

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ &
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ**



**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΗ ΔΟΜΗ
ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ**

**ΚΟΤΡΩΝΑΚΗΣ Ι. ΜΑΝΩΛΗΣ
MSc Μηχανικός Περιβάλλοντος**

**ΧΑΝΙΑ
Φεβρουάριος 2018**

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΕΔΑΦΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ
ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

ΚΟΤΡΩΝΑΚΗΣ Ι. ΜΑΝΩΛΗΣ
MSc Μηχανικός Περιβάλλοντος

Επταμελής εξεταστική επιτροπή:

Νικολαΐδης Νικόλαος - Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Π.Κ.) (Επιβλέπων)

Καλογεράκης Νικόλαος - Καθηγητής Π.Κ. (μέλος τριμελούς επιτροπής)

Παρανυχιανάκης Νικόλαος – Επ. Καθηγητής Π.Κ. (μέλος τριμελούς επιτροπής)

Κομνίτσας Κωνσταντίνος - Καθηγητής Π.Κ.

Ροζάκης Στυλιανός – Αν. Καθηγητής Π.Κ.

Σταυρουλάκης Γεώργιος - Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Μωραΐτης Δανιήλ - Επ. Καθηγητής Πανεπιστημίου Sultan Qaboos

ΧΑΝΙΑ
Φεβρουάριος 2018

“Η επιστήμη γνωρίζει μόνο μία εντολή

να συμβάλει στην επιστήμη”

*Μπέρτολτ Μπρεχτ
Γερμανός δραματουργός, σκηνοθέτης
και ποιητής του 20ού αιώνα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, με θέμα «Ο ρόλος της οργανικής ουσίας στη δομή και στην ποιότητα του εδάφους», εκπονήθηκε στο εργαστήριο «Υδρογεωχημική Μηχανική και Αποκατάσταση Εδαφών» της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης (Π.Κ.). Η παρούσα έρευνα διεξήχθη στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος SoilTReC (Μετασχηματισμοί του Εδάφους σε Ευρωπαϊκές Λεκάνες Απορροής – www.soiltrec.eu).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Νικολαΐδη της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Π.Κ., για την υπόδειξη του θέματος, την άριστη καθοδήγησή του και συνεργασία μας καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Η βοήθειά του και οι συμβουλές τους κατά τη διάρκεια της διατριβής υπήρξαν καθοριστικής σημασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Καλογεράκη της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Π.Κ. για τη συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή της διδακτορικής μου διατριβής και για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη που με βοήθησε στο σχεδιασμό του πειράματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Κομνίτσα της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Π.Κ., τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Στυλιανό Ροζάκη της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Π.Κ., τον καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη της Σχολής Εφαρμοσμένων Επιστημών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης και τον επίκουρο καθηγητή κ. Δανιήλ Μωραΐτη της Σχολής Επιστημών του Πανεπιστημίου Sultan Qaboos, που μου έκαναν την τιμή να αποτελέσουν μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής και να παραστούν στην υποστήριξη της διδακτορικής μου διατριβής, όπως και για τον χρόνο που δέθεσαν για την ανάγνωση της διατριβής.

Στο σημείο αυτό οφείλω να αναφέρω ότι η παρούσα διατριβή ήταν απόρροια μίας γόνιμης και παραδειγματικής συνεργασίας όλου του προσωπικού του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών, με συντονιστή τον διευθυντή του εργαστηρίου. Πραγματοποιήθηκε μία ομαδική δουλειά, οι καρποί της οποίας παρουσιάζονται στο παρόν σύγγραμμα. Θα ήθελα, λοιπόν, να εκφράσω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο μου Γιώργο Γιαννάκη, υποψήφιο διδάκτορα του Π.Κ., ο οποίος ήταν ο κύριος υπεύθυνος του πειράματος στο πεδίο τα έτη 2013 και 2014. Τον ευχαριστώ, επίσης, για τις αναλύσεις στο εργαστήριο που πραγματοποίησε, τις σημαντικές παρατηρήσεις του, καθώς και για την άριστη συνεργασία που είχαμε σε όλα τα επίπεδα.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην υπεύθυνη χημικό του εργαστηρίου Υδρογεωχημική Μηχανική και Αποκατάσταση Εδαφών, Λίλη Σάρου, για τις αναλύσεις βαρέων μετάλλων και κατιόντων που πραγματοποίησε στο ICP-MS. Θα ήθελα να εκφράσω και ένα μεγάλο ευχαριστώ στην χημικό του εργαστηρίου Στέλλα Βουτσαδάκη για όλες τις αναλύσεις οργανικού άνθρακα και ολικού αζώτου που πραγματοποίησε στα δείγματα εδάφους, εδαφικών διαλυμάτων και φυτικού ιστού. Τις ευχαριστώ, επίσης, για την συμβουλευτική υποστήριξη και καθοδήγησή τους στις φυσικές και χημικές αναλύσεις που πραγματοποίησα στο εργαστήριο, αλλά και για την έγκαιρη εξασφάλιση του απαραίτητου υλικού και των αντιδραστηρίων που απαιτούνταν.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά την Συνεργάτιδα του εργαστηρίου, Διπλωματούχο Μηχανικό της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Ντίνα

Μοιρογιώργου, για την πολύτιμη βοήθειά της στην έγκαιρη αναβάθμιση του κώδικα του μοντέλου 1D-ICZ. Ακόμα, ευχαριστώ τις Δρ. Σταμάτη Φωτεινή, Ανδρονίκη (Νίνα) Παπαφιλίππáκη και Μυρτώ Τσικνιά για τις πολύτιμες συμβουλές τους στην εκπόνηση τις διατριβής. Ευχαριστώ θερμά και όλους τους συναδέλφους-μέλη των εργαστηρίων για το όμορφο κλίμα συνεργασίας και συνύπαρξης που αναπτύχθηκε μεταξύ μας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να σταθώ και να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους: Διονύση Ευσταθίου, Σωτηρία Πανακούλια, Σοφία Νεραντζάκη, Μαρία Λιλλή, οι οποίοι είχαν τη δική τους ξεχωριστή συμβολή στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον φίλο μου Δανιήλ Μωραΐτη, για τις πολύτιμες συμβουλές του σχετικά με τις δειγματοληψίες πεδίου, αλλά και για τις αναλύσεις ορυκτολογικής σύνθεσης που πραγματοποίησε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Π.Κ.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους υπεύθυνους των εργαστηρίων α) Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας καθώς και β) Εμπλουτισμού της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Π.Κ. για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήριά τους. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον βιολόγο Salvatore Pasta και τον δασολόγο Δήμο Δημητρίου για την αναγνώριση των φυτικών ειδών της αυτοφυούς βλάστησης που αναπτύχθηκε στον αγρό ενδιάμεσα των καλλιεργητικών περιόδων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Μανώλη Κοκάκη, που ήταν υπεύθυνος για την καθημερινή συντήρηση των φυτών, αλλά και για την πολύτιμη βοήθειά του που πρόσφερε στην προετοιμασία του εδάφους για την καλλιέργεια, όπως επίσης και στον κ. Παντελή Καραγιαννάκη για την 4ετή παραχώρηση του αγροτεμαχίου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

Την ΔΕΔΙΣΑ Χανίων ευχαριστώ ιδιαίτερα για την ευγενική χορηγία του κόμποστ που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, καθώς και τον κ. Ψαρολογάκη για την χορηγία των φυτών.

Ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου Νίκο, Αντώνη και Χρήστο για την ψυχολογική υποστήριξη που μου πρόσφεραν για την ολοκλήρωση της διατριβής.

Είμαι βαθιά ευγνώμων στους γονείς μου, Γιάννη και Ελένη, στις αδελφές μου Ειρήνη και Θεοδώρα, καθώς και στην Σίσσυ και στην Ναταλία για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια που είναι πάντα δίπλα μου.

Χανιά, 26 Φεβρουαρίου 2018

Μανώλης Κοτρωνάκης

αφιερώνεται στους γονείς μου Γιάννη και Ελένη...

... στην Σίσσυ και στην Ναταλία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
Αναφορές.....	9
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	11
2.1 Αρχές Οικολογίας Χερσαίων Οικοσυστημάτων	11
2.1.1 Ποιότητα Εδάφους και Υπηρεσίες Οικοσυστημάτων	11
2.1.2 Η Κρίσιμη Ζώνη της Γης.....	12
2.1.3 Ροές νερού σε ένα χερσαίο οικοσύστημα.....	15
2.1.4 Ροές άνθρακα σε ένα χερσαίο οικοσύστημα – Συσώρευση οργανικής ύλης.....	17
2.1.5 Ροές αζώτου σε ένα χερσαίο οικοσύστημα	21
2.1.6 Η Δομή του εδάφους.....	24
2.1.7 Θρέψη φυτών	31
2.2 Υποβάθμιση Εδαφών σε Γεωργικά Εδάφη	34
2.3 Στρατηγικές Διαχείρισης του Εδάφους για μια Βιώσιμη Γεωργία	36
2.3.1 Εμπλουτισμός των εδαφών με οργανική ύλη	36
2.3.2 Ζωική κοπριά	37
2.3.3 Παραγωγή κόμποστ από το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων	38
2.3.4 Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής.....	41
2.4 Μοντελοποίηση Εδαφικών Οικοσυστημάτων	43
2.5 Η Καλλιέργεια της Τομάτας.....	47
Αναφορές.....	48
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	53
3.1 Επιλογή Πειραματικού Αγρού	53
3.2 Κλιματικές και Μετεωρολογικές Συνθήκες της Ευρύτερης Περιοχής	55
3.3 Πειραματικός Σχεδιασμός.....	56
3.4 Εφαρμογή Ανόργανων και Οργανικών Λιπασμάτων.....	66
3.5 Δειγματοληψίες και Αναλύσεις Εδάφους.....	68
3.6 Δειγματοληψίες και Αναλύσεις Εδαφοβελτιωτικών	79
3.7 Δειγματοληψίες και Αναλύσεις Εδαφικού Διαλύματος	80

3.8	Δειγματοληψίες και Αναλύσεις Φυτικού Ιστού	82
3.9	Στατιστική Επεξεργασία	83
	Αναφορές.....	84
4.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ στις ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΘΡΕΨΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ “SOLANUM LYCOPERSICUM”	85
	Περίληψη.....	85
4.1	Γεωλογικός και Εδαφικός Χαρακτηρισμός.....	86
4.2	Ιδιότητες Εδαφοβελτιωτικών	89
4.3	Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Αρδευτικού και Βρόχινου Νερού	90
4.4	Υγρασία Εδάφους	95
4.5	Συνολικές Προστιθέμενες Ποσότητες C , N, P και K στο Έδαφος.....	96
4.6	Επίδραση Μεταχείρισης και Σταδίου Ανάπτυξης της Καλλιέργειας στις Χημικές-Βιοχημικές Ιδιότητες του Εδάφους.....	99
4.6.1	pH	101
4.6.2	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (Ec)	104
4.6.3	Εδαφικός Οργανικός Άνθρακας και Ολικό Άζωτο.....	106
4.6.4	Ενεργές Δεξαμενές Οργανικής Ύλης.....	114
4.6.4.1	Σωματιδιακή Οργανική Ύλη	114
4.6.4.2	Διαλυτή Οργανική Ύλη.....	118
4.6.4.3	Δυνητικά Διαλυτή Οργανική Ύλη	122
4.6.4.4	Δυνητικά Ανοργανοποιησιμο Άζωτο.....	124
4.6.4.5	Δείκτης Αρωματικότητας Οργανικής Ύλης	126
4.6.5	Ανόργανες μορφές αζώτου	129
4.6.5.1	Διαθέσιμο Εδαφικό Άζωτο	129
4.6.5.2	Μεταβολές της συγκέντρωσης NO ₃ -N.....	131
4.6.5.3	Μεταβολές της συγκέντρωσης NH ₄ -N.....	133
4.6.5.4	Ρυθμοί Ανοργανοποίησης και Νιτροποίησης.....	134
4.6.6	Διαθέσιμος Εδαφικός Φώσφορος (Olsen-P)	139
4.7	Επίδραση της Οργανικής Λίπανσης στην Απόδοση της Καλλιέργειας και στη Θρέψη των Φυτών	142
4.7.1	Παραγωγή Βιομάζας και Απόδοση Καλλιέργειας.....	142

4.7.2	Συγκέντρωση των Θρεπτικών Στοιχείων στα Φύλλα, στα Στελέχη και στους Καρπούς του Φυτού	145
4.7.3	Συσώρευση και Ποσοστά Πρόσληψης των Θρεπτικών Στοιχείων N, P και K στο Υπέργειο Μέρος του Φυτού	151
4.8	Συσχετίσεις - Παραγοντική Ανάλυση	153
4.8.1	Εδαφικές παράμετροι	153
4.8.2	Παράμετροι φυτού	157
4.9	Συζήτηση - Συμπεράσματα.....	162
	Αναφορές.....	165
5.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	171
	Περίληψη.....	171
5.1	Αποτελέσματα	172
5.1.1	Κατανομή σωματιδίων και συσσωματωμάτων στο αρχικό έδαφος.....	172
5.1.2	Σπάσιμο συσσωματωμάτων λόγω μηχανικής κατεργασίας του εδάφους....	173
5.1.3	Δημιουργία συσσωματωμάτων εντός καλλιεργητικής περιόδου.....	175
5.1.4	Μακροχρόνια επίδραση μεταχείρισης στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων	177
5.1.5	Κατανομή C και N στα συσσωματώματα.....	180
5.1.5.1	Περιεκτικότητα μακρο- και μικρο- συσσωματωμάτων σε OC και N.....	180
5.1.5.2	Κατανομή σωματιδιακής οργανικής ύλης στα συσσωματώματα	182
5.1.6	Συσχετίσεις - Παραγοντική Ανάλυση	184
5.2	Συμπεράσματα	190
	Αναφορές.....	191
6.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	193
	Περίληψη.....	193
6.1	Περιγραφή και Βαθμονόμηση Μοντέλου 1D-ICZ.....	194
6.1.1	Περιγραφή του μοντέλου	194
6.1.2	Στρατηγική προσομοίωσης και αρχικοποίηση μοντέλου (Model Setup)	195
6.1.2.1	Αρχικοποίηση μεταφοράς θερμότητας, και διαλυμένων ουσιών (HYDRUS-1D)	197
6.1.2.2	Αρχικοποίηση μεταβολών βιομάζας (PROSUM).....	199

6.1.2.3	Αρχικοποίηση Οργανικού Άνθρακα, συσσωμάτωσης και δομής του εδάφους 203	
6.1.2.4	Στρατηγική βαθμονόμησης του μοντέλου	204
6.2	Αποτελέσματα	206
6.2.1	Φυτική Ανάπτυξη και Υπέργεια Καθαρή Πρωτογενής Παραγωγή	206
6.2.2	Οργανικός άνθρακας του εδάφους και SOC που σχετίζεται με τα συσσωματώματα.....	211
6.2.3	Απόθεμα αζώτου στο έδαφος	213
6.2.4	Σταθερότητα συσσωματωμάτων εδάφους στη διαβροχή.....	215
6.2.5	Προς την ανάπτυξη ενός «Δείκτη Εδαφικής Αειφορίας».....	217
6.3	Συμπεράσματα	221
	Αναφορές.....	222
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	223
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	227
	Παράρτημα I: Σύγκριση Μεταξύ Παρατηρούμενων και Προσομοιωμένων Τιμών Θρεπτικών Συστατικών Εδαφικού Διαλύματος.....	227
	Παράρτημα II: Φωτογραφίες των Ζιζανίων που Αναπτύχθηκαν στον Αγρό.....	228
	Παράρτημα III: Εργασίες που προέκυψαν από την παρούσα Διατριβή	232

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Μετεωρολογικά στοιχεία περιοχής μελέτης (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).....	55
Πίνακας 3.2. Ημερομηνία αρχής και τέλους καλλιεργητικής περιόδου	59
Πίνακας 3.3. Στάδια ανάπτυξης καλλιέργειας υπαίθριας τομάτας	60
Πίνακας 3.4. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 1 ^η καλλιεργητική περίοδο.....	64
Πίνακας 3.5. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 2 ^η καλλιεργητική περίοδο.....	64
Πίνακας 3.6. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 3 ^η καλλιεργητική περίοδο	65
Πίνακας 3.7. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 4 ^η καλλιεργητική περίοδο.....	65
Πίνακας 3.8. Πρωτόκολλο υγρής χώνευσης στερεών δειγμάτων.....	74
Πίνακας 3.9. Όρια ανίχνευσης μεθόδων και γραμμικό εύρος καμπυλών βαθμονόμησης ICP-MS 7500cx.....	75
Πίνακας 4.1. Χημικές ιδιότητες του εδάφους και των οργανικών υποστρωμάτων.	87
Πίνακας 4.2. Στοιχειακή ανάλυση δείγματος αρχικού εδάφους.	88
Πίνακας 4.3. Ορυκτολογική σύνθεση εδάφους	88
Πίνακας 4.4. Πρόγραμμα άρδευσης στη διάρκεια των τεσσάρων ετών (2011-2014).	90
Πίνακας 4.5. Χημικός χαρακτηρισμός του αρδευτικού και του βρόχινου νερού. Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών.	91
Πίνακας 4.6. Υπολογισμός αθροίσματος κατιόντων και ανιόντων στο αρδευτικό νερό	92
Πίνακας 4.7. Περιεχόμενη υγρασία δειγμάτων κατά τις δειγματοληψίες. Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών.....	95
Πίνακας 4.8. Εισερχόμενες ποσότητες συνολικού οργανικού άνθρακα ($t\ TOC \cdot ha^{-1}$) στο έδαφος. "IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.....	97
Πίνακας 4.9. Εισερχόμενες ποσότητες ολικού αζώτου ($kgTN \cdot ha^{-1}$), φωσφόρου ($kgTP \cdot ha^{-1}$) και καλίου ($kgTK \cdot ha^{-1}$) στο έδαφος. "IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.....	98
Πίνακας 4.10. Επισκόπηση τιμών στατιστικής σημαντικότητας (p -values) από την ανάλυση διακύμανσης κατά δύο παράγοντες (two-way ANOVA) δείχνοντας την επίδραση της μεταχείρισης (ανόργανη λίπανση, κόμποστ, κοπριά και μίγμα 70% κόμποστ και 30% κοπριά) και του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας στις χημικές-βιοχημικές ιδιότητες του εδάφους σε βάθος 0–15, 15–30 και 30–50 εκ., για κάθε έτος ξεχωριστά. Με έντονα γράμματα σημειώνονται οι τιμές όπου $p < 0,05$	100
Πίνακας 4.11. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) και της άρωσης στα αποθέματα ($t \cdot ha^{-1}$) του εδάφους σε ολικό οργανικό άνθρακα (TOC) και ολικό άζωτο (TN) και στα αποθέματα ($t \cdot ha^{-1}$) και στην ποσοστιαία σύσταση (%) του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POM-C) και αζώτου (POM-N), καθώς και στο λόγο POM-C : POM-N. Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών. Εντός της ίδιας δειγματοληψίας αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$	117
Πίνακας 4.12. Ποσότητες εδαφικού ανόργανου αζώτου σε $gN \cdot m^{-2}$ ή $kgN \cdot stremma^{-1}$ εδάφους στις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών.....	130
Πίνακας 4.13. Επί τοις εκατό (%) περιεκτικότητα του εδαφικού ανόργανου αζώτου σε νιτρικό άζωτο στις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M".	131
Πίνακας 4.14. Καθαρός ρυθμός ανοργανοποίησης αζώτου (NNMR, σε $mg (NH_4^+ - N + NO_3^- - N) \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$) στις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι τιμές μέσα στην παρένθεση αντιστοιχούν στα τυπικά σφάλματα.	135

Πίνακας 4.15. Επίδραση της μεταχείρισης στην περιεκτικότητα του ολικού N (% ξ.β.), K ⁺ (% ξ.β.) και P ³⁺ (% ξ.β.) στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού <i>Solanum Lycopersicum</i>	148
Πίνακας 4.16. Επίδραση της μεταχείρισης στην περιεκτικότητα του Ca ²⁺ (% ξ.β.), Mg ²⁺ (% ξ.β.), Na ⁺ (ppm) και Zn ²⁺ (ppm) στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού <i>Solanum Lycopersicum</i>	149
Πίνακας 4.17. Επίδραση της μεταχείρισης στην περιεκτικότητα του Fe ²⁺ (ppm), Cu ²⁺ (ppm), Mn ²⁺ (ppm) και B ⁺ (ppm) στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού <i>Solanum Lycopersicum</i>	150
Πίνακας 4.18. Συσώρευση (kg·ha ⁻¹) και ποσοστά πρόσληψης (%) των θρεπτικών στοιχείων N, P και K στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού <i>Solanum Lycopersicum</i>	152
Πίνακας 4.19. Συντελεστές συσχέτισης των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κύριων συνιστωσών.....	154
Πίνακας 4.20. Αποτελέσματα της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities).....	155
Πίνακας 4.21. Ποσοστά διακύμανσης συνιστωσών.....	155
Πίνακας 4.22. Τελικές παραγοντικές επιβαρύνσεις των εδαφικών παραμέτρων στις κύριες συνιστώσες.....	155
Πίνακας 4.23. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων της θρεπτικής κατάστασης και της απόδοσης του φυτού που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κύριων συνιστωσών. Η παραγωγή βιομάζας (στελέχη, φύλλα, καρποί) αναφέρεται σε ξηρό βάρος.	157
Πίνακας 4.24. Τεστ KMO και Bartlett's.....	158
Πίνακας 4.25. Αποτελέσματα της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities) του φυτού.....	158
Πίνακας 4.26. Ποσοστά διακύμανσης κύριων συνιστωσών παραμέτρων φυτού.....	160
Πίνακας 4.27. Τελικές παραγοντικές επιβαρύνσεις των εδαφικών παραμέτρων στις κύριες συνιστώσες.....	160
Πίνακας 5.1. Ρυθμοί σχηματισμού μακρο-συσσωματωμάτων (mo ⁻¹). "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30.	177
Πίνακας 5.2. Κατανομή OC και N (g·kg ⁻¹ ολικού εδάφους) και λόγος C:N στα 3 κλάσματα συσσωματωμάτων (>250 μm, 53-250 μm, <53 μm), σε διάφορες ημερομηνίες. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": μίγμα κόμποστ και κοπριά. Εντός της ίδιας δειγματοληψίας, αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για p<0,05.....	181
Πίνακας 5.3. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των δεικτών σταθερότητας των συσσωματωμάτων και των διαφόρων κλασμάτων της εδαφικής οργανικής ύλης.	184
Πίνακας 5.4. Συντελεστές συσχέτισης των εδαφικών και φυτικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κύριων συνιστωσών. ^a	185
Πίνακας 5.5. Τεστ KMO and Bartlett's.....	185
Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities).....	186
Πίνακας 5.7. Ποσοστά διακύμανσης κύριων συνιστωσών εδαφικών και φυτικών παραμέτρων.....	186
Πίνακας 5.8. Τελικές παραγοντικές επιβαρύνσεις των εδαφικών και φυτικών παραμέτρων στις κύριες συνιστώσες.....	187
Πίνακας 6.1. Προσομοίωση πειραματικού αγρού.....	196
Πίνακας 6.2. Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση της μεταφοράς νερού και θερμότητας.....	198
Πίνακας 6.3. Αρχικές συγκεντρώσεις στο εδαφικό διάλυμα.	199
Πίνακας 6.4. Ποσοστιαία κατανομή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγής για την ανάπτυξη του μυκορριζικού ποώδη φυτού, την ανάπτυξη της ρίζας, τα εκκρίματα των ριζών και τις μεταφορές από τις ρίζες προς τις μυκόρριζες.....	200
Πίνακας 6.5. Σταθερές παράμετροι του PROSUM.....	202
Πίνακας 6.6. Κατανομή αρχικών δεξαμενών OC στους 3 τύπους WSA για κάθε εδαφικό ορίζοντα... ..	203
Πίνακας 6.7. Αρχική κατανομή των σωματιδίων-συσσωματωμάτων μεγέθους αργίλου-ιλύος (< 53μm) και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2 and AC3 κλάσματα των συσσωματωμάτων σε κάθε ένα από τα 3 προφίλ εδάφους (< 20 cm, 20 - 40 cm, > 40 cm).	203

Πίνακας 6.8. Προσομοιωμένες ροές μάζας (σχετιζόμενες με τον C και τα στραγγίσματα) και δείκτες ποιότητας εδαφικής δομής στα 4 έτη προσομοίωσης.....	217
Πίνακας S1. Σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενων (obs) και προσομοιωμένων (sim) τιμών των pH, Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα (DOC), Ολικού Αζώτου (TN), Νιτρικού Αζώτου (N-NO_3^-), Φωσφόρου φωσφορικών ιόντων (P-PO_4^{3-}), Θεικών Ιόντων (SO_4^{2-}) και όξινου ανθρακικού ιόντος (HCO_3^-).	227

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Η Κρίσιμη Ζώνη της Γης (http://criticalzone.org/national/research/the-critical-zone-1national/).	13
Σχήμα 2.2. Ροές υλικών, ενέργειας και γενετικού υλικού μέσα στην ΚΖ. Οι ροές αυτές προκύπτουν από τις περιβαλλοντικές διεργασίες της Κρίσιμης Ζώνης και παρέχουν αγαθά και υπηρεσίες για ανθρώπινο όφελος. Τα μεγάλα βέλη αντιπροσωπεύουν ροές υλικών και ενέργειας, οι μεγάλοι έντονοι χαρακτήρες αντιπροσωπεύουν τα αγαθά και τις υπηρεσίες και οι μικροί χαρακτήρες αντιστοιχούν στα κύρια περιβαλλοντικά στοιχεία της Κρίσιμης Ζώνης. (Banwart et al. 2012)....	14
Σχήμα 2.3. Υδρολογική ισορροπία ενός οικοσυστήματος (Waring & Running 1998).	16
Σχήμα 2.4. Επισκόπηση των κύριων ροών άνθρακα ενός οικοσυστήματος. (Chapin et al. 2012)	18
Σχήμα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση των συνδυασμένων κύκλων άνθρακα και αζώτου στα εδάφη. (Nikolaidis and Bidoglio, 2013)	20
Σχήμα 2.6. Απλοποιημένος κύκλος εδαφικού αζώτου (Chapin et al. 2012).	23
Σχήμα 2.7. Τρίγωνο εδαφικής υφής: ποσοστά άμμου, ιλύς και αργίλου στις 12 κλάσεις του εδάφους.	24
Σχήμα 2.8. Η σχέση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της σταθερότητας των συσσωματωμάτων και των λειτουργιών του εδάφους. (Six & Paustian 2014).....	25
Σχήμα 2.9. Το εννοιολογικό πρότυπο του Monnier, όπου παρουσιάζεται σχηματικά η δυναμική της σταθερότητας των συσσωματωμάτων, μετά από την προσθήκη τριών οργανικών υποστρωμάτων (πράσινη κοπριά, άχυρο και αποσυντιθέμενη κοπριά) και σε σχέση με τη δυναμική των παραγόντων που επηρεάζουν τη συσσωμάτωση (μικροοργανισμοί, προ-χουμικές ουσίες και χουμικά συστατικά). Ο Monnier αναγνώρισε τρεις περιόδους (που εμφανίζονται ως ζώνες A, B και C) κατά τις οποίες συμβαίνουν οι κύριες διαδικασίες συσσωμάτωσης (Monnier, G., 1965, αναφερόμενο από Abiven et al. 2009).	28
Σχήμα 2.10. Εννοιολογικό μοντέλο σχηματισμού και διάσπασης συσσωματωμάτων. (Stamati, et al., 2013b).....	30
Σχήμα 2.11. Μηχανισμοί μετακίνησης ανόργανων θρεπτικών συστατικών προς τη ριζόσφαιρα. [AGRONOMY 4052 (http://www.soilfertility.lsu.edu/Agro4052.htm)]	31
Σχήμα 2.12. Σχέση μεταξύ των οδηγών που αλλάζουν το οικοσύστημα του εδάφους σε σχέση με τις λειτουργίες και τις απειλές του εδάφους (Nikolaidis 2011a).	34
Σχήμα 2.13. Οργανική Ύλη: Πηγή θρεπτικών για τα φυτά και δρώσα δύναμη των φυσικών, χημικών και βιολογικών μετασχηματισμών στα χερσαία οικοσυστήματα.	36
Σχήμα 2.14. Σχηματική αναπαράσταση του τροποποιημένου μοντέλου CAST που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο 1D-ICZ.....	45
Σχήμα 3.1. Πειραματικός Σχεδιασμός. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν το δίκτυο άρδευσης, ενώ οι σκιαγραφημένες περιοχές απεικονίζουν τις περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες εδάφους.....	56
Σχήμα 4.1. Εύρεση της υφής του εδάφους (ίλυο-πηλώδες) με τη χρήση του τριγώνου της μηχανικής σύστασης.	86
Σχήμα 4.2. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του pH στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους.	

Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	103
Σχήμα 4.3. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Ec) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	105
Σχήμα 4.4. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του εδαφικού οργανικού άνθρακα (TOC, g/kg) σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	107
Σχήμα 4.5. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου (TN, g/kg) σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	108
Σχήμα 4.6. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του λόγου οργανικού άνθρακα προς άζωτο (TOC/TN) σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	109
Σχήμα 4.7. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του εδαφικού οργανικού άνθρακα (TOC) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	110
Σχήμα 4.8. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του ολικού αζώτου (TN) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	112
Σχήμα 4.9. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του λόγου άνθρακα προς άζωτο (TOC/TN) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	113
Σχήμα 4.10. Η επίδραση της προσθήκης οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος (ενσωμάτωση ζιζανίων και υπολειμμάτων καλλιεργειών, κόμποστ ΑΣΑ και κοπριά από αιγοπρόβατα), στις συγκεντρώσεις του ολικού εδαφικού οργανικού άνθρακα (TOC) και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POM-C) στις μεταχειρίσεις (α) της ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) του	

κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) της κοπριάς από αιγοπρόβατα ("M") και (δ) του μίγματος κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M") σε αναλογία 70:30.	116
Σχήμα 4.11. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στις συγκεντρώσεις (α) του εκχυλισμένου διαλυτού οργανικού άνθρακα (ESOC), (β) του εκχυλισμένου διαλυτού οργανικού αζώτου (ESON), (γ) του λόγου ESOC/ESON και (δ) η ποσοστιαία σύσταση του ESOC στον εδαφικό οργανικό άνθρακα, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπώδευση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	120
Σχήμα 4.12. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού άνθρακα (ESOC, mg/kg) και οργανικού αζώτου (ESON, mg/kg) στην αρχή (Διαγραμ. α & γ) και στο τέλος της περιόδου (Διαγραμ. β & δ), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	121
Σχήμα 4.13. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στις συγκεντρώσεις (α) του δυνητικά διαλυτού οργανικού άνθρακα (PSOC), (β) του δυνητικά διαλυτού οργανικού αζώτου (PSON), (γ) του λόγου ESOC/PSOC και (δ) του λόγου ESON/PSON, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπώδευση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	123
Σχήμα 4.14. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του δυνητικά διαλυτού οργανικού άνθρακα (PSOC, mg/kg) και αζώτου (PSON, mg/kg) στην αρχή (Διαγραμ. α & γ) και στο τέλος της περιόδου (Διαγραμ. β & δ), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	124
Σχήμα 4.15. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στις συγκεντρώσεις του (α) δυνητικά ανοργανοποιήσιμου αζώτου (PMN), (β) του διαλυτού οργανικού αζώτου που δεν υφίσταται ανοργανοποίηση και (γ) του λόγου PMN/TN και (δ) του % ποσοστού της δυνητικά διαλυτού αζώτου που ανοργανοποιείται (PSN-PMN)*PSN1- στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπώδευση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	125
Σχήμα 4.16. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του δυνητικά ανοργανοποιήσιμου αζώτου (PMN, mg/kg) στην αρχή (Διαγραμμα α) και στο τέλος της περιόδου (Διάγραμμα β), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	126
Σχήμα 4.17. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στο λόγο της απορρόφησης της UV ακτινοβολίας στα 280 nm προς τη συγκέντρωση (α) του ESOC (SUVA _{ESOC}) και (β) του PSOC (SUVA _{PSOC}), στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπώδευση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	128
Σχήμα 4.18. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της SUVA _{ESOC} και της SUVA _{PSOC} στην αρχή (Διαγραμ. α & γ) και στο τέλος της περιόδου (Διαγραμ. β & δ), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος	

αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα. Οι μπάρες με διαφορετικά γράμματα (εντός της ίδιας δειγματοληψίας) υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.	128
Σχήμα 4.19. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του νιτρικού αζώτου ($\text{NO}_3\text{-N}$) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	132
Σχήμα 4.20. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	134
Σχήμα 4.21. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στη μεταβολή του Δυνητικού Ρυθμού Νιτροποίησης (PNR) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα. Οι μπάρες με ίδια γράμματα (εντός της ίδιας δειγματοληψίας) υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.	136
Σχήμα 4.22. Η επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης δικυανοδιαμιδίου στο Καθαρό (Δυνητικό) Ρυθμό Νιτροποίησης, NNR(DCD), αντιπαραβαλλόμενη με τον Δυνητικό Ρυθμό Νιτροποίησης, PNR, στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. "IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	139
Σχήμα 4.23. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του διαθέσιμου Φωσφόρου (Olsen-P) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	140
Σχήμα 4.24. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην: (α) συνολική παραγωγή καρπού (νωπό βάρος) ανά φυτό και (β) συνολική παραγωγή υπέργειας βιομάζας (ξηρό βάρος) ανά φυτό, για τα έτη 2011, 2012, 2013 και 2014. Η διάρκεια της κάθε καλλιεργητικής περιόδου ήταν 118, 146, 149 και 122 ημέρες, αντίστοιχα. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα. Οι μπάρες με διαφορετικά γράμματα (εντός της ίδιας καλλιεργητικής περιόδου) υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.	143
Σχήμα 4.25. Συνολική παραγωγή στελεχών, φύλλων και καρπών (ξηρό βάρος) ανά φυτό για τα έτη: (α) 2011, (β) 2012, (γ) 2013 και (δ) 2014. "IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	144
Σχήμα 4.26. Βήματα παραγοντικής ανάλυσης.	153
Σχήμα 4.27. Διάγραμμα φόρτισης των παραγόντων μετά την ορθογωνική περιστροφή μέγιστης διακύμανσης, (α), και διαγράμματα παραγοντικής βαθμολόγησης που δείχνουν τη θέση των μεταχειρίσεων, (β), των σταδίων ανάπτυξης του φυτού, (γ), και των εδαφικών στρώσεων, (δ), ως προς τις 2 κύριες συνιστώσες (Παράγοντες I και II). "IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC":	

Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30. S1: Στάδιο Βλαστητικής ανάπτυξης, S2: Στάδιο Άνθησης και καρπόδεσης, S3: Στάδιο Ωρίμανσης καρπών, S4: Στάδιο Συγκομιδής.....	156
Σχήμα 4.28. Διάγραμμα Scree των ιδιοτιμών.	159
Σχήμα 4.29. Διάγραμμα κύριων συνιστωσών (παραγόντων) στον ορθογωνικό χώρο.	161
Σχήμα 5.1. Κατανομή σωματιδίων και συσσωματωμάτων στο αρχικό έδαφος. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	172
Σχήμα 5.2. Κατανομή των συσσωματωμάτων που προσδιορίστηκαν με ξηρή κοσκίνηση (DSA) στο αρχικό έδαφος και στα εδάφη των μεταχειρίσεων μετά την έναρξη του πειράματος. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	173
Σχήμα 5.3. Κατανομή υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) στο αρχικό έδαφος και στα εδάφη των μεταχειρίσεων αμέσως την έναρξη του πειράματος. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	174
Σχήμα 5.4. Κατανομή υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) στα εδάφη των μεταχειρίσεων πριν (Διαγραμ. α & γ) και μετά (Διαγραμ. β & δ) την υποβολή τους σε μηχανική κατεργασία, προκειμένου να ενσωματωθούν τα οργανικά λιπάσματα. Για λόγους συγκρισιμότητας, πραγματοποιήθηκε άροση και στη μεταχείριση της ανόργανης λίπανσης. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	175
Σχήμα 5.5. Ποσοστιαία αναλογία των υδατοσταθερών μακροσυσσωματωμάτων μετά από διόρθωση του ποσοστού σε άμμο (WSAsand-free > 250 μm), στα επιφανειακά εδάφη (0-15 εκ.) των μεταχειρίσεων στην αρχή και στο τέλος των καλλιεργητικών περιόδων 2011, 2013 και 2014. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.	176
Σχήμα 5.6. (α) Ποσοστό υδατοσταθερών μακροσυσσωματωμάτων, μετά από διόρθωση του ποσοστού σε άμμο (WSAsand-free > 250 μm), και (β) Μέση σταθμισμένη διάμετρος των υδατοσταθερών κλασμάτων (MWD), στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.....	178
Σχήμα 5.7. Αποθέματα (σε t·ha ⁻¹) σωματιδιακού και απορροφούμενου στα ανόργανα σωματίδια του εδάφους, οργανικού άνθρακα (POM-C, Mineral associated-C) και αζώτου (POM-N, Mineral associated-N), στα κλάσματα των μακρο- και μικρο- συσσωματωμάτων, στο τέλος της 4ης καλλιεργητικής περιόδου. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι τιμές πάνω από τις μπάρες αντιστοιχούν στην αναλογία σωματιδιακού C ή N προς απορροφούμενο στα ανόργανα σωματίδια C ή N.	183
Σχήμα 5.8. Διάγραμμα ιδιοτιμών κύριων συνιστωσών σε φθίνουσα σειρά (Scree Plot).	187
Σχήμα 5.9. (α) Διάγραμμα φόρτισης των παραγόντων μετά την ορθογωνική περιστροφή μέγιστης διακύμανσης και (β) Διάγραμμα παραγοντικής βαθμολόγησης που δείχνει τη θέση των μεταχειρίσεων ως προς τις 2 κύριες συνιστώσες (Παράγοντες I και II). "IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "Μ": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+Μ": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.....	188
Σχήμα 6.1. Οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του εδάφους.	198
Σχήμα 6.2. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του C που συσσωρεύονται στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (τομάτα και ζιζάνια), για κάθε μεταχείριση, κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("Μ") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+Μ"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.	206

Σχήμα 6.3. Σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών υπέργειας καθαρής πρωτογενούς παραγωγής (ANPP-Above Ground Net Primary Production, g φυτικής βιομάζας m ⁻²). (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Παρουσιάζονται η ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (CV).....	207
Σχήμα 6.4. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του N που συσσωρεύονται στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (τομάτα και ζιζάνια), για κάθε μεταχείριση, κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.	209
Σχήμα 6.5. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του P και του K που συσσωρεύονται στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (τομάτα και ζιζάνια), για κάθε μεταχείριση, κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.....	210
Σχήμα 6.6. Προσομοίωση αποθεμάτων Οργανικού Άνθρακα στο κυρίως χώμα (TOC) και σε κάθε κλάσμα συσσωματώματος (AC1, AC2, AC3), για κάθε μεταχείριση κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η γραμμές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.....	212
Σχήμα 6.7. Προσομοίωση αποθεμάτων Αζώτου στο κυρίως χώμα (TN) και σε κάθε κλάσμα συσσωματώματος (AC1, AC2, AC3), για κάθε μεταχείριση κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η γραμμές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.	214
Σχήμα 6.8. Προσομοίωση κατανομής WSA για κάθε μεταχείριση κατά την 4-ετή περίοδο. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η γραμμές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M").	216
Σχήμα 6.9. Δείκτες βιωσιμότητας (σύννοψη για τους τέσσερις καλλιεργητικούς κύκλους) της μεταχείρισης της ανόργανης λίπανσης ("IF"), του κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), της κοπριάς ("M") και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M").	218
Σχήμα 6.10. Ποσότητες NO ₃ , PO ₄ και K που μετακινήθηκαν προς τα υπόγεια νερά (σύννοψη για τους τέσσερις καλλιεργητικούς κύκλους) της μεταχείρισης της ανόργανης λίπανσης ("IF"), του κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), της κοπριάς ("M") και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M").	219

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Φωτογραφία μακρο-συσσωματωμάτων από έναν ακαλλιέργητο ελαιώνα της Κρήτης. (Nikolaidis and Bidoglio, 2013)	26
Εικόνα 2.2. Ανοιχτές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης. [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]	39
Εικόνα 2.3. Παραγόμενο κόμποστ ΕΜΑΚ Χανίων. Τοποθετείται σε συσκευασία των 30 L και πωλείται σε δίκτυο καταστημάτων σε όλη την Κρήτη. Επιπλέον, γίνεται διάθεσή του και σε σάκους όγκου 0,5 και 1,0 m ³ . [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]	41
Εικόνα 2.4. Υπαίθρια καλλιέργεια τομάτας.	47
Εικόνα 3.1: Λεκάνη Απορροής Ποταμού Κοιλιάρη και θέση πειραματικού αγρού.	54
Εικόνα 3.1. Απεικόνιση του αγρού: (α) πριν τον καθαρισμό του (5/9/2010 - αεροφωτογραφία Google Earth), (β) μετά την αποξίλωση της βλάστησης (Απρίλιος 2011), (γ) κατά τη διαδικασία βαθιάς άρσης (Ιούνιος 2011). (δ) πριν την έναρξη του πειράματος (Ιούλιος 2011).	57
Εικόνα 3.2. (α) Χάραξη περιοχών διαχειρίσεων, (β) Ισοκατανομή ποσοτήτων εδαφοβελτιωτικών, (γ) Προσθήκη εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος και (δ) τελική άρση του χωραφιού.	58
Εικόνα 3.3. Η καλλιέργεια τομάτας στον πειραματικό αγρό.	59
Εικόνα 3.4. Στάγδην άρδευση με 2 γραμμές ανά σειρά φυτών.	60
Εικόνα 3.5. (Α) Ολοκληρωμένο κιτ γεωτρηπάνων για την τοποθέτηση των υγρασιόμετρων. Περιλαμβάνει (i) βάση σταθεροποίησης των τρυπανιών, (ii) τρυπάνι οδηγός, (iii) τρυπάνι τελειώματος, (iv) ράβδο και (v) πορώδους πλαστικοί σωλήνες, (Β) Υγρασιόμετρο τύπου PR2 Profile Probe, Delta-T Devices.	61
Εικόνα 3.6. Τοποθέτηση πλαστικών σωλήνων υποδοχής των υγρασιόμετρων.	61
Εικόνα 3.7. Κεραμικό λυσίμετρο αναρρόφησης πορώδους εδαφικού διαλύματος (Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών).	62
Εικόνα 3.8. Καλλιεργητικές φροντίδες κατά τη διάρκεια του 3ου έτους ανάπτυξης των φυτών.	63
Εικόνα 3.9. Υπολείμματα καλλιέργειας και αυτοφυή βλάστηση (ριζοζιζάνια).	63
Εικόνα 3.9. (α) Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης Χανίων της ΔΕΔΙΣΑ, (β) κοσκίνηση και ενσάκωση υλικού.	67
Εικόνα 3.10. Αεροξήρανση δειγμάτων εδάφους.	69
Εικόνα 3.11. Κλασματοποίηση εδάφους σύμφωνα με τους Stamati, et al. (2013) και Elliott (1986). ..	71
Εικόνα 3.12. Αναλυτής N/C της εταιρείας AnalyticJena.	73
Εικόνα 3.13. Διήθηση εκχυλισμάτων εδάφους (σε 2M KCl).	73
Εικόνα 3.14. (α) Χειροκίνητη αντλία για την άσκηση υποπίεσης και (β) Αναρρόφηση συλλεγμένου δείγματος από κεραμικά αναρροφητικά λυσίμετρα.	80

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα αγροτικής παραγωγής που στηρίζονται αποκλειστικά στη χρήση ανόργανων λιπασμάτων και σκευασμάτων φυτοπροστασίας έχουν ως σκοπό τη μεγιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής, χωρίς ωστόσο να θεωρείται το έδαφος ως ένα οικοσύστημα. Η παραπάνω αγροτική πρακτική έχει οδηγήσει σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος και των οικοσυστημικών υπηρεσιών που προσφέρει το έδαφος, όπως είναι η παραγωγή τροφής, η διήθηση και η μετακίνηση του νερού και των θρεπτικών συστατικών, η βιοποικιλότητα και αποθήκευση οργανικής ύλης. Η ποιότητα του εδάφους και οι λειτουργίες που αυτό επιτελεί συνδέονται άμεσα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη (soil organic matter, SOM) και τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων στην επίδραση του νερού. Η εφαρμογή οργανικών εδαφοβελτιωτικών για την αναπλήρωση της οργανικής ύλης του εδάφους, μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ανάσχεση της υποβάθμισης των οικοσυστημικών υπηρεσιών και της αύξησης της παραγωγής. Στόχος της διατριβής είναι η μελέτη των μετασχηματισμών των ιδιοτήτων του εδάφους και των υπηρεσιών που προσφέρει στην Κρίσιμη Ζώνη (KZ) της Γης, μετά από την εφαρμογή οργανικών εδαφοβελτιωτικών σε έναν πειραματικό αγρό καλλιέργειας τομάτας, που αντιμετωπίζει άμεσα τον κίνδυνο της ερημοποίησης (απώλεια της οργανικής ουσίας στο έδαφος), ως συνέπεια των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών. Βασικό ζητούμενο είναι η ανάδειξη μιας αειφόρου διαχείρισης των γεωργικών εδαφών στην Ελλάδα, με την προσθήκη οργανικών υποστρωμάτων, συνδυάζοντας αυξημένες γεωργικές αποδόσεις με τη βελτίωση των εδαφικών λειτουργιών και της ποιότητας του περιβάλλοντος.

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μια ολιστική και διεπιστημονική προσέγγιση της βελτίωσης της ποιότητας του εδάφους, η οποία συνδυάζει μελέτη πεδίου με προσομοίωση των αποτελεσμάτων. Η μελέτη υλοποιήθηκε σε δύο στάδια: α) το πείραμα αγρού, όπου εφαρμόστηκαν σε ετήσια βάση οργανικά προϊόντα, όπως κόμποστ από αστικά στερεά απόβλητα (κόμποστ ΑΣΑ), χωνεμένη κοπριά αιγοπροβάτων, υπολείμματα καλλιέργειας και αγριόχορτα, σε μία καλλιέργεια τομάτας, και μελετήθηκαν οι μεταβολές των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους και η ανάπτυξη των καλλιεργειών σε βραχυχρόνια (μήνες), αλλά και μακροχρόνια βάση (4 έτη), και β) τη μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων του πειραματικού αγρού, για την ποσοτικοποίηση και συσχέτιση των οικοσυστημικών υπηρεσιών που προσφέρει το έδαφος. Για τη σύγκριση των μεταχειρίσεων που εφαρμόστηκαν κόμποστ ΑΣΑ και κοπριά, χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας η εφαρμογή ανόργανης συμβατικής λίπανσης. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με το Μονοδιάστατο Ολοκληρωμένο Μοντέλο Κρίσιμης Ζώνης Εδάφους (1D-Integrated Critical Zone, 1D-ICZ), που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου SoilTrEC. Με το μοντέλο αυτό είναι δυνατόν να προσομοιωθούν οι μεταβολές της βιομάζας και οι μετασχηματισμοί και δέσμευση του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών, σε σχέση με τις μεταβολές της δομής του εδάφους, της διηθητικής ικανότητας του νερού και της βιοποικιλότητας.

Τα αποτελέσματα του πειράματος στο πεδίο έδειξαν ότι η αγροτική πρακτική της εφαρμογής οργανικών εδαφοβελτιωτικών αύξησε σημαντικά την οργανική ουσία του εδάφους, εμπλουτίζοντάς το με τις απαραίτητες ποσότητες διαθέσιμου αζώτου και φωσφόρου για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Η εφαρμογή των οργανικών υποστρωμάτων ενίσχυσε τη φυσική δομή του εδάφους τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια κλίμακα. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στη διαβροχή παρατηρήθηκαν στο έδαφος που

εφαρμόστηκε κόμποστ ΑΣΑ. Γενικά, το κόμποστ ΑΣΑ είχε σημαντική επίδραση στη συσσωμάτωση και στον εμπλουτισμό του εδάφους με εδαφική οργανική ύλη. Η χρήση μίγματος κόμποστ και κοπριάς εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα γιατί συνδυάζει τη θετική επίδραση του κόμποστ στη δομή του εδάφους, με το ωφέλιμο μικροβιακό φορτίο και τα θρεπτικά συστατικά που προσφέρει η κοπριά για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Η προσομοίωση των δεδομένων αγρού για όλες τις μεταχειρίσεις στέφθηκε από μεγάλη επιτυχία. Το μοντέλο είναι σε θέση να αναπαραστήσει την παραγωγή βιομάζας, τη δυναμική του σχηματισμού υδατοσταθερών συσσωματωμάτων και τη δυναμική της δέσμευσης του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών στα διαφορετικά μεγέθη WSA, καθώς επίσης και τη μεταβλητότητα της διήθησης και της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς των ουσιών στο εδαφικό διάλυμα, στις διάφορες μεταχειρίσεις.

Οι βαθμονομημένες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οδήγησαν εν τέλει στην ποσοτικοποίηση δεικτών βασικών εδαφικών λειτουργιών. Η ποσοτικοποίηση των εδαφικών λειτουργιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη δεικτών αειφορίας του εδάφους, προς αξιολόγηση των αντισταθμιστικών οφελών μεταξύ διαφορετικών αγρο-οικολογικών πρακτικών και πρακτικών διαχείρισης αγροτικής γης. Οι παραπάνω δείκτες θα μπορούσαν, επίσης, να ενσωματωθούν σε μεθοδολογίες αξιολόγησης του κύκλου ζωής προϊόντων και υπηρεσιών όπως π.χ. για την επιλογή της καλύτερης μεθόδου διαχείρισης αποβλήτων, καθώς και για την ορθότερη αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων που αφορούν τη δημιουργία οργανικών προϊόντων κατάλληλων για την αειφόρο γεωργία.

ABSTRACT

The agricultural production systems based exclusively on the use of inorganic fertilizers and pesticides aim to maximize agricultural production, without however considering the soil as an ecosystem. This agricultural practice has led to degradation of the environment and the ecosystem services that soil provides, such as food production, filtration and movement of water and nutrients, biodiversity and organic matter storage. Soil quality is directly linked to soil organic matter (SOM) and soil aggregate stability. The application of organic soil improvers for the replenishment of soil organic matter can make a significant contribution to halting the degradation of ecosystem services and to increase primary production. The aim of the dissertation is to study the changes in soil properties and the its services in the Critical Zone, following the application of organic substrates to an experimental field of tomato cultivation, that faces the risk of desertification (loss of organic soil), as a consequence of foreseeable climate change. The key issue is the emergence of a sustainable management of agricultural land in Greece, with the addition of organic substrates, combining increased agricultural yields with improved soil functions and environmental quality.

This thesis presents a holistic and interdisciplinary approach to soil quality improvement, which combines field study with simulation. The study was carried out in two stages: a) the field experiment, where organic products such as compost from municipal solid waste (compost MSW), digested manure derived from sheep and goats, crop residues and weeds were applied to a tomato crop on a yearly basis and the changes in the physical and chemical properties of the soil and the growth of crops were monitored; and (b) modeling the results of the experimental field for the quantification and correlation of soil ecosystems services. The control treatment used in this field experiment was inorganic fertilization. The simulation was carried out with the 1D-Integrated Critical Zone Model, 1D-ICZ, which has been developed within the framework of the SoilTrEC research project. 1D-ICZ model simulates the changes in biomass and the transformations and accumulation of carbon and nutrients in relation to changes in soil structure, water filtration capacity and biodiversity.

The results of the field experiment showed that the agricultural practice of applying organic soil improvers significantly increased the organic matter of the soil, enriching it with the necessary quantities of available nitrogen and phosphorus for the growth of the crop. The application of organic substrates has enhanced the physical structure of the soil both on a monthly and an annual basis. The application of compost significant improved water stable aggregation. In general, compost had a significant effect on soil aggregation and enrichment with soil organic matter, however its incorporation into the soil did not result in complete coverage of the crop with the necessary quantities of N and P. The use of a mixture of compost and manure shows the best results because it combines the positive effect of compost on the soil structure with the beneficial effect of manure that have in microbial population and the availability of nutrients. The simulation of the field data for all treatments was fulfilled with great success. The model was able to represent the biomass production, the dynamics of the formation of water-stable aggregates and the dynamics of carbon and nutrient accumulation in different WSA sizes, as well as the water filtration and the efficiency of transport of substances in the soil solution, in the various treatments. The calibrated simulations finally led to the quantification of key territorial function indicators.

The simulations eventually led to the quantification of the key soil functions. Quantification of territorial functions can be used to develop soil sustainability indicators to assess the compensatory benefits between different agro-ecological practices and agricultural land management practices. These indicators could also be incorporated into life cycle assessment methodologies, as in the case of selecting the best urban solid waste management method, as well as for assessing investment projects that concern the production of organic amendments applicable to sustainable agriculture.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργική βιωσιμότητα αποσκοπεί να αντιμετωπίσει τις σύγχρονες προκλήσεις όπως είναι η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης τροφίμων, η αυξανόμενη χρήση πρώτων υλών και η κατανάλωση ενέργειας, το πόσιμο νερό, η ερημοποίηση και η χρηματοπιστωτική κρίση. Η συνεχιζόμενη πληθυσμιακή ανάπτυξη, η οποία αναμένεται να φθάσει τα 9 δισεκατομμύρια άτομα έως το 2050, σε συνδυασμό με την αύξηση των καταναλωτικών προτύπων διαβίωσης, κυρίως στον αναπτυσσόμενο κόσμο, θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των αναγκών παραγωγής τροφίμων τα επόμενα 40 χρόνια (Banwart 2011; Nikolaidis 2011). Η εν λόγω πίεση ενισχύεται από την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση για βιοκαύσιμα και τις ενεργειακές καλλιέργειες. Επιπρόσθετα, οι τρέχουσες προβλέψεις των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής πρόκειται να ασκήσουν περαιτέρω σημαντική πίεση στη γεωργία κατά τις προσεχείς δεκαετίες, συμπεριλαμβανομένων την απώλεια της βιοποικιλότητας και την υποβάθμιση της οργανικής ουσίας του εδάφους (Foley et al. 2011). Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται πιο ανησυχητική στις Μεσογειακές χώρες, οι οποίες παρουσιάζουν τα μικρότερα αποθέματα εδαφικού οργανικού άνθρακα στην Ευρώπη, που συνήθως είναι μικρότερα από $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Lugato et al. 2014).

Η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής συμπίπτει με την ανάπτυξη των ανόργανων λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών παρασκευασμάτων και έχει συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της παραγωγής τροφίμων (Amundson et al. 2015). Οι Foley et al. (2011), ανέφεραν ότι, κατά τις τελευταίες 5 δεκαετίες, η αύξηση της χρήσης λιπασμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο ανήλθε σε 500%· γεγονός, το οποίο, σε συνδυασμό με τον διπλασιασμό σχεδόν των αρδευόμενων εκτάσεων καλλιεργήσιμης γης, συνέβαλε στην υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και των υδατινών οικοσυστημάτων, καθώς επίσης και της ικανότητας του εδάφους να δεσμεύει τον άνθρακα και να αποκαθιστά την εδαφική διάβρωση (Amundson et al. 2003; Amundson et al. 2015). Είναι γνωστό ότι τα παραπάνω χημικά σκευάσματα διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο για τις αποδόσεις των καλλιεργειών, ωστόσο η μονοδιάστατη χρήση τους στις εντατικές καλλιέργειες μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια των τροφίμων και να υποβαθμίσει τη γονιμότητα του εδάφους, μέσω της μείωσης των εισροών άνθρακα (και επομένως και των αποθεμάτων θρεπτικών συστατικών) και της μηχανικής άρωσης, η οποία καταστρέφει τα συσσωματώματα και τη δομή του εδάφους (Luo et al. 2010). Παράλληλα, το σύστημα παραγωγής και διανομής των συμβατικών λιπασμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια, οδηγώντας στη ραγδαία αύξηση της ζήτησης των ολοένα εξαντλούμενων ορυκτών πόρων αλλά, παράλληλα, και στην εκτόξευση του κόστους προμήθειάς τους. Η εκτεταμένη χρήση των εμπορικών λιπασμάτων θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του αποτυπώματος άνθρακα (Komnitsas & Doula 2017; Tilman et al. 2011), επιδεινώνοντας τις επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη, ειδικά στις περιοχές που βρίσκονται υπό την επικείμενη απειλή ερημοποίησης, όπως είναι η Κρήτη (Moraetis et al. 2011a).

Ένα κεντρικό στοιχείο της στρατηγικής αντιμετώπισης αυτών των μεγάλων προκλήσεων είναι η διατήρηση ενός υγιούς εδάφους. Ένα υγιές έδαφος μπορεί να οριστεί ως το έδαφος που επιτρέπει στα φυτά να αναπτυχθούν και να φτάσουν στη μέγιστη παραγωγή τους, χωρίς να προσβάλλονται από φυτοπαθογόνους οργανισμούς και χωρίς να απαιτείται η εφαρμογή χημικών λιπασμάτων. Ένα υγιές έδαφος συσχετίζεται άμεσα και πολλές φορές ταυτίζεται με τη γονιμότητα του εδάφους. Η γονιμότητα ενός εδάφους είναι η συνδυασμένη επίδραση των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών που του επιτρέπουν να εκτελεί τις

βασικές του λειτουργίες και τις σχετικές οικολογικές υπηρεσίες: παραγωγή τροφίμων και βιομάζας, δέσμευση ατμοσφαιρικού C στο έδαφος (C sequestration), βιοποικιλότητα, διήθηση νερού και μετασχηματισμό θρεπτικών ουσιών. Η εδαφική οργανική ύλη αποτελεί το κύριο συστατικό της συνταγής για τη διατήρηση ενός υγιούς γόνιμου εδάφους επειδή επηρεάζει σημαντικά τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες και λειτουργίες των εδαφών (Allison 1973; Campbell 1978). Η προσθήκη οργανικού άνθρακα στα γεωργικά εδάφη παρέχει μία πηγή βραδέως απελευθερούμενων θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των φυτών και διεγείρει τη δραστηριότητα της μικροβιακής βιομάζας και των ενζύμων (D. Moraetis et al. 2011b; Franco-Otero et al. 2012), αυξάνει τη βιοποικιλότητα κάτω από το έδαφος, ρυθμίζει την προσφορά θρεπτικών ουσιών και τις αποδόσεις των καλλιεργειών (Fagnano et al. 2011; Rigane & Medhioub 2011) και βελτιώνει τη δομή του εδάφους, μέσω της ενίσχυσης της σταθερότητας των συσσωματωμάτων του εδάφους στις επιδράσεις του νερού. Τα συσσωματώματα με τη σειρά τους προστατεύουν με φυσικό τρόπο την εδαφική οργανική ύλη και συμβάλλουν στη δημιουργία μεγάλων πόρων μέσα στο έδαφος, με έμμεση συνέπεια την ευκολότερη διήθηση του νερού και των διαλυτών θρεπτικών στοιχείων (Banwart 2011), την ανεμπόδιση διείσδυση των ριζών της βλάστησης και στη μείωση της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης των εδαφών (Banwart 2011; Jastrow et al. 2007).

Η υπερθέρμανση του πλανήτη μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην οργανική ουσία του εδάφους, ωστόσο η ακριβής εκτίμηση και πρόβλεψη της SOM στα γεωργικά εδάφη συνδέεται στενά με τα ειδικά χαρακτηριστικά των αγρο-οικοσυστημάτων. Η ισορροπία SOM εξαρτάται περισσότερο από τις ανθρωπογενείς ενέργειες και λιγότερο από την κλιματική αλλαγή (Lugato et al. 2014). Τα οργανικά λιπάσματα-εδαφοβελτιωτικά χρησιμοποιούνται προκειμένου να ενισχυθεί το έδαφος με οργανική ουσία και να βελτιωθεί η γονιμότητά του. Το πιο γνωστό οργανικό λίπασμα που χρησιμοποιείται επί χιλιετίες είναι η **ζωική κοπριά**. Η κοπριά είναι ένα αζωτοκαλιούχο λίπασμα που χρησιμοποιείται πολλές φορές στην περιοχή που παράγεται, χωρίς να απαιτείται η μεταφορά της σε μακρινές αποστάσεις, με έμμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους. Παρόλο αυτά, η τιμή της έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω ζήτησης, με αποτέλεσμα να μην είναι προσιτή σε όλους τους αγρότες. Παράλληλα η διαθεσιμότητα των κτηνοτροφικών αποβλήτων είναι περιορισμένη, καθώς δεν υπάρχουν στην Ελλάδα και στην Κρήτη συστήματα οργανωμένης κτηνοτροφίας, όπου η παραγωγή κοπριάς θα μπορούσε να παρασχεθεί στους τοπικούς αγρότες σε επαρκή επίπεδα. Η εν μέρει αντικατάστασή της με άλλο πιο φθινό και εύκολα διαθέσιμο οργανικό λίπασμα θα έδινε μια σημαντική βοήθεια προς την κατεύθυνση αυτή. Η χρησιμοποίηση του **κόμποστ από τα αστικά απόβλητα (κόμποστ ΑΣΑ)** είναι μια καλή προοπτική με την προϋπόθεση ότι είναι καλής ποιότητας και πληροί όλες τις προδιαγραφές σχετικά με τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων. Το κόμποστ ΑΣΑ θεωρείται ένα σημαντικό εργαλείο ανακύκλωσης της οργανικής ύλης και χρησιμοποιείται στη γεωργία ως βελτιωτικό εδάφους, αλλά και ως λίπασμα (Hargreaves et al. 2008). Ωστόσο, η διαθεσιμότητα του αζώτου έχει βρεθεί ότι είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας στις αποδόσεις των καλλιεργειών στα τροποποιημένα με κόμποστ εδάφη (Paranychanakis et al. 2013) και θα πρέπει να εφαρμόζονται υψηλότερες δόσεις κόμποστ προκειμένου να αυξηθεί η διαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών, προκαλώντας πολλές φορές αναστολή της ανάπτυξης των φυτών λόγω τοξικών φαινομένων (Giannakis et al. 2014). Η εφαρμογή, λοιπόν, μεγάλων δόσεων κόμποστ στα γεωργικά εδάφη έχει ως συνέπεια να αυξάνεται το ρίσκο επιβάρυνσης των εδαφών με βαρέα μέταλλα και να δημιουργούνται ερωτηματικά σχετικά με την ασφάλεια των παραγόμενων αγροτικών προϊόντων (Achiba et al. 2009; Komnitsas & Zaharaki 2014). Ως εκ τούτου, η συνδυασμένη χρήση ζωικής κοπριάς και κόμποστ ΑΣΑ θα μπορούσε να είναι ευεργετική, συνδυάζοντας την ιδιαίτερη θρεπτική αξία που έχει η κοπριά, με τις ευεργετικές ιδιότητες που έχει το κόμποστ στη διατήρηση και αύξηση των οικοσυστημικών υπηρεσιών που προσφέρει το έδαφος. Εξάλλου έχει αποδειχθεί ότι το κόμποστ ΑΣΑ και η ζωική κοπριά

που παράγονται στην Κρήτη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το κύριο σύστημα λίπανσης των φυτών, για τον επαρκή εφοδιασμό των καλλιεργειών της Κρήτης με θρεπτικά (Nikolaidis 2011, Stamati, et.al, 2011).

Ο προσδιορισμός των επιπτώσεων των οργανικών εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης του εδάφους και θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω του πειραματισμού και της ποσοτικής και μηχανιστικής ερμηνείας των παρατηρούμενων αλλαγών που προκύπτουν στις εδαφικές διεργασίες και λειτουργίες. Το δυναμικό των οργανικών εδαφοβελτιωτικών να αυξάνουν την απόδοση μίας καλλιέργειας και ταυτόχρονα να βελτιώνουν συνολικά τις οικοσυστημικές υπηρεσίες που προσφέρει το έδαφος, θα μπορούσε να συμβάλλει στη μείωση της ανησυχίας που υπάρχει σχετικά με την ασφάλεια των τροφίμων. Πολλές μελέτες ενσωμάτωσης οργανικών στο έδαφος σε αγροτικές καλλιέργειες εστιάζονται στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου και όχι στις μεταβολές των διάφορων παραμέτρων κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του φυτού, όπου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διαχείριση του εδάφους, των υπολειμμάτων της καλλιέργειας και των ζιζανίων του αγρού, η ανάπτυξη των φυτών, καθώς και οι αβιοτικές συνθήκες. Σημαντική πρόκληση, λοιπόν, είναι να γίνουν κατανοητοί οι ρυθμοί των διαδικασιών που καθορίζουν τα αποθέματα της εδαφικής μάζας και της οργανικής ύλης στην ΚΖ της Γης κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων. Από την άλλη πλευρά, ο πειραματικός σχεδιασμός θα πρέπει να υλοποιείται και υπό το πρίσμα των επιπτώσεων των αγροτικών μεταχειρίσεων στο περιβάλλον και της χρησιμότητάς τους, όσον αφορά στη διατήρηση αυτών των οφελών διαχρονικά – δηλαδή, της συμβολής τους στην επίτευξη μακροχρόνιας διάρκειας καλής λειτουργίας των εδαφικών οικοσυστημάτων.

