφονται οι παραδοχές και οι περιορισμοί που συνοδεύουν τη μελέτη, καθιστώντας τη μια συνολική και ολοκληρωμένη εξέταση της καλλιέργειας σίτου με βάση τις τεχνικές και τις πρακτικές που εφαρμόζονται στον συγκεκριμένο αγροτικό τομέα.

3.2 Διαμόρφωση μελέτης περίπτωσης και σεναρίων

Η πειραματική έκταση καλλιέργειας σιταριού βρίσκεται στον Κρόκο Κοζάνης και αποτελείται από δύο αγροτεμάχια συνολικής έκτασης 86,6 στρεμμάτων (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 Πειραματική περιοχή

Η καλλιέργεια του σίτου στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια: κατεργασία εδάφους, φύτευση, λίπανση, ψεκασμός και συγκομιδή. Η προετοιμασία του εδάφους είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αύξηση της παραγωγής σίτου. Αρχικά, ο γεωργός εφάρμοσε στο τέλος του καλοκαιριού κατεργασία εδάφους με δισκοσβάρνα πλάτους 3 μέτρων, ώστε να καταστραφεί η καλαμιά της προηγούμενης περιόδου. Στη συνέχεια, έγινε άροση με άροτρο πλάτους 2.2 μέτρων. Στη συνέχεια, ακολούθησε κατεργασία εδάφους με καλλιεργητή βαρέως τύπου 4.5 μέτρων στις αρχές του φθινοπώρου. Η επόμενη κατεργασία εδάφους πραγματοποιήθηκε με σβάρνα πλάτους 2.8 μέτρων και η τελευταία κατεργασία που πραγματοποιήθηκε ήταν η ισοπέδωση με κύλινδρο πλάτους 3 μέτρων (πριν ή μετά τη σπορά). Οι κατεργασίες εδάφους αναφέρονται με ενδεικτικές ημερομηνίες στον Πίνακα 3.1.

Η σπορά πραγματοποιήθηκε με συρόμενη σπαρτική μηχανή πλάτους 2.5 μέτρων με υνάκια (συμβατική) με ποσότητα σπόρου ανά στρέμμα 18-20 κιλά. Η ποικιλία του σπόρου ήταν η MERIDANO που είναι ποικιλία σκληρού σιταριού με σταθερά υψηλό δυναμικό παραγωγής και με μεγάλη προσαρμοστικότητα σε όλους τους τύπους εδαφών. Διακρίνεται για την αντοχή στο ψύχος, το πλάγιασμα, τις ασθένειες και την ξηρασία. Παράγει φυτό μέσου ύψους με άριστα ποιοτικά χαρακτηριστικά για την παραγωγή ζυμαρικών αλεύρων και ζωοτροφών, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη.

Πίνακας 3.1 Τύποι κατεργασίας εδάφους και ημερομηνίες που έλαβαν χώρα σύμφωνα με τον γεωργό

Εφαρμογές	Τύπος κατεργασίας εδάφους	Ημερομηνία (κατά προσέγγιση)
1 ^η	Δισκοσβάρνα (καταστροφή καλαμιάς)	20 Ιουλίου με 10 Αυγούστου, 2022
2 ^η	Όργωμα με άροτρο	10 Αυγούστου με 10 Σεπτεμβρίου, 2022
3 ^η	Καλλιεργητής Βαρέως Τύπου	10 Σεπτεμβρίου με 31 Σεπτεμβρίου, 2022
4 ^η	Σβάρνα	1 Οκτωβρίου με 20 Οκτωβρίου, 2022
5 ^η	Ισοπέδωση με κύλινδρο (πριν ή μετά τη σπορά)	1 Νοεμβρίου με 15 Δεκεμβρίου, 2022

Η λίπανση (Πίνακα 3.2) πραγματοποιήθηκε με λιπασματοδιανομέα διασποράς 12 μέτρων με χωρητικότητα 1.550 λίτρων και χρησιμοποιήθηκε για επιφανειακή λίπανση. Η λίπανση έγινε 3 φορές: μια τον Νοέμβριο με τύπο λιπάσματος Ω (18-18-0) με ποσότητα εφαρμογής ανά στρέμμα 22.7 κιλά, η δεύτερη πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο με τύπο λιπάσματος 27N (27-0-0) και ποσότητα εφαρμογής ανά στρέμμα

14 κιλά και η τρίτη έλαβε χώρα τον Μάρτιο με τύπο λιπάσματος 27N (27-0-0) και ποσότητα εφαρμογής ανά στρέμμα 13,6 κιλά.

Πίνακας 3.2 Εφαρμογές και τύποι λιπάσματος που χρησιμοποίησε ο γεωργός

A/A	Τύπος λιπάσματος	Ημερομηνία εφαρμογής (κατά προσέγγιση)
1η	Ω 18-18-0 (χειμερινό με σπορά)	Νοέμβριο 2022
2η	27N 27-0-0 (ανοιξιάτικο 1ο χέρι)	Φεβρουάριο 2023
3η	27N 27-0-0 (ανοιξιάτικο 2ο χέρι)	Μάρτιο 2023

Ο γεωργός χρησιμοποίησε πέντε διαφορετικά είδη φαρμάκων για την εξάλειψη των ζιζανίων και την προστασία των φυτών του από διάφορες απειλές. Αναλυτικά, τα είδη φαρμάκων και η χρήση τους είναι οι εξής:

- **Είδος Α (Πυρεθρίνη):** Προορίζεται για την καταπολέμηση εντόμων, όπως ο ζάβρος, ο κριόκερος και άλλα έντομα γενικά.
- **Είδος Β (Axial):** Χρησιμοποιείται για την καταπολέμηση αγριοβρώμης, ήρας και άλλων στενόφυλλων ζιζανίων.
- **Είδος Γ (Biathlon):** Κατάλληλο για την αντιμετώπιση φυτών, όπως η bifora, η παπαρούνα, το αγριοσινάπι, η κολλιτσίδα και το αγκάθι.
- **Είδος Δ (Dash):** Λειτουργεί ως προσκολλητική ουσία για την καλύτερη εφαρμογή των σκευασμάτων.
- **Είδος Ε (Comet):** Πρόκειται για μυκητοκτόνο φάρμακο.

Όπως αναφέρεται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.3), ο γεωργός εφάρμοσε τα ανωτέρω σκευάσματα για αντιμετώπιση εντόμων, ασθενειών και ζιζανίων, ως εξής:

Αρχικά, τον Δεκέμβριο, εφαρμόστηκε εντομοκτόνο με βάση την πυρεθρίνη, με την εμπορική ονομασία "Graffiti", με δόση 2 λίτρα ανά στρέμμα για την καταπολέμηση του εντόμου ζάβρος. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλήφθηκε και τον Απρίλιο, αυτή τη φορά για τον έλεγχο του εντόμου κριόκερος και άλλων εντόμων.

Τον Απρίλιο, πραγματοποιήθηκε, ζιζανιοκτονία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν 4 λίτρα ανά στρέμμα για την καταπολέμηση των στενόφυλλων ζιζανίων, και 7 γραμμάρια ανά στρέμμα για την αντιμετώπιση των πλατύφυλλων, όπως είναι η bifora και η παπαρούνα. Συνοδευτικά, χρησιμοποιήθηκαν 75 cc ενισχυτικής ουσίας ανά στρέμμα για την καλύτερη προσκόλληση του φαρμάκου στα φύλλα των φυτών.

Τέλος, τον Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο, πραγματοποιήθηκε μυκητοκτονία με χρήση 100 cc μυκητοκτόνου ανά στρέμμα, προκειμένου να προστατευτεί ο αγρός από διάφορες ασθένειες που προέρχονται από μύκητες.

Μέσω αυτού του ενδεδειγμένου σχεδίου, ο γεωργός διασφαλίζει την υγεία και την ποιότητα των καλλιεργειών του, προσφέροντάς τους την καλύτερη δυνατή προστασία από ασθένειες και εχθρούς.

Πίνακας 3.3 Γενικές πληροφορίες σχετικά με τη φυτοπροστασία.

A/A	Τύπος φαρμάκου	Ημερομηνία εφαρμογής (κατά προσέγγιση)
1 ^η	Εντομοκτόνο Graffiti (πυρεθρίνη)	1. (Δεκέμβριος) 2022 2. (Απρίλιος) 2023
2 ^η	Ζιζανιοκτόνο για στενόφυλλα	Απρίλιος, 2023
3 ^η	Ζιζανιοκτόνο για πλατύφυλλα	Απρίλιος, 2023
4 ^η	Ενισχυτική ουσία για προσκόλληση στα φύλλα	Μάρτιος, 2023
5 ^η	Μυκητοκτόνο	Απρίλιος, 2023

Η τελευταία φάση της γεωργικής διαδικασίας ήταν η συγκομιδή των καρπών. Για την υλοποίηση αυτής της κρίσιμης διεργασίας, ο γεωργός χρησιμοποίησε αλωνιστική μηχανή με πλάτος τράπεζας 4.57 μέτρων και κατανάλωση καυσίμου 2,5 λίτρα το στρέμμα.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των προαναφερθέντων γεωργικών διαδικασιών από την κατεργασία του εδάφους μέχρι και τη συγκομιδή, ο γεωργός κατάφερε να επιτύχει μια συνολική συγκομιδή της τάξεως των 200 κιλών ανά στρέμμα.

3.3 Καθορισμός σκοπού - πεδίου εφαρμογής

Ο κύριος στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να καθορίσει και να αναλύσει τις περιβαλλοντικές διαφορές που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της καλλιέργειας του σίτου μέσα από διαφορετικές τεχνικές. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν η παραδοσιακή καλλιέργεια, η εφαρμογή λίπανσης ακριβείας καθώς και η σπορά χωρίς άροση με τις λοιπές διεργασίες ίδιες με την συμβατική μέθοδο. Με την ανάλυση ευαισθησίας ελέγχθηκε από ποια ποσότητα λιπάσματος μεταβάλλονται τα αποτελέσματα της ΑΚΖ.

3.4 Λειτουργική μονάδα

Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε ήταν η καλλιέργεια σιταριού σε ένα εκτάριο καλλιεργήσιμης έκτασης. Ορισμένοι ερευνητές έχουν προτείνει 1 τόνο παραγόμενου σιταριού ως λειτουργική μονάδα (Brock, et al., 2012· Holka, et al., 2016), αλλά μια τέτοια μονάδα επηρεάζεται σημαντικά από τον βαθμό απόδοσης, με αποτέλεσμα να

διακυβεύονται τα αποτελέσματα και να οδηγεί σε μη συγκρίσιμα αποτελέσματα (McAuliffe et al., 2020).

3.5 Όρια του συστήματος

Αφού καθορίστηκε η λειτουργική μονάδα, το επόμενο στάδιο ήταν να οριστεί το πεδίο εφαρμογής του συστήματος, αναγνωρίζοντας ποιες διαδικασίες συμπεριλαμβάνονται στην AKZ και ποιες αποκλείονται. Είναι ζωτικής σημασίας να καθοριστούν σωστά τα όρια του συστήματος κατά τον σχεδιασμό μιας AKZ, ενσωματώνοντας θεωρητικά όλες τις αναγκαίες διαδικασίες μονάδας για την υλοποίηση της λειτουργικής μονάδας (Sonesson et al., 2010.)

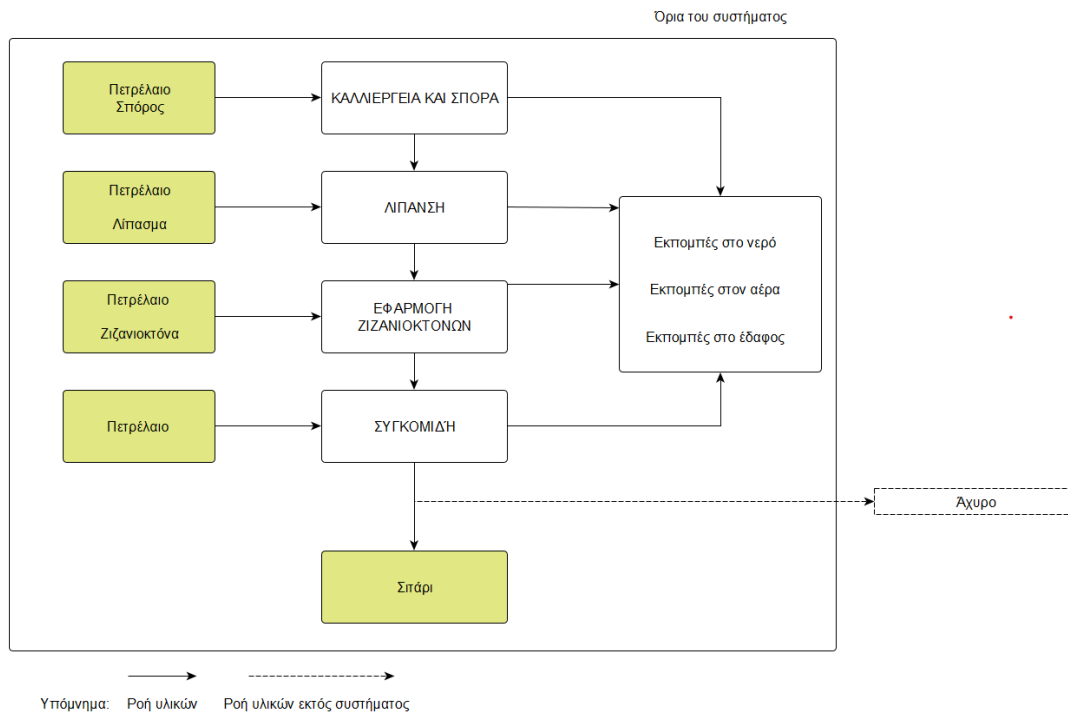
Η μελέτη αυτή καλύπτει ολοκληρωτικά την επεξεργασία της γεωργικής παραγωγής, αρχίζοντας από την προετοιμασία του εδάφους και φτάνοντας μέχρι τη συγκομιδή του τελικού προϊόντος ακολουθώντας την προσέγγιση "από την κούνια στην πύλη" (cradle to gate). Στο πλαίσιο της τυπικής παραγωγής σκληρού σίτου, τα βασικά βήματα περιλαμβάνουν:

- κατεργασία εδάφους (άροση, σβάρνα, καλλιεργητής)
- σπορά
- λίπανση
- χημική καταπολέμηση εχθρών (ζιζανίων, εντόμων, ασθενειών)
- συγκομιδή του σιταριού

Επιπλέον, στα όρια του συστήματος περιλαμβάνονται και οι μεταφορές που πραγματοποίησε ο γεωργός, ώστε να προμηθευτεί τις πρώτες ύλες.

Εκτός ορίων του συστήματος θεωρείται η διαδικασία μεταφοράς του συγκομισμένου σπόρου προς αποθήκευση και επεξεργασία.

Στην Εικόνα 3.2 αποτυπώνονται τα όρια του συστήματος κατά την AKZ της καλλιέργειας σιταριού.



Εικόνα 3.2 Όρια του Συστήματος

3.6 Απογραφή δεδομένων

Τα δεδομένα της μελέτης, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, συλλέχθηκαν μέσω ερωτηματολογίου που απαντήθηκε από τον παραγωγό και αφορούσαν τις λεπτομέρειες για την καλλιέργεια σιταριού ανά στρέμμα. Στη συγκεκριμένη έρευνα δεν υπολογίστηκε η χρήση νερού, αφού ο συγκεκριμένος αγρός δεν αρδεύεται. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται αναλυτικά τα δεδομένα που ελήφθησαν από τον γεωργό κατά τη συμβατική καλλιέργεια.

Πίνακας 3.4 Απογραφή δεδομένων σχετικά με τη μελέτη

Στάδιο		Μονάδες	Ποσότητα
Διεργασίες καλλιέργειας	Καλλιεργητής	Lt/ha (πετρέλαιο)	20
	Ψεκαστικό	Lt/ha (πετρέλαιο)	6
	Λιπασματοδιανομέας	Lt/ha (πετρέλαιο)	6
	Δισκοσβάρνα	Lt/ha (πετρέλαιο)	20
	Άροτρο	Lt/ha (πετρέλαιο)	28
	Σπαρτική Μηχανή	Lt/ha (πετρέλαιο)	20
	Σβάρνα	Lt/ha (πετρέλαιο)	15
	Κύλινδρος	Lt/ha (πετρέλαιο)	15
Λιπάσματα	27N 27-0-0	kg/ha	115,38
	Ω 18-18-0	kg/ha	40,86
Φυτοπροστασία	Πυρεθρίνη	Lt/ha	40
	Axial	Lt/ha	40
	Biathlon	Lt/ha	0,07

	Dash	Lt/ha	0,25
	Comet	Lt/ha	1
Σπορά	MEPINTIANO (ΣΚΛΗΡΟ ΣΙΤΑΡΙ)	Kg/ha	180
Συγκομιδή	Αλωνιστική μηχανή	Lt/ha	15

Ενώ τα δεδομένα για τη συμβατική καλλιέργεια προήλθαν απευθείας από τον γεωργό, οι πληροφορίες για τη λίπανση ακριβείας και την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία βασίστηκαν σε βιβλιογραφικές πηγές, καθώς οι τελευταίες δυο δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμη από τον γεωργό.

3.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί ένα κρίσιμο μέρος της ΑΚΖ, καθώς αναδεικνύει πώς οι αλλαγές σε κεντρικές παραμέτρους μπορούν να επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η εστίαση στην ποσότητα των λιπασμάτων χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει πώς η μεταβολή της χρήσης αυτών των εισροών επηρεάζει τις περιβαλλοντικές εκπομπές και την ενεργειακή αποδοτικότητα της γεωργικής παραγωγής, βάσει της οδηγίας της ΕΕ για δραστική μείωση των λιπασμάτων μέχρι το 2050 (Πράσινη Συμφωνία).

Κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης, εξετάστηκαν 3 σενάρια μείωσης της αρχικής ποσότητας των λιπασμάτων (20%, 30% και 50%). Αυτές οι ποσοστιαίες μειώσεις αποτελούν σημαντικές μεταβολές και η επίδρασή τους στην ΑΚΖ μπορεί να προσφέρει σημαντικές ενδείξεις για την επίδρασή τους στο τελικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής σίτου στον Κρόκο Κοζάνης.

3.8 Παραδοχές και περιορισμοί

Σε ιδανικές συνθήκες, μια ΑΚΖ θα έπρεπε να λαμβάνει υπόψη της όλα τα υλικά και την ενέργεια που χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής ενός προϊόντος ή υπηρεσίας. Παρόλα αυτά, στην πραγματικότητα είναι συχνά αναγκαίο να γίνονται ορισμένες παραδοχές και εκτιμήσεις, όταν δημιουργούμε μοντέλα για τις διαδικασίες ενός συστήματος, κυρίως λόγω περιορισμένου χρόνου, πόρων και πληροφοριών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι περιορισμοί και οι παραδοχές της παρούσας μελέτης.

Πίνακας 3.5 Παραδοχές σχετικά με τα δεδομένα της Μελέτης

Στάδιο	Παραδοχές
Δεδομένα Ecoinvent	Τα στοιχεία που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων Ecoinvent, σχετικά με τη χρήση γεωργικών μηχανημάτων και ειδικότερα του ελκυστήρα, κρίνονται ενδεικτικά για τον σκοπό αυτής της μελέτης.

	Υφίσταται μερική έλλειψη στα διαθέσιμα δεδομένα όσον αφορά τα ειδικά γεωργικά μηχανήματα.
Καλλιέργεια σιταριού (άρδευση)	Πρόκειται για αγρό με ξηρικό σίτο, επομένως δεν εφαρμόζεται άρδευση.
Μετακινήσεις εργατικού προσωπικού	Λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ οικισμού και αγρού, οι μετακινήσεις αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση.
Μη κατεργασία εδάφους	Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι σε περίπτωση μη κατεργασίας εδάφους, η ποσότητα των λιπασμάτων αυξάνεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε ότι η ποσότητα παραμένει αμετάβλητη.
Μεταφορές	Σχετικά με τις μεταφορές, δεν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι μεταφορικές διαδικασίες που συνδέονται με τη δημιουργία των κύριων συστατικών του συστήματος, λόγω έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων. Για τις πρώτες διαδρομές χρησιμοποιούνται οι εκτιμώμενες αποστάσεις μεταφοράς από το σύνολο δεδομένων της ecoinvent “market”.
Λίπανση ακριβείας	Λόγω έλλειψης πρωτογενών δεδομένων για τη γεωργία ακριβείας θεωρήθηκε από τη βιβλιογραφία ότι η μείωση του λιπάσματος κατά τη λίπανση ακριβείας είναι από 20-50% (Φουντάς & Γέμτος, 2015) και πιο συγκεκριμένα στην ερευνά που πραγματοποιήθηκε από τον Medel-Jimenez (2022) η μείωση είναι κοντά στο 22%. Επιπλέον, οι Vizzari et al. (2019) εξοικονόμησαν έως 50% στην ποσότητα λιπάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

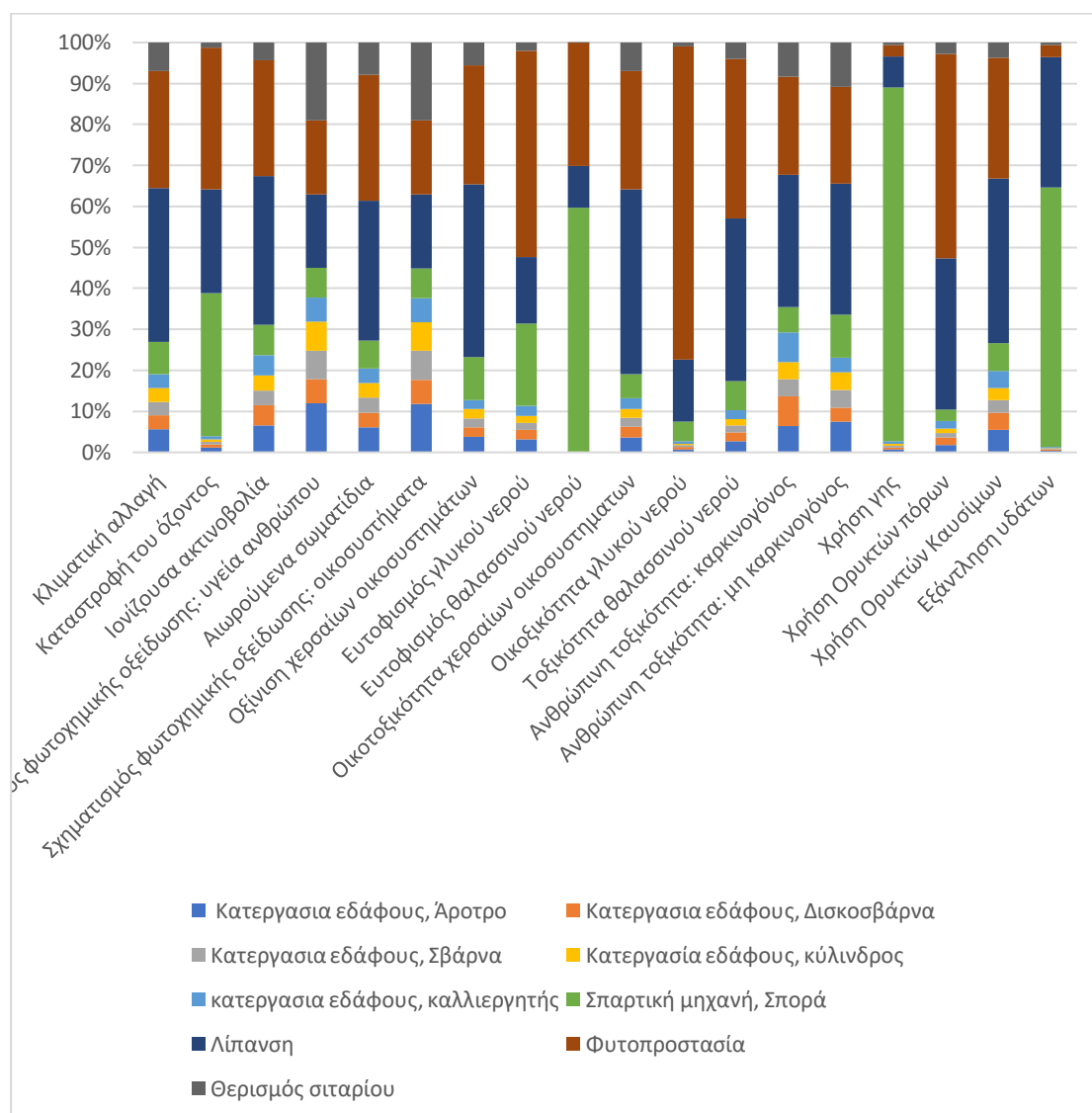
Στο εν λόγω κεφάλαιο αρχικά πραγματοποιείται η αξιολόγηση των κρίσιμων ευρημάτων αναφορικά με την εφαρμογή της παραδοσιακής καλλιέργειας σιταριού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συγκριτική ανάλυση αυτής της καλλιέργειας με τις δύο εναλλακτικές μεθόδους (με λίπανση ακρίβειας, χωρίς κατεργασία του εδάφους). Το κεφάλαιο καταλήγει με μια ανάλυση ευαισθησίας, η οποία αναλύει τον αντίκτυπο που έχουν οι διαφορετικές ποσότητες λιπασμάτων στα περιβαλλοντικά αποτελέσματα.

4.2 Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων ΑΚΖ παραδοσιακής καλλιέργειας σιταριού

Στην παρούσα μελέτη, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έγινε μέσω της μεθόδου ReCiPe 2016 midpoint (H) και endpoint (H), όπως περιγράφεται από τους Huijbregts et al. (2001) στο Κεφάλαιο 2.6. Δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις επιδράσεις που προκύπτουν από τις μεταβολές στη χρήση λιπασμάτων και τις πρακτικές φυτοπροστασίας. Μελετάται ειδικότερα πώς αυτές οι εκπομπές επηρεάζουν το περιβάλλον, περιλαμβάνοντας τον ευτροφισμό και την οξίνιση των χερσαίων και γλυκών υδάτων, όπως αναλύεται από τους De Vries et al. (2015). Επιπλέον, χρήση των παραπάνω σχετίζεται με τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων, όπως αναφέρεται από τους Erismann et al. (2013), την έκθεση σε τοξικές ουσίες (Erismann et al., 2007) και τη δημιουργία ατμοσφαιρικών σωματιδίων (Erismann et al., 2013). Σε παγκόσμιο επίπεδο, αυτές οι επιπτώσεις αντιπροσωπεύουν τη συμβολή τους στο φαινόμενο της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας, όπως καταγράφεται από τους Davidson et al. (2009), καθώς και στην εξάντληση του στρώματος του όζοντος, όπως αναφέρεται από τους Ravishankara et al. (2009). Ως εκ τούτου, παρά την παρουσίαση όλων των κατηγοριών επιπτώσεων, οι βασικές κατηγορίες επιπτώσεων που μελετώνται στη βιβλιογραφία, σχετικά με τη λίπανση και φυτοπροστασία, είναι η κλιματική αλλαγή, η δημιουργία μικροσωματιδίων, ο ευτροφισμός γλυκού νερού, η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων, η οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων, ο θαλάσσιος ευτροφισμός και η ανθρώπινη τοξικότητα μη καρκινογόνου τύπου.

4.2.1 Midpoint συμβατικής καλλιέργειας

Το διάγραμμα 4.1 έρχεται να συμπληρώσει τον πίνακα Π.Β1 και παρέχει μια εποπτική παρουσίαση των συνεισφορών των διάφορων γεωργικών διαδικασιών στις επιμέρους περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων στην καλλιέργεια σιταριού.



Διάγραμμα 4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού ανά κατηγορία επίπτωσης σε midpoint επίπεδο

Αναφορικά με την κλιματική αλλαγή, η λίπανση δείχνει τη μεγαλύτερη συμβολή με 38%, ενώ η φυτοπροστασία ακολουθεί με 29%. Η σπορά εμφανίζεται να συμβάλλει σημαντικά στην κατηγορία της εξάντλησης υδάτων με 63%, μια συνεισφορά που είναι συγκριτικά υψηλότερη από τη λίπανση που κατέχει ένα ποσοστό 32%. Στον τομέα της καταστροφής του όζοντος, η σπορά και η φυτοπροστασία είναι οι κυριότεροι συντελεστές με 35% η καθεμία. Για την ιονίζουσα ακτινοβολία, η λίπανση είναι η πλέον σημαντική δραστηριότητα με 36%, ενώ η φυτοπροστασία ακολουθεί με 28%. Όσον αφορά την οικοτοξικότητα γλυκού νερού, η φυτοπροστασία επιβαρύνει σημαντικά σε ποσοστό 76%, ενώ η λίπανση συμβάλλει με 15%.

Στις κατηγορίες, όπου οι συνεισφορές είναι πιο ισορροπημένες, όπως στο σχηματισμό φωτοχημικής οξειδωσης για την υγεία του ανθρώπου και τα οικοσυστήματα, και οι δύο διαδικασίες λίπανσης και φυτοπροστασίας εμφανίζουν παρόμοια ποσοστά, 18% καθεμία. Η χρήση γης είναι, επίσης, ένας τομέας, όπου η σπορά έχει την κυριότερη συμβολή σε ποσοστό 86%.

Ο θεραισμός, αν και είναι λιγότερο επιβαρυντικός στην πλειονότητα των κατηγοριών, δείχνει μια σημαντική συμβολή στην εξάντληση υδάτων και στον σχηματισμό φωτοχημικής οξειδωσης για την υγεία του ανθρώπου και τα οικοσυστήματα με ποσοστά 19%.

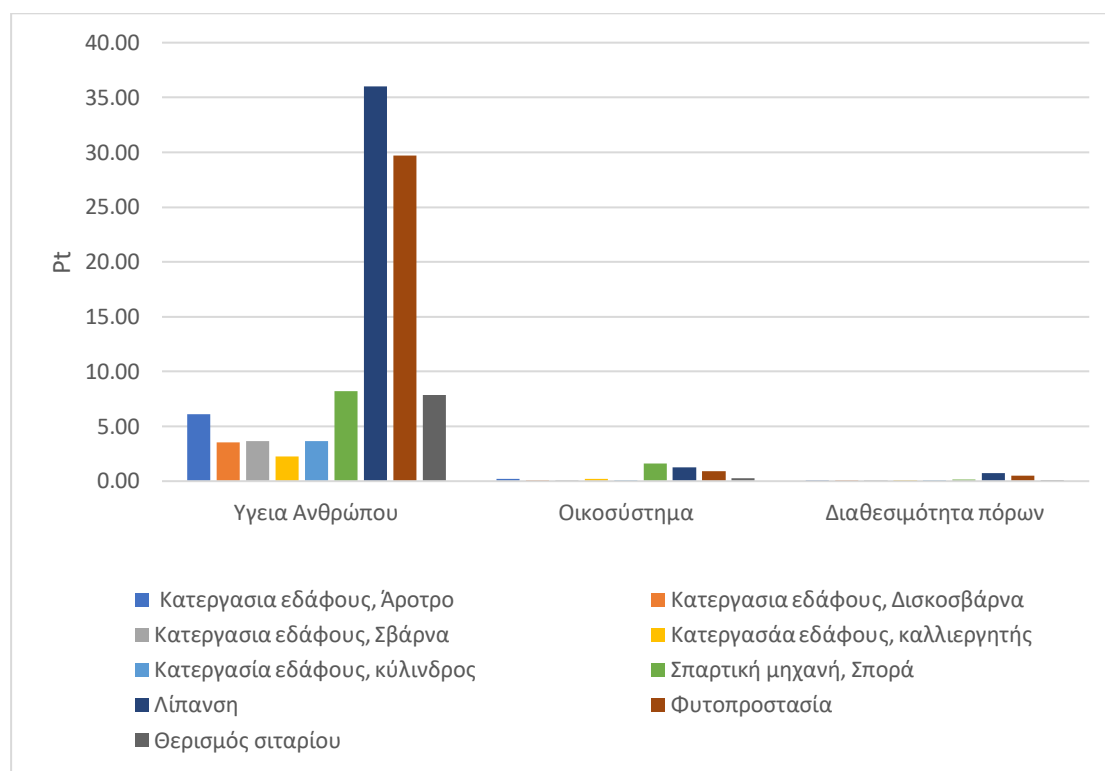
4.2.2 Endpoint συμβατικής καλλιέργειας

Στην εφαρμογή της μεθοδολογίας ReCiPe 2016 σε επίπεδο endpoint, αναδεικνύονται έντονες διακυμάνσεις στα σταθμισμένα αποτελέσματα, όταν εξετάζουμε τις επιδράσεις που επιφέρουν διάφορες γεωργικές διεργασίες σε τρία κρίσιμα συστατικά της βιωσιμότητας: την ανθρώπινη υγεία, την ακεραιότητα των οικοσυστημάτων και τη διαθεσιμότητα των πόρων.

Από την ανάλυση του διαγράμματος 4.2, διακρίνουμε μια έντονη διαφοροποίηση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των γεωργικών διεργασιών. Συγκεκριμένα, η λίπανση εμφανίζει την πλέον σημαντική επίδραση στην υγεία του ανθρώπου, καθώς και η φυτοπροστασία, ενώ οι άλλες διεργασίες εμφανίζουν συγκριτικά μικρότερο αντίκτυπο. Ωστόσο, αυτό δε μειώνει τη σημασία τους, καθώς κάθε διαδικασία συνεισφέρει στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της γεωργικής παραγωγής. Η εκτεταμένη χρήση χημικών εισροών αποτελεί αιτία ιδιαίτερης ανησυχίας για την ανθρώπινη υγεία, καθώς διαφαίνεται ότι έχει άμεση σχέση με αυξημένους κινδύνους. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα έρχονται σε σύμφωνία με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την έρευνά των Fotia, et al., (2021).

Στην κατηγορία του οικοσυστήματος, η σπορά εμφανίζει την υψηλότερη επιβάρυνση με τη λίπανση και τη φυτοπροστασία να ακολουθούν, αναδεικνύοντας την πίεση που ασκούν αυτές οι διεργασίες στα φυσικά συστήματα. Κυρίαρχος παράγοντας στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος ήταν η χρήση και η τροποποίηση της γεωργικής γης για την παραγωγή σπόρων σιταριού. Συγκεκριμένα, οι επιπτώσεις από τη χρήση της γης – όπως η καλλιέργεια με άροτρο – είναι υπεύθυνη για τη μείωση της διαθεσιμότητας των ενδαιτημάτων και την εξασθένηση της βιοποικιλότητας, με αποτέλεσμα την περαιτέρω υποβάθμιση των πληθυσμών άγριας ζωής (Brenttrup et al., 2004). Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα πόρων, η λίπανση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη

επίπτωση, ενώ η φυτοπροστασία έχει επίσης σημαντική επίπτωση. Αυτό αντικατοπτρίζει την υψηλή κατανάλωση πόρων για την παραγωγή και την εφαρμογή των λιπασμάτων και των προϊόντων φυτοπροστασίας.



Διάγραμμα 4.2 Σταθμισμένα αποτελέσματα της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού σε endpoint επίπεδο ανά δραστηριότητα στη συμβατική καλλιέργεια σιταριού

Αναλύοντας τα δεδομένα που παρέχονται στον πίνακα Π.Β 2 που αντανακλώνται στο διάγραμμα 4.3, μπορούμε να καταλήξουμε σε ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις σχετικά με τη συμβολή των διάφορων γεωργικών διαδικασιών στην περιβαλλοντική επίδραση της καλλιέργειας σιταριού.