Αυτά τα αντισταθμιστικά οφέλη εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες και τα πειράματα δεν μπορούν να αποδώσουν το πλήρες εύρος των αποτελεσμάτων, τα οποία μπορεί να έχει κάθε εφαρμοζόμενη πρακτική στο έδαφος. Τα μαθηματικά μοντέλα που προσομοιώνουν τις αλληλεπιδράσεις που εκδηλώνονται εντός του συστήματος φυτό-έδαφος-νερό-ατμόσφαιρα, μπορεί να συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση των εδαφικών λειτουργιών και να υλοποιήσουν στην πράξη τις αλλαγές που έχουν διατυπωθεί ως υποθέσεις και οι οποίες είναι σε θέση να εξισορροπήσουν τα πλεονεκτήματα και τα πιθανά αντισταθμιστικά οφέλη, καθώς και να επανασχεδιάσουν την αγροτική πολιτική.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας που διεξήχθη στην παρούσα διατριβή ήταν να γίνει μια ολοκληρωμένη διαχείριση της γεωργικής γης, που βασίζεται στην αύξηση των αποθεμάτων του εδάφους σε οργανική ουσία. Η μελέτη περιλαμβάνει δύο στάδια: **α) το πείραμα αγρού**, όπου εφαρμόστηκαν σε ετήσια βάση οργανικά προϊόντα σε μία καλλιέργεια τομάτας και μελετήθηκαν οι μεταβολές των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους και η ανάπτυξη των καλλιεργειών σε βραχυχρόνια (μήνες), αλλά και μακροχρόνια βάση (4 έτη), και **β) τη μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων του πειραματικού αγρού**, για την ποσοτικοποίηση και συσχέτιση των οικοσυστημικών υπηρεσιών που προσφέρει το έδαφος.

α) Ο πειραματικός σχεδιασμός στηρίχθηκε στην υπόθεση ότι, η αναπλήρωση της εδαφικής οργανικής ύλης, ως γεωργική πρακτική, μπορεί να βελτιώσει την εδαφική γονιμότητα, όπως καταδεικνύεται από τις αυξημένες αποδόσεις καλλιέργειας. Τα οργανικά προϊόντα που εφαρμόστηκαν στο έδαφος παρήχθησαν εντός της γεωργικής γης ή σε σχετικά κοντινή απόσταση από αυτήν, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο σε εξοικονόμηση ενέργειας, πόρων και χρημάτων. Στο πείραμα αυτό εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης στο έδαφος κόμποστ ΑΣΑ, κοπριάς αιγοπροβάτων, υπολείμματα καλλιέργειας και τα εποχιακά ζιζάνια που αναπτύχθηκαν στον αγρό: i) στους χημικούς δείκτες ποιότητας εδάφους που περιλαμβάνουν

το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την εδαφική οργανική ύλη και τις δυναμικές μορφές της, τις συγκεντρώσεις των διαθέσιμων μορφών N, τους ρυθμούς ανοργανοποίησης και νιτροποίησης, καθώς και τις διαθέσιμες ποσότητες φωσφορικών ιόντων, ii) στην καταγραφή των μεταβολών της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στην επίδραση του νερού και της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού και σωματιδιακού άνθρακα και αζώτου στα συσσωματώματα του εδάφους και iii) στις αποδόσεις των φυτών και στη θρεπτική κατάστασή τους και iv) στις αλληλεπιδράσεις των εδαφικών και φυτικών παραμέτρων.

β) Τα αποτελέσματα του πειραματικού αγρού χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μιας ευρείας βάσης δεδομένων για να αποκτηθούν τιμές των διεργασιών που περιγράφονται σε μοντέλα προσομοίωσης των χερσαίων οικοσυστημάτων, όπως είναι το Μονοδιάστατο Ολοκληρωμένο Μοντέλο Κρίσιμης Ζώνης Εδάφους (1D-Integrated Critical Zone, 1D-ICZ) (Giannakis et al. 2017). Με το μοντέλο αυτό είναι δυνατόν να προσομοιωθούν οι μεταβολές της βιομάζας και οι μετασχηματισμοί και δέσμευση του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών, σε σχέση με τις μεταβολές της δομής του εδάφους, της διηθητικής ικανότητας του νερού και της βιοποικιλότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ροής του νερού και της θερμότητας, της μεταφοράς των διαλυμένων ουσιών και των γεωχημικών αντιδράσεων, της δυναμικής της δομής του εδάφους, της δυναμικής του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών και της παραγωγής και αποικοδόμησης των φυτών και της μικροβιακής βιομάζας του εδάφους (Kottronakis et al. 2017). Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα του πειραματικού αγρού χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές τιμές που ισχύουν για κάθε διεργασία ξεχωριστά, αλλά και για τη σύνδεση των διαφόρων υπο-μοντέλων του 1D-ICZ, παρέχοντας όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την αξιολόγηση, τον εντοπισμό σφαλμάτων (debugging) και την αναβάθμιση (upgrading) του κώδικα του συγκεκριμένου μοντέλου. Ο έλεγχος (verification), λοιπόν, του προγράμματος (1D-ICZ) πραγματοποιήθηκε με τις μετρήσεις του πειραματικού αγρού και η προσομοίωση του πειράματος για τα 4 έτη που εφαρμόστηκε, οδήγησε εν κατακλείδι στη μοντελοποίηση των οικοσυστημικών υπηρεσιών που προσφέρει το έδαφος και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τις πρακτικές που πρέπει να ακολουθηθούν για μια βιώσιμη γεωργική παραγωγή, που θα λαμβάνει υπόψη όλους τους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις λειτουργίες του εδαφικού προφίλ της KZ.

Η παρούσα διατριβή συνίσταται από 7 Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύντομη εισαγωγή στο πρόβλημα και της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη σωστή διαχείριση των γεωργικών εδαφών. Στο δεύτερο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση στην ποιότητα και στις λειτουργίες του εδάφους που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν στην KZ ως βιοφυσικές ροές και μετασχηματισμοί υλικών και ενέργειας από την ατμόσφαιρα έως τα υπόγεια ύδατα. Παράλληλα, εξετάζονται οι λόγοι που οδηγούν στην υποβάθμιση των γεωργικών γαιών, καθώς και οι μεθοδολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν για την αναστροφή των δυσμενών επιπτώσεων από την εντατικοποίηση της αγροτικής παραγωγής. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στο πείραμα αγρού και στα επόμενα 2 κεφάλαια (Κεφ. 4 και 5) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειραματικού αγρού που αφορούν τις χημικές παραμέτρους του εδάφους και τη θρέψη και απόδοση των καλλιεργειών (Κεφ. 4), καθώς και την επίδραση των μεταχειρίσεων στη δομή του εδάφους (Κεφ. 5). Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των αποτελεσμάτων του πειραματικού αγρού, χρησιμοποιώντας το μοντέλο 1D-ICZ, το οποίο αποτελεί τη μηχανιστική μαθηματική περιγραφή των εδαφικών διεργασιών και λειτουργιών. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο (Κεφ. 7) αποδίδονται συνολικά τα

συμπεράσματα της εργασίας και παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, εξελίσσοντας την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διεξήχθη στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος SoilTReC (Μετασχηματισμοί του Εδάφους σε Ευρωπαϊκές Λεκάνες Απορροής – www.soiltrec.eu).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Achiba, W. Ben, Gabteni, N., Lakhdar, A., Laing, G. Du, Verloo, M., Jedidi, N. and Gallali, T. (2009) 'Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Allison, F. E. (1973) 'Soil organic matter and its role in crop production', *Soil organic matter and its role in crop production*.
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E. and Sparks, D. L. (2015) 'Soil science. Soil and human security in the 21st century.', *Science (New York, N.Y.)*, 348(6235), p. 1261071.
- Amundson, R., Guo, Y. and Gong, P. (2003) 'Soil diversity and land use in the United States', *Ecosystems*, 6(5), pp. 470–482.
- Banwart, S. (2011) 'Save our soils', *Nature*.
- Campbell, C. A. (1978) 'Soil Organic Carbon, Nitrogen and Fertility', in *Soil Organic Matter*.
- Fagnano, M., Adamo, P., Zampella, M. and Fiorentino, N. (2011) 'Environmental and agronomic impact of fertilization with composted organic fraction from municipal solid waste: A case study in the region of Naples, Italy', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. and Zaks, D. P. M. (2011) 'Solutions for a cultivated planet', *Nature*.
- Franco-Otero, V. G., Soler-Rovira, P., Hernández, D., López-de-Sá, E. G. and Plaza, C. (2012) 'Short-term effects of organic municipal wastes on wheat yield, microbial biomass, microbial activity, and chemical properties of soil', *Biology and Fertility of Soils*.
- Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Valstar, J., Rowe, E. C., Moirgiorgou, K., Kotronakis, M., Paranychanakis, N. V., Rousseva, S., Stamati, F. E. and Banwart, S. A. (2017) 'Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ): A Tool for Dynamic Simulation of Soil Functions and Soil Structure', in *Advances in Agronomy*.
- Giannakis, G. V., Kourgialas, N. N., Paranychanakis, N. V., Nikolaidis, N. P. and Kalogerakis, N. (2014) 'Effects of Municipal Solid Waste Compost on Soil Properties and Vegetables Growth', *Compost Science & Utilization*, 22(3).

- Hargreaves, J. C., Adl, M. S. and Warman, P. R. (2008) 'A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(1), pp. 1–14.
- Jastrow, J., Amonette, J. and Bailey, V. (2007) 'Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration', *Climatic Change*.
- Komnitsas, K. A. and Doula, M. K. (2017) 'Framework to improve sustainability of agriculture in small islands: The case of Pistacia vera L. cultivation in Aegina, Greece', *Environmental Forensics*.
- Komnitsas, K. and Zaharaki, D. (2014) 'Assessment of Human and Ecosystem Risk Due to Agricultural Waste Compost Application on Soils: A Review', *Environmental Forensics*.
- Kotronakis, M., Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Rowe, E. C., Valstar, J., Paranychnianakis, N. V. and Banwart, S. A. (2017) 'Modeling the Impact of Carbon Amendments on Soil Ecosystem Functions Using the 1D-ICZ Model', *Advances in Agronomy*.
- Lal, R. (2006) 'Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands', *Land Degradation and Development*, 17(2), pp. 197–209.
- Lugato, E. et al. (2014) 'A new baseline of organic carbon stock in European agricultural soils using a modelling approach', *Global Change Biology*.
- Luo, Z., Wang, E. and Sun, O. J. (2010) 'Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis', *Geoderma*, 155(3), pp. 211–223.
- Moraetis, D., Stamati, F., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychnianakis, N. and Nikolaidis, N. P. (2011a) 'Identification of hydrologic and geochemical pathways using high frequency sampling, REE aqueous sampling and soil characterization at Koiliaris Critical Zone Observatory, Crete', *Applied Geochemistry*, 26, pp. S101–S104.
- Moraetis, D., Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P. and Kalogerakis, N. (2011b) 'Olive mill wastewater irrigation of maize: Impacts on soil and groundwater', *Agricultural Water Management*.
- Nikolaidis, N. P. (2011) 'Human impacts on soils: Tipping points and knowledge gaps', *Applied Geochemistry*, 26, pp. S230–S233.
- Paranychnianakis, N. V., Tsiknia, M., Giannakis, G., Nikolaidis, N. P. and Kalogerakis, N. (2013) 'Nitrogen cycling and relationships between ammonia oxidizers and denitrifiers in a clay-loam soil', *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Stamati, F.E., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychnianakis, N., Kalogerakis, N., Nikolaidis, N., (2011) 'Modeling carbon sequestration potential in Cretan soils', *5th Bioremediation Conference*, July 4-7, Chania, Crete, Greece.
- Rigane, M. K. and Medhioub, K. (2011) 'Assessment of properties of Tunisian agricultural waste composts: Application as components in reconstituted anthropic soils and their effects on tomato yield and quality', *Resources, Conservation and Recycling*.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. and Befort, B. L. (2011) 'Global food demand and the sustainable intensification of agriculture.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΑΡΧΕΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1.1 Ποιότητα Εδάφους και Υπηρεσίες Οικοσυστημάτων

Το έδαφος θεωρείται ένας σημαντικός φυσικός πόρος που εκτελεί βασικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές λειτουργίες. Ορίζεται εν γένει ως το ανώτατο τμήμα του γήινου φλοιού και αποτελεί ένα πολυφασικό σύστημα που αποτελείται από στερεά, υγρά και αέρια, με τα στερεά που καταλαμβάνουν περίπου το ήμισυ του όγκου του εδάφους, ενώ τα υγρά και τα αέρια κατέχουν έκαστο 15 έως 35% του όγκου (Ugolini & Spaltenstein 1992). Η φυσική μήτρα του εδάφους παρέχει νερό και θρεπτικά συστατικά στα φυτά και στους μικροοργανισμούς και αποτελεί το σύστημα φυσικής υποστήριξης στο οποίο εδράζεται η χερσαία βλάστηση και το μέσο στο οποίο ζουν οι περισσότεροι οργανισμοί.

Η έννοια “**ποιότητα εδάφους**” τράβηξε την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας από τις αρχές του 1990 όταν η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ δημοσίευσε το βιβλίο “Soil and water quality: An Agenda for Agriculture” (National Research Council 1993). Στη δημοσίευση αυτή γίνεται αναφορά σε διάφορες προσπάθειες ορισμού της ποιότητας του εδάφους και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ποιότητα των εδαφών προσδιορίζεται καλύτερα σε σχέση με τις λειτουργίες που εκτελούν τα εδάφη στα φυσικά και αγρο-οικοσυστήματα και δεν περιορίζεται μόνο στην παραγόμενη φυτομάζα. Για τον καθορισμό των μεθόδων εκτίμησης της ποιότητας του εδάφους έχουν προταθεί διάφορες εδαφικές ιδιότητες, ωστόσο η απλή μέτρηση και αναφορά της απόκρισης μιας μεμονωμένης παραμέτρου εδάφους σε μια δεδομένη πρακτική διαχείρισης δεν επαρκεί (Vrscay et al. 2008; Karlen et al. 1997). Οι εδαφικοί πόροι αναγνωρίζονται πλέον ως ένα δυναμικό σύστημα διαβίωσης που αναδύεται μέσα από μια μοναδική ισορροπία και αλληλεπίδραση των βιολογικών, χημικών και φυσικών συστατικών του (Karlen et al. 1997). Οι λειτουργίες του οικοσυστήματος του εδάφους προέρχονται από τις δυναμικές δράσεις των κοινοτήτων των φυτών, των ζώων και των μικροοργανισμών και από το αβιοτικό περιβάλλον, τα οποία συνυπάρχουν ως μονάδα και αλληλεξαρτώνται (Alcamo et al. 2005; Nikolaidis 2011a). Τα περισσότερα οικοσυστήματα αποκτούν την ενέργειά τους από τον ήλιο και τα υλικά τους από την ατμόσφαιρα και τα ορυκτά πετρώματα. Η ενέργεια και τα υλικά μεταφέρονται μεταξύ των συνιστωσών μέσα στο οικοσύστημα και στη συνέχεια απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Τα βασικά βιοτικά συστατικά των οικοσυστημάτων περιλαμβάνουν τα φυτά που φέρνουν άνθρακα και ενέργεια στο οικοσύστημα, αποσυνθέτες, οι οποίοι διασπούν τη νεκρή οργανική ύλη και απελευθερώνουν CO₂ και θρεπτικά συστατικά, και τα ζώα, τα οποία μεταφέρουν ενέργεια και υλικά μέσα στα οικοσυστήματα και ρυθμίζουν τη δραστηριότητα των φυτών και των αποσυνθετών. Τα βασικά αβιοτικά συστατικά των οικοσυστημάτων είναι η ατμόσφαιρα, το νερό και τα ορυκτά πετρώματα. (Chapin et al. 2012)

Η ποιότητα του εδάφους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις λειτουργίες που επιτελεί το εδαφικό οικοσύστημα. Σύμφωνα με την Πρόταση Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 22ας Σεπτεμβρίου 2006 με την οποία καθορίζεται το πλαίσιο για την προστασία του εδάφους (Commission of the European Communities 2006), ως **εδαφικές λειτουργίες** θεωρούνται η παροχή φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος στον άνθρωπο

για τις δραστηριότητές του, η παραγωγή βιομάζας (τροφής κ.λπ.) και πρώτων υλών, η αποθήκευση, η διήθηση και η μεταποίηση των θρεπτικών συστατικών, διαφόρων ουσιών και του νερού, η παροχή φυσικού υπόβαθρου για την ανάπτυξη της βιοποικιλότητας (οικολογικά ενδιαφέροντα, βιολογικά είδη κ.λπ.), η συγκρότηση αποθέματος άνθρακα, καθώς και η διαφύλαξη της γεωλογικής και αρχαιολογικής κληρονομιάς.

Σύμφωνα με την παγκόσμια πρωτοβουλία “η Οικονομία των Οικοσυστημάτων και της Βιοποικιλότητας” (TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity 2010), **τα προϊόντα και οι υπηρεσίες οικοσυστήματος είναι η άμεση και έμμεση συνεισφορά των οικοσυστημάτων στην ανθρώπινη ευημερία**. Έχουν αναγνωριστεί τέσσερα διαφορετικά είδη υπηρεσιών, όλα ζωτικής σημασίας για την υγεία και ευημερία των ανθρώπων (Millennium Ecosystem Assessment 2005; Banwart et al. 2015; Robinson et al. 2013; Jónsson & Davídsdóttir 2016):

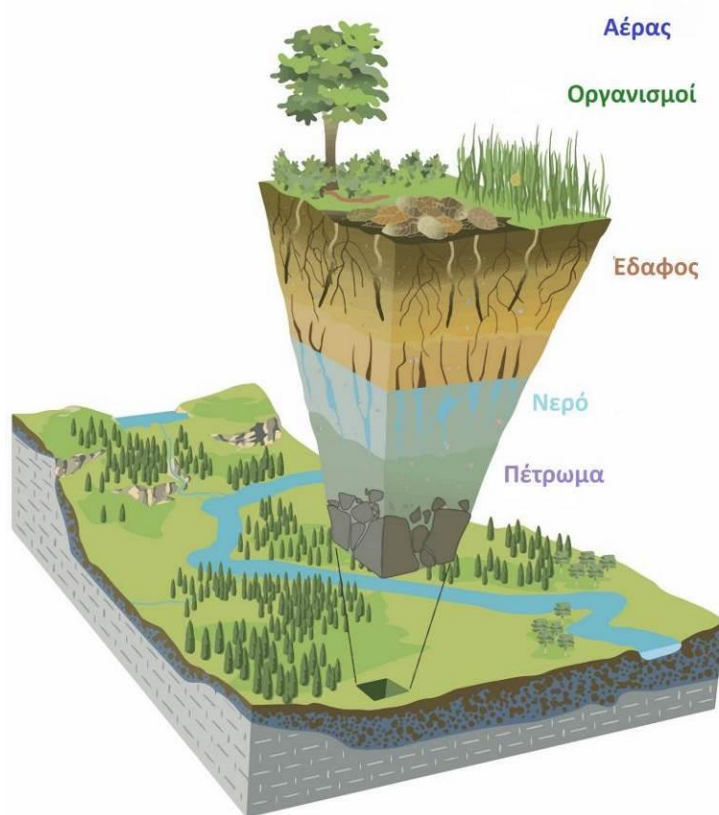
- Οι **υποστηρικτικές υπηρεσίες** που υποστηρίζουν την ανάπτυξη και παραγωγή, όπως η εδαφογένεση, η φωτοσύνθεση, η αποσύνθεση, η παροχή βιοτόπων για τη βιοποικιλότητα, ο κύκλος των θρεπτικών ουσιών, η ανταλλαγή αερίων με την ατμόσφαιρα και η προσρόφηση και μετακίνηση νερού.
- Οι **υπηρεσίες ρύθμισης** του κλίματος, των επιφανειακών και υπόγειων ρευμάτων, της ποιότητας του νερού και του αέρα, και των περιβαλλοντικών κινδύνων. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν: τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, τη ρύθμιση των ασθενειών και των επιβλαβών οργανισμών, τη φίλτρανση και τον καθαρισμό των υδάτων, τον έλεγχο της διάβρωσης, την πρόληψη των πλημμυρών και τη ρύθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος.
- Οι **υπηρεσίες παροχής**, που περιλαμβάνουν παροχή τροφίμων, νερού, υλικών, ενεργειακών πόρων και της πλατφόρμας που εδράζονται οι κατασκευές.
- Οι **πολιτιστικές υπηρεσίες**, οι οποίες καλύπτουν τη φυσική ομορφιά, την αρχαιολογική κληρονομιά, την έμπνευση και την αναψυχή, και συμβάλλουν στην πνευματική μας ευημερία.

Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των εδαφών επηρεάζουν έντονα όλες τις πτυχές της λειτουργίας των οικοσυστημάτων, οι οποίες, με τη σειρά τους, ανατροφοδοτούν τις φυσικές, δομικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών. **Τα εδάφη διαδραματίζουν έναν τόσο αναπόσπαστο ρόλο στις διεργασίες του οικοσυστήματος που είναι δύσκολο να χωριστεί η μελέτη των εδαφών από εκείνη των οικοσυστημικών διεργασιών**. (Chapin et al. 2012)

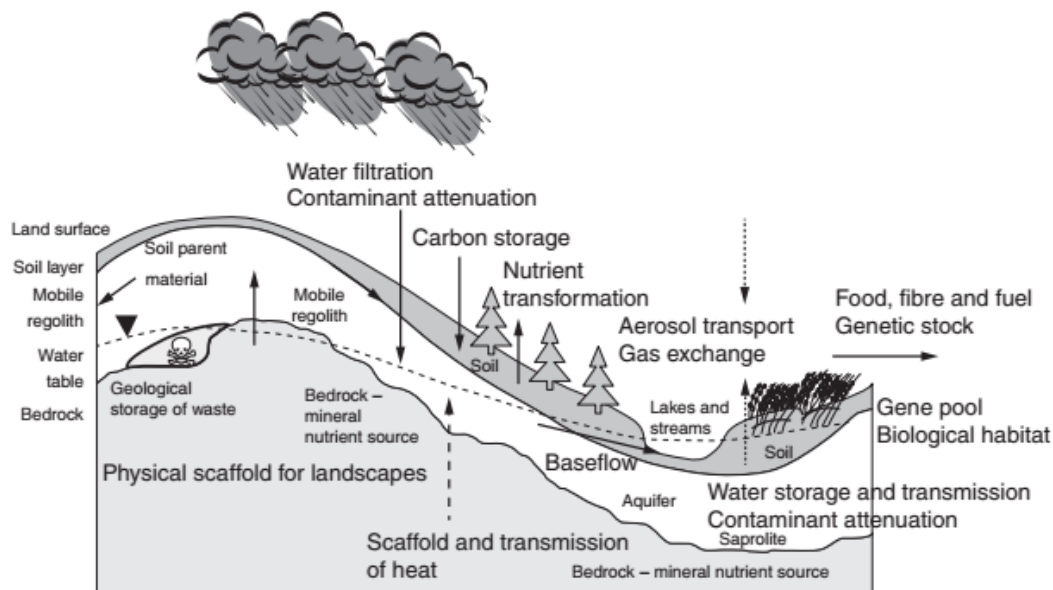
2.1.2 Η Κρίσιμη Ζώνη της Γης

Οι διεργασίες των οικοσυστημάτων και οι εδαφικές λειτουργίες μπορούν να μελετηθούν σε πολλές χωρικές κλίμακες. Για παράδειγμα η επίδραση της προσθήκης οργανικών εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος μπορεί να μελετηθεί είτε στο εργαστήριο, εξετάζοντας π.χ. τα είδη και τους πληθυσμούς των μικροοργανισμών που συνεισφέρουν στην ανοργανοποίηση και στην απελευθέρωση των διαθέσιμων θρεπτικών συστατικών, είτε στο

πεδίο προσδιορίζοντας π.χ. τη συσσώρευση οργανικού άνθρακα και την παραγωγή βιομάζας σε έναν πειραματικό αγρό, είτε σε παγκόσμια κλίμακα, ερευνώντας π.χ. την επίδραση στον κύκλο του C και στις κλιματικές αλλαγές. Η Κρίσιμη Ζώνη (Critical Zone) της Γης αποτελεί τη χωρική κλίμακα που συμπεριλαμβάνει όλα τα βιοτικά και αβιοτικά μέρη ενός οικοσυστήματος, το περιβάλλον εκείνο όπου τα πετρώματα, το έδαφος, το νερό, ο αέρας και οι ζωντανοί οργανισμοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και διαμορφώνουν την επιφάνεια της Γης. **Η Κρίσιμη Ζώνη (Κ.Ζ.) της Γης είναι το λεπτό επιφανειακό πορώδες στρώμα του πλανήτη μας που εκτείνεται από τις κορυφές των δέντρων μέχρι τον πυθμένα των υδροφορέων πόσιμου νερού (Σχ. 2.1).** Το έδαφος βρίσκεται στην καρδιά της Κρίσιμης Ζώνης ως ενεργό στρώμα που μεταφέρει μάζα, ενέργεια και γενετικό υλικό προς τα πάνω στην ατμόσφαιρα, προς τα κάτω στα υπόγεια νερά και πλευρικά στα επιφανειακά νερά (Σχ. 2.2).



Σχήμα 2.1. Η Κρίσιμη Ζώνη της Γης (<http://criticalzone.org/national/research/the-critical-zone-national/>).



Σχήμα 2.2. Ροές υλικών, ενέργειας και γενετικού υλικού μέσα στην ΚΖ. Οι ροές αυτές προκύπτουν από τις περιβαλλοντικές διεργασίες της Κρίσιμης Ζώνης και παρέχουν αγαθά και υπηρεσίες για ανθρώπινο όφελος. Τα μεγάλα βέλη αντιπροσωπεύουν ροές υλικών και ενέργειας, οι μεγάλοι έντονοι χαρακτήρες αντιπροσωπεύουν τα αγαθά και τις υπηρεσίες και οι μικροί χαρακτήρες αντιστοιχούν στα κύρια περιβαλλοντικά στοιχεία της Κρίσιμης Ζώνης. (Banwart et al. 2012)

Η μελέτη της ΚΖ ορίζει ένα νέο πεδίο της περιβαλλοντικής επιστήμης μέσα στο οποίο μπορεί να διαμορφωθεί μια ολιστική ερευνητική προσέγγιση συνδυάζοντας θεωρητικές μεθόδους και μεθόδους παρατήρησης από πολλούς επιστημονικούς τομείς (Giannakis et al. 2017). Το πορώδες αυτό εξωτερικό κέλυφος της Γης μεταξύ του αμετάβλητου υποστρώματος / ιζήματος κατάντη και της ατμόσφαιρας ανάντη μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας αλληλοτροφοδοσίας (Anderson et al. 2007). Η ΚΖ είναι ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο, ανοιχτό σύστημα και παρουσιάζει μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Το πεδίο αυτό δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην κατανόηση των μηχανιστικών λειτουργιών σε μια χωρική κλίμακα από νανόμετρα μέχρι παγκόσμια και σε μια χρονική κλίμακα από το δευτερόλεπτο έως τους τεκτονικούς χρόνους. Μέσα στη ζώνη αυτή μελετώνται οι φυσικές, χημικές και βιολογικές μεταβολές από την οξική, ταχεία κυκλοφορία της ατμόσφαιρας μέχρι την ανοξική, βραδεία ροή των υδροφόρων στρωμάτων, που συχνά συναντάται σε βάθη περίπου 5-10 μέτρα (Banwart, S.A., et al. 2012).

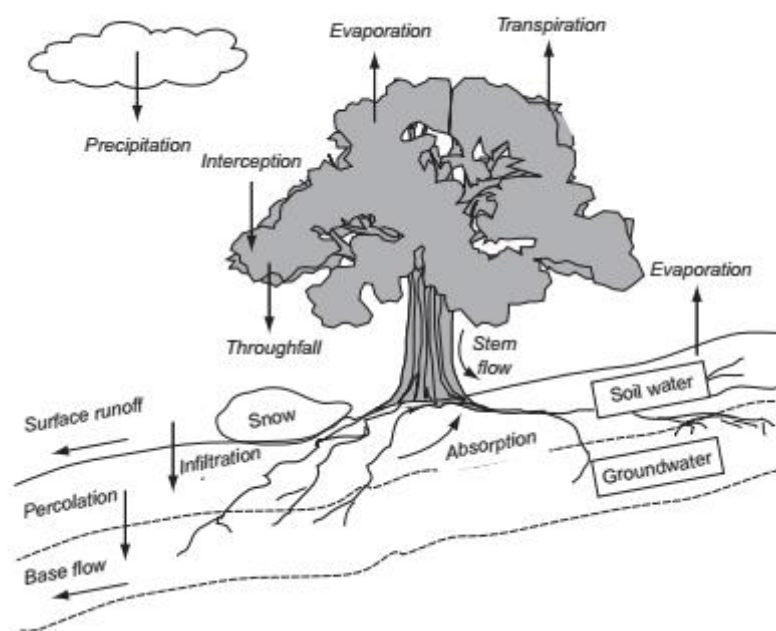
Η εξέλιξη της ΚΖ προέρχεται από μια τεράστια ανισορροπία, η οποία απορρέει από τις ροές της ύλης και της ενέργειας στα σύνορά της με το εξωτερικό περιβάλλον. Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν τις ροές ύλης και ενέργειας από και προς την ΚΖ, και κατ' επέκταση της δημιουργίας του εδάφους και σχηματισμού οικοσυστημάτων, προκαλούνται λόγω μεταβλητότητας στο κλίμα, την τοπογραφική θέση, τους οργανισμούς, την ηλικία του υποστρώματος και τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Το κλίμα είναι ο παράγοντας που καθορίζει με ακρίβεια τα ποσοστά των διεργασιών σχηματισμού του εδάφους και συνεπώς των επιπέδων ανάπτυξής του. Η τοπογραφία τροποποιεί αυτές τις τιμές σε τοπική κλίμακα μέσω των επιπτώσεών της στο μικροκλίμα και την ισορροπία μεταξύ ανάπτυξης εδάφους και διάβρωσης. Οι οργανισμοί επηρεάζουν επίσης έντονα την ανάπτυξη του εδάφους μέσω των επιπτώσεών τους στο φυσικό και χημικό περιβάλλον. Το μητρικό υλικό παράγεται από την

φυσική και χημική αποδόμηση των πετρωμάτων και των ορυκτών. Ο χρόνος ενσωματώνει τον αντίκτυπο όλων των παραπάνω παραγόντων στον προσδιορισμό της μακροπρόθεσμης πορείας ανάπτυξης του εδάφους, ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν τροποποιήσει σημαντικά τα εδάφη της Γης. (Charpin et al. 2012)

Οι λειτουργίες του εδάφους μπορούν να ποσοτικοποιηθούν στην ΚΖ ως βιοφυσικές ροές και μετασχηματισμοί υλικών και ενέργειας από την ατμόσφαιρα έως τα υπόγεια ύδατα (Κεφάλαια 2.1.2 – 2.1.6). Οι λειτουργίες του εδάφους υφίστανται πολλές φορές υποβάθμιση διότι συνήθως διαχειριζόμαστε τη γη για έναν και μόνο σκοπό, όπως την παραγωγή τροφής, ενώ αγνοούμε και συχνά καταστρέφουμε τις άλλες υπηρεσίες που παρέχει το οικοσύστημα αυτό (Κεφ. 2.2). Οι λειτουργίες του εδάφους και οι υπηρεσίες οικοσυστήματος θα γίνουν ακόμα πιο σημαντικές καθώς αυξάνονται οι παγκόσμιες τιμές των τροφίμων, καθώς οι πόλεις επεκτείνονται και οι απαιτήσεις για παροχή νερού αυξάνονται και καθώς η αλλαγή του κλίματος καθιστά την αποθήκευση άνθρακα πιο κρίσιμη. Γι αυτό το λόγο απαιτείται η λήψη άμεσων μέτρων που θα αναβαθμίζουν και θα προστατεύουν τα οικοσυστήματα. Βασικά μέτρα αποτελούν η υιοθέτηση μεθόδων διαχείρισης των εδαφών για μια βιώσιμη γεωργία, έτσι ώστε να λαμβάνονται γεωργικά προϊόντα και είδη διατροφής χωρίς χημικά υπολείμματα και ταυτόχρονα το περιβάλλον να προστατεύεται (Κεφ. 2.3). Εξίσου σημαντικό ρόλο αποτελεί η κατεύθυνση της έρευνας προς τη δημιουργία αυστηρών μεθόδων πρόβλεψης ποσοτικού προσδιορισμού και καλύτερης αξιοποίησης του φυσικού κεφαλαίου του εδάφους, την αξιολόγηση των επιλογών για τη διατήρηση ή την επέκτασή του και τον προσδιορισμό του τρόπου με τον οποίο μπορεί να αντιστραφεί η υποβάθμισή του. Οι λειτουργίες του εδάφους μπορούν να προσομοιωθούν με μαθηματικά μοντέλα των διεργασιών του εδάφους εντός της ΚΖ που διασυνδέει το έδαφος, τη μικροβιακή βιομάζα, τη βλάστηση, την πανίδα, την ατμόσφαιρα, τα επιφανειακά ύδατα, τα πετρώματα και τα υπόγεια ύδατα (Κεφ. 2.4).

2.1.3 Ροές νερού σε ένα χερσαίο οικοσύστημα

Ο υδρολογικός κύκλος αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τις περισσότερες διαδικασίες των οικοσυστημάτων. **Το νερό εισέρχεται στα χερσαία οικοσυστήματα κυρίως μέσω της κατακρήμνισης και της άρδευσης. Η επιφανειακή και υπόγεια απορροή, η εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και η διαπνοή από τα φυτά αποτελούν τις κύριες οδούς απώλειας νερού από τη δεξαμενή του εδάφους (Σχ. 2.3).** Η ηλιακή ακτινοβολία μαζί με τη θερμοκρασία, την τάση ατμών και την ταχύτητα του ανέμου αποτελούν την δρώσα δύναμη που οδηγεί το νερό κάθετα από τη Γη στην ατμόσφαιρα μέσω εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύει το 75% της μεταφοράς ενέργειας από τη Γη στην ατμόσφαιρα και ως εκ τούτου είναι μια βασική διαδικασία στον ενεργειακό ισοζύγιο της Γης (Charpin et al. 2012). Ο υδρολογικός κύκλος ελέγχει επίσης τους βιογεωχημικούς κύκλους της Γης επηρεάζοντας όλες τις βιοτικές διεργασίες, διαλύοντας τα θρεπτικά συστατικά και μεταφέροντας τα μέσα και ανάμεσα στα οικοσυστήματα. Αυτές οι θρεπτικές ουσίες παρέχουν τους πόρους που υποστηρίζουν την ανάπτυξη οργανισμών. Η μετακίνηση των υλικών διαμέσου του νερού συνδέει τα οικοσυστήματα μέσα στην ΚΖ.



Σχήμα 2.3. Υδρολογική ισορροπία ενός οικοσυστήματος (Waring & Running 1998).

Η βλάστηση αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες του υδρολογικού κύκλου. Πριν η κατακρήμνιση φτάσει στο έδαφος, το νερό συγκρατείται και εξατμίζεται από την επιφάνεια της βλάστησης και το στρώμα των υπολειμμάτων της στο έδαφος (Waring & Running 1998). Τα φυτά απορροφούν νερό από το έδαφος μέσω των ριζικών συστημάτων τους. Η μεγαλύτερη ποσότητα νερού απορροφάται από τα ριζικά τριχιδία και από τις μυκηλιακές υφές που εκτείνονται στο έδαφος καθώς και από τους υδατάνθρακες που εκκρίνονται από τις ρίζες και μεγιστοποιούν την επαφή της ρίζας με το έδαφος. Το νερό κινείται ανοδικά στους βλαστούς των φυτών και καταλήγει στα φύλλα. Τα φυτά χάνουν το νερό κυρίως διαμέσου των στοματίων (Charpin et al. 2012). Στην πραγματικότητα μόνο ένα μικρό μέρος του νερού χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των βιοχημικών αναγκών των φυτών καθώς το υπόλοιπο εξέρχεται στην ατμόσφαιρα. Ουσιαστικά το φυτό λειτουργεί ως αντλία νερού απορροφώντας νερό από το εδαφικό διάλυμα και μεταφέροντας το στην ατμόσφαιρα.

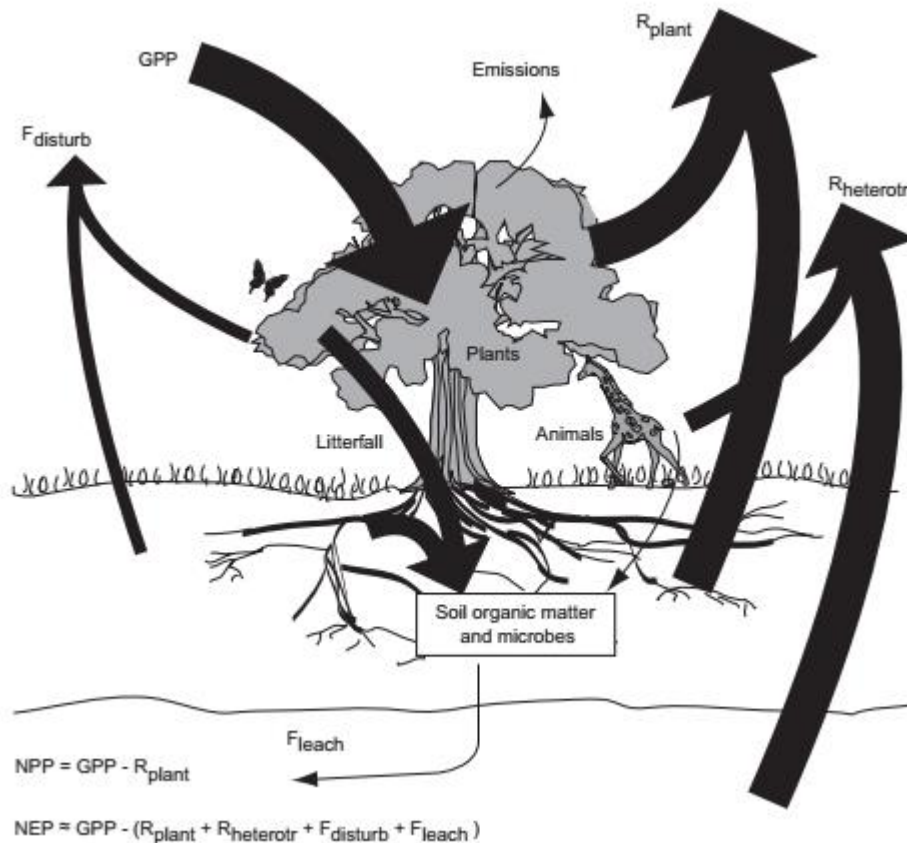
Το νερό αποθηκεύεται στο έδαφος κυρίως στους πόρους μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους ως φιλμ νερού προσροφημένο στα σωματίδια του εδάφους. Το έδαφος θεωρείται κορεσμένο όταν όλοι οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες, το νερό αποστραγγίζεται υπό την επίδραση της βαρύτητας (κορεσμένη ροή) μέχρις ότου, συχνά μετά από αρκετές ημέρες, οι δυνάμεις που συγκρατούν το νερό σε φιλμ πάνω στα σωματίδια εδάφους ισοούνται με την βαρυτική πίεση. Σε αυτό το σημείο, που ονομάζεται **υδατοικανότητα (field capacity)**, το νερό δεν αποστραγγίζει πλέον ελεύθερα. Η υδατοικανότητα (field capacity) ενός εδάφους είναι η ποσότητα νερού που συγκρατείται από ένα κορεσμένο έδαφος μετά την αποστράγγιση του βαρυτικού νερού. Σε τιμές περιεκτικότητας νερού κάτω από την υδατοικανότητα, το νερό μετακινείται μέσα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους σε απόκριση του δυναμικού του — δηλαδή της δυνητικής ενέργειας του νερού σε σχέση με το καθαρό νερό. Όταν οι ρίζες του φυτού απορροφούν νερό από το έδαφος, ώστε να αναπληρώσουν το νερό που χάνεται κατά τη διαπνοή, τότε

υφίσταται μείωση το πάχος του φιλμ νερού που βρίσκεται κοντά στις ρίζες, με αποτέλεσμα το εναπομείναντα νερό να συγκρατείται με μεγαλύτερη δύναμη στα εδαφικά σωματίδια. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι να μειωθεί το δυναμικό νερού του εδάφους στη ριζόσφαιρα. Τα φυτά συνεχίζουν να διαπνέουν και το νερό συνεχίζει να κινείται προς τη ρίζα μέχρι να επιτευχθεί το κατώφλι του δυναμικού του νερού του εδάφους, όταν οι ρίζες δεν μπορούν πλέον να απομακρύνουν το νερό από τις επιφάνειες των σωματιδίων. Το σημείο αυτό καλείται μόνιμο **σημείο μαρασμού**. Η διαφορά στην περιεκτικότητα σε νερό μεταξύ υδατοικανότητας και σημείου μόνιμου μαρασμού καλείται **διαθέσιμη υγρασία** και παρέχει μια εκτίμηση του διαθέσιμου στο φυτό νερού. (Chapin et al. 2012) Η βλάστηση συχνά απομακρύνει το 65 έως 75% του διαθέσιμου στο φυτό νερό προτού εμφανιστούν ενδείξεις ξήρανσης του φυτού (Waring & Running 1998).

Η διαθέσιμη υγρασία ενός εδάφους εξαρτάται από τον συνολικό όγκο των πόρων. Γι αυτό το λόγο, **η διαθέσιμη υγρασία ενισχύεται ουσιαστικά από την παρουσία αργίλου και οργανικής ύλης του εδάφους**, λόγω της μεγάλης επιφάνειας αυτών των υλικών. Η μεγάλη έκταση της επιφάνειας ανά μονάδα όγκου εδάφους σε εδάφη λεπτής υφής εξηγεί την υψηλή υδατοικανότητα τους. Ένα αργιλώδες έδαφος, για παράδειγμα, με το μεγάλο ποσοστό μικρών σωματιδίων, συγκρατεί τέσσερις φορές περισσότερο νερό από ένα αμμώδες έδαφος. Η οργανική ύλη ενισχύει επίσης την υδατοικανότητα των εδαφών λόγω του υδρόφιλου χαρακτήρα της και των επιπτώσεών της στη δομή του εδάφους. Για το λόγο αυτό, τα εδάφη σε θαμνώδης εκτάσεις, που έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, διατηρούν περισσότερο νερό από ό, τι τα εδάφη που λαμβάνουν μικρές ποσότητες υπολειμμάτων βλάστησης. (Chapin et al. 2012)

2.1.4 Ροές άνθρακα σε ένα χερσαίο οικοσύστημα – Συσσώρευση οργανικής ύλης

Η **φωτοσύνθεση είναι η διαδικασία με την οποία ο περισσότερος άνθρακας και η χημική ενέργεια εισέρχονται στα οικοσυστήματα**. Η φωτοσύνθεση στην κλίμακα των οικοσυστημάτων ονομάζεται ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή (Gross Primary Production, GPP). Περίπου **το μισό της GPP επιστρέφεται στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής των φυτών** (Σχήμα 4) για να παρέχεται σε αυτά η ενέργεια που υποστηρίζει την ανάπτυξη και τη συντήρησή τους (Schlesinger 1977, Waring & Running 1998). Η καθαρή πρωτογενής παραγωγή (Net Primary Production, NPP) είναι το καθαρό κέρδος άνθρακα από τη βλάστηση και ισούται με τη διαφορά μεταξύ της GPP και της αναπνοής των φυτών. Τα φυτά χάνουν άνθρακα μέσω διαφόρων οδών εκτός από την αναπνοή (Σχ. 2.4). Τα φυτοφάγα ζώα αφαιρούν τον άνθρακα από τα φυτά. Τα φυτά απελευθερώνουν επίσης άνθρακα στην ατμόσφαιρα μέσω εκπομπής πτητικών οργανικών ενώσεων ή με καύση σε πυρκαγιές (Σχήμα 4). **Η μεγαλύτερη, ωστόσο, απελευθέρωση άνθρακα από τα φυτά είναι τυπικά η μεταφορά του από τα φυτά στο έδαφος**. Αυτό συμβαίνει μέσα από τα φυτικά υπολείμματα, τις εκκρίσεις ενζύμων από τις ρίζες (root exudation: έκκριση διαλυτών οργανικών ενώσεων από τις ρίζες στο χώμα) και τις μεταφορές άνθρακα σε μικρόβια που συμβιώνουν αρμονικά με τις ρίζες των φυτών (π.χ. μυκόριζες και αζωτο- σταθεροποιητικά βακτήρια). **Αυτές οι μεταφορές άνθρακα από τα φυτά στο έδαφος οδηγούν τελικά στη δημιουργία της οργανικής ύλης του εδάφους (SOM)**, η οποία είναι συνήθως η μεγαλύτερη δεξαμενή άνθρακα για τα οικοσυστήματα. (Chapin et al. 2012)



Σχήμα 2.4. Επισκόπηση των κύριων ροών άνθρακα ενός οικοσυστήματος. (Chapin et al. 2012)

Τα αποθέματα οργανικής ύλης στα εδάφη προκύπτουν από την ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών άνθρακα στο περιβάλλον του υπεδάφους (Davidson et al. 2006). Η οργανική ύλη του εδάφους αποτελείται από υπολείμματα φυτών και ζώων, ζώντες μικροοργανισμούς και από τον χούμο. Πιο συγκεκριμένα, ο γενικός όρος "οργανική ύλη" αναφέρεται στο άθροισμα όλων των οργανικών ουσιών που υπάρχουν στο έδαφος. Αυτό το άθροισμα προέρχεται από υπολείμματα σε διάφορα στάδια αποσύνθεσης, ουσίες που συντίθενται μέσω μικροβιακών-χημικών αντιδράσεων και βιομάζας μικροοργανισμών εδάφους, καθώς και άλλων ειδών πανίδας μαζί με τα μεταβολικά προϊόντα τους (Lal et al. 2007). **Επιδρά με πολλούς τρόπους στο έδαφος και στην ανάπτυξη των φυτών**, όπως στην αποσάθρωση (διαλυτοποίηση) των ορυκτών, στη γένεση του εδάφους, στην ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας, στην προσρόφηση βαρέων μετάλλων, στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του εδάφους και της συγκράτησης νερού και τέλος στη δημιουργία συσσωματωμάτων και καλής δομής. Η συσσωμάτωση των κόκκων του εδάφους βελτιώνει το πορώδες και την κατανομή των διαφόρων μεγέθους πόρων, με αποτέλεσμα τη μείωση του φαινομένου ειδικού βάρους και τη βελτίωση της υδατοικανότητας του εδάφους. Επίσης, η οργανική ουσία επιδρά θετικά στην ανάπτυξη των φυτών εφοδιάζοντας το έδαφος με θρεπτικά στοιχεία και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητά τους. Ουσιαστικά, αποτελεί την πηγή του 90% - 95% του αζώτου σε εδάφη χωρίς λίπανση και είναι η κυριότερη πηγή διαθέσιμου φωσφόρου και διαθέσιμου θείου. (Chapin et al. 2012)

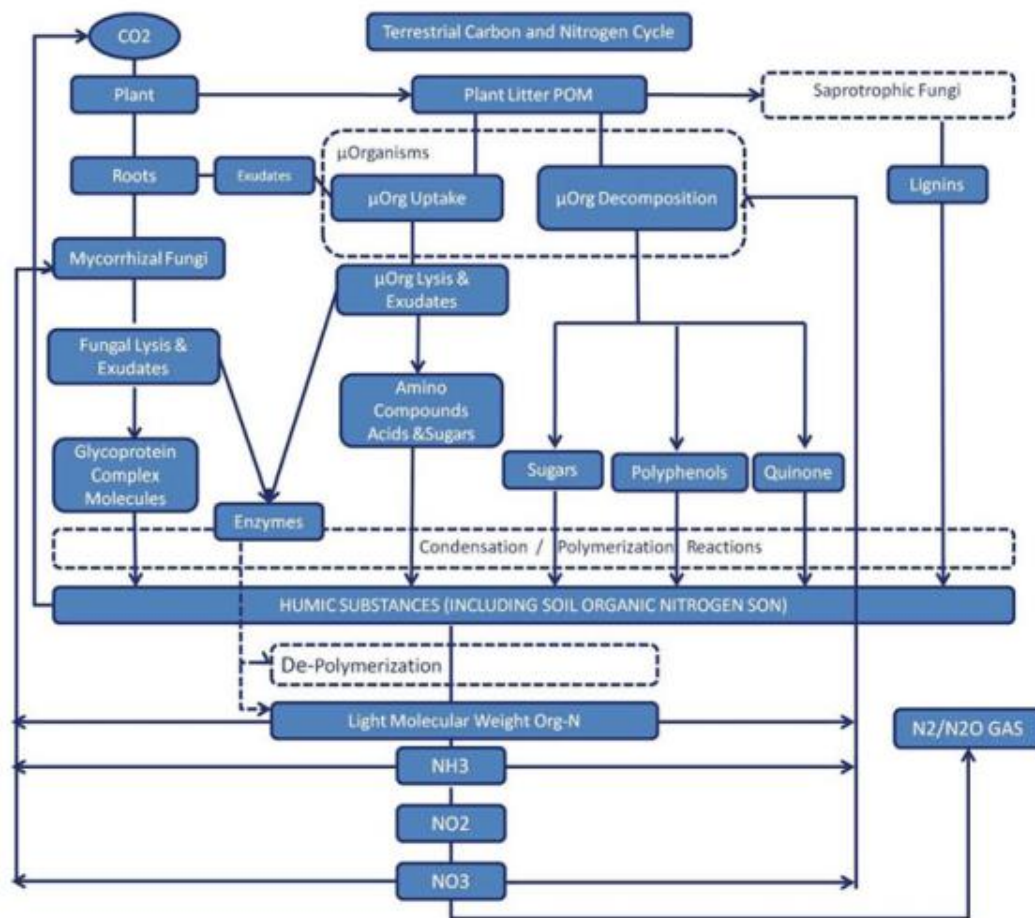
Η **αποσύνθεση της οργανικής ύλης** είναι η μετατροπή της νεκρής οργανικής ύλης σε CO_2 και ανόργανα θρεπτικά συστατικά και μιας εναπομένουσας δεξαμενής σύνθετων οργανικών

ενώσεων που είναι ανθεκτικές σε περαιτέρω μικροβιακή αποδόμηση (χούμος). Η αποσύνθεση πραγματοποιείται κυρίως από ετερότροφους μικροοργανισμούς. **Η ετεροτροφική αναπνοή από μικρόβια και ζώα μετατρέπει την οργανική ύλη σε CO₂ και είναι η κύρια οδός της απώλειας άνθρακα από τα οικοσυστήματα** (Σχ. 2.1). Η διαδικασία αυτή είναι υπό την επίδραση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών του εδάφους και οδηγεί στην απελευθέρωση και την κυκλοφορία φυτικών θρεπτικών ουσιών, ιδιαίτερα του αζώτου (N), του θείου και του φωσφόρου (Murphy et al. 2007, Diacono & Montemurro 2010) .

Η αποσύνθεση είναι συνέπεια της αλληλεπίδρασης φυσικών και χημικών διεργασιών που συμβαίνουν εντός και εκτός των ζώντων οργανισμών. **Η αποσύνθεση προκύπτει από τρεις τύπους διαδικασιών** με διαφορετικούς ελέγχους και συνέπειες:

- i) μέσω της δράσης της **έκπλυσης (leaching)**, όπου το νερό μεταφέρει τα διαλυτά υλικά από την οργανική ύλη στο εδαφικό πλέγμα. Αυτά τα διαλυτά υλικά είτε απορροφούνται από τους οργανισμούς, είτε αντιδρούν με την ορυκτή φάση του εδάφους, είτε χάνονται από το σύστημα μέσω της κατακόρυφης κίνησης του εδαφικού διαλύματος.
- ii) μέσω του **τεμαχισμού (fragmentation)** της οργανικής ύλης από τα ζώα. Ο τεμαχισμός από τα ζώα εδάφους σπάει τα μεγάλα κομμάτια της οργανικής ύλης σε μικρότερα, δημιουργώντας τη **σωματιδιακή οργανική ύλη (Particulate Organic Matter – POM)** που αποτελεί πηγή τροφής για την πανίδα του εδάφους. Ο τεμαχισμός αναμειγνύει επίσης την αποσυντιθέμενη οργανική ύλη στο έδαφος.
- iii) μέσω της **χημικής μετατροπής (chemical alteration)**. (Chapin et al. 2012)

Η **χημική μετατροπή της νεκρής οργανικής ύλης** είναι κατά κύριο λόγο συνέπεια της δραστηριότητας των βακτηρίων και των μυκήτων (Σχ. 2.5) (Nikolaidis and Bidoglio, 2013). Το σωματιδιακό οργανικό υλικό, που αποτελείται κυρίως από τη λιγνίνη, την κυτταρίνη και την ημικυτταρίνη, υπόκεινται σε βιοχημική μετατροπή σε μικρότερα μόρια που δημιουργούνται με τη δράση μυκήτων, βακτηρίων και ενζύμων. Τα προϊόντα της αποσύνθεσης είναι τα σάκχαρα, οι πολυφαινόλες και οι κινόνες που προέρχονται από τη μικροβιακή αποσύνθεση της λιγνίνης. Τα προϊόντα από τη λύση των μικροοργανισμών και τα εκκρίματα που απελευθερώνονται είναι οι αμινο-ενώσεις, τα οξέα και τα σάκχαρα καθώς και τα νουκλεϊκά οξέα και τα πολυμερή των δομικών κυττάρων. Οι γραμμικές αλυσίδες (>250) των αμινοξέων σχηματίζουν τις πρωτεΐνες οι οποίες αποτελούν βασικά μέρη των μικροοργανισμών. Οι μυκορριζικοί μύκητες συνεισφέρουν σύμπλοκα μόρια γλυκοπρωτεΐνης στη δεξαμενή οργανικού άνθρακα του εδάφους μέσω της απελευθέρωσης των εκκριμάτων και των προϊόντων μυκητιακής λύσης. Οι αντιδράσεις συμπύκνωσης και πολυμερισμού μεταξύ των αμινο-ενώσεων, των σακχάρων και των κινινών και των λιγνινών παράγουν χουμικές ουσίες (Nikolaidis and Bidoglio, 2013). Οι χουμικές ουσίες είναι ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους ενώσεων σταθεροποιημένες με υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις και δεσμούς υδρογόνου.



Σχήμα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση των συνδυασμένων κύκλων άνθρακα και αζώτου στα εδάφη. (Nikolaïdis and Bidoglio, 2013)

Η **ταχύτητα αποσύνθεσης της οργανικής ύλης** εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και από τις ιδιότητες του εδάφους, την ποιότητα του υποστρώματος και τη σύνθεση και δραστηριότητα της μικροβιακής κοινότητας (περιλαμβάνοντας και τα ζώα του εδάφους). Η **δραστηριότητα των μικροβίων του εδάφους είναι πιο σημαντική από τη μικροβιακή βιομάζα για τον προσδιορισμό του ρυθμού αποσύνθεσης**. Στα γεωργικά εδάφη, για παράδειγμα, η μικροβιακή βιομάζα τείνει να είναι υψηλότερη σε εξαιρετικά υγρά ή ξηρά εδάφη, όπου η αποσύνθεση είναι αργή, σε σχέση με τα μέτρια υγρά εδάφη με υψηλότερο ρυθμό αποσύνθεσης (Insam 1990). Δεδομένου ότι η περισσότερη μικροβιακή βιομάζα είναι ανενεργή, είναι πιθανότατα πιο σημαντική ως δεξαμενή θρεπτικών συστατικών παρά ως πρόβλεψη του ρυθμού αποσύνθεσης (Chapin et al. 2012). Η **χημεία του άνθρακα είναι ένας ισχυρός καθοριστικός παράγοντας της ποιότητας των φυτικών υπολειμμάτων**. Τα ευκόλως βιοδιασπώμενα υλικά, όπως τα σάκχαρα και οι πρωτεΐνες, αποσυντίθενται ταχύτερα από τα ανθεκτικά στη βιοδιάσπαση υλικά, όπως η λιγνίνη και τα μικροβιακά κυτταρικά τοιχώματα. Η παροχή αζώτου και φωσφόρου μπορεί επίσης να περιορίσει την αποσύνθεση των εύκολα βιοδιασπώμενων υποστρωμάτων άνθρακα, όπως γεωργικά υπολείμματα και εκκρίματα ρίζας. Φυτά σε περιβάλλοντα πλούσια σε θρεπτικά δημιουργούν υπολείμματα υψηλής θρεπτικής αξίας (Hobbie 1992, Cornelissen 1996). Ο ρυθμός αποσύνθεσης μειώνεται με το χρόνο, καθώς εξαντλούνται τα οργανικά υποστρώματα. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που ευνοούν την

πρωτογενή παραγωγή (ζέστη, υγρασία, εύφορο έδαφος) προάγουν επίσης την αποσύνθεση, οπότε δεν υπάρχει σαφής συσχέτισης μεταξύ της ποσότητας άνθρακα που συσσωρεύεται στα εδάφη και της πρωτογενούς παραγωγής ή του ρυθμού αποσύνθεσης. (Chapin et al. 2012)

Η οργανική ύλη που έχει υποστεί χουμοποίηση και δεν μπορεί εύκολα να διασπαστεί από τα μικρόβια του εδάφους προς απελευθέρωση των χρήσιμων για τα φυτά ανόργανων συστατικών, συμβάλλει παραταύτα στη βελτίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί μία δεξαμενή αποθήκευσης των θρεπτικών συστατικών του που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο για την υποστήριξη της βλάστησης και αποτελεί υπόβαθρο για την ανάπτυξη της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημικών υπηρεσιών του εδάφους. Ωστόσο, **η συσσώρευση οργανικής ύλης στα εδάφη είναι μια διαδικασία πολύ πιο αργή και πιο πολύπλοκη από την αποδόμησή της**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εδάφη που υπόκεινται σε εντατικές καλλιέργειες και βρίσκονται σε περιοχές ευάλωτες στη ξηρασία, όπως είναι οι Μεσογειακές χώρες, να εμφανίζουν σημάδια εξάντλησης της οργανικής ύλης (Diacono & Montemurro 2010). Για να αποτραπεί αυτή η δυσμενής εξέλιξη θα πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα προστασίας και ενίσχυσης της εδαφικής οργανικής ύλης (Κεφ. 2.5), με πιο χαρακτηριστικό τη βελτίωση της δομής των εδαφών (Κεφ. 2.1.5).

2.1.5 Ροές αζώτου σε ένα χερσαίο οικοσύστημα

Ο κύκλος του αζώτου περιλαμβάνει εισροές και εκροές από τα οικοσυστήματα και μεταφορές ανάμεσα στα οικοσυστήματα (Hart, et al. 1994). Το άζωτο εισέρχεται μέσω της βιολογικής δέσμευσης του ατμοσφαιρικού αζώτου και της εναπόθεσης από την ατμόσφαιρα μέσω κατακρήμνισης και αέρα. Η λίπανση είναι μια πρόσθετη εισροή αζώτου στα διαχειριζόμενα οικοσυστήματα. Το άζωτο ανακυκλώνεται διαμέσου της βλάστησης και χάνεται από τα οικοσυστήματα μέσω της έκπλυσης, την έκλυση αμμωνίας, τη διάβρωση από τον αέρα και το νερό, τη φωτιά και την απομάκρυνση των υλικών κατά τη συγκομιδή των καλλιεργειών (Σχ. 2.6).

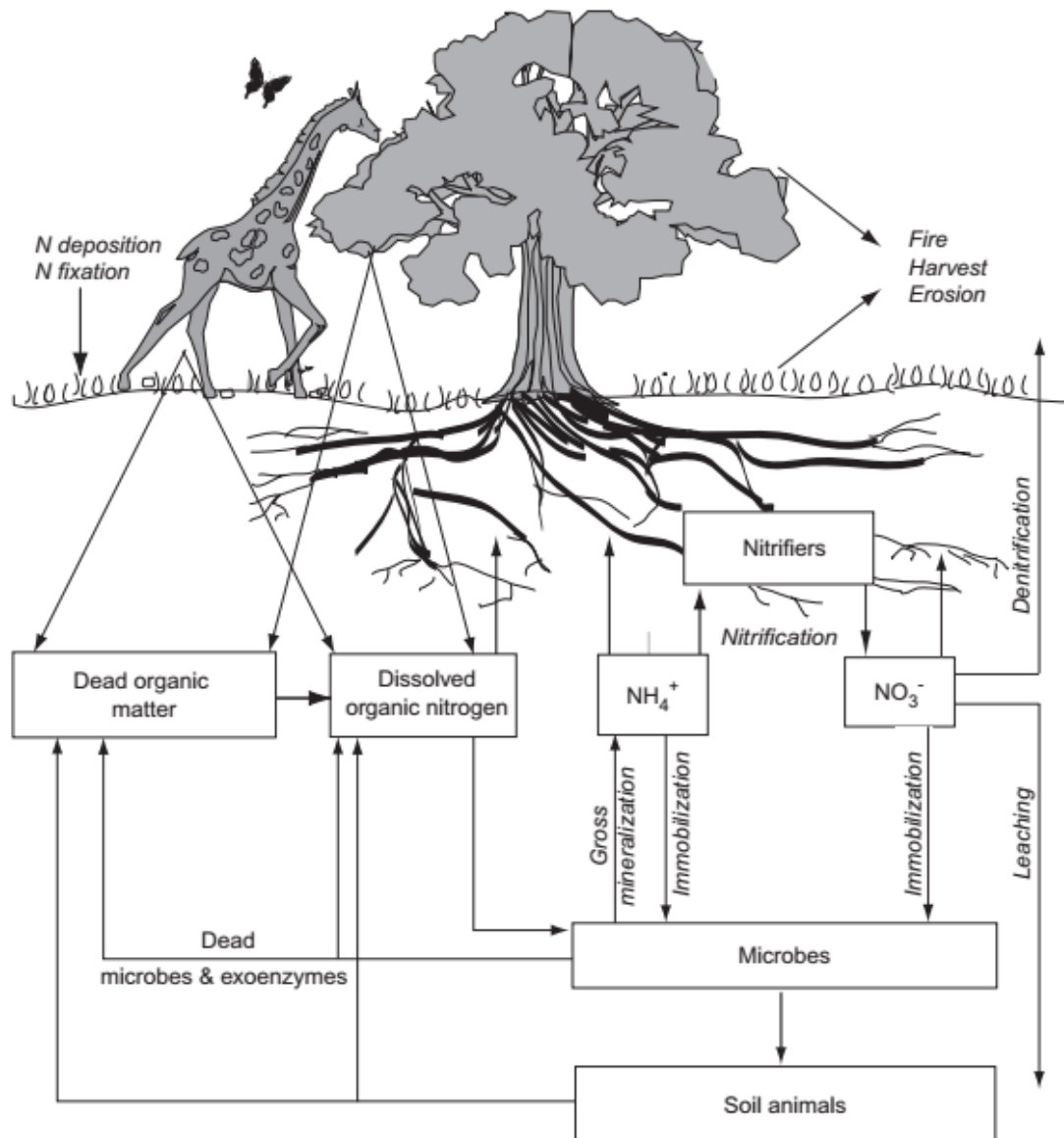
Το περισσότερο (πάνω από 99%) άζωτο του εδάφους περιέχεται στη νεκρή οργανική ύλη. Το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου στα νεκρά οργανικά υλικά περιέχεται σε σύνθετα πολυμερή όπως πρωτεΐνες, νουκλεϊνικά οξέα και χιτίνη (από τα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων και των εντόμων) που είναι πολύ μεγάλα για να περάσουν από τις μικροβιακές μεμβράνες. Συνεπώς, τα μικρόβια πρέπει να εκκρίνουν διάφορα εξωκυτταρικά ένζυμα (exoenzymes) όπως πρωτεάσες, ριβονουκλεάσες, χιτινάσες και ουρεάσες για να διασπάσουν τα μεγάλα πολυμερή σε μικρές υδατοδιαλυτές υπομονάδες, όπως αμινοξέα και νουκλεοτίδια που μπορούν να απορροφηθούν από τα μικροβιακά κύτταρα. Το άζωτο που απελευθερώνεται με τον μηχανισμό αυτό χαρακτηρίζεται ως **διαλυμένο οργανικό άζωτο (Dissolved Organic Nitrogen - DON)**. (Chapin et al. 2012)

Τα φυτά, οι μυκορριζικοί μύκητες και οι αποδομητές μικροοργανισμοί μπορούν να απορροφήσουν το DON. Τα φυτά και οι μυκορριζικοί μύκητες μπορούν να απορροφήσουν κάποιο DON, χρησιμοποιώντας το για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των φυτών. Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τον άνθρακα για να υποστηρίξουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις για ανάπτυξη και συντήρηση και εκκρίνουν το NH_4^+ στο έδαφος. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **ανοργανοποίηση (mineralization)** του αζώτου. Σε πολλές περιπτώσεις, τα μικρόβια έχουν πιθανώς ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των ριζών των φυτών επειδή τα μικρόβια που παράγουν τα εξωκυτταρικά ένζυμα είναι πιο κοντά στο

σημείο της ενζυμικής δραστηριότητας. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε ότι η ανοργανοποίηση του αζώτου είναι η κύρια οδός αποδόμησης του DON στα εδάφη. Η **καθαρή ανοργανοποίηση αζώτου (net N mineralization)** είναι η καθαρή συσσώρευση ανόργανου αζώτου στο εδαφικό διάλυμα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η καθαρή ανοργανοποίηση του αζώτου είναι μία σημαντική παράμετρος μέτρησης της διαθεσιμότητας του αζώτου στα φυτά σε οικοσυστήματα με ταχείς ρυθμούς μετατροπής του αζώτου, όπου υπάρχει μικρός ανταγωνισμός για το άζωτο μεταξύ των φυτών και των μικροβίων. (Chapin et al. 2012)

Όταν το DON δεν επαρκεί για να ικανοποιήσει την απαίτηση των μικροοργανισμών σε άζωτο, τότε απορροφούν επιπλέον ανόργανο άζωτο (NH_4^+ ή NO_3^-) από το διάλυμα του εδάφους. Η **ακινητοποίηση (immobilization)** είναι η απομάκρυνση του ανόργανου αζώτου από τη διαθέσιμη δεξαμενή με μικροβιακή πρόσληψη και χημική σταθεροποίηση. Η κρίσιμη αναλογία C : N που δείχνει τη διαχωριστική γραμμή μεταξύ της καθαρής ανοργανοποίησης του αζώτου (net nitrogen mineralization) και της καθαρής πρόσληψης αζώτου (net nitrogen uptake) από τα μικρόβια μπορεί να υπολογιστεί από το ρυθμό ανάπτυξης των μικροβιακών πληθυσμών και τις αναλογίες C : N της μικροβιακής βιομάζας και των υποστρωμάτων τους. Θεωρώντας ότι οι μικροοργανισμοί αποδομούν 100 μονάδες C τότε ενσωματώνονται στη βιομάζα τους 40 μονάδες C, ενώ 60 μονάδες θα μετατραπούν σε CO_2 λόγω αναπνοής. Η αναλογία C : N στη μικροβιακή βιομάζα είναι συνήθως 1 : 10, οπότε οι 40 μονάδες μικροβιακού C απαιτούν 4 μονάδες N, που σημαίνει ότι οι 100 μονάδες του αρχικού υποστρώματος απαιτούν 4 μονάδες N, δηλ. $(\text{C} / \text{N})_{\text{αρχ. υποστρωμ.}} = 100 : 4 = 25 : 1$. Σε υψηλότερες C : N αναλογίες, οι μικροοργανισμοί πρέπει να απορροφούν επιπλέον ανόργανο άζωτο από το έδαφος για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της ανάπτυξης τους. Αντίθετα, σε χαμηλότερες C : N αναλογίες εκκρίνουν την περίσσεια αζώτου στο έδαφος με τη μορφή **διαλυμένου οργανικού αζώτου**.