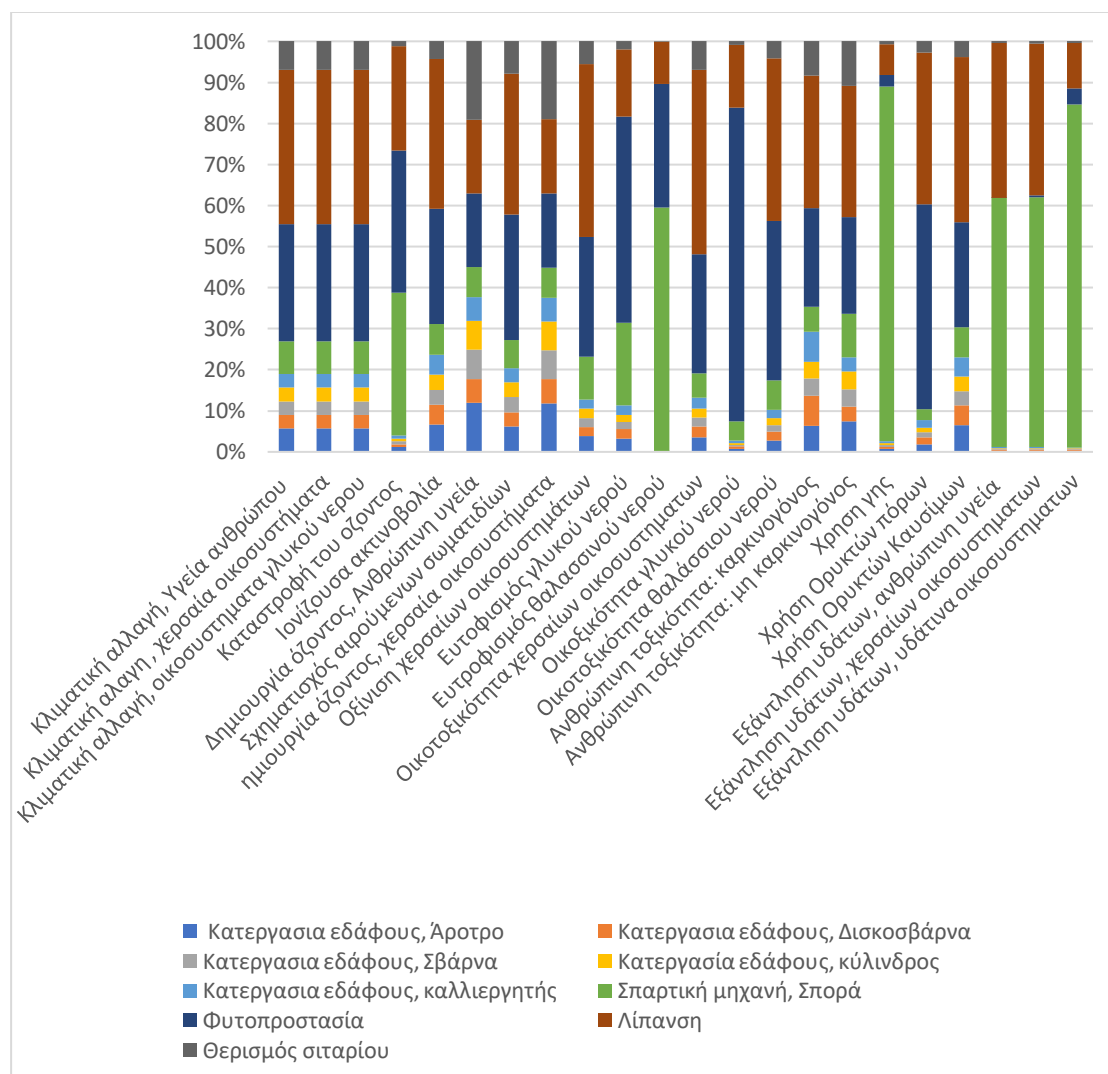
Αρχικά, η λίπανση παρουσιάζει την υψηλότερη συμβολή σε πολλές κρίσιμες κατηγορίες, κατέχοντας το 38% της συνολικής επίδρασης στην κλιματική αλλαγή για την υγεία του ανθρώπου, τα χερσαία και τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Η σπορά με τη σπαρτική μηχανή είναι ο κύριος παράγοντας που συνεισφέρει στην εξάντληση των υδάτων, με ένα εντυπωσιακό 61% για την ανθρώπινη υγεία και τα χερσαία οικοσυστήματα και 84% για τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Όσον αφορά την καταστροφή του όζοντος, η σπορά και η φυτοπροστασία έχουν ίση συμβολή (35%), ενώ η λίπανση παρουσιάζει λιγότερο ανησυχητική επίδραση (25%).

Αυτό δείχνει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη πιο βιώσιμων μεθόδων φυτοπροστασίας και σποράς.

Η φυτοπροστασία έχει σημαντική επίπτωση στην κατηγορία του ευτροφισμού του γλυκού νερού (50%) και στην οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (76%), υπογραμμίζοντας την ανάγκη για αυστηρότερη ρύθμιση και ελέγχους στη χρήση φυτοφαρμάκων για την προστασία των υδάτινων πόρων.



Διάγραμμα 4.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού σε "endpoint" επίπεδο της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού

4.3 Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σίτου

4.3.1 Midpoint διαφορετικών μεθόδων

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 4.1) παρέχει μια συγκριτική ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τριών διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σίτου:

συμβατική καλλιέργεια, καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους και καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας. Οι επιπτώσεις μετρούνται σε διάφορους δείκτες, όπως η κλιματική αλλαγή, η οικοτοξικότητα, η ανθρώπινη τοξικότητα, η χρήση γης και η χρήση ορυκτών καυσίμων. Στον δείκτη της κλιματικής αλλαγής, η συμβατική καλλιέργεια σημειώνει την υψηλότερη εκπομπή με 2172.59 kg CO₂ eq. Αντιθέτως, η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας έχει τη χαμηλότερη εκπομπή με 1699.84 kg CO₂ eq. Στον δείκτη της οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων, παρατηρείται πάλι ότι η συμβατική καλλιέργεια έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά (11564.19 kg 1,4-DCB), ενώ η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας έχει τη χαμηλότερη (9722.88 kg 1,4-DCB). Για την ανθρώπινη τοξικότητα (μη καρκινογόνος), η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή με 950.79 kg 1,4-DCB, ενώ η συμβατική καλλιέργεια έχει την υψηλότερη με 1271.33 kg 1,4-DCB. Στη χρήση γης, η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας καταλαμβάνει λιγότερη έκταση (578.66 m²a crop eq) σε σύγκριση με τη συμβατική καλλιέργεια (595.94 m²a crop eq). Τέλος, στη χρήση ορυκτών καυσίμων, η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση με 551.98 kg oil eq, ενώ η συμβατική καλλιέργεια έχει την υψηλότερη με 713.50 kg oil eq.

Συμπερασματικά, η καλλιέργεια σιταριού χωρίς κατεργασία εδάφους φαίνεται να παρουσιάζει συνολικά τη χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση σε όλους τους παραπάνω δείκτες, εκτός από τον δείκτη της ανθρώπινης τοξικότητας, όπου η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας φαίνεται να έχει χαμηλότερο αντίκτυπο.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η εφαρμογή λίπανσης ακριβείας στην καλλιέργεια του σιταριού αποτελεί μια προσέγγιση που συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Αυτή η μέθοδος προωθεί την ακριβή και στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων, οδηγώντας σε θετικές επιδράσεις σε διάφορους τομείς, όπως η μείωση της οικοτοξικότητας και η βελτιωμένη διαχείριση των ορυκτών πόρων. Μέσω της προσεκτικής αυτής διαχείρισης, η λίπανση ακριβείας αναδεικνύεται ως μια καινοτόμος και αποτελεσματική πρακτική στη γεωργία, προάγοντας μια βιώσιμη ανάπτυξη με ελαχιστοποιημένη περιβαλλοντική επίπτωση.

Αξιοσημείωτη είναι η πολύ μικρή διαφορά στην κατηγορία της καταστροφής του όζοντος μεταξύ των τριών μεθόδων καλλιέργειας, υποδεικνύοντας ότι αυτός ο δείκτης δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις εν λόγω αλλαγές στις γεωργικές πρακτικές. Επίσης, όλες οι μέθοδοι δείχνουν παρόμοιες τιμές στην κατηγορία της ιονίζουσας ακτινοβολίας, με τη συμβατική καλλιέργεια να παρουσιάζει την υψηλότερη επίδραση και την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους τη χαμηλότερη.

Όσον αφορά τον ευτροφισμό τόσο του γλυκού όσο και του θαλάσσιου νερού, η καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους εμφανίζει τα χαμηλότερα επίπεδα, δείχνοντας ότι μπορεί να μειώσει την απορροή θρεπτικών ουσιών σε υδάτινα συστήματα. Η λίπανση ακριβείας έχει παρόμοιες τιμές με την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία, υποδηλώνοντας ότι η εκλεπτυσμένη διαχείριση των λιπασμάτων μπορεί να μειώσει την απορροή σε σύγκριση με τη συμβατική καλλιέργεια.

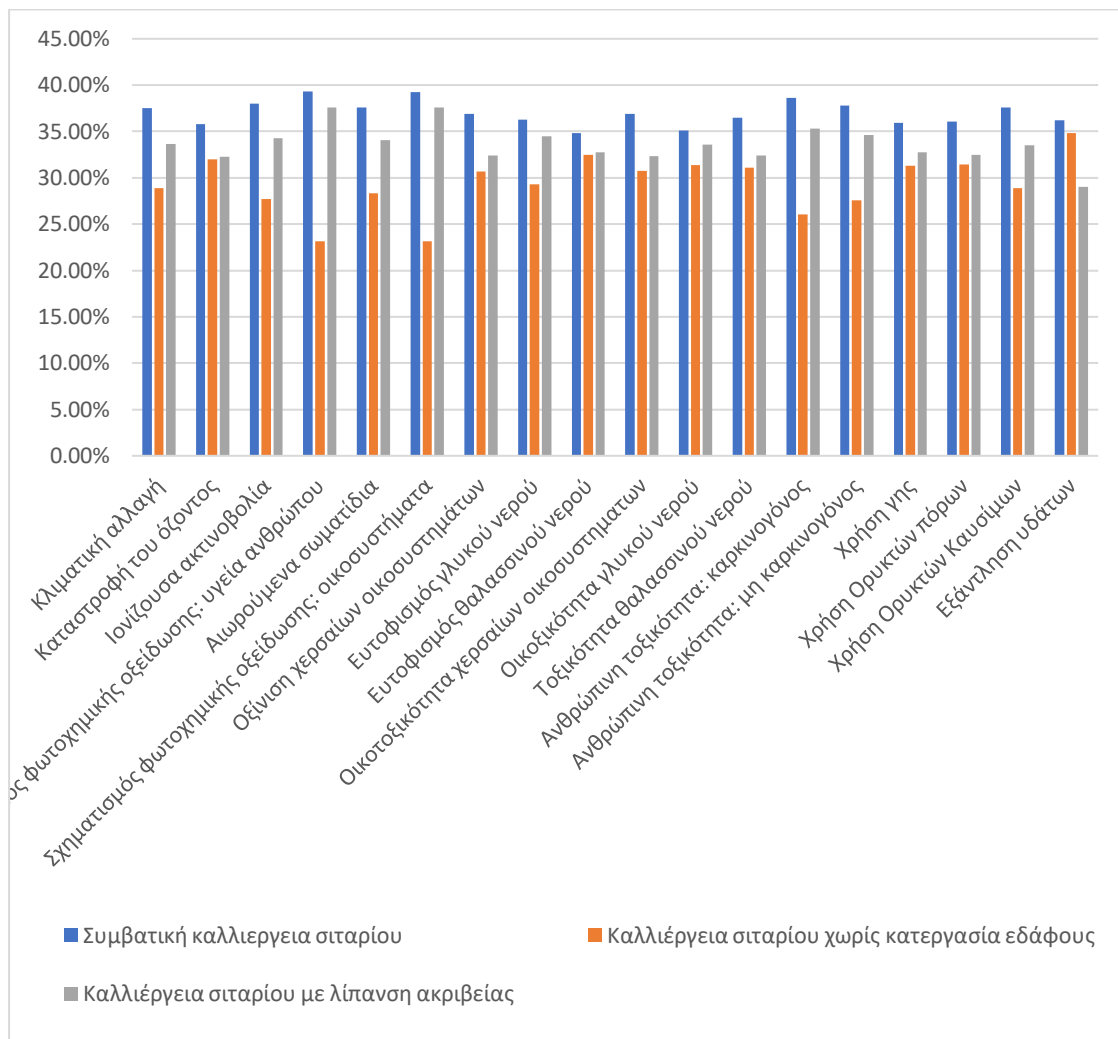
Στην κατηγορία της χρήσης γης, παρατηρείται μια μείωση στις τιμές για τις μεθόδους καλλιέργειας χωρίς κατεργασία και με λίπανση ακριβείας, συγκριτικά με τη συμβατική καλλιέργεια.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού των τριών διαφορετικών διεργασιών καλλιέργειας σιταριού σε midpoint επίπεδο με τη μέθοδο ReCiPe 2016

Κατηγορία επίπτωσης	Μονάδες	Συμβατική καλλιέργεια σιταριού	Καλλιέργεια σιταριού με λίπανση ακριβείας	Καλλιέργεια σιταριού χωρίς κατεργασία εδάφους
Κλιματική αλλαγή	kg CO ₂ eq	2172,5905	1959,6883	1699,8424
Καταστροφή του όζοντος	kg CFC11 eq	0,005819275	0,005424391	0,005393731
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	12,913019	11,695457	9,523263
Σχηματισμός φωτοχημικής οξείδωσης: υγεία ανθρώπου	kg NO _x eq	9,7689327	9,3655565	5,9217367
Αιωρούμενα σωματίδια	kg PM2.5 eq	5,7495211	5,2367637	4,4064918
Σχηματισμός φωτοχημικής οξείδωσης: οικοσυστήματα	kg NO _x eq	9,9607217	9,5473597	6,0496769
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	16,249185	14,436482	13,721623
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	0,44589447	0,42713554	0,3739772
Ευτροφισμός θαλασσινού νερού	kg N eq	0,60224394	0,58561718	0,58365168
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	11564,187	10186,95	9722,879
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	13,460599	12,914272	12,08576
Τοξικότητα θαλασσινού νερού	kg 1,4-DCB	13,167004	11,781074	11,322726

Ανθρώπινη τοξικότητα: καρκινογόνος	kg 1,4-DCB	37,66673	34,504448	25,824671
Ανθρώπινη τοξικότητα: μη καρκινογόνος	kg 1,4-DCB	1271,3347	1172,2683	950,79079
Χρήση γης	m ² a crop eq	595,9406	584,02563	578,66469
Χρήση Ορυκτών πόρων	kg Cu eq	36,354428	32,76887	31,797408
Χρήση Ορυκτών Καυσίμων	kg oil eq	713,50324	638,42699	551,98049
Εξάντληση υδάτων	m ³	59,716895	54,592234	58,75276

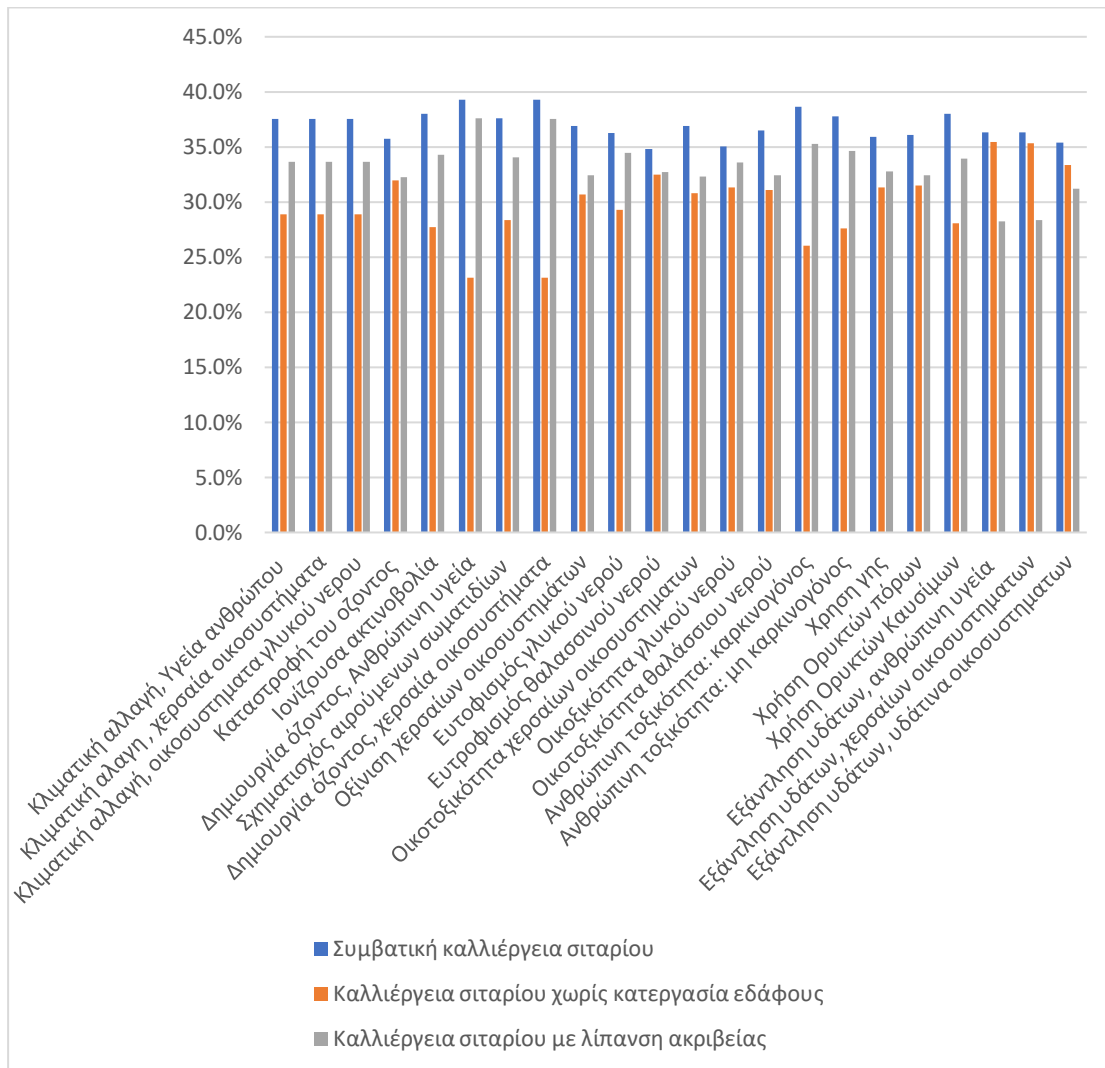
Το παρακάτω διάγραμμα 4.4 παρουσιάζει μια οπτική σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τρεις διαφορετικές μεθόδους καλλιέργειας σιταριού. Συνολικά, το διάγραμμα υπογραμμίζει τη σημαντικότητα της επιλογής μεθόδων καλλιέργειας που μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η καλλιέργεια σιταριού χωρίς κατεργασία εδάφους φαίνεται να προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική σε σχέση με τις πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις, όπως επισημαίνεται από τις συνεπώς χαμηλότερες μπάρες στο διάγραμμα. Προσθέτοντας στην ανάλυση, το διάγραμμα αυτό υποδεικνύει, επίσης, ότι οι καινοτόμες πρακτικές, όπως η λίπανση ακριβείας, παρόλο που δεν επιτυγχάνουν το ίδιο χαμηλό επίπεδο επιπτώσεων με την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία, προσφέρουν μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τη συμβατική καλλιέργεια. Αυτό υπογραμμίζει την αξία της ενσωμάτωσης τεχνολογικών καινοτομιών στη γεωργία που στοχεύουν στη βέλτιστη διαχείριση των πόρων και στη μείωση της χρήσης εισροών που συμβάλλουν σε περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.



Διάγραμμα 4.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις χαρακτηρισμού σε midpoint επίπεδο αναφορικά με τις τρεις μεθόδους καλλιέργειας σιταριού

4.3.2 Endpoint διαφορετικών μεθόδων

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν στο τελικό επίπεδο της ReCiPe 2016 αναφορικά με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους καλλιέργειας σιταριού. Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, φαίνεται ότι η καλλιέργεια σιταριού με λίπανση ακριβείας συχνά έχει μεσαίες επιδράσεις μεταξύ των άλλων δύο μεθόδων, με εξαίρεση την εξάντληση υδάτων, όπου έχει τη χαμηλότερη επίδραση. Η συμβατική καλλιέργεια φαίνεται να έχει συνήθως την υψηλότερη επίδραση, ενώ η καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους έχει τη χαμηλότερη επίδραση στην πλειοψηφία των κατηγοριών. Περισσότερα δεδομένα παρουσιάζονται στον Π. Β2 στο παράρτημα.

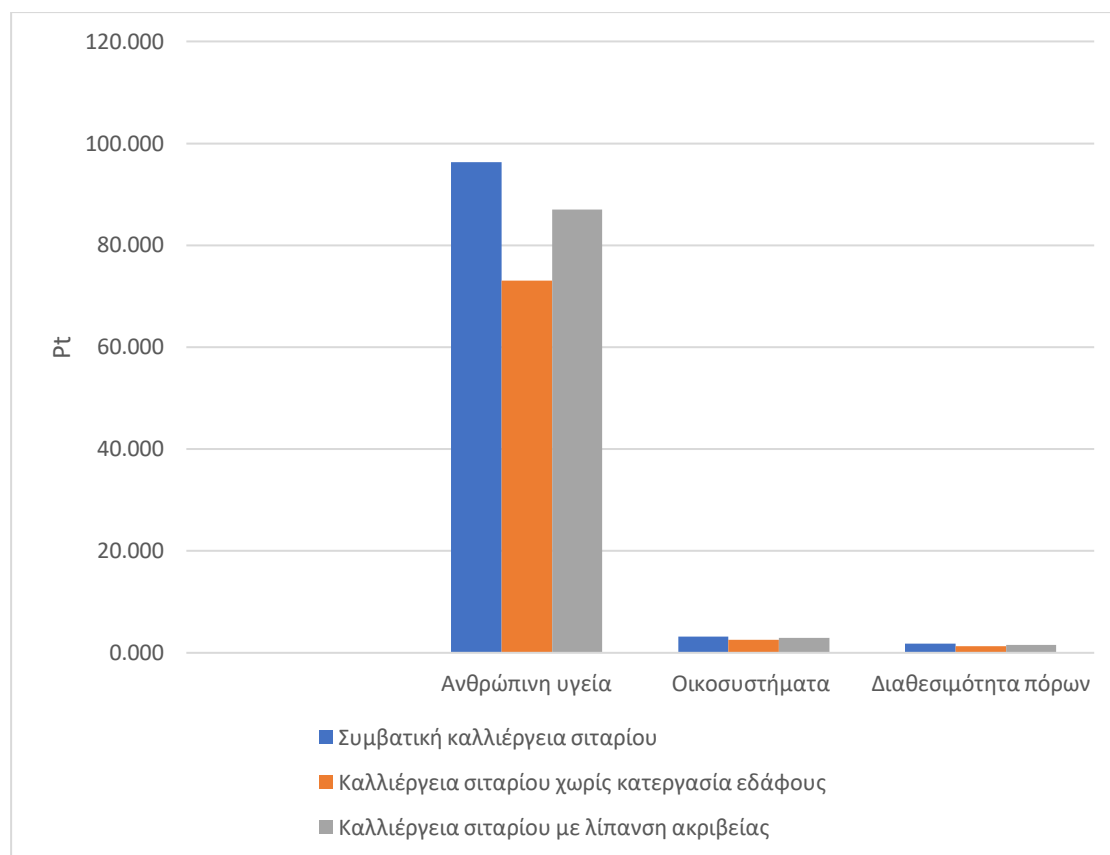


Διάγραμμα 4.5 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού σε endpoint επίπεδο αναφορικά με τη σύγκριση των τριών διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας

Το διάγραμμα που ακολουθεί είναι μια οπτική παρουσίαση των επιπτώσεων που έχουν οι τρεις διαφορετικές μέθοδοι καλλιέργειας σιταριού στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στη διαθεσιμότητα πόρων.

Από τα σταθμισμένα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, διακρίνουμε ότι η καλλιέργεια σιταριού χωρίς κατεργασία εδάφους δείχνει τη μικρότερη συνολική επίδραση στις τρεις κατηγορίες σύγκρισης. Αυτό υποδηλώνει ότι αυτή η μέθοδος

ενδέχεται να είναι πιο βιώσιμη και λιγότερο επιβαρυντική σε σχέση με τη συμβατική καλλιέργεια και εκείνη με λίπανση ακριβείας.



Διάγραμμα 4.6 Σύγκριση των σταθμισμένων αποτελεσμάτων των τριών διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σε endpoint επίπεδο

4.3.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Ο πίνακας 4.2 και το γράφημα 4.7 παρουσιάζουν τα δεδομένα της ανάλυσης ευαισθησίας στο πλαίσιο της μεθόδου ReCiPe 2016 σε επίπεδο midpoint. Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας εξετάζεται ο αντίκτυπος της μειωμένης χρήσης λιπασμάτων σε διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικής επίπτωσης σε σύγκριση πάντα με τη συμβατική λίπανση και τα πρωτογενή δεδομένα που έχουν ληφθεί από τον γεωργό.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας σε διαφορετικές ποσότητες λιπάσματος.

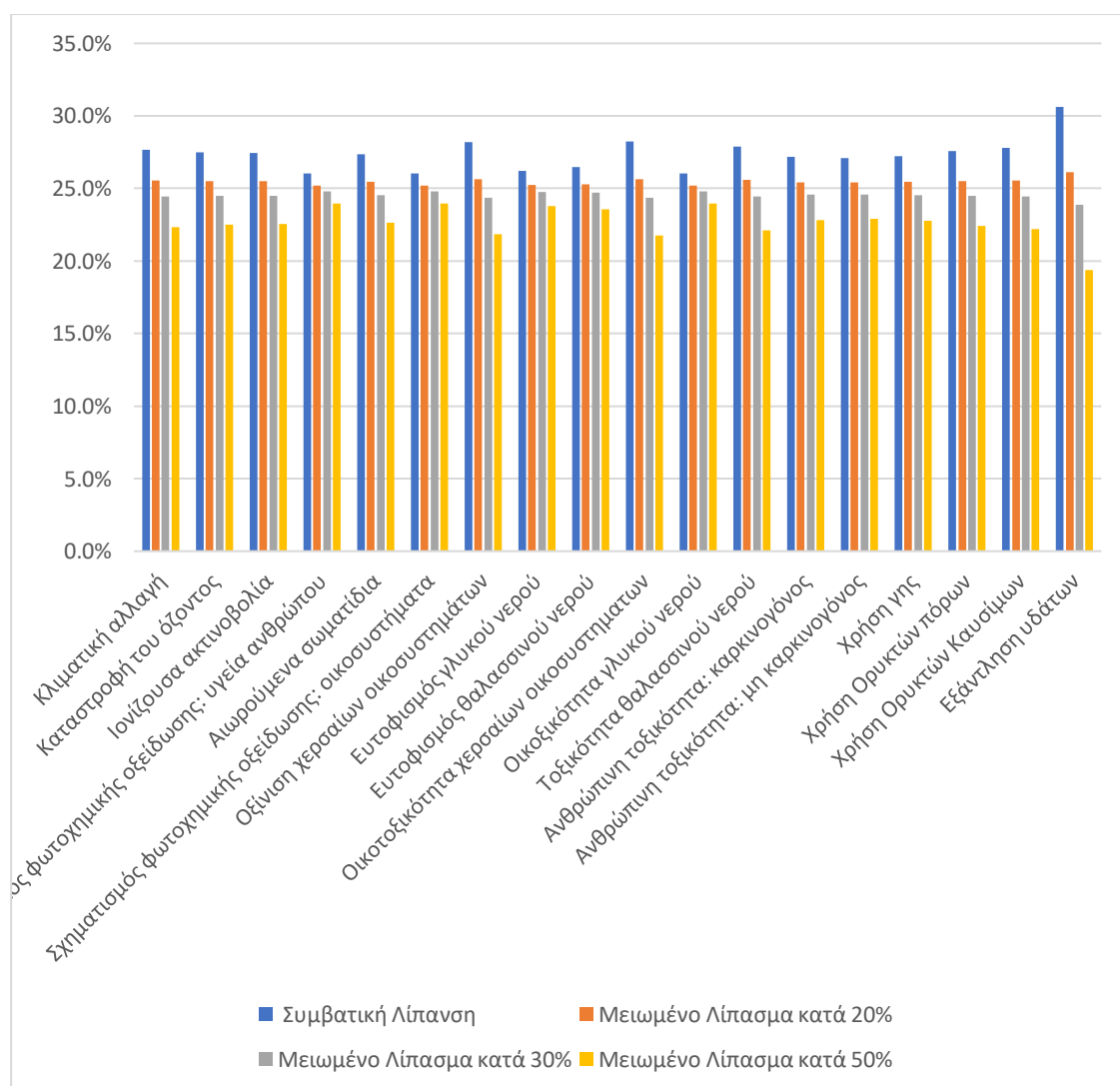
Κατηγορία επίπτωσης	Μονάδες	Συμβατική Λίπανση	Μειωμένο Λίπασμα κατά 20%	Μειωμένο Λίπασμα κατά 30%	Μειωμένο Λίπασμα κατά 50%

Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	2172	2014	1936	1778
Καταστροφή του όζοντος	kg CFC11 eq	0.005819	0.005527	0.005381	0.005088
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	12.91302	12.01129	11.56043	10.6587
Σχηματισμός φωτοχημικής οξείδωσης: υγεία ανθρώπου	kg NOx eq	9.768933	9.470192	9.320821	9.02208
Αιωρούμενα σωματίδια	kg PM2.5 eq	5.749521	5.369772	5.179898	4.800149
Σχηματισμός φωτοχημικής οξείδωσης: οικοσυστήματα	kg NOx eq	9.960722	9.654585	9.501517	9.19538
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	16.24919	14.9067	14.23545	12.89296
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	0.445894	0.432001	0.425055	0.411161
Ευτροφισμός θαλασσινού νερού	kg N eq	0.602244	0.589931	0.583774	0.571461
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	11564.19	10544.21	10034.22	9014.247
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1.4-DCB	13.4606	13.05599	12.85369	12.44909
Τοξικότητα θαλασσινού νερού	kg 1.4-DCB	13.167	12.14059	11.62738	10.60096
Ανθρώπινη τοξικότητα: καρκινογόνος	kg 1.4-DCB	37.66673	35.32476	34.15377	31.8118
Ανθρώπινη τοξικότητα: μη καρκινογόνος	kg 1.4-DCB	1271.335	1197.966	1161.281	1087.913
Χρήση γης	m2a crop eq	595.9406	587.1163	582.7042	573.8799
Χρήση Ορυκτών πόρων	kg Cu eq	36.35443	33.69893	32.37119	29.71569
Χρήση Ορυκτών Καυσίμων	kg oil eq	713.5032	657.9021	630.1016	574.5005
Εξάντληση υδάτων	m3	59.7169	55.92162	54.02398	50.2287

Στον πίνακα αυτόν αποκαλύπτεται μια τάση μείωσης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, καθώς μειώνεται η ποσότητα του λιπάσματος που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, οι εκπομπές CO2 eq μειώνονται σημαντικά, καθώς το λίπασμα μειώνεται

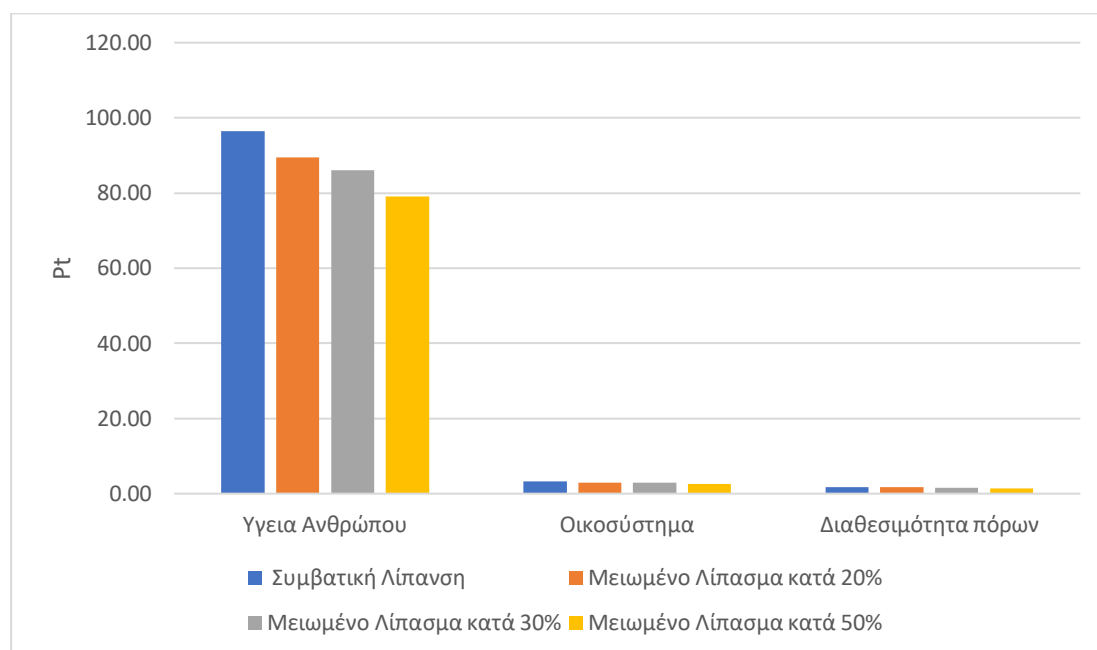
κατά 50%. Ανάλογες μειώσεις παρατηρούνται και σε άλλες κατηγορίες, όπως η καταστροφή του όζοντος, η ιονίζουσα ακτινοβολία και η τοξικότητα για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα. Επιπλέον, η μείωση της χρήσης λιπάσματος συνδέεται με τη μείωση της χρήσης γης και την εξάντληση των υδάτων, ενισχύοντας το επιχείρημα για μετάβαση σε πιο βιώσιμες αγροτικές πρακτικές.

Συνοπτικά, τα δεδομένα υποδεικνύουν ένα μοτίβο, όπως αναφέρεται και στο Διάγραμμα 4.7: η μείωση της χρήσης λιπασμάτων οδηγεί σε μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου σε πολλαπλές κατηγορίες. Αυτό τονίζει την αξία της υιοθέτησης πιο βιώσιμων πρακτικών στη γεωργία, που θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ισορροπούνται αυτά τα οφέλη με τις ανάγκες της γεωργικής παραγωγής και της οικονομικής βιωσιμότητας.



Διάγραμμα 4.7 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού midpoint επιπέδου της ανάλυσης εναισθησίας σε διαφορετικές ποσότητες λιπάσματος.

Το διάγραμμα 4.8 παρουσιάζει τις επιπτώσεις της συμβατικής λίπανσης σε σύγκριση με τρία σενάρια μειωμένης λίπανσης (κατά 20%, 30% και 50%) στην υγεία του ανθρώπου, το οικοσύστημα και τη διαθεσιμότητα πόρων. Η ανάλυση αποκαλύπτει ότι όσο περισσότερο μειώνεται η χρήση λιπάσματος, τόσο περιορίζονται και οι επιδράσεις σε όλες τις τρεις κατηγορίες. Αυτό υποδηλώνει ότι μια μειωμένη χρήση λιπάσματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένες συνθήκες υγείας για τους ανθρώπους, λιγότερο αντίκτυπο στα οικοσυστήματα και καλύτερη διαχείριση των φυσικών πόρων.



Διάγραμμα 4.8 Σταθμισμένα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σε endpoint επίπεδο.

4.4 Συζήτηση και σύγκριση αποτελεσμάτων με προηγούμενες μελέτες

Όπως αναδεικνύεται σε αυτό το κεφάλαιο, η χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η εφαρμογή λιπασμάτων επηρεάζει άμεσα το περιβάλλον, τόσο μέσω της παραγωγής τους πριν τη χρήση στην καλλιέργεια, όσο και κατά τη μεταφορά τους, αν και σε μικρότερο βαθμό. Η παραγωγή λιπασμάτων συνεπάγεται τη χρήση ορυκτών ενεργειακών πόρων και προκαλεί την εκπομπή ενώσεων αζώτου στο περιβάλλον, συμβάλλοντας έτσι σε πολλαπλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά την ανάγκη για αβιοτικούς πόρους και στους δείκτες που σχετίζονται με τοξικότητα. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και μονοξειδίου του αζώτου (NO) από την καύση ορυκτών καυσίμων κατά την παραγωγή λιπασμάτων, όπως στις διαδικασίες παραγωγής αμμωνίας και νιτρικού οξέος, έχουν, επίσης, έντονο αντίκτυπο στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στους δείκτες τοξικότητας, η παραγωγή και η μεταφορά φυτοφαρμάκων

είναι, επίσης, σημαντική. Η εκτενής ανάγκη για ορυκτά καύσιμα στην παραγωγή τόσο των λιπασμάτων όσο και των φυτοφαρμάκων είναι μια παρατήρηση που επιβεβαιώνεται από την έρευνα των Zappe et al., (2020), η οποία υποδεικνύει ότι το 1,3-1,8% της παγκόσμιας κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων αφιερώνεται στην παραγωγή λιπασμάτων.