Σε ορισμένα οικοσυστήματα, τα NH_4^+ μετατρέπονται σε νιτρώδη (NO_2^-) και μετά σε νιτρικά (NO_3^-). Η μετατροπή από αμμωνιακά σε νιτρικά χαρακτηρίζεται ως **νιτροποίηση (nitrification)**. Το άζωτο καταναλώνεται από τα ζώα όταν τρώνε φυτά ή μικρόβια εδάφους και επιστρέφει στο έδαφος ως νεκρή οργανική ύλη και DON. Το αμμώνιο που παράγεται από την ανοργανοποίηση του αζώτου εκτός από το ότι απορροφάται από τα φυτά ή τους μικροοργανισμούς, προσροφάται επίσης εύκολα στις αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες των ορυκτών του εδάφους και της οργανικής ύλης, με αποτέλεσμα τις σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις NH_4^+ (συχνά λιγότερο από 1 ppm) στο εδαφικό διάλυμα. Μπορεί, επίσης, να εξατμιστεί σε αέριο αμμωνίας (NH_3). Τέλος, το άζωτο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω της απονιτροποίησης (Σχ. 2.6).



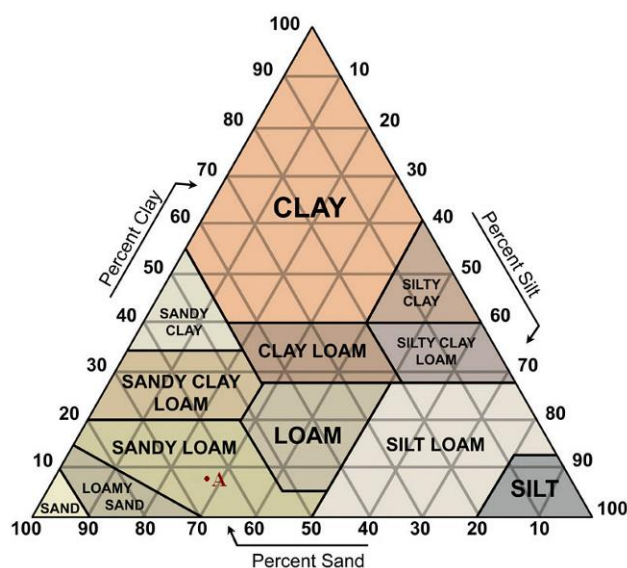
Σχήμα 2.6. Απλοποιημένος κύκλος εδαφικού αζώτου (Chapin et al. 2012).

Τις τελευταίες 2 δεκαετίες έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην έρευνα των βιοχημικών διεργασιών που επηρεάζουν τον κύκλο ζωής του αζώτου στο έδαφος. Σε μια προσπάθεια σύνθεσης πολλών δημοσιεύσεων ανασκόπησης της επιστημονικής έρευνας στο πεδίο αυτό (Schimel και Bennett 2004, Nannipieri και Eldor 2009, Gardenas et al., 2011, Geisseler et al.), οι Nikolaidis and Bidoglio (2013) πρότειναν το παρακάτω σχήμα βιοχημικών αντιδράσεων που συμμετέχουν στον κύκλο ζωής του αζώτου του εδάφους (Σχήμα 2.5). Οι μικροοργανισμοί απορροφούν και αποσυνθέτουν την POM. Τα προϊόντα της αποσύνθεσης συμβάλλουν στη συσσώρευση του οργανικού αζώτου στο έδαφος, καθώς και σε προϊόντα λύσης μικροοργανισμών και απελευθερωμένων εκκρίσεων. Οι ρίζες των φυτών επίσης απελευθερώνουν εκκρίματα που μπορούν με τη σειρά τους να ενισχύσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα. Οι μυκορριζικοί μύκητες εμπλουτίζουν τα αποθέματα οργανικού αζώτου στο έδαφος μέσω της απελευθέρωσης εκκρίματων και προϊόντων μυκητιακής λύσης. Οι μικροοργανισμοί και τα μυκητιακά εκκρίματα περιλαμβάνουν ένζυμα που καταλύουν τον

αποπολυμερισμό του οργανικού αζώτου του εδάφους σε αμινοξέα και ενώσεις τύπου αμινο-σακχάρου. Αυτές οι ενώσεις μπορούν να προσληφθούν άμεσα από τους μικροοργανισμούς και τους μυκορριζικούς μύκητες / φυτά ή να ακολουθήσουν τη διαδικασία ανοργανοποίησης-ακινητοποίησης-μετασχηματισμού σε αμμωνιακά ιόντα. Η διαδικασία νιτροποίησης μετατρέπει το αμμώνιο ιόν σε νιτρώδες και νιτρικό και η διαδικασία της απονιτροποίησης μετατρέπει το νιτρικό ιόν σε αέριο άζωτο. Τα αμμωνιακά και νιτρικά άλατα μπορούν στη συνέχεια να απορροφηθούν από τους μικροοργανισμούς και τους μυκορριζικούς μύκητες / φυτά. Για να ολοκληρωθεί ο κατάλογος μετασχηματισμών αζώτου στα εδάφη, λαμβάνονται υπόψη και οι δύο διαδικασίες μετατροπής αμμωνίου σε αέριο άζωτο: i) τα αμμωνιακά (NH_3) οξειδώνεται σε νιτρώδες (NO_2^-) ακολουθούμενη από τη αναγωγή του NO_2^- σε νιτρικό οξύ (NO), υποοξείδιο του αζώτου (N_2O) και μοριακό άζωτο (N_2), και ii) αναερόβια οξείδωση των αμμωνιακών.

2.1.6 Η Δομή του εδάφους

Τα τρία βασικά συστατικά του εδάφους είναι η άμμος, η άργιλος και η ιλύς. Το κλάσμα με τη μεγαλύτερη χημική ενεργότητα είναι αυτό της άργιλου. Η υφή (μηχανική σύσταση) του εδάφους ορίζεται από τις σχετικές αναλογίες σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών, που κυμαίνονται από σωματίδια μεγέθους άργιλου (κάτω από 0,002 mm) μέχρι ιλύς (0,002 έως 0,05 mm) και άμμου (0,05 έως 2,0 mm) (Σχ. 2.7).

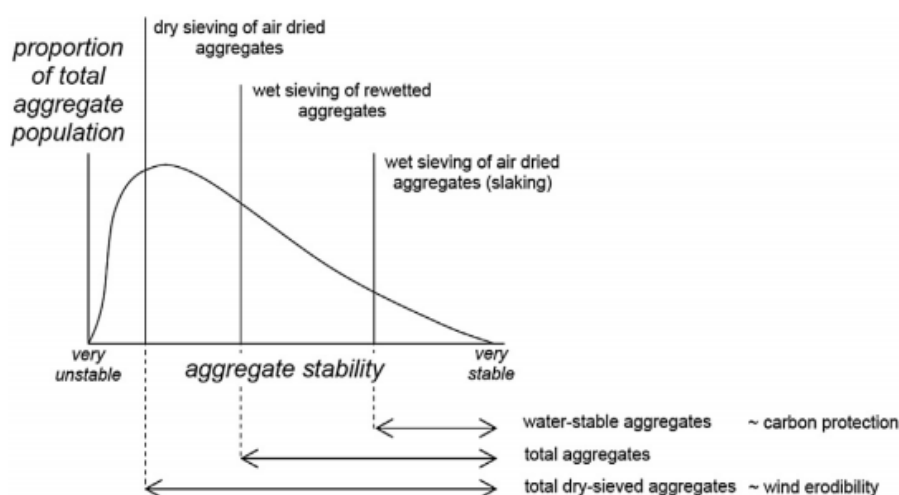


Σχήμα 2.7. Τρίγωνο εδαφικής υφής: ποσοστά άμμου, ιλύς και άργιλου στις 12 κλάσεις του εδάφους.

Η **υφή** είναι σημαντική κυρίως επειδή καθορίζει τη συνολική ενεργή επιφάνεια σε μια ποσότητα εδάφους. Τα σωματίδια λεπτής κοκκομετρίας στη μήτρα εδάφους έχουν μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας προς όγκο. Τα λεπτόκοκκα εδάφη και μεγάλες επιφάνειες διατηρούν περισσότερο νερό μέσω της προσρόφησης νερού στα σωματίδια εδάφους. Πολλές άλλες ιδιότητες του εδάφους, όπως η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, η ικανότητα συγκράτησης νερού και το δυναμικό οξειδοαναγωγής, σχετίζονται με

την υφή του εδάφους, οπότε η υφή μπορεί να αποτελέσει καλό δείκτη για πολλές ιδιότητες του οικοσυστήματος.

Η **δομή** του εδάφους ορίζεται ως «το μέγεθος, το σχήμα και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων του εδάφους, των συσσωματωμάτων και των πόρων σε όλη την κλίμακα μεγέθους από νανόμετρα έως εκατοστά» (Bronick & Lal 2005, Oades 1993). Ωστόσο, πολλές φορές η δομή του εδάφους αναφέρεται συγκεκριμένα είτε στη διάταξη των ανόργανων και οργανικών σωματιδίων του εδάφους που ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας τα συσσωματώματα του εδάφους, είτε στον βαθμό της σταθερότητας των συσσωματωμάτων (Bronick & Lal 2005). Ο βαθμός σταθερότητας των συσσωματωμάτων μπορεί να εκφραστεί με διάφορους δείκτες, όπως είναι η κατανομή των συσσωματωμάτων του εδάφους κατόπιν ξηρής κοσκίνησης και η ικανότητα του εδάφους να διατηρεί τη δομή του υπό την επίδραση του νερού, εκφραζόμενη συνήθως ως σταθερότητα των συσσωματωμάτων στην επίδραση του νερού (water stable aggregates, WSA). Τα υδατοσταθερά συσσωματώματα αντιπροσωπεύουν πιο σταθερά και μικρότερα συσσωματώματα σε σχέση με τα συσσωματώματα της ξηρής κοσκίνησης (Six & Paustian 2014; Regelink et al. 2015) (Σχ. 2.8).



Σχήμα 2.8. Η σχέση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της σταθερότητας των συσσωματωμάτων και των λειτουργιών του εδάφους. (Six & Paustian 2014)

Τα συσσωματώματα εμφανίζονται με ποικίλους τρόπους και μεγέθη. Οι περισσότερες επιστημονικές ομάδες έχουν ταξινομήσει τα συσσωματώματα σε τρεις κατηγορίες κλασμάτων, ανάλογα με το μέγεθος του κάθε κλάσματος: i) τα μακρο-συσσωματώματα (macro-aggregates) που κυμαίνονται από 250 έως 2000 μm , ii) τα μικρο-συσσωματώματα (micro-aggregates) που κυμαίνονται από 53 έως 250 μm και iii) τα κλάσματα μεγέθους ιλύς-αργίλου (silt-clay aggregates < 53 μm). Διαφορετικές ομάδες κλασμάτων εμφανίζουν διαφορετικές εδαφικές ιδιότητες όπως είναι οι δυνάμεις συνοχής και η κατανομή του άνθρακα και του αζώτου (Bronick & Lal 2005).

Τα κενά μεταξύ των συσσωματωμάτων αποτελούν τους πόρους του εδάφους και είναι ο χώρος στον οποίο συγκρατούνται και ανταλλάσσονται το νερό, ο αέρας, τα μικρόβια, τα θρεπτικά συστατικά και η οργανική ύλη του εδάφους. Ένα καλά δομημένο έδαφος πρέπει να

προάγει μία έντονη βιολογική δραστηριότητα προσλαμβάνοντας, αποθηκεύοντας και μεταφέροντας εύκολα νερό, θρεπτικά, αέρια και ενέργεια και παρέχοντας έναν ικανοποιητικό αριθμό από κατάλληλες επιφάνειες και χώρους για βιοχημικές ανταλλαγές (Εικ. 2.1) (Banwart 2011, Charman & Murphy 1998). Αγρονομικά γόνιμο έδαφος θεωρείται το έδαφος στο οποίο μεγαλύτερο από το 60% των συσσωματωμάτων του βρίσκεται σε μία κλίμακα μεταξύ των 0,25 και 10 mm (Banwart 2011; Stamatī, et al. 2013a). Τα συσσωματώματα προστατεύουν με φυσικό τρόπο την εδαφική οργανική ύλη, όπου οι διαδικασίες αποσύνθεσης είναι περιορισμένες εντός της δομής τους εξαιτίας της μικρής διαθεσιμότητας του νερού και του οξυγόνου και λόγω της μειωμένης ενζυμικής προσβασιμότητας (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000, Jastrow et al. 2007, Nikolaidis and Bidoglio 2013, Young & Ritz 2000, Six et al. 2002). Επίσης, τα συσσωματώματα συμβάλλουν στη δημιουργία μεγάλων πόρων μέσα στο έδαφος με έμμεση συνέπεια την ευκολότερη διήθηση του νερού και των διαλυτών θρεπτικών στοιχείων (Banwart 2011), την ανεμπόδιση διείσδυση των ριζών της βλάστησης (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000), στη ρύθμιση των μικροβιακών κοινοτήτων (Young & Ritz 2000) και στη μείωση της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης των εδαφών (Banwart 2011; Jastrow et al. 2007). Όλες αυτές οι διεργασίες επιδρούν σημαντικά στη δυναμική της οργανικής ύλης, στην πρωτογενή παραγωγή και στην κυκλοφορία των θρεπτικών (Six et al., 2004), συμβάλλοντας στην ανάπτυξη των οικοσυστημικών διεργασιών εντός της ΚΖ.

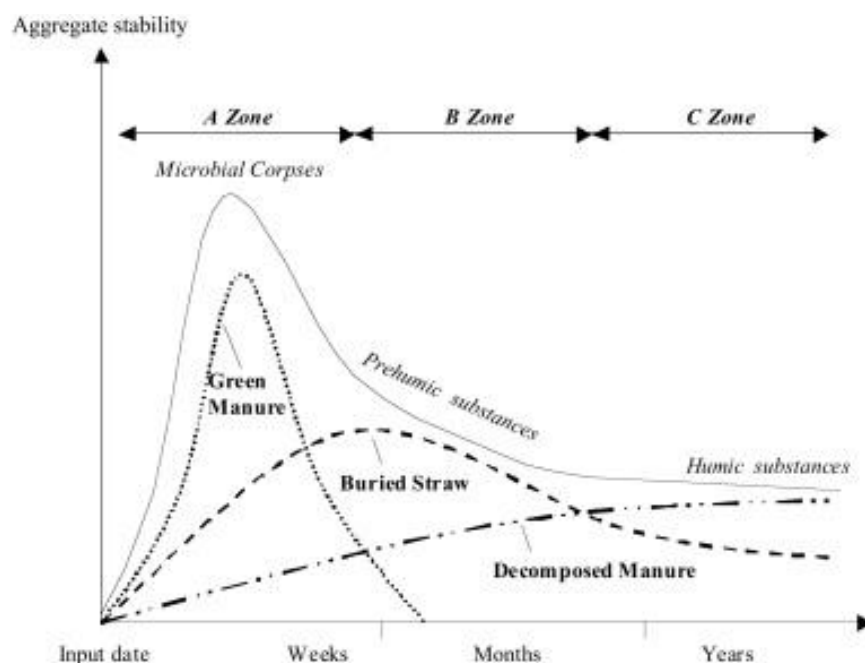


Εικόνα 2.1. Φωτογραφία μακρο-συσσωματωμάτων από έναν ακαλλιέργητο ελαιώνα της Κρήτης. (Nikolaidis and Bidoglio, 2013)

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στις επιδράσεις του νερού (water stable aggregates, WSA) αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό τους, δεδομένου ότι σχετίζεται με την καλή δομή του εδάφους και κατά συνέπεια με τη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για την ανάπτυξη των οικοσυστημάτων. Πολλοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό και τη σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων στο έδαφος, όπως η οργανική ύλη που είναι διαθέσιμη για αποσύνθεση (με τον υδρόφοβο χαρακτήρα της, που προσκολλάται στις

επιφάνειες), τα βακτήρια τα οποία χρησιμοποιούν την οργανική ύλη και παράγουν εκκρίματα τα οποία καταλύουν τη διάσπαση και τη μετατροπή της οργανικής ύλης, οι ρίζες των φυτών (που παράγουν επίσης εκκρίσεις), η διαθεσιμότητα του νερού στο σύστημα, οι μύκητες και η μικρό πανίδα του εδάφους (ασπόνδυλα, σκουλήκια, τερμίτες κ.λπ.) (Nikolaidis and Bidoglio, 2013). Τα αργιλώδη ορυκτά επηρεάζουν την συσσωμάτωση λόγω των αλληλεπιδράσεών τους με την οργανική ύλη (ΟΜ), οδηγώντας στο σχηματισμό οργανομεταλλικών ενώσεων (Six et al. 2000). Παρόμοια, τα Fe (υδρο) οξείδια και τα πολυσθενή κατιόντα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό οργανικών-ανόργανων συμπλόκων λόγω των ισχυρών αλληλεπιδράσεών τους με τα χουμικά οξέα (Pronk et al. 2011; Regelink et al. 2015).

Η οργανική ύλη διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συσσωμάτωση των σωματιδίων και ως παράγοντας συσσωμάτωσης έχει εκτεταμένα μελετηθεί (Elliott 1986, Kotronakis et al., 2011, Angers 1998, Bronick & Lal 2005, Six et al. 2004, Stamati, et al. 2013a, Stamati, et al. 2013b, Kotronakis et al. 2017, Apostolakis et al. 2017, Yaméogo, et al., 2018, Karami et al. 2012). Η ΟΥ είναι ένα σύνθετο μίγμα πολλαπλών οργανικών ουσιών όπως οι χουμικές ουσίες, οι πολυσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες, η λιγνίνη και οι ελάχιστα διαλυτές αλειφατικές ενώσεις και αυτό το εύρος των συστατικών και κατ' επέκταση των ιδιοτήτων επιτρέπει στην οργανική ύλη να επηρεάσει τη συσσωμάτωση μέσω διαφορετικών μηχανισμών και σε διαφορετικές κλίμακες (Tisdall & Oades 1982; Regelink et al. 2015). Σε διάφορα εννοιολογικά μοντέλα η αύξηση της σταθερότητας της συσσωμάτωσης μετά την ενσωμάτωση οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος σχετίζεται με τις δυναμικές αποσύνθεσης των πρόσθετων. Το 1965 ο Monnier (1965) πρότεινε ένα εννοιολογικό σχήμα (Σχ. 2.9), το οποίο περιγράφει τις επιπτώσεις διαφορετικών οργανικών προϊόντων αναφοράς στη σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων, έναντι σε μια χρονική κλίμακα που μεταβάλλεται από εβδομάδες, μήνες σε χρόνια μετά την ενσωμάτωση. Μερικά προϊόντα, όπως το πράσινο λίπασμα είχαν έντονες επιδράσεις μέσα σε ένα μήνα στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων, ενώ λιγότερο εύκολα βιοαποικοδομήσιμα υλικά, όπως το χωνεμένο οργανικό λίπασμα είχαν κάποιες αρχικές αλλά σχετικά μεγάλες επιδράσεις σε ετήσια κλίμακα (Abiven et al. 2009).



Σχήμα 2.9. Το εννοιολογικό πρότυπο του Monnier, όπου παρουσιάζεται σχηματικά η δυναμική της σταθερότητας των συσσωματωμάτων, μετά από την προσθήκη τριών οργανικών υποστρωμάτων (πράσινη κοπριά, άχυρο και αποσυντιθέμενη κοπριά) και σε σχέση με τη δυναμική των παραγόντων που επηρεάζουν τη συσσωμάτωση (μικροοργανισμοί, προ-χουμικές ουσίες και χουμικά συστατικά). Ο Monnier αναγνώρισε τρεις περιόδους (που εμφανίζονται ως ζώνες A, B και C) κατά τις οποίες συμβαίνουν οι κύριες διαδικασίες συσσωμάτωσης (Monnier, G., 1965, αναφερόμενο από Abiven et al. 2009).

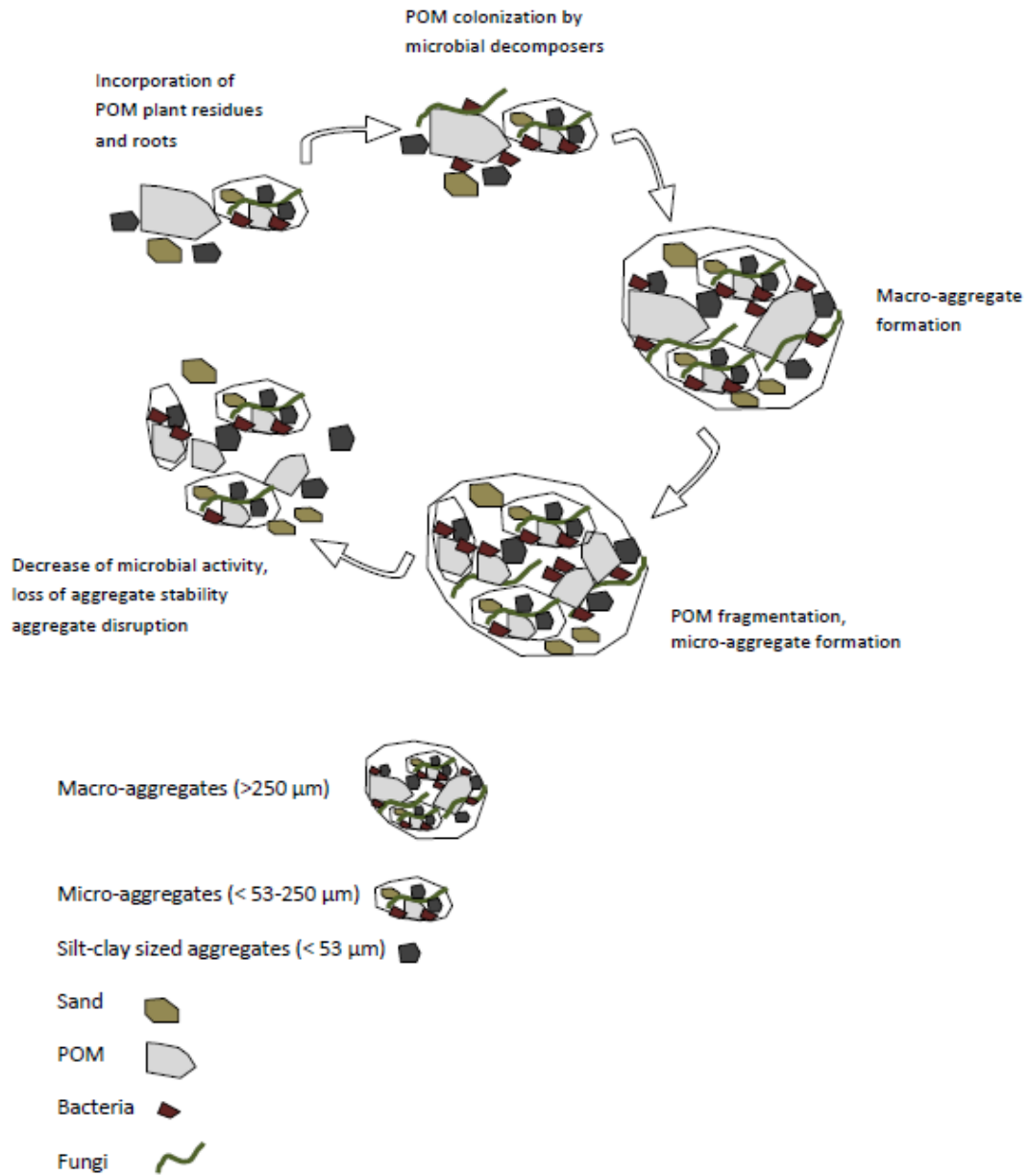
Ο Monnier εξήγησε ότι οι βραχυπρόθεσμες επιδράσεις του οργανικού υλικού στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων οφείλεται στη μετατροπή των μικροβιακών προϊόντων και κυττάρων, ενώ οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις οφειλόταν στα χουμικά συστατικά. Διαφορετικά είδη οργανικού υλικού έχουν διαφορετικές επιδράσεις στη συνοχή και την υδροφοβικότητα του εδάφους, εξαρτώμενα από τα εγγενή χαρακτηριστικά τους. Τα χουμικά συστατικά είναι κυρίως υδροφοβικά και αυξάνουν την υδροφοβικότητα των αργίλων (Jouany 1991). Έτσι, τα προϊόντα πλούσια σε χουμικά συστατικά, όπως είναι τα ζωικά απόβλητα και τα διάφορα προϊόντα κόμποστ, αναμένεται ότι μπορεί να αυξήσουν την υδροφοβικότητα των συσσωματωμάτων και κατ' επέκταση τη σταθερότητά τους υπό την επίδραση του νερού (Abiven et al. 2009).

Τις προηγούμενες δεκαετίες παρουσιάστηκαν διάφοροι **μηχανισμοί συσσωμάτωσης**. Οι **Tisdall & Oades (1982)** παρουσίασαν το **ιεραρχικό πρότυπο συσσωμάτωσης (aggregate hierarchy concept)** σύμφωνα με το οποίο διαφορετικά επίπεδα συσσωμάτωσης σχηματίζονται κάτω από την επίδραση διαφορετικών μηχανισμών συνένωσης. Έτσι τα ελεύθερα πρωτογενή σωματίδια (οργανικά και ανόργανα) και τα συσσωματώματα κοκκομετρίας <20μm ενώνονται μεταξύ τους με ισχυρούς (persistent) οργανικούς δεσμευτικούς παράγοντες (χουμοποιημένη οργανική ύλη και σύμπλοκα πολυσθενή μεταλλικών κατιόντων), οξείδια και αργιλοπυριτικά άλατα και σχηματίζουν τα μικρο-συσσωματώματα (20-250 μm). Τα παραγόμενα σταθερά μικρο-συσσωματώματα ενώνονται

μεταξύ τους σχηματίζοντας τα μακρο-συσσωματώματα (>250 μm) μέσω προσωρινών (ρίζες και υφές μυκήτων) και μεταβατικών-παροδικών (πολυσακχαρίτες) συγκολλητικών παραγόντων. Λόγω αυτής της ιεραρχικής σειράς σχηματισμού των συσσωματωμάτων και των συνδετικών παραγόντων, η σταθερότητα των μικρο-συσσωματωμάτων είναι υψηλότερη από τη σταθερότητα των μακρο-συσσωματωμάτων και λιγότερο εξαρτώμενη από τη γεωργική διαχείριση. (Six et al. 2004)

Ο **Oades (1984)** ανέπτυξε τη θεωρία ότι οι ρίζες και οι υφές συγκρατούν μαζί το μακρο-συσσωμάτωμα και αποτελούν τον πυρήνα για τον σχηματισμό μικρο-συσσωματωμάτων στο κέντρο του μακρο-συσσωματώματος. Ο **Elliott (1986)** προχώρησε σε δύο παρατηρήσεις όσον αφορά στην ιεραρχική θεωρία συσσωμάτωσης: (1) αύξηση της συγκέντρωσης C με αύξηση της τάξης μεγέθους συσσωματωμάτων και (2) υψηλότερη περιεκτικότητα σε νέες και πιο 'ασταθείς' (labile, εύκολα αποδομήσιμες) ενώσεις C (π.χ. ενώσεις με υψηλότερη αναλογία C:N) στα μακρο-συσσωματώματα σε σχέση με τα μικρο-συσσωματώματα. Οι **Oades & Waters (1991)** κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ιεραρχική θεωρία συσσωμάτωσης λαμβάνει χώρα μόνο στα εδάφη όπου η οργανική ύλη είναι ο πιο σημαντικός συγκολλητικός παράγοντας. Οι **Golchin et al. (1995)** πρότειναν ότι όταν φρέσκο φυτικό υλικό εισέρχεται στο έδαφος, προκαλεί το σχηματισμό συσσωματωμάτων επειδή προκαλεί την παραγωγή συνδετικών παραγόντων μικροβιακής προέλευσης, όντας μια πηγή C για μικροβιακή δραστηριότητα. Ωστόσο, οι **Angers et al. (1997)** παρουσίασαν τα πιο πειστικά ποσοτικά δεδομένα για την επιβεβαίωση της θεωρίας σχηματισμού μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα.

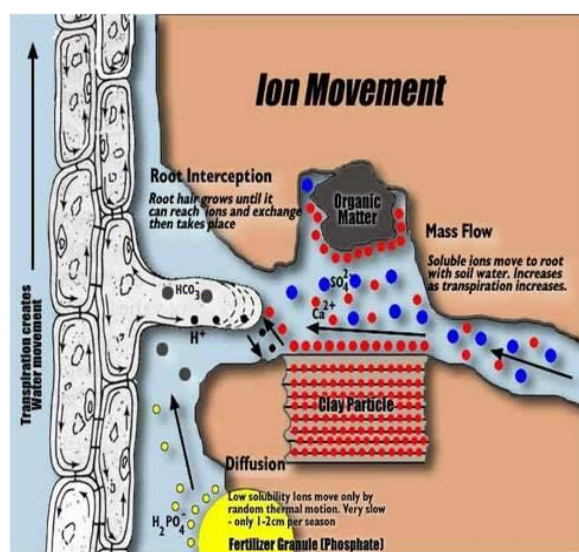
Μετά τη μελέτη των Angers et al. (1997) πολυάριθμες μελέτες έχουν προτείνει μικρές παραλλαγές στα εννοιολογικά μοντέλα που παρουσιάζουν τον ρόλο που διαδραματίζει η οργανική ύλη και ειδικότερα η **σωματιδιακή οργανική ύλη (POM)** στο σχηματισμό μικρο-συσσωματωμάτων εντός των μακρο-συσσωματωμάτων (Plante et al. 2002; Six et al. 1998; Stamati, et al. 2013b; Nikolaidis and Bidoglio, 2013; Angers et al. 1997). Το POM αποτελείται από μεγάλα σωματίδια οργανικής ύλης (250-2000 μm) τα οποία υπάρχουν ως ελεύθερο κλάσμα ελαφρού POM (LF) ή επικαλυμμένα με σωματίδια εδάφους (Bronick & Lal 2005). Οι Nikolaidis and Bidoglio (2013) αναφέρουν ότι καθώς η POM αποσυντίθεται, οι βακτηριακές αποικίες δεσμεύουν τα σωματίδια της αργίλου με τα εκκρίματά τους. Η συγκρότηση των σωματιδίων σε μακρο-συσσωματώματα διευκολύνεται από τις ρίζες και από τις υφές των μυκήτων καθώς οι εκκρίσεις τους βοηθούν στην δέσμευση-σύνδεση των σωματιδίων. Με τον τρόπο αυτό, τα μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται εντός των μακρο-συσσωματωμάτων και απελευθερώνονται σταδιακά κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης. Έτσι, πρώτα λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός των μακρο-συσσωματωμάτων γύρω από το σωματιδιακό φυτικό υλικό και έπειτα ακολουθεί η απελευθέρωση των μικρο-συσσωματωμάτων καθώς τα υλικά αποσυντίθενται (Σχ. 2.10) (Stamati, et al., 2013b).



Σχήμα 2.10. Εννοιολογικό μοντέλο σχηματισμού και διάσπασης συσσωματωμάτων. (Stamati, et al., 2013b)

2.1.7 Θρέψη φυτών

Τα φυτά απορροφούν τα διάφορα στοιχεία είτε από τον αέρα (C, O, H), είτε από το έδαφος σε ανόργανες ιονικές μορφές διαλυμένες στην υγρασία του εδάφους. Η μετακίνηση των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων στη ριζόσφαιρα διέπεται από τρεις μηχανισμούς (Σχ. 2.11): τη μαζική ροή (mass flow), τη διάχυση (diffusion) και την ανάπτυξη ριζών (root interception). Η **μαζική ροή** είναι η μετακίνηση των διαλυτών θρεπτικών συστατικών προς τις ρίζες με την κίνηση του νερού. Η απώλεια νερού από τα φυτά λόγω διαπνοής είναι ο κύριος μηχανισμός που προκαλεί τη μαζική ροή του εδαφικού διαλύματος προς την επιφάνεια της ρίζας. Είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός θρέψης των φυτών. Αφορά τα ιόντα που είτε είναι άφθονα (Ca^{2+} , Mg^{2+}), είτε πολύ ευκίνητα (κυρίως ανιόντα, όπως NO_3^- , SO_4^{2-} κτλ.). Η **διάχυση** είναι ο μηχανισμός που παρέχει τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά στις ρίζες των φυτών καθώς η γονιμότητα του εδάφους μειώνεται. Είναι η κίνηση ιόντων λόγω διαφοράς συγκέντρωσης του ιόντος μέσα στη μάζα του νερού. Η πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και η ανοργανοποίηση παρέχουν τις κινητήριες δυνάμεις για τη διάχυση στην επιφάνεια της ρίζας, μειώνοντας τη συγκέντρωση των θρεπτικών στην επιφάνεια της ρίζας (απορρόφηση) και αυξάνοντας τη συγκέντρωση αλλού στο έδαφος (ανοργανοποίηση). Αφορά κυρίως το P και το K. Η **αύξηση ριζών (root interception)**, όπου οι ρίζες μετακινούνται προς το θρεπτικό είναι μικρής σημασίας για τη θρέψη σε σχέση με τους 2 πρώτους μηχανισμούς. Η ποσότητα διαθέσιμου αζώτου, φωσφόρου και καλίου ανά μονάδα όγκου εδάφους είναι πάντοτε μικρότερη από την ποσότητα των θρεπτικών ουσιών που απαιτούνται για την κατασκευή της ρίζας, επομένως η ανάπτυξη της ρίζας δεν μπορεί ποτέ να αποτελέσει σημαντικό μηχανισμό τροφοδοσίας των θρεπτικών. Η ανάπτυξη της ρίζας είναι κρίσιμη, όχι επειδή απορροφά θρεπτικά συστατικά, αλλά επειδή η ριζόσφαιρα διαπλατύνεται και επεκτείνεται δημιουργώντας νέα επιφάνεια ρίζας πάνω στην οποία μπορούν να προσροφούνται τα θρεπτικά συστατικά μέσω της διάχυσης και της μαζικής ροής. Οι μυκόρριζες και οι μυκορριζικοί υφές αυξάνουν τον όγκο του εδάφους που λαμβάνουν θρεπτικές ουσίες τα φυτά και λειτουργούν βασικά ως επέκταση του ριζικού συστήματος στο χώμα.



Σχήμα 2.11. Μηχανισμοί μετακίνησης ανόργανων θρεπτικών συστατικών προς τη ριζόσφαιρα. [AGRONOMY 4052 (<http://www.soilfertility.lsu.edu/Agro4052.htm>)]

Η ποσότητα των θρεπτικών ουσιών που ανακυκλώνονται διαμέσου της βλάστησης εξαρτάται από τη δυναμική ισορροπία μεταξύ της προσφοράς θρεπτικών ουσιών από το έδαφος και της ζήτησης θρεπτικών συστατικών από τη βλάστηση. Η αναλογία των θρεπτικών ουσιών που απαιτούνται για τη στήριξη της μέγιστης ανάπτυξης είναι παρόμοια για τα περισσότερα φυτά (Ingestad & Agren 1988). Οποιαδήποτε θρεπτική ουσία εμφανίζεται λιγότερο από τη βέλτιστη αναλογία είναι πιθανό να περιορίσει την ανάπτυξη, γι αυτό το λόγο **τα φυτά επενδύουν κατά προτίμηση στην απορρόφηση εκείνων των θρεπτικών συστατικών που περιορίζουν την ανάπτυξη**. Η θρεπτική ουσία που περιορίζει ισχυρά την ανάπτυξη ενός φυτού, καθορίζει και τα ποσοστά ανακύκλωσης και των υπόλοιπων θρεπτικών.

Τα θρεπτικά στοιχεία που λαμβάνονται από τα φυτά για την ανάπτυξή τους χωρίζονται σε **μακροθρεπτικά**: άζωτο (N), φώσφορος (P), κάλιο (K), ασβέστιο (Ca), θείο (S), μαγνήσιο (Mg), νάτριο (Na) και **μικροθρεπτικά** (ή ιχνοστοιχεία): βόριο (B), χλώριο (Cl), μαγγάνιο (Mn), σίδηρος (Fe), ψευδάργυρος (Zn), χαλκός (Cu) και μολυβδαίνιο (Mo). Όλα τα θρεπτικά μεταφέρονται προς τα πάνω στα φυτά μέσω του ξύλου ή του βλαστού. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αζώτου, φωσφόρου και καλίου εμφανίζονται τυπικά στα φύλλα (και σε μικρότερο βαθμό στις λεπτές ρίζες) λόγω της σημασίας αυτών των στοιχείων στο μεταβολισμό. Το ξύλο, αντίθετα, έχει χαμηλές συγκεντρώσεις όλων των στοιχείων, (ιδιαίτερα του αζώτου και του φωσφόρου) εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας του ξυλλογίου, που αποτελείται από νεκρά κύτταρα. **Η διαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών επηρεάζει την ανάπτυξη περισσότερο από ότι επηρεάζει τη συσσώρευση των θρεπτικών ουσιών στους φυτικούς ιστούς**. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών ουσιών στους ιστούς αυξάνονται σημαντικά μόνο όταν άλλοι παράγοντες αρχίζουν να περιορίζουν την ανάπτυξη των φυτών.

Τα προσλαμβανόμενα θρεπτικά στοιχεία, χρησιμοποιούνται από το φυτό είτε σαν δομικά υλικά των ιστών του, είτε ως παράγοντες που ρυθμίζουν τη θρέψη του (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) (Χουλιάρης Α.Ν. 2004). Τα πιο σημαντικά στοιχεία από τα μακροθρεπτικά είναι το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο. Το **άζωτο** είναι συστατικό όλων των ζωντανών κυττάρων και της χλωροφύλλης και αποτελεί απαραίτητο μέρος όλων των πρωτεϊνών, των ενζύμων και των μεταβολικών διεργασιών που εμπλέκονται στη σύνθεση και μεταφορά ενέργειας. Η περιεκτικότητα των φυτών σε άζωτο κυμαίνεται μεταξύ 1 και 6% του ξηρού βάρους των ιστών του φύλλου. Συνήθως τα νεαρά φυτά και οι ιστοί έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε N. Η έλλειψη αζώτου στο χώμα εκδηλώνεται στα φυτά με φύλλα κιτρινωπά αλλά και με αργή και μειωμένη ανάπτυξη (Hopkins & Huner 2009). Το ριζικό σύστημα επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από το υπέργειο. Περίσσεια N προκαλεί μεγάλη φυτική ανάπτυξη, αυξάνει τη φυλλική επιφάνεια και επομένως τη φωτοσύνθεση και προκαλεί οψίμιση της παραγωγής, ιδίως όταν ο P δεν υπάρχει στην επιθυμητή αναλογία.

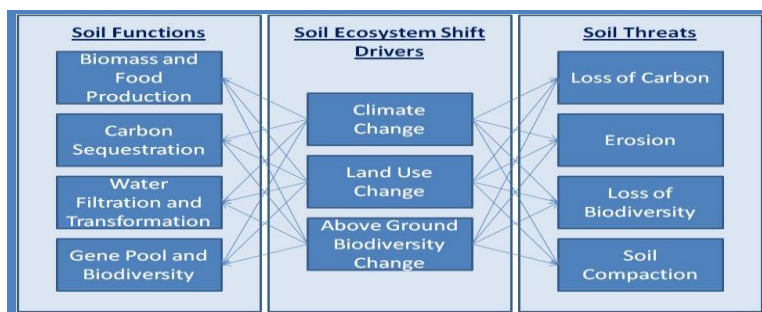
Ο **φώσφορος** βρίσκεται στο φυτό υπό ανόργανη και οργανική μορφή. Ο οργανικός αποτελεί συνήθως το 1/3-2/3 του συνολικού. Ο φώσφορος είναι δομικό συστατικό του DNA και της ATP και ADP και ως εκ τούτου είναι απαραίτητος για την κυτταροδιαίρεση, τη φωτοσύνθεση και γενικώς για την παροχή βιολογικής ενέργειας στο φυτό. Ο P συμβάλλει στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και προωρίζει την παραγωγή. Επειδή είναι απαραίτητος για το ριζικό σύστημα, χρειάζεται στο φυτό από τα πρώτα στάδια αναπτύξεως. Οι συγκεντρώσεις φωσφόρου στα ώριμα φύλλα κυμαίνονται από 0,2 έως 0,5% (Σαρρής Π. Φ.). Έλλειψη P προκαλεί ατροφική ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και κατά συνέπεια και του υπέργειου τμήματος. Περίσσεια P είναι σπάνια περίπτωση γιατί δεσμεύεται εύκολα στο έδαφος. Τυχόν περίσσεια μπορεί να περιορίσει, λόγω ανταγωνισμού, την πρόσληψη άλλων στοιχείων και να μειώσει την παραγωγή λόγω υπερβολικής πρωϊμησης.

Το **κάλιο** σχετίζεται με τον σχηματισμό της χλωροφύλλης και επομένως επηρεάζει τη φωτοσύνθεση. Δεν είναι δομικό συστατικό των οργανικών ενώσεων αλλά παίζει καταλυτικό ρόλο στον πολυμερισμό των υδατανθράκων και τη χρησιμοποίηση νιτρικών αλάτων στον σχηματισμό πρωτεϊνών. Ακόμη συμβάλλει στην κυτταρική διαίρεση, στην ενζυματική δράση και στην οικονομία του φυτού ως προς το νερό. Το K παίζει σπουδαίο ρόλο για τη φυσιολογική λειτουργία των στοματίων και επηρεάζει το άνοιγμα και το κλείσιμο αυτών. Ανεπαρκής λειτουργία των στοματίων, που προκαλείται από έλλειψη K, οδηγεί σε περιορισμό της εισόδου του CO₂ και κατά συνέπεια και της φωτοσύνθεσης. Επίσης, όταν το K είναι ανεπαρκές, τα στομάτια δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και οι απώλειες νερού με τη διαπνοή μπορεί να φθάσουν σε επικίνδυνα επίπεδα. Γενικώς το K μετριάξει τις τυχόν δυσμενείς επιπτώσεις από την περίσσεια N και P, υποβοηθάει την πρόσληψη νερού, την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και την αντοχή των φυτών στην ξηρασία και αυξάνει την αφομοίωση. Στα υγιή πλήρως ανεπτυγμένα ώριμα φύλλα το τυπικό εύρος επάρκειας για το κάλιο είναι μεταξύ 1,5 και 4% σε ξηρή βάση και με λόγο N:K (w:w) = 1:1. Περίσσεια K μπορεί να δυσχεράνει την πρόσληψη άλλων κατιόντων, ιδιαιτέρως του Mg και Ca. [Πλατφόρμα Τηλεκπαίδευσης, <http://eclass.uth.gr/eclass/>]

2.2 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΣΕ ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Η χρήση μη βιώσιμων καλλιεργητικών πρακτικών, οι εξορύξεις, οι αποψιλώσεις, η αστικοποίηση και η υποβάθμιση από τη βιομηχανική ρύπανση είχαν ως αποτέλεσμα ο ρυθμός απώλειας του εδάφους να είναι πολύ γρηγορότερος (100 φορές ή και περισσότερο) από αυτόν του σχηματισμού νέου εδάφους -με συνέπεια το έδαφος να θεωρείται πλέον ένας πεπερασμένος φυσικός πόρος (Nikolaidis, 2011). Η αγροτική διαχείριση είναι μέρος του προβλήματος καθώς συνδέεται με φαινόμενα διάβρωσης, αλάτωσης, συμπίεσης, καταστροφή των εδαφικών συσσωματωμάτων και υποβάθμιση εδαφικής δομής, μείωση οργανικής ύλης, κ.α. Οι σύγχρονες γεωργικές πρακτικές έχουν οδηγήσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών μορφών ήπιας καλλιέργειας με εντατικές καλλιέργειες, σε συστήματα μονοκαλλιεργειών και σε χρήση μεγάλων ποσοτήτων φυτοπροστατευτικών προϊόντων και λιπασμάτων. Η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής και οι ακατάλληλες γεωργικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο τα τελευταία 60 χρόνια αποσκοπούσαν στη μεγιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής, χωρίς να θεωρείται το έδαφος ως ένα οικοσύστημα (Nikolaidis 2011a; Banwart 2011). Ως αποτέλεσμα, τα σύγχρονα γεωργικά συστήματα μπορεί να έχουν γίνει παραγωγικά, αλλά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση ανόργανων εμπορικών λιπασμάτων. Ωστόσο, τα λιπάσματα είναι αρκετά δαπανηρά και δεν χρησιμοποιούνται κατάλληλα. Χρησιμοποιούμε 50 φορές περισσότερο P από την ποσότητα που πραγματικά χρειαζόμαστε, στέλνοντας τεράστιες ποσότητες P σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και τελικά προκαλώντας ευτροφισμό στα νερά. Επιπλέον, οι τρέχουσες γεωργικές πρακτικές δεν είναι βιώσιμες, αφού απαιτούν 10-57 φορές περισσότερη ενέργεια για να παράγουν 1 μονάδα ενέργειας από ένα προϊόν κρέατος και 7-10 μονάδες περισσότερη ενέργεια για ένα φυτικό προϊόν (phD Stamati, Nikolaidis 2011). Στην Ελλάδα, υπάρχουν περίπου 255.000 τρακτέρ που προκαλούν διάβρωση των ευπαθών εδαφών.

Συνολικά, οι γεωργικές πρακτικές έχουν επηρεάσει σοβαρά τις λειτουργίες του οικοσυστήματος του εδάφους και σε πολλές περιπτώσεις προκάλεσαν την κατάρρευση του εδαφικού οικοσυστήματος, επηρεάζοντας την ποιότητα του νερού και του εδάφους. Αλλαγές στις χρήσεις γης όπως η μετατροπή εδαφών με φυσική βλάστηση σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, η μείωση της υπέργειας βιοποικιλότητας εξαιτίας των καλλιεργητικών πρακτικών και την υπερβόσκηση, καθώς και οι κλιματικές αλλαγές μπορούν να οδηγήσουν σε απότομες αλλαγές στο εδαφικό οικοσύστημα και να καταλήξουν σε μακράς διάρκειας μεταβολές τόσο στο τοπίο όσο και στην βιοτική και αβιοτική δομή του εδάφους (Σχ. 1.12) (Nikolaidis, 2011).



Σχήμα 2.12. Σχέση μεταξύ των οδηγών που αλλάζουν το οικοσύστημα του εδάφους σε σχέση με τις λειτουργίες και τις απειλές του εδάφους (Nikolaidis 2011a).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ανέλυσε και περιέγραψε την απειλή που αντιμετωπίζει το έδαφος στην Ευρώπη σε ένα έγγραφο γνωστό ως «Towards a Thematic Strategy of Soil Protection» ή, πιο απλά, «Soil Communication» (Commission of the European Communities 2006). Η Θεματική Στρατηγική για την Προστασία του Εδάφους τελικά υιοθετήθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο το Σεπτέμβριο του 2006 (EC, COM 2006 231 final). Οι κύριες διαδικασίες εδαφικής υποβάθμισης θεωρούνται μεταξύ άλλων, η μείωση της εδαφικής γονιμότητας, απώλειες άνθρακα και βιοποικιλότητας, ο περιορισμός της ικανότητας του εδάφους να συγκρατεί το νερό, η διατάραξη των κύκλων των αερίων και των θρεπτικών συστατικών και η μείωση της αποδόμησης των ρυπογόνων ουσιών. Η υποβάθμιση των εδαφών επηρεάζει τοιούτοτρόπως άμεσα την ποιότητα του νερού και του αέρα, τη βιοποικιλότητα και τις κλιματικές αλλαγές. Παράλληλα, μπορεί να επηρεάσει την υγεία του πληθυσμού ή να απειλήσει την ασφάλεια των ειδών ανθρώπινης και ζωικής διατροφής (Commission of the European Communities 2006; Montanarella & Panagos 2015). Οι δράσεις της Θεματικής Στρατηγικής για την Προστασία του Εδάφους περιλαμβάνουν τη διεξαγωγή επιστημονικής έρευνας που αναπτύσσει τη βάση δεδομένων για μια αποτελεσματική πολιτική για την προστασία και την ενίσχυση των λειτουργιών του εδάφους. Ένα σκέλος της τρέχουσας έρευνας περιλαμβάνει την ανάπτυξη παρατηρητηρίων κρίσιμης ζώνης, δηλαδή ερευνητικών χώρων για τη διεπιστημονική μελέτη των διεργασιών του εδάφους και των αλυσιδωτών φυσικοχημικών και βιολογικών μεταβολών εντός της Κρίσιμης Ζώνης της Γης (Project SoilTrEC, Banwart et al. 2011).

Η υποβάθμιση των εδαφών ακολουθεί μια σταδιακή πορεία κατά την οποία ο ρυθμός υποβάθμισης αυξάνεται. Στην πρώτη φάση της υποβάθμισης περιορίζεται η βλάστηση που προστατεύει το έδαφος. Όλοι οι παράγοντες που συνδέονται με τον περιορισμό της βλάστησης συμβάλλουν στην υποβάθμιση κατά το στάδιο αυτό. Αποτέλεσμα του περιορισμού της βλάστησης είναι η μείωση της βιολογικής δραστηριότητας του εδάφους, η μείωση της οργανικής ουσίας, η καταστροφή της δομής και η διάσπαση των συσσωματωμάτων. Κατόπιν, ακολουθεί αύξηση της επιφανειακής απορροής, διάβρωση και υποβάθμιση των εδαφικών πόρων. Η υποβάθμιση του εδάφους συντελείται επίσης χωρίς τον περιορισμό της βλάστησης, με την εκμηχανισμένη καλλιέργεια και την έντονη και απότομη άρδευση των καλλιεργειών, λόγω του σπασίματος των συσσωματωμάτων.

Για τη μελλοντική ευζωία θα πρέπει να αναληφθεί επείγοντως συντονισμένη δράση με σκοπό τη βελτίωση της οικολογικής ανθεκτικότητας και τη μεγιστοποίηση των οφελών που μπορεί να αποφέρει η γεωργική παραγωγή, διατηρώντας τη βιοποικιλότητα, συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών οικοσυστήματος που αυτή παρέχει (φυσικό κεφάλαιο), για την εγγενή της αξία και τη σημαντική συμβολή της στην ευημερία των ανθρώπων και στην οικονομική ευμάρεια.

2.3 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΒΙΩΣΙΜΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

2.3.1 Εμπλουτισμός των εδαφών με οργανική ύλη

Η οργανική ύλη του εδάφους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μακροπρόθεσμη διατήρηση ή / και την αποκατάσταση του εδάφους και συνεπώς στη βιώσιμη γεωργική παραγωγή λόγω της βελτίωσης των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων των εδαφών (Diacono & Montemurro 2010; Bronick & Lal 2005; Nikolaidis & Bidoglio 2013). Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι αποτελεί ένα πολύ δραστικό δείκτη ποιότητας εδάφους που επηρεάζει την παραγωγικότητα και τη λειτουργικότητα των εδαφών (Komatsuzaki & Ohta 2007; Lal 2006; F. Stamati et al. 2013a).

Η οργανική ύλη του εδάφους αποτελείται από υπολείμματα φυτών και ζώων, ζώντες μικροοργανισμούς και από τον χούμο. Επιδρά με πολλούς τρόπους στο έδαφος και στην ανάπτυξη των φυτών (Σχ. 2.13), όπως στην αποσάθρωση (διαλυτοποίηση) ορυκτών, στη γένεση του εδάφους, στην ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας, στην προσρόφηση βαρέων μετάλλων, στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του εδάφους και τέλος στη δημιουργία συσσωματωμάτων και καλής δομής. Η συσσωμάτωση των κόκκων του εδάφους βελτιώνει το πορώδες και την κατανομή των διαφόρων μεγέθους πόρων, με αποτέλεσμα τη μείωση του φαινομένου ειδικού βάρους και τη βελτίωση της υδατοικανότητας του εδάφους. Επίσης, η οργανική ουσία επιδρά θετικά στην ανάπτυξη των φυτών εφοδιάζοντας το έδαφος με θρεπτικά στοιχεία και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητά τους. Ουσιαστικά, αποτελεί την πηγή του 90% - 95% του αζώτου σε εδάφη χωρίς λίπανση και είναι η κυριότερη πηγή διαθέσιμου φωσφόρου και διαθέσιμου θείου.



Σχήμα 2.13. Οργανική Ύλη: Πηγή θρεπτικών για τα φυτά και δρώσα δύναμη των φυσικών, χημικών και βιολογικών μετασχηματισμών στα χερσαία οικοσυστήματα.

Οι γεωργικές πρακτικές διαχείρισης που ενισχύουν την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικές ουσίες προτιμώνται τα τελευταία χρόνια γιατί συνδυάζουν αυξημένες γεωργικές αποδόσεις με τη βελτίωση των εδαφικών λειτουργιών και της ποιότητας του περιβάλλοντος. Με τον τρόπο αυτό οι δραστηριότητες αυτές μπορούν να θεωρηθούν βιώσιμες (Lal 2004).

Γεωργικές πρακτικές που αυξάνουν τη σύσταση των εδαφών σε οργανικές ουσίες είναι η **καθόλου έως ελαφριά άροση των εδαφών, οι εναλλαγές καλλιεργειών, η φυτοκάλυψη, η χλωρή λίπανση και η προσθήκη οργανικών λιπασμάτων**. Τα παραδοσιακά συστήματα καλλιέργειας που δεν χρησιμοποιούν μηχανική κατεργασία έχουν ως αποτέλεσμα να παραμένουν τα διάφορα φυτικά υπολείμματα στην επιφάνεια των εδαφών, διατηρώντας και βελτιώνοντας την περιεκτικότητά τους σε οργανική ουσία (Diacono & Montemurro 2010). Παράλληλα, η μειωμένη κατεργασία του εδάφους αυξάνει τους μακροπόρους και τα βιοκανάλια που επηρεάζουν την κίνηση και τη διαθεσιμότητα του νερού, οδηγώντας σε μεγαλύτερη φυτική παραγωγή (Bronick & Lal 2005). Οι εναλλαγές καλλιεργειών μέσω της εφαρμογής κατάλληλων συστημάτων αμειψισποράς ψυχανθών – αγρωστωδών συνήθως αυξάνουν την οργανική ύλη και επιφέρουν αλλαγές στις πηγές N, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητά τους για τα φυτά και ως εκ τούτου η απόδοση N είναι μεγαλύτερη (Diacono & Montemurro 2010). Με την εναλλαγή των φυτών που είναι βαθύρριζα ή επιπολαιόριζα, οι καλλιέργειες έχουν στη διάθεσή τους μεγαλύτερη ποσότητα θρεπτικών στοιχείων, τα οποία παίρνουν από διαφορετικά στρώματα του εδάφους. Εμπλουτίζεται, έτσι, περισσότερο το έδαφος σε οργανική ουσία λόγω της αυξημένης παραγωγής φυτικών υπολειμμάτων (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000). Η φυτοκάλυψη ή η χλωρή λίπανση μπορεί επίσης να ενισχύσει την αποτελεσματική χρήση των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά, κυρίως λόγω της αύξησης του μικροβιακού πληθυσμού και της δραστηριότητας του εδάφους (Watson et al. 2002). Η φυτοκάλυψη γενικά αναπτύσσεται για να παρέχει κάλυψη του εδάφους κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, αποτρέποντας έτσι τη διάβρωσή του από την ισχύ του ανέμου και του βρόχινου νερού, η οποία μειώνει την περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, αποτελεί μια τεχνική που περιορίζει την έκλυση θρεπτικών ουσιών, τα οποία γίνονται διαθέσιμα για τη μετέπειτα καλλιέργεια (Diacono & Montemurro 2010).

Παρουσιάζεται, λοιπόν, αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις στρατηγικές εναλλακτικής οικοδόμησης γονιμότητας, επειδή οι συμβατικές εισροές, όπως τα συνθετικά λιπάσματα, πρέπει να αποκλειστούν ή να μειωθούν στη βιώσιμη γεωργική διαχείριση. Όλες οι ομάδες αποβλήτων παρουσιάζουν γενικά αξιοσημείωτα περιεχόμενα οργανικής ύλης και σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών και η χρήση τους στη γεωργία μπορεί να συμβάλει στο κλείσιμο των φυσικών οικολογικών κύκλων (Diacono & Montemurro 2010). Η αυξημένη ανακύκλωση των οργανικών υπολειμμάτων ως λιπασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση των μη ανανεώσιμων πόρων, π.χ. ορυκτών καυσίμων και τύρφης, αλλά και την αποφυγή υπερβολικής κατανάλωσης ενέργειας για την παραγωγή των χημικών λιπασμάτων και των φυτοφαρμάκων (Mondini & Sequi 2008).

2.3.2 Ζωική κοπριά

Η προσθήκη στο έδαφος φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων και άλλων οργανικών υλικών αποτελεί μια πολύ παλιά γεωργική πρακτική. Το πιο γνωστό οργανικό λίπασμα που χρησιμοποιείται στη γεωργία επί χιλιετίες είναι η **ζωική κοπριά**. Η κοπριά αποτελείται από τα στερεά και υγρά απεκκρίματα των διαφόρων αγροτικών ζώων και από το άχυρο ή άλλο υλικό με το οποίο επιστρώνεται ο στάβλος. Τα στερεά απεκκρίματα αποτελούνται από τα δύσπεπτα μέρη της τροφής που καταναλώθηκε και δεν υπέστησαν την επίδραση της πεπτικής λειτουργίας. Τα υγρά απεκκρίματα (ούρα) περιέχουν τα συστατικά της τροφής που υπέστησαν την επίδραση της πεπτικής λειτουργίας και χρησιμοποιήθηκαν από τον οργανισμό των ζώων και αργότερα απεκκρίθηκαν. Όλα τα θρεπτικά στα ούρα βρίσκονται σε

διαλυτή μορφή και είναι, είτε αμέσως διαθέσιμα στα φυτά, είτε καθίστανται εύκολα διαθέσιμα. Τα ούρα σε σχέση με τα στερεά απεκκρίματα έχουν μικρή περιεκτικότητα σε φώσφορο και υψηλή σε άζωτο και κάλι. Γενικά όσο πιο εύπεπτη είναι η τροφή των ζώων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των θρεπτικών που περιέχεται στα ούρα και τόσο μεγαλύτερη είναι η θρεπτική αξία της κοπριάς. Η ειδική σύσταση της κοπριάς εξαρτάται, από το είδος του ζώου και την ηλικία, από το είδος και την ποσότητα της τροφής με την οποία τρέφεται το ζώο, από το υλικό επίστρωσης του στάβλου, καθώς και από τον τρόπο συλλογής και διατήρησης της κοπριάς (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000).

Κατά κανόνα, από τις τροφές, με τις οποίες τρέφονται τα ζώα, χρησιμοποιούν μόνο το 1/5. Τα υπόλοιπα 4/5 αποβάλλονται με τα απεκκρίματά τους ως στερεά και υγρά. Ειδικότερα από τις τροφές που καταναλώνονται, τα 3/4 του αζώτου, τα 4/5 φωσφόρου, τα 9/10 του καλίου, και το 1/2 της οργανικής ύλης, δεν χρησιμοποιούνται από τα ζώα. Γι αυτό το λόγο, οι ζωικές κοπριές είναι πολύτιμες πηγές μακρο- και μικρο στοιχείων (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000).

Κύρια γνωρίσματα των ζωικών κοπριών είναι ότι εμφανίζουν μεγάλη μεταβλητότητα στη ποσότητα υγρασίας και θρεπτικών και ανισόρροπη αναλογία μεταξύ των θρεπτικών που περιέχουν. Επίσης, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ φρέσκιας και χωνεμένης κοπριάς με σημαντικότερη ότι η χωνεμένη κοπριά είναι πλουσιότερη σε θρεπτικά στοιχεία (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000).

Οι καλλιέργειες που ευνοούνται, ιδιαίτερα, από την εφαρμογή της κοπριάς είναι οι σκαλιστικές. Η κοπριά είναι βασικά ένα αζοτοκαλιούχο λίπασμα και η τομάτα συγκαταλέγεται μεταξύ των καλλιεργειών που έχουν σημαντικές απαιτήσεις σε άζωτο και κάλι.

2.3.3 Παραγωγή κόμποστ από το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων

Η έλλειψη αρκετής ποσότητας κοπριάς κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα οδήγησε πολλούς παραγωγούς να προσφύγουν σε κάθε είδους υπολείμματα της γεωργικής εκμετάλλευσης και να παρασκευάζουν με αυτά λιπαντικά μίγματα (κομπόστες), σε αντικατάσταση της κοπριάς. Με τα μίγματα αυτά επιτυγχάνεται πολλές φορές προϊόν όμοιο με τη καλά χωνεμένη κοπριά.

Στην Ελλάδα παράγονται ετησίως 5,8 εκ. τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων, εκ των οποίων περίπου 2,6 εκ. τόνοι είναι βιοαπόβλητα. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών εξακολουθεί να καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό αξιοποιείται μέσω της οικιακής κομποστοποίησης ή ανακτάται σε εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας.

Η κατεργασία των φυσικών και ζωικών υπολειμμάτων βασίζεται στη φυσική διεργασία της ζύμωσης (κομποστοποίηση), κάτω από ευνοϊκές συνθήκες υγρασίας, θερμοκρασίας και αερισμού. Η ποιότητα του κόμποστ εξαρτάται από το είδος της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε και την παραγωγική διαδικασία (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000). Η κομποστοποίηση είναι η αποσύνθεση βιοαποδομήσιμων υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες, όπου αναπτύσσονται θερμοκρασίες κατάλληλες για θερμόφιλα βακτήρια ως αποτέλεσμα τη βιολογική παραγωγή θερμότητας. Το κόμποστ ορίζεται ως το στερεό σωματιδιακό προϊόν της κομποστοποίησης που έχει υποστεί απολύμανση και σταθεροποίηση (Komnitsas & Zaharaki 2014). Ειδικότερα, η χρήση κόμποστ που παράγεται

από το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων (κόμποστ ΑΣΑ) οδηγεί αφενός στην αύξηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανικά, με όλες τις θετικές επιδράσεις στο έδαφος και τα οικοσυστήματα, αφετέρου συμβάλλει στη μείωση του όγκου των στερεών αποβλήτων προς διάθεση σε Χ.Υ.Τ.Α. προστατεύοντας το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

Η κομποστοποίηση πραγματοποιείται σε τέσσερις φάσεις, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με το ύψος της θερμοκρασίας:

- i) Ψυχροφιλική φάση (έως 22 °C, διάρκεια 1-2 ημέρες)
- ii) Πρώτη Μεσοφιλική φάση (έως 22 – 40 °C, διάρκεια 3-4 ημέρες)
- iii) Θερμοφιλική φάση (έως 40 – 60 °C, διάρκεια 15-20 ημέρες)
- iv) Δεύτερη Μεσοφιλική φάση (έως 40 °C – θερμοκρασία περιβάλλοντος, διάρκεια >30 ημέρες)



Εικόνα 2.2. Ανοιχτές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης. [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]

Η πλήρης και ταχεία βιολογική αποδόμηση των οργανικών υλικών με τη διαδικασία της κομποστοποίησης, εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες όπως είναι οι αερόβιες συνθήκες, η υγρασία, η σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N), το μέγεθος των τεμαχιδίων του προς ζύμωση υλικού, η θερμοκρασία της διεργασίας και το pH [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2008].

Αερισμός

Ο περιοδικός αερισμός του βιοαποδομούμενου υλικού είναι απαραίτητος για να παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου στους αερόβιους μικροοργανισμούς που πραγματοποιούν τη ζύμωση του υλικού. Όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στη μάζα πέσει κάτω του 5% περίπου, αρχίζουν να επικρατούν αναερόβιες συνθήκες που επιβραδύνουν τη ζύμωση και προκαλούν την παραγωγή δύσσοσμων αερίων.

Υγρασία

Η παρουσία ελεύθερου νερού στο ζυμούμενο υλικό είναι απαραίτητη για τις βιοτικές ανάγκες και τη μετακίνηση των μικροοργανισμών. Η συνολική ποσότητα υγρασίας που απαιτείται για την ομαλή πορεία της ζύμωσης εξαρτάται από τη φύση του υλικού (υδατοϊκανότητα) και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ του 55% και 65% σε υγρή βάση.

Σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N)

Η σχέση C/N επιδρά σημαντικά στην βιολογική αποδόμηση του υλικού. Δεδομένου ότι μόνο το 1/3 του μεταβολιζόμενου C χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς (το υπόλοιπο αποβάλλεται κυρίως ως CO₂) η άριστη σχέση C/N στο ζυμούμενο υλικό υπολογίζεται γύρω στο 30:1. Ωστόσο, τα οργανικά ΑΑ (ιδίως με υψηλό ποσοστό σε χαρτί) έχουν δυσμενή λόγο θρεπτικών ουσιών (λόγος C/N μέχρι 60:1), που μπορεί όμως να βελτιωθεί με την προσθήκη αζωτούχων ενώσεων (π.χ. λάσπη βιολογικών καθαρισμών λυμάτων με C/N 12:1). Στο τελικό προϊόν της βιοσταθεροποίησης ο λόγος C/N γίνεται περίπου ίσος με 20:1, ώστε να μη υπάρχει κίνδυνος να δεσμευθεί κατά την υπολοιπόμενη ωρίμανση το άζωτο του εδάφους.

Μέγεθος των τεμαχιδίων του προς ζύμωση υλικού

Το μέγεθος των τεμαχιδίων του υλικού επιδρά τόσο στην ποσότητα του νερού και αέρα που μπορεί το υλικό να συγκρατήσει κατά τη αερόβια σταθεροποίηση, όσο και στη διαθέσιμη συνολική επιφάνεια που προσφέρεται στους μικροοργανισμούς για προσβολή. Κοκκομετρία υλικού με διάμετρο λίγων χιλιοστών μέχρι και πέντε εκατοστών 0,1 – 50 mm περίπου, θεωρείται ικανοποιητική.

Θερμοκρασία αερόβιας σταθεροποίησης

Η θερμοκρασία αερόβιας βιοαποδόμησης του υλικού εξασφαλίζει την ανάπτυξη της κατάλληλης μικροχλωρίδας και ταυτόχρονα την καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών για τον άνθρωπο και τα φυτά. Η αποδόμηση των οργανικών ουσιών είναι γενικά εξώθερμη αντίδραση, με αποτέλεσμα να ανεβαίνει αρχικά η θερμοκρασία της σωρού (στους 65-70 °C) και προοδευτικά να ελαττώνεται, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος όταν ολοκληρωθεί πρακτικά η αποδόμηση και απομείνει η ωρίμανση.

pH

Στην αρχική φάση της βιοαποδόμησης επικρατούν όξινες συνθήκες, ενώ αργότερα γίνονται αλκαλικές (pH = 5,5 – 13).

Κατά τη διαδικασία της κομποστοποίησης παράγεται CO₂, νερό, ανόργανα στοιχεία, θερμότητα και σταθεροποιημένο οργανικό υλικό (κόμποστ) που αποτελεί περίπου το 20-40% κ.β. της αρχικής οργανικής ύλης.

Σύμφωνα με την **Κ.Υ.Α. 171914/2013**, τα προϊόντα λιπασματοποίησης θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις της **Απόφασης 2006/799/ΕΚ (Κοινοτικό Οικολογικό Σήμα)** ως προς:

- την περιεκτικότητα ορισμένων επικίνδυνων ουσιών (Παράρτημα – Εδάφιο 2)
- την περιεκτικότητα σε άζωτο (Παράρτημα – Εδάφιο 4)
- τις προσμίξεις (Παράρτημα – Εδάφιο 3)
- τις επιδόσεις (Παράρτημα – Εδάφιο 5)



Εικόνα 2.3. Παραγόμενο κόμποστ ΕΜΑΚ Χανίων. Τοποθετείται σε συσκευασία των 30 L και πωλείται σε δίκτυο καταστημάτων σε όλη την Κρήτη. Επιπλέον, γίνεται διάθεσή του και σε σάκους όγκου 0,5 και 1,0 m³. [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]

Όταν το κόμποστ έχει εφαρμογή στη **γεωργία**, τότε ισχύει το θεσμικό πλαίσιο που καθορίζεται από το ΥΠΑΑΤ [ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014]:

- **Κ.Υ.Α. 291180/11034/02 Άδειες κυκλοφορίας νέων τύπων λιπασμάτων** που έχει τροποποιηθεί με την **Κ.Υ.Α. 257921/2004**, όπου δίνονται ελάχιστα ποιοτικά χαρακτηριστικά για τα βαρέα μέταλλα και τα θρεπτικά συστατικά
- **Κανονισμός 889/2008 για τη Βιολογική Γεωργία**, όπου καθορίζονται τα λιπάσματα και τα βελτιωτικά εδάφους που επιτρέπονται στη βιολογική γεωργία
- **Νόμος 4235/2014**, όπου στο Άρθρο 49 παρ. 3, γίνεται αναφορά σε προϊόντα από αστικά ή βιομηχανικά απόβλητα καθώς και πρώτες ύλες ζωικής προέλευσης
- **Υ.Α. 217217/2004** για τις εδαφοβελτιωτικές ουσίες και τα υποστρώματα καλλιεργειών (εδαφομίγματα)

2.3.4 Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής

Τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα μπορούν επίσης να θεωρηθούν πολύτιμοι πόροι για την επίτευξη της γονιμότητας των εδαφών. Ωστόσο, το όφελος αυτό προκύπτει μόνο αν εφαρμοστούν σύμφωνα με τις ορθές πρακτικές, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του εδάφους, τη χρήση του και τις κλιματικές συνθήκες. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχει δημιουργήσει η γεωργική δραστηριότητα και την συνέχιση των θετικών λειτουργιών της, οι αγρότες θα πρέπει να εφαρμόζουν ορισμένες πρακτικές, οι οποίες ονομάστηκαν Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής. (Κ.Ο.Γ.Π.). Ο **Κώδικας Ορθής Γεωργικής Πρακτικής** (Υ.Α. 1420/82031/2015) είναι ένας απλός **πρακτικός οδηγός που απευθύνεται προς όλους όσοι ασχολούνται με γεωργοκτηνοτροφικές δραστηριότητες και έχει ως σκοπό να τους καθοδηγήσει να προστατεύουν το περιβάλλον**, αποφεύγοντας να το μολύνουν ή να

ελαχιστοποιούν τη μόλυνση του. Αυτό σημαίνει ότι ο σύγχρονος γεωργός δεν πρέπει να έχει ως στόχο μόνο την παραγωγή αλλά ταυτόχρονα πρέπει να εντάξει στο πρόγραμμα των δραστηριοτήτων του και την αναγκαιότητα προστασίας του περιβάλλοντος.

Οι πρακτικές αυτές, σχεδόν όλες παλιές, που η έρευνα έδειξε, ότι ήταν αποτελεσματικές εμπλουτίστηκαν, όπου χρειάστηκε με νέες και αποσκοπούν:

- στην αειφορική διαχείριση των γεωργικών γαιών και των φυσικών πόρων
- στην προστασία και διαφύλαξη του αγροτικού τοπίου και των χαρακτηριστικών του
- στην προστασία της υγείας των αγροτών και των καταναλωτών.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων οι Κώδικες παρεμβαίνουν στις ακόλουθες γεωργικές δραστηριότητες: κατεργασία του εδάφους, αμειψισπορά, λίπανση, διαχείριση υδάτινων πόρων, φυτοπροστασία, διαχείριση αυτοφυούς χλωρίδας, συγκομιδή, διαχείριση υπολειμμάτων καλλιέργειας και διαχείριση απορριμμάτων. Οι Κώδικες Ορθής γεωργικής Πρακτικής αφορούν, επίσης, και στις κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Νομοθετικά, ο Κώδικας έχει δημοσιευτεί ως διάταγμα στις 6 Σεπτεμβρίου του 2002 και καλύπτεται με τον Περί Ελέγχου της Ρύπανσης των Νερών και Εδάφους Νόμο του 2002. (www.moa.gov.cy - Υπουργείο Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος)

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η ποσοτικοποίηση των απειλών του εδάφους απαιτεί την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων που θα λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές, χημικές και ανθρώπινες διεργασίες. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση του αντίκτυπου των απειλών του εδάφους στα οικοσυστήματα και στις υπηρεσίες που προσφέρει (Montanarella & Panagos 2015). Παράλληλα, η γεωργική αειφορία και η ασφάλεια των τροφίμων απαιτούν τόσο σημαντικές αλλαγές στις σύγχρονες γεωργικές πρακτικές όσο και εργαλεία σχεδίασης που θα μας παρέχουν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογική προσέγγιση για την ποσοτική αντιμετώπιση της δυναμικής των φυτών, της πανίδας, των μικροοργανισμών και του αβιοτικού περιβάλλοντος, αλληλοεπιδρώντας ως μονάδα στην Κρίσιμη Ζώνη (ΚΖ). Τα Παρατηρητήρια της Κρίσιμης Ζώνης του εδάφους είναι "τοποθεσίες" όπου όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με μοντέλα διαδικασιών. Η ποσοτικοποίηση της δυναμικής της ΚΖ και των απειλών του εδάφους δεν είναι μόνο μια απάντηση στις πολιτικές που σχετίζονται με το έδαφος, αλλά συμβάλλει στην εφαρμογή πολιτικών στον τομέα της γεωργίας, της αλλαγής του κλίματος, του χωροταξικού σχεδιασμού, του νερού και της βιοποικιλότητας (Montanarella & Panagos 2015).

Γενικότερα, τα **μοντέλα προσομοίωσης των εδαφικών οικοσυστημάτων** μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση της λειτουργίας της ΚΖ και τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις των κύριων συνιστωσών της, την εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων από τη χρήση διαφόρων γεωργικών πρακτικών, τη στοχευμένη αγροτική παραγωγή που θα οδηγεί σε βελτιστοποίηση της παραγωγής και στην ασφάλεια των προϊόντων, την προστασία του περιβάλλοντος, τη δημιουργία γεωργικών εργαλείων χρήσιμων για την ερευνητική κοινότητα αλλά πρωτίστως για τους γεωργούς, την ολιστική και διεπιστημονική αντιμετώπιση της έννοια των χερσαίων οικοσυστημάτων, τη δημιουργία μιας πλατφόρμας μοντελοποίησης βασισμένη στο GIS ώστε να προσδιοριστούν οι απειλές του εδάφους, και τέλος τη δημιουργία μιας ενιαίας και αποδεκτής από την επιστημονική κοινότητα μεθοδολογίας ποσοτικοποίησης των απειλών του εδάφους, η οποία θα μπορεί να ενσωματώνεται στα διάφορα μοντέλα **Ανάλυσης Κύκλου Ζωής** Προϊόντων και Υπηρεσιών.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων ανάλογα με τις διεργασίες που προσομοιώνουν και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συστημάτων (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000): **Εμπειρικά μοντέλα** που βασίζονται σε παρατηρούμενες σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, **Στοχαστικά μοντέλα** όπου οι λειτουργικές σχέσεις εξαρτώνται από τυχαίες παραμέτρους και σχετίζονται με κατανομές πιθανοτήτων, **Μη Στοχαστικά ή Καθορισμένα μοντέλα** όπου περιγράφονται ακριβείς σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών και τα αποτελέσματα έχουν μία και μοναδική τιμή, **Μηχανιστικά μοντέλα** που βασίζονται σε γνωστούς μηχανισμούς/νόμους των Φυσικών Επιστημών, **Μαθηματικά μοντέλα** και **Δυναμικά μοντέλα** που περιγράφουν διεργασίες που εξαρτώνται από τον χρόνο. Σημαντικό στοιχείο για την εφαρμογή ενός μοντέλου προσομοίωσης σε επίπεδο διαχείρισης της παραγωγής είναι η επαλήθευση (**verification**) και η επικύρωση (**validation**) του μοντέλου. Η επαλήθευση αφορά κυρίως τον έλεγχο του κώδικα προγραμματισμού του μοντέλου σε σχέση με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική του ανάπτυξη και η επικύρωση αναφέρεται σε ανεξάρτητα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του (Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α., 2000). Συνήθως, η εκτίμηση της "καταλληλότητας" του μοντέλου κατά τον έλεγχο του (επικύρωση) του κώδικα στις διάφορες εφαρμογές προσομοίωσης χερσαίων οικοσυστημάτων γίνεται μέσω στατιστικών τεχνικών.

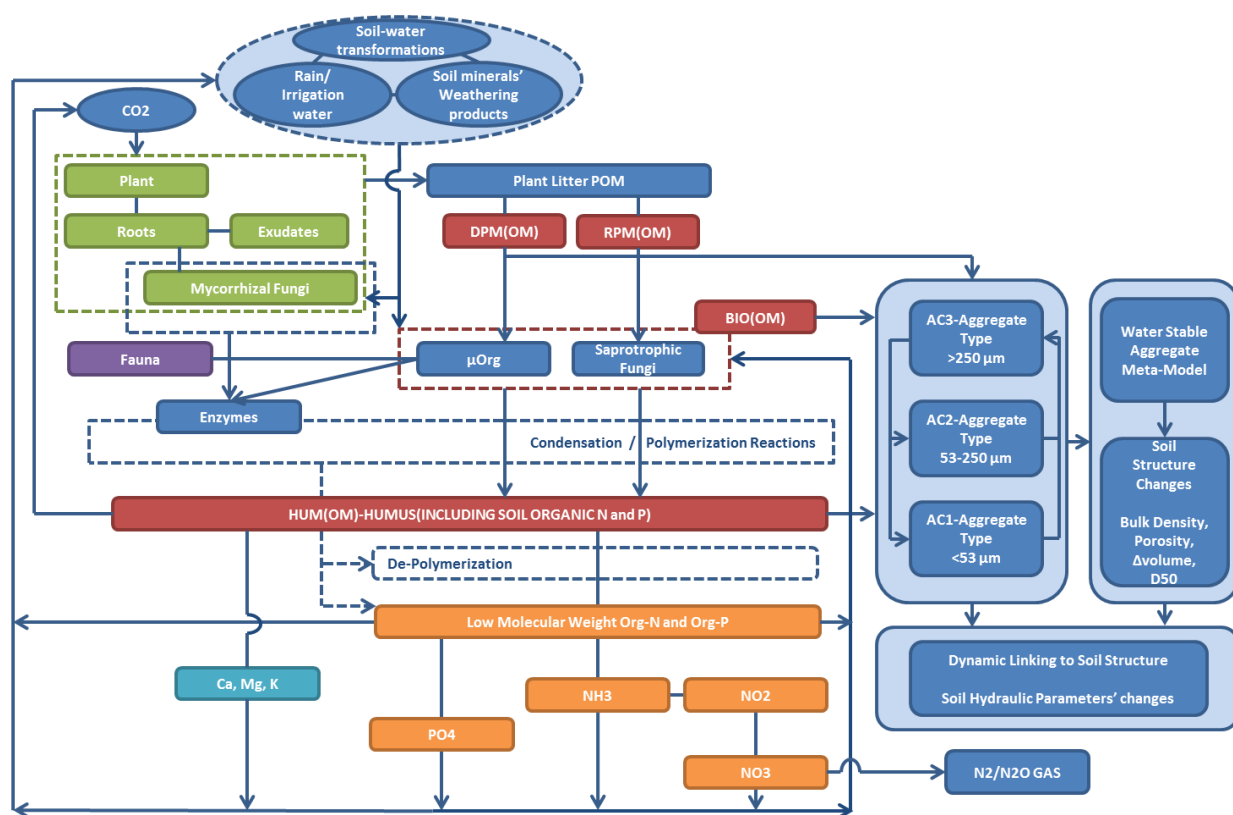
Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση ξεχωριστών λειτουργιών του εδάφους, όπως είναι η αποσάθρωση-εδαφογένεση (weathering) και η οξίνιση (acidification) του εδάφους (Posch & Reinds 2009; Wallman et al. 2005b), η φυσική αναδιάταξη του εδαφικού προφίλ από τη χλωρίδα και πανίδα του εδάφους (bioturbation models) (Finke & Hutson 2008), η δυναμική της δομής και των συσσωματωμάτων του εδάφους (Segoli et al. 2013; Plante et al. 2002; De Gryze et al. 2006; Stamati, et al. 2013b; Malamoud et al. 2009; Abiven et al. 2008), η δυναμική της Εδαφικής Οργανικής Ύλης (EOY) (Grace et al. 2006; Parton, W. J.; Schimel, D. S.; Cole, C. v.; Ojima 1987; Coleman 2008), η παραγωγή βιομάζας και η θρέψη των φυτών (Wamelink et al. 2009), η εδαφική οικολογία (Hunt et al. 1987), η μετακίνηση του νερού και των διαλυτών συστατικών στην ακόρεστη ζώνη (Šimůnek et al. 2009), τα μοντέλα χημικής ισορροπίας (chemical equilibrium models) (Aguilera et al. 2005; Wallman et al. 2005b) και τα μοντέλα συμπίεσης του εδάφους λόγω εκμηχάνισης της αγροτικής παραγωγής (Keller et al. 2015; Roger-Estrade et al. 2000).

Η μοντελοποίηση των μετασχηματισμών του άνθρακα και του αζώτου στα χερσαία οικοσυστήματα έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια και πολλές ανασκοπήσεις της βιβλιογραφία έχουν πραγματοποιηθεί στο ερευνητικό αυτό πεδίο (Nikolaidis and Bidoglio, 2013). Σε γενικές γραμμές, τα μοντέλα άνθρακα διαιρούν την εδαφική οργανική ύλη σε ανθεκτικές, εύκολα βιοδιασπώμενες, ανόργανες μορφές και μικροβιακή βιομάζα. Η ανοργανοποίηση του άνθρακα και του αζώτου θεωρείται η κύρια διαδικασία που ενεργοποιεί όλες τις υπόλοιπες. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα που έχουν τα μοντέλα αυτά είναι ότι δεν λαμβάνουν υπόψη τους μετασχηματισμούς που συμβαίνουν στο εδαφικό προφίλ (Nikolaidis and Bidoglio, 2013) και επομένως δεν θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την προσομοίωση της ΚΖ και των λειτουργιών της.

Τα μοντέλα προσομοίωσης της Ε.Ο.Υ. θεωρούνται δυναμικά μοντέλα και διακρίνονται σε διεργασιοστρεφή (process-oriented) και οργανισμοστρεφή (organism-oriented). Τα διεργασιοστρεφή μοντέλα έχουν προτιμηθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία σε σχέση με τα οργανισμοστρεφή, καθώς απαιτούν λιγότερα δεδομένα εισαγωγής, περιέχουν λιγότερες παραμέτρους προς ρύθμιση και έχουν μικρότερο υπολογιστικό κόστος (Stamati, et al., 2013b). Το μοντέλο **RothC-26.3** (Coleman 2008) θεωρείται ένα από τα πιο διαδεδομένα διεργασιοστρεφή μοντέλα προσομοίωσης του οργανικού άνθρακα στα εδάφη και λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό αποδόμησης, τη θερμοκρασία, την υγρασία του εδάφους και τη φυτική κάλυψη του εδάφους. Με τη βοήθεια αυτού του μοντέλου μπορούν να γίνουν υπολογισμοί σε μία κλίμακα από λίγα χρόνια έως και λίγους αιώνες (Stamati, et al. 2013a). Το μοντέλο θεωρεί τον οργανικό άνθρακα στις παρακάτω μορφές ή “δεξαμενές” του στο έδαφος: i) τα αποσυνθέσιμα φυτικά υλικά (Decomposable Plant Material, DPM), ii) τα ανθεκτικά στην αποσύνθεση φυτικά υλικά (Resistant Plant Material, RPM), iii) εδαφικοί μικροοργανισμοί ή μικροβιακή βιομάζα (Biomass, BIO), iv) το χουμοποιημένο οργανικό υλικό (Humus, HUM) και v) μία μικρή ποσότητα αδρανούς οργανικού υλικού (Inert Organic Matter IOM). Κάθε δεξαμενή αποδομείται βάσει κινητικής εξίσωσης πρώτης τάξεως, ενώ η ενότητα του IOM είναι ανθεκτική στην αποδόμηση (Stamati, et al. 2013a).

Τα μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής της δομής και των συσσωματωμάτων του εδάφους μπορεί να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες (Nikolaidis and Bidoglio, 2013): **Εμπειρικά** (De Gryze et al. 2006; Abiven et al. 2008), **Μηχανιστικά** (Plante et al. 2002), **Μη Στοχαστικά μοντέλα εδαφικής συσσωμάτωσης** (De Gryze et al. 2006) και **Μη Στοχαστικά μοντέλα εδαφικής δομής** (Malamoud et al. 2009; Stamati, et al. 2013b). Το συνδυαστικό μοντέλο για τον οργανικό άνθρακα, τα συσσωματώματα και τη δομή των επιφανειακών

εδαφών (**Carbon, Aggregation, and Structure, CAST**) που δημιουργήθηκε από την εργασία των (Stamati, et al. 2013b) (Σχ. 2.14) στη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης προσομοιώνει τον προτεινόμενο, στη διεθνή βιβλιογραφία, μηχανισμό σχηματισμού των μακρο-συσσωματωμάτων γύρω από το σωματιδιακό φυτικό οργανικό υλικό που εισέρχεται και ενσωματώνεται στα εδάφη και κατά την διάσπασή τους απελευθερώνονται μικρο-συσσωματώματα. Οι δεξαμενές άνθρακα του μοντέλου RothC συνδυάστηκαν με υπορουτίνες προσομοίωσης της συσσωμάτωσης και της δομής του εδάφους. Το μοντέλο CAST μπορεί να βοηθήσει στη διερεύνηση των παραγόντων που καθορίζουν την ΕΟΥ, τη συσσωμάτωση και τη δομή του εδάφους σε διαφορετικά οικοσυστήματα και να προβλέψει την απόκριση του εδαφικού συστήματος σε διαφορετικές αγροτικές και καλλιεργητικές πρακτικές, αλλαγές χρήσης γης και τις κλιματικές αλλαγές προκειμένου να σχεδιαστούν και να βελτιστοποιηθούν τα κατάλληλα μέτρα και πρακτικές (Stamati, et al. 2013b).



Σχήμα 2.14. Σχηματική αναπαράσταση του τροποποιημένου μοντέλου CAST που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο 1D-ICZ.

Μόλις πρόσφατα αναπτύχθηκε ένα μοντέλο (**1D Integrated Critical Zone, 1D-ICZ**) (Giannakis et al. 2017) που συνδέει όλες τις οικολογικές υπηρεσίες που προσφέρει το έδαφος μέσα στην ΚΖ. Το μοντέλο 1D-ICZ προσομοιώνει όλες τις σημαντικές λειτουργίες του εδάφους, όπως η παραγωγή βιομάζας, η δέσμευση άνθρακα και θρεπτικών συστατικών, η διατήρηση της βιοποικιλότητας του εδάφους και η διήθηση και ο μετασχηματισμός του νερού έχοντας τη δυνατότητα να ποσοτικοποιεί τις υπηρεσίες του οικοσυστήματος του εδάφους. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τέσσερα κύρια υπομοντέλα: i) ροής και μεταφοράς (HYDRUS-1D) (Šimůnek et al. 2009), ii) βιοανάδευσης (bioturbation): χημικής ισορροπίας και κινητικής της

διάλυσης των ορυκτών (Wallman et al. 2005b), iii) τροποποιημένου μοντέλου CAST (Stamati, et al. 2013b) της δυναμικής των C/N/P/Ca/Mg και του σχηματισμού συσσωματωμάτων, και iv) δυναμικής της βιομάζας (PROSUM). Η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου 1D-ICZ παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.1.1, στην αντίστοιχη δημοσίευση (Giannakis et al. 2017) καθώς και στο εγχειρίδιο του προγράμματος (Nikolaidis, et al. 2014).

2.5 Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ

Η τομάτα (*Solanum lycopersicum*) είναι φυτό της οικογένειας των Σολανιδών (*Solanaceae*), ιθαγενές της Κεντρικής και Νοτίου Αμερικής. Η διάρκεια του βιολογικού κύκλου της τομάτας εξαρτάται κυρίως από τις κλιματολογικές συνθήκες, όπου σε τροπικές χώρες είναι πολυετής, ενώ στην Ευρώπη καλλιεργείται ως ετήσιο φυτό αφού δεν αντέχει τις χαμηλές χειμωνιάτικες θερμοκρασίες. Ευνοϊκές θερμοκρασίες για την τομάτα είναι 18°C - 27°C, αλλά αντέχει και σε θερμοκρασίες από 12°C έως 38°C (Αγγίδης Α., 2000). Τα φύλλα είναι σύνθετα, αποτελούμενα από 5-9 μικρότερα φύλλα. Το χρώμα του καρπού οφείλεται σε δύο χρωστικές: την λυκοπίνη (κόκκινο χρώμα) και την καροτίνη (κίτρινο-πορτοκαλί χρώμα).

Η τομάτα καλλιεργείται σε όλα σχεδόν τα εδάφη, που η φυσική τους σύσταση επηρεάζει ευνοϊκά όλους τους παράγοντες που είναι απαραίτητοι για την κανονική ανάπτυξη των φυτών (Αγγίδης Α., 2000). Η τομάτα αποδίδει καλύτερα σε εδάφη με σταθερή δομή, υψηλό βαθμό υδατοικανότητας με καλή στράγγιση και υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία (Ολύμπιος, 2001). Τα πιο κατάλληλα εδάφη είναι τα εδάφη μέσης σύστασης. Τα φυτά απαιτούν ικανοποιητικά επίπεδα εδαφικής υγρασίας τόσο κατά την περίοδο βλάστησης, όσο και την περίοδο ανάπτυξης του καρπού. Η τομάτα είναι φυτό μέσης ανθεκτικότητας στην αλατότητα. Μπορεί να αρδεύεται με νερό με E_c 4,5 dS/m, ωστόσο η χρήση νερού με $E_c < 2.5$ dS/m είναι επιθυμητή. Καλύτερες αποδόσεις έχουν τα εδάφη που το pH είναι ελαφρά όξινο ή ουδέτερο 5,8-6,7. Όταν το pH του εδάφους βρίσκεται έξω από τα όρια αυτά, ελαττώνεται ανάλογα η παραγωγή και σε πολύ αλκαλικά ή όξινα εδάφη, δυσκολεύεται ακόμη και η βλάστηση των φυτών (Αγγίδης Α., 2000). Η περίσσεια αζώτου προκαλεί ανθόρροια όταν το φυτό βρίσκεται στο στάδιο της άνθισης, οψίμιση της παραγωγής, σχίσμο των καρπών, υποβάθμιση των οργανοληπτικών του χαρακτηριστικών κάνοντάς τον πολλές φορές άγευστο και αυξάνει την ευαισθησία του στις ασθένειες. Αντίθετα, το κάλιο συμβάλλει στην ανάπτυξη των σακχάρων βελτιώνοντας την ποιότητα, περιορίζει τα σχισίματα του καρπού και συμβάλλει στη συνεκτικότητα του καρπού και στην αύξηση του βάρους του. Μέγιστη παραγωγή τομάτας μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μέσα επίπεδα καλίου. Η βλάστηση και η καρποφορία φυτών τομάτας μπορεί να περιορισθούν σε εδάφη ανεπαρκώς εφοδιασμένα με φωσφόρο. Ο φωσφόρος επιταχύνει την αύξηση του ριζικού συστήματος και στην επιτάχυνση της ωρίμανσης καρπών και φυτών.



Εικόνα 2.4. Υπαίθρια καλλιέργεια τομάτας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αγγίδης, Α. (2000) 'Τομάτα Υπαίθρια. Επιτραπέζια – Βιομηχανική, Καλλιέργεια – Αξιοποίηση'.
- ΕΠΠΕΡΑΑ. (2014) 'Οδηγός λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (αερόβια επεξεργασία) προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων'.
- Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α. (2000) 'Η οργανική ουσία του εδάφους. Το πρόβλημα των ελληνικών εδαφών', *ΕΚΔΟΣΕΙΣ: Σταμούλη Α.Ε.*
- Ολύμπιος, Χ. Μ. (2001) 'Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια', *Εκδόσεις Α. Σταμούλης.*
- Σαρρής, Π. Φ. «Η Φυσιολογία των Χημικών Στοιχείων στο Φυτό», Βιβλιογραφική έρευνα, www.agrool.gr.
- Χουλιάρης, Α.Ν. (2004) 'Η λίπανση στη Βιολογική Γεωργία', *Τμήμα Φυτικής Παραγωγής-Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Λάρισας.*
- Abiven, S., Menasseri, S. and Chenu, C. (2009) 'The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D. a. and Leterme, P. (2008) 'A Model to Predict Soil Aggregate Stability Dynamics following Organic Residue Incorporation under Field Conditions', *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), p. 119.
- Aguilera, D. R., Jourabchi, P., Spiteri, C. and Regnier, P. (2005) 'A knowledge-based reactive transport approach for the simulation of biogeochemical dynamics in Earth systems', *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.
- Alcamo, J., van Vuuren, D., Ringler, C., Cramer, W., Masui, T., Alder, J. and Schulze, K. (2005) 'Changes in nature's balance sheet: Model-based estimates of future worldwide ecosystem services', *Ecology and Society*.
- Anderson, S. P., von Blanckenburg, F. and White, A. F. (2007) 'Physical and chemical controls on the critical zone', *Elements*.
- Angers, D. A., Recous, S. and Aita, C. (1997) 'Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C¹⁵N-labelled wheat straw in situ', *European Journal of Soil Science*.
- Apostolakis, A., Panakoulia, S., Nikolaidis, N. P. and Paranychanakis, N. V. (2017) 'Shifts in soil structure and soil organic matter in a chronosequence of set-aside fields', *Soil and Tillage Research*.
- Banwart, S. A., Black, H., Cai, Z., Gicheru, P. T., Joosten, H., Victoria, R. L., Milne, E., Noellemeyer, E. and Pascual, U. (2015) 'The Global Challenge for Soil Carbon', *Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*.
- Banwart, S., Menon, M., Bernasconi, S. M., Bloem, J., Blum, W. E. H., Souza, D. M. de, Davidsdotir, B., Duffy, C., Lair, G. J., Kram, P., Lamacova, A., Lundin, L., Nikolaidis, N. P., Novak, M., Panagos, P., Ragnarsdottir, K. V., Reynolds, B., Robinson, D., Rousseva, S., de Ruiter, P., van Gaans, P., Weng, L., White, T. and Zhang, B. (2012) 'Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: Introduction to experimental methods and initial results', *Comptes Rendus - Geoscience*.

- Banwart, S. (2011) 'Save our soils', *Nature*.
- Bronick, C. J. and Lal, R. (2005) 'Soil structure and management: A review', *Geoderma*.
- Chapin, F. S., Matson, P. A. . P. A., Vitousek, P. M. . P. M., Stuart Chapin F., Iii., Matson, P. A. . P. A. and Vitousek, P. M. . P. M. (2012) *Principles of terrestrial ecosystem ecology, Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*.
- Coleman, K. (2008) 'A model for the turnover of carbon in soil', (November 1999).
- Commission of the European Communities (2006) 'Thematic strategy for soil protection', *Com (2006)*.
- Cornelissen, J. H. C. (1996) 'An Experimental Comparison of Leaf Decomposition Rates in a Wide Range of Temperate Plant Species and Types', *The Journal of Ecology*.
- Davidson, E.A.E.A.J.E. a et al. (2006) 'Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change', *Nature*.
- Diacono, M. and Montemurro, F. (2010) 'Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review', *Agronomy for Sustainable Develop* Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). *Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. Agronomy for Sustainable Development*, 30(2), 401–422.
- Elliott, E. (1986) 'Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils', *Soil Science Society of America Journal*, 50(S-3), pp. 627–633.
- Finke, P. A. and Hutson, J. L. (2008) 'Modelling soil genesis in calcareous loess', *Geoderma*.
- Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Valstar, J., Rowe, E. C., Moirgiorgou, K., Kotronakis, M., Paranychanakis, N. V., Rousseva, S., Stamati, F. E. and Banwart, S. A. (2017) 'Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ): A Tool for Dynamic Simulation of Soil Functions and Soil Structure', in *Advances in Agronomy*.
- Golchin, A., Oades, J. M., Skjemstad, J. O. and Clarke, P. (1995) 'Structural and Dynamic Properties of Soil Organic Matter as Natural Abundance, Pyrolysis Mass Spectrometry Reflected by', *Australian Journal of Soil Research*.
- Grace, P. R., Ladd, J. N., Robertson, G. P. and Gage, S. H. (2006) 'SOCRATES - A simple model for predicting long-term changes in soil organic carbon in terrestrial ecosystems', *Soil Biology & Biochemistry*.
- De Gryze, S., Six, J. and Merckx, R. (2006) 'Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study', *European Journal of Soil Science*.
- Hart, Stephen C, Stark, J.M., Davidson, E.A., Firestone, M. K. (1994) 'Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification', *Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*.
- Hobbie, S. E. (1992) 'Effects of plant species on nutrient cycling', *Trends in Ecology & Evolution*.
- Hopkins, W. G. and Huner, N. P. A. (2009) *Introduction to Plant Physiology, Agronomy Journal*.
- Hunt, H. W., Coleman, D. C., Ingham, E. R., Ingham, R. E., Elliott, E. T., Moore, J. C., Rose, S. L., Reid, C. P. P. and Morley, C. R. (1987) 'The detrital food web in a shortgrass prairie',

Biology and Fertility of Soils.

- Ingestad, T. and Agren, G. I. (1988) 'Nutrient uptake and allocation at steady-state nutrition', *Physiologia Plantarum*.
- Insam, H. (1990) 'Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime?', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Jastrow, J., Amonette, J. and Bailey, V. (2007) 'Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration', *Climatic Change*.
- Jónsson, J. Ö. G. and Davídsdóttir, B. (2016) 'Classification and valuation of soil ecosystem services', *Agricultural Systems*.
- Jouany, C. (1991) 'Surface free energy components of clay-synthetic humic acid complexes from contact-angle measurements', *Clays and Clay Minerals*. d
- Karami, A., Homaei, M., Afzalnia, S., Ruhipour, H. and Basirat, S. (2012) 'Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. and Schuman, G. E. (1997) 'Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial)', *Soil Science Society of America Journal*.
- Keller, T., da Silva, A. P., Tormena, C. A., Giarola, N. F. B., Cavalieri, K. M. V., Stettler, M. and Arvidsson, J. (2015) 'SoilFlex-LLWR: Linking a soil compaction model with the least limiting water range concept', *Soil Use and Management*.
- Komnitsas, K. and Zaharaki, D. (2014) 'Assessment of Human and Ecosystem Risk Due to Agricultural Waste Compost Application on Soils: A Review', *Environmental Forensics*.
- Kotronakis, M., Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Rowe, E. C., Valstar, J., Paranychanakis, N. V. and Banwart, S. A. (2017) 'Modeling the Impact of Carbon Amendments on Soil Ecosystem Functions Using the 1D-ICZ Model', *Advances in Agronomy*.
- Lal, R., Follett, R. F., Stewart, B. A. and Kimble, J. M. (2007) 'Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security', *Soil science*.
- Malamoud, K., McBratney, A. B., Minasny, B. and Field, D. J. (2009) 'Modelling how carbon affects soil structure', *Geoderma*. Elsevier B.V., 149(1–2), pp. 19–26.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*.
- Mondini, C. and Sequi, P. (2008) 'Implication of soil C sequestration on sustainable agriculture and environment', *Waste Management*.
- Montanarella, L. and Panagos, P. (2015) 'Policy relevance of Critical Zone Science', *Land Use Policy*.
- Murphy, D. V., Stockdale, E. A., Brookes, P. C. and Goulding, K. W. T. (2007) 'Impact of microorganisms on chemical transformations in soil', in *Soil Biological Fertility: A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*.
- Nikolaidis N.P., and Bidoglio, G. (2013). 'Soil organic matter dynamics and structure', *Sustainable Agriculture Reviews*. 12, 175-200.
- Nikolaidis, N. P. (2011) 'Human impacts on soils: Tipping points and knowledge gaps',

- Oades, J. M. (1993) 'The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure', *Geoderma*.
- Oades, J. M. and Waters, A. G. (1991) 'Aggregate hierarchy in soils', *Australian Journal of Soil Research*.
- Oades, J. M. (1984) 'Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management', *Plant and Soil*.
- Parton, W. J.; Schimel, D. S.; Cole, C. V.; Ojima, D. S. (1987) 'Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands', *Soil Science Society of America Journal*.
- Plante, A. F., Feng, Y. and McGill, W. B. (2002) 'A modeling approach to quantifying soil macroaggregate dynamics', *Canadian Journal of Soil Science*.
- Posch, M. and Reinds, G. J. (2009) 'A very simple dynamic soil acidification model for scenario analyses and target load calculations', *Environmental Modelling and Software*.
- Pronk, G. J., Heister, K. and Kögel-Knabner, I. (2011) 'Iron Oxides as Major Available Interface Component in Loamy Arable Topsoils', *Soil Science Society of America Journal*.
- Regelink, I. C., Stoof, C. R., Rousseva, S., Weng, L., Lair, G. J., Kram, P., Nikolaidis, N. P., Kercheva, M., Banwart, S. and Comans, R. N. J. (2015) 'Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties', *Geoderma*. Elsevier, 247–248, pp. 24–37.
- Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., Reynolds, B., Tipping, E., Tye, A. M., Watts, C. W., Whalley, W. R., Black, H. I. J., Warren, G. P. and Robinson, J. S. (2013) 'Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., Boiffin, J., Caneill, J. and Manichon, H. (2000) 'Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems', *European Journal of Soil Science*.
- Schlesinger, W. H. (1977) 'Carbon Balance in Terrestrial Detritus', *Annual Review of Ecology and Systematics*.
- Segoli, M., De Gryze, S., Dou, F., Lee, J., Post, W. M., Denef, K. and Six, J. (2013) 'AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies', *Ecological Modelling*.
- Šimůnek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M. T. (2009) 'The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 4.08. HYDRUS Softw. Ser. 3.', *Dep. of Environ. Sci., Univ. of Calif., Riverside.*, (January), p. 332.
- Six, J. and Paustian, K. (2014) 'Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool', *Soil Biology & Biochemistry*.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Denef, K. (2004) 'A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics', *Soil and Tillage Research*, pp. 7–31.

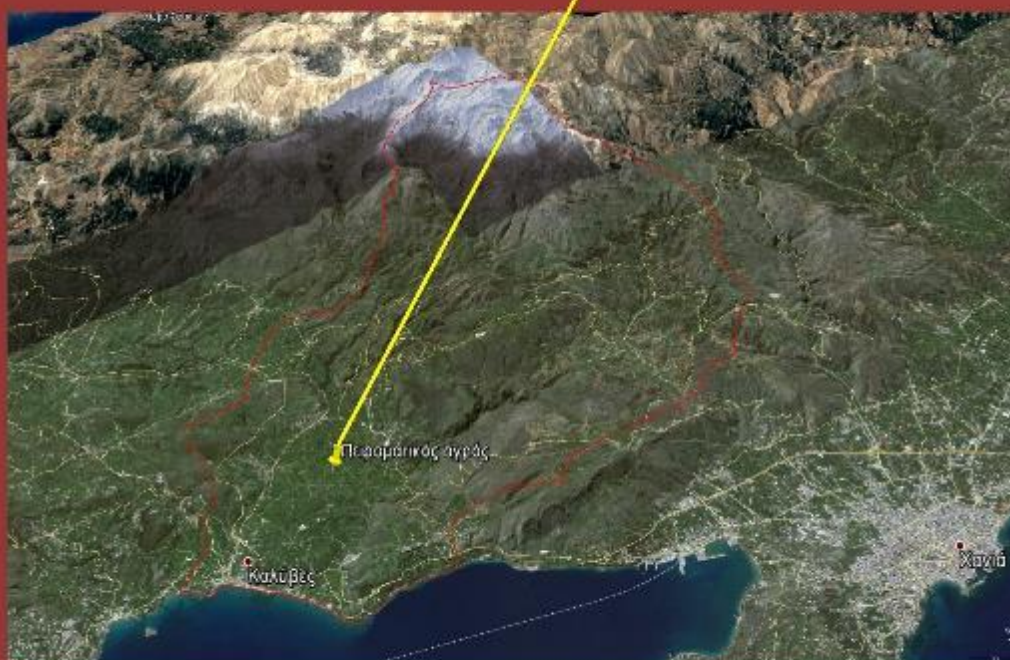
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. and Paustian, K. (2002) 'Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils', *Plant and Soil*.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K. and Doran, J. W. (1998) 'Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils', *Soil Science Society of America Journal*.
- Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P. and Schnoor, J. L. (2013a) 'Modeling topsoil carbon sequestration in two contrasting crop production to set-aside conversions with RothC - Calibration issues and uncertainty analysis', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 165, pp. 190–200.
- Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P., Banwart, S. and Blum, W. E. H. (2013b) 'A coupled carbon, aggregation, and structure turnover (CAST) model for topsoils', *Geoderma*, 211, pp. 51–64.
- TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity (2010) *The Economics of Ecosystems & Biodiversity, Ecosystems*.
- Tisdall, J. M. and Oades, J. M. (1982) 'Organic matter and water-stable aggregates in soils', *Journal of soil science*, 33, pp. 141–163.
- Ugolini, F. C. and Spaltenstein, H. (1992) '7 Pedosphere', *International Geophysics*.
- Vrscaj, B., Poggio, L. & Marsan, F.A. (2008) 'A method for soil environmental quality evaluation for management and planning in urban areas', *Landscape and Urban Planning*.
- Wallman, P., Svensson, M. G. E., Sverdrup, H. and Belyazid, S. (2005) 'ForSAFE - An integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments', in *Forest Ecology and Management*.
- Wamelink, G. W. W., van Dobben, H. F. and Berendse, F. (2009) 'Vegetation succession as affected by decreasing nitrogen deposition, soil characteristics and site management: A modelling approach', *Forest Ecology and Management*.
- Waring, R. H. and Running, S. W. (1998) 'Forest ecosystems: analysis at multiple scales', in *Forest ecosystems: analysis at multiple scales*.
- Watson, C. a, Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L. R. and Rayns, F. W. (2002) 'Managing soil fertility in organic farming systems', *Soil Use and Management*.
- Young, I. M. and Ritz, K. (2000) 'Tillage, habitat space and function of soil microbes', *Soil and Tillage Research*.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΓΡΟΥ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στη διάρκεια μιας περιόδου 4 ετών (2011 – 2014) και αφορά 4 μεταχειρίσεις ενός αγρού που βρίσκεται εκτός οικισμού Νέο Χωριό Δήμου Αποκόρωνας, Περιφερειακής Ενότητας Χανίων, με γεωγραφικές συντεταγμένες: 35° 26' 14'' N, 24° 08' 34'' E και υψόμετρο περίπου 14 μ. πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Ο πειραματικός αγρός βρίσκεται στην πεδιάδα της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη (KRB-Koiliaris River Basin – Εικ. 3.1), εντός της περιοχής του Παρατηρητηρίου της Κρίσιμης Ζώνης του Κοιλιάρη (CZO-Critical Zone Observatory). Η Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη αντιπροσωπεύει μία περιοχή εντατικής κτηνοτροφικής και γεωργικής εκμετάλλευσης της γης ανά τους αιώνες, η οποία αντιμετωπίζει άμεσα τον κίνδυνο της ερημοποίησης (απώλεια του οργανικής ουσίας στο έδαφος) ως συνέπεια των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών (Moraetis et al. 2010; Banwart et al. 2012; Daniel Moraetis et al. 2011). Στην περιοχή αυτή έχουν υλοποιηθεί σειρά Ευρωπαϊκών και εθνικών ερευνητικών προγραμμάτων από το Πολυτεχνείο Κρήτης και συγκεκριμένα από το Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Στο πλαίσιο των προγραμμάτων αυτών έχουν πραγματοποιηθεί υδρολογικές, υδρογεωχημικές και βιοχημικές μελέτες εδαφών, καθώς και μελέτες για την εξέλιξη και προέλευσή τους. Η περιοχή αποτελεί ένα από τα τέσσερα Παρατηρητήρια της Κρίσιμης Ζώνης Εδαφών (ΠΚΖ) του Ευρωπαϊκού προγράμματος SOILTREC (Μετασχηματισμοί του Εδάφους σε Ευρωπαϊκές Λεκάνες Απορροής – www.soiltrec.eu).

**Θέση Πειραματικού
Αγρού: Νέο Χωριό
Δ. Αποκόρωνα**



Εικόνα 3.1: Λεκάνη Απορροής Ποταμού Κουλιάρη και θέση πειραματικού αγρού.

Η έκταση αυτή προκρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών ύστερα από μελέτη και επιτόπιο έλεγχο, καθώς αποτελεί αγρό που δεν έχει υποστεί κανένα είδος ανθρώπινης παρέμβασης και αγροτικής διαχείρισης τα τελευταία 25 έτη, με αποτέλεσμα το έδαφος να εμφανίζει καλή δομή και να είναι πλούσιο σε οργανικό άνθρακα. Στόχος της μελέτης ήταν να εφαρμοστεί στο αγρόκτημα μια αειφόρος διαχείριση με την προσθήκη οργανικών ουσιών, έτσι ώστε αυτό να διατηρήσει τη γονιμότητά του.

3.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Το κλίμα αποτελεί ένα από τους πρωταρχικούς ρυθμιστικούς παράγοντες του επιπέδου της οργανικής ουσίας του εδάφους και κατ' επέκταση της γονιμότητάς του. Η περιοχή που επιλέχθηκε αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα Μεσογειακού εδάφους που αντιμετωπίζει άμεσα τον κίνδυνο της ερημοποίησης (απώλεια του οργανικής ουσίας στο έδαφος) ως συνέπεια των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό των Χανίων (Υψόμ.: 10 m, 35° 30'28''N, 24°00'22''E), τον οποίο διαχειρίζεται το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ). Η μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της περιόδου των 4 ετών κυμαινόταν μεταξύ 11,7 και 26,9 °C, και η μέση ετήσια βροχόπτωση κατά την ίδια περίοδο ήταν 648 mm (Πίν. 3.1).

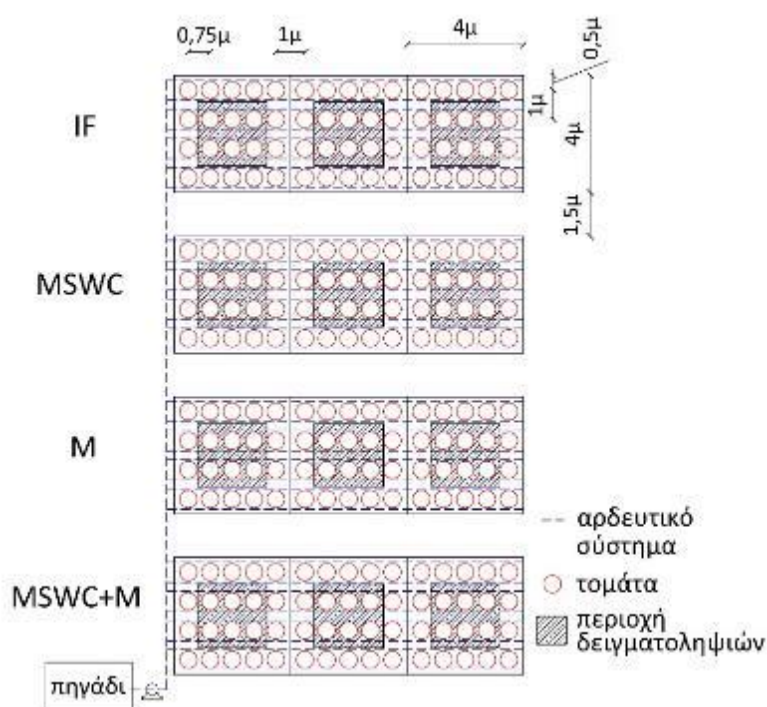
Πίνακας 3.1. Μετεωρολογικά στοιχεία περιοχής μελέτης (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).

ΜΗΝΑΣ	Μέση Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Μέση Ελάχιστη Θερμοκρασία (°C)	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέση Βροχόπτωση (mm)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/hr)
Ι	21.6	-0.1	11.7	100	4.4
Φ	23.0	-1.1	11.8	118	6.0
Μ	26.5	0.7	13.3	46	5.7
Α	28.9	4.4	16.4	32	5.6
Μ	31.6	6.9	20.2	20	4.6
Ι	35.7	11.5	24.3	0.4	4.9
Ι	36.8	14.7	26.9	0.1	5.1
Α	36.5	14.0	26.9	0	4.3
Σ	33.9	11.6	24.5	10	3.6
Ο	30.9	6.6	19.8	102	3.1
Ν	27.1	4.4	15.8	80	3.2
Δ	24.7	1.1	13.1	140	3.9

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

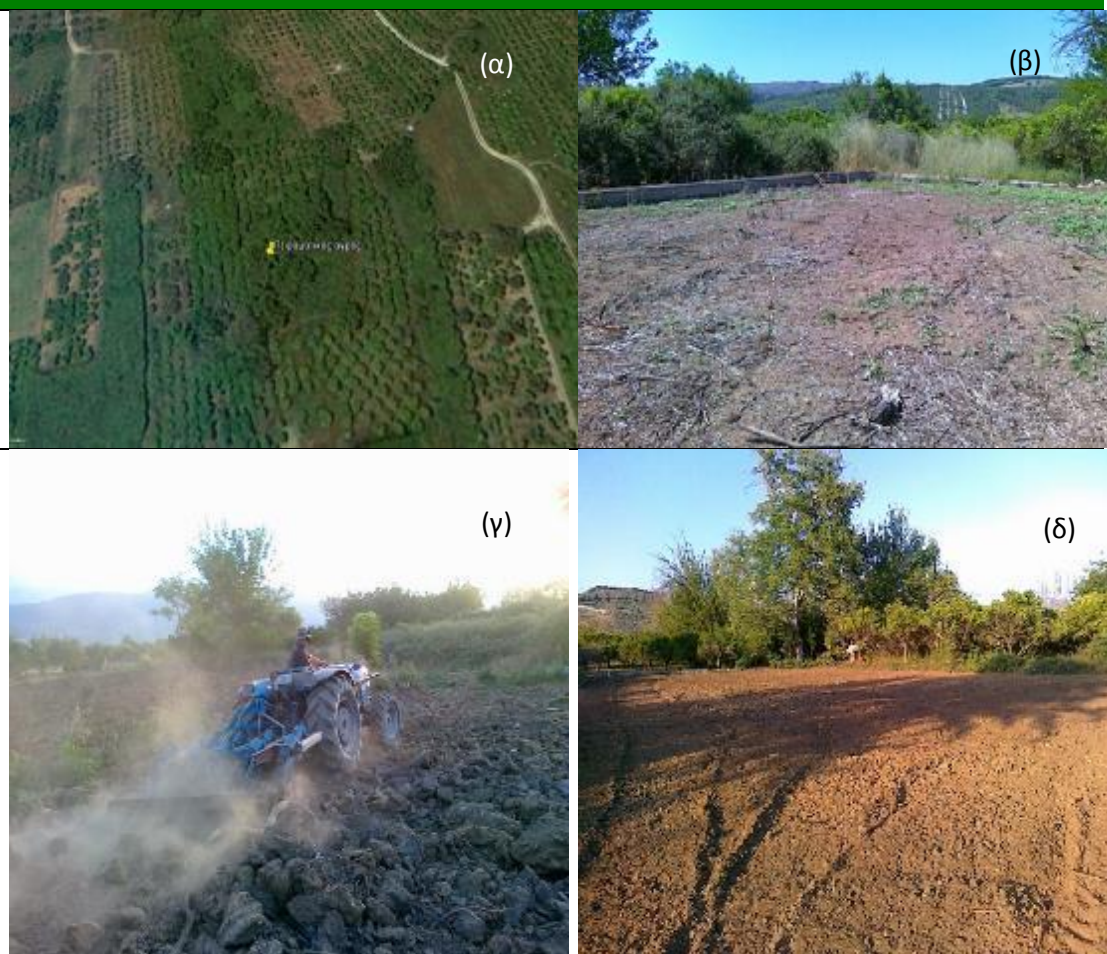
Στο συγκεκριμένο πείραμα επιλέχτηκε η προσθήκη ζωικών αποβλήτων (χωνεμένη κοπριά από αιγοπρόβατα) και κόμποστ από αστικά στερεά απόβλητα (κόμποστ ΑΣΑ) γιατί τα υλικά αυτά είναι πλούσια σε χουμικές ουσίες και το όφελος που προκύπτει από τη συστηματική ετήσια ενσωμάτωσή τους στο έδαφος δεν περιορίζεται στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου αλλά είναι μακροχρόνιο. Ο πειραματικός σχεδιασμός παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Το διάστημα 2011-2014 πραγματοποιήθηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις λίπανσης με τρεις επαναλήψεις σε κάθε μεταχείριση. Στην πρώτη μεταχείριση χρησιμοποιήθηκε ανόργανη (συμβατική) λίπανση (Inorganic Fertilization - "IF") 20 kg N/στρέμμα, στη δεύτερη κόμποστ από αστικά στερεά απόβλητα (Municipal Solid Waste Compost - "MSWC") σε αναλογία 5 t ξηρού βάρους ανά στρέμμα, στην τρίτη επιλέχτηκε η προσθήκη ζωικών αποβλήτων-κοπριά (Manure - "M", 5 t/ στρέμμα) και στην τέταρτη ο συνδυασμός 70% κομποστ και 30% κοπριάς ("MSWC+M"), κατά την ίδια αναλογία (Kotronakis et al. 2017).

Ο πειραματικός αγρός ήταν ένας πρώην πορτοκαλεώνας, ο οποίος είχε εγκαταλειφθεί για σχεδόν 25 χρόνια πριν την έναρξη του πειράματος (Εικ. 3.1α). Τον Απρίλιο του 2011, κόπηκαν τα δέντρα και αποφυλώθηκε η βλάστηση (Εικ. 3.1β). Τον Ιούνιο του 2011 έγινε άροση του αγρού σε βάθος 60 cm με καλλιεργητή βαρέως τύπου για να αεριστεί ελαφρά το έδαφος και να καταστραφούν κάποια ζιζάνια (Εικ. 3.1γ). Ένα μήνα πριν την αρχή του πειράματος εκτελέστηκε νέα άροση του αγρού (Εικ. 3.1δ).



Σχήμα 3.1. Πειραματικός Σχεδιασμός. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν το δίκτυο άρδευσης, ενώ οι σκιαγραφημένες περιοχές απεικονίζουν τις περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες εδάφους.

Προετοιμασία αγρού



Εικόνα 3.1. Απεικόνιση του αγρού: (α) πριν τον καθαρισμό του (5/9/2010 - αεροφωτογραφία Google Earth), (β) μετά την αποξίλωση της βλάστησης (Απρίλιος 2011), (γ) κατά τη διαδικασία βαθιάς άροσης (Ιούνιος 2011). (δ) πριν την έναρξη του πειράματος (Ιούλιος 2011).

Λόγω των περιορισμών διαθέσιμης επιφάνειας, χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα μεμονωμένο τεμάχιο ανά μεταχείριση, διαστάσεων έκαστο 4 x 12 μ. (Σχ. 3.2). Το καθένα από τα τέσσερα τεμάχια χωρίστηκε επιπλέον σε τρεις υποπεριοχές (υποτεμάχια, 4 x 4 μ. έκαστο), που αντιστοιχούν στις επαναλήψεις της κάθε μεταχείρισης. Το σύνολο του πειράματος έγινε σε 192 τ.μ.

Η προσθήκη των εδαφοβελτιωτικών πραγματοποιήθηκε στις 20/07/2011. Για να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή των οργανικών λιπασμάτων ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία: Η περιοχή του πειράματος αρχικά διαιρέθηκε σε τέσσερις τομείς (τεμάχια) ίσου μεγέθους (Εικ. 3.2α). Κάθε τομέας αντιπροσώπευε μία μεταχείριση. Ο δεύτερος τομέας που αντιστοιχεί σε εφαρμογή κόμποστ χωρίστηκε σε 10 υποπεριοχές και ίσες ποσότητες κόμποστ ΑΣΑ διασκορπίστηκε σε κάθε μία από τις υποπεριοχές με το χέρι (Εικ. 3.2β). Το ίδιο έγινε και στην τέταρτη περιοχή όπου τα οργανικά υποστρώματα, λίπασμα και κοπριά, διασκορπίστηκαν με τον ίδιο τρόπο σε δέκα υποπεριοχές. Ο τρίτος τομέας, εφαρμογή κοπριάς, χωρίστηκε σε 16 υποπεριοχές και κάθε υποπεριοχή έλαβε την ίδια ποσότητα. Τα εδαφοβελτιωτικά διασκορπίστηκαν με το χέρι ομοιόμορφα στην επιφάνεια του κάθε υποτεμαχίου (Εικ. 3.2γ) και ενσωματώθηκαν σε βάθος μέχρι 7 cm από την επιφάνεια του

εδάφους, μέσω άροσης πριν τη φύτευση (Εικ. 3.2δ). Άροση εφαρμόστηκε επίσης και στη “ΙΓ” μεταχείριση.



Εικόνα 3.2. (α) Χάραξη περιοχών διαχειρίσεων, (β) Ισοκατανομή ποσοτήτων εδαφοβελτιωτικών, (γ) Προσθήκη εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος και (δ) τελική άροση του χωραφίου.

Καλλιέργεια

Το φυτικό είδος που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος ήταν η τομάτα (*Solanum lycopersicum*), η οποία καλλιεργείται ευρέως στην περιοχή και έχει μικρό καλλιεργητικό κύκλο, επιτρέποντας την αξιολόγηση των επιπτώσεων της οργανικής και ανόργανης λίπανσης στην ανάπτυξη των φυτών σε ετήσια βάση. Σημειώνεται ότι το πρώτο έτος (2011) χρησιμοποιήθηκε μία όψιμη ποικιλία και εφαρμόστηκαν μικρότερες ποσότητες λιπασμάτων σε σχέση με τα επόμενα έτη. Στην καλλιεργητική αυτή χρονιά πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες δειγματοληψίες σε 3 βάθη του ριζικού υποστρώματος για να ελεγχθούν οι μετασχηματισμοί βασικών χημικών και βιοχημικών παραμέτρων του εδάφους σε κάθε στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Από τα αποτελέσματα της πρώτης χρονιάς εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για το μετέπειτα σχεδιασμό των πειραμάτων.

Στις 01/08/2011, εξήντα (60) φυντάνια όψιμης ποικιλίας τομάτας ανά μεταχείριση, μεταφυτεύτηκαν σε παράλληλες γραμμές στον πειραματικό αγρό (Εικ. 3.3). Η απόσταση γραμμής από γραμμή ήταν 100 cm και η απόσταση ανάμεσα στα φυτά στην ίδια γραμμή ήταν από 75 έως 100 cm (75 cm ανάμεσα στα φυτά της ίδιας υποπεριοχής και 100 cm ανάμεσα στα φυτά 2 όμορων υποπεριοχών της ίδιας μεταχείρισης). Οι αποστάσεις μεταξύ των τεμαχίων (μεταχειρίσεων) ήταν 150 cm (Σχ. 3.2). Οι σειρές των φυτών που οριοθετούν την κάθε μεταχείριση τοποθετήθηκαν σε απόσταση μισό μέτρο από τα όρια των μεταχειρίσεων. Την πρώτη χρονιά, η καλλιεργητική περίοδος ολοκληρώθηκε στα τέλη Νοεμβρίου. Τα επόμενα 2 έτη, μεταφυτεύτηκαν φυντάνια τομάτας ποικιλίας “Bobcat” και η καλλιεργητική περίοδος διήρκεσε από τις αρχές Μαΐου μέχρι τον Οκτώβριο, όπου πραγματοποιήθηκε η τελευταία συγκομιδή και αφαιρέθηκε το υπέργειο μέρος των φυτών για τις ανάγκες τις δειγματοληψίας. Το τελευταίο έτος τα φυντάνια (ποικιλίας “Bobcat”) μεταφυτεύτηκαν τον Μάιο του 2014 και η καταστροφική δειγματοληψία των φυτών πραγματοποιήθηκε στις 06/09/2014 (Πίν. 3.2). Σημειώνεται ότι η τελευταία συγκομιδή για την περίοδο αυτή πραγματοποιήθηκε 1 μήνα αργότερα από την δειγματοληψία του υπέργειου μέρους των φυτών.



Εικόνα 3.3. Η καλλιέργεια τομάτας στον πειραματικό αγρό.

Πίνακας 3.2. Ημερομηνία αρχής και τέλους καλλιεργητικής περιόδου

α/α έτος πειραματισμού	Μεταφύτευση	Τέλος Καλλιεργητικής Περίοδου
1ο έτος	1-Αυγ-11	27-Νοε-11
2ο έτος	17-Μαϊ-12	9-Οκτ-12
3ο έτος	13-Μαϊ-13	29-Σεπ-13
4ο έτος	11-Μαϊ-14	6- Σεπ-14

Η καλλιέργεια της υπαίθριας τομάτας χωρίστηκε σε 4 στάδια ανάπτυξης (κατά προσέγγιση σε 25ημ+, 25ημ+, 25ημ+, τελευταία συγκομιδή), σύμφωνα με τα κριτήρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Τα κριτήρια αυτά προσδιορίστηκαν εμπειρικά και σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας μετά το πέρας των τεσσάρων ετών πειραματισμού.

Πίνακας 3.3. Στάδια ανάπτυξης καλλιέργειας υπαίθριας τομάτας

α/α	Στάδια Ανάπτυξης	Περιγραφή	Ημέρες
1	Βλαστητική ανάπτυξη	Από τη μεταφύτευση των σπορόφυτων έως την εμφάνιση του πρώτου άνθους	0-25
2	Άνθηση και καρπόδεση	Από την εμφάνιση του πρώτου άνθους έως τη δημιουργία του πρώτου καρπού	25-50
3	Ωρίμανση καρπών	Από τη δημιουργία του πρώτου καρπού έως την πρώτη συγκομιδή	50-75
4	Συγκομιδή	Από την πρώτη έως την τελευταία συγκομιδή	75+

Άρδευση

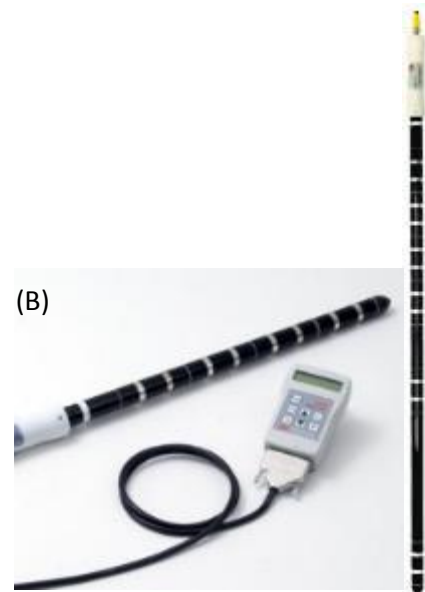
Εγκαταστάθηκε σύστημα άρδευσης, το οποίο παρείχε στις πειραματικές διαχειρίσεις νερό προερχόμενο από τον υπόγειο υδροφόρα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μία αντλία και το υπάρχον πηγάδι. Υιοθετήθηκε σύστημα άρδευσης με τη μέθοδο της σταγόνας (στάγδην άρδευση). Επιλέχθηκε η εγκατάσταση 2 σωλήνων ανά γραμμή έτσι ώστε η διασπορά του νερού να είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση των διαχειρίσεων (Εικ. 3.4). Στην αρχή οι σωλήνες είχαν τοποθετηθεί δίπλα από τους βλαστούς των φυτών και στη συνέχεια μετά το πέρας τριών εβδομάδων από τη μεταφύτευση, οι σωλήνες απλώθηκαν ομοιόμορφα.



Εικόνα 3.4. Στάγδην άρδευση με 2 γραμμές ανά σειρά φυτών.

Τοποθέτηση Δειγματολήπτη Βρόχινου Νερού, Υγρασιόμετρων και Λυσιμέτρων Αναρρόφησης

Κατά την έναρξη του πειράματος τοποθετήθηκε ένας δειγματολήπτης βρόχινου νερού και ένα υγρασιόμετρο κάθετης τομής εδάφους (PR2 Profile Probe Systems 100 cm της εταιρείας Delta-T) σε κάθε μεταχείριση για τον υπολογισμό του προφίλ (σε 6 έξι βάθη) της υγρασίας του εδάφους (Εικόνες 3.5 και 3.6).



Εικόνα 3.5. (Α) Ολοκληρωμένο κιτ γεωτρημάτων για την τοποθέτηση των υγρασιόμετρων. Περιλαμβάνει (i) βάση σταθεροποίησης των τρυπανιών, (ii) τρυπάνι οδηγός, (iii) τρυπάνι τελειώματος, (iv) ράβδο και (v) πορώδης πλαστικοί σωλήνες, (Β) Υγρασιόμετρο τύπου PR2 Profile Probe, Delta-T Devices.



Εικόνα 3.6. Τοποθέτηση πλαστικών σωλήνων υποδοχής των υγρασιόμετρων.

Επίσης, τον Ιούνιο του 2012 τοποθετήθηκαν μεταξύ των φυτών 12 κεραμικά λυσίμετρα αναρρόφησης πορώδους εδαφικού διαλύματος του οίκου Eijkelamp (Εικ. 3.7). Τα λυσίμετρα αυτά τοποθετήθηκαν 3 ανά διαχείριση σε 3 βάθη (10, 30, και 60 εκ.) με σκοπό να συλλεχθούν εδαφικά διαλύματα και να μελετηθεί η κατακόρυφη μετακίνηση των χημικών συστατικών και των μετάλλων στο έδαφος, καθώς και να μετρηθεί η συγκέντρωσή τους στα διάφορα βάθη και στο χρόνο. Η κατασκευή τους έγινε στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών χρησιμοποιώντας τα εξής υλικά:

- Πλαστικοί σωλήνες από σκληρό PVC διαστάσεων 1154mm x 28mm diameter
- Κεραμικές κάψες 0.5 (part number 653x01-B05M2), 1 (part number 653x01-B01M3) και 2 bar (part number 653x01-B02M2) του οίκου Soilmoisture
- Τάπες ρακόρ
- Σωλήνας Πολυουρεθάνης
- Σωλήνας Νερού 3mm



Εικόνα 3.7. Κεραμικό λυσίμετρο αναρρόφησης πορώδους εδαφικού διαλύματος (Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών).