Στη διαδικασία της καλλιέργειας, η σπορά είναι, επίσης, ένας κρίσιμος παράγοντας, καθώς η παραγωγή των σπόρων αποτελεί μια σημαντικά επιβαρυντική διαδικασία. Ο σπόρος που παράγεται στο αγρόκτημα ακολουθεί μια σειρά διαδικασιών πριν την τελική του χρήση. Αρχικά, μεταφέρεται σε ένα κέντρο επεξεργασίας, όπου υποβάλλεται σε διάφορες επεξεργασίες, όπως προ-καθαρισμό, καθαρισμό, ενδεχόμενη ξήρανση και χημική επεξεργασία (στην περίπτωση της ολοκληρωμένης παραγωγής). Στη συνέχεια, ο σπόρος συσκευάζεται σε σάκους, αποθηκεύεται και τελικά μεταφέρεται στο περιφερειακό κέντρο αποθήκευσης. Κάθε ένα από αυτά τα στάδια απαιτεί πόρους και έχει τις δικές του περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συνεισφέροντας στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της καλλιέργειας (Bernas, et al., 2021).

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι η εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων αλλά και χημικών για τη φυτοπροστασία προκαλούν σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση (Kumar, et al., 2021). Οι ίδιοι αναφέρουν στην έρευνά τους ότι τα αζωτούχα λιπάσματα, επίσης, μπορούν να μετατραπούν σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O), ένα αέριο που συνεισφέρει στην κλιματική αλλαγή και έχει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 265 φορές υψηλότερο από το CO_2 . Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης, διεργασίες που συμβαίνουν μέσω μικροβιακής δράσης στο έδαφος και μετατρέπουν την αμμωνία (NH_3) σε νιτρικό άλας (NO_3^-) και στη συνέχεια σε N_2 .

Η λίπανση και οι συνέπειές της στα υδάτινα οικοσυστήματα μπορούν να αναλυθούν μέσα από την ποιότητα και τη σύνθεση των παραγόμενων λιπασμάτων. Τα στοιχεία άζωτο και φώσφορος, που αποτελούν τις βάσεις για την παραγωγή των νιτρικών και σύνθετων λιπασμάτων, είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη των φυτών. Ωστόσο, οι ίδιοι αυτοί παράγοντες μπορούν να παίξουν έναν κρίσιμο ρόλο στην επιδείνωση του φαινομένου του ευτροφισμού στα υδατικά συστήματα.

Επιπλέον, με τη χρήση λιπασμάτων προκαλούνται επιπτώσεις στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα συμβάλλοντας στον σχηματισμό λεπτών σωματιδίων, μέσω της παραγωγής και εκπομπής διαφόρων αερίων. Ο σχηματισμός των λεπτών σωματιδίων προκαλείται από οξείδια του αζώτου (NO_x) και αμμωνία (NH_3), που παράγονται από τη διάσπαση και τη μετατροπή των λιπασμάτων στο έδαφος. Αυτά τα σωματίδια

επιηρεάζουν την ποιότητα του αέρα, με επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στην ορατότητα.

Σύμφωνα με τους Vatsanidou et al., (2020) η παραγωγή και η συντήρηση των γεωργικών μηχανημάτων, καθώς και όλου του σχετικού εξοπλισμού που απαιτείται στη γεωργία, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες στο σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι ίδιοι στην έρευνά τους αναφέρουν πως τη μεγαλύτερη επίπτωση στην κατηγορία της χρήση γης είχε η διεργασία της σποράς που έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της δικής μας έρευνας.

Η χρήση χημικών για φυτοπροστασία αναδεικνύεται ως πηγή σοβαρών μακροπρόθεσμων επιπτώσεων τόσο στην υγεία του ανθρώπου όσο και στο περιβάλλον, επιηρεάζοντας επίσης την τροφική αλυσίδα (Blengini et al., 2009). Μία από τις κύριες ανησυχίες αφορά τη μεταφορά των φυτοφαρμάκων προς τα επιφανειακά ύδατα μετά την εφαρμογή τους στα καλλιεργήσιμα εδάφη. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε μέσω απορροής είτε μέσω διήθησης, με αποτέλεσμα τα φυτοφάρμακα να φθάνουν στα ύδατα από τα οποία εξάγεται το πόσιμο νερό. Εκτός από την απειλή που συνιστούν για τα υδάτινα οικοσυστήματα, τα φυτοφάρμακα μπορούν να έχουν επίσης αρνητικές συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία (Blengini et al., 2009).

Η έρευνα των Darzi-Naftchali et al., (2022) επιβεβαιώνει ότι η χρήση ορυκτών καυσίμων έχει σημαντική συμβολή στις επιπτώσεις ιονίζουσας ακτινοβολίας, ενώ παρόμοια ευρήματα προέκυψαν και από τη δική μας έρευνα καθώς απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή των λιπασμάτων και των χημικών για την προστασία των φυτών. Συγκεκριμένα, μηχανήματα που κινούνται με ορυκτά καύσιμα συνεισφέρουν σημαντικά στην υποβάθμιση της στιβάδας του όζοντος. Από την έρευνά μας προκύπτει επίσης η σημαντική επιβάρυνση της διεργασίας σποράς σε αυτή την κατηγορία επιπτώσεων, κυρίως λόγω της απαιτούμενης κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων για τη μεταφορά και δημιουργία των σπόρων. Επιπρόσθετα, τα ζιζανιοκτόνα διακρίνονται για την υψηλή καταστροφική τους δράση, όπου και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για τους υδάτινους πόρους και για την εξάντληση του όζοντος, όπως επισημαίνεται και στην έρευνα των Sumon et al. (2018).

Οι Saber et al. (2020) αναφέρουν στην έρευνά τους ότι οξίνιση του περιβάλλοντος είναι ένα φαινόμενο που συνδέεται κυρίως με τις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2), αμμωνίας (NH_3), και διοξειδίου του αζώτου (NO_2) στην ατμόσφαιρα ή στο έδαφος. Η εφαρμογή λιπασμάτων και χημικών φυτοφαρμάκων συνδέεται άμεσα με την αύξηση της τοξικότητας στο έδαφος, το οποίο λειτουργεί ως κύριος αποδέκτης και αποθήκη των ρύπων, λόγω της προσρόφησης των σωματιδίων στην επιφάνειά του. Η διαδικασία

αυτή οδηγεί στην έκπλυση ρύπων και τοξικών συστατικών προς τα υπόγεια νερά, αυξάνοντας τη ρύπανση των υδάτινων πόρων. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα συνάδουν πλήρως με τα δικά μας αποτελέσματα, τα οποία επιβεβαιώνουν ότι οι διαδικασίες λίπανσης και φυτοπροστασίας παρουσιάζουν τις πιο σημαντικές επιπτώσεις στις συγκεκριμένες κατηγορίες επίπτωσης .

Σύμφωνα με την έρευνα των Darzi-Naftchali (2022), τα φωσφορούχα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα αποτελούν τις κυριότερες πηγές που συνεισφέρουν στον ευτροφισμό. Επιπλέον, η εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιδείνωση του ευτροφισμού των υδάτινων. Επιπροσθέτως, αναφέρουν πως ο φωσφόρος είναι το σημαντικότερο στοιχείο για την εντατικοποίηση του ευτροφισμού.

Διάφορες μελέτες έχουν καταγράψει παρόμοιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, οι Biswas et al. (2010) διεξήγαγαν μια μελέτη AKZ στη Βικτόρια της Αυστραλίας, επικεντρώνοντας στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με την καλλιέργεια σίτου. Διαπίστωσαν ότι περίπου το 46% των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων προέρχονταν από τη χρήση και την εφαρμογή λιπασμάτων. Ομοίως, οι Wang et al. (2014) εξέτασαν την περιβαλλοντική επίδραση των συστημάτων εναλλαγής καλλιεργειών σίτου-καλαμποκιού στην περιοχή Quzhou της Βόρειας Κίνας και διαπίστωσαν ότι η χρήση λιπασμάτων και γεωργικών μηχανημάτων συνέβαλε περισσότερο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η μελέτη πρότεινε ότι η μειωμένη περιβαλλοντική επίπτωση θα μπορούσε να επιτευχθεί με μειωμένους ρυθμούς χημικών και πιο αποδοτική χρήση των γεωργικών μηχανημάτων. Όλες αυτές οι μελέτες έχουν εντοπίσει ότι η λίπανση και οι εκπομπές που προκαλούνται από τη χρήση είναι σημεία περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε αυτές τις διαδικασίες για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών προφίλ των συστημάτων καλλιέργειας. Η βιβλιογραφία προτείνει διάφορες λύσεις για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Για παράδειγμα, οι Gonzalez-García et al. (2013) αξιολόγησαν διάφορα σενάρια βασισμένα σε εναλλακτικά λιπάσματα με χαμηλούς ρυθμούς εξάτμισης, καθώς και οργανικά λιπάσματα, ενώ οι Bacenetti et al. (2014) πρότειναν την ανάπτυξη ειδικών μοντέλων για την εκτίμηση των εκπομπών αζώτου αντί της χρήσης συντελεστών εκπομπών που έχουν καθιερωθεί από τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, άλλες μελέτες έχουν καταδείξει πως χαμηλότερες ποσότητες λιπασμάτων συνδέονται με μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, η μελέτη των Todorović et al. (2018) έδειξε ότι οι τακτικές διαχείρισης με υψηλότερα επίπεδα εφαρμογής λιπάσματος είχαν αυξημένες

επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, την εξάντληση του όζοντος και την ανθρώπινη τοξικότητα. Αντιθέτως, η μελέτη των Medel-Jiménez et al (2022) κατέδειξε σημαντικότερες αλλαγές στις επιπτώσεις της μη καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας. Σύμφωνα με τους Brentrup et al. (2004), υψηλότεροι ρυθμοί εφαρμογής αζώτου συνδέονταν με αύξηση του ευτροφισμού και αποτελούσε τον πιο σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα. Σε άλλη μελέτη, οι Nilsson et al. (2020) έδειξαν ότι η κλιματική επίδραση ήταν ελαφρώς χαμηλότερη με μικρότερη χρήση λιπάσματος, 1200 kg CO₂eq/ha με εφαρμογή 200 kg N/ha έναντι 1170 kg CO₂eq/ha με 140 kg N/ha.

Σύμφωνα με την έρευνα των Yadav et al (2021), ο γεωργικός τομέας μπορεί να συνεισφέρει στον μετριασμό των εκπομπών GHG με τη μείωση των εκπομπών N₂O κατά 10%. Η μείωση των δόσεων λίπανσης με N είναι μια από τις στρατηγικές μετριασμού που προτείνεται για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή σιτηρών. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας.

Επιπλέον, αναφορικά με τη σύγκριση της συμβατικής καλλιέργειας με την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους τα αποτελέσματά μας έρχονται σε συμφωνία με την έρευνα των De Vita et al. (2007). Αναφέρουν ότι οι συνολικές εκπομπές που αφορούν την κλιματική αλλαγή επηρεάζονται από το σύστημα άροσης, διαφέρουν σημαντικά (1172.8 kg CO₂ ανά εκτάριο) στη συμβατική καλλιέργεια και των αποτελεσμάτων που βρέθηκαν στην καλλιέργεια χωρίς άροση με 829.9 kg CO₂ ανά εκτάριο. Ακόμη, έχουν εντοπίσει τους πιθανούς λόγους για την καλύτερη απόδοση υπό την πρακτική της μη άροσης να οφείλεται στη βελτιωμένη κατάσταση του εδάφους, ειδικά στην ικανότητα διατήρησης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Ο ρόλος της μη-κατεργασίας στη μείωση των εκπομπών αναφορικά με την κλιματική αλλαγή έχει αποδειχθεί από τον Frye (1984), ο οποίος αναφέρει ότι η μετάβαση από την άροση σε μη-κατεργασία θα μπορούσε να εξοικονομήσει περίπου 20 kg C ανά εκτάριο τον χρόνο.

Επιπλέον αναφορικά με την επίδραση των λιπασμάτων στην κλιματική αλλαγή, οι Khakbazan et al. (2009) αναφέρουν ότι όσο αυξάνεται η ποσότητα και ο ρυθμός χρήσης των λιπασμάτων τόσο αυξάνονται και οι συνολικές επιπτώσεις του CO₂, όπου έρχεται σε συμφωνία με τη δική μας έρευνα.

Στην έρευνά τους, οι Holka και Bieńkowski (2020) κατέδειξαν ότι η αυξημένη χρήση λιπασμάτων συνεπάγεται σημαντική αύξηση στις εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγή σιταριού. Παράλληλα, οι ίδιοι ερευνητές επισημαίνουν ότι συγκρίνοντας τη συμβατική καλλιέργεια με την καλλιέργεια σιταριού χωρίς κατεργασία του εδάφους, η τελευταία παρουσιάζει πιο θετικά αποτελέσματα ως

προς τις επιδράσεις στην κλιματική αλλαγή, γεγονός που συμφωνεί με τα δικά μας ευρήματα. Περαιτέρω, η έρευνά τους με τα όρια του συστήματος να αναφέρονται από το στάδιο της παραγωγής έως το αγρόκτημα, για την παραγωγή σιταριού, έδειξε ότι το 72% των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου προέρχεται από τη διαδικασία της λίπανσης, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τη δική μας έρευνα, όπως παρατηρείται στον Πίνακα Π. Β.1.

Επιπλέον, όπως αναφέρουν οι Balafoutis, et al. (2017) στην έρευνά τους, η διαδικασία παραγωγής λιπασμάτων συνεισφέρει σημαντικά στα GHG, αποτέλεσμα το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας. Η παραγωγή αζωτούχων λιπασμάτων συνεπάγεται με τη σύνθεση αμμωνίας, κατά την οποία παράγεται CO₂ από τη χρήση ορυκτών πηγών ενέργειας, όπως κυρίως το φυσικό αέριο, τόσο ως πρώτη ύλη όσο και ως καύσιμο.

Τέλος οι Todorović, et al. (2018) αναφέρουν στην έρευνά τους ότι η παραγωγή και η μεταφορά σπόρων στην πύλη του αγροκτήματος ήταν υπεύθυνες για ένα αξιοσημείωτο μερίδιο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα συστήματα παραγωγής σιταριού, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τη δική μας έρευνα. Επιπλέον, σε περιπτώσεις καλλιέργειας με λίπανση, οι επιδράσεις από την παραγωγή των σπόρων ήταν λιγότερο σημαντικές σε σχέση με αυτές που προκαλούνται από τα λιπάσματα, λόγω της υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών στον αγρό. Παρόλα αυτά, οι επιπτώσεις από τους σπόρους παραμένουν σημαντικές.

4.5 Συστάσεις προς μελλοντική έρευνα

Η επιλογή των λιπασμάτων και των φυτοφαρμάκων επηρεάζει σημαντικά τις αξιολογήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε γεωργικά συστήματα, όπως η καλλιέργεια σιταριού στην Ελλάδα. Τα μοντέλα για τις εκπομπές από τα λιπάσματα, ειδικότερα, έχουν μεγάλη επίδραση στο περιβαλλοντικό φορτίο σχετιζόμενο με την κλιματική αλλαγή, την οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων, την οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων και την τοξικότητα θαλασσινού νερού, λόγω της ισχυρής εξάρτησής τους από τις εκπομπές αζώτου, όπως αναφέρουν στην έρευνά τους οι Rivera, et al. (2017). Αντιθέτως, οι επιπτώσεις των φυτοφαρμάκων επηρεάζουν κυρίως την κατηγορία της τοξικότητας εδαφών, όπως αναφέρουν οι Rivera, et al. (2017), καθώς και τον ευτροφισμό και την τοξικότητα των υδάτων.

Οι μελέτες περίπτωσης αποκαλύπτουν τη σημασία των διάφορων γεωργικών πρακτικών και τον τρόπο με τον οποίο αυτές επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αυτές οι

πρακτικές περιλαμβάνουν τις εργασίες στο πεδίο, όπως ο τύπος του μηχανήματος, ο αριθμός των επαναλήψεων και η κατανάλωση καυσίμου ντίζελ, καθώς και τον τύπο και την ποσότητα των λιπασμάτων και των φυτοφαρμάκων που χρησιμοποιούνται. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται εν μέρει από τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής.

Μέτρα για τη μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης περιλαμβάνουν την επιλογή του τύπου των λιπασμάτων και τη βελτιστοποίηση της δοσολογίας τους. Ωστόσο, όπως έδειξε η μελέτη, η σωστή χρήση και ποσότητα λιπασμάτων μπορεί να ωφελήσει ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων, ιδίως εκείνες που συνδέονται με τις εκπομπές αζώτου, αλλά μπορεί, επίσης, να επιδεινώσει άλλες. Η επιλογή των κρίσιμων επιπτώσεων θα εξαρτηθεί από τα κριτήρια των ενδιαφερομένων και θα καθοδηγήσει τις επιλογές διαχείρισης για τη μείωση των επιπτώσεων.