Διαχείριση ζιζανίων και υπολειμμάτων καλλιέργειας και έλεγχος εχθρών και ασθενειών

Κατά τη διάρκεια κάθε καλλιεργητικής περιόδου, η διαχείριση των ζιζανίων πραγματοποιήθηκε με χειρωνακτική αφαίρεση σε τακτά χρονικά διαστήματα (Εικ. 3.8). Τα υπολείμματα της καλλιέργειας και η χλωρή αυτοφυή βλάστηση (Εικ. 3.9) που αναπτύχθηκε κατά τη χειμερινή περίοδο κάθε έτους αποκόπηκαν και παρέμειναν στο έδαφος μέχρι να χάσουν την υγρασία τους και ενσωματώθηκαν στο έδαφος με φρεζάρισμα τους μήνες Μάρτιος-Απρίλιος (χλωρή λίπανση).

Για τον έλεγχο των εχθρών και των ασθενειών της καλλιέργειας εφαρμόστηκε ένα πρόγραμμα προληπτικών επεμβάσεων, που αφορούσε κυρίως την αντιμετώπιση του Περενόπορου (*Plasmopara viticola* → σκεύασμα Aliette), της Τούτας (*Tuta absoluta* → Steward), του Τετράνυχου (*Tetranychus urticae* → Vedes), την Αλτερνάρια (*Alternaria solani* → Albert) και του Ωιδίου (*Leveillula taurica* → Topas), του Βάκιλου (*Bacillus*).



Εικόνα 3.8. Καλλιεργητικές φροντίδες κατά τη διάρκεια του 3ου έτους ανάπτυξης των φυτών.



Εικόνα 3.9. Υπολείμματα καλλιέργειας και αυτοφυή βλάστηση (ριζοζιζάνια).

Ημερολόγιο εργασιών πεδίου

Οι καλλιεργητικές πρακτικές και οι δειγματοληψίες εδάφους και φυτού που εφαρμόστηκαν στον πειραματικό αγρό την περίοδο 2011-2014 παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.4-3.7.

Πίνακας 3.4. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 1^η καλλιεργητική περίοδο.

Ημερ/νία	Δραστηριότητα
20/07/11	Ενσωμάτωση στο έδαφος οργανικών λιπασμάτων
01/08/11	Μεταφύτευση φυντανίων - Έναρξη καλλιεργητικής περιόδου
10/08/11	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές, χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
27/08/11	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (150 g)
09/09/11	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (280 g) και Δειγματοληψία φυλλώματος
10/09/11	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
06/10/11	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (250 g)
09/10/11	Εγκατάσταση υγρασιόμετρων
15/10/11	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
09/11/11	Δειγματοληψία φυλλώματος
24/11/11	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές, χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
27/11/11	Δειγματοληψία συνόλου φυτού τομάτας (υπέργειο τμήμα και ρίζες) - Λήξη καλλιεργητικής περιόδου

Πίνακας 3.5. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 2^η καλλιεργητική περίοδο.

Ημερ/νία	Δραστηριότητα
09/04/12	Ενσωμάτωση στο έδαφος υπολειμμάτων καλλιέργειας και ζιζανίων
07/05/12	Ενσωμάτωση στο έδαφος οργανικών λιπασμάτων
08/05/12	Εγκατάσταση υγρασιόμετρων
17/05/12	Μεταφύτευση φυντανίων - Έναρξη καλλιεργητικής περιόδου
28/05/12	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές αναλύσεις
29/05/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (100 g)
02/06/12	Εγκατάσταση κεραμικών λυσίμετρων αναρρόφησης
06/06/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
20/06/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
24/06/12	Εγκατάσταση κεραμικών λυσίμετρων αναρρόφησης
27/06/12	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές αναλύσεις και Δειγματοληψία φυλλώματος
30/06/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
10/07/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (400 g)
23/07/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (400 g)
31/07/12	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
01/08/12	1η συγκομιδή
05/08/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (500 g)
08/08/12	2η συγκομιδή
13/08/12	3η συγκομιδή
22/08/12	4η συγκομιδή
30/08/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (500 g)
01/09/12	5η συγκομιδή
07/09/12	Δειγματοληψία φυλλώματος
11/09/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (500 g)
20/09/12	6η συγκομιδή
25/09/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (500 g)
01/10/12	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (450 g)
06/10/12	7η συγκομιδή
08/10/12	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές, χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
09/10/12	Δειγματοληψία υπέργειου τμήματος τομάτας - Λήξη καλλιεργητικής περιόδου

Πίνακας 3.6. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 3η καλλιεργητική περίοδο.

Ημερ/νία	Δραστηριότητα
16/04/13	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές & χημικές αναλύσεις (WSA, C/N σε κάθε κλάσμα)
22/04/13	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
26/04/13	Ενσωμάτωση στο έδαφος οργανικών λιπασμάτων
13/05/13	Μεταφύτευση φυτανίων - Έναρξη καλλιεργητικής περιόδου
24/05/13	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές, χημικές και βιοχημικές αναλύσεις
28/05/13	Εγκατάσταση κεραμικών λυσίμετρων αναρρόφησης
29/05/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (100 g)
10/06/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g) και λήψη δειγμάτων αρδευτικού νερού
21/06/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
23/06/13	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές (WSA), χημικές (C/N σε κάθε κλάσμα) και βιοχημικές αναλύσεις
02/07/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
10/07/13	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές αναλύσεις και Δειγματοληψία φυλλώματος
11/07/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (700 g)
20/07/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (700 g)
29/07/13	1η συγκομιδή και Δειγματοληψία εδάφους για βιοχημικές αναλύσεις
04/08/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (700 g)
07/08/13	2η συγκομιδή
11/08/13	3η συγκομιδή
17/08/13	4η συγκομιδή
20/08/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (500 g)
23/08/13	5η συγκομιδή
05/09/13	6η συγκομιδή
16/09/13	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (600 g)
20/09/13	7η συγκομιδή
23/09/13	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές αναλύσεις
29/09/13	Δειγματοληψία υπέργειου τμήματος τομάτας - Λήξη καλλιεργητικής περιόδου
01/11/13	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές & χημικές αναλύσεις (WSA, C/N σε κάθε κλάσμα WSA)

Πίνακας 3.7. Ημερολόγιο εργασιών πεδίου για την 4^η καλλιεργητική περίοδο.

Ημερ/νία	Δραστηριότητα
03/05/14	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές & χημικές αναλύσεις (WSA, C/N σε κάθε κλάσμα) πριν το όργωμα
10/05/14	Ενσωμάτωση στο έδαφος οργανικών λιπασμάτων
10/05/14	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές & χημικές αναλύσεις (WSA, C/N σε κάθε κλάσμα) μετά το όργωμα
11/05/14	Μεταφύτευση φυτανίων - Έναρξη καλλιεργητικής περιόδου
01/06/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (100 g)
12/06/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
18/06/14	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές αναλύσεις και Δειγματοληψία φυλλώματος
23/06/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
23/06/13	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές & χημικές αναλύσεις (WSA, C/N σε κάθε κλάσμα)
03/07/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 30-10-10 (330 g)
10/07/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (700 g)
24/07/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (700 g)
24/07/14	1η συγκομιδή
01/08/14	2η συγκομιδή
06/08/14	3η συγκομιδή
11/08/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (700 g)
12/08/14	4η συγκομιδή
18/08/14	5η συγκομιδή
23/08/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (500 g)
24/08/14	6η συγκομιδή
29/08/14	Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος 20-20-20 (650 g)
02/09/14	7η συγκομιδή
06/09/14	Δειγματοληψία εδάφους για χημικές αναλύσεις
06/09/14	Δειγματοληψία υπέργειου τμήματος τομάτας (φύλλα και στελέχη) - Λήξη καλλιεργητικής περιόδου
09/10/14	Δειγματοληψία εδάφους για φυσικές & χημικές αναλύσεις
09/10/14	Τελευταία συγκομιδή εναπομείναντων φυτών τομάτας

3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ

Η δόση λιπάσματος που εφαρμόστηκε στη μεταχείριση της ανόργανης λίπανσης (IF) ήταν 20 kg N στρέμμα⁻¹, τα οποία ήταν συνολικά διαθέσιμα ανά 1000 m² σε κάθε καλλιεργητικό κύκλο, με την εξαίρεση του πρώτου έτους, για τον οποίο ήταν 3 kg N στρέμμα⁻¹. Εφαρμόστηκαν δύο συνθετικά διαλυτά ανόργανα λιπάσματα μέσω άρδευσης. Το πρώτο ήταν ένα (30-10-10) λίπασμα, το οποίο αποτελούνταν από 30% συνολικό διαθέσιμο N (με τη μορφή 2,8% NO₃, 4,8% NH₄, και 23% ουρίας), 10% διαθέσιμο P ως P₂O₅, και 10% διαθέσιμο K ως K₂O, πλέον μικροθρεπτικών συστατικών, το οποίο εφαρμόστηκε στα δύο πρώτα στάδια ανάπτυξης των φυτών. Το δεύτερο λίπασμα ήταν ένα (20-20-20), το οποίο εφαρμόστηκε στα δύο τελευταία στάδια ανάπτυξης των φυτών και περιείχε 20% N (με τη μορφή 3,9% NO₃, 3,8% NH₄, και 12,3% ουρίας), 20% P, 20% K και μικροθρεπτικά συστατικά. Συνολικά, η αναλογία του πρώτου (30-10-10) και δεύτερου (20-20-20) λιπάσματος που εφαρμόστηκε σε κάθε καλλιεργητικό κύκλο ήταν 1:3.



Η βιομηχανία λιπασμάτων συχνά εκφράζει τα θρεπτικά συστατικά των λιπασμάτων ως οξείδια, όπως το K₂O και το P₂O₅. Τα στοιχειακά περιεχόμενα σε K και P υπολογίστηκαν με βάση τους ακόλουθους τύπους.

$$\% K = \frac{39,1}{47,1} \% K_2O$$

$$\% P = \frac{62}{142} \% P_2O_5$$

Το κόμποστ (Municipal Solid Waste compost, MSWC) που χρησιμοποιήθηκε από οργανικά οικιακά απόβλητα προέρχονταν από το Εργοστάσιο Μηχανικής Διαλογής και Κομποστοποίησης της Διαδημοτικής Επιχείρησης Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ) Χανίων. Το φυσικό οργανικό λίπασμα (κόμποστ) ήταν ένα ώριμο κόμποστ και παρασκευάστηκε από υπολείμματα οργανικών αστικών αποβλήτων, σε συνδυασμό με πράσινα απόβλητα. Η σταβλίσια κοπριά (Manure, M) συλλέχθηκε από στάνες και περιείχε φρέσκια πρόβεια και κατσικίσια απόβλητα. Το κόμποστ και η κοπριά κοσκινίστηκαν με κόσκινο διαμέτρου οπών 4mm και ενσακίστηκαν για να μεταφερθούν στο αγρόκτημα (Εικ. 3.9).



Εικόνα 3.9. (α) Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης Χανίων της ΔΕΔΙΣΑ, (β) κοσκίνιση και ενσάκωση υλικού.

3.5 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τον Ιούνιο του 2011 έγινε άροση του αγρού σε βάθος 60 cm με καλλιεργητή βαρέως τύπου για να αεριστεί ελαφρά το έδαφος και να καταστραφούν κάποια ζιζάνια. Πριν την άροση, έγινε εκσκαφή τριών ορυγμάτων κάθετης τομής εδάφους και λήφθηκαν δείγματα εδάφους από έξι διακριτούς εδαφικούς ορίζοντες (0-3 cm, 3-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm, 50-70 cm, και 70-120 cm).

Το πρώτο έτος του πειράματος (2011) ελήφθησαν τρία δείγματα πυρήνα-κυλινδρικής τομής (χρησιμοποιώντας ένα δειγματολήπτη εδάφους τύπου edelman του οίκου Eijkelkamp) από κάθε υποτεμάχιο και από τρία εδαφικά βάθη (0-15, 15-30 και 30-50 cm), σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Το έτος 2012, η δειγματοληψία εδάφους πραγματοποιήθηκε σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, όπου ελήφθησαν τρία δείγματα από κάθε υποτεμάχιο και από δύο εδαφικά βάθη (0-15 και 15-30 cm). Το επόμενο έτος (2013) η δειγματοληψία εδάφους έλαβε χώρα 4 φορές: πριν την ενσωμάτωση του οργανικού εδαφοβελτιωτικού, στην αρχή, ενδιάμεσα και το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Τέλος, το 2014 πραγματοποιήθηκαν 2 δειγματοληψίες, η πρώτη 1 μήνα μετά τη μεταφύτευση των σπορόφυτων και η δεύτερη στο τέλος του πειράματος.

Τα δείγματα αρχικού εδάφους (Ιούνιος 2011) αναμίχθηκαν για να δημιουργηθεί ένα μίγμα 200 g. Αντίστοιχη διαδικασία εκτελέστηκε και για τα δείγματα πυρήνα, όπου δημιουργήθηκε ένα μίγμα 200 g για κάθε υποτεμάχιο και βάθος που επρόκειτο να αναλυθεί. Ένα μικρό μέρος από κάθε μίγμα χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε υγρασία. Το υπόλοιπο δείγμα υποβλήθηκε σε ξήρανση με αέρα σε συνθήκες δωματίου (Εικόνα 10), κοσκινίστηκε μέσα από κόσκινο 2 χιλ. με σκοπό την κατακράτηση και διαχωρισμό υπολειμμάτων από φύλλα και χάλικες διαμέτρου $d > 2$ mm και στη συνέχεια αποθηκεύτηκε σε θερμοκρασία δωματίου μέσα σε αεροστεγείς σακούλες μέχρι να υποβληθεί σε χημική ανάλυση. Το κλάσμα < 2 mm χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των pH, Ec, N-NO_3^- , N-NH_4^+ και τη κοκκομετρική σύσταση και ορυκτολογία. Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανικό άνθρακα (Total Organic Carbon – TOC), ολικό άζωτο (Total Nitrogen – TN), διαθέσιμο φώσφορο (olsen-Phosphorus – olsen-P) και μέταλλα, το εδαφικό υλικό με κοκκομετρία < 2 mm υπεβλήθη σε θρυμματισμό και κοσκίνισμα (κόσκινο 250 μm).

Επιπρόσθετα, ελήφθησαν τρία δείγματα αδιατάρακτου εδάφους με τη διάνοιξη εδαφικής τομής σε βάθος 0-15 εκ., 300 g από κάθε μεταχείριση, για τον υπολογισμό της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στις επιδράσεις του νερού, κατά την έναρξη και τη λήξη κάθε καλλιεργητικής περιόδου. Μία επιπλέον δειγματοληψία διενεργήθηκε το τρίτο έτος, πριν την άροση, για να αξιολογηθεί η επίπτωση της μηχανικής κατεργασίας του εδάφους στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων του εδάφους. Τα αδιατάρακτα δείγματα διαλύθηκαν ελαφρά με το χέρι, προκειμένου να αφαιρεθούν τα οργανικά υπολείμματα, οι μεγαλύτερες ρίζες και τυχόν τεμαχίδια ορυκτών. Στη συνέχεια, τα δείγματα υπέστησαν ξήρανση με αέρα (Εικ. 3.10) και κοσκινίστηκαν μέσα από κόσκινο 8 mm και κατόπιν αποθηκεύτηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος, για την εκτίμηση του Φαινόμενου Ειδικού Βάρους (ΦΕΒ) ελήφθησαν με ειδικούς δειγματολήπτες πυρήνες αδιατάρακτου εδάφους (100 cm^3). Όλα τα δείγματα (διαταραγμένα και αδιατάραχτα) ελήφθησαν σε απόσταση 30 cm από τα σημεία μεταφύτευσης των σπορόφυτων.



Εικόνα 3.10. Αεροξήρανση δειγμάτων εδάφους.

Φυσικές Αναλύσεις

Η μηχανική σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης με ακτίνες laser (laser diffraction analysis, αναλυτής Mastersizer S) στο εργαστήριο Εμπλουτισμού της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στην εκτροπή των ακτίνων laser, όταν αυτές προσπίπτουν σε κόκκους. Με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων laser, μια δεσμίδα ακτίνας λέιζερ εκπέμπεται κάθετα σε ένα ρευστό (νερό) στο οποίο το υπό μέτρηση υλικό είναι διασπαρμένο και εκτιμάται η διάμετρος σφαίρας ισοδύναμου όγκου συναρτήσεις της γωνίας εκτροπής των ακτίνων laser.

Το ΦΕΒ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας πυρήνες εδάφους 100 cm³. Το περιεχόμενο υγρασίας του εδάφους προσδιορίστηκε με δυο τρόπους : α) στο πεδίο με τακτικές μετρήσεις μέσω των 4 υγρασιόμετρων (1 για κάθε μεταχείριση) που είχαν εγκατασταθεί στο πεδίο και β) στο εργαστήριο αμέσως μετά την δειγματοληψία μέσω της ξήρανσης των δειγμάτων εδάφους σε φούρνο στους 110 °C για 16 ώρες και μέτρηση του βάρους του δείγματος πριν και μετά την ξήρανση.

Η κατανομή μεγέθους των ξηρών συσσωματωμάτων (Dry Stable Aggregates, DSA) προσδιορίστηκε με χειρωνακτική κοσκίνηση αεροξηραμένου εδάφους (500 g), χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σειρά κοσκίνων: 10, 5.6, 2, 1, 0.25 και 0.053 mm.

Ο προσδιορισμός της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στις επιδράσεις του νερού (Water Stable Aggregates, WSA) στηρίχθηκε στο μοντέλο κλασματοποίησης που περιγράφεται από τους Stamati, et al. (2013) και Elliott (1986). Συνοπτικά, τα δείγματα διαχωρίστηκαν σε 5 κλάσματα υδατοσταθερών συσσωματωμάτων: i) μεγάλα μακροσυσσωματώματα (>2000 μm), ii) μεσαία μακροσυσσωματώματα (1000-2000 μm), iii) μικρά μακροσυσσωματώματα (250-1000 μm), iv) μικροσυσσωματώματα (53-250 μm), και v) μικροσυσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου και ορυκτών σωματιδίων (<53 μm). Πιο συγκεκριμένα 40 g ξηραμένου με αέρα και κοσκινισμένου (8-mm) δείγματος εδάφους βυθίστηκε στο νερό πάνω από κόσκινο με διάμετρο οπών 2000 μm και αφέθηκε σε κατάσταση ηρεμίας για 5 min, έτσι ώστε να επιτραπεί το μούλιασμα και η κατακάθιση των ασταθών συσσωματωμάτων. Κατόπιν, το δείγμα κοσκινίστηκε χειροκίνητα και η μάζα που συγκρατήθηκε από το κόσκινο και συλλέχθηκε σε αλουμινένιο ταψάκι, ενώ η μάζα που πέρασε στο νερό τοποθετήθηκε διαδοχικά στα κόσκινα των 1 mm, 250 μm και 53 μm με 40, 20 και 10 βυθίσεις, αντίστοιχα (Εικ. 3.11). Τα διαχωρισμένα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 40 °C για τουλάχιστον 1 ημέρα ώστε να αφαιρεθεί η υγρασία τους και κατόπιν ζυγίστηκαν για να καταγραφεί η ποσοστιαία ξηρή μάζα τους. Το ποσοστό άμμου κάθε κλάσματος υδατοσταθερού συσσωματώματος προσδιορίστηκε μετά τη διασπορά του κλάσματος σε εξαμεταφωσφορικό άλας (0,5%) για 18 ώρες στις 190 στροφές (rpm) (Stamati et al. 2013). Η ποσοστιαία αναλογία των συσσωματωμάτων μετρήθηκε μετά από διόρθωση του ποσοστού σε άμμο ως εξής:

$$WSA_{sand-free} = WSA \cdot [1 - \text{αναλογία άμμου}_{WSA}]$$

όπου:

WSA : υδατοσταθερό κλάσμα συσσωματώματος, (g)

WSA_{sand-free} : υδατοσταθερό κλάσμα συσσωματώματος απαλλαγμένο από τα ανόργανα σωματίδια άμμου, (g)

αναλογία άμμου_{WSA} : η αναλογία της άμμου επί συνολικού κλάσματος εδάφους

Για την έκφραση της κατανομής των WSA χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης MWD_w (Mean Weight Diameter of WSA), που υπολογίστηκε ως εξής (van Bavel 1949):

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

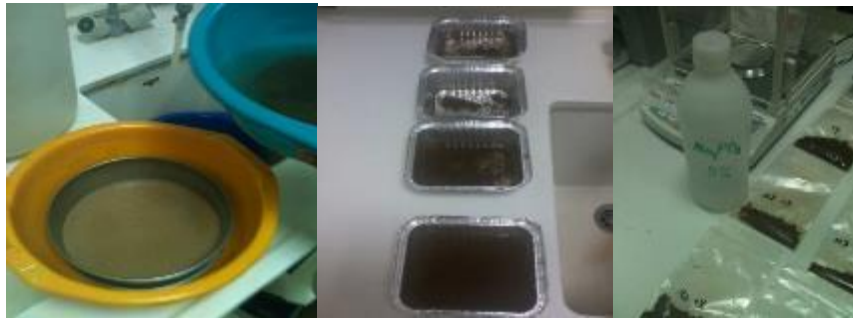
όπου

MWD : η μέση σταθμισμένη διάμετρος των υδατοσταθερών κλασμάτων, (*mm*)

X_i : η μέση διάμετρος για κάθε τάξη κλασμάτων, (*g*)

W_i : η αναλογία επί συνολικού εδάφους του κάθε κλάσματος

Οι μεγαλύτερες τιμές *MWD* υποδεικνύουν υψηλότερες αναλογίες μακροσυσσωμαμάτων και επομένως υψηλότερη σταθερότητα στη διάβρωση από το νερό.



Εικόνα 3.11. Κλασματοποίηση εδάφους σύμφωνα με τους Stamati, et al. (2013) και Elliott (1986).

Χημικές Αναλύσεις

Οι αναλύσεις έγιναν στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης και συμμετείχαν η Lilly Sagu και η Στέλλα Βουτσαδάκη, χημικοί του Εργαστηρίου, καθώς και ο υποψήφιος διδάκτορας Γιαννάκης Γιώργος.

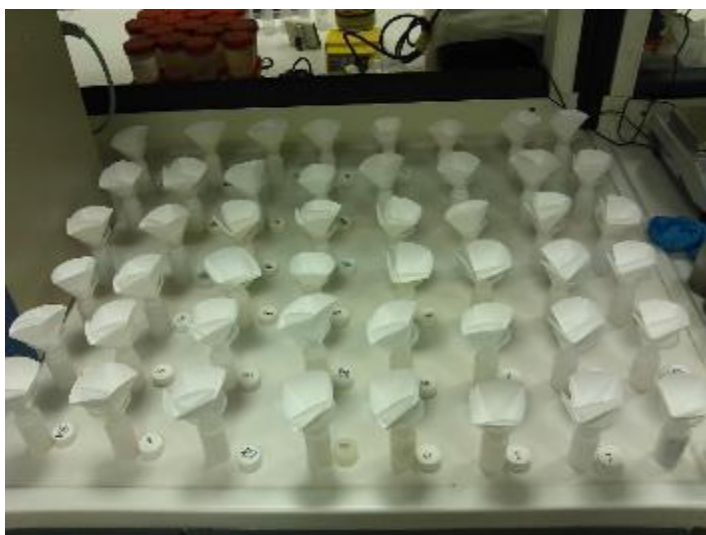
Το pH του εδάφους προσδιορίστηκε σε εναιώρημα απεσταγμένου νερού και εδάφους 1:2:5 (v/v) χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμένο ηλεκτρόδιο υάλου και ένα πεχάμετρο βαθμονομημένο ως προς τυπικές τιμές της κλίμακας δραστηριότητας του ιόντος υδρογόνου. Χρησιμοποιήθηκε ένα εναιώρημα εδάφους σε νερό αναλογίας 1:5 για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι περιεκτικότητες του εδάφους σε OC και TN μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν αναλυτή N/C του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών (Multi N/C 2100 της εταιρείας AnalytikJena – Εικ. 3.12). Το σύστημα ανάλυσης ολικού οργανικού άνθρακα με σύστημα προσδιορισμού ολικού αζώτου του οίκου AnalytikJena, model multi N/C 3100, λειτουργεί με την αρχή της καταλυτικής οξείδωσης του δείγματος και μετατροπής του περιεχομένου άνθρακα σε CO₂, το οποίο ανιχνεύεται με τη μέθοδο μη διασπειρόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR). Αντίστοιχα, το οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε αέριο N₂, το οποίο ανιχνεύεται με τον ανιχνευτή αζώτου χημειοφωταύγειας που λειτουργεί με κενό.

Η ποσοστιαία σύσταση του εδάφους σε OC και TN μετρήθηκε σε όλα τα κλάσματα και υποκλάσματα των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων. Για τη μέτρηση της σωματιδιακής οργανικής ύλης χρησιμοποιήθηκαν τα κλάσματα εδάφους που συλλέχθηκαν στα κόσκινα 250 μm και 53 μm (κοκκομετρία 53-2000 μm), κατά τη διαδικασία κοσκίνησης των υδατοσταθερών κλασμάτων εδάφους >2000 μm, 250-2000 μm και 53-250 μm και αφού προηγουμένως είχαν υποστεί διασπορά σε εξαμεταφωσφορικό άλας (βλ. προηγούμενη παράγραφο - φυσικές αναλύσεις).

Οι συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων και αμμωνίου προσδιορίστηκαν φασματοφωτομετρικά σε εκχυλίσματα εδάφους (σε KCl 2M) χρησιμοποιώντας φασματοφωτόμετρο *Spectrophotometer HACH DR-2800*. Οι εκχυλίσσεις έγιναν σε αναλογία εδάφους προς KCl: 1 gr προς 5 mL διαλύματος KCl 2M, με ανάδευση για 30 λεπτά σε 180 rpm. Ακολούθησε η διήθηση του εκχυλίσματος σε φίλτρα Whatman™ No 42 (Εικ. 3.13). Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του N-NO₃⁻ πραγματοποιήθηκε φασματοφωτομετρικά σε μήκος κύματος 500 nm με τη μέθοδο αναγωγής Cd (χρήση του αντιδραστηρίου NitraVer® 5, Powder Pillows της εταιρείας HACH). Αντίστοιχα, ο προσδιορισμός του N-NH₄⁺ έγινε επίσης φωτομετρικά (425 nm) ακολουθώντας τη μέθοδο αναγωγής Nessler (χρήση αντιδραστηρίων Mineral Stailiser, PolivinyI Alcohol Dispensing Agent και Nessler Reagent). Με τις παραπάνω μεθοδολογίες υπολογίστηκε η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών για τα φυτά. Ο διαθέσιμος P προσδιορίστηκε μέσω της μεθόδου Olsen (Olsen et al. 1954) μετά την εκχύλιση με διττανθρακικό νάτριο 0,5 M (pH 8,5).



Εικόνα 3.12. Αναλυτής N/C της εταιρείας AnalyticJena.



Εικόνα 3.13. Διήθηση εκχυλισμάτων εδάφους (σε 2M KCl).

Πραγματοποιήθηκαν στοιχειακές αναλύσεις δειγμάτων εδάφους μέσω φασματοσκοπίας φθορισμού ενεργειακής διασποράς ακτίνων Χ (EDS-XRF). Οι στοιχειακές αναλύσεις αφορούσαν κλάσματα μάζας των ενώσεων οξειδίου (Na_2O , MgO , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , και P_2O_5). Για τις παραπάνω μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα φασματόμετρο τύπου Bruker S2 Ranger XRF του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας & Οργανικής Πετρογραφίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Π.Κ. Το όργανο αυτό στηρίζεται στον ανιχνευτή στερεάς κατάστασης πυριτίου, Si (Li), που διακρίνει και μετρά φασματικές κατανομές διαφορετικών ενεργειών ακτίνων Χ. Τα δισκία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναλυτική μέθοδο παρασκευάστηκαν ως εξής: Δείγματα αρχικού εδάφους (πριν την έναρξη του πειράματος) από διάφορα βάθη λειοτριβήθηκαν και κοσκινίστηκαν στα 60 μm και υπέστησαν πύρωση στους 1050 $^\circ\text{C}$ για να υπολογιστεί η απώλεια βάρους. Κατόπιν αναμίχθηκαν με ειδικό κερί σε αναλογία 1 προς 10 και στη συνέχεια με χρήση βορικού οξέος με πίεση (περίπου 150 atm) παρασκευάστηκαν τα δισκία.

Για τα εδαφικά δείγματα που ελήφθησαν πριν την έναρξη του πειράματος πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ολικών μετάλλων (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As κλπ.) με τη χρήση του ICP-MS 7500cx του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Π.Κ. Πριν την ανάλυση τα δείγματα προετοιμάστηκαν κατάλληλα με τη βοήθεια της υγρής χώνευσης με μικροκύματα (Synthos 3000, Anton Paar), προκειμένου να παραληφθούν σε διαλυτή μορφή τα προς ανάλυση στοιχεία. Για την υγρή χώνευση χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου EPA3051 (Standard methods in microwave assisted sample preparation, Application Note by Anton Paar). Συγκεκριμένα, ζυγίστηκε ποσότητα στερεού δείγματος (0.25-0.5g) και χωνεύτηκε με 9 mL HNO₃ (>69% tracedetect grade, Merck) ακολουθώντας το εξής πρόγραμμα (Πίν. 3.8):

Πίνακας 3.8. Πρωτόκολλο υγρής χώνευσης στερεών δειγμάτων.

Stage	Power	Ramp in	Hold	Comment
1	600W	6 min		<u>At 800W:</u> Max Temperature: 200°C
2	800W		14min	Max Pressure: 40bar
3	0W		15min	Reach room temperature

Έπειτα, τα χωνεμένα δείγματα αραιώθηκαν και φυγοκεντρήθηκαν. Το υπερκείμενο υγρό απομακρύνθηκε προσεκτικά, διηθήθηκε (0,45μm, Whatman), αραιώθηκε κατάλληλα και αναλύθηκε με συνθήκες ίδιες με αυτές των υγρών δειγμάτων (παράμετροι λειτουργίας ICP-MS, επεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων, έλεγχος αξιοπιστίας χώνευσης και ανάλυσης των στερεών δειγμάτων).

Γενικά, η έκφραση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση εξωτερικής καμπύλης βαθμονόμησης (5 τουλάχιστον επίπεδα συγκέντρωσης, με συντελεστή συσχέτισης (r) της τάξης του 0,99 για κάθε στοιχείο) χρησιμοποιώντας πρότυπες ενώσεις κατάλληλης καθαρότητας των εταιρειών Merck. Τα όρια ανίχνευσης προέκυψαν από τις καμπύλες βαθμονόμησης με κατάλληλους μαθηματικούς υπολογισμούς (Chemstation Software by Agilent). Τα όρια ανίχνευσης καθώς και το γραμμικό εύρος των καμπυλών βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 3.9).

Πίνακας 3.9. Όρια ανίχνευσης μεθόδων και γραμμικό εύρος καμπυλών βαθμονόμησης ICP-MS 7500cx.

Μέθοδος	Εύρος μεθόδου	Όρια ανίχνευσης
Βόριο (B)	0-200 µg/L	0,0580 µg/L
Νάτριο (Na)	0-5 mg/L	0,0001 mg/L
Μαγνήσιο (Mg)	0-25 mg/L	0,0001 mg/L
Αργίλιο (Al)	0-25 mg/L	0,0001 mg/L
Πυρίτιο (Si)	0-25 mg/L	0,0001 mg/L
Κάλιο (K)	0-25 mg/L	0,0040 mg/L
Ασβέστιο (Ca)	0-25 mg/L	0,0040 mg/L
Βανάδιο (V)	0-200 µg/L	0,0010 µg/L
Χρώμιο (Cr)	0-200 µg/L	0,0150 µg/L
Μαγγάνιο (Mn)	0-200 µg/L	0,0100 µg/L
Νικέλιο (Ni)	0-200 µg/L	0,0001 µg/L
Σίδηρος (Fe)	0-200 µg/L	0,0003 mg/L
Χαλκός (Cu)	0-200 µg/L	0,0200 µg/L
Ψευδάργυρος (Zn)	0-200 µg/L	0,0600 µg/L
Αρσενικό (As)	0-200 µg/L	0,0300 µg/L
Σελήνιο (Se)	0-200 µg/L	0,2800 µg/L
Κάδμιο (Cd)	0-200 µg/L	0,0100 µg/L
Υδράργυρος (Hg)	0-200 µg/L	0,1300 µg/L
Μόλυβδος (Pb)	0-200 µg/L	0,0010 µg/L

Κατά την ανάλυση των μετάλλων με το ICP-MS αξιοποιήθηκε η δυνατότητα του οργάνου να λειτουργεί σε collision (He) ή/και reaction (H₂) mode με στόχο την παραγωγή ακόμα πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων λόγω του περιορισμού των ισοβαρών παρεμποδίσεων (π.χ., παρεμπόδιση του 40Ar12C στην ανάλυση του 52Cr). Η ανάλυση με το ICP-MS πλεονεκτεί των άλλων τεχνικών (ατομική απορρόφηση, φασματοφωτομετρία, σταθμικός προσδιορισμός κλπ.) ως προς τα χαμηλότερα όρια ανίχνευσης, το μεγαλύτερο εύρος γραμμικότητας, την ταυτόχρονη πολυστοιχειακή ανάλυση και την ανάλυση μεγάλου αριθμού δειγμάτων σε σειρά σε σύντομο χρόνο (batch analysis).

Η ορυκτολογική σύνθεση προσδιορίστηκε μέσω τεχνικών ποσοτικής περίθλασης ακτινών X (XRD), χρησιμοποιώντας ένα περιθλασίμετρο κόνεως τύπου Bruker D8 Advance του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Π.Κ.

Βιοχημικές Αναλύσεις

1η χρονιά

Εκχυλίσματα εδάφους σε διάλυμα KCl 2M χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του Διαλυτού Οργανικού Άνθρακα (Εκχυλισμένος Διαλυτός Οργανικός Άνθρακας - Extacted Soluble Organic Carbon, ESOC) και Αζώτου (Εκχυλισμένο Διαλυτό Οργανικό/Ολικό Άζωτο - Extacted Soluble Organic/Total Nitrogen, ESON/ESN), της βραχυπρόθεσμης δυνητικής ικανότητας διαλυτοποίησης του οργανικού άνθρακα (Δυνητικά Διαλυτός Οργανικός Άνθρακας - Potentially Soluble Organic Carbon, PSOC) και οργανικού/ολικού αζώτου (Δυνητικά Διαλυτό Οργανικό/Ολικό Άζωτο - Potentially Soluble Organic/Total Nitrogen, PSON/PSN) του εδάφους καθώς και της βραχυπρόθεσμης δυνητικής ικανότητας ανοργανοποίησης του αζώτου

(Δυνητικά Ανοργανοποιήσιμο Άζωτο - Potentially Mineralizable N, PMN). Τα εδάφη εκχυλίστηκαν με 2M διαλύματος KCl σε μια αναλογία 1: 5 έδαφος προς διάλυμα (20 g έδαφος / 100 mL KCl 2M), ανακινήθηκαν στις 225 στροφές ανά λεπτό (rpm) και επωάστηκαν για 1 ώρα στους 20 °C και για 1 εβδομάδα στους 40 °C. Τα εκχυλίσματα διηθήθηκαν μέσω ενός φίλτρου με διάμετρο πόρων 0,45 μm και η περιεκτικότητά τους σε NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, οργανικό C, οργανικό και ολικό N μετρήθηκε σύμφωνα με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Το PMN υπολογίστηκε ως η διαφορά του ανόργανου αζώτου (νιτρικό και αμμωνιακό άζωτο) μεταξύ των δειγμάτων που επωάστηκαν 1 εβδομάδα και αυτών που επωάστηκαν 1 ώρα (Burton et al., 2007). Το PSOC και το PSON μετρήθηκαν στα δείγματα που επωάστηκαν 1 εβδομάδα (Burton et al. 2007). Οι εκχυλίσσεις έγιναν εις διπλούν.

Για να αποκτήσουμε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την παρουσία αρωματικών υδρογονανθράκων στο ESOC και στο PSOC, τα εκχυλίσματα αναλύθηκαν για να προσδιοριστεί η ειδική απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας του ESOC και του PSOC σε μήκος κύματος 280 nm (SUVA₂₈₀), ως εκτίμηση της αρωματικής περιεκτικότητας του διαλυτού οργανικού άνθρακα. Η ειδική απορρόφηση UV (SUVA) ορίζεται ως η απορρόφηση UV ενός δείγματος διαλύματος σε ένα δεδομένο μήκος κύματος κανονικοποιημένο για συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα. Η απορρόφηση UV στα 280 nm μετρήθηκε σε φασματοφωτόμετρο Shimadzu UV mini 1240 του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Π.Κ. Η απορρόφηση μετρήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου με DI νερό ως κενό και για την ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες αραιώσεις. Η απορρόφηση στα 280 nm στη συνέχεια κανονικοποιήθηκε για περιεκτικότητα ESOC και PSOC για να δώσει SUVA_{ESOC} και SUVA_{PSOC}, αντίστοιχα. Η SUVA λαμβάνεται διαιρώντας την απορρόφηση στα 280 nm (1 cm μήκος διαδρομής) με το διαλυτό οργανικό άνθρακα και εκφράζεται σε λίτρα ανά χιλιοστόγραμμα C ανά μέτρο (L·mg·DOC⁻¹·m⁻¹).

Η SUVA δίνεται από τους εξής τύπους:

$$SUVA, SOC = \frac{abs_{280}}{0.003 * \frac{SOC}{Df}}$$

όπου,

- abs₂₈₀: Απορρόφηση στα 280 nm
- Df: Παράγοντας αραιώσης (Dilution factor)
- SOC: Συγκέντρωση διαλυτού οργανικού άνθρακα (ESOC ή PSOC) της διαλυτής φάσης του δείγματος (mg/L)
- Η τιμή 0.003 υποδηλώνει τον όγκο σε L που χρησιμοποιείται για την ανάλυση.

2η και 3η χρονιά

Για τον υπολογισμό του **Καθαρού Ρυθμού Ανοργανοποίησης του Αζώτου (Net N Mineralization Rate, NNMR)** συλλέχθηκαν 3 δείγματα εδάφους ανά μεταχείριση ("IF", "MSWC", "M" και "MSWC+M") και βάθος εδάφους (0-15 και 15-30 εκ.) στις 31/7/12, 8/10/12, 23/6/13 και 29/7/13. Για κάθε δείγμα εδάφους της 1^{ης} δειγματοληψίας δημιουργήθηκαν 6 υποδείγματα ανά βάθος εδάφους (αντίστοιχα 4 υποδείγματα/δείγμα εδάφους για τις υπόλοιπες 3 δειγματοληψίες), όπου ποσότητα εδάφους που αντιστοιχούσε σε 10 g ξηρού

βάρους μεταφερόταν σε πλαστικά κυλίνδρους φυγοκέντρισης των 100 ml. Σε όλα τα υποδείγματα προστέθηκε απιονισμένο νερό μέχρι η υδατοικανότητα του εδάφους να φθάσει στο 70% και στη συνέχεια προεπώσθηκαν στους 20 °C για 5 ημέρες, προκειμένου να έρθει το σύστημα σε μία ισορροπία και να ανταπεξέλθουν οι μο του εδάφους στο σοκ που υπέστησαν από την ομογενοποίηση, μεταφορά και αποθήκευση στο εργαστήριο. Στη συνέχεια τα 3 πρώτα υποδείγματα εδάφους εκχυλίστηκαν με διάλυμα KCl 2M και μετρήθηκε η περιεκτικότητά τους σε NO_3^- -N και NH_4^+ -N. Τα υπόλοιπα 3 υποδείγματα επώσθηκαν αερόβια για 28 ημέρες στους 20 °C. Σημειώνεται ότι τα φιαλίδια καλύπτονταν με παραφίλμ για να επιτρέπεται η ανταλλαγή αερίων και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες νερού. Κατά τη διάρκεια της επώασης η εδαφική υγρασία ρυθμιζόταν σε εβδομαδιαία βάση στο 70% της υδατοικανότητας του εδάφους, μέσω της ζύγισης της περιεκτικότητας των εδαφών σε υγρασία και της αναπλήρωσης των απωλειών υγρασίας με την προσθήκη απιονισμένου νερού. Τα περιεχόμενα των υποδειγμάτων σε NO_3^- -N και NH_4^+ -N στο επιφανειακό (0-15 εκ.) και υποκείμενο στρώμα εδάφους (15-30 εκ.) υπολογίστηκαν την 28^η ημέρα σύμφωνα με τις προαναφερόμενες σε προηγούμενες παραγράφους μεθοδολογίες. Ο συνολικός αριθμός χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα της πρώτης δειγματοληψίας ήταν 6 (υποδείγματα)*3(επαναλήψεις)*4(μεταχειρίσεις)*2(βάθη εδάφους) = 144 αναλύσεις και στα δείγματα των τριών υπολοίπων δειγματοληψιών ήταν 4*3*4*2 = 96 αναλύσεις/δειγματοληψία. Ο **NNMR** υπολογίστηκε ως το κλάσμα της διαφοράς της συγκέντρωσης των ανόργανων μορφών N στις ημέρες 28 και 0, προς το συνολικό αριθμό ημερών (εξίσωση 1), και εκφράζεται σε χιλιοστόγραμμα Ανόργανου N ανά κιλό εδάφους ανά ημέρα ($\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

$$\text{NNMR} = [(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})_{28} - (\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})_0] / 28 \quad \text{εξίσ. (1)}$$

Για τον υπολογισμό του **Δυνητικού Ρυθμού Νιτροποίησης (Potential Nitrification Rate PNR)** διενεργήθηκε ένα πείραμα επώασης σε δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν στις 31/7/12, 8/10/12, 22/4/13 και 24/5/13 ενώ ο **Πραγματικός Ρυθμός Νιτροποίησης (Gross Nitrification Rate, GNR)** μετρήθηκε μόνο στα δείγματα που συλλέχθηκαν στις 8/10/12. Για κάθε δείγμα εδάφους δημιουργήθηκαν 6 υποδείγματα, όπου ποσότητα εδάφους που αντιστοιχούσε σε 10 g ξηρού βάρους μεταφερόταν σε πλαστικά κωνικά φιαλίδια των 100 ml. Σε όλα τα υποδείγματα προστέθηκε απιονισμένο νερό μέχρι η υδατοικανότητα του εδάφους να φθάσει στο 70% και στη συνέχεια προεπώσθηκαν στους 20 °C για 5 ημέρες. Κατόπιν προστέθηκε σε κάθε υπόδειγμα διάλυμα που περιείχε 4,7 mg $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{ml}$. Συνολικά προστέθηκαν ομοιόμορφα 100 mg NH_4^+ -N /kg εδάφους (ξηρού βάρους). Μετά την προσθήκη αμμωνίας 2 από τα 6 υποδείγματα επώσθηκαν στους 20 °C για 30 λεπτά και το επόμενο ζεύγος επώσθηκε στην ίδια θερμοκρασία για 3 ημέρες. Στα τελευταία υποδείγματα προστέθηκε επιπλέον 4mg/ml ποσότητας δικυανοδιαμιδίου (Dicyandiamide, DCD) και ακολούθησε επώαση 20 °C για 3 ημέρες. Η εφαρμογή του αναστολέα νιτροποίησης έγινε ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του εδάφους κάθε φιαλιδίου. Τα περιεχόμενα των υποδειγμάτων σε NO_3^- -N και NH_4^+ -N στο επιφανειακό (0-15 εκ.) και υποκείμενο στρώμα εδάφους (15-30 εκ.) προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τις προαναφερόμενες σε προηγούμενες παραγράφους μεθοδολογίες. Ο **PNR** υπολογίστηκε ως το κλάσμα της διαφοράς της συγκέντρωσης του Νιτρικού Αζώτου στις ημέρες 3 και 0, προς το συνολικό αριθμό ωρών (εξίσωση 2), και εκφράζεται σε χιλιοστόγραμμα Νιτρικού Αζώτου ανά κιλό εδάφους ανά ώρα ($\text{mg NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

$$\text{PNR} = [(\text{NO}_3^- - \text{N})_3 - (\text{NO}_3^- - \text{N})_0] / 72 \quad \text{εξίσ. (2)}$$

Ο **GNR** υπολογίστηκε ως η διαφορά των καθαρών ποσοστών νιτροποίησης μεταξύ των δειγμάτων που δέχθηκαν επίδραση αμμωνιακού υποστρώματος (PNR) και εκείνων που

δέχθηκαν επιπλέον την επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης. Θεωρητικά, εφόσον το DCD δύναται να αναστείλει πλήρως τη διαδικασία της νιτροποίησης, τα δείγματα που λαμβάνουν τον παρεμποδιστή νιτροποίησης θα έχουν χαμηλότερα καθαρά ποσοστά νιτροποίησης (αρνητικοί ρυθμοί), εξαιτίας του γεγονότος ότι λαμβάνει χώρα μόνο η διεργασία της κατανάλωσης των νιτρικών. Οι Καθαροί Ρυθμοί Νιτροποίησης (Net Nitrification Rate, NNR) υπολογίζονται ως τα ποσοστά μεταβολής των συγκεντρώσεων NO_3^- -N στο έδαφος σε 3 ημέρες επώασης των δειγμάτων.

3.6 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ

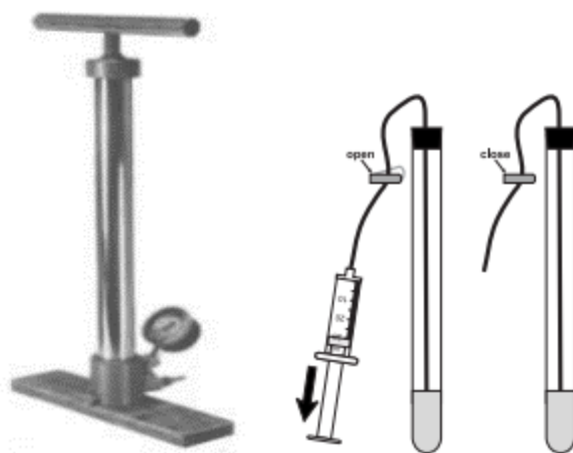
Τέσσερα δείγματα από κάθε οργανικό εδαφοβελτιωτικό υπέστησαν ξήρανση σε κλίβανο (45 °C) και αλέστηκαν σε μύλο για να περάσουν μέσα από κόσκινο 2-mm για την παραλαβή και αποθήκευση ενός ομογενοποιημένου δείγματος. Οι συνολικές περιεκτικότητες των οργανικών σε C και N προσδιορίστηκαν μετά από επιπλέον άλεση (χρησιμοποιήθηκε κόσκινο 0,2 mm), την οποία ακολούθησε η καύση σε αναλυτή N/C (Multi N/C 2100 της εταιρείας Analyticjena).

Τα δείγματα χωνεύτηκαν σε έναν φούρνο μικροκυμάτων χώνευσης (Multi wave 3000 της εταιρείας Anton Paar) και το συνολικό άζωτο (Total Nitrogen, TN) και ο συνολικός φωσφόρος (Total Phosphorus, TP) στα προϊόντα της χώνευσης προσδιορίστηκαν μέσω της συσκευής micro Kjeldahl (Bremner & Mulvaney 1982) και της μεθόδου Olsen (Olsen et al. 1954), αντίστοιχα. Το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των εδαφοβελτιωτικών προσδιορίστηκαν σε αιώρημα εδαφοβελτιωτικό : νερό = 1 : 5.

Τα δείγματα αναλύθηκαν για τον ποσοτικό προσδιορισμό της συγκέντρωσης των ολικών μετάλλων (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As κλπ.) με τη χρήση του ICP-MS 7500cx, αφού προετοιμάστηκαν κατάλληλα με τη βοήθεια της υγρής χώνευσης με μικροκύματα (Synthos 3000, Anton Paar), προκειμένου να παραληφθούν σε διαλυτή μορφή τα προς ανάλυση στοιχεία.

3.7 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ

Οι δειγματοληψίες εδαφικού διαλύματος έχουν ως σκοπό να μελετηθεί η μετακίνηση των χημικών συστατικών και των μετάλλων στο έδαφος καθώς και να προσδιοριστεί η συγκέντρωσή τους στα διάφορα βάθη και στο χρόνο. Διενεργήθηκαν ταυτόχρονα με τις δειγματοληψίες εδάφους, σε μηνιαία βάση. Χρησιμοποιήθηκαν δειγματολήπτες με κεραμική κάψα μύζησης (κεραμικά αναρροφητικά λυσίμετρα - ceramic suction cups) στους οποίους ασκούνταν υποπίεση με χρήση χειροκίνητης αντλίας (Εικ. 3.14α) και τα δείγματα εδαφικού διαλύματος συλλέγονταν 18-24 ώρες αργότερα. Τα αναρροφητικά λυσίμετρα είναι στην ουσία υπεδάφιοι δειγματολήπτες οι οποίοι συλλέγουν το κινούμενο από την επιφάνεια προς το υπέδαφος νερό στην ακόρεστη ζώνη. Αποτελούνται από έναν κοίλο πορώδη κεραμικό κύλινδρο συνδεδεμένο στο άκρο ενός χαλύβδινου κοίλου κυλίνδρου που χρησιμεύει ως δοχείο συλλογής. Στο άνω άκρο του οργάνου εφαρμόζονται δύο σωλήνες (συνήθως από χάλυβα ή teflon), ένας για την δημιουργία κενού και ένας για την αναρρόφηση του συλλεγμένου δείγματος. (Εικ. 3.14β)



Εικόνα 3.14. (α) Χειροκίνητη αντλία για την άσκηση υποπίεσης και (β) Αναρρόφηση συλλεγμένου δείγματος από κεραμικά αναρροφητικά λυσίμετρα.

Τα δείγματα εδαφικού διαλύματος φιλτραρίστηκαν απευθείας στο πεδίο, χρησιμοποιώντας φίλτρα 0,45 μm , και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για να υποβληθούν σε χημικές αναλύσεις. Το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος μετρήθηκε στον αγρό, χρησιμοποιώντας φορητούς ανιχνευτές pH/ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η περιεκτικότητα διαλύματος σε διαλυμένο οργανικό άνθρακα (DOC-Dissolved Organic Carbon) και διαλυμένο άζωτο (DN-Dissolved Nitrogen) μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τον αναλυτή N/C (Multi N/C 2100 της εταιρείας Analyticjena). Οι συγκεντρώσεις νιτρικού άλατος (NO_3^-), αμμωνίου (NH_4^+), φωσφορικού (PO_4^{3-}) και θειικού άλατος (SO_4^{2-}) προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα φασματοφωτόμετρο τύπου HACH 2800DR μετά τις μεθόδους αναγωγής καδμίου, Nessler, ασκορβικού οξέος και SulfaVer 4, αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα kit της εταιρείας HACH.

Οι συγκεντρώσεις Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} και του συνολικού Al προσδιορίστηκαν με χρήση του επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος με φασματομετρία μαζών (ICP-MS 7500cx coupled with Autosampler Series 3000, both by Agilent Technologies) του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Π.Κ. Πριν την ανάλυση τα υγρά δείγματα διηθήθηκαν (ηθμός 0,45 μm , Whatman), οξινίστικαν με πυκνό

νιτρικό οξύ (>69% HNO₃ tracedetect grade) σε επίπεδο 2% και τέλος, αναλύθηκαν είτε ως είχαν είτε μετά από κατάλληλη αραίωση (μέσα στο εύρος της καμπύλης βαθμονόμησης).

3.8 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΦΥΤΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ

Έγινε δειγματοληψία φύλλων τομάτας 3 φορές, όπου ελήφθησαν φύλλα πλήρως ανεπτυγμένα πάνω από το μέσο ύψος του φυτού και οπωσδήποτε όχι από φύλλα της κορυφής. Οι ώριμοι καρποί τομάτας συλλέγονταν τακτικά καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της καλλιέργειας. Η καταστροφική δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου, όπου έγινε αποκοπή 12 φυτών από κάθε χειρισμό (τέσσερα φυτά για κάθε επανάληψη). Τα φυτά χωρίστηκαν σε καρπούς, φύλλα και βλαστούς και αποθηκεύτηκαν σε σακούλες για να μεταφερθούν στο εργαστήριο. Έγινε ζύγιση του νωπού βάρους των υλικών και στη συνέχεια ξήρανση σε φούρνο στους 40 °C μέχρι σταθεροποίηση του βάρους για να προσδιοριστεί η ξηρή βιομάζα. Κατόπιν, δείγματα καρπών, βλαστών και φύλλων αλέστηκαν σε μύλο και φυλάχθηκαν για περαιτέρω αναλύσεις. Η περιεκτικότητα των φυτικών ιστών σε νερό (LWC [%]) υπολογίστηκε ως εξής:

$$\text{LWC (\%)} = [(\text{Νωπή βιομάζα} - \text{ξηρή βιομάζα}) \times 100 / \text{νωπή βιομάζα}]$$

Ο άνθρακας των φυτικών ιστών μετρήθηκε χρησιμοποιώντας αναλυτή N/C (Multi N/C 2011 της εταιρείας Analyticjena). Για τη μέτρηση του ολικού N και του P, τα ξηρά κονιοτοποιημένα δείγματα υπέστησαν υγρή χώνευση σε φούρνο μικροκυμάτων (συσκευή τύπου Anton Paar multi wave 3000) και το N και ο P μετρήθηκαν στα χωνευμένα δείγματα μέσω της μικρο-Kjeldahl (Bremner & Mulvaney 1982) και Olsen (Olsen et al. 1954) μεθόδου, αντίστοιχα. Η ανάλυση του φυτικού ιστού για τα υπόλοιπα στοιχεία θρεπτικών συστατικών (Ca, Mg, Fe, K, κλπ.) και μετάλλων (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As κλπ.) διενεργήθηκε μετά από υγρή χώνευση με μικροκύματα (Synthos 3000, Anton Paar) και ανάλυση ICP-MS (συσκευή τύπου Agilent Technologies 7500CX ICP-MS) του χωνεμένου διαλύματος.

3.9 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος SPSS. Για τη διαπίστωση στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ των υπό μελέτη παραμέτρων ανάμεσα στους χειρισμούς χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης (one way ANOVA). Οι συγκρίσεις των μέσων όρων πραγματοποιήθηκαν με το κριτήριο Tukey. Ως κατώφλι στατιστικής σημαντικότητας ορίστηκε η τιμή $p < 0,05$.

Τα δεδομένα υποβλήθηκαν επίσης σε διερευνητική παραγοντική ανάλυση (Exploratory Factor Analysis) για να ελεγχθεί ποιες μεταβλητές σε ένα σύνολο δεδομένων είναι περισσότερο συναφείς και πώς συσχετίζονται και να αξιολογηθούν οι σχέσεις μεταξύ των παρατηρούμενων μεταβλητών. Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι για την εξαγωγή παραγόντων είναι η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis) (Wold et al. 1987) και η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Factoring). Στην παρούσα εργασία έγινε εφαρμογή της **ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες**. Για την προσέγγιση της “ιδανικής λύσης” και για να γίνουν τα αποτελέσματα πιο ερμηνεύσιμα, επιλέχθηκε η ορθόγωνη στρέψη (orthogonal rotation) και συγκεκριμένα η τεχνική **Varimax**. Σημειώνεται ότι επειδή όλες οι μεταβλητές έχουν κάποια συσχέτιση με όλους τους παράγοντες, η “ιδανική λύση” στην ανάλυση παραγόντων είναι εκείνη στην οποία η κάθε μεταβλητή έχει υψηλή φόρτιση (loading) σε έναν παράγοντα και πολύ χαμηλές φορτίσεις στους άλλους παράγοντες. Για τον έλεγχο της καταλληλότητας των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης MSA (πρέπει όλες οι τιμές να είναι μεγαλύτερες από 0,5), η ορίζουσα (determinant) του πίνακα συνάφειας (πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,00001) και το κριτήριο των Kaiser Meyer Olkin (KMO), που κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 1 ($0 \leq KMO \leq 1$), με αποδεκτή τιμή $KMO > 0,5$. Επίσης, για τον έλεγχο της συνάφειας μεταξύ των μεταβλητών μας εξετάστηκε αν ο δείκτης σφαιρικότητας (Bartlett’s test of sphericity) είναι στατιστικά σημαντικός ($p < 0,05$). Τέλος, για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού των εξαγόμενων παραγόντων χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα “Scree” των ιδιοτιμών (Eigenvalues) σε συνδυασμό με το κριτήριο του Kaiser, σύμφωνα με το οποίο επιλέγονται οι παράγοντες που έχουν ιδιοτιμή μεγαλύτερη του 1.

- Banwart, S., Menon, M., Bernasconi, S. M., Bloem, J., Blum, W. E. H., Souza, D. M. de, Davidsdotir, B., Duffy, C., Lair, G. J., Kram, P., Lamacova, A., Lundin, L., Nikolaidis, N. P., Novak, M., Panagos, P., Ragnarsdottir, K. V., Reynolds, B., Robinson, D., Rousseva, S., de Ruiter, P., van Gaans, P., Weng, L., White, T. and Zhang, B. (2012) 'Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: Introduction to experimental methods and initial results', *Comptes Rendus - Geoscience*.
- van Bavel, C. H. M. (1949) 'Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation', *Soil Science Society of America Journal*.
- Bremner, J. M. and Mulvaney, C. S. (1982) 'Nitrogen-total', in *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*.
- Burton, J., Chen, C., Xu, Z. and Ghadiri, H. (2007) 'Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Elliott, E. (1986) 'Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils', *Soil Science Society of America Journal*.
- Kotronakis, M., Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Rowe, E. C., Valstar, J., Paranychnianakis, N. V. and Banwart, S. A. (2017) 'Modeling the Impact of Carbon Amendments on Soil Ecosystem Functions Using the 1D-ICZ Model', *Advances in Agronomy*.
- Moraetis, D., Stamati, F., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychnianakis, N. and Nikolaidis, N. P. (2011) 'Identification of hydrologic and geochemical pathways using high frequency sampling, REE aqueous sampling and soil characterization at Koiliaris Critical Zone Observatory, Crete', *Applied Geochemistry*, 26, pp. S101–S104.
- Moraetis, D., Efstathiou, D., Stamati, F., Tzoraki, O., Nikolaidis, N. P., Schnoor, J. L. and Vozinakis, K. (2010) 'High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin', *Journal of Hydrology*.
- Olsen, S. R., Cole, C. V, Watandbe, F. and Dean, L. (1954) 'Estimation of Available Phosphorus in Soil by Extraction with sodium Bicarbonate', *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P. and Schnoor, J. L. (2013) 'Modeling topsoil carbon sequestration in two contrasting crop production to set-aside conversions with RothC – Calibration issues and uncertainty analysis', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 165, pp. 190–200.
- Wold, S., Esbensen, K. and Geladi, P. (1987) 'Principal Component Analysis', *Tutorial n Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems Elsevier Science Publishers B . V.*

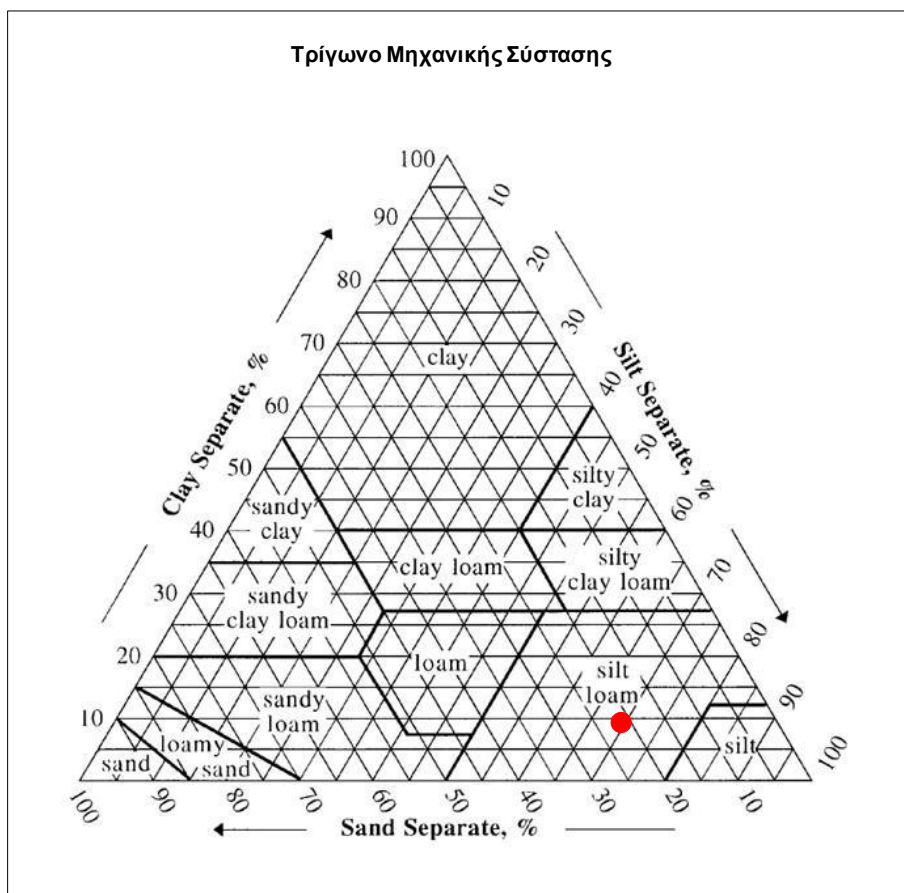
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΘΡΕΨΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ “*SOLANUM LYCOPERSICUM*”

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ποιότητα του εδάφους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις λειτουργίες που επιτελεί το εδαφικό οικοσύστημα. Οι λειτουργίες του εδάφους συνδέονται με την ικανότητά του να αποθηκεύει και να ανακυκλώνει τα θρεπτικά στοιχεία με τη διαδικασία της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης, της αφομοίωσης των θρεπτικών στοιχείων από τους μικροοργανισμούς του εδάφους και της πρόσληψης των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά. Σκοπός του πειράματος ήταν η εφαρμογή μιας αειφορικής αγροτικής διαχείρισης σε μία εντατική καλλιέργεια υπαίθριας τομάτας, που χαρακτηρίζεται από υψηλές απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία, με πυλώνα την ανακύκλωση της οργανικής ύλης στο έδαφος. Επιλέχθηκε η εφαρμογή κόμποστ από οργανικά οικιακά απόβλητα, χωνεμένα ζωικά απόβλητα (κοπριά) και η συνδυασμένη χρήση κόμποστ και κοπριάς. Για την εκτίμηση του όφελους ή του αρνητικού αντίκτυπου που προκύπτει από την υιοθέτηση της πρακτικής εμπλουτισμού των γεωργικών εδαφών με οργανικά προϊόντα, χρησιμοποιήθηκε σαν μάρτυρας στον πειραματικό σχεδιασμό συμβατική χημική λίπανση, σε κατάλληλες δόσεις που κάλυπταν τις θρεπτικές ανάγκες της συγκεκριμένης καλλιέργειας. Σε όλες τις μεταχειρίσεις, η δεξαμενή της φυτικής βιομάζας που αναπτύχθηκε στους πειραματισμούς (ζιζάνια και υπολείμματα καλλιεργειών) επιστράφηκε πίσω στο έδαφος. Βασικό ζητούμενο ήταν η διατήρηση και ενίσχυση της ποιότητας του εδάφους και η προστασία του περιβάλλοντος. Για την εκτίμηση της ποιότητας του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν εδαφικοί χημικοί και βιοχημικοί δείκτες, οι αποδόσεις των καλλιεργειών και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων των φυτών, όπου μελετήθηκε η επίδραση που έχει το είδος της μεταχείρισης θρεπτικών υλικών, το στάδιο ανάπτυξης του φυτού και το βάθος του εδάφους στις παραπάνω εδαφικές και φυτικές παραμέτρους. Παράλληλα, μέσω ισοζυγίων μάζας, υπολογίστηκαν τα ποσοστά πρόσληψης των μακροθρεπτικών στοιχείων N, P και K, και σε συνδυασμό με την παρακολούθηση της μεταβολής των στοιχείων αυτών στο προφίλ της ριζόσφαιρας εκτιμήθηκε ο κίνδυνος περιβαλλοντικής επιβάρυνσης του υπόγειου υδροφορέα. Η εφαρμογή οργανικής λίπανσης στον αγρό αύξησε την οργανική ουσία του εδάφους, εμπλουτίζοντάς το με τις απαραίτητες ποσότητες διαθέσιμου αζώτου και φωσφόρου για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Συγκρίνοντας συνολικά τα αποτελέσματα της χημικής κατάστασης των εδαφών, διαπιστώνουμε ότι τα εδάφη των “M” και “MSWC+M” μεταχειρίσεων παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές στους δείκτες ποιότητας εδάφους και τις υψηλότερες αποδόσεις στα φυτά. Η ετήσια εφαρμογή 50 t·ha⁻¹ χωνεμένης κοπριάς (ξ.β.) στο αργιλοπηλώδες έδαφος του πειραματικού αγρού δύναται να προκαλέσει την κάθετη μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων N και P προς τον υπόγειο υδροφορέα. Το κόμποστ ΑΣΑ, που παρήχθη στο εργοστάσιο κομποστοποίησης της ΔΕΔΙΣΑ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στα γεωργικά εδάφη και η χρήση του σε συνδυασμό με κοπριά από αιγοπρόβατα να οδηγήσει σε μεγιστοποίηση των αποδόσεων και ταυτόχρονα διαφύλαξη της ποιότητας του περιβάλλοντος.

4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται πάνω σε πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις (Τεταρτογενείς σχηματισμοί) και τα εδάφη της ευρύτερης περιοχής χαρακτηρίζονται ως Entisols: εδάφη που έχουν σχηματισθεί πρόσφατα, στα οποία απουσιάζουν οι χαρακτηριστικοί εδαφικοί ορίζοντες. Η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους πριν την έναρξη του πειράματος ήταν η εξής: 82 g kg^{-1} περιεκτικότητα μεγέθους αργίλου, 619 g kg^{-1} περιεκτικότητα μεγέθους ιλύος και 299 g kg^{-1} περιεκτικότητα μεγέθους άμμου. Σύμφωνα με την παραπάνω σύσταση και το τρίγωνο της μηχανικής σύστασης (Σχ. 4.1), το έδαφος χαρακτηρίζεται ως **ιλυώδες-πηλώδες** στο άνω (0-60 cm) στρώμα. Το φαινόμενο ειδικό βάρος (ΦΕΒ) του εδάφους (bulk density, BD) ήταν 1380 kg m^{-3} . Το pH κατά την έναρξη του πειράματος ήταν 7,9 και η ηλεκτρική αγωγιμότητα $0,2 \text{ mS/cm}$. Η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε ολικό οργανικό άνθρακα (Total Organic Carbon, TOC) ήταν $28,2 \text{ g kg}^{-1}$, ενώ η αρχική συνολική περιεκτικότητα του εδάφους σε άζωτο (Total Nitrogen, TN), φώσφορο (Total Phosphorus, TP) και Κάλιο (Total Potassium, TK) ήταν $2,5 \text{ g kg}^{-1}$, $0,03 \text{ g kg}^{-1}$ και $0,45 \text{ g kg}^{-1}$ αντίστοιχα (Πίν. 4.1). Ο λόγος C/N ήταν 11,3 που φανερώνει επαρκή επίπεδα αζώτου για τις ανάγκες των μικροοργανισμών και συνεπώς έντονο ρυθμό αποδομήσεως οργανικής ουσίας.



Σχήμα 4.1. Εύρεση της υφής του εδάφους (ιλυο-πηλώδες) με τη χρήση του τριγώνου της μηχανικής σύστασης.

Πίνακας 4.1. Χημικές ιδιότητες του εδάφους και των οργανικών υποστρωμάτων.

Παράμετρος	Αρχικό Έδαφος	MSWC	M	Ριζοζιζάνια	ΚΥΑ 114218 /1997*	ΚΥΑ 291180/ 2002**	ΚΥΑ 56366/ 2014***
	M.O. (τυπικό σφάλμα)	M.O. (τυπικό σφάλμα)	M.O. (τυπικό σφάλμα)	M.O. (τυπικό σφάλμα)			
Υγρασία (%)	12.2 (0.3)	28.4 (5.3)	56.8 (3.8)	n.d.	6 - 8		
pH (in H ₂ O)	7.87 (0.1)	7.95 (0.03)	7.60 (0.02)	n.d.			
Ec (mS/cm)	0.2 (0.01)	14.9 (0.4)	15.2 (0.3)	n.d.			
TOC (g kg ⁻¹)	28.2 (2.1)	253 (16.9)	279 (15.6)	564.8 (12.9)			
N (g kg ⁻¹)	2.5 (0.1)	17.4 (3.5)	17.9 (2.6)	6.8 (0.3)			
C/N (g g ⁻¹)	11.3	14.6	15.7	83.1			
P (g kg ⁻¹)	0.03 (0.004)	1.5 (0.2)	7.0 (0.8)	0.9 (0.02)			
K (g kg ⁻¹)	0.45 (0.04)	15.5 (0.4)	14.2 (1.3)	19.1 (3.4)			
Ca (g kg ⁻¹)	63.7(18.5)	141.6 (3.3)	42.9 (2.6)	14.24 (2.3)			
Mg (g kg ⁻¹)	8.8 (1.4)	7.1 (0.4)	5.8 (0.4)	2.0 (0.5)			
Fe (g kg ⁻¹)	23.5 (4.5)	<DL	<DL	1.4 (0.4)			
Ba (g kg ⁻¹)	231.9 (63.4)	295.6 (12.4)	68.3 (6.9)	22.7 (3.7)			
Mn (mg kg ⁻¹)	503.7 (42.5)	202.6 (25.2)	457.7 (38.9)	95.4 (0.9)			
Zn (mg kg ⁻¹)	46.5 (3.1)	482.3 (13.6)	210.9 (10.8)	16.6 (1.9)	2000	750	1200
Cr (mg kg ⁻¹)	41.7 (4.9)	30.9 (10.3)	12.3 (2.9)	9.6 (1.4)	510	300	250
Cu (mg kg ⁻¹)	22.2 (4.0)	268.9 (27.3)	36.7 (2.1)	11.2 (1.2)	500	200	400
Ni (mg kg ⁻¹)	39.7 (1.8)	22.2 (0.8)	6.6 (0.2)	<DL	200	30	100
Pb (mg kg ⁻¹)	15.4 (2.0)	246.7 (8.8)	4.2 (0.3)	<DL	500	50	300
Cd (mg kg ⁻¹)	<DL	<DL	<DL	<DL	10	12	3
As (mg kg ⁻¹)	6.9 (1.3)	2.2 (0.4)	<DL	<DL	15	4	10
Hg (mg kg ⁻¹)	<DL	3.28 (0.8)	<DL	<DL	5	2	2.5

M.O.: Μέσος όρος, **Ec:** Ηλεκτρική αγωγιμότητα, **TOC:** Ολικός Οργανικός Άνθρακας, **N:** Άζωτο, **P:** Φώσφορος, **K:** Κάλιο, **Ca:** Ασβέστιο, **Mg:** Μαγνήσιο, **Fe:** Σίδηρος, **Ba:** Βάριο, **Mn:** Μαγγάνιο, **Zn:** Ψευδάργυρος, **Cr:** Χρώμιο, **Cu:** Χαλκός, **Ni:** Νικέλιο, **Pb:** Μόλυβδος, **Cd:** Κάδμιο, **“MSWC”:** Municipal Solid Waste Compost-Κόμποστ από αστικά στερεά απόβλητα, **“M”:** Manure-Κοπριά αιγοπροβάτων, **n.d.:** Δεν έχει μετρηθεί, **<DL:** μικτότερο του ορίου ανίχνευσης, *Ελάχιστα ποιοτικά χαρακτηριστικά από εγκαταστάσεις κομποστοποίησης, **Οριακές τιμές στοιχείων για τη χορήγηση αδειών κυκλοφορίας νέων τύπων λιπασμάτων, ***Καθορισμός οριακών τιμών κομπόστ τύπου Α (ΕΚΑ 19 05 03) για τις χρήσεις του άρθρου 4 της Υ.Α. οικ. 56366_4351_2014.

Τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Όλα τα δείγματα ήταν πλούσια σε πυρίτιο. Επίσης, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του ασβεστίου αυξάνονται με το βάθος.

Στην ορυκτολογική σύνθεση των δειγμάτων εδάφους κυριαρχεί ο χαλαζίας, σε συνδυασμό με την παρουσία Ασβεστίτη, Καολινίτη, Παραγωνίτη, Δολομίτη, και Μοσχοβίτη (Πίν. 4.3).

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

Πίνακας 4.2. Στοιχειακή ανάλυση δείγματος αρχικού εδάφους.

Βάθος (cm)	Na ₂ O (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Απώλεια πύρωσης (%)
0-10	2.2	1.5	0.8	4.8	0.5	0.1	3.6	5.4	65.2	0.8	15.1
10-30	0	1.9	0.9	4.7	0.5	0.1	4.2	6.5	68.4	0.7	12.2
30-50	0	2.2	1.1	7.4	0.5	0.1	4.4	6.8	60.8	0.8	15.9
50-70	0	2.4	0.9	10.9	0.5	0.1	3.5	5.8	55.5	0.9	19.4

Πίνακας 4.3. Ορυκτολογική σύνθεση εδάφους

Ορυκτά	Σύσταση (%)
Χαλαζίας	59.4
Ασβεστίτης	10.5
Καολινίτης	7.9
Δολομίτης	7.1
Παραγωνίτης	7
Μοσχοβίτης	6.9
Αλβίτης	0.6
Ορθόκλαστα	0.5

4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφοβελτιωτικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Τα δύο υλικά εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες όσον αφορά το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την περιεκτικότητά τους σε οργανικό άνθρακα, άζωτο και κάλιο. Το pH των οργανικών λιπασμάτων θα πρέπει να είναι ουδέτερο έως ελαφρώς όξινο (6,05-7,5) για να αποφεύγεται η αεριοποίηση της αμμωνίας και η έκλυση δυσάρεστων οσμών (Moldes et al. 2007). Το pH του κόμποστ του πειράματος ήταν 7,95 και της κοπριάς 7,6, με τα δύο οργανικά εδαφοβελτιωτικά να χαρακτηρίζονται ως ελαφρώς αλκαλικά. Η τιμή του pH του κόμποστ είναι υψηλότερη της κοπριάς λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων κατιόντων ασβεστίου που υπάρχουν στο κόμποστ. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του “MSWC” και της “M” ήταν 14,9 και 15,2 mS/cm, αντίστοιχα, τιμές που θεωρούνται υψηλές σε σχέση με τις τιμές που παρουσιάζονται σε άλλες επιστημονικές εργασίες (Lasaridi et.al.,2006; Moldes et al., 2007; Papafilippaki et.al.,2016, Manios, 2003). Οι υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλονται προφανώς στον υψηλό βαθμό αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας, που οδηγεί στη συσσώρευση αλάτων (Manios, 2003). Η περιεκτικότητα του “MSWC” σε οργανικό άνθρακα και άζωτο ήταν 253 g C/kg και 17,4 g N/kg, αντίστοιχα, και οι αντίστοιχες τιμές για την “M” ήταν 279 g C/kg και 17,9 g N/kg. Ωστόσο, η “M” παρουσιάζει υψηλότερη συγκέντρωση σε φώσφορο σε σύγκριση με το “MSWC”, παράγοντας σημαντικός για την ανάπτυξη της τομάτας που έχει υψηλές απαιτήσεις σε φώσφορο.

Η αναλογία της συγκέντρωσης C προς τη συγκέντρωση N (λόγος C : N) στο κόμποστ και στην κοπριά, χρησιμοποιείται συχνά ως δείκτης της ποιότητας των οργανικών αυτών υλικών, επειδή οργανική ουσία με χαμηλό λόγο C : N (χαμηλή συγκέντρωση αζώτου) γενικά αποδομείται γρήγορα (Enríquez et al. 1993, Gholz et al. 2000). Τα οργανικά λιπάσματα με υψηλές συγκεντρώσεις N και χαμηλούς λόγους C:N, ανοργανοποιούν σημαντικές ποσότητες N για την ικανοποίηση των αναγκών ανάπτυξης των φυτών (Cordovil et al., 2005 and Seneviratne, 2000). Αντίθετα, το N μπορεί να ακινητοποιηθεί στα οργανικά υποστρώματα σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Στο συγκεκριμένο πείραμα, ο λόγος C : N του “MSWC” και της “M” ήταν 14,6 και 15,7, αντίστοιχα, που υποδηλώνει ότι τα υλικά αυτά έχουν ωριμάσει επαρκώς (Moldes et al., 2007, Κουκουλάκης, Σιμώνης, Γκέρτζης). Οι τιμές αυτές, επίσης, θεωρούνται ικανοποιητικές εξασφαλίζοντας το απαραίτητο διαθέσιμο για τα φυτά άζωτο. Η κρίσιμη αναλογία C : N πάνω από την οποία δεν υπάρχει απελευθέρωση αζώτου από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης θεωρείται η τιμή 25 : 1 (βλ. κεφ. 2.1.4).

Οι προδιαγραφές ποιότητας του κόμποστ ποικίλουν ευρύτατα από κράτος σε κράτος και ο γενικός στόχος είναι η προστασία του εδάφους, ειδικά των γεωργικών εδαφών, κυρίως από βαρέα μέταλλα. Κατά τη λειτουργία του εργοστασίου κομποστοποίησης της ΔΕΔΙΣΑ παράγεται υψηλής ποιότητας κόμποστ, με τις τιμές συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων να είναι κάτω από τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια (Πίν. 4.1).

4.3 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΒΡΟΧΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

Τα δεδομένα διαχείρισης άρδευσης (η εφαρμοζόμενη δοσολογία άρδευσης σε όλες τις μεταχειρίσεις σε μηνιαία βάση) παρέχονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Πρόγραμμα άρδευσης στη διάρκεια των τεσσάρων ετών (2011-2014).

2011		2012		2013		2014	
μήνας	νερό* (mm)	μήνας	νερό (mm)	μήνας	νερό (mm)	μήνας	νερό (mm)
		Μάιος-12	97.5	Μάιος-13	166.7	Μάιος-14	146.4
		Ιουν-12	136	Ιουν-13	429.7	Ιουν-14	403.6
		Ιουλ-12	230.8	Ιουλ-13	484.4	Ιουλ-14	622.4
Αυγ-11	578.1	Αυγ-12	299.5	Αυγ-13	494.8	Αυγ-14	588.5
Σεπ-11	395.8	Σεπ-12	218.8	Σεπ-13	382.8	Σεπ-14	57.3
Οκτ-11	15.6	Οκτ-12	46.9				
sum	989.6		1029		1958		1818

*Υπόγειο νερό που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση των φυτών

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αρδευτικού και βρόχινου νερού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5. Χημικός χαρακτηρισμός του αρδευτικού και του βρόχινου νερού. Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών.

	Αρδευτικό νερό	Βρόχινο νερό
	M.O.	M.O.
	(τυπικό σφάλμα)	(τυπικό σφάλμα)
pH	7.3 (0.3)	6.5 (1.1)
Ec (μS/cm)	952 (43)	42.6 (12.8)
DOC (mg L ⁻¹)	7.8 (2.3)	6.7 (0.5)
DON (mg L ⁻¹)	3.6 (1.2)	2.2 (1.5)
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	71.4 (12.3)	5.3 (0.2)
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	0.44 (0.03)	0.49 (0.06)
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	0.12 (0.06)	0.02 (0.001)
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	46.9 (0.5)	1.7 (0.8)
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	97.7 (5.9)	4.1 (1.2)
HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	257.4 (16.6)	11.3 (0.9)
CaCO ₃ (mg L ⁻¹)	160.2 (16.3)	<DL
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	16.9 (10.5)	0.4 (0.2)
K ⁺ (mg L ⁻¹)	2.2 (1.1)	2.4 (1.6)
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	141.9 (9.5)	1.7 (0.3)
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	17.2 (1.5)	0.43 (0.06)
SAR	1.34	0.27
Al ³⁺ (μg L ⁻¹)	1.3 (0.2)	4.1 (3.5)
B ³⁺ (μg L ⁻¹)	30.1 (13.5)	120.0 (36.2)
Fe ³⁺ (μg L ⁻¹)	11.7 (6.8)	21.3 (11.2)
Ba ²⁺ (μg L ⁻¹)	187.7 (50.0)	65.3 (18.1)
Mn ²⁺ (μg L ⁻¹)	4.1 (1.6)	2.9 (2.0)
Zn ²⁺ (μg L ⁻¹)	16.7 (4.1)	27.2 (12.8)
Cr ³⁺ (μg L ⁻¹)	0.9 (0.2)	<DL
Cu ²⁺ (μg L ⁻¹)	<DL	<DL
Ni ²⁺ (μg L ⁻¹)	0.02 (0.01)	<DL
Pb ²⁺ (μg L ⁻¹)	<DL	<DL
Cd ²⁺ (μg L ⁻¹)	<DL	<DL
As ³⁺ (μg L ⁻¹)	0.2 (0.01)	<DL
Hg ²⁺ (μg L ⁻¹)	<DL	<DL

M.O.: Μέσος όρος, **Ec:** Ηλεκτρική αγωγιμότητα, **DOC:** Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας, **DON:** Διαλυμένο Οργανικό Άζωτο, **NO₃⁻:** Νιτρικά ιόντα, **NH₄⁺:** Αμμωνιακά ιόντα, **PO₄³⁻:** Φώσφορικά ιόντα, **SO₄²⁻:** Θειικά ιόντα, **Cl⁻:** Χλωρίδια, **HCO₃⁻:** Όξινα ανθρακικά ιόντα, **CaCO₃:** Ανθρακικά άλατα, **Na⁺:** Ιόντα Νατρίου, **K⁺:** Ιόντα Καλίου, **Ca²⁺:** Ιόντα Ασβεστίου, **Mg²⁺:** Ιόντα Μαγνησίου, **Al³⁺:** Ιόντα Αργιλίου, **B³⁺:** Ιόντα Βορίου, **Fe³⁺:** Ιόντα Σιδήρου, **Ba²⁺:** Ιόντα Βαρίου, **Mn²⁺:** Ιόντα Μαγγανίου, **Zn²⁺:** Ιόντα Ψευδαργύρου, **Cr³⁺:** Ιόντα Χρωμίου, **Cu²⁺:** Ιόντα Χαλκού, **Ni²⁺:** Ιόντα Νικελίου, **Pb²⁺:** Ιόντα Μολύβδου, **Cd²⁺:** Ιόντα Καδμίου, **As³⁺:** Ιόντα Αρσενικού, **Hg²⁺:** Ιόντα Υδραργύρου, **n.d.:** Δεν έχει μετρηθεί, **<DL:** μικρότερο του ορίου ανίχνευσης,

Έλεγχος αξιοπιστίας αναλύσεων αρδευτικού νερού

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αναλύσεων του αρδευτικού νερού υπολογίζουμε το *σφάλμα ισοζυγίου ιόντων*, δηλαδή το λόγο της διαφοράς του αθροίσματος των ανιόντων από το άθροισμα των κατιόντων προς τα συνολικά ιόντα, εκφρασμένο επί της εκατό.

$$\text{Σφάλμα ισοζυγίου ιόντων} = \frac{\sum_{\text{κατιόντων}} - \sum_{\text{ανιόντων}}}{\sum_{\text{κατιόντων}} + \sum_{\text{ανιόντων}}} \times 100$$

Για να θεωρούνται αξιόπιστες οι αναλύσεις θα πρέπει η τιμή του σφάλματος ισοζυγίου ιόντων να είναι μεγαλύτερη του 5%.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 4.6) γίνεται ο υπολογισμός του αθροίσματος των χιλιοστογραμμοϊσοδύναμων ανά λίτρο των ανιόντων και του αθροίσματος των χιλιοστογραμμοϊσοδύναμων ανά λίτρο των κατιόντων του αρδευτικού νερού.

Πίνακας 4.6. Υπολογισμός αθροίσματος κατιόντων και ανιόντων στο αρδευτικό νερό

Ιόν	Συγκέντρωση (mg/L)	Τυπικό Βάρος	n	Ισοδύναμο Βάρος (mg/mgΙΣ)	mgΙΣ/L
Ca ²⁺	141.9	40.08	2	20.04	7.08
Mg ²⁺	17.2	24.3	2	12.15	1.42
Na ⁺	16.9	22.99	1	22.99	0.74
K ⁺	2.2	39.1	1	39.1	0.06
NH ₄ ⁺	0.44	18	1	18	0.02
Άθροισμα κατιόντων					9.31
HCO ₃ ⁻	257.4	61.02	1	61.02	4.22
SO ₄ ²⁻	46.9	96.07	2	48.04	0.98
Cl ⁻	97.7	35.45	1	35.45	2.76
NO ₃ ⁻	71.4	62	1	62	1.15
Άθροισμα ανιόντων					9.1

g/ΙΣ: γραμμοϊσοδύναμο, n: σταθερά Loschmidt που είναι 6.022×10^{23} σωματίδια ανά γραμμοϊσοδύναμο.

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο για τον έλεγχο του ισοζυγίου κατιόντων και ανιόντων, έχουμε: $((9.31-9.10)/(9.31+9.10)) \times 100 = 1.1\%$, οπότε τα αποτελέσματα κρίνονται αξιόπιστα.

Προβλήματα που σχετίζονται με αρδευόμενες καλλιέργειες και έλεγχος καταλληλότητας αρδευτικού νερού

Κίνδυνοι για τις καλλιέργειες μπορεί να προέρχονται από υψηλή αλατότητα του νερού, τοξικές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο νερό άρδευσης, μειωμένη διηθητική ικανότητα του εδάφους, που οφείλεται συνήθως σε υψηλές συγκεντρώσεις νατρίου στο νερό άρδευσης και ακραίες τιμές pH.

Η τιμή του pH του νερού αξιολογείται ανάλογα με το έδαφος και την καλλιέργεια, διότι μπορεί να προκαλέσει θρεπτικές ανισορροπίες στα φυτά, ωστόσο οι επιπτώσεις του pH του νερού στο pH του εδάφους είναι γενικά μικρές, επειδή το έδαφος έχει μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα. Σύμφωνα με τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 5, το pH στο αρδευτικό νερό βρίσκεται μεταξύ 7.0 και 7.6, τιμές που θεωρούνται απόλυτα φυσιολογικές για την ομαλή ανάπτυξη των φυτών.

Τα άλατα στο έδαφος μειώνουν τη διαθεσιμότητα του ύδατος στην καλλιέργεια σε τέτοιο βαθμό ώστε να επηρεάζεται η απόδοση. Στις αρδευόμενες περιοχές, τα άλατα συχνά προέρχονται από υψηλής αλατότητας εφαρμοζόμενο νερό, με υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι μειώσεις της απόδοσης εμφανίζονται όταν τα άλατα συσσωρεύονται στη ζώνη της ρίζας σε τέτοιο βαθμό ώστε η καλλιέργεια δεν είναι πλέον σε θέση να αντλήσει επαρκές νερό από το διάλυμα του εδάφους (αύξηση ωσμωτικής πίεσης του εδαφικού διαλύματος), με αποτέλεσμα να υπάρχει υδατική καταπόνηση για σημαντικό χρονικό διάστημα. Εάν η πρόσληψη νερού μειώνεται αισθητά, το φυτό επιβραδύνει τον ρυθμό ανάπτυξής του. (Ayers & Westcot 1985)

Επίσης, υψηλές συγκεντρώσεις νατρίου στο αρδευτικό νερό, σε σχέση με χαμηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου και μαγνησίου μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση του pH (αλκαλίωση) και σε διασπορά της αργίλου, με επακόλουθη τη μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους. Τα επιφανειακά συσσωματώματα του εδάφους διασκορπίζονται σε πολύ μικρότερα σωματίδια τα οποία φράζουν τους πόρους του εδάφους δημιουργώντας μία κρούστα στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα την κακή στράγγιση και τον μειωμένο αερισμό του εδάφους. Ωστόσο, το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να προκληθεί και σε περιπτώσεις άρδευσης με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε αλάτι σε εδάφη με πολύ μικρές συγκεντρώσεις σε ασβέστιο. Στην περίπτωση αυτή, το νερό ξεπλένει από το επιφανειακό έδαφος τα περισσότερα από τα διαλυτά μέταλλα, συμπεριλαμβανομένου του ασβεστίου, στοιχείου απαραίτητο για τη διατήρηση της δομής του εδάφους.

Οι πιο χρησιμοποιούμενες μετρήσεις για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού άρδευσης σε σχέση με πιθανά προβλήματα του νερού στο έδαφος είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού (EC_w) και το ποσοστό προσρόφησης του Νατρίου (SAR, Sodium Absorption Ratio). Το SAR είναι ένας δείκτης της συγκέντρωσης του νατρίου στο νερό σε σχέση με τις συγκεντρώσεις του ασβεστίου και μαγνησίου. Η τιμή του Ο λόγος προσρόφησης νατρίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SAR = \frac{[Na]^+}{\sqrt{\frac{[Mg]^{+2} + [Ca]^{+2}}{2}}}$$

όπου $[Na]^+$: Συγκέντρωση ιόντων Νατρίου (meq/L)

όπου $[Mg]^{+2}$: Συγκέντρωση ιόντων Μαγνησίου (meq/L)

όπου $[Ca]^{+2}$: Συγκέντρωση ιόντων Ασβεστίου (meq/L)

Όσο υψηλότερη είναι η αναλογία νατρίου ως προς το ασβέστιο και το μαγνήσιο, τόσο υψηλότερο είναι το SAR. Με τις παραπάνω δυο παραμέτρους (EC_w και SAR) γίνεται η ποιοτική ταξινόμηση του νερού άρδευσης σύμφωνα με το σύστημα του Αμερικανικού Υπουργείου Γεωργίας (USDA Salinity Laboratory). Η μέθοδος αυτή δίνει: α) Τέσσερις κατηγορίες του κινδύνου νατρίωσης ή της SAR, ήτοι: Χαμηλός (S1), Μέσος (S2), Υψηλός (S3) και πολύ υψηλός (S4), και β) Τέσσερις κατηγορίες αλατότητας-αγωγιμότητας, ήτοι: Χαμηλή (C1), Μέση (C2), Υψηλή (C3) και Πολύ Υψηλή (C4). Ο συνδυασμός των ανωτέρω μας δίνει 4x4=16 κλάσεις καταλληλότητας νερού άρδευσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5, το αρδευτικό νερό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα κατατάσσεται στην Κατηγορία C3-S1, δηλαδή νερό υψηλής αγωγιμότητας (αλατότητας) με χαμηλή περιεκτικότητα νατρίου. Το νερό αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση σε εδάφη με καλή στράγγιση και για ημιανθεκτικές σε άλατα καλλιέργειες. Στην περίπτωση του πειραματικού αγρού αφενός το έδαφος παρουσιάζει καλή στράγγιση και έκπλυση και αφετέρου η τομάτα αντέχει σε υψηλό ποσοστό αλάτων νερού (μέχρι 2.5–5 dS/cm).

Προβλήματα τοξικότητας στα φυτά εμφανίζονται, επίσης, όταν ορισμένα συστατικά (ιόντα νατρίου, χλωρίου ή βορίου) στο έδαφος ή το νερό απορροφούνται από το φυτό και συσσωρεύονται σε συγκεντρώσεις αρκετά υψηλές ώστε να προκαλούν ζημιές στις καλλιέργειες ή μειωμένες αποδόσεις. Ο βαθμός βλάβης εξαρτάται από την ευαισθησία της κάθε καλλιέργεια. Τα ιόντα απορροφούνται από τις ρίζες και μεταφέρονται στα φύλλα όπου συσσωρεύονται κατά τη διάρκεια της διαπνοής. Τα ιόντα συσσωρεύονται κυρίως στις περιοχές όπου η απώλεια νερού είναι μεγαλύτερη, συνήθως στις άκρες των φύλλων. Καθώς οι συγκεντρώσεις αυξάνονται λόγω του εφαρμοζόμενου νερού, η βλάβη αναπτύσσεται ταχύτερα και γίνεται σταδιακά πιο σοβαρή. Στην περίπτωση του νερού άρδευσης του πειράματος, οι συγκεντρώσεις των προαναφερόμενων ιόντων ήταν σε χαμηλά έως μέτρια επίπεδα.

Συμπερασματικά, λοιπόν, το υπόγειο νερό που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση της καλλιέργειας της τομάτας, κρίθηκε κατάλληλο, χωρίς να επηρεάζει το βαθμό ανάπτυξης των φυτών και τη σταθερότητα της δομής του εδάφους.

4.4 ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι τιμές της περιεχόμενης υγρασίας των εδαφών την περίοδο που έλαβαν χώρα οι δειγματοληψίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7. Περιεχόμενη υγρασία δειγμάτων κατά τις δειγματοληψίες. Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών.

Βάθος εδάφους (εκ.)	Μεταχειρίσεις	10/8/2011	24/11/2011	28/5/2012	27/6/2012	31/7/2012	8/10/2012	22/4/2013	24/5/2013	10/7/2013	23/9/2013	18/6/2014	9/10/2014
0-15	IF	24.2 (0.4)	25.3 (1.2)	22.3 (0.8)	17.2 (0.5)	23.1 (0.5)	19.6 (0.6)	11.6 (0.5)	13.9 (1.6)	18.8 (0.4)	20.8 (0.6)	15.0 (1.0)	19.1 (0.2)
	MSWC	24.5 (0.4)	25.9 (1.3)	20.5 (0.9)	18.1 (0.6)	22.0 (1.1)	19.9 (1.2)	12.5 (0.4)	9.4 (1.2)	19.3 (1.0)	20.0 (0.8)	15.1 (0.3)	21.7 (0.5)
	M	24.5 (0.5)	26.8 (0.9)	24.1 (0.4)	18.8 (0.7)	24.3 (1.3)	21.8 (1.5)	13.2 (0.4)	8.2 (1.0)	19.4 (2.4)	21.8 (0.8)	18.9 (0.2)	20.9 (0.7)
	MSWC+M	22.7 (1.0)	24.5 (0.5)	21.8 (0.3)	17.0 (0.7)	21.8 (0.9)	17.6 (1.1)	13.9 (0.0)	10.2 (0.6)	20.1 (0.6)	20.3 (0.6)	15.3 (0.5)	21.8 (0.9)
15-30	IF	24.3 (1.0)	24.4 (0.6)	21.5 (1.8)	19.6 (0.9)	24.6 (1.4)	21.8 (0.7)	13.7 (0.8)	13.1 (1.6)	19.3 (0.2)	20.9 (0.1)	13.9 (1.2)	17.1 (0.1)
	MSWC	22.9 (0.6)	23.8 (0.9)	20.1 (0.2)	18.9 (0.6)	23.1 (1.0)	20.4 (0.3)	14.0 (0.8)	10.9 (0.4)	19.8 (0.6)	18.7 (0.4)	13.5 (0.9)	17.7 (0.2)
	M	24.2 (0.4)	25.8 (0.7)	23.2 (0.7)	19.7 (0.8)	23.3 (1.3)	23.1 (1.1)	15.4 (0.2)	9.4 (1.0)	20.6 (1.1)	20.4 (1.1)	18.5 (0.6)	17.3 (0.9)
	MSWC+M	24.8 (0.9)	25.6 (0.4)	21.7 (0.3)	18.3 (1.3)	22.9 (0.6)	20.4 (0.6)	15.5 (0.3)	12.4 (0.6)	20.2 (0.4)	20.2 (0.7)	19.1 (1.1)	18.8 (0.6)
30-50	IF	25.2 (0.5)	24.6 (1.3)										
	MSWC	26.6 (0.4)	24.2 (2.2)										
	M	26.0 (0.5)	24.3 (0.6)										
	MSWC+M	24.9 (1.3)	23.3 (0.4)										

“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.

4.5 ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ C, N, P ΚΑΙ K ΣΤΟ ΈΔΑΦΟΣ

Οι συνολικές ποσότητες οργανικού άνθρακα (ανόργανα λιπάσματα, εδαφοβελτιωτικά, υπολείμματα καλλιέργειας και εποχιακά ζιζανία) που προστέθηκαν στο έδαφος του πειραματικού αγρού από τις διάφορες καλλιεργητικές φροντίδες, που εφαρμόστηκαν την περίοδο 2011-2014, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8. Οι αντίστοιχες ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων N, P, K παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9. Συνολικά τα 4 έτη προστέθηκαν:

- 12,4 t TOC·ha⁻¹, 2,3 t TN·ha⁻¹, 0,3 t TP·ha⁻¹ και 1,5 t TK·ha⁻¹ στη “IF” μεταχείριση,
- 59,0 t TOC·ha⁻¹, 4,8 t TN·ha⁻¹, 0,4 t TP·ha⁻¹ και 3,9 t TK·ha⁻¹ στη “MSWC”,
- 63,0 t TOC·ha⁻¹, 4,8 t TN·ha⁻¹, 1,3 t TP·ha⁻¹ και 3,6 t TK·ha⁻¹ στη “M” και
- 61,9 t TOC·ha⁻¹, 4,9 t TN·ha⁻¹, 0,7 t TP·ha⁻¹ και 4,0 t TK·ha⁻¹ στη “MSWC+M”.

Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ότι σε σύγκριση με τη “IF” μεταχείριση, στις μεταχειρίσεις με τα οργανικά λιπάσματα προστέθηκε 5,5 φορές περίπου περισσότερος OC, 2 φορές περίπου περισσότερο N και 2,5 - 3 φορές περίπου περισσότερο K. Οι ποσότητες φωσφόρου που ενσωματώθηκαν στο έδαφος ποικίλουν ανάμεσα στις μεταχειρίσεις, με τις μεγαλύτερες ποσότητες να εμφανίζουν εκείνες που περιείχαν κοπριά, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του συγκεκριμένου υλικού σε φώσφορο (7,0 g kg⁻¹, πίνακας 4.1). Συγκεκριμένα, στις “M” και “MSWC+M” μεταχειρίσεις προστέθηκαν 5 και 2,5 φορές αντίστοιχα περισσότερος P τα έτη 2012-2014, σε σύγκριση με τη συμβατική λίπανση (IF), αλλά και 4,5 και 2 φορές αντίστοιχα περισσότερος P σε σύγκριση με τη “MSWC” μεταχείριση.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 3.3, στο πρώτο έτος (2011) εφαρμόστηκαν μικρότερες ποσότητες λιπασμάτων σε σχέση με τα επόμενα έτη. Το πείραμα ξεκίνησε στα μέσα Ιουλίου (20-07-2011) με την προσθήκη των οργανικών λιπασμάτων και την μηχανική κατεργασία του εδάφους όλων των μεταχειρίσεων. Πριν την προσθήκη των οργανικών λιπασμάτων δεν υπάρχουν δεδομένα για τις ποσότητες αυτοφυούς βλάστησης που ενσωματώθηκαν στο έδαφος.

Πίνακας 4.8. Εισερχόμενες ποσότητες συνολικού οργανικού άνθρακα (t TOC·ha⁻¹) στο έδαφος. “IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.

	Πηγή	IF	MSWC	M	MSWC+M
2011	Κόμποστ ΑΣΑ	–	8.2	–	5.7
	Κοπριά	–	–	6.4	1.9
	Άθροισμα	0	8.2	6.4	7.6
2012	Κόμποστ ΑΣΑ	–	13.2	–	9.2
	Κοπριά	–	–	14.5	4.3
	Υπολειμματική καλλιέργεια*	0.8	0.9	1.1	1.1
	Ριζοζιζάνια*	2.5	1.8	2.6	2.7
	Ρίζες και ριζικά τριχίδια**	3.0	3.0	3.0	3.0
	Άθροισμα	6.3	18.9	21.2	20.3
2013	Κόμποστ ΑΣΑ	–	13.2	–	9.2
	Κοπριά	–	–	14.5	4.3
	Υπολειμματική καλλιέργεια*	2.2	2.0	2.2	2.4
	Ριζοζιζάνια*	1.8	1.5	2.3	2.5
	Ρίζες και ριζικά τριχίδια**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Άθροισμα	4.0	16.7	19.0	18.4
2014	Κόμποστ ΑΣΑ	–	13.2	–	9.2
	Κοπριά	–	–	14.5	4.3
	Υπολειμματική καλλιέργεια*	2.1	2.0	1.9	2.1
	Ριζοζιζάνια*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Ρίζες και ριζικά τριχίδια**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Άθροισμα	1.7	14.8	15.9	15.1
2011-2014	Συνολικά	12.4	59.0	63.0	61.9

* υπέργεια βιομάζα

** υπόγεια φυτική βιομάζα από την υπολειμματική καλλιέργεια και τα ριζοζιζάνια, μετρημένη στη “IF” μεταχείριση

n.d.: δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα

Πίνακας 4.9. Εισερχόμενες ποσότητες ολικού αζώτου ($\text{kgTN}\cdot\text{ha}^{-1}$), φωσφόρου ($\text{kgTP}\cdot\text{ha}^{-1}$) και καλίου ($\text{kgTK}\cdot\text{ha}^{-1}$) στο έδαφος. “IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.

	Πηγή	N				P				K			
		IF	MSWC	M	MSWC+M	IF	MSWC	M	MSWC+M	IF	MSWC	M	MSWC+M
2011	Ανόργανη Λίπανση	37	–	–	–	8	–	–	–	16	–	–	–
	Κόμποστ ΑΣΑ	–	607	–	425	–	53	–	37	–	542	–	380
	Κοπριά	–	–	384	115	–	–	150	45	–	–	304	91
	Άρδευση+Βροχή	199	199	199	199	0.2	0.2	0.2	0.2	31	31	31	31
	Άθροισμα	237	806	583	739	9	24	150	62	47	573	335	502
2012	Ανόργανη Λίπανση	204	–	–	–	68	–	–	–	131	–	–	–
	Κόμποστ ΑΣΑ	–	868	–	607	–	76	–	53	–	775	–	542
	Κοπριά	–	–	893	268	–	–	349	105	–	–	708	212
	Υπολειμματική καλλιέργεια*	42	57	70	66	29	14	34	36	97	96	120	120
	Ριζοζιζάνια*	66	43	72	71	4.0	2.6	4.1	4.3	87	57	93	94
	Ρίζες και ριζικά τριχίδια**	63	63	63	63	28	28	28	28	161	161	161	161
	Άρδευση+Βροχή	220	220	220	220	0.3	0.3	0.3	0.3	34	34	34	34
	Άθροισμα	595	1251	1318	1295	130	80	416	197	510	1123	1116	1163
2013	Ανόργανη Λίπανση	201	–	–	–	67	–	–	–	130	–	–	–
	Κόμποστ ΑΣΑ	–	868	–	607	–	76	–	53	–	775	–	542
	Κοπριά	–	–	893	268	–	–	349	105	–	–	708	212
	Υπολειμματική καλλιέργεια*	162	167	223	191	32	31	36	29	321	336	392	412
	Ριζοζιζάνια*	45	39	58	65	2.7	2.4	3.5	4.0	59	52	76	86
	Ρίζες και ριζικά τριχίδια**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Άρδευση+Βροχή	347	347	347	347	0.4	0.4	0.4	0.4	58	58	58	58
	Άθροισμα	755	1421	1521	1478	102	68	388	162	567	1220	1234	1310
2014	Ανόργανη Λίπανση	204	–	–	–	68	–	–	–	131	–	–	–
	Κόμποστ ΑΣΑ	–	868	–	607	–	76	–	53	–	775	–	542
	Κοπριά	–	–	893	268	–	–	349	105	–	–	708	212
	Υπολειμματική καλλιέργεια*	139	146	143	150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	164	177	192	188
	Ριζοζιζάνια*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Ρίζες και ριζικά τριχίδια**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Άρδευση+Βροχή	331	331	331	331	0.4	0.4	0.4	0.4	54	54	54	54
	Άθροισμα	674	1345	1367	1356	69	35	349	129	350	1007	954	997
2011-2014	Συνολικά	2261	4824	4789	4869	310	207	1303	534	1474	3923	3640	3972

*υπέργεια βιομάζα, **υπόγεια φυτική βιομάζα από την υπολειμματική καλλιέργεια και τα ριζοζιζάνια μετρημένη στη “IF” μεταχείριση, n.d.: δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

4.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΧΗΜΙΚΕΣ-ΒΙΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας μπορεί να επηρεάσει τη βιοχημική δυναμική του εδάφους μεταβάλλοντας τη χρονική και χωρική κατανομή των διαθέσιμων υποστρωμάτων C που προέρχονται από τη ριζοεναπόθεση (rhizodeposition) και τη βιομάζα της ρίζας της καλλιέργειας. Η ριζική απόθεση του C μπορεί να είναι διπλάσια από την ποσότητα του C που περιέχεται στις μακρόριζες, και αυτό αντιπροσωπεύει μια σημαντική μεταφορά ενέργειας από τα φυτά στους μικροοργανισμούς του εδάφους (Gregory 2006). Έτσι, η αύξηση της μικροβιακής βιομάζας κατά την ταχεία ανάπτυξη των καλλιεργειών μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της εισροής C από τη ριζόσφαιρα στο έδαφος (Liang et al. 2011).

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές σημαντικότητας από την ανάλυση διακύμανσης δύο παραγόντων (μεταχείρισης και σταδίου ανάπτυξης καλλιέργειας) για κάθε έτος (2011-2014) και βάθος (0-15, 15-30, 30-50 εκ.). Το είδος της λίπανσης επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τον εδαφικό οργανικό άνθρακα και ολικό άζωτο, τη σωματιδιακή οργανική ύλη, τα διαθέσιμα για τα φυτά στοιχεία του αζώτου και του φωσφόρου (νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά ανιόντα), καθώς επίσης και τους εδαφικούς δείκτες DON, DOC:DON και SUVA280. Το στάδιο ανάπτυξης του φυτού επηρεάζει τα περισσότερα στοιχεία του εδάφους εκτός από τον οργανικό άνθρακα και το δυνητικά ανοργανοποιήσιμο άζωτο. Γενικά, ο ολικός οργανικός άνθρακας διαφοροποιήθηκε σημαντικά περισσότερο λόγω του είδους της μεταχείρισης που εφαρμόστηκε και λιγότερο από την επίδραση του σταδίου ανάπτυξης των φυτών.

Στα 2 πρώτα έτη, σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ μεταχείρισης και σταδίου ανάπτυξης παρουσιάζεται στο pH, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και στην αναλογία διαλυτού οργανικού άνθρακα προς οργανικό άζωτο (πρώτο έτος), ενώ στα επόμενα 2 έτη υπήρχε σημαντική αλληλεπίδραση στα θρεπτικά συστατικά του εδάφους, όπως επίσης και στην Ec.

Πίνακας 4.10. Επισκόπηση τιμών στατιστικής σημαντικότητας (p-values) από την ανάλυση διακύμανσης κατά δύο παράγοντες (two-way ANOVA) δείχνοντας την επίδραση της μεταχείρισης (ανόργανη λίπανση, κόμποστ, κοπριά και μίγμα 70% κόμποστ και 30% κοπριά) και του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας στις χημικές-βιοχημικές ιδιότητες του εδάφους σε βάθος 0–15, 15–30 και 30–50 εκ., για κάθε έτος ξεχωριστά. Με έντονα γράμματα σημειώνονται οι τιμές όπου $p < 0,05$.

	Ιδιότητα εδάφους	Μεταχείριση			Στάδιο ανάπτυξης καλλιέργειας τομάτας			Μεταχείριση x Στάδιο ανάπτυξης		
		0 – 15 εκ	15 – 30 εκ	30 – 50 εκ	0–15 εκ	15 – 30 εκ	30 – 50 εκ	0–15 εκ	15 – 30 εκ	30 – 50 εκ
2011	pH	0.362	0.054	0.214	<0.001	<0.001	<0.001	0.008	0.299	0.051
	Ec	0.012	0.158	0.183	<0.001	<0.001	<0.001	0.025	0.294	0.303
	TOC	0.065	0.014	0.246	0.361	0.848	<0.001	0.993	0.593	0.798
	TN	0.125	0.076	0.866	<0.001	0.892	0.146	0.529	0.502	0.121
	TOC/TN	0.007	<0.001	0.325	0.003	0.187	<0.001	0.861	0.096	0.140
	POM-C	0.184	-	-	0.210	-	-	0.597	-	-
	POM-N	0.080	-	-	0.393	-	-	0.656	-	-
	ESOC	0.154	0.354	0.708	<0.001	<0.001	<0.001	0.428	0.298	0.660
	ESON	0.010	0.889	0.225	<0.001	<0.001	<0.001	0.203	0.043	0.619
	ESOC/ESON	<0.001	0.143	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.012	<0.001
	NH ₄ ⁺ -N	0.249	-	-	0.027	-	-	0.479	-	-
	NO ₃ ⁻ -N	0.522	-	-	<0.001	-	-	0.217	-	-
	PSOC	0.900	0.063	0.019	<0.001	0.090	0.812	0.504	0.188	0.892
	PSON	0.194	0.354	0.420	0.110	<0.001	0.587	0.903	0.933	0.137
	PMN	0.265	0.277	0.881	0.867	0.173	0.008	0.972	0.241	0.379
	SUVA 280	<0.001	0.090	0.108	<0.001	0.013	<0.001	0.136	0.453	0.272
2012	pH	0.105	<0.001	-	<0.001	<0.001	-	0.074	<0.001	-
	Ec	<0.001	<0.001	-	<0.001	0.088	-	0.003	0.058	-
	TOC	<0.001	<0.001	-	0.523	0.188	-	0.933	0.040	-
	TN	<0.001	0.186	-	<0.001	<0.001	-	0.232	0.478	-
	TOC/TN	0.089	0.002	-	<0.001	<0.001	-	0.096	0.186	-
	NH ₄ ⁺ -N	0.009	0.184	-	<0.001	<0.001	-	0.687	0.123	-
	NO ₃ ⁻ -N	<0.001	<0.001	-	<0.001	0.041	-	0.079	0.947	-
	PNR	0.256	0.761	-	0.124	<0.001	-	0.721	0.868	-
	Olsen-P	<0.001	<0.001	-	0.011	0.010	-	0.295	0.417	-
2013	pH	0.539	0.551	-	<0.001	<0.001	-	0.941	0.639	-
	Ec	<0.001	<0.001	-	<0.001	<0.001	-	0.038	0.024	-
	TOC	<0.001	<0.001	-	0.003	<0.001	-	0.582	0.236	-
	TN	<0.001	<0.001	-	0.002	<0.001	-	0.079	0.023	-
	TOC/TN	0.227	0.698	-	<0.001	<0.001	-	0.067	0.091	-
	POM-C	<0.001	-	-	-	-	-	-	-	-
	POM-N	<0.001	-	-	-	-	-	-	-	-
	NH ₄ ⁺ -N	<0.001	<0.001	-	0.406	0.050	-	0.131	<0.001	-
	NO ₃ ⁻ -N	<0.001	<0.001	-	<0.001	<0.001	-	0.065	0.012	-
	PNR	0.809	0.348	-	-	-	-	-	-	-
	Olsen-P	<0.001	<0.001	-	<0.001	0.005	-	0.005	<0.001	-
2014*	pH	<0.001	<0.001	-	<0.001	<0.001	-	0.947	0.925	-
	Ec	<0.001	0.086	-	0.006	0.162	-	0.264	0.027	-
	TOC	<0.001	0.134	-	0.295	0.262	-	0.316	0.940	-
	TN	<0.001	0.086	-	0.014	0.029	-	0.371	0.691	-
	TOC/TN	0.213	0.290	-	0.108	0.012	-	0.241	0.166	-
	POM-C	<0.001	-	-	<0.001	-	-	<0.001	-	-
	POM-N	<0.001	-	-	<0.001	-	-	0.001	-	-
	NH ₄ ⁺ -N	0.003	0.012	-	<0.001	<0.001	-	0.088	0.041	-
	NO ₃ ⁻ -N	<0.001	0.002	-	<0.001	<0.001	-	0.039	<0.001	-
	Olsen-P	<0.001	<0.001	-	0.019	0.695	-	0.004	0.473	-

*το 2014 όλες οι παράμετροι πλην του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POM-C) και αζώτου (POM-N) μετρήθηκαν στα δείγματα 2 δειγματοληψιών, ενώ τα POM-C και POM-N μετρήθηκαν στα δείγματα 3 δειγματοληψιών

4.6.1 pH

Η αρχική τιμή του pH του εδάφους επηρεάζεται από τα αρχικά υλικά που σχημάτισαν το έδαφος. Στον πειραματικό αγρό το αρχικό pH του εδάφους εμφανίζεται μέτρια αλκαλικό (7.87) που υποδηλώνει ότι το έδαφος έχει σχηματιστεί από αλκαλικά πετρώματα. Το pH είναι μία δυναμική μεταβλητή και η τιμή του εξαρτάται από τις ποσότητες ανιόντων και κατιόντων που περιέχονται στο έδαφος. Οι καλλιεργητικές φροντίδες μπορεί να επηρεάσουν την τιμή του pH του εδάφους, ωστόσο η ανάπτυξη μίας καλλιέργειας επηρεάζει σημαντικά την τιμή του pH μέσω της προσρόφησης από τα φυτά των θρεπτικών συστατικών του εδάφους, των εκκρίσεων από το ριζικό σύστημα και την έκπλυση των NO_3^- και των βασικών μεταλλικών κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) από το έδαφος μέσω του νερού που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Πράγματι, στον πειραματικό αγρό της τομάτας, για κάθε έτος ξεχωριστά, το pH του εδάφους διαφοροποιήθηκε σημαντικά μεταξύ των σταδίων ανάπτυξης του φυτού σε όλες τις μεταχειρίσεις και τα βάθη του εδάφους (Σχ. 4.2). Στην αρχή της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου η εδαφική οξύτητα παρουσίασε μία μικρή αύξηση και κατόπιν μειώθηκε. Τη δεύτερη χρονιά αυξήθηκε στην αρχή και στη συνέχεια παρέμεινε σχεδόν σταθερή. Την τρίτη χρονιά παρουσίασε αντίθετη συμπεριφορά σε σχέση με τις προηγούμενες, όπου παρουσιάστηκε μία μείωση μέχρι τις 10-7-2013 και στη συνέχεια αυξήθηκε. Την ίδια χρονιά έλαβε χώρα μία δειγματοληψία εδάφους πριν την ενσωμάτωση των οργανικών υποστρωμάτων και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων η εφαρμογή κόμποστ ("MSWC") είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του pH κατά 0,24 σε σχέση με τον μάρτυρα, η εφαρμογή κοπριάς ("M") οδήγησε σε μείωση κατά 0,37 και η εφαρμογή μίγματος κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M") κατά 0,14. Στο τέλος της τρίτης καλλιεργητικής περιόδου, οι τιμές του εδαφικού pH αυξήθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις προφανώς λόγω της απορρόφησης από τα φυτά των θρεπτικών ανιόντων. Την τελευταία χρονιά το pH αυξάνεται σε όλες τις μεταχειρίσεις και οι τιμές του φθάνουν από 7,5 έως 7,8. Όσον αφορά στη μεταβολή του pH στα βάθη 0-15, 15-30 και 30-50 εκ., δεν παρουσιάζεται καμία σημαντική διαφοροποίηση στο εδαφικό προφίλ εκτός από το τελευταίο στρώμα του εδάφους, που οι τιμές του pH είναι υψηλότερες σε όλες τις μεταχειρίσεις και αυτό οφείλεται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις κατιόντων ασβεστίου, που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των εδαφών αυτών.

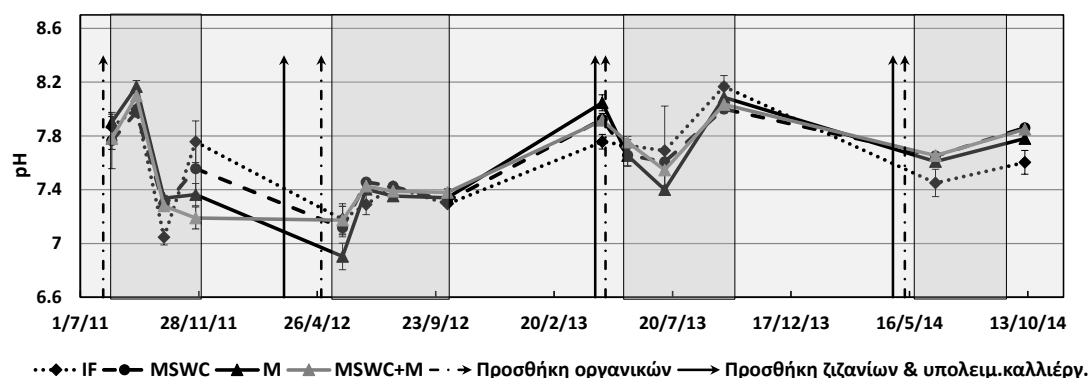
Συγκρίνοντας τις μεταχειρίσεις των εδαφών, ενώ στις τρεις πρώτες χρονιές πειραματισμού δεν υπήρχε κάποια διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων όσον αφορά στην τιμή του pH του εδάφους, στην τελευταία πειραματική χρονιά οι χειρισμοί της προσθήκης οργανικών στο έδαφος ("MSWC", "M", "MSWC+M") παρουσίασαν υψηλότερες τιμές pH (0-30 εκ.) σε σύγκριση με τη 'IF' μεταχείριση. Η διαφορά της εδαφικής οξύτητας μεταξύ οργανικής και ανόργανης λίπανσης ήταν μικρή αλλά στατιστικά σημαντική. Το pH των οργανικών μεταχειρίσεων στην τελευταία δειγματοληψία το 2014 κυμάνθηκε πολύ κοντά στην αρχική τιμή του (7,87). Πιο συγκεκριμένα, το εδαφικό pH της "MSWC" μεταχείρισης στο τέλος του πειράματος ήταν 7,86, στη "M" ήταν 7,78 και στη "MSWC+M" ήταν 7,85, ενώ η τιμή του pH στη "IF" μεταχείριση ήταν 7,60. Το παραπάνω αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί στη συσσώρευση μεταλλικών ιόντων στην εδαφική μάζα από την ετήσια προσθήκη κόμποστ και κοπριάς στο έδαφος. Τα μεταλλικά ιόντα μέσα στο έδαφος διαλύονται και δίνουν υδροξύλια, αυξάνοντας το pH. Παράλληλα, η εφαρμογή ανόργανων λιπασμάτων μπορεί να προκαλέσει μείωση του εδαφικού pH, μέσω της ελευθέρωσης H^+ κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης.

Στη βιβλιογραφία τα αποτελέσματα της επίδρασης της προσθήκης στο έδαφος οργανικών λιπασμάτων είναι αντιφατικά. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση του pH του εδάφους (Radin & Warman 2011; Steiner et al. 2007; M. S. Mkhabela & Warman 2005; Giannakis et al. 2014) και οι αυξήσεις αυτές είναι συνήθως ανάλογες με τις ποσότητες κόμποστ και κοπριάς που χρησιμοποιήθηκε. Από την αντίπερα όχθη, οι Parafilippaki et al. (2015) χρησιμοποίησαν στην εργασία τους κόμποστ από τη ΔΕΔΙΣΑ Χανίων, το οποίο το

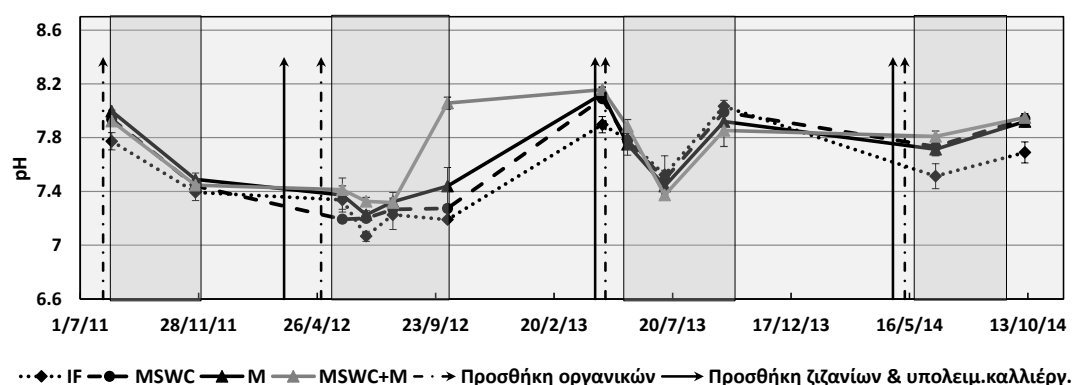
πρόσθεσαν σε καλλιέργεια *Cichorium spinosum* σε δύο αναλογίες (60 και 150 t·ha⁻¹) και παρατήρησαν ότι η προσθήκη του κόμποστ, και στις δύο αναλογίες, μείωσε ελαφρώς, αλλά σημαντικά το pH του εδάφους σε όλες τις δειγματοληψίες. Η μείωση του pH του εδάφους, μετά την εφαρμογή του κόμποστ αποδόθηκε στην ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας και την απελευθέρωση του CO₂. Αντίστοιχα, οι Achiba et al. (2009) διαπίστωσαν ότι η εφαρμογή κόμποστ και κοπριάς σε ένα αργιλοπηλώδη έδαφος, σε μία περιοχή με ημίξηρο κλίμα, προκάλεσε μια ελαφριά αλλά σημαντική μείωση του pH του εδάφους, που ωστόσο δεν υπερέβη τις 0,3 μονάδες σε σχέση με τον μάρτυρα.

Τα αποτελέσματα της επίδρασης των οργανικών λιπασμάτων στο pH του εδάφους του πειραματικού αγρού, αλλά και άλλων εδαφικών ιδιοτήτων όπως θα εξεταστεί σε επόμενες υποενότητες, δείχνουν ότι μεταξύ των μεταχειρίσεων παρουσιάστηκε σημαντική διαφοροποίηση μετά το τρίτο έτος. Το παραπάνω επιβεβαιώνει τις προσπάθειες διαφόρων ερευνητικών ομάδων (Nardi et al. 2004; Kukul et al. 2009; Bastida et al. 2008; Ros et al. 2006; Steiner et al. 2007) που επιλέγουν να μελετούν τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις αυτών των χειρισμών, έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλή και χρήσιμα συμπεράσματα για μία βιώσιμη αγροτική διαχείριση.

(α)



(β)



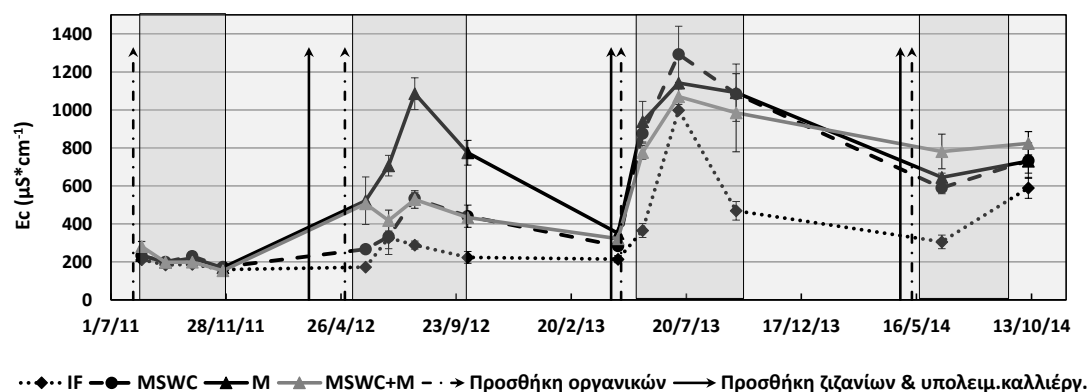
Σχήμα 4.2. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του pH στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκρίζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

4.6.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (Ec)

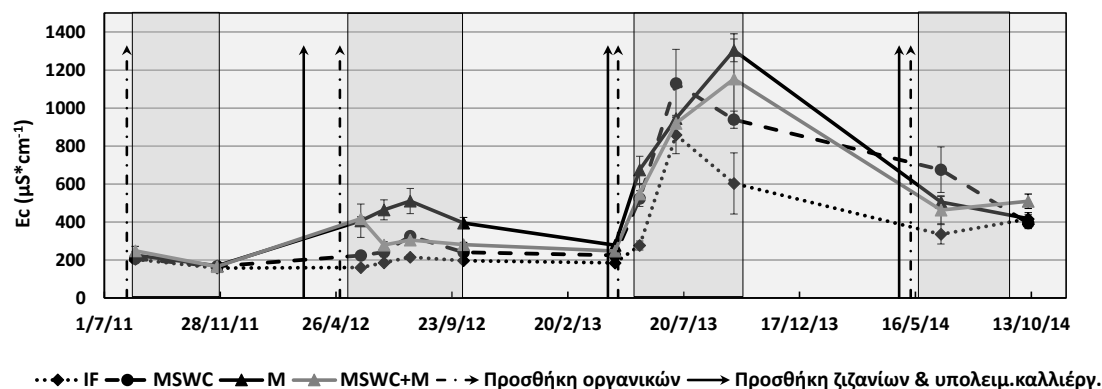
Μελετήθηκε η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Ec) του εδάφους στη διάρκεια κάθε καλλιεργητικής περιόδου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 4.3. Γενικά, διαπιστώθηκε αύξηση της Ec κατά την ανάπτυξη και καρποφορία των φυτών και αυτό οφείλεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις αλάτων στο έδαφος. Το παραπάνω δεν παρατηρήθηκε στο πρώτο έτος γιατί αφενός οι εισερχόμενες ποσότητες λιπασμάτων ήταν μικρότερες σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονιές (Πίν. 4.8) και αφετέρου η ανάπτυξη των φυτών πραγματοποιήθηκε στα τέλη του καλοκαιριού και την φθινοπωρινή περίοδο και όχι στα μέσα της καλοκαιρινής σεζόν όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και ευνοείται η μικροβιακή δραστηριότητα. Οι τιμές Ec φθάνουν στο μέγιστο ακριβώς την περίοδο όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες θερμοκρασίες και τα φυτά βρίσκονται σε πλήρη ανάπτυξη και στη συνέχεια καθώς μεταβαίνοντας προς το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου κάθε έτους (πλην του πρώτου έτους), παρέμειναν σταθερές ή μειώθηκαν. Παρόμοια πορίσματα διατύπωσαν οι Rigane & Medhioub (2011), όπου η χρησιμοποίηση οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος (διάφορα προϊόντα κόμποστ και κοπριά) οδήγησε σε αρχική αύξηση των τιμών της Ec ενός αμμοπηλώδη εδάφους, μέχρι ενός μέγιστου ορίου, και κατόπιν μετά την 45^η ημέρα του καλλιεργητικού κύκλου της τομάτας, οι τιμές της Ec μειώθηκαν σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις. Η μείωση αυτή αποδόθηκε στην πρόσληψη από τα φυτά των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους και στην απώλεια λόγω έκπλυσης του εδάφους από το αρδευτικό νερό (Zhang et al. 2006; Hargreaves et al. 2008).

Στη διάρκεια των τριών τελευταίων καλλιεργητικών περιόδων, διαπιστώθηκε σημαντική διαφοροποίηση στην τιμή της Ec μεταξύ ανόργανης ("IF") και οργανικής ("MSWC", "M", "MSWC+M") λίπανσης στο σύνολο των δειγματοληψιών και για κάθε βάθος ξεχωριστά. Η προσθήκη οργανικών στο έδαφος είχε ως αποτέλεσμα τον εφοδιασμό του με θρεπτικά συστατικά και μεταλλικά στοιχεία και την αντίστοιχη αύξηση της αγωγιμότητας. Έτσι σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγματοληψιών που πραγματοποιήθηκαν πριν και μετά την ενσωμάτωση των οργανικών υποστρωμάτων το 2013, η εφαρμογή κόμποστ οδήγησε σε αρχική αύξηση της Ec κατά 442 $\mu\text{S}/\text{cm}$ σε σχέση με τον μάρτυρα, η εφαρμογή κοπριάς κατά 437 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και η εφαρμογή κόμποστ και κοπριάς κατά 304 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Την περίοδο 2012, η "M" μεταχείριση παρουσίασε σταθερά τις μεγαλύτερες τιμές Ec σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαχειρίσεις, που οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων που παρουσιάζει η κοπριά. Την επόμενη χρονιά, η συσσώρευση αλάτων σε όλες τις οργανικές μεταχειρίσεις είχε ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών των μεταχειρίσεων αυτών. Στο τέλος του τελευταίας περιόδου, οι τιμές της Ec του επιφανειακού στρώματος σε όλες τις μεταχειρίσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 590 και 810 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ στο υποκείμενο στρώμα εδάφους (15-30 εκ.) κυμάνθηκαν από 400 έως 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

(α)



(β)



Σχήμα 4.3. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (E_c) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζές περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

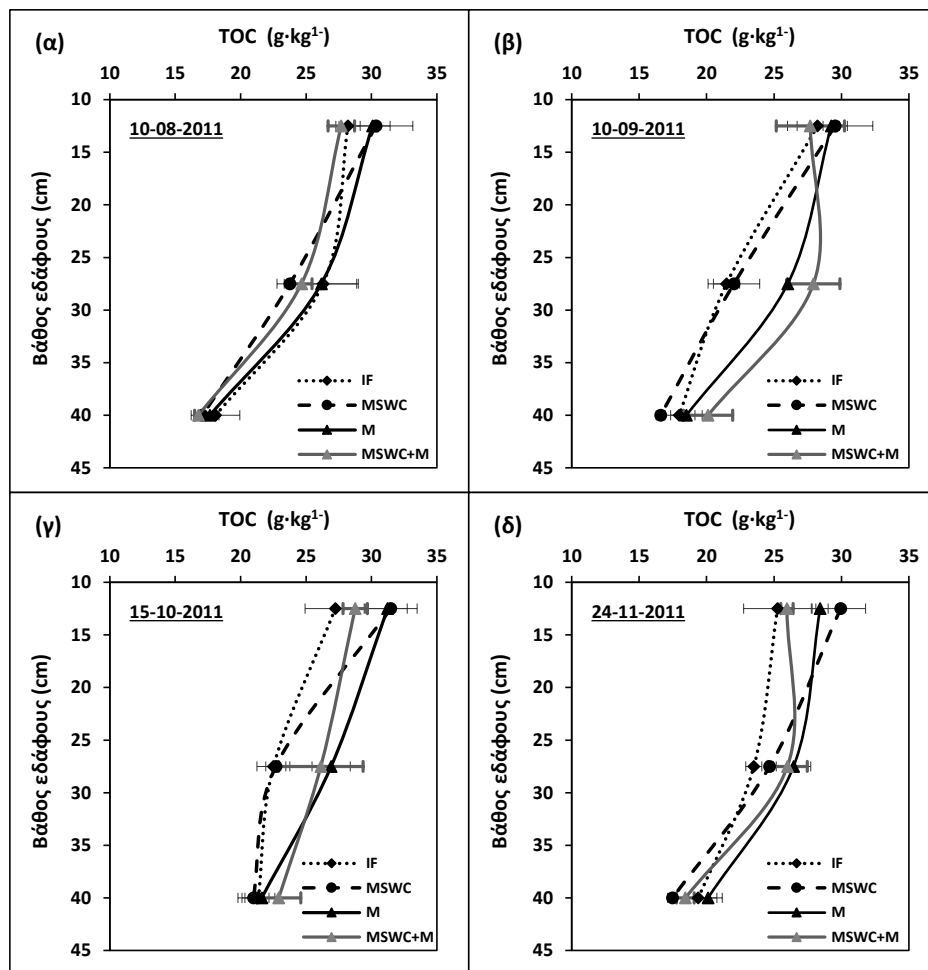
4.6.3 Εδαφικός Οργανικός Άνθρακας και Ολικό Άζωτο

Την **πρώτη καλλιεργητική περίοδο** πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες δειγματοληψίες σε 3 βάθη εδάφους (0-15, 15-30 και 30-50 εκ.) για κάθε μεταχείριση, όπου μελετήθηκε η επίδραση του είδους της λίπανσης και του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας στις μεταβολές του οργανικού άνθρακα (Total Organic Carbon, TOC), του ολικού αζώτου (Total Nitrogen, TN) και του λόγου TOC/TN στο προφίλ του ενεργού ριζοστρώματος.