Για την παροχή αξιόπιστων πληροφοριών προς τα ενδιαφερόμενα μέρη, σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιδόσεις των τροφικών συστημάτων, οι μελέτες AKZ πρέπει να συμπεριλαμβάνουν όλες τις σχετικές εκπομπές. Η πρόκληση με τις εκπομπές αζώτου από την εφαρμογή λιπάσματος είναι ο ποσοτικός τους προσδιορισμός. Εφόσον τα πρωτογενή δεδομένα συχνά δεν είναι διαθέσιμα, απαιτούνται εργαλεία εκτίμησης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα σε συνδυασμό, είναι σημαντικό να αποφεύγεται η διπλή καταμέτρηση των εκπομπών. Χρειάζεται, λοιπόν, καθοδήγηση για το ποιες εκπομπές πρέπει να ληφθούν υπόψη και ποιο μοντέλο πρέπει να εφαρμοστεί για την αποφυγή της διπλής καταμέτρησης. Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με τα δημητριακά περιλαμβάνουν εκπομπές N_2O , NH_3 , NO_x και NO_3 (Niero et al., 2015· Hamelin et al., 2012· Dijkman et al. 2017), αλλά άλλες δε λαμβάνουν υπόψη τις εκπομπές NO_x (Noya et al., 2015· Bacenetti et al., 2016). Η πλήρης καταγραφή των εκπομπών αζώτου στα μοντέλα LCI πρέπει να συνοδεύεται από την ακριβή ποσοτικοποίηση των διαδρομών επίπτωσης, όπως για παράδειγμα για τον θαλάσσιο ευτροφισμό (Cosme et al., 2015· Cosme & Niero, 2017· Cosme & Hauschild, 2016· Woods et al., 2016).

Επιπλέον, θα ήταν απαραίτητο να διερευνηθούν τα όρια του συστήματος σε μια επόμενη μελέτη. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να διεξαχθεί μια αναλυτική μελέτη "cradle-to-grave", η οποία θα καλύπτει όλα τα στάδια από τη γέννηση του προϊόντος μέχρι την απόρριψή του. Αυτό θα περιλαμβάνει τη μεταφορά προς κατανάλωση καθώς και την επεξεργασία του τελικού προϊόντος, αλλά και την αντιμετώπιση των αποβλήτων που προκύπτουν κατά τη διαδικασία. Επιπλέον, μια μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να

αξιολογήσει την επίδραση της ποσότητας λιπασμάτων στην απόδοση διαφορετικών ποικιλιών σιταριού και τις επιπτώσεις αυτών των ποικιλιών στο περιβάλλον.

Σε ό,τι αφορά την επίπτωση από την εφαρμογή φυτοφαρμάκων, τα αποτελέσματα της ΑΚΖ θα πρέπει να συμπληρωθούν με άλλες μεθόδους αξιολόγησης, όπως είναι η αξιολόγηση κινδύνου, πριν καταλήξουν σε συμπεράσματα σχετικά με τα αντίστοιχα επίπεδα κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία.

Τέλος, αυτή η μελέτη μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη πηγή για άλλες μελέτες ΑΚΖ στην Ελλάδα, όταν το σιτάρι χρησιμοποιείται ως είσοδος σε ευρύτερες μελέτες, όπως για την παραγωγή αλευριού, ψωμιού ή και σιταριού για ανθρώπινη κατανάλωση, μεταξύ πολλών άλλων προϊόντων ή συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η γεωργία αποτελεί έναν κρίσιμο τομέα που συμβάλλει στη ρύπανση του περιβάλλοντος, γεγονός που καθιστά επιτακτική την ανάγκη για πρωτοποριακές αγροτεχνολογικές λύσεις. Αυτές οι λύσεις στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης πόρων και ενέργειας. Η έρευνα εστιάζει στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τριών διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σιταριού: τη συμβατική καλλιέργεια, την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους και την καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας.

Στη συμβατική καλλιέργεια παρατηρούνται σημαντικές επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, ιδιαίτερα από τη λίπανση, η οποία συνδέεται με υψηλές εκπομπές CO₂ eq. Η οικοτοξικότητα και η ανθρώπινη τοξικότητα είναι, επίσης, υψηλές σε αυτήν τη μέθοδο, κυρίως λόγω της λίπανσης και της φυτοπροστασίας. Η χρήση γης και ορυκτών καυσίμων είναι, επίσης, αυξημένη στη συμβατική καλλιέργεια.

Σε σύγκριση, η καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους φαίνεται να έχει τη χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση σε όλους τους δείκτες, με εξαίρεση την ανθρώπινη τοξικότητα, όπου η καλλιέργεια με λίπανση ακριβείας φαίνεται να έχει τη λιγότερη επίπτωση. Η λίπανση ακριβείας, επίσης, φαίνεται να έχει μικρότερο αντίκτυπο σε σύγκριση με τη συμβατική καλλιέργεια, αν και οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες όσο αυτές που παρατηρούνται με την καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους. Ωστόσο, η λίπανση ακριβείας μπορεί να προσφέρει άλλα πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη απόδοση των καλλιεργειών και μειωμένη ανάγκη για εισροές.

Η ανάλυση ευαισθησίας για τη λίπανση δείχνει ότι η μείωση της χρήσης λιπασμάτων οδηγεί σε συνολική μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς υποδηλώνει ότι μειώνοντας τις ποσότητες λιπασμάτων, μπορεί να επιτευχθεί ένα πιο βιώσιμο αποτύπωμα για την καλλιέργεια σιταριού, μειώνοντας τις εκπομπές CO₂, την οικοτοξικότητα και την ανθρώπινη τοξικότητα καθώς και την απαίτηση για γεωργική έκταση και ορυκτά καύσιμα.

Συμπερασματικά, η χρήση λιπασμάτων συνέβαλε στην αύξηση σε σημαντικό βαθμό σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μελετήθηκαν. Η συγκεκριμένη έρευνα επιβεβαιώνει τα ευρήματα άλλων μελετών, που τονίζουν ότι η χρήση λιπασμάτων και φυτοχημικών έχουν σημαντική συμβολή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των καλλιεργειών. Η παραγωγή και η χρήση των λιπασμάτων είναι στενά συνδεδεμένες διαδικασίες και για αυτό συνιστάται η βελτίωση της οικολογικής αποδοτικότητας της καλλιέργειας σιταριού μέσω της βελτιστοποίησης

των μεθόδων διαχείρισης και της μείωσης της χρήσης. Οι πιθανές στρατηγικές για την ενίσχυση της παραγωγικότητας και της οικολογικής αποδοτικότητας του σίτου περιλαμβάνουν την ακριβή διαχείριση του αζώτου (χρονική στιγμή, δόση, τύπος λιπάσματος) και την επιλογή τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον που αξιοποιούν βέλτιστα τους πόρους για την παραγωγή και χρήση των λιπασμάτων. Επιπροσθέτως, αξίζει να επισημανθεί ότι η διαδικασία της σποράς αποτελεί επίσης ένα κρίσιμο στάδιο στην καλλιέργεια, καθώς η παραγωγή και η μεταφορά των σπόρων ενέχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Η επιλογή και η καλλιέργεια των σωστών ποικιλιών σπόρων είναι ουσιώδης για την επίτευξη υψηλής παραγωγικότητας και μειωμένου περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Η ανάπτυξη ανθεκτικών στις ασθένειες και πιο αποδοτικών σε όρους πόρων ποικιλιών σπόρων μπορεί να μειώσει την ανάγκη για εντατική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, μειώνοντας έτσι τη συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Επίσης, η εφαρμογή καινοτόμων τεχνικών σποράς και διαχείρισης των καλλιεργειών μπορεί να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα της καλλιέργειας και να μειώσει τις απαιτήσεις για εισροές, συμβάλλοντας στην περαιτέρω μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Η έρευνα υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω βελτιστοποίηση των μεθόδων καλλιέργειας σιταριού, προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ απόδοσης, οικονομικής βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η μείωση της χρήσης λιπασμάτων και η εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων καλλιέργειας, όπως η καλλιέργεια χωρίς κατεργασία εδάφους, μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη για τη βιώσιμη γεωργία. Η βιωσιμότητα δεν εξαρτάται από μία μόνο τεχνολογική λύση- απαιτεί ένα ολόκληρο σύμπλεγμα μέτρων που θα καταστήσουν το σύνολο της γεωργικής παραγωγής πιο ανθεκτικό στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και της οικονομικής και πολιτικής αβεβαιότητας. Ωστόσο, κάθε ερευνητική μελέτη, λύση ή τεχνολογικό στοιχείο μπορεί να συμβάλει σε μια ταχύτερη και ομαλότερη μετάβαση σε μια πιο βιώσιμη γεωργία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Ανδρής, Λ. (2021). *Προσδιορισμός περιβαλλοντικού αποτυπώματος με τη μέθοδο ανάλυσης κύκλου ζωής σε θερμοκηπιακές ανθοκομικές καλλιέργειες*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής.
- Γιουρούκας, Γ. (2016). *Εφαρμογή μεθόδων γεωργίας ακριβείας για μέτρησης παραλλακτικότητας σε καλλιέργεια σιταριού, για μεταβλητή εφαρμογή αζωτούχου λίπανσης*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Σχολή Γεωπονικών Επιστημών. Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.
- Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. (2015). *Πράσινη χημεία και τεχνολογία στη βιώσιμη ανάπτυξη* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/2320>
- Καραμάνος, Α., (1992). *Τα σιτηρά των εύκρατων κλιμάτων*. Ανώτατη Γεωπονική Σχολή Αθηνών.
- Κορπέτης, Ε. (2014). *Αξιολόγηση δώδεκα τοπικών ποικιλιών μαλακού σιταριού (*triticum aestivum* L.) σε δύο περιβαλλοντικές συνθήκες*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Σχολή Γεωπονικών Επιστημών. Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.
- Λοΐζου, Ε. (2001). *Ποσοτική αξιολόγηση των επιπτώσεων της παραγωγικής διαδικασίας στο περιβάλλον* (Doctoral dissertation). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Γεωτεχνικών Επιστημών. Τμήμα Γεωπονίας. Τομέας Αγροτικής Οικονομίας.
- Μαραζάς, Θ., & Μαργαρίτης, Α. (2012). *Τεχνοοικονομική μελέτη καλλιέργειας σιτηρών και καλαμποκιού στο Πολύδροσο Ν. Φωκίδος*. ΑΤΕΙ Μεσολογγίου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας.

- Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ., & Σλίνη, Θ. (2015). *Τεχνική προστασία περιβάλλοντος* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/1009>
- Σμπυράκος, Π. (2021). *Επιπτώσεις της χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στο περιβάλλον. Περίπτωση δήμου Ευρώτα Λακωνίας*. Διπλωματική εργασία. ΕΑΠ, Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας
- Στεργιοπούλου, Ε. (2021). *Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) Παραγωγής Ροδάκινων*. Διπλωματική εργασία. ΕΑΠ, Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας.
- Τανός, Α., Αγγελουπούλου, Α., Φουντάς, Σ., Γέμπος, Θ., Νάνος, Γ., & Χατζηνίνος, Α. (2007). Ζώνες Διαχείρισης Βάση Χαρτών Παραγωγής, Ποιοτικών Χαρακτηριστικών και Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας. *5ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής (ΕΓΜΕ2007)*.
- Φουντάς, Σ., & Γέμπος, Θ. (2015). *Γεωργία ακριβείας*. [ηλεκτρ. βιβλ.]. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2670>.

Ξενόγλωσση

- Ali, S. A., Tedone, L., Verdini, L., & De Mastro, G. (2017). Effect of different crop management systems on rainfed durum wheat greenhouse gas emissions and carbon footprint under Mediterranean conditions. *Journal of Cleaner Production, 140*, 608-621.
- Arora, N. K., & Mishra, I. (2019). United Nations Sustainable Development Goals 2030 and environmental sustainability: race against time. *Environmental Sustainability, 2*(4), 339-342.
- Bacenetti, J., Fusi, A., Negri, M., Guidetti, R., & Fiala, M. (2014). Environmental assessment of two different crop systems in terms of biomethane potential production. *Science of the total environment, 466*, 1066-1077.
- Bacenetti, J., Sala, C., Fusi, A., & Fiala, M. (2016). Agricultural anaerobic digestion plants: What LCA studies pointed out and what can be done to make them more environmentally sustainable. *Applied energy, 179*, 669-686.

- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I. & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339.
- Bernas, J., Bernasová, T., Gerstberger, P., Moudrý, J., Konvalina, P., & Moudrý, J. (2021). Cup plant, an alternative to conventional silage from a LCA perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 311-326.
- Bernas, J., Bernasová, T., Nedbal, V., & Neugschwandtner, R. W. (2021). Agricultural lca for food oil of winter rapeseed, sunflower, and hemp, based on czech standard cultivation practices. *Agronomy*, 11(11), 2301.
- Biswas, W. K., Graham, J., Kelly, K., & John, M. B. (2010). Global warming contributions from wheat, sheep meat and wool production in Victoria, Australia—a life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 18(14), 1386-1392.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P., & Kuhlmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy*, 20(3), 265-279.
- Bux, C., Lombardi, M., Varese, E., & Amicarelli, V. (2022). Economic and environmental assessment of conventional versus organic durum wheat production in Southern Italy. *Sustainability*, 14(15), 9143.
- Canals, L. M. (2003). *Contributions to LCA Methodology for Agricultural Systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment* (Doctoral dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona).
- Cao, Y., Yu, H., Tan, J., Peng, F., Wang, H., Li, J., & Wong, N. B. (2013). Nitrogen-, phosphorous- and boron-doped carbon nanotubes as catalysts for the aerobic oxidation of cyclohexane. *Carbon*, 57, 433-442.
- Carr, P. M., Cavigelli, M. A., Darby, H., Delate, K., Eberly, J. O., Gramig, G. & Woodley, A. L. (2019). Nutrient cycling in organic field crops in Canada and the United States. *Agronomy Journal*, 111(6), 2769-2785.

- Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., & Yang, H. (2003). Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 315-358.
- Cassman, K. G., Dobermann, A., & Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132-140.
- Cosme, N., & Hauschild, M. Z. (2017). Characterization of waterborne nitrogen emissions for marine eutrophication modelling in life cycle impact assessment at the damage level and global scale. *The international journal of life cycle assessment*, 22, 1558-1570.
- Cosme, N., Mayorga, E., & Hauschild, M. Z. (2018). Spatially explicit fate factors of waterborne nitrogen emissions at the global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 1286-1296.
- Davidson, C. L., Dooley, J. J., & Dahowski, R. T. (2009). Assessing the impacts of future demand for saline groundwater on commercial deployment of CCS in the United States. *Energy Procedia*, 1(1), 1949-1956.
- Darzi-Naftchali, A., Motevali, A., & Keikha, M. (2022). The life cycle assessment of subsurface drainage performance under rice-canola cropping system. *Agricultural water management*, 266, 107579.
- De Baan, L., Alkemade, R., & Koellner, T. (2013). Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1216-1230.
- De Vita, P., Di Paolo, E., Fecondo, G., Di Fonzo, N., & Pisante, M. (2007). No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and tillage research*, 92(1-2), 69-78.
- Desai, B. H. (2020). 14. United Nations Environment Programme (UNEP). *Yearbook of International Environmental Law*, 31(1), 319-325.
- Dijkman T.J., Basset-Mens C., Antón A., & Núñez M. (2018). LCA of Food and Agriculture. In: M. Hauschild, R. Rosenbaum, & S. Olsen (eds), *Life Cycle Assessment*. Springer, Cham.

- Dijkman, T. J., Basset-Mens, C., Antón, A., & Núñez, M. (2018). LCA of Food and Agriculture. *Life cycle assessment: theory and practice*, 723-754.
- Drugova, T., Curtis, K. R., & Akhundjanov, S. B. (2020). Organic wheat products and consumer choice: A market segmentation analysis. *British Food Journal*, 122(7), 2341-2358.
- Duan, J., Ren, C., Wang, S., Zhang, X., Reis, S., Xu, J., & Gu, B. (2021). Consolidation of agricultural land can contribute to agricultural sustainability in China. *Nature Food*, 2(12), 1014-1022.
- Engels, C., & Marschner, H. (1995). Plant uptake and utilization of nitrogen. *Nitrogen fertilization in the environment*, 41-81.
- Erisman, J. W., Bleeker, A., Galloway, J., & Sutton, M. S. (2007). Reduced nitrogen in ecology and the environment. *Environmental pollution*, 150(1), 140-149.
- Erisman, J. W., Galloway, J. N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N. B., Petrescu, A. R., & de Vries, W. (2013). Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130116.
- European Commission. Cereals Market Situation. Committee for the Common Organisation of Agricultural Markets. 2022. Ανακτήθηκε από: <https://circabc.europa.eu/sd/a/92653d37-7fff-40c1-8d5e-b6bb3625c04a/EU%20cereals%20market.pdf>
- Fader, M., Gerten, D., Krause, M., Lucht, W., & Cramer, W. (2013). Spatial decoupling of agricultural production and consumption: quantifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014046.
- Fagnano, M., Fiorentino, N., D'Egidio, M. G., Quaranta, F., Ritieni, A., Ferracane, R., & Raimondi, G. (2012). Durum wheat in conventional and organic farming: yield amount and pasta quality in Southern Italy. *The Scientific World Journal*, 2012.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 91(1), 1-21.

- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H. J. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The international journal of life cycle assessment*, *11*, 80-85.
- Fitzgerald, G. J. (2010). Characterizing vegetation indices derived from active and passive sensors. *International Journal of Remote Sensing*, *31*(16), 4335-4348.
- Follett, R. F. (2001). Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*, *61*(1-2), 77-92.
- Fotia, K., Mehmeti, A., Tsirogiannis, I., Nanos, G., Mamolos, A. P., Malamos, N., & Todorovic, M. (2021). LCA-based environmental performance of olive cultivation in Northwestern Greece: from rainfed to irrigated through conventional and smart crop management practices. *Water*, *13*(14), 1954.
- Frye, W. W. (1984). Energy requirement in no-tillage. *Agricultural and Food Sciences, Environmental Science*, 127-151. doi:[10.1007/978-1-4684-1467-7_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1467-7_6)
- Gajda, A. M., Czyż, E. A., Stanek-Tarkowska, J., Furtak, K. M., & Grządziel, J. (2017). Effects of long-term tillage practices on the quality of soil under winter wheat. *Plant, Soil and Environment*, *63*(5), 236.
- González-García, S., Moreira, M. T., Dias, A. C., & Mola-Yudego, B. (2014). Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: Environmental and energy profiles. *Journal of cleaner production*, *66*, 188-198.
- Guinée, J. B. (Ed.). (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards* (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., & Pant, R. (2013). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *18*, 683-697.
- Helmes, R., Ponsioen, T., Blonk, H., Vieira, M., Goglio, P., van der Linden, R.,... & Verweij-Novikova, I. (2020). *Hortifootprint Category Rules: Towards a PEFCR for horticultural products* (No. 2020-041). Wageningen Economic Research.
- Helmes, R. J., Huijbregts, M. A., Henderson, A. D., & Jolliet, O. (2012). Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *17*, 646-654.

- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H. J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., & Nemecek, T. (2010). Implementation of life cycle impact assessment methods. *Final report ecoinvent*, 3(2), 2.
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(9), 3232-3237.
- Holka, M., & Bieńkowski, J. (2020). Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy*, 10(12), 1877.
- Holka, M., Jankowiak, J., Bieńkowski, J., & Dąbrowicz, R. (2016). Life cycle assessment (LCA) of winter wheat in an intensive crop production system in Wielkopolska region (Poland). *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(535), e545.
- Horchani, F., Hajri, R., & Aschi-Smiti, S. (2010). Effect of ammonium or nitrate nutrition on photosynthesis, growth, and nitrogen assimilation in tomato plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 610-617.
- Howarth, R. W. (1998). An assessment of human influences on fluxes of nitrogen from the terrestrial landscape to the estuaries and continental shelves of the North Atlantic Ocean. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 52(2-3), 213-223.
- Huang, X., Huang, S., Han, B., & Li, J. (2022). The integrated genomics of crop domestication and breeding. *Cell*. 185(15), 2828-2839. doi: 10.1016/j.cell.2022.04.036
- Huijbregts, M. A., Norris, G., Bretz, R., Citroth, A., Maurice, B., von Bahr, B., & de Beaufort, A. S. (2001). Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6, 127-132.
- Ingrao, C., Giudice, A. L., Bacenetti, J., Tricase, C., Dotelli, G., Fiala, M., & Mbohwa, C. (2015). Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 29-42.
- Ingrao, C., Tricase, C., Cholewa-Wójcik, A., Kawecka, A., Rana, R., & Siracusa, V. (2015). Polylactic acid trays for fresh-food packaging: A Carbon Footprint assessment. *Science of the Total Environment*, 537, 385-398.

- ISO 14040 (2006). Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO 14044 (2006). *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*. Geneva, Switzerland: ISO.
- JRC-IEA (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—General guide for Life Cycle Assessment—Detailed guidance*. First edition March 2010. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Kan, D., Vieira, M., & Verweij-Novikova, I. (2020). *Life cycle analysis of horticultural products: Memo on capital goods modelling*. Wageningen Economic Research. <https://edepot.wur.nl/526775>
- Khan, M. K., Teng, J. Z., Khan, M. I., & Khan, M. O. (2019). Impact of globalization, economic factors and energy consumption on CO₂ emissions in Pakistan. *Science of the total environment*, 688, 424-436.
- Khakbazan, M., Mohr, R. M., Derksen, D. A., Monreal, M. A., Grant, C. A., Zentner, R. P. & Nagy, C. N. (2009). Effects of alternative management practices on the economics, energy and GHG emissions of a wheat–pea cropping system in the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 30-38.
- Kumar, R., Karmakar, S., Minz, A., Singh, J., Kumar, A., & Kumar, A. (2021). Assessment of greenhouse gases emission in maize-wheat cropping system under varied N fertilizer application using cool farm tool. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 710108.
- Lammerts van Bueren, E. T., Jones, S. S., Tamm, L., Murphy, K. M., Myers, J. R., Leifert, C., & Messmer, M. M. (2011). The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 58(3-4), 193-205.
- Lee, K. M., & Inaba, A. (2004). *Life cycle assessment: best practices of ISO 14040 series*. Center for Ecodesign and LCA (CEL), Ajou University.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J. M., & Guckert, A. (1999). Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil*, 214, 49-59.

- Lipinski, B., Hanson, C., Waite, R., Searchinger, T., & Lomax, J. (2013). *Reducing food loss and waste*. Working Paper, Installment 2 of Creating a Sustainable Food Future. Washington DC: World Resources Institute.
- Lithourgidis, A. S., Dordas, C. A., Damalas, C. A., & Vlachostergios, D. (2011). Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian journal of crop science*, 5(4), 396-410.
- Liu, D., Zhu, X., & Wang, Y. (2021). China's agricultural green total factor productivity based on carbon emission: an analysis of evolution trend and influencing factors. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123692.
- Liu, Y., Lonappan, L., Brar, S. K., & Yang, S. (2018). Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: a review. *Science of the total environment*, 645, 60-70.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620.
- MacArthur, E., & Heading, H. E. A. D. I. N. G. (2019). How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Found*, 1, 1-71.
- Malakouti, M. J., & Majidi, A. (2019). Effect of Potassium Fertilizers Management on Some Quantitative and Qualitative Characteristics of Wheat. *Water and Soil*, 33(4), 635-645.
- McAuliffe, G. A., Takahashi, T., & Lee, M. R. (2020). Applications of nutritional functional units in commodity-level life cycle assessment (LCA) of agri-food systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 208-221.
- McCloud, P. R., Gronwald, R., & Kuykendall, H. (2007). Precision agriculture: NRCS support for emerging technologies. *Agronomy Technical Note*, 1, 1-9.
- Medel-Jiménez, F., Piringer, G., Gronauer, A., Barta, N., Neugschwandtner, R. W., Krexner, T., & Kral, I. (2022). Modelling soil emissions and precision agriculture in fertilization life cycle assessment-A case study of wheat production in Austria. *Journal of Cleaner Production*, 380(2), 134841.
- Melvin, A. M., Sarofim, M. C., & Crimmins, A. R. (2016). Climate benefits of US EPA programs and policies that reduced methane emissions 1993–2013. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 6873-6881.

- Meynard, J. M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M. H., & Makowski, D. (2002). Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie*, 22(7-8), 817-829.
- Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., & Gyldenkærne, S. (2011). Danish emission inventory for agriculture. *NERI Technical Report*, (810).
- Mohamed, E. S., Belal, A. A., Abd-Elmabod, S. K., El-Shirbeny, M. A., Gad, A., & Zahran, M. B. (2021). Smart farming for improving agricultural management. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 971-981.
- Montemurro, F., & Maiorana, M. (2015). Agronomic practices at low environmental impact for durum wheat in mediterranean conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 38(4), 624-638.
- Diacono, M., Rubino, P., & Montemurro, F. (2013). Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 219-241.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohammadkashi, N., Chau, K. W., & Mostashari-Rad, F. (2022). *Principle of Life Cycle Assessment and Cumulative Exergy Demand for Biodiesel Production: Farm-To-Combustion*. 10.1007/978-3-030-90720-4_6.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2018). Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. *Science of the total environment*, 631, 1279-1294.
- Naderloo, L., Alimardani, R., Omid, M., Sarmadian, F., Javadikia, P., Torabi, M. Y., & Alimardani, F. (2012). Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs. *Measurement*, 45(6), 1406-1413.
- Nilsson, A., Shabestary, K., Brandão, M., & Hudson, E. P. (2020). Environmental impacts and limitations of third-generation biobutanol: Life cycle assessment of n-butanol produced by genetically engineered cyanobacteria. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 205-216.

- Noya, I., González-García, S., Bacenetti, J., Arroja, L., & Moreira, M. T. (2015). Comparative life cycle assessment of three representative feed cereals production in the Po Valley (Italy). *Journal of Cleaner Production*, *99*, 250-265.
- Pau-Vall, M., & Vidal, C. (1999). Nitrogen in agriculture. European agriculture and environment. *Agriculture, environment, rural development: facts and figures—a challenge for agriculture*. Agriculture Directorate. http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/en/nitro_en/report.htm.
- Peteinatos, G. G., Rueda-Ayala, V., Gerhards, R., & Andujar, D. (2015). Precision harrowing with a flexible tine harrow and an ultrasonic sensor. *10th European Conference on Precision Agriculture - ECPA2015, Tel Aviv (Israel)*. doi: 10.3920/978-90-8686-814-8_72.
- Peteinatos, G. G., Weis, M., Andújar, D., Rueda Ayala, V., & Gerhards, R. (2014). Potential use of ground-based sensor technologies for weed detection. *Pest management science*, *70*(2), 190-199.
- Pingali, P. L. (2012). Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the national academy of sciences*, *109*(31), 12302-12308.
- Prasad, A. K., Sarkar, S., Singh, R. P., & Kafatos, M. (2007). Inter-annual variability of vegetation cover and rainfall over India. *Advances in space research*, *39*(1), 79-87.
- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., & Schepers, J. S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, *93*(1), 131-138.
- Raven, J. A., Andrews, M., & Quigg, A. (2005). The evolution of oligotrophy: implications for the breeding of crop plants for low input agricultural systems. *Annals of Applied Biology*, *146*(3), 261-280.
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, *326*(5949), 123-125.
- Rivera, X. C. S., Bacenetti, J., Fusi, A., & Niero, M. (2017). The influence of fertiliser and pesticide emissions model on life cycle assessment of agricultural products:

- The case of Danish and Italian barley. *Science of the Total Environment*, 592, 745-757.
- Romanekas, K., Avizienyte, D., Boguzas, V., Sarauskis, E., Jasinskas, A., & Marks, M. (2016). Impact of tillage systems on chemical, biochemical and biological composition of soil. *Journal of Elementology*, 21(2).
- Romero-Gámez, M., Audsley, E., & Suárez-Rey, E. M. (2014). Life cycle assessment of cultivating lettuce and escarole in Spain. *Journal of cleaner production*, 73, 193-203.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C.,... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172.
- Saber, Z., van Zelm, R., Pirdashti, H., Schipper, A. M., Esmaeili, M., Motevali, A., ... & Huijbregts, M. A. (2021). Understanding farm-level differences in environmental impact and eco-efficiency: The case of rice production in Iran. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1021-1029.
- Sonesson, U., Davis, J., & Ziegler, F. (2010). *Food production and emissions of greenhouse gases: an overview of the climate impact of different product groups*. SIK-Report No 802 2010.
- Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of agricultural engineering research*, 76(3), 267-275.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.
- Sumon, K. A., Rashid, H., Peeters, E. T., Bosma, R. H., & Van den Brink, P. J. (2018). Environmental monitoring and risk assessment of organophosphate pesticides in aquatic ecosystems of north-west Bangladesh. *Chemosphere*, 206, 92-100.
- Sundmaeker, H., Verdouw, C., Wolfert, S., & Freire, L. P. (2022). Internet of food and farm 2020. In *Digitising the Industry Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds* (pp. 129-151). River Publishers.

- Tabatabaeefar, A., Emamzadeh, H., Varnamkhasti, M. G., Rahimizadeh, R., & Karimi, M. (2009). Comparison of energy of tillage systems in wheat production. *Energy*, *34*(1), 41-45.
- Tilman, D. (1999). Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, *96*(11), 5995-6000.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, *418*(6898), 671-677.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, *515*(7528), 518-522.
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'antonio, C., Dobson, A., Howarth, R.,... & Swackhamer, D. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *science*, *292*(5515), 281-284.
- Todorović, M., Mehmeti, A., & Cantore, V. (2018). Impact of different water and nitrogen inputs on the eco-efficiency of durum wheat cultivation in Mediterranean environments. *Journal of cleaner production*, *183*, 1276-1288.
- Trotter, T. F., Frazier, P., Trotter, M. G., & Lamb, D. W. (2008, July). Objective biomass assessment using an active plant sensor (Crop Circle), preliminary experiences on a variety of agricultural landscapes. In *9th International Conference on Precision Agriculture (ICPA)*. Denver, Colorado, USA.
- Tudisca, S., Di Trapani, A. M., Sgroi, F., & Testa, R. (2014). Organic Farming and Economic Sustainability: The Case of Sicilian Durum Wheat. *Quality-Access to Success*, *15*(138).
- Van Stappen, F., Lories, A., Mathot, M., Planchon, V., Stilmant, D., & Debode, F. (2015). Organic versus conventional farming: the case of wheat production in Wallonia (Belgium). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, *7*, 272-279.
- Vatsanidou, A., Fountas, S., Liakos, V., Nanos, G., Katsoulas, N., & Gemtos, T. (2020). Life cycle assessment of variable rate fertilizer application in a Pear Orchard. *Sustainability*, *12*(17), 6893.

- Vinyes, E., Gasol, C. M., Asin, L., Alegre, S., & Muñoz, P. (2015). Life Cycle Assessment of multiyear peach production. *Journal of Cleaner Production*, *104*, 68-79.
- Vinyes, E., Asin, L., Alegre, S., Muñoz, P., Boschmonart, J., & Gasol, C. M. (2017). Life Cycle Assessment of apple and peach production, distribution and consumption in Mediterranean fruit sector. *Journal of Cleaner Production*, *149*, 313-320.
- Vizzari, M., Santaga, F., & Benincasa, P. (2019). Sentinel 2-based nitrogen VRT fertilization in wheat: Comparison between traditional and simple precision practices. *Agronomy*, *9*(6), 278.
- Wang, X., Chen, Y., Sui, P., Gao, W., Qin, F., Wu, X., & Xiong, J. (2014). Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: an emergy evaluation based on LCA. *Journal of cleaner production*, *65*, 234-245.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource technology*, *120*, 78-83.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*, 1218-1230.
- Woods, J. S., Veltman, K., Huijbregts, M. A., Verones, F., & Hertwich, E. G. (2016). Towards a meaningful assessment of marine ecological impacts in life cycle assessment (LCA). *Environment international*, *89*, 48-61.
- Yao, X., Zhu, Y., Tian, Y., Feng, W., & Cao, W. (2010). Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *12*(2), 89-100.
- Zaveri, E., & B. Lobell, D. (2019). The role of irrigation in changing wheat yields and heat sensitivity in India. *Nature communications*, *10*(1), 4144.
- Zappe, A. L., de Oliveira, P. F., Boettcher, R., Rodriguez, A. L., Machado, Ê. L., Dos Santos, P. A. M., ... & de Matos, M. A. A. (2020). Human health risk and potential

environmental damage of organic and conventional *Nicotiana tobaccum* production. *Environmental Pollution*, 266, 114820.

Zebarth, B. J., & Rosen, C. J. (2007). Research perspective on nitrogen BMP development for potato. *American Journal of Potato Research*, 84, 3-18.

Zingale, S., Guarnaccia, P., Timpanaro, G., Scuderi, A., Matarazzo, A., Bacenetti, J., & Ingrao, C. (2022). Environmental life cycle assessment for improved management of agri-food companies: The case of organic whole-grain durum wheat pasta in Sicily. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(2), 205-226.

Zhu, X., & Liu, D. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222-231.

Διαδικτυακές πηγές

World Population Prospects (2022) Ανακτήθηκε από: <https://population.un.org/wpp/>

EU, (2013). 2013/179/EU: Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations Text with EEA relevance. Ανακτήθηκε από: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32013H0179>

FAOSTAT. Crops and Livestock Products. 2022. Ανακτήθηκε από: <https://www.fao>

IPCC Sixth Assessment Report (AR6), (2022). Ανακτήθηκε από: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

ISPA (2019). Ανακτήθηκε από: <https://www.ispag.org/about/definition>.

Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development) Ανακτήθηκε από: <https://www.oecd.org/greece/>

SimaPro (2022), <https://support.simapro.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ερωτηματολόγιο προς γεωργό

Π.Α 1 Βασικές πληροφορίες

<i>Βασικές πληροφορίες</i>	
Συνολική έκταση (στρ)	86,6 στρ. (Πειραματικοί Αγροί)
<i>Ελκυστήρας – Τρακτέρ (μικρό)</i>	
Μοντέλο	FORD 5000
Χρονολογία	1972
Κατανάλωση	75 λίτρα Ρεζερβουάρ / O.E.C.D. TEST 3 gal/h / μ.ο. 1,5 λίτρα στρέμμα
Κυβικά	4.200 κ.ε.
Ίπποι	82
<i>Ελκυστήρας – Τρακτέρ (μεγάλο)</i>	
Μοντέλο	JOHN DEERE 6630 PREMIUM
Χρονολογία	2007
Κατανάλωση	200 λίτρα Ρεζερβουάρ / DLG TEST 298 g/kwh / μ.ο. 2,0 λίτρα / στρέμμα
Κυβικά	6.800 κ.ε.
Ίπποι	140
<i>Καλλιεργητής</i>	
Πλάτος	4,5 μέτρα
Τύπος καλλιεργητή	Προετοιμασίας
Εταιρεία	ΦΟΥΚΑΣ (ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΣ – ΦΟΥΚΑΣ / ΚΑΡΔΙΤΣΑ)
Μοντέλο	PR FLEX 45X12
<i>Ψεκαστικό</i>	
Χωρητικότητα	1.000 λίτρα
Πλάτος Ψεκαστικού	12 μέτρα
Εταιρεία	AGROTIS
Μοντέλο	DX 12
<i>Λιπασματοδιανομέας</i>	
Χωρητικότητα	1.550 λίτρα
Πλάτος Διανομής	12 μέτρα
Μοντέλο	CL Geospread
Εταιρεία	Kverneland
<i>Άροτρο</i>	
Πλάτος	2,20 μέτρα
Εταιρεία	KVERNELAND
Μοντέλο	AB 100
<i>Δισκοσβάρνα</i>	
Πλάτος	3,00 μέτρα
Εταιρεία	ΠΗΓΑΣΟΣ (Κυριαζόπουλου Β. / Αυλές Σερβίων) www.pigasosagro.gr
Μοντέλο	ΑΓΝΩΣΤΟ