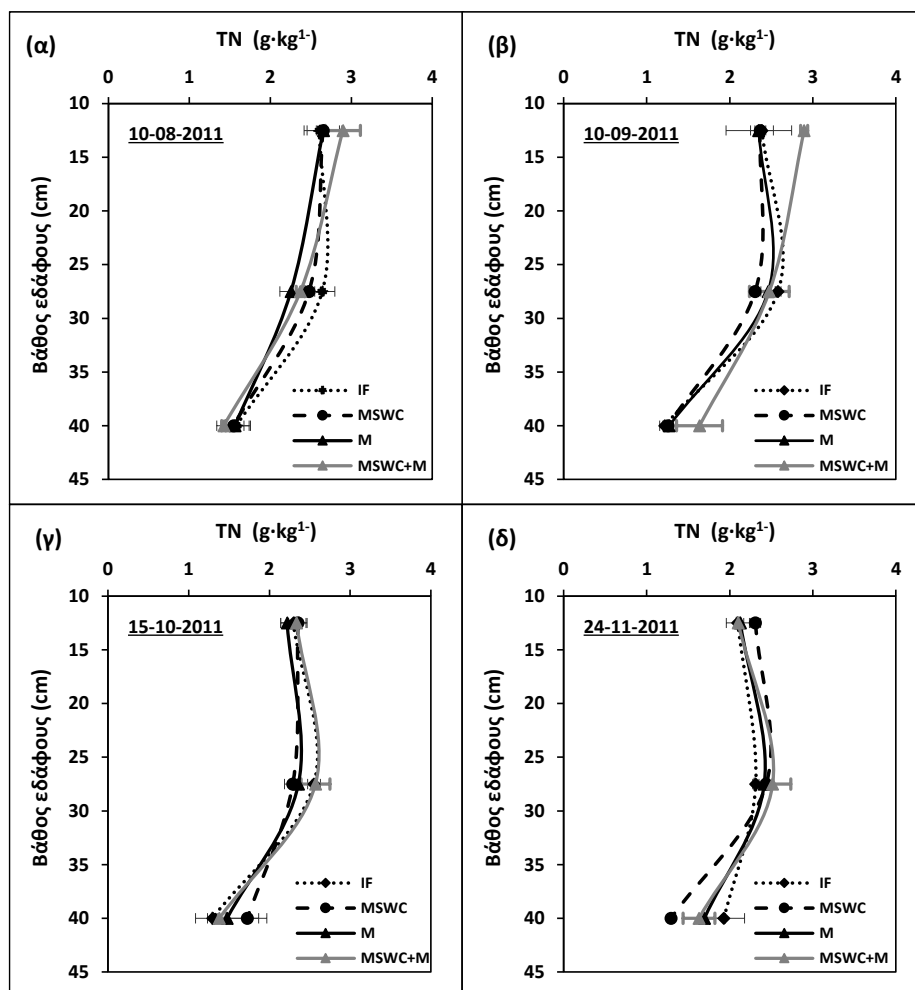
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα και του ολικού αζώτου μειώνονται από την επιφάνεια προς τα βαθύτερα στρώματα (Σχ. 4.4-4.6). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις του TOC και του TN είναι σημαντικά υψηλότερες στα βάθη 0-30 εκ. σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα, ως αποτέλεσμα της πυκνότερης ανάπτυξης του ριζικού συστήματος της καλλιέργειας στο στρώμα εδάφους 0-30 εκ. και τις επαγόμενες εκκρίσεις οργανικών ουσιών. Σε αντίθεση με τις συγκεντρώσεις TOC και TN, ο λόγος TOC/TN παρέμεινε σταθερός στο προφίλ του ενεργού ριζοχώματος.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της περιεκτικότητας του εδάφους σε TOC συνολικά σε όλες τις δειγματοληψίες **της πρώτης χρονιάς** για κάθε βάθος, παρατηρούμε ότι **στο προφίλ 0-15 εκ.** υπήρχε σημαντική διαφοροποίηση των δύο μεταχειρίσεων “IF” και “MSWC+M” με τις μεταχειρίσεις “M” και “MSWC”, όπου οι τελευταίες εμφάνισαν υψηλότερα ποσοστά σε οργανικό άνθρακα. Επίσης, **στο βάθος εδάφους 15-30 εκ.** η “IF” και η “MSWC” μεταχείριση παρουσίασαν μικρότερες συγκεντρώσεις TOC σε σχέση με τη “M” και τη “MSWC+M”. Ως εκ τούτου για να μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, συγκρίνουμε τις τιμές των συγκεντρώσεων του TOC συνολικά στο προφίλ 0-30 εκ. και παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα στο εδαφικό προφίλ 0-30 εκ. επηρεάστηκε σημαντικά μόνο από την προσθήκη κοπριάς (μεταχείριση “M”) σε σύγκριση με τη μεταχείριση “IF”. Αντίστοιχα, δεν υπήρχε κάποια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων όσον αφορά στις συγκεντρώσεις του TN στο προφίλ εδάφους 0-30 εκ. Αναφορικά με το **στρώμα εδάφους 30-50 εκ.**, το είδος της λίπανσης δεν επηρέασε σημαντικά τις συγκεντρώσεις TOC και TN.

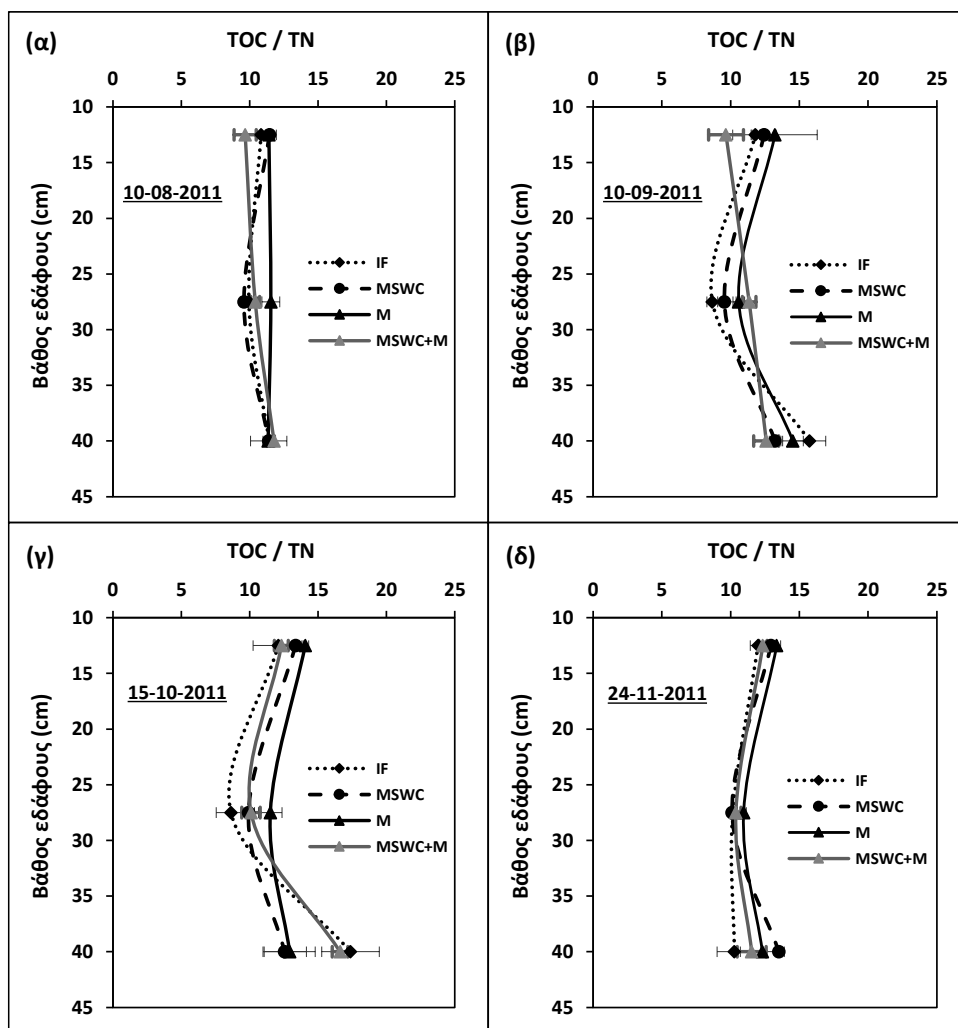
Η περιεκτικότητα του εδάφους σε TOC και TN δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά **ανάμεσα στα στάδια ανάπτυξης του φυτού** στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο στο εδαφικό προφίλ 0-30 εκ. Για το βάθος 30-50 εκ. παρατηρήθηκε ότι στο στάδιο της ωρίμανσης των καρπών (3^{ος} μήνας), οι συγκεντρώσεις TOC αυξήθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις, προφανώς λόγω της πλήρους ανάπτυξης του ριζικού συστήματος, αλλά και λόγω της μεταφοράς από το επιφανειακό στρώμα οργανικής ουσίας, ως αποτέλεσμα της άρδευσης.



Σχήμα 4.4. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του εδαφικού οργανικού άνθρακα (TOC, g/kg) σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, “IF”, του κόμποστ ΑΣΑ, “MSWC”, της κοπριάς, “M”, και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, “MSWC+M”. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.



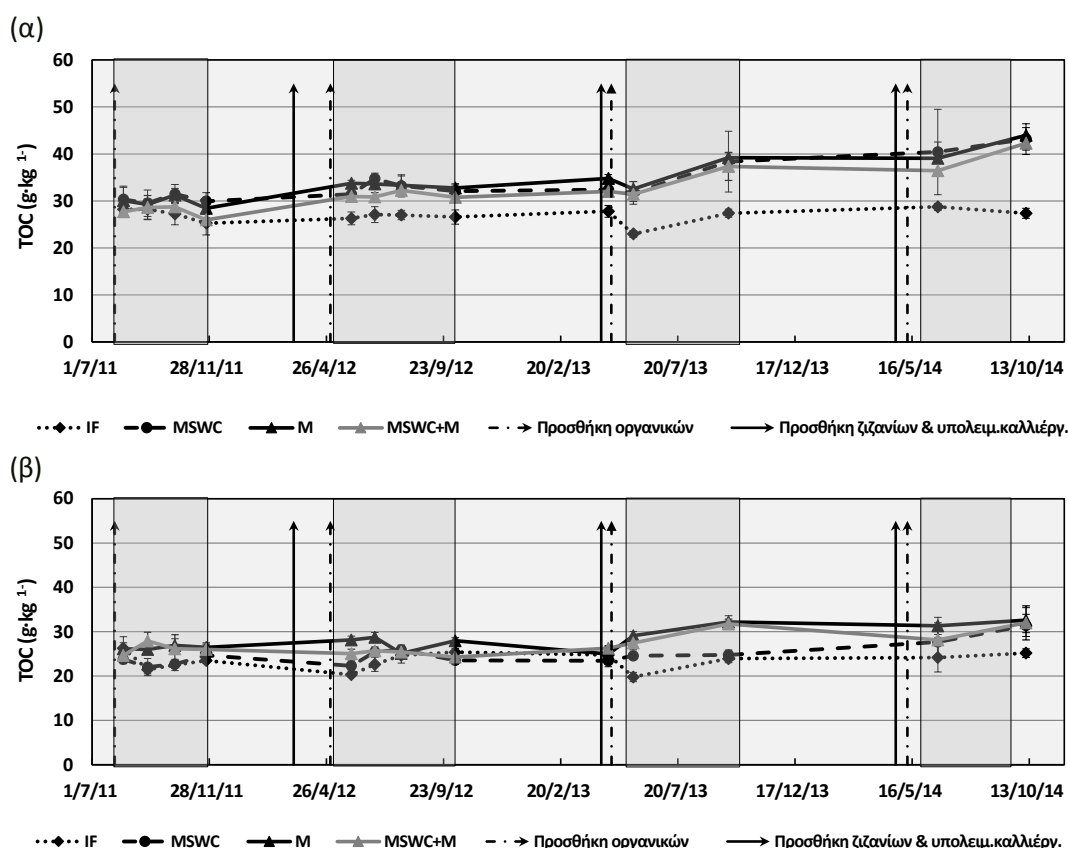
Σχήμα 4.5. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου (TN, g/kg) σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, “IF”, του κόμποστ ΑΣΑ, “MSWC”, της κοπριάς, “M”, και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, “MSWC+M”. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.



Σχήμα 4.6. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του λόγου οργανικού άνθρακα προς άζωτο (TOC/TN) σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, “IF”, του κόμποστ ΑΣΑ, “MSWC”, της κοπριάς, “M”, και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, “MSWC+M”. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Εξετάζοντας τη μεταβολή του TOC στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.) στα 4 έτη του πειραματισμού (Σχ. 4.7), διαπιστώνουμε ότι οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα αυξάνονται σταδιακά με το χρόνο στις μεταχειρίσεις της οργανικής λίπανσης, ενώ στο χειρισμό της ανόργανης λίπανσης (IF) παρέμειναν σταθερές. Στο τέλος του 4^{ου} έτους, οι συγκεντρώσεις του TOC στις “MSWC”, “M” και “MSWC+M” μεταχειρίσεις ήταν κατά 22, 24 και 21,7 g/kg μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στη “IF” μεταχείριση. Ομοίως, για το βάθος 15-30 εκ. η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα ήταν από 6,2 έως 7,4 g/kg υψηλότερες από την “IF” μεταχείριση. Η προσθήκη, λοιπόν, των οργανικών ουσιών κόμποστ ή/και κοπριά, αύξησε το περιεχόμενο του επιφανειακού στρώματος του εδάφους σε οργανικό άνθρακα κατά 60% περίπου σε σύγκριση με τη “IF” μεταχείριση. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, όπου οι Fronning et al. (2008) ανέφεραν αύξηση του TOC κατά 41% και 25% μετά από 3 χρόνια προσθήκη κόμποστ και κοπριά, αντίστοιχα. Ομοίως, οι Rigane & Medhioub (2011) διαπίστωσαν ότι η ενσωμάτωση οργανικών εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος σε μία καλλιέργεια τομάτας ενίσχυσε σημαντικά

το περιεχόμενο του εδάφους σε οργανική ουσία (από 7,6 έως 23,6 g/kg). Αντίστοιχα, οι Baldi et al. (2010) πραγματοποίησαν ένα πείραμα σε έναν αγρό με ροδάκινα, όπου εφάρμοσαν στο αγρόκτημα τέσσερις μεταχειρίσεις (μάρτυρας, ανόργανη λίπανση, κόμποστ ΑΣΑ και κοπριά από βοοειδή) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μετά από 8 έτη εφαρμογής του πειράματος, η οργανική ουσία του εδάφους αυξήθηκε μέχρι και 169%. **Συγκρίνοντας τις οργανικές μεταχειρίσεις μεταξύ τους**, διαπιστώνουμε ότι το είδος του οργανικού υποστρώματος δεν επηρέασε σημαντικά τη συσσώρευση άνθρακα στο έδαφος. Τέλος, η καλλιεργητική πρακτική της ενσωμάτωσης στο έδαφος των υπολειμμάτων καλλιεργειών και ζιζανίων διατήρησε τουλάχιστον τα επίπεδα του TOC σταθερά ("IF" μεταχείριση).

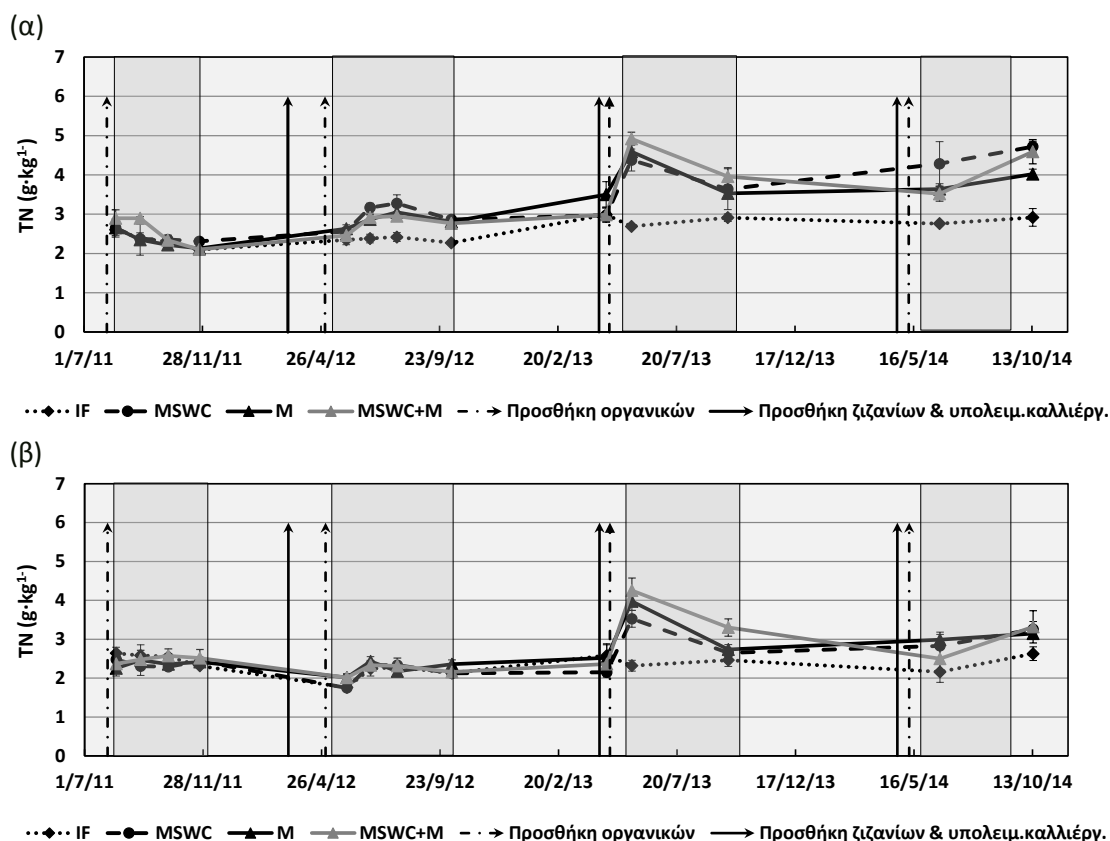


Σχήμα 4.7. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του εδαφικού οργανικού άνθρακα (TOC) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων του TN στη διάρκεια των τεσσάρων ετών (2011-2014) στα βάθη 0-15 (Σχ. 4.7α) και 15-30 εκ. (Σχ. 4.7β). Παρατηρούμε ότι το TN παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τον TOC, με τις τιμές του να αυξάνονται με την πάροδο των ετών, σημειώνοντας σημαντική αύξηση κυρίως μετά το 3^ο έτος. Η προσθήκη οργανικών ουσιών στο έδαφος αύξησε σημαντικά τα επίπεδα του ολικού αζώτου. Συγκεκριμένα, στο τέλος του πειράματος η μεταχείριση "MSWC" παρουσίασε 62%

περισσότερο άζωτο από τη “IF” μεταχείριση, η “M” 38% και η “MSWC+M” 57%. Είναι αξιοσημείωτο ότι στο τέλος της τέταρτης καλλιεργητικής περιόδου οι τιμές του TN στις μεταχειρίσεις όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο κόμποστ ΑΣΑ ή/και σε συνδυασμό με την κοπριά σε αναλογία 70:30, ήταν αυξημένες περίπου κατά 20% σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της διαχείρισης της κοπριάς, παρόλο που προστέθηκαν μικρότερες ποσότητες αζώτου στις “MSWC” και “MSWC+M” μεταχειρίσεις από ότι στη “M”. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κόμποστ ΑΣΑ απελευθερώνει με πιο αργούς ρυθμούς το άζωτο σε σχέση με τα ζωικά απόβλητα, που δομούνται από εύκολως βιοαποδομήσιμα και ευκίνητα συστατικά.

Σε αντίστοιχες μελέτες που έχουν εκπονηθεί, η προσθήκη οργανικών ουσιών στο έδαφος οδήγησε σε αύξηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε TN (Mallory & Griffin 2007; Sodhi et al. 2009), ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις τα επίπεδα αζώτου στις οργανικές μεταχειρίσεις δεν υπερέβησαν τα επίπεδα αζώτου στους χειρισμούς όπου χρησιμοποιήθηκε ανόργανη λίπανση (Evanylo et al. 2008; Calleja-Cervantes et al. 2015). Ωστόσο, η επανειλημμένη εφαρμογή κομποστοποιημένων και άλλων οργανικών υλικών αυξάνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άζωτο κατά έως και 90%, το οποίο αποθηκεύεται για χρήση σε μελλοντικές καλλιεργητικές περιόδους, συχνά χωρίς να προκαλεί έκπλυση νιτρικών αλάτων στα υπόγεια ύδατα (Diacono & Montemurro 2010). Τα παραπάνω οφέλη που προκύπτουν πολλαπλασιάζονται όταν τα υλικά αυτά εφαρμόζονται σύμφωνα με τις ορθές πρακτικές, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του εδάφους, τη χρήση του και τις κλιματολογικές συνθήκες (Diacono & Montemurro 2010).

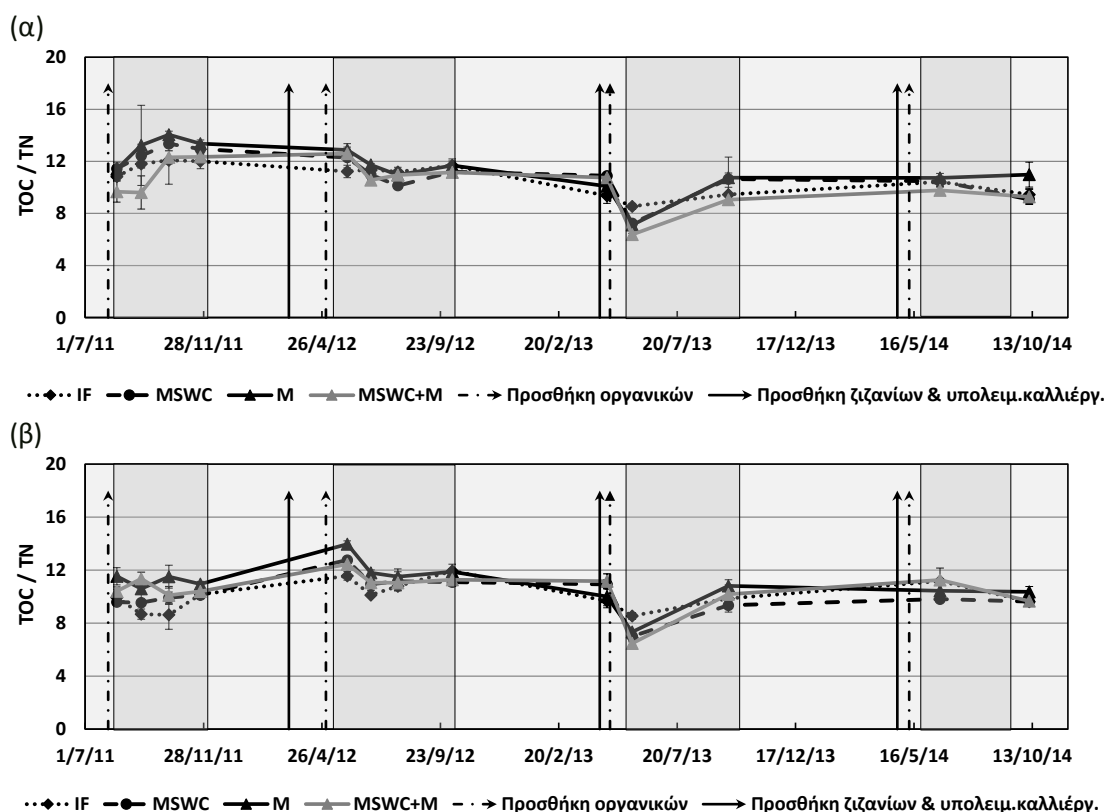


Σχήμα 4.8. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του ολικού αζώτου (TN) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζές περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Η αναλογία C / N στο έδαφος καθορίζεται από την κατάσταση της οργανικής ύλης και τους μικροβιακούς πληθυσμούς και τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος (Mandal et al. 2007). Η βασική αρχή πίσω από αυτόν τον δείκτη ποιότητας της οργανικής ύλης είναι ότι ο οργανικός άνθρακας είναι η πρωταρχική πηγή ενέργειας για τα μικρόβια του εδάφους, τα οποία όμως απαιτούν την πρόσληψη αζώτου για να πολλαπλασιαστούν και να χρησιμοποιήσουν αυτή την ενέργεια για τις λειτουργικές τους ανάγκες. Τα μικρόβια χρησιμοποιούν αυτόν τον άνθρακα μέσω αναπνοής, με επακόλουθη απώλεια διοξειδίου του άνθρακα από το έδαφος. Καθώς το ευκόλως βιοδιασπώμενο (ενεργό) κλάσμα του οργανικού υλικού αποσυντίθεται, ο λόγος C : N πέφτει μέχρι να επιτευχθεί τελικά μια σταθερή κατάσταση (το παθητικό κλάσμα).

Στην περίπτωση του πειραματικού αγρού, ο λόγος C : N παρουσιάζει μικρές αλλά σημαντικές διακυμάνσεις με το χρόνο τα τρία πρώτα έτη, ενώ το τελευταίο έτος παρουσιάζει σταθερές τιμές (Σχ. 4.9). Επίσης, δεν επηρεάζεται στατιστικώς σημαντικά από το είδος της μεταχείρισης, υποδεικνύοντας ότι η αναλογία αυξήσεων ή μειώσεων στις δεξαμενές C και N στο έδαφος ήταν παρόμοια για όλες τις μεταχειρίσεις. Τα αποτελέσματα αυτά είναι στην ίδια γραμμή με την εργασία των Mandal et al. (2007), που διεξήγαγαν ένα

μακροχρόνιο πείραμα στο οποίο διερευνήθηκε η επίδραση από την εφαρμογή ανόργανης λίπανσης και κοπριάς στις εδαφικές παραμέτρους, σε έναν πειραματικό αγρό καλλιέργειας σιταριού. Σημαντική μεταβολή του λόγου C : N και κατ' επέκταση της σύστασης της οργανικής ουσίας παρουσιάζεται μόνο μετά την ενσωμάτωση στο έδαφος των ζιζανίων, των υπολειμμάτων της καλλιέργειας και των οργανικών εδαφοβελτιωτικών, μέσω της κατεργασίας του εδάφους. Η πτώση του λόγου C : N υποδηλώνει υψηλές εισερχόμενες ποσότητες αζώτου, που μπορεί να οφείλεται κυρίως στην ενσωμάτωση του πλούσιου σε άζωτο φυτού *Urtica cfr. dioica* (τσουκνίδα), που αποτελεί ένα από τα επικρατέστερα ζιζάνια που αναπτύχθηκαν στον πειραματικό αγρό ενδιάμεσα των καλλιεργητικών περιόδων (Παράρτημα II).



Σχήμα 4.9. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του λόγου άνθρακα προς άζωτο (TOC/TN) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζές περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

4.6.4 Ενεργές Δεξαμενές Οργανικής Ύλης

Η συνολική περιεκτικότητα σε οργανική ύλη του εδάφους αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ποιότητας του εδάφους, καθώς έχει εκτεταμένες επιδράσεις στις φυσικές, χημικές και στις βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Εντούτοις, οι μεταβολές στις συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα (TOC) και του ολικού αζώτου (TN) πραγματοποιούνται με αργούς ρυθμούς και δεν παρέχουν επαρκή ένδειξη σημαντικών βραχυπρόθεσμων μεταβολών που μπορεί να προκύψουν στην ποιότητα της οργανικής ύλης του εδάφους. Οι **ευκόλως μεταχηματιζόμενες (labile) ενεργές δεξαμενές οργανικής ύλης**, όπως η **σωματιδιακή οργανική ύλη** (Particulate Organic Matter, POM), η **εκχυλισμένη διαλυτή οργανική ύλη** (Extracted Soluble Organic Matter, ESOM), η **δυσλυτή οργανική ύλη** (Potential Soluble Organic Matter, PSOM), το **δυσλυτό ανοργανοποιήσιμο άζωτο** (Potentially Mineralizable Nitrogen, PMN) και ο **δείκτης αρωματικότητας οργανικής ύλης** (specific UV absorbance at 280 nm, SUVA) μπορούν να θεωρηθούν ως πρόσφοροι δείκτες ποιότητας εδάφους που επηρεάζουν τη λειτουργία του με συγκεκριμένους τρόπους και είναι πολύ πιο ευαίσθητοι δείκτες στις αλλαγές στη διαχείριση του εδάφους.

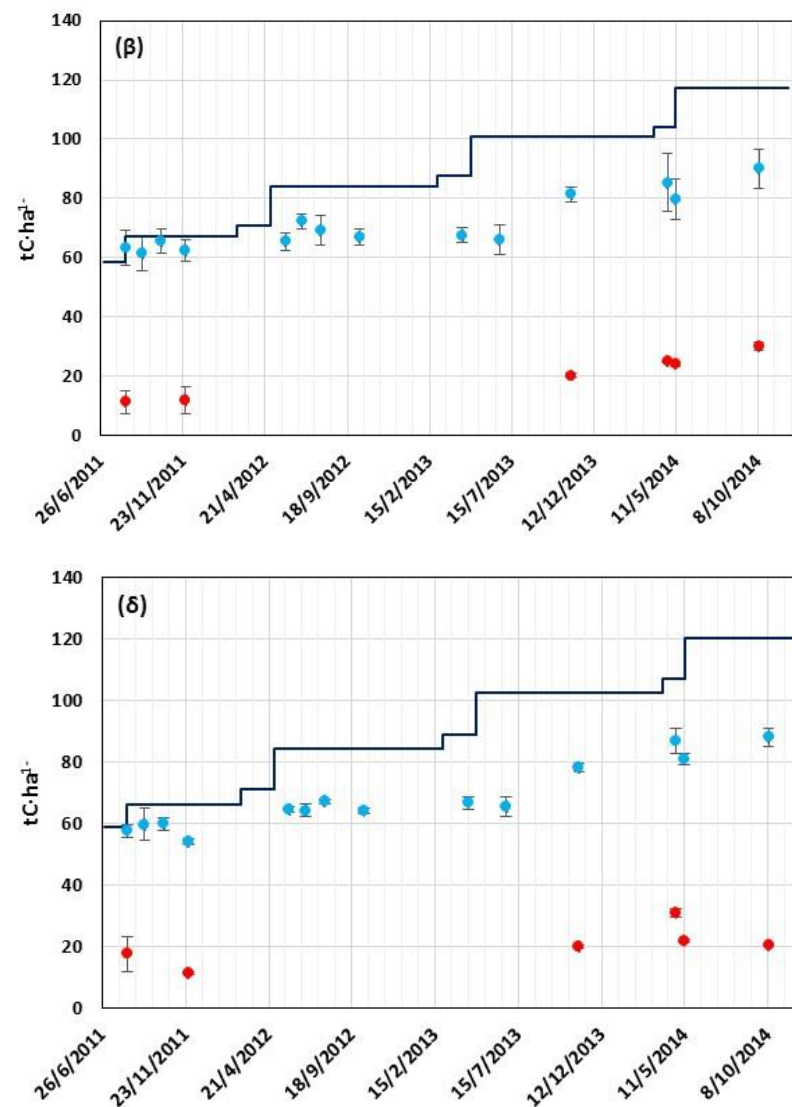
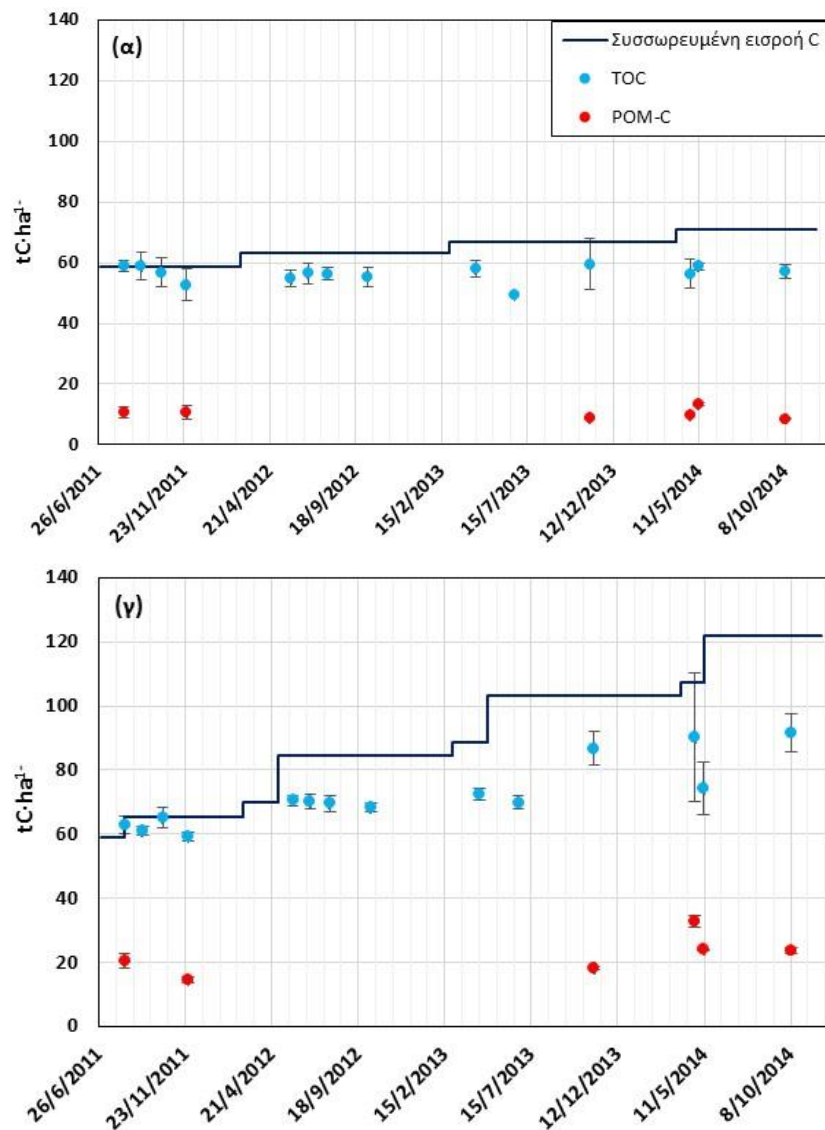
4.6.4.1 Σωματιδιακή Οργανική Ύλη

Η σωματιδιακή οργανική ύλη (POM) είναι μια μεταβατική δεξαμενή οργανικής ύλης ανάμεσα σε υπολείμματα νωπών φυτών και εξευγενισμένη οργανική ύλη (Haynes 2005). Το κλάσμα POM περιλαμβάνει όλα τα “χαμηλής πυκνότητας” σωματίδια οργανικής ύλης του εδάφους (SOM) μεγέθους μικρότερο από 2 χιλ και μεγαλύτερο από 0,053 χιλ (Cambardella & Elliott 1992). Η POM έχει χαρακτηριστεί σε αρκετές εργασίες ως ένας από τους πιο ευαίσθητους δείκτες ποιότητας του εδάφους, κατά την εφαρμογή διαφόρων τύπων λιπασμάτων στους αγρούς. Μάλιστα, σε μία πρόσφατη εργασία όπου μελετήθηκαν οι μεταβολές διαφόρων δεικτών ποιότητας εδάφους (TOC, POM, permanganate oxidizable organic carbon, macroaggregate associated-C, micro_within_macroaggregate associated-C, silt-clay associated-C) (Plaza-Bonilla et al. 2014), το κλάσμα του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (particulate organic carbon, POM-C) είχε τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές στις πρακτικές γεωργικής διαχείρισης, αποδεικνύοντας την ικανότητά του ως πρώιμο δείκτη βελτιστοποιημένων πρακτικών για τη δέσμευση του C στο έδαφος (Plaza-Bonilla et al. 2014).

Η εφαρμογή οργανικών εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος του πειραματικού αγρού ενίσχυσε τη δέσμευση του OC στο έδαφος. Μετά από 4 έτη ετήσιας προσθήκης οργανικών εδαφοβελτιωτικών, στο τέλος της 4^{ης} περιόδου τα αποθέματα C στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 cm) της ανόργανης λίπανσης ήταν 57,1 t·ha⁻¹ και στις οργανικές μεταχειρίσεις περίπου 91 t·ha⁻¹ (Πίν. 4.11). Στην παραπάνω δειγματοληψία, το ποσοστό POM-C επί του συνόλου του εδαφικού οργανικού άνθρακα ήταν 15% στην “IF” μεταχείριση, 23% στην “MSWC+M”, 26% στην “M” και 34% στον “MSWC” χειρισμό (Πίν. 4.11). Αντίστοιχα, το ποσοστό POM-N επί του συνόλου του εδαφικού ολικού αζώτου ήταν 13% στην “IF” μεταχείριση, 19% στην “MSWC+M”, 20% στην “M” και 18% στην “MSWC” (Πίν. 4.11).

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 και στο Σχήμα 4.10 διαπιστώνουμε ότι τα ποσοστά POM-C αυξάνονται σταθερά στη μεταχείριση όπου εφαρμόστηκε κόμποστ (“MSWC”) και δεν φαίνεται να επηρεάζονται από την άροση, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες οργανικές μεταχειρίσεις. Επίσης, σε σύγκριση με την ανόργανη λίπανση, οι οργανικές μεταχειρίσεις εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερα αποθέματα εδαφικού οργανικού άνθρακα και ολικού αζώτου, καθώς και σωματιδιακής οργανικής ύλης. Από την

αρχή του πειράματος συνολικά ο C που δεσμεύθηκε στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 cm), μετά από 4ετή εφαρμογή οργανικής λίπανσης, ήταν $30,4 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ για το “MSWC+M”, $28,9 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ για την “M” και $26,0 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ για το “MSWC”. Ο άνθρακας που συσσωρεύτηκε στο έδαφος διέφερε σημαντικά ως προς τη σύστασή του ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. Ενώ στη “MSWC” μεταχείριση οι 20 από τους 26 $\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ που δεσμεύτηκαν ήταν POM-C, στις υπόλοιπες οργανικές μεταχειρίσεις το μεγαλύτερο μέρος του συσσωρευμένου OC εμφανίστηκε στο κλάσμα που σχετίζεται με τα σωματίδια μεγέθους ιλύος-αργίλου, υποδηλώνοντας ότι τα οργανικά υλικά μετατρέπονται σχετικά γρήγορα σε σωματίδια ή κολλοειδή που προσροφούνται στην ορυκτή ύλη ή συσσωματώνονται. Όσον αφορά στη “IF” μεταχείριση, δεν διαπιστώθηκε δέσμευση του OC στο έδαφος παρά το γεγονός ότι τα υπολείμματα της καλλιέργειας και τα ζιζάνια ενσωματώνονταν στο έδαφος σε ετήσια βάση.



Σχήμα 4.10. Η επίδραση της προσθήκης οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος (ενσωμάτωση ζιζανίων και υπολειμμάτων καλλιεργειών, κόμποστ ΑΣΑ και κοπριά από αιγοπρόβατα), στις συγκεντρώσεις του ολικού εδαφικού οργανικού άνθρακα (TOC) και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POM-C) στις μεταχειρίσεις (α) της ανόργανης λίπανσης (“IF”), (β) του κόμποστ ΑΣΑ (“MSWC”), (γ) της κοπριάς από αιγοπρόβατα (“M”) και (δ) του μίγματος κόμποστ και κοπριάς (“MSWC+M”) σε αναλογία 70:30.

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

Πίνακας 4.11. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) και της άρωσης στα αποθέματα ($t \cdot ha^{-1}$) του εδάφους σε ολικό οργανικό άνθρακα (TOC) και ολικό άζωτο (TN) και στα αποθέματα ($t \cdot ha^{-1}$) και στην ποσοστιαία σύσταση (%) του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POM-C) και αζώτου (POM-N), καθώς και στο λόγο POM-C : POM-N. Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών. Εντός της ίδιας δειγματοληψίας αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.

Μεταχείριση	10/08/11	24/11/11	01/11/13	3/5/2014*	10/5/2014**	09/10/14
TOC, $t \cdot ha^{-1}$						
IF	58.8a (± 1.9)	52.7a (± 5.2)	59.6b (± 8.2)	56.3 (± 4.7)	58.8b (± 1.1)	57.1b (± 2.2)
MSWC	64.0a (± 5.9)	62.4a (± 3.8)	81.4a (± 2.5)	85.2 (± 9.8)	79.7a (± 6.7)	90.0a (± 6.8)
M	62.7a (± 2.8)	59.2a (± 1.2)	86.8a (± 5.2)	90.3 (± 20.0)	74.4ab (± 8.3)	91.6a (± 5.7)
MSWC+M	57.7a (± 2.1)	54.1a (± 1.0)	78.4ab (± 1.5)	86.9 (± 4.0)	80.9a (± 1.8)	88.1a (± 3.0)
POM-C, $t \cdot ha^{-1}$						
IF	10.7a (± 1.9)	10.6a (± 2.4)	8.8b (± 0.1)	9.9c (± 0.1)	13.4c (± 0.5)	8.6c (± 0.1)
MSWC	11.4a (± 3.9)	11.9a (± 4.5)	20.3a (± 0.7)	25.0b (± 0.5)	24.1a (± 0.6)	30.1a (± 1.6)
M	20.4a (± 2.1)	14.5a (± 1.1)	18.1a (± 0.3)	34.9a (± 3.9)	23.9a (± 0.1)	23.8b (± 0.9)
MSWC+M	17.6a (± 5.6)	11.3a (± 0.5)	19.9a (± 0.5)	31.0ab (± 1.3)	21.7b (± 0.4)	20.5b (± 0.2)
POM-C, % του TOC						
IF	18a (± 2.6)	20a (± 2.5)	15b (± 1.6)	18b (± 1.4)	23b (± 1.3)	15c (± 0.4)
MSWC	17a (± 4.5)	18a (± 5.7)	25a (± 0.7)	30ab (± 4.0)	31a (± 2.2)	34a (± 2.6)
M	33a (± 3.8)	25a (± 1.9)	21a (± 0.9)	40a (± 6.4)	32a (± 2.0)	26ab (± 2.4)
MSWC+M	30a (± 9.1)	21a (± 0.6)	25a (± 0.5)	36ab (± 2.3)	27ab (± 0.6)	23bc (± 0.8)
TN, $t \cdot ha^{-1}$						
IF	5.4a (± 0.1)	4.4a (± 0.3)	5.5b (± 0.4)	6.0b (± 0.2)	5.8c (± 0.2)	6.1b (± 0.5)
MSWC	5.5a (± 0.5)	4.8a (± 0.1)	7.2a (± 0.2)	8.3a (± 0.2)	7.6a (± 0.6)	9.8a (± 0.3)
M	5.5a (± 0.4)	4.4a (± 0.1)	6.9a (± 0.6)	7.7a (± 0.6)	6.9ab (± 0.4)	8.4a (± 0.3)
MSWC+M	6.0a (± 0.5)	4.4a (± 0.0)	7.8a (± 0.1)	7.9a (± 0.4)	7.6a (± 0.3)	9.6a (± 0.6)
POM-N, $t \cdot ha^{-1}$						
IF	1.4a (± 0.4)	1.3a (± 0.4)	0.9c (± 0.02)	0.6b (± 0.00)	0.8c (± 0.02)	0.8c (± 0.01)
MSWC	1.3a (± 0.4)	1.5a (± 0.6)	2.1a (± 0.04)	1.7a (± 0.02)	1.5a (± 0.02)	1.9a (± 0.01)
M	2.9a (± 0.3)	2.4a (± 0.6)	1.8b (± 0.02)	1.3a (± 0.18)	1.3b (± 0.01)	1.7b (± 0.04)
MSWC+M	2.7a (± 1.0)	1.6a (± 0.0)	1.9b (± 0.04)	1.5a (± 0.02)	1.3b (± 0.01)	1.7b (± 0.01)
POM-N, % του TN						
IF	26a (± 7.9)	29a (± 7.4)	17c (± 1.1)	11b (± 0.4)	14b (± 0.8)	13b (± 1.0)
MSWC	23a (± 6.0)	31a (± 12.1)	30a (± 0.6)	20a (± 0.4)	20a (± 1.7)	19a (± 0.6)
M	53a (± 9.1)	54a (± 12.0)	26ab (± 1.3)	20a (± 2.5)	19ab (± 0.8)	20a (± 0.1)
MSWC+M	42a (± 12.4)	37a (± 1.3)	25b (± 0.1)	19a (± 0.7)	17ab (± 0.7)	18a (± 1.3)
POM-C / POM-N						
IF	8.5a (± 1.3)	8.9a (± 1.9)	9.3c (± 0.1)	15.3c (± 0.1)	16.4b (± 0.3)	11.1b (± 0.0)
MSWC	9.2a (± 1.0)	8.6a (± 1.9)	9.6bc (± 0.2)	14.9c (± 0.2)	16.2b (± 0.6)	15.8a (± 0.7)
M	7.1a (± 0.2)	6.5a (± 0.9)	10.0ab (± 0.1)	22.8a (± 0.4)	18.7a (± 0.3)	14.2a (± 0.2)
MSWC+M	6.9a (± 0.4)	7.0a (± 0.1)	10.3a (± 0.1)	20.7b (± 0.5)	17.2ab (± 0.4)	11.9b (± 0.1)

*πριν την άρωση, **μετά την άρωση

4.6.4.2 Διαλυτή Οργανική Ύλη

Η διαλυμένη οργανική ύλη (Dissolved Organic Matter, DOM) θεωρείται το πιο δυναμικό κλάσμα στα εδάφη και ένα τμήμα από αυτό αποτελεί άμεσα διαθέσιμο υπόστρωμα για μικροβιακή δραστηριότητα (McGILL et al. 1986). Αποτελεί, επίσης, σημαντική πηγή ανοργανοποιήσιμων N, S και P και μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και στην ανακύκλωση των συστατικών αυτών. Πολύ πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε ως κλάσμα ασταθούς οργανικής ύλης και δείκτης ποιότητας εδάφους στα γεωργικά εδάφη (Haynes 2005). Η διαλυμένη οργανική ύλη που υπάρχει στο διάλυμα του εδάφους προέρχεται κυρίως από την έκπλυση των υπολειμμάτων της υπέργειας και υπόγειας βιομάζας των φυτών (και την προκύπτουσα σωματιδιακή οργανική ύλη) συν τη συνθετική δραστηριότητα της μικροβιακής βιομάζας του εδάφους (Haynes 2005). Λόγω των δυσκολιών της δειγματοληψίας του διαλύματος του εδάφους, η οργανική ύλη συχνά εκχυλίζεται με νερό ή διάφορα διαλύματα αλάτων και αναφέρεται ως «διαλυτή» ή «εκχυλισμένη» οργανική ύλη. Αυτά τα αντιδραστήρια αφαιρούν τη διαλυμένη οργανική ύλη συν κάποιο δυνητικά διαλυτό υλικό.

Η Εκχυλισμένη Διαλυτή Οργανική Ύλη (ESOM) αποτελεί μία ευαίσθητη παράμετρο στις αλλαγές στη διαχείριση του εδάφους και ως εκ τούτου ένας καλός δείκτης της ποιότητας του εδάφους (Liang et al. 2011; Christou et al. 2006). Η ESOM θεωρείται ότι αποικοδομείται γρήγορα και μπορεί να γίνει άμεση πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς του εδάφους (Zhou et al. 2012; Stamati et al. 2011). Η ESOM, που προέρχεται από την εκχύλιση του εδάφους σε διάλυμα KCl 2M και επώαση του διαλύματος για 2 ώρες, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του εδάφους για την παραγωγή της διαλυμένης οργανικής ύλης (Dissolved Organic Matter, DOM), ενώ η DOM αντιστοιχεί στην οργανική ύλη του εδαφικού διαλύματος που λαμβάνεται από το πεδίο. Οι δύο αυτές ομάδες δεν έχουν το ίδιο μέγεθος ούτε έχουν την ίδια σύνθεση. Οι διαλυτές δεξαμενές οργανικών N συντίθενται, τουλάχιστον μερικώς, από το ευκόλως ανοργανοποιήσιμο N, και έτσι έχουν σημαντική επίδραση στις πολύ μικρές αλλά ταχέως μετασχηματιζόμενες δεξαμενές N όπως το $\text{NH}_4\text{-N}$. Δεδομένα από πείραμα που διεξήχθη στο Rothamsted (Dyke et al. 1983) δείχνουν ότι η δεξαμενή του Εκχυλισμένου Διαλυτού Οργανικού Αζώτου (Extracted Soluble Organic Nitrogen, ESON) στο έδαφος είναι πολύ μεγαλύτερη από την ποσότητα του οργανικού N που λαμβάνεται από το εδαφικό διάλυμα (Dissolved Organic Nitrogen, DON) μέσω λυσίμετρων ή αναρρόφησης από κεραμικά δισκία τοποθετημένα εντός της εδαφικής μάζας. Μάλιστα η DON ισοδυναμεί με το 2-10% της ομάδας ESON. Η ESON αντιπροσωπεύει το υπόστρωμα από το οποίο παράγονται τα NH_4^+ και τελικά τα NO_3^- στο έδαφος (Christou et al. 2006), χωρίς ωστόσο να θεωρείται το ίδιο δυναμική παράμετρος με τις ανόργανες μορφές του εδαφικού αζώτου (Murphy et al. 2000). Η διαλυτή οργανική ύλη, ωστόσο, είναι πιθανόν να αποτελεί μια σημαντική δεξαμενή στις διαδικασίες μετασχηματισμού του C και του N. Το παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η δειγματοληψία του εδαφικού διαλύματος παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες στην εφαρμογή της και αποτελεί μία επίπονη διαδικασία, καθιστά τη μελέτη των δεξαμενών της διαλυτής οργανικής ύλης απαραίτητη για την ορθή κατανόηση και πρόβλεψη της παραγωγής, μετασχηματισμού και της αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας στα γεωργικά συστήματα (Murphy et al. 2000).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πρώτης πειραματικής χρονιάς, η περιεκτικότητα του Εκχυλισμένου Διαλυτού Οργανικού Άνθρακα (Extracted Soluble Organic Carbon, ESOC) στο έδαφος κυμάνθηκε μεταξύ 114 και 203 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ την περίοδο της βλαστητικής ανάπτυξης και 49-106 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ την περίοδο της συγκομιδής. Αντίστοιχα, η περιεκτικότητά του ESON στο

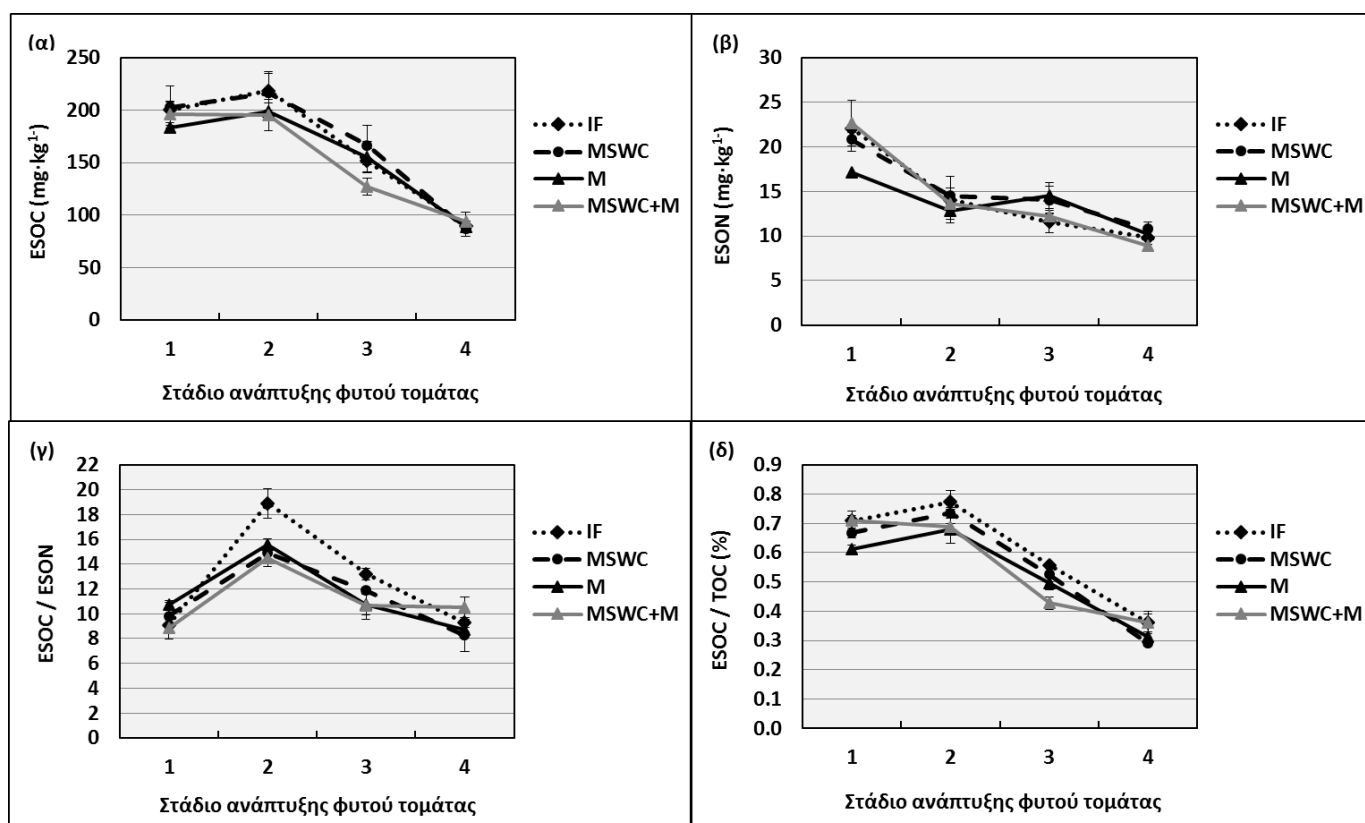
έδαφος κυμάνθηκε μεταξύ 11 και 23 mg·kg⁻¹ στο πρώτο στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και 6-11 mg·kg⁻¹ στο τελευταίο στάδιο. Παρόμοια αποτελέσματα διαπιστώθηκαν και στην εργασία των Ostrowska & Porębska (2015), όπου η συγκέντρωση του ESOC κυμάνθηκε περίπου 130-180 mg·kg⁻¹ στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους, αμέσως μετά τον Ο ορίζοντα.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.11 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του ESOC (Σχ. 4.11α) και του ESON (Σχ. 4.11β) στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους (0-15 εκ.) σε όλες τις μεταχειρίσεις, για όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού της α' καλλιεργητικής περιόδου, όπου και υπήρχαν μετρήσεις. Από το Σχήμα 4.11α παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις του ESOC είναι σταθερές ή αυξάνονται οριακά στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των φυτών σε όλες τις μεταχειρίσεις και κατόπιν μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, που μπορεί να οφείλεται στη μικροβιακή κατανάλωση της διαλυτής οργανικής ύλης στο τέλος του φθινοπώρου (Farrell et al. 2011; Filep & Rékási 2011; Christou et al. 2006). Οι συγκεντρώσεις του ESON εμφανίζουν μία απότομη μείωση μεταξύ 1^{ης} και 2^{ης} δειγματοληψίας και κατόπιν μειώνονται με πιο αργούς ρυθμούς. Στο Σχήμα 4.11γ παρουσιάζεται η εξέλιξη του λόγου ESOC/ESON στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), ενώ στο Σχήμα 4.11δ αποτυπώνεται η ποσοστιαία σύσταση του ESOC στον εδαφικό οργανικό άνθρακα (TOC) του επιφανειακού εδάφους. Γενικά σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας (0-50 εκ.) όλων των μεταχειρίσεων και σε όλη την καλλιεργητική περίοδο, ο λόγος ESOC/ESON βρέθηκε από 6.1 έως 18.9, ενώ η % περιεκτικότητα του TOC του εδάφους σε ESOC κυμάνθηκε μεταξύ 0,61 και 0,73 σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας (0-50 εκ.) στην πρώτη δειγματοληψία, 0,68-0,83 στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.) στη δεύτερη δειγματοληψία, 0,42-0,56 στο επιφανειακό στρώμα εδάφους στην τρίτη δειγματοληψία και 0,21-0,43 σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας στην τέταρτη και τελευταία δειγματοληψία. Σε άλλες μελέτες σε πειραματικούς αγρούς, το ESOC βρέθηκε να αντιπροσωπεύει το 0,05–0,40 % του TOC (Haynes 2005), ενώ σύμφωνα με τη μελέτη των Ostrowska & Porębska (2015) η ποσοστιαία αναλογία του ESOC στο TOC βρέθηκε από 0,5 έως 0,6% στον Ο ορίζοντα, 0,5–1,3 στους Α ορίζοντες (Α και ΑΕ) και 0,9–1,7 στους Β ορίζοντες, έως περισσότερο από 10 στον C ορίζοντα. Και οι δύο δείκτες εμφανίζουν έντονη μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, ακολουθώντας την ίδια τάση που έχει ο ESON. Οι δύο αυτοί δείκτες θεωρείται ότι μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τις βραχυχρόνιες βιοχημικές διεργασίες που συντελούνται σε μία καλλιεργητική περίοδο. Μάλιστα, οι Ostrowska & Porębska (2015) έδειξαν ότι το ποσοστό επί τοις εκατό του ESON στο TOC φάνηκε να είναι ένας καλύτερος δείκτης της ανοργανοποίησης της οργανικής ύλης του εδάφους σε σχέση με τον λόγο C / N.

Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν τη σημασία της διαλυτής οργανικής ύλης που αποτελεί ένα δυναμικό κλάσμα της οργανικής ουσίας του εδάφους, παρουσιάζοντας έντονη μεταβλητότητα, συσχετιζόμενη πολλές φορές με τη μικροβιακή βιομάζα, τη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους (Clivot et al. 2017; Liang et al. 2011), την ανάπτυξη των φυτών (Murphy et al. 2000) και της υπερβόσκησης (Stamati et al. 2011). Η περίοδος ταχείας ανάπτυξης των φυτών τόσο πάνω όσο και κάτω από το έδαφος (ανάπτυξη ρίζας / ανοργανοποίηση και εκκρίματα ρίζας) φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο στη δυναμική του ESON. Η βιομάζα της ριζόσφαιρας είναι στο μέγιστο της μετά την άνθηση και κατά την ωρίμανση η ριζοεναπόθεση C μπορεί να είναι διπλάσια από την ποσότητα του C που περιέχεται στις μακρόριζες. Αυτό αντιπροσωπεύει μια σημαντική μεταφορά ενέργειας από τα φυτά στους μικροοργανισμούς του εδάφους (Gregory 2006) και κατ' επέκταση στις δεξαμενές ESON και ESON, εφόσον η διαλυτή οργανική ύλη μπορεί να προέρχεται από το θάνατο των μικροβιακών κυττάρων και τις λύσεις (Liang et al. 2011). Τα αποτελέσματα είναι

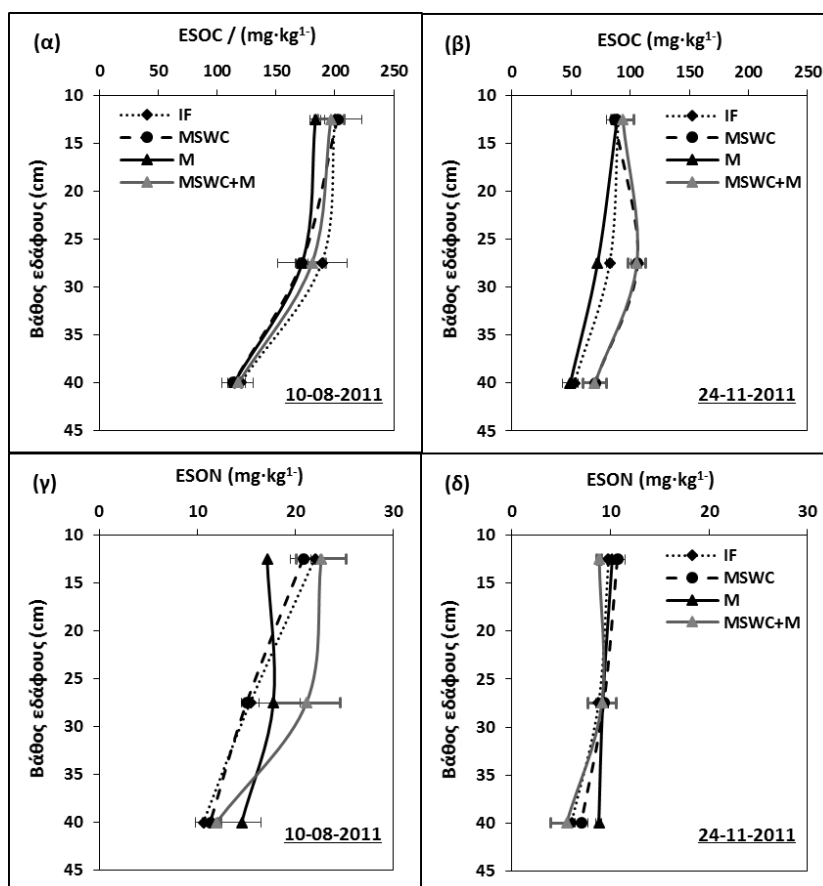
σε ακολουθία με παρόμοιες εργασίες (D. V. Murphy et al. 2007; Liang et al. 2011), όπου ο δείκτης ESOC και κυρίως το ESON εμφανίζουν έντονη μεταβλητότητα στη διάρκεια μίας καλλιεργητικής περιόδου.

Εξετάζοντας την επίδραση του είδους της λίπανσης στις τιμές του ESOC και του ESON στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (Σχ. 4.11α και 4.11β), παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η παραπάνω διαπίστωση έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της εργασίας των Liang et al. (2011), όπου δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στη ESON στις επεξεργασίες ανόργανης και οργανικής λίπανσης (κοπριά), καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου αραβοσίτου, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους. Αντίθετα, η προσθήκη οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος σε μια καλλιέργεια τομάτας για 2 έτη (Tu et al. 2006), είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ESOC στις οργανικές μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα, που στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ανόργανο συνθετικό λίπασμα, όπως στην περίπτωση μας. Επίσης, στην εργασία των Khalili & Nourbakhsh (2012), η εφαρμογή χημικού λιπάσματος δεν επηρέασε τη συγκέντρωση του ESON στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους σε σύγκριση με το την προσθήκη κοπριάς, που αύξησε σημαντικά τα επίπεδα ESON.



Σχήμα 4.11. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στις συγκεντρώσεις (α) του εκχυλισμένου διαλυτού οργανικού άνθρακα (ESOC), (β) του εκχυλισμένου διαλυτού οργανικού αζώτου (ESON), (γ) του λόγου ESOC/ESON και (δ) η ποσοστιαία σύσταση του ESOC στον εδαφικό οργανικό άνθρακα, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστητική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπόδεση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η μεταβολή του ESOC και του ESON στο εδαφικό προφίλ στην αρχή και στο τέλος του πρώτου καλλιεργητικού κύκλου, απ' όπου παρατηρούμε ότι οι τιμές του ESON μειώνονται σημαντικά μετά τα 30 εκ. εδάφους σε όλες τις μεταχειρίσεις, πλην της "M". Το ίδιο παρατηρείται για τις τιμές του ESOC που μειώνονται σε όλες τις διαχειρίσεις, χωρίς καμία εξαίρεση. Η διαφορετική συμπεριφορά της "M" μεταχείρισης όσον αφορά στις αυξημένες συγκεντρώσεις του ESN στο στρώμα εδάφους 30-50 εκ., ενδεχομένως υποδεικνύει ότι το άζωτο του εδαφικού διαλύματος από τη μεταχείριση αυτή μπορεί να αποτελέσει μία σημαντική πηγή απώλειας N από το έδαφος, χωρίς ωστόσο να είναι ξεκάθαρο αν το ESON ανοργανοποιείται πριν εγκαταλείψει το επιφανειακό έδαφος (Murphy et al. 2000). Την πιθανή διαφυγή του ESON από το έδαφος, χωρίς πρωτίστως τη μετατροπή του σε NH_4^+ και NO_3^- , ενισχύει η εργασία που εκπόνησαν οι Khalili & Nourbakhsh (2012) κατά την οποία διαπίστωσαν ότι η ESON στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους δεν βιοδιασπάται εύκολα και έχει ελάχιστη συμβολή στην ανοργανοποίηση του αζώτου.