Σπαρτική Μηχανή		
Πλάτος	2,50 μέτρα	
Τύπος σπαρτικής μηχανής	Συρόμενη με υνάκια (συμβατική)	
Εταιρεία	PEKOP (ΑΦΟΙ Εμμ. Δεβετζόγλου / Βαθύλακος Θεσσαλονίκης)	
Μοντέλο	ΓΑΙΑ	
Σβάρνα		
Πλάτος	2,80 μέτρα	
Τύπος μηχανήματος	Ισοπεδωτής Εδάφους	
Μοντέλο	ΑΓΝΩΣΤΟ	
Εταιρεία	ΓΕΡ. ΠΑΛ. (Παλικρούσης / Φλώρινα)	
Κύλινδρος		
Πλάτος	3,00 μέτρα	
Τύπος μηχανήματος	Συμπιεστής Εδάφους	
Μοντέλο	ΑΓΝΩΣΤΟ	
Εταιρεία	Ντάγκας Κ. Γεωργικά Μηχανήματα (Ελευθεροχώρι Γρεβενών)	
Θεριζοαλωνιστική Μηχανή		
Μοντέλο	NEW HOLLAND 8070	
Χρονολογία	1983	
Κατανάλωση	300 Λίτρα Ρεζερβουάρ / 1,5 lt / στρέμμα	
Κυβικά	5.900 κ.ε.	
Ίπποι	140	
ΙΧ Φορτηγάκι Αγροτικής Χρήσης		
Μοντέλο	NISSAN PICK UP (d22)	
Χρονολογία	1999	
Κατανάλωση	10 Λίτρα / 100 km (χωρίς βάρος)	
Κυβικά	2.500 κ.ε.	
Ίπποι	103	
Συνολική κατανάλωση και αγορά καυσίμου		
Πόσα λίτρα αγοράζονται για όλη τη χρήση στην αρχή του έτους;	Αγοράζονται σε δόσεις των 1.000 ή 1.500 λίτρων και όχι ολικά. (Μ.Ο. Τελευταίας 3 ετίας είναι 14.096 lt / έτος)	
Πόσο κοστίζει η συνολική προμήθεια σε περίπτωση αποθήκευσης	Για το 2022 η συνολική αγορά πετρελαίου κόστισε 25.076 ευρώ με Μ.Ο. 1,871 € / lt και σύνολο 13.400 lt	
Εισροές (στρέμμα)		
Τρόπος προμήθειας πρώτων υλών:		
Μετακίνηση	Φορτηγάκι ή Καρότσα Τρακτέρ ή Απ' ευθείας Παραλαβή	
Χιλιομετρική απόσταση	Πήγαινε έλα: 10 km (minimum) - 270 km (maximum) μ.ο.	
Τύπος οχήματος	Φορτηγάκι Nissan ή Τρακτέρ με καρότσα	
Κατανάλωση οχήματος	10 lt / 100 km (φορτηγάκι) 20 lt / h (τρακτέρ)	
Τόπος προμήθειας	Κοζάνη προς Κρόκο ή Θεσσαλονίκη προς Κρόκο	
Κατεργασία εδάφους		
Εφαρμογές	Τύπος κατεργασίας εδάφους	Ημερομηνία (κατά προσέγγιση)
1 ^η	Δισκοσβάρνα (καταστροφή καλαμιάς)	20 Ιουλίου με 10 Αυγούστου

2 ^η	Όργωμα με άροτρο	10 Αυγούστου με 10 Σεπτεμβρίου			
3 ^η	Καλλιεργητής Βαρέως Τύπου	10 Σεπτεμβρίου με 31 Σεπτεμβρίου			
4 ^η	Σβάρνα	1 Οκτωβρίου με 20 Οκτωβρίου			
5 ^η	Ισοπέδωση με κύλινδρο (πριν ή μετά τη σπορά)	1 Νοεμβρίου με 15 Δεκεμβρίου			
Λίπανση					
Είδος λιπάσματος		Είδος Α		Είδος Β	
		27N 27-0-0		Ωmega 18-18-0	
Συνολική προμήθεια στην αρχή του έτους (κιλά)		27.600 kg		22.680 kg	
		ΑΝΟΙΞΙΑΤΙΚΟ		ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ	
Τιμή (κιλό)		0,41€		0,51€	
Χρήση λιπάσματος					
A/A	Τύπος λιπάσματος	Ποσότητα εφαρμογής ανά στρέμμα		Ημερομηνία εφαρμογής	
1 ^η	27N 27-0-0 (ΑΝΟΙΞΙΑΤΙΚΟ 1 ^ο ΧΕΡΙ)	14,0		ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟ	
2 ^η	27N 27-0-0 (ΑΝΟΙΞΙΑΤΙΚΟ 2 ^ο ΧΕΡΙ)	13,6		ΜΑΡΤΙΟ	
3 ^η	Ω 18-18-0 (ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΜΕ ΣΠΟΡΑ)	22,7		ΝΟΕ / ΔΕΚ	
Σπορά					
Σπόρος (συνολική προμήθεια)					
Είδος Σπόρου		Είδος Α			
		ΜΕΡΙΝΤΙΑΝΟ (ΣΚΛΗΡΟ ΣΙΤΑΡΙ)			
Συνολική προμήθεια στην αρχή του έτους (κιλά)		15.000 Kg			
Τιμή (κιλό)		0,75 €/Kg			
Ημερομηνία σποράς		Μέσα Νοε – Μέσα Δεκ			
Ποσότητα ανά στρέμμα		18 με 20 kg			
Φυτοπροστασία					
Φυτοπροστασία (συνολική προμήθεια)					
Είδος Φαρμάκου	Είδος Α	Είδος Β	Είδος Γ	Είδος Δ	Είδος Ε
	Πυρεθρίνη (Για ζάβρο / κριόκερο / έντομα γενικά)	Axial (Για αγριοβρώμη ήρα / στενόφυλλα γενικά)	Biathlon (Για bifora, παπαρούνα, αγριοσινάπι, κολλιτσίδα, αγκάθι)	Dash (ενισχυτική ουσία για προσκόλληση του φαρμάκου στα φύλλα ή κόλλα)	Comet (Μυκητοκτόνο)
Συνολική προμήθεια στην αρχή του έτους (λίτρα/κιλά)	2 lt / στρ. 80 lt	4 lt / στρ. 80 lt	7 gr / στρ. 9.000 gr	75 cc / στρ. 80 lt	100 cc / στρ. 30 lt
Τιμή (λίτρο/κιλό)	17,2 €/lt	67,25 €/lt	229 €/kg	10 €/lt	50 €/lt

<u>A/A</u>	<u>Τύπος φαρμάκου</u>	<u>Ποσότητα εφαρμογής ανά στρέμμα</u>	<u>Ημερομηνία εφαρμογής</u>
1 ^η	Εντομοκτόνο Graffiti (πυρεθρίνη)	2 lt / στρ.	Νοε, Δεκ (ζάβρο) Μαρτ, Απρ (κρίοκερο κτλ.)
2 ^η	Ζιζανιοκτόνο για στενόφυλλα	4 lt / στρ.	Μαρτ, Απρ (αγριοβρώμη κτλ)
3 ^η	Ζιζανιοκτόνο για πλατύφυλλα	7 gr / στρ.	Μαρτ, Απρ (bifora, παπαρούνα, αγριοσινάπι, κολλιτσίδα, αγκάθι κτλ)
4 ^η	Ενισχυτική ουσία για προσκόλληση στα φύλλα	75 cc / στρ.	Μαρτ, Απρ (για πλατύφυλλα και στενόφυλλα)
5 ^η	Μυκητοκτόνο	100 cc / στρ.	Μαρτ, Απρ. Μάιο
Αλωνιστική μηχανή			
Πλάτος Τράπεζας	4,57 μέτρα		
Εταιρία	New Holland		
Μοντέλο	8070		
Κυβικά	5.945 cc		
Ίπποι	140		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Π.Β 1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού της συμβατικής καλλιέργειας σιταριού σε midpoint επίπεδο με τη μέθοδο ReCiPe 2016 (FU: 1ha)

Κατηγορία επίπτωσης	Μονάδες	Κατεργασία εδάφους, Αροτρο	Κατεργασία εδάφους, Δισκοσβάρνα	Κατεργασία εδάφους, Σβάρνα	Κατεργασία εδάφους, Κύλινδρος	Κατεργασία εδάφους, Καλλιεργητής	Σπαρτική μηχανή, Σπορά	Λίπανση	Φυτοπροστασία	Θερισμός Σιταριού
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	122,81034	71,98786	73,30147	73,30147	71,98786	171,80825	815,01880	620,82656	151,54789
Καταστροφή του όζοντος	kg CFC11 eq	0,00007	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,002030147	0,00148	0,00201	0,00007
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	0,85047	0,63248	0,46821	0,46821	0,63248	0,95992114	4,70032	3,63582	0,56512
Σχηματισμός φωτοχημικής οξειδωσης: υγεία ανθρώπου	kg NOx eq	1,16344	0,57487	0,68651	0,68651	0,57487	0,71175651	1,75719	1,75225	1,86154
Αιωρούμενα σωματίδια	kg PM2.5 eq	0,35414	0,19942	0,21063	0,21063	0,19942	0,38986308	1,96946	1,75868	0,45726
Σχηματισμός φωτοχημικής οξειδωσης: οικοσυστήματα	kg NOx eq	1,18003	0,58638	0,69639	0,69639	0,58638	0,72611463	1,79857	1,80123	1,88925
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	0,62219	0,36004	0,36492	0,36492	0,36004	1,692738	6,85639	4,73282	0,89513
Ευτοφισμός γλυκού νερού	kg P eq	0,01409	0,01038	0,00772	0,00772	0,01038	0,089868843	0,07262	0,22409	0,00903
Ευτοφισμός θαλασσινού νερού	kg N eq	0,00022	0,00020	0,00014	0,00014	0,00020	0,35837171	0,06163	0,18095	0,00040
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	412,87940	303,33272	250,55550	250,55550	303,33272	687,80871	5210,0852 0	3349,40350	796,23372
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	0,09524	0,08086	0,05670	0,05670	0,08086	0,63839963	2,04713	10,28580	0,11891
Τοξικότητα θαλασσινού νερού	kg 1,4-DCB	0,36112	0,28052	0,21458	0,21458	0,28052	0,9462966	5,22387	5,10793	0,53761
Ανθρώπινη τοξικότητα: καρκινογόνος	kg 1,4-DCB	2,41486	2,73782	1,55669	1,55669	2,73782	2,3345516	12,17633	9,01490	3,13706
Ανθρώπινη τοξικότητα: μη καρκινογόνος	kg 1,4-DCB	94,65127	44,62470	54,74503	54,74503	44,62470	133,83611	407,19455	299,19665	137,71670

Χρήση γης	m2a crop eq	4,23904	3,05506	2,71949	2,71949	3,05506	514,78784	45,07261	16,18497	4,10706
Χρήση Ορυκτών πόρων	kg Cu eq	0,63584	0,67409	0,40595	0,40595	0,67409	0,32097	13,41905	18,12449	1,00975
Χρήση Ορυκτών Καυσίμων	kg oil eq	39,40328	29,47140	21,72570	21,72570	29,47140	28,20464	286,91535	210,03592	26,82304
Εξάντληση Υδάτων	m3	0,19777	0,17633	0,12395	0,12395	0,17633	3,85653	19,02931	1,73708	0,37672

Π.Β 2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού για τη συμβατική καλλιέργεια στο endpoint επίπεδο με τη μέθοδο ReCiPe 2016 (FU: 1ha)

Κατηγορία επίπτωσης	Μονάδες	Κατεργασία εδάφους, Άροτρο	Κατεργασία εδάφους, Δισκοσβάρνα	Κατεργασία εδάφους, Σβάρνα	Κατεργασία εδάφους, Κύλινδρος	Κατεργασία εδάφους, Καλλιεργητής	Σπαρτική μηχανή, Σπορά	Λίπανση	Φυτοπροστασία	Θερισμός Σιταριού
Κλιματική αλλαγή, Υγεία ανθρώπου	DALY	1,14E-04	6,68E-05	6,80E-05	6,80E-05	6,68E-05	0,0001595	5,76E-04	7,56E-04	1,41E-04
Κλιματική αλλαγή, χερσαία οικοσυστήματα	species.yr	3,44E-07	2,02E-07	2,05E-07	2,05E-07	2,02E-07	4,81E-07	1,74E-06	2,28E-06	4,24E-07
Κλιματική αλλαγή, οικοσυστήματα γλυκού νερού	species.yr	9,39E-12	5,51E-12	5,61E-12	5,61E-12	5,51E-12	1,31E-11	4,75E-11	6,23E-11	1,16E-11
Καταστροφή του όζοντος	DALY	3,63E-08	2,18E-08	2,09E-08	2,09E-08	2,18E-08	1,08E-06	1,07E-06	7,84E-07	3,66E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία	DALY	7,23E-09	5,38E-09	3,98E-09	3,98E-09	5,38E-09	8,16E-09	3,09E-08	3,99E-08	4,80E-09
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	DALY	1,06E-06	5,23E-07	6,25E-07	6,25E-07	5,23E-07	6,48E-07	1,59E-06	1,60E-06	1,69E-06
Σχηματισμός αιρούμενων σωματιδίων	DALY	2,23E-04	1,25E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,25E-04	0,0002451	1,10E-03	1,24E-03	2,88E-04
Δημιουργία όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	species.yr	1,52E-07	7,56E-08	8,98E-08	8,98E-08	7,56E-08	9,37E-08	2,32E-07	2,32E-07	2,44E-07

Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	species.yr	1,32E-07	7,63E-08	7,73E-08	7,73E-08	7,63E-08	3,59E-07	1,00E-06	1,45E-06	1,90E-07
Ευτροφισμός γλυκού νερού	species.yr	9,48E-09	6,98E-09	5,19E-09	5,19E-09	6,98E-09	6,03E-08	1,50E-07	4,87E-08	6,07E-09
Ευτροφισμός θαλασσινού νερού	species.yr	3,78E-13	3,37E-13	2,32E-13	2,32E-13	3,37E-13	6,09E-10	3,08E-10	1,05E-10	6,85E-13
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	species.yr	4,71E-09	3,46E-09	2,86E-09	2,86E-09	3,46E-09	7,85E-09	3,82E-08	5,95E-08	9,09E-09
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	species.yr	6,61E-11	5,61E-11	3,93E-11	3,93E-11	5,61E-11	4,43E-10	7,15E-09	1,42E-09	8,25E-11
Οικοτοξικότητα θαλάσσιου νερού	species.yr	3,79E-11	2,95E-11	2,25E-11	2,25E-11	2,95E-11	9,94E-11	5,36E-10	5,49E-10	5,65E-11
Ανθρώπινη τοξικότητα: καρκινογόνος	DALY	8,02E-06	9,09E-06	5,17E-06	5,17E-06	9,09E-06	7,75E-06	2,99E-05	4,04E-05	1,04E-05
Ανθρώπινη τοξικότητα: μη καρκινογόνος	DALY	2,16E-05	1,02E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,02E-05	3,05E-05	6,82E-05	9,28E-05	3,14E-05
Χρήση γης	species.yr	3,76E-08	2,71E-08	2,41E-08	2,41E-08	2,71E-08	4,57E-06	1,44E-07	4,00E-07	3,64E-08
Χρήση Ορυκτών πόρων	USD2013	1,47E-01	1,56E-01	9,38E-02	9,38E-02	1,56E-01	0,2323342	4,19E+00	3,10E+00	2,33E-01
Χρήση Ορυκτών Καυσίμων	USD2013	1,62E+01	1,17E+01	8,82E+00	8,82E+00	1,17E+01	18,118583	6,35E+01	9,95E+01	9,70E+00
Εξάντληση υδάτων, ανθρώπινη υγεία	DALY	2,22E-07	1,99E-07	1,38E-07	1,38E-07	1,99E-07	4,83E-05	1,01E-08	3,00E-05	3,49E-07
Εξάντληση υδάτων, χερσαίων οικοσυστημάτων	species.yr	1,54E-09	1,39E-09	9,63E-10	9,63E-10	1,39E-09	3,12E-07	2,22E-09	1,91E-07	2,48E-09
Εξάντληση υδάτων, υδάτινων οικοσυστημάτων	species.yr	2,05E-13	1,93E-13	1,28E-13	1,28E-13	1,93E-13	6,67E-11	3,12E-12	8,78E-12	3,26E-13

Π.Β 3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού σε endpoint επίπεδο για τη σύγκριση των 3 διαφορετικών μεθόδων καλλιέργειας σιταριού

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Συμβατική καλλιέργεια σιταριού	Καλλιέργεια σιταριού χωρίς κατεργασία εδάφους	Καλλιέργεια σιταριού με λίπανση ακριβείας
Κλιματική αλλαγή, Υγεία ανθρώπου	DALY	1,90E-03	1,46E-03	1,70E-03
Κλιματική αλλαγή, χερσαία οικοσυστήματα	species.yr	5,73E-06	4,41E-06	5,14E-06
Κλιματική αλλαγή, οικοσυστήματα γλυκού νερού	species.yr	1,57E-10	1,20E-10	1,40E-10
Καταστροφή του όζοντος	DALY	2,13E-06	1,91E-06	1,92E-06
Ιονίζουσα ακτινοβολία	DALY	1,07E-07	7,79E-08	9,64E-08
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	DALY	8,50E-06	5,00E-06	8,14E-06
Σχηματισμός αιρούμενων σωματιδίων	DALY	0,003438495	0,002594162	0,003116494
Δημιουργία όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	species.yr	1,23E-06	7,25E-07	1,18E-06
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	species.yr	3,16E-06	2,62E-06	2,77E-06
Ευτροφισμός γλυκού νερού	species.yr	2,51E-07	2,02E-07	2,38E-07
Ευτροφισμός θαλασσινού νερού	species.yr	4,76E-10	4,45E-10	4,48E-10
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	species.yr	1,27E-07	1,06E-07	1,11E-07
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	species.yr	8,98E-09	8,03E-09	8,60E-09
Οικοτοξικότητα θαλάσσιου νερού	species.yr	1,31E-09	1,12E-09	1,16E-09

Ανθρώπινη τοξικότητα: καρκινογόνος	DALY	0,00012071	8,14E-05	0,000110212
Ανθρώπινη τοξικότητα: μη καρκινογόνος	DALY	0,000270749	0,00019766	0,000248184
Χρήση γης	species.yr	1,20E-06	1,05E-06	1,09E-06
Χρήση Ορυκτών πόρων	USD2013	8,2471712	7,1937657	7,4183916
Χρήση Ορυκτών Καυσίμων	USD2013	241,83606	178,64017	215,93682
Εξάντληση υδάτων, ανθρώπινη υγεία	DALY	3,61E-05	3,52E-05	2,81E-05
Εξάντληση υδάτων, χειρσαίων οικοσυστημάτων	species.yr	2,33E-07	2,27E-07	1,82E-07
Εξάντληση υδάτων, υδάτινα οικοσυστημάτων	species.yr	1,98E-11	1,87E-11	1,75E-11