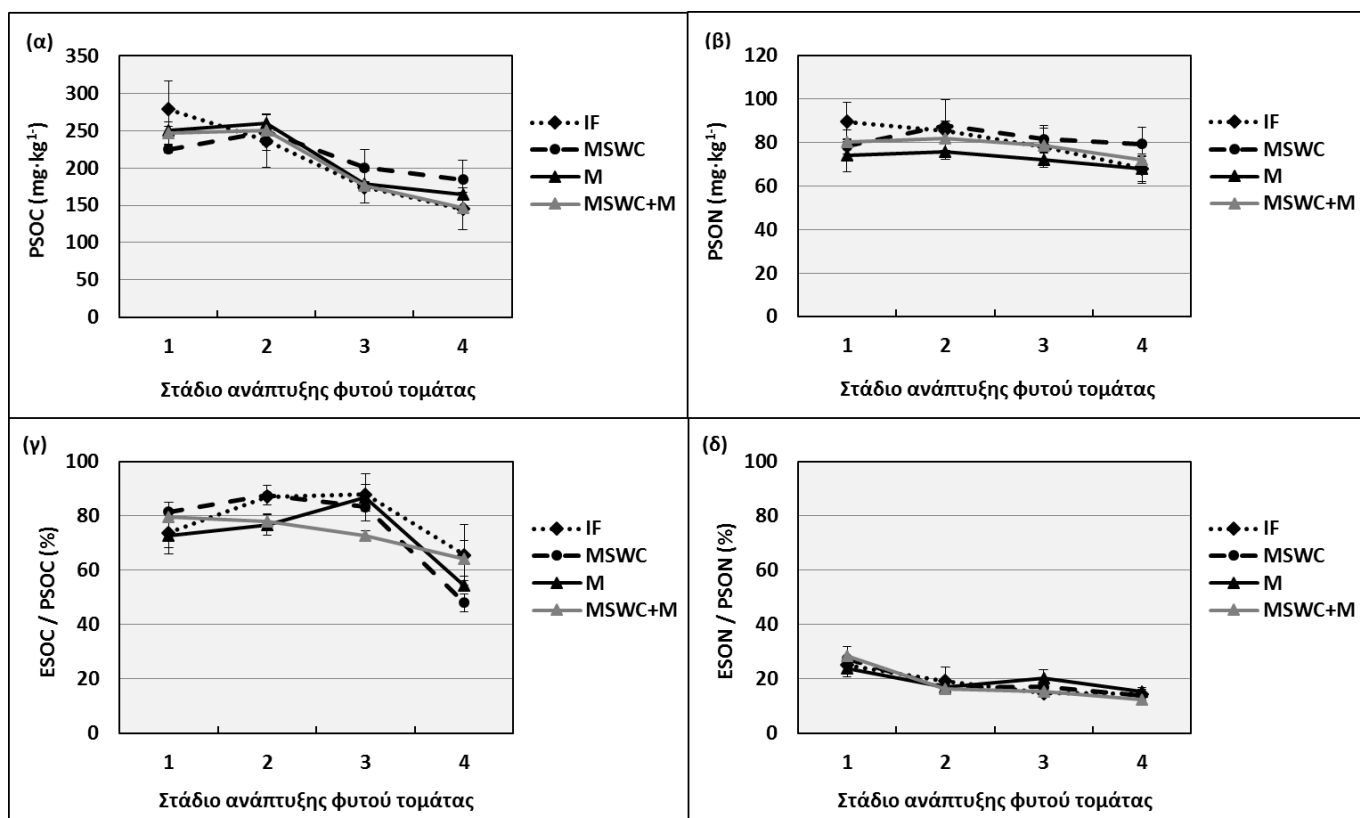


Σχήμα 4.12. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυτού οργανικού άνθρακα (ESOC, mg/kg) και οργανικού αζώτου (ESON, mg/kg) στην αρχή (Διαγραμ. α & γ) και στο τέλος της περιόδου (Διαγραμ. β & δ), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

4.6.4.3 Δυνητικά Διαλυτή Οργανική Ύλη

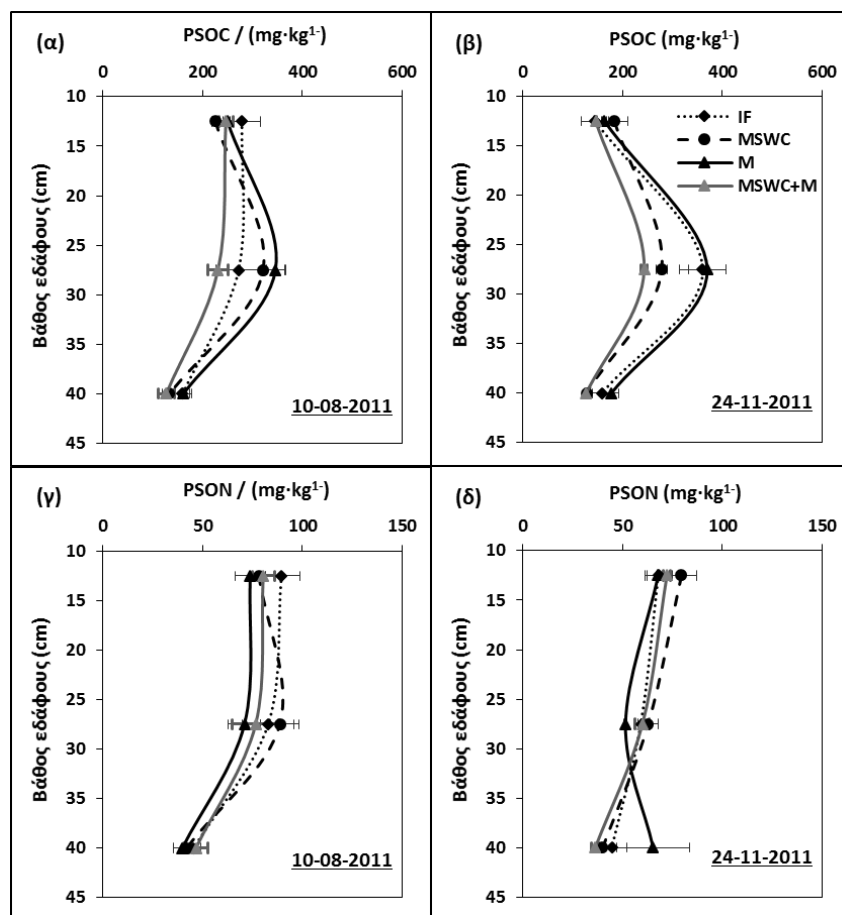
Η Δυνητικά Διαλυτή Οργανική Ύλη (PSOM) του εδάφους περιγράφει τη μέγιστη συγκέντρωση της διαλυτής οργανικής ύλης κατά τη διάρκεια της 7ήμερης επώασης των εκχυλισμένων δειγμάτων εδάφους και αποτελεί μία παράμετρο που εκφράζει την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει την οργανική ύλη σε διαλυμένη μορφή. Παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα και εξαρτάται από την σύνθεση της εδαφικής οργανικής ύλης. Επίσης, η τιμή του Δυνητικά Διαλυτού Οργανικού Αζώτου (Potential Soluble Organic Nitrogen, PSON) θα μπορούσε να είναι ενδεικτική της αποσύνθεσης της ασταθούς δεξαμενής οργανικού N σε ιδανικές συνθήκες περιβάλλοντος και να αποτελέσει έναν δείκτη του μεγέθους της δεξαμενής αυτής (Stamati et al. 2011; Burton et al. 2007).

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του Δυνητικά Διαλυτού Οργανικού Άνθρακα (Potential Soluble Organic Carbon, PSOC) (Σχ. 4.12α) και του Δυνητικά Διαλυτού Οργανικού Αζώτου (Potential Soluble Organic Nitrogen, ESON) (Σχ. 4.13β), στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.). Επίσης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται τα ποσοστά του ESOC και του ESON επί των μέγιστων τιμών τους που εκφράζονται με τις παραμέτρους PSOC και PSON, αντίστοιχα (Σχ. 4.13γ και Σχ. 4.13δ, αντίστοιχα). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η περιεκτικότητα του PSOC στο έδαφος κυμάνθηκε μεταξύ 127 και 346 mg·kg⁻¹ την περίοδο της βλαστητικής ανάπτυξης και 127-369 mg·kg⁻¹ την περίοδο της συγκομιδής. Αντίστοιχα, η περιεκτικότητα του PSON στο έδαφος κυμάνθηκε μεταξύ 40 και 89 mg·kg⁻¹ την περίοδο της βλαστητικής ανάπτυξης και 36-79 mg·kg⁻¹ την περίοδο της συγκομιδής. Επίσης, ο ESOC κυμάνθηκε από 56 έως 96% του PSOC σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας (0-50 εκ.) στην πρώτη δειγματοληψία, από 73 έως 88% στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.) στη δεύτερη και τρίτη δειγματοληψία και από 20 έως 66% σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας στην τέταρτη και τελευταία δειγματοληψία (Σχ. 4.13γ). Αντίστοιχα, το ESON κυμάνθηκε από 17 έως 37% του PSON σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας (0-50 εκ.) στην πρώτη δειγματοληψία, από 15 έως 20% στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.) στη δεύτερη και τρίτη δειγματοληψία και από 12 έως 18% σε όλο το προφίλ της ριζόσφαιρας στην τέταρτη και τελευταία δειγματοληψία (Σχ. 4.13δ).



Σχήμα 4.13. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στις συγκεντρώσεις (α) του δυνητικά διαλυτού οργανικού άνθρακα (PSOC), (β) του δυνητικά διαλυτού οργανικού αζώτου (PSON), (γ) του λόγου ESOC/PSOC και (δ) του λόγου ESON/PSON, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπόδεση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται η μεταβολή του PSOC και του PSON στο εδαφικό προφίλ ριζόσφαιρας στην αρχή και στο τέλος του πρώτου καλλιεργητικού κύκλου. Και στις 2 περιπτώσεις οι τιμές του PSON και του PSOC μειώνονται σημαντικά μετά τα 30 εκ. εδάφους σε όλες τις μεταχειρίσεις, με μόνη εξαίρεση την περίπτωση της “M” μεταχείρισης όπου η τιμή του PSON είναι στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στις άλλες μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4.14. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του δυνητικά διαλυτού οργανικού άνθρακα (PSOC, mg/kg) και αζώτου (PSON, mg/kg) στην αρχή (Διαγράμ. α & γ) και στο τέλος της περιόδου (Διαγράμ. β & δ), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, “IF”, του κόμποστ ΑΣΑ, “MSWC”, της κοπριάς, “M”, και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, “MSWC+M”. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

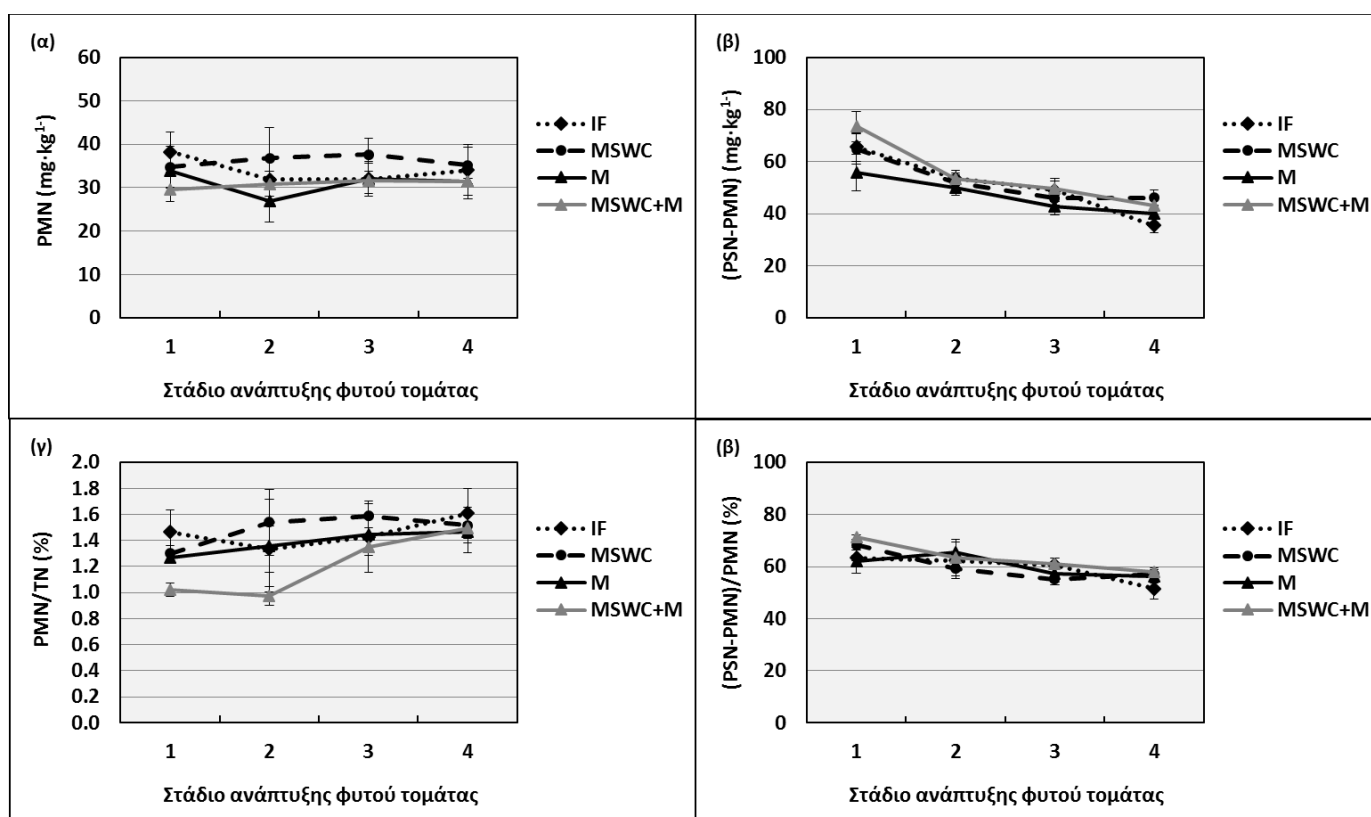
4.6.4.4 Δυνητικά Ανοργανοποιήσιμο Άζωτο

Το Δυνητικά Ανοργανοποιήσιμο Άζωτο (PMN) είναι ένα μέτρο του ενεργού κλάσματος του οργανικού N του εδάφους, το οποίο είναι κυρίως υπεύθυνο για την απελευθέρωση του ανοργανοποιήσιμου N μέσω μικροβιακής δράσης (Campbell & Curtin 2007). Αποτελεί έναν βιολογικό δείκτη που σχετίζεται με την παραγωγικότητα του εδάφους και το δυναμικό εφοδιασμού N. Το PMN αποτελείται από μια ετερογενή σειρά οργανικών υποστρωμάτων που περιλαμβάνουν τη μικροβιακή βιομάζα, υπολείμματα πρόσφατων καλλιεργειών και χούμο (Campbell & Curtin 2007).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πρώτης πειραματικής χρονιάς, οι τιμές του PMN σε όλες τις μεταχειρίσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 27 και 39 mg·kg⁻¹ και ο μέσος όρος των τιμών ήταν 33 mg·kg⁻¹. Στο Σχήμα 4.15α φαίνεται ότι οι τιμές του PMN του επιφανειακού στρώματος εδάφους, σε όλες τις μεταχειρίσεις, δεν παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές μεταξύ των σταδίων ανάπτυξης του φυτού. Επίσης, στο ίδιο βάθος εδάφους (0-15 εκ.) οι συγκεντρώσεις αυτές δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από το είδος της μεταχείρισης. Στο Σχήμα 4.15β παρουσιάζεται η μεταβολή του (δυνητικά) διαλυτού αζώτου που δεν υφίσταται

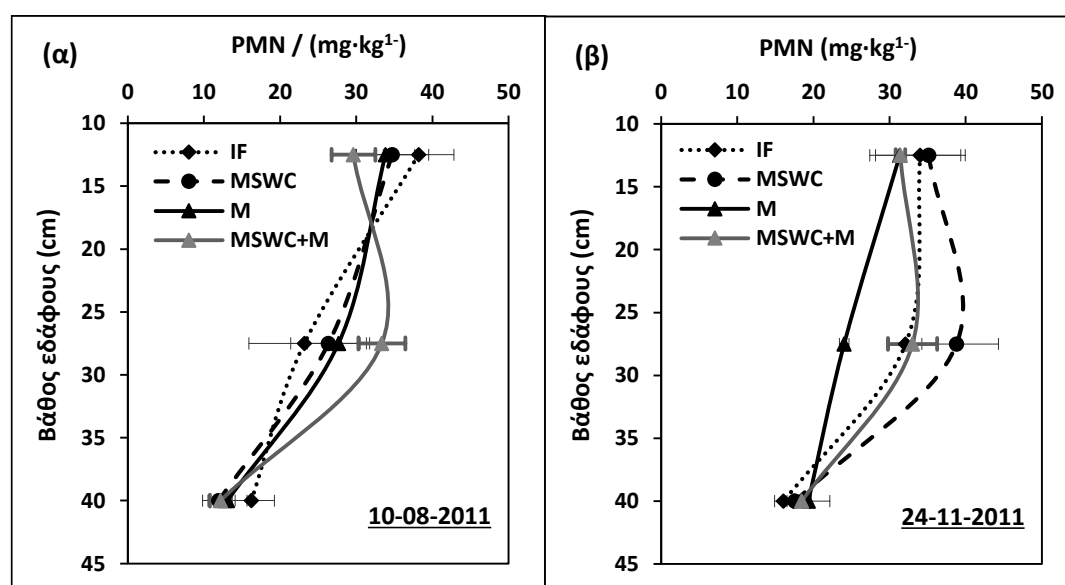
ανοργανοποίηση (PSN-PMN) στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε κάθε στάδιο ανάπτυξης του φυτού. Και στην περίπτωση αυτή οι συγκεντρώσεις του (PSN-PMN) δεν μεταβάλλονται σημαντικά καθώς αναπτύσσεται το φυτό. Το μέσο ποσοστό του αζώτου που μετατρέπεται σε διαθέσιμες για το φυτό (ή ανόργανες) μορφές υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού και χρόνου βρέθηκε ότι είναι 35%, ενώ το κλάσμα που δεν υφίσταται ανοργανοποίηση είναι 65% (Σχ. 4.15δ).

Έχει προταθεί ο λόγος του ανοργανοποιήσιμου αζώτου προς το εδαφικό ολικό άζωτο ότι θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως ευαίσθητο δείκτη των μεταβολών της SOM (Haynes 2005). Στην περίπτωση του πειραματικού αγρού της τομάτας, η % αναλογία του στο συνολικό άζωτο του επιφανειακού εδάφους (PMN/TN) κυμάνθηκε από 1 έως 1,6% (Σχ. 4.15γ). Τα αποτελέσματα αυτά είναι παρόμοια με άλλες εργασίες που έχουν εκπονηθεί (Haynes 2005), όπου το PMN αντιπροσωπεύει το 0,8-12% (συνήθως 1,5-5 %) του εδαφικού ολικού αζώτου.



Σχήμα 4.15. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στις συγκεντρώσεις του (α) δυνητικά ανοργανοποιήσιμου αζώτου (PMN), (β) του διαλυτού οργανικού αζώτου που δεν υφίσταται ανοργανοποίηση και (γ) του λόγου PMN/TN και (δ) του % ποσοστού της δυνητικά διαλυτού αζώτου που ανοργανοποιείται (PSN-PMN)*PSN1- στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλαστητική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπόδεση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Η συνολική ποσότητα νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου που ανοργανοποιήθηκε υπό συνθήκες επώασης σε όλες τις μεταχειρίσεις κυμάνθηκε από 16 έως 19 mg·kg⁻¹ στο βάθος των 30-50 εκατοστών (Σχ. 4.16), παρουσιάζοντας το μικρότερο δυναμικό ανοργανοποίησης σε σχέση με τα ανώτερα στρώματα του εδάφους και αυτό οφείλεται κυρίως στις μειωμένες ποσότητες ολικού αζώτου και οργανικής ουσίας που υπάρχουν σε αυτό το βάθος. Επίσης, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική επίδραση των μεταχειρίσεων στις τιμές του PMN στο εδαφικό προφίλ της ριζόσφαιρας εκτός από την τελευταία δειγματοληψία, όπου οι τιμές του PMN της “M” μεταχείρισης μειώνονται γραμμικά με το βάθος, ενώ των υπολοίπων μεταχειρίσεων εμφανίζουν απότομη μείωση μετά τα 30 εκ.



Σχήμα 4.16. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της συγκέντρωσης του δυνητικά ανοργανοποιήσιμου αζώτου (PMN, mg/kg) στην αρχή (Διαγράμμα α) και στο τέλος της περιόδου (Διάγραμμα β), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, “IF”, του κόμποστ ΑΣΑ, “MSWC”, της κοπριάς, “M”, και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, “MSWC+M”. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

4.6.4.5 Δείκτης Αρωματικότητας Οργανικής Ύλης

Ο υπολογισμός της μεταβολής της διαλυτής οργανικής ύλης κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης μίας καλλιέργειας, αποτελεί έναν κρίκο στην αλυσίδα της μελέτης των κύκλων των θρεπτικών και του άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα. Ωστόσο, για την καλύτερη κατανόηση των μεταβολών αυτών, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν άμεσα τις βιοχημικές αυτές μεταβολές σε έναν καλλιεργητικό κύκλο, όπως είναι ο χαρακτηρισμός της διαλυτής οργανικής ύλης ως προς τη βιοδιαθεσιμότητα, που εξαρτάται από τη σύσταση της ESOM. Για παράδειγμα, τα υδρόφοβα οξέα είναι λιγότερο προσβάσιμα στη μικροβιακή αποικοδόμηση από ότι οι υδρόφιλες ενώσεις. Επίσης, οι αρωματικές δομές είναι εξαιρετικά σταθερές, ενώ οι υδατάνθρακες λειτουργούν ως το κύριο υπόστρωμα για τους μικροοργανισμούς (Kalbitz et al. 2003a). Για την μέτρηση των παραπάνω ιδιοτήτων συνήθως πραγματοποιούνται χημικές και βιοχημικές αναλύσεις. Ωστόσο, οι μέθοδοι που βασίζονται στην απορρόφηση υπεριώδων ακτίνων προτιμώνται έναντι των βιολογικών και συμβατικών χημικών μεθόδων επειδή είναι σχετικά απλές, καταναλώνουν λιγότερα χημικά

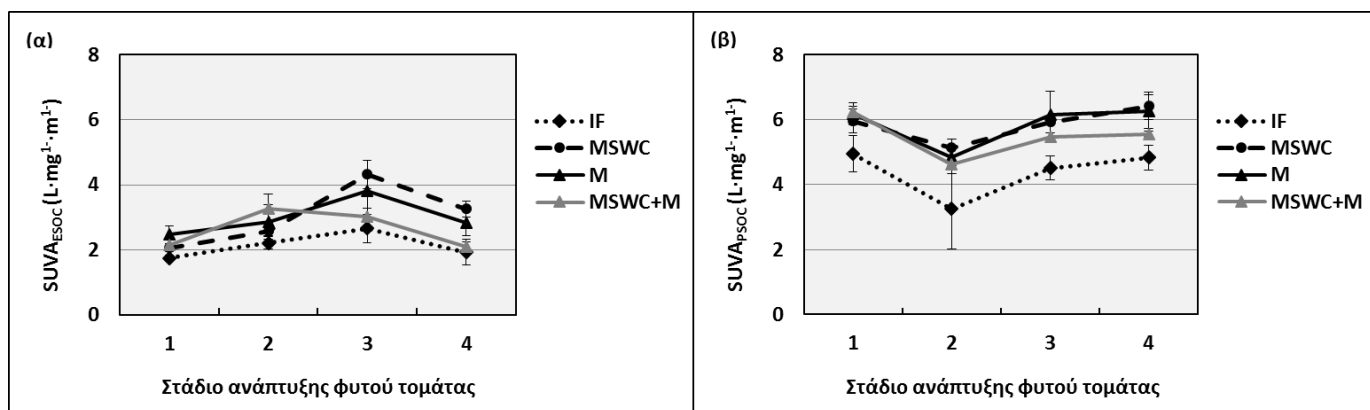
Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

αντιδραστήρια και προσαρμόζονται εύκολα για συνήθεις χρήσεις στα εργαστήρια αναλύσεων εδάφους. Η μέτρηση της ειδικής απορρόφησης στα 280 nm (SUVA) αποτελεί την πιο απλή μέτρηση για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε αρωματικό άνθρακα στα υδάτινα συστήματα (Weishaar et al. 2003) και στα εκχυλίσματα εδάφους (Kalbitz et al. 2003a; Kalbitz et al. 2003b; Höll et al. 2009).

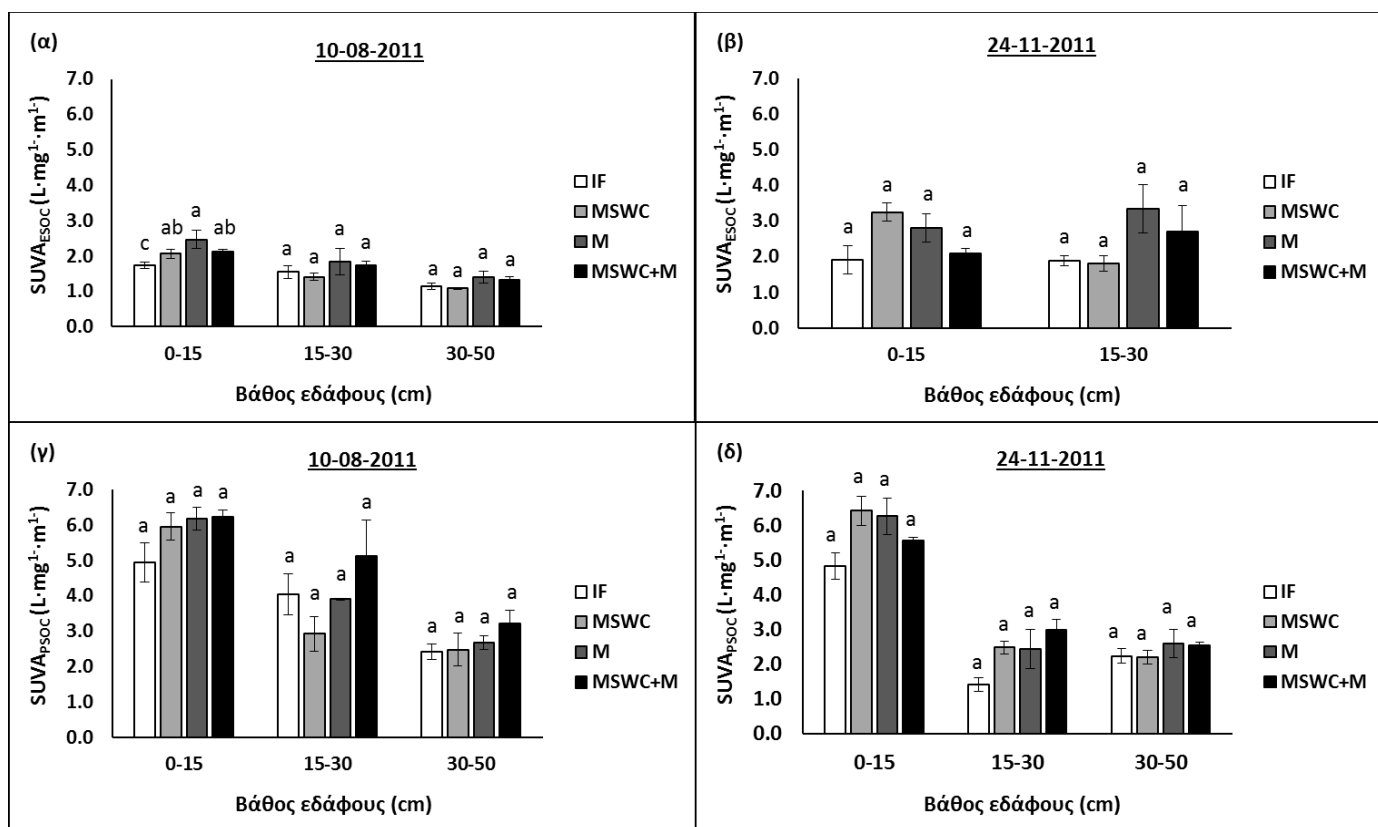
Η UV απορρόφηση μετρήθηκε στα εκχυλισμένα κλάσματα που επώαστηκαν για μία ημέρα και για μία εβδομάδα και προσδιορίστηκε η SUVA₂₈₀ (ειδική UV απορρόφηση στα 280 nm), αλλά και η SUVA₂₅₄ (ειδική UV απορρόφηση στα 254 nm). Πιο αναλυτικά, υπολογίστηκε σε κάθε στάδιο ανάπτυξης του φυτού η SUVA_{ESOC} και η SUVA_{PSOC}, που αντιστοιχούν στο λόγο της απορρόφησης της UV ακτινοβολίας στα 280 nm προς τη συγκέντρωση του ESOC (mg/L) και του PSOC (mg/L), αντίστοιχα. Η οργανική ύλη που εκχυλίστηκε από το έδαφος των οργανικών μεταχειρίσεων (“MSWC”, “M”, “MSWC+M”) παρουσίασε υψηλότερα ποσοστά αρωματικών ουσιών στο βάθος 0-15 εκ. σε σύγκριση με τη μεταχείριση που εφαρμόστηκε συμβατική ανόργανη λίπανση (“IF”) (Σχ. 4.17α και Σχ. 4.18α). Αυτό σημαίνει ότι ο ESOC των οργανικών μεταχειρίσεων βιοδιασπάται πιο αργά από ότι στη “IF”, συνεισφέροντας με αυτόν τον τρόπο στην απορρόφηση του ESOC στα εδαφικά τεμαχίδια και στην αποθήκευση θρεπτικών στοιχείων για μελλοντική χρήση από τα φυτά της καλλιέργειας. Επίσης, παρατηρείται αύξηση των τιμών της SUVA_{ESOC} στις μεταχειρίσεις “MSWC” και “M” στο στάδιο της ωρίμανσης των καρπών και ακολουθεί μία μικρή πτώση στο τελευταίο στάδιο της συγκομιδής. Γενικά, οι τιμές της SUVA_{ESOC} στο επιφανειακό στρώμα εδάφους κυμάνθηκαν μεταξύ 1,7 και 3,3 L/mg-m, ενώ ο μέσος όρος όλων των τιμών ήταν 2,3 L/mg-m. Παρόμοιες τιμές αναφέρονται και από άλλους ερευνητές (Kalbitz et al. 2003b; Höll et al. 2009; Stamati et al. 2011) όπου το εύρος τους κυμάνθηκε από 0,16 έως 9,7 L/mg-m και ο μέσος όρος ήταν 2,15 L/mg-m. Ομοίως οι τιμές η τιμή της ειδικής UV απορρόφησης στα 254 nm κυμάνθηκε από 2,5 έως 5,1 L/mg-m, με μέσο όρο τιμών 3,5 L/mg-m. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και από άλλες ερευνητικές ομάδες (Fox et al. 2017; Smemo et al. 2007; Strack et al. 2015), όπου οι τιμές της SUVA₂₅₄ κυμάνθηκαν ήταν 2,1-5,5 L/mg-m και μέσο όρο 4,2 L/mg-m.

Εξετάζοντας τις τιμές της SUVA_{ESOC} στα βάθη 15-30 και 30-50 εκ. (Σχ. 4.18α και Σχ. 4.18β) διαπιστώνουμε ότι η προσθήκη κοπριάς στο έδαφος (“M” και “MSWC+M” μεταχείριση) οδήγησε σε μικρή αύξηση του περιεχομένου του ESOC σε αρωματικές ενώσεις. Επίσης, στο τέλος της α’ καλλιεργητικής περιόδου οι τιμές της SUVA_{ESOC} στη “M”, “MSWC+M”, “MSWC” και “IF” μεταχείριση, στο βάθος 15-30 εκ. ήταν αυξημένες κατά 83%, 55%, 28% και 22% , αντίστοιχα, σε σχέση με την πρώτη δειγματοληψία. Μάλιστα, η τιμή της SUVA_{ESOC} της “M” μεταχείρισης (3,4 L/mg-m) στο βάθος αυτό (15-30 εκ), ήταν η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.

Συγκρίνοντας τις τιμές της SUVA_{ESOC} και της SUVA_{PSOC} παρατηρούμε ότι ο δυνητικά διαλυτός οργανικός άνθρακας έχει περισσότερες αρωματικές ομάδες στη σύστασή του από το ESOC. Για το επιφανειακό έδαφος, η SUVA_{PSOC} υπολογίστηκε 40-190% υψηλότερη της SUVA_{ESOC}. Παρόμοια αποτελέσματα εμπλουτισμού της διαλυτής οργανικής ύλης με αρωματικές ουσίες παρατηρούνται και για το βάθος 15-30 εκ., εκτός από τις περιπτώσεις των “IF” και “M” μεταχειρίσεων, όπου στο τέλος της α’ καλλιεργητικής περιόδου διαπιστώθηκε ότι οι τιμές SUVA_{PSOC} ήταν μικρότερες από τις SUVA_{ESOC}.



Σχήμα 4.17. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στο λόγο της απορρόφησης της UV ακτινοβολίας στα 280 nm προς τη συγκέντρωση (α) του ESO_C (SUVA_{ESOC}) και (β) του PSO_C (SUVA_{PSOC}), στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (1: Βλασθητική ανάπτυξη, 2: Άνθηση και καρπώδεση, 3: Ωρίμανση καρπών, 4: Συγκομιδή). Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.



Σχήμα 4.18. Διαγράμματα εδαφικού προφίλ 1ου έτους που δείχνουν τη διακύμανση της SUVA_{ESOC} και της SUVA_{PSOC} στην αρχή (Διαγραμ. α & γ) και στο τέλος της περιόδου (Διαγραμ. β & δ), για τις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, “IF”, του κόμποστ ΑΣΑ, “MSWC”, της κοπριάς, “M”, και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, “MSWC+M”. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα. Οι μπάρες με διαφορετικά γράμματα (εντός της ίδιας δειγματοληψίας) υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.

4.6.5 Ανόργανες μορφές αζώτου

Για την καλύτερη κατανόηση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών αλλά και της δυναμικής του αζώτου στο έδαφος κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, αλλά και σε βάθος τετραετίας, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των συγκεντρώσεων του νιτρικού ($\text{NO}_3\text{-N}$) και του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$) για όλα τα έτη, σε 2 βάθη (0-15 και 15-30 εκ.), εκτός από την πρώτη χρονιά όπου ο προσδιορισμός του διαθέσιμου εδαφικού αζώτου έγινε μόνο για το επιφανειακό στρώμα εδάφους. Η επίδραση, λοιπόν, των τεσσάρων μεταχειρίσεων στις συγκεντρώσεις του ανόργανου αζώτου στο έδαφος στα 4 έτη πειραματισμού παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.19 και 4.20. Επίσης, στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται οι ποσότητες του εδαφικού ανόργανου αζώτου σε κιλά ανά στρέμμα, για κάθε καλλιεργητική περίοδο και στον Πίνακα 4.13 το ποσοστό του νιτρικού αζώτου που περιέχεται στο συνολικό εδαφικό άζωτο.

4.6.5.1 Διαθέσιμο Εδαφικό Άζωτο

Οι αναλύσεις εδάφους (Πίν. 4.12) έδειξαν ότι η συνολική ποσότητα του διαθέσιμου εδαφικού αζώτου κυμάνθηκε μεταξύ 4,3 και 8,5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ για το βάθος των 0-15 εκ. το πρώτο έτος, 11,3 - 40,2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ για το βάθος των 0-30 εκ. το δεύτερο έτος, 10,4 - 56,4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ για το βάθος των 0-30 εκ. το τρίτο έτος και 8,4 - 46,3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ για το βάθος των 0-30 εκ. το τέταρτο έτος. Σημειώνεται ότι ως φαινόμενο ειδικό βάρος έχει ληφθεί η τιμή 1.21 για βάθος 0-15 και 1.24 για βάθος 15-30 εκ. Συνολικά το **90% περίπου του ανόργανου Ν** στο στρώμα εδάφους 0-30 εκ. (έτη 2012-14) **προήλθε από τα νιτρικά ιόντα** (Πίν. 4.13), υποδηλώνοντας ότι ο ρυθμός νιτροποίησης είναι υψηλός και το μεγαλύτερο μέρος των αμμωνιακών ιόντων μετατρέπονται ταχύτατα σε νιτρικά.

Από τον Πίνακα 4.12 φαίνεται, επίσης, ότι η ποσότητα του ανόργανου αζώτου ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους ήταν διαφορετική μεταξύ των μεταχειρίσεων, αλλά και μεταξύ των σταδίων ανάπτυξης του φυτού και των καλλιεργητικών κύκλων. Ενώ την πρώτη χρονιά δεν υπήρχε σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων, τη δεύτερη χρονιά η προσθήκη κοπριάς στο έδαφος συνέβαλε σε αυξημένη συσσώρευση ανόργανου αζώτου στο έδαφος, σε αντίθεση με την εφαρμογή μόνο κόμποστ (*“MSWC”*), που παρουσίασε παραπλήσιες τιμές ποσοτήτων ολικού ανόργανου αζώτου με τη συμβατική λίπανση. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται και την επόμενη καλλιεργητική περίοδο (2013), με τη διαφορά ότι η *“MSWC”* μεταχείριση παρουσιάζει αρκετά υψηλότερες τιμές αποθεματικών ανόργανου αζώτου σε σχέση με το 2012. Φαίνεται ότι η συσσώρευση οργανικής ουσίας στη *“MSWC”* μεταχείριση οδήγησε σε σταδιακή απελευθέρωση διαθέσιμου αζώτου με το πέρασμα των ετών, με αποκορύφωμα τον Ιούνιο του 2014 όπου οι ποσότητες ανόργανου αζώτου στη *“MSWC”* μεταχείριση είναι αρκετά υψηλότερες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Εξετάζοντας, επίσης, τα αποτελέσματα των αναλύσεων των εδαφών σε ανόργανο άζωτο κατά τη διάρκεια κάθε καλλιεργητικής περιόδου, παρατηρούμε ότι την πρώτη και δεύτερη περίοδο δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των σταδίων ανάπτυξης του φυτού, σε αντίθεση με το τρίτο έτος όπου παρατηρείται ένα μέγιστο κατά το στάδιο ωρίμανσης των καρπών. Τέλος, παρατηρούμε ότι στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου των τριών τελευταίων ετών, οι μεταχειρίσεις *“M”* και *“MSWC+M”* παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες ποσότητες διαθέσιμου αζώτου στα πρώτα 30 εκατοστά εδάφους.

Πίνακας 4.12. Ποσότητες εδαφικού ανόργανου αζώτου σε $\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}$ ή $\text{kgN}\cdot\text{stremma}^{-1}$ εδάφους στις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι τιμές εντός παρενθέσεων αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση των μέσων τιμών.

1η Καλλιεργητική Περίοδος (2011)_Βάθος 0-15 εκ.				
Μεταχείριση	10/8/2011	10/9/2011	15/10/2011	24/11/2011
IF	7.6 (± 0.1)	5.6 (± 0.6)	4.7 (± 0.6)	4.5 (± 0.3)
MSWC	7.3 (± 0.3)	5.3 (± 0.1)	5.1 (± 0.3)	4.8 (± 0.4)
M	7.6 (± 0.2)	5.2 (± 0.1)	5.6 (± 0.3)	4.9 (± 0.0)
MSWC+M	8.5 (± 0.1)	5.0 (± 0.2)	4.8 (± 0.2)	4.3 (± 0.0)
2η Καλλιεργητική Περίοδος (2012)_Βάθος 0-30 εκ.				
Μεταχείριση	28/5/2012	27/6/2012	31/7/2012	8/10/2012
IF	13.5 (± 2.6)	13.7 (± 2.7)	12.9 (± 4.5)	13.4 (± 5.6)
MSWC	17.3 (± 5.2)	11.3 (± 4.0)	14.4 (± 1.3)	12.0 (± 2.2)
M	34.0 (± 9.8)	40.2 (± 4.9)	36.8 (± 5.8)	27.7 (± 7.4)
MSWC+M	26.9 (± 2.4)	21.4 (± 4.8)	18.6 (± 2.3)	18.0 (± 3.7)
3η Καλλιεργητική Περίοδος (2013)_Βάθος 0-30 εκ.				
Μεταχείριση	22/4/2013	24/5/2013	10/7/2013	10/9/2013
IF	10.4 (± 1.0)	12.3 (± 2.6)	23.1 (± 7.7)	13.1 (± 1.3)
MSWC	13.1 (± 0.7)	25.4 (± 3.9)	42.8 (± 3.9)	18.9 (± 0.6)
M	21.1 (± 2.8)	29.0 (± 0.5)	56.4 (± 4.9)	25.2 (± 4.0)
MSWC+M	14.1 (± 3.6)	38.0 (± 5.4)	48.5 (± 8.0)	25.5 (± 6.0)
4η Καλλιεργητική Περίοδος (2014)_Βάθος 0-30 εκ.				
Μεταχείριση	18/6/14		9/10/2014	
IF	24.4 (± 2.1)		8.4 (± 1.8)	
MSWC	46.3 (± 3.8)		13.0 (± 2.3)	
M	28.2 (± 2.6)		17.8 (± 2.7)	
MSWC+M	32.4 (± 3.3)		20.0 (± 2.5)	

Πίνακας 4.13. Επί τοις εκατό (%) περιεκτικότητα του εδαφικού ανόργανου αζώτου σε νιτρικό άζωτο στις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, "MSWC+M".

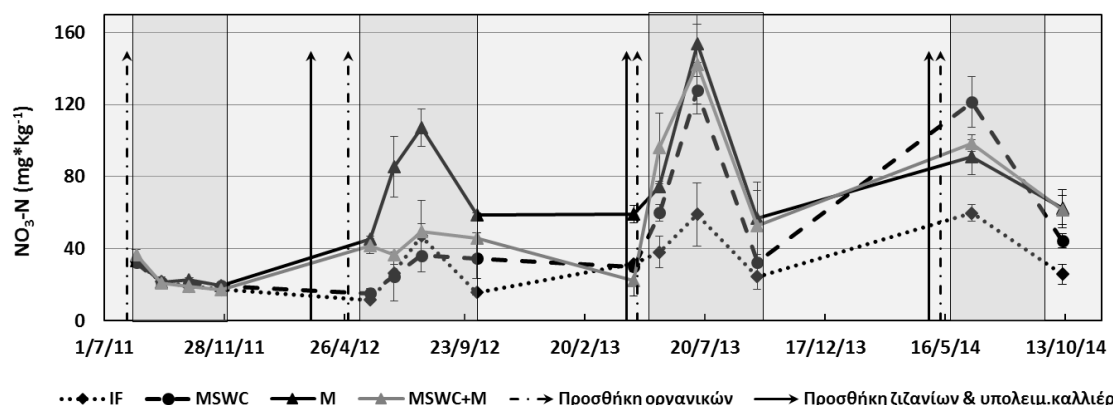
1η Καλλιεργητική Περίοδος (2011) - βάθος 0-15 εκ.				
Μεταχείριση	10/8/2011	10/9/2011	15/10/2011	24/11/2011
IF	46	36	32	40
MSWC	80	72	74	74
M	81	74	75	74
MSWC+M	86	75	72	73
2η Καλλιεργητική Περίοδος (2012) - βάθος 0-30 εκ.				
Μεταχείριση	28/5/2012	27/6/2012	31/7/2012	8/10/2012
IF	82	86	85	90
MSWC	89	79	86	88
M	93	94	95	94
MSWC+M	93	89	89	93
3η Καλλιεργητική Περίοδος (2013) - βάθος 0-30 εκ.				
Μεταχείριση	22/4/2013	24/5/2013	10/7/2013	10/9/2013
IF	79	95	96	96
MSWC	75	93	96	90
M	92	85	96	95
MSWC+M	73	92	95	88
4η Καλλιεργητική Περίοδος (2014) - βάθος 0-30 εκ.				
Μεταχείριση	18/6/2014	9/10/2014		
IF	61	69		
MSWC	94	92		
M	94	94		
MSWC+M	93	94		

4.6.5.2 Μεταβολές της συγκέντρωσης NO_3-N

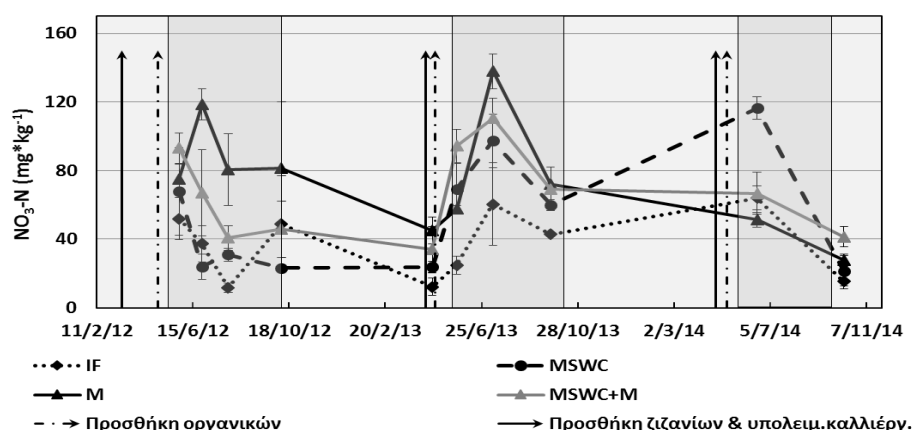
Εξετάζοντας την περιεκτικότητα του επιφανειακού εδάφους (0-15 εκ.) σε νιτρικό άζωτο στη διάρκεια των τεσσάρων ετών (Σχ. 4.19α), διαπιστώνουμε ότι στο δεύτερο, τρίτο και τέταρτο έτος το εδαφικό νιτρικό άζωτο αυξάνεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή του στην αρχή της καρπόδεσης και κατόπιν μειώνεται ως αποτέλεσμα της πρόσληψής του από τα φυτά και τη μείωσης της θερμοκρασίας του εδάφους στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (Christou et al. 2006). Στη διάρκεια του πρώτου έτους το εδαφικό νιτρικό άζωτο μειώνεται γραμμικά σε όλες τις μεταχειρίσεις, προφανώς λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει περίσσεια αζώτου και τα φυτά αντλούν τις απαραίτητες ποσότητες που απαιτούνται για την ανάπτυξή τους. Σε βάθος εδάφους 15-30 εκ. (Σχ. 4.19β) οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων τα έτη 2013 και 2014 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του επιφανειακού στρώματος. Ωστόσο, την 2^η καλλιεργητική περίοδο παρατηρείται μία σημαντική γραμμική μείωση στις μεταχειρίσεις "IF", "MSWC" και

“MSWC+M” μέχρι το στάδιο της ωρίμανσης των καρπών και ακολούθως σταθεροποίηση των τιμών μέχρι το τέλος της περιόδου.

(α)



(β)



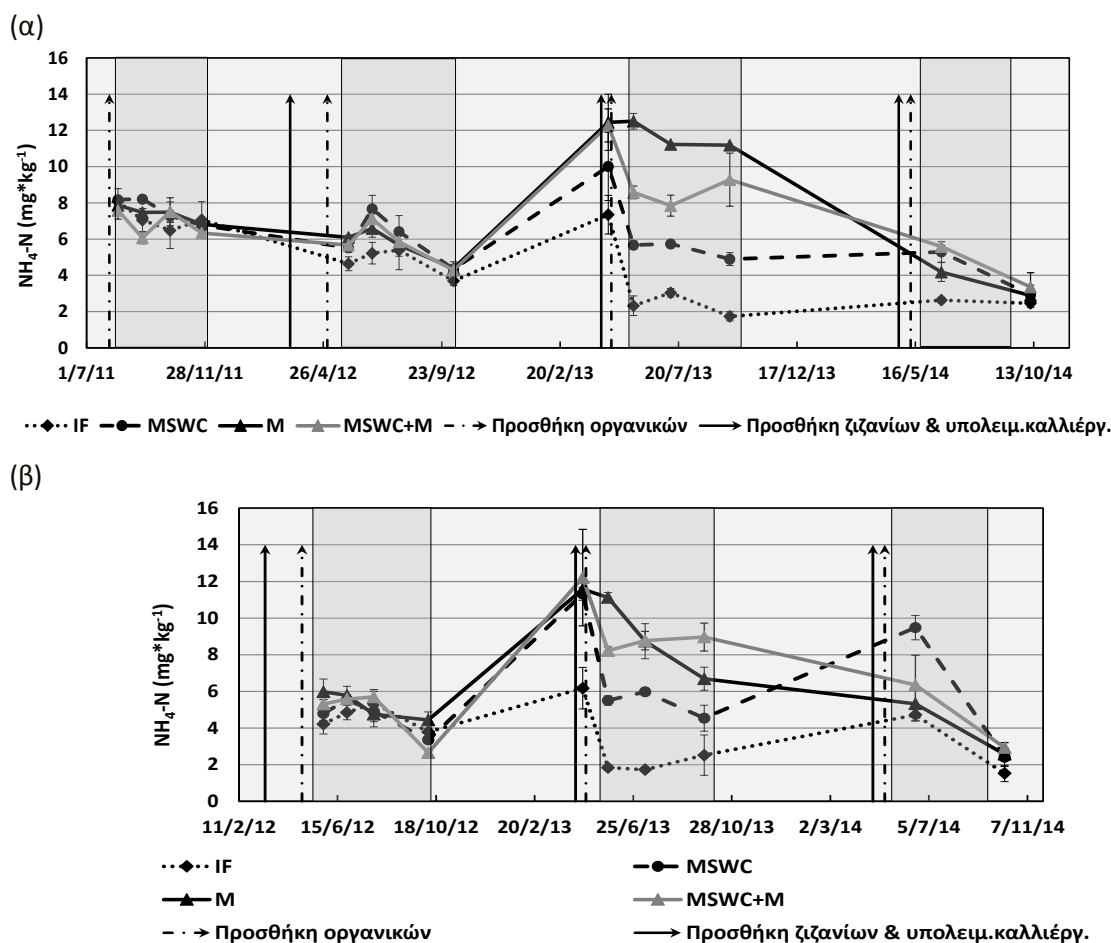
Σχήμα 4.19. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του νιτρικού αζώτου ($\text{NO}_3\text{-N}$) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα υπό το πρίσμα της επίδρασης της λίπανσης στις συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου στο υποκείμενο στρώμα εδάφους (Σχ. 4.19), διαπιστώνουμε ότι οι οργανικές λιπάνσεις οδήγησαν σε αύξηση των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων, με τις μέγιστες τιμές του $\text{NO}_3\text{-N}$ να είναι $36,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ στη “MSWC+M” μεταχείριση τον Αύγουστο του 2011, $118,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ στη “M” μεταχείριση (βάθος 15-30 εκ.) τον Ιούνιο του 2012, $153,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ στη “M” μεταχείριση (βάθος 0-15 εκ.) τον Ιούλιο του 2013 και $121,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ στη “MSWC” μεταχείριση (βάθος 0-15 εκ.) τον Ιούνιο του 2014. Στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου οι ποσότητες των νιτρικών ιόντων έχουν κατά το μεγαλύτερο μέρος τους εξαντληθεί, λόγω κυρίως της πρόσληψής τους από τα φυτά. Σε κάθε περίπτωση, στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου υπήρχε υψηλότερη συσσώρευση νιτρικών ιόντων στις οργανικές μεταχειρίσεις σε σύγκριση με τη συμβατική.

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

4.6.5.3 Μεταβολές της συγκέντρωσης $\text{NH}_4\text{-N}$

Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”, “MSWC”, “M” και “MSWC+M”) στην εξέλιξη του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$) στο επιφανειακό (0-15 εκ.) και υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Στα δύο πρώτα έτη, οι τιμές του $\text{NH}_4\text{-N}$ κυμάνθηκαν μεταξύ 3,7 και 8,2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ και στα δύο τελευταία έτη οι τιμές ήταν 1,5 - 12,5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Με εξαίρεση το πρώτο έτος, φαίνεται ότι οι οργανικές μεταχειρίσεις συνέβαλαν στην αύξηση του περιεχομένου των εδαφών σε αμμωνιακά ιόντα, με τη μεγαλύτερη συμβολή να παρατηρείται στην 3^η καλλιεργητική περίοδο. Συγκεκριμένα, το έτος 2013 οι συγκεντρώσεις του $\text{NH}_4^+\text{-N}$ στη “M” μεταχείριση εμφανίζονται σε αρκετά υψηλά επίπεδα και ήταν κατά μέσο όρο 400% μεγαλύτερες από ότι στη “IF”. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις των $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ήταν την άνοιξη του 2013 από μέτρια έως υψηλά επίπεδα σε όλες τις μεταχειρίσεις και κατόπιν με τη μεταφύτευση των φυτών και την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου, οι συγκεντρώσεις αυτές μειώθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις πλην της “M”. Αντίστοιχα, σε σύγκριση με τη συμβατική ανόργανη λίπανση, οι τιμές των αμμωνιακών ιόντων παρουσιάζονται κατά μέσο όρο 340% μεγαλύτερες στη “MSWC+M” μεταχείριση και κατά μέσο όρο 230% μεγαλύτερες στη “MSWC” μεταχείριση. Στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου οι ποσότητες των αμμωνιακών ιόντων παρουσιάζονται εξαντλημένες κατ’ αντιστοιχία με τα νιτρικά ιόντα, εκτός από το τρίτο έτος, όπου οι συγκεντρώσεις των $\text{NH}_4^+\text{-N}$ παρέμειναν αυξημένες, υποδηλώνοντας ότι το έδαφος στις οργανικές μεταχειρίσεις της 3^{ης} περιόδου συνεχίζει να εφοδιάζεται με ποσότητες αμμωνιακών ιόντων, που προέρχονται κυρίως από την ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης του εδάφους. Τέλος, δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή των συγκεντρώσεων του $\text{NH}_4^+\text{-N}$ στο εδαφικό προφίλ 0-30 εκ.



Σχήμα 4.20. Η επίδραση των μεταχειρίσεων ("IF": Ανόργανη λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά από αιγοπρόβατα, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4\text{-N}$) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

4.6.5.4 Ρυθμοί Ανοργανοποίησης και Νιτροποίησης

Προκειμένου να προβλεφθεί η διαθεσιμότητα του N σε καλλιέργειες από το έδαφος, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τόσο οι ανόργανες ενώσεις N όσο και το N που μπορεί εύκολα να ανοργανοποιηθεί και είναι πιθανό να απελευθερωθεί κατά την ανάπτυξη των καλλιεργειών, καθώς και ο ρυθμός ανοργανοποίησης του αζώτου. Το Δυνητικά Ανοργανοποιήσιμο Άζωτο (Potentially Mineralizable Nitrogen, PMN) και ο Καθαρός Ρυθμός Ανοργανοποίησης του Αζώτου (NET N mineralization Rate, NNMR) αποτελούν τους βιολογικούς δείκτες που σχετίζονται με την παραγωγικότητα του εδάφους, το δυναμικό εφοδιασμού του σε N και του ρυθμού ανοργανοποίησης του αζώτου. Το PMN μπορεί να οριστεί ως το κλάσμα του οργανικού αζώτου που μετατρέπεται σε διαθέσιμες μορφές αζώτου υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού και χρόνου, ενώ ο NNMR προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ του ολικού ρυθμού ανοργανοποίησης και της ακινητοποίησης από τη μικροβιακή βιομάζα του εδάφους (Accoe et al. 2004; Hart et al. 1994).

Ο Καθαρός Ρυθμός Ανοργανοποίησης του αζώτου στα εδάφη των μεταχειρίσεων του πειράματος, μελετήθηκε στο εργαστήριο με το πείραμα επώασης που εφαρμόστηκε στα δείγματα που ελήφθησαν στα μέσα του καλοκαιριού του έτους 2012 και 2013, καθώς και σε αυτά της τελευταίας δειγματοληψίας της 2^{ης} καλλιεργητικής περιόδου (2012). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14.

Πίνακας 4.14. Καθαρός ρυθμός ανοργανοποίησης αζώτου (NNMR, σε mg (NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)·kg⁻¹·d⁻¹) στις μεταχειρίσεις της ανόργανης λίπανσης, "IF", του κόμποστ ΑΣΑ, "MSWC", της κοπριάς, "M", και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς σε αναλογία 70:30, "MSWC+M". Οι τιμές μέσα στην παρένθεση αντιστοιχούν στα τυπικά σφάλματα.

Βάθος εδάφους	Μεταχείριση	31/7/12	8/10/12	23/6/13	29/7/13
0-15 εκ.	IF	-2.3 (0.4)	n.d.	0.6 (0.3)	0.0 (0.2)
	MSWC	-3.5 (0.9)	n.d.	-0.3 (0.2)	0.4 (0.2)
	M	-8.0 (1.0)	n.d.	0.02 (0.4)	-0.8 (0.5)
	MSWC+M	-2.1 (0.7)	n.d.	0.0 (0.5)	0.3 (0.1)
15-30 εκ.	IF	-0.4 (0.1)	-1.0 (0.1)	-0.3 (0.2)	0.2 (0.2)
	MSWC	0.0 (0.4)	-0.9 (0.1)	-0.3 (0.4)	-0.6 (0.4)
	M	0.4 (1.3)	-1.4 (0.4)	0.1 (0.02)	0.1 (0.4)
	MSWC+M	-1.2 (0.2)	-1.2 (0.4)	0.2 (0.5)	-0.2 (0.2)

n.d. : Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα

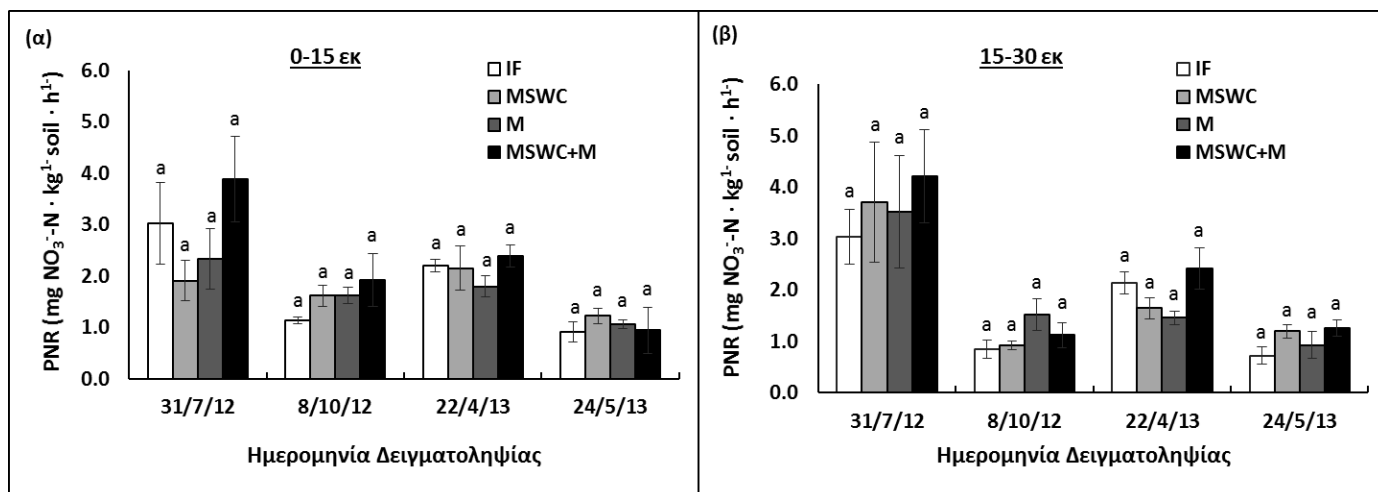
Στα επιφανειακά δείγματα εδάφους, κατά το στάδιο ωρίμανσης των καρπών (ημερ/νία δειγματοληψίας: 31-7-2012) οι τιμές του NNMR ήταν αρνητικές σε όλες τις μεταχειρίσεις, υποδηλώνοντας ακινητοποίηση του N από τους μο του εδάφους. Το φαινόμενο αυτό ήταν πιο έντονο στη μεταχείριση "M", περιορίζοντας τη μεταφορά νιτρικών στα κατώτερα στρώματα. Στα δείγματα εδάφους 15-30 εκ. οι τιμές ήταν ελαφρώς αρνητικές για τις "IF" και "MSWC+M" μεταχειρίσεις και με θετικό πρόσημο, οριακά στο 0, για τις "MSWC" και "M". Στο τέλος της ίδιας καλλιεργητικής χρονιάς οι αντίστοιχες τιμές για το στρώμα εδάφους 15-30 εκ., όπου και υπήρχαν μετρήσεις, είχαν αρνητικό πρόσημο. Το επόμενο έτος (2013), οι τιμές του NNMR παρουσίασαν μικρή διακύμανση σε όλες τις μεταχειρίσεις, με μέγιστη τιμή 0,3 mg (NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)·kg⁻¹·d⁻¹ στη "MSWC+M" μεταχείριση (0-15 εκ. βάθος εδάφους) και ελάχιστη τιμή -0,8 mg (NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)·kg⁻¹·d⁻¹ στη "M" μεταχείριση (0-15 εκ. βάθος εδάφους). Σημειώνεται, επίσης, ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η προσθήκη κόμποστ ΑΣΑ οδήγησε οριακά σε ακινητοποίηση του αζώτου. Εξ άλλου είναι γνωστό ότι τα κόμποστ ΑΣΑ χαρακτηρίζονται από χαμηλές και σταθερές ταχύτητες απελευθέρωσης N καθώς και από φαινόμενα ακινητοποίησης, τα οποία ενδέχεται να περιορίσουν την ανάπτυξη μιας καλλιέργειας (Paranychianakis et al. 2013).

Η νιτροποίηση είναι μία κρίσιμη διαδικασία στο βιογεωχημικό κύκλο του αζώτου και στη θρέψη των φυτών και περιλαμβάνει τη βιολογική οξείδωση της αμμωνίας (NH₃), μέσω νιτρωδών (NO₂⁻), σε νιτρικά (NO₃⁻). Η νιτροποίηση στο έδαφος θεωρείται γενικά ότι πραγματοποιείται σε δύο στάδια, όπου η αμμωνία πρώτα οξειδώνεται σε νιτρώδη άλατα από φυλογενετικά διακριτές ομάδες οξειδωτικών **βακτηρίων** αμμωνίας ή **αρχαίων** και στη συνέχεια σε νιτρικά άλατα μέσω των **βακτηρίων Nitrobacter** ή από **Commamox βακτήρια** ικανά να προκαλέσουν πλήρη νιτροποίηση (Li et al. 2018; Tzanakakis & Paranychianakis 2017).

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού "Solanum Lycopersicum"

Οι πιο συνηθισμένες χρήσεις του όρου νιτροποίηση περιλαμβάνουν τουλάχιστον τρεις διαφορετικές πειραματικά καθορισμένες έννοιες: τον ρυθμό καθαρής, συνολικής και δυνητικής νιτροποίησης (net, gross and potential nitrification rate). Ο **Καθαρός Ρυθμός Νιτροποίησης (Potential Nitrification Rate, NNR)** είναι ο ρυθμός συσσώρευσης νιτρικών και είναι ίσος με το ρυθμό μετατροπής των κατιόντων αμμωνίου (NH_4^+) και της αμμωνίας (NH_3) σε NO_3^- μείον τις καταναλώσεις που λαμβάνουν χώρα από την ακινητοποίηση του αζώτου από τους μικροοργανισμούς και την απονιτροποίηση. Ο **Πραγματικός Ρυθμός Νιτροποίησης (Gross Nitrification Rate, GNR)** είναι ο πραγματικός ρυθμός μετατροπής των $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ σε NO_3^- , ανεξάρτητα από τις καταναλώσεις νιτρικών. Ο **Δυνητικός Ρυθμός Νιτροποίησης (Potential Nitrification Rate, PNR)** είναι ο μέγιστος ρυθμός νιτροποίησης που συμβαίνει υπό συνθήκες κορεσμού όσον αφορά στην παροχή υποστρώματος ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) και υπό βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίας και αερισμού (Norton & Stark 2010; Hart et al. 1994).

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχ. 4.21) απεικονίζεται η επίδραση της μεταχείρισης στον Δυνητικό Ρυθμό Νιτροποίησης (PNR), σε χιλιοστόγραμμα νιτρικού αζώτου ανά κιλό εδάφους ανά ώρα ($\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), σε δείγματα που ελήφθησαν από δύο εδαφικούς ορίζοντες (0-15 και 15-30 εκ.). Τα δείγματα συλλέχθηκαν στα δύο τελευταία στάδια ανάπτυξης του φυτού το έτος 2012, καθώς και τις χρονικές περιόδους πριν την προσθήκη των οργανικών εδαφοβελτιωτικών το επόμενο έτος και μετά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου του ίδιου έτους.



Σχήμα 4.21. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στη μεταβολή του Δυνητικού Ρυθμού Νιτροποίησης (PNR) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα. Οι μπάρες με ίδια γράμματα (εντός της ίδιας δειγματοληψίας) υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της 2^{ης} πειραματικής χρονιάς, η τιμή του PNR στα 4 πειραματικά εδάφη κυμάνθηκε μεταξύ 1,9 και 4,2 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ την περίοδο της ωρίμανσης των καρπών, στα μέσα του καλοκαιριού, και μεταξύ 0,8 και 1,9 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ την περίοδο της συγκομιδής (τελευταία δειγματοληψία). Αντίστοιχα, για το έτος 2013 η τιμή του PNR κυμάνθηκε από 1,5 έως 2,4 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ πριν την εφαρμογή ανόργανης λίπανσης, κόμποστ και κοπριάς, και από 0,7 έως 1,3 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ αμέσως μετά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου. Παρόμοια αποτελέσματα διαπιστώθηκαν και στην

εργασία των Parafilippaki et al. (2015), όπου η τιμή του PNR κυμάνθηκε περίπου μεταξύ 1,2 και 4,1 mg NO₃⁻-N·kg⁻¹·h⁻¹ στις μεταχειρίσεις ενός αργιλώδους εδάφους, στο οποίο έγινε εφαρμογή κόμποστ ΑΣΑ που παρασκευάστηκε στο Εργοστάσιο Μηχανικής Διαλογής και Κομποστοποίησης της Διαδημοτικής Επιχείρησης Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΕΔΙΣΑ) Χανίων. Στην εργασία αυτή διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη κόμποστ αύξησε τον δυνητικό ρυθμό νιτροποίησης σε όλες τις δειγματοληψίες και η αύξηση αυτή ήταν ανάλογη της ποσότητας κόμποστ που προστέθηκε στο έδαφος. Στον πειραματικό αγρό της τομάτας, η παραπάνω τάση αύξηση του PNR λόγω προσθήκης στο έδαφος κόμποστ ΑΣΑ, παρατηρήθηκε στο τέλος της 2^{ης} και στην έναρξη της 3^{ης} καλλιεργητικής περιόδου (δειγματοληψία: 24/5/2013). Γενικά παρατηρήθηκε μία σημαντική μείωση του δυνητικού ρυθμού νιτροποίησης σε όλες τις μεταχειρίσεις με την έναρξη της 3^{ης} καλλιεργητικής περιόδου, που μπορεί να οφείλεται στη μεταβολή του μικροβιακού πληθυσμού των νιτροποιητών και την ενεργότητά τους, λόγω της προσθήκης στο έδαφος ενός νέου φυτικού είδους (*Solanum Lycopersicum*) (Tsiknia et al. 2013).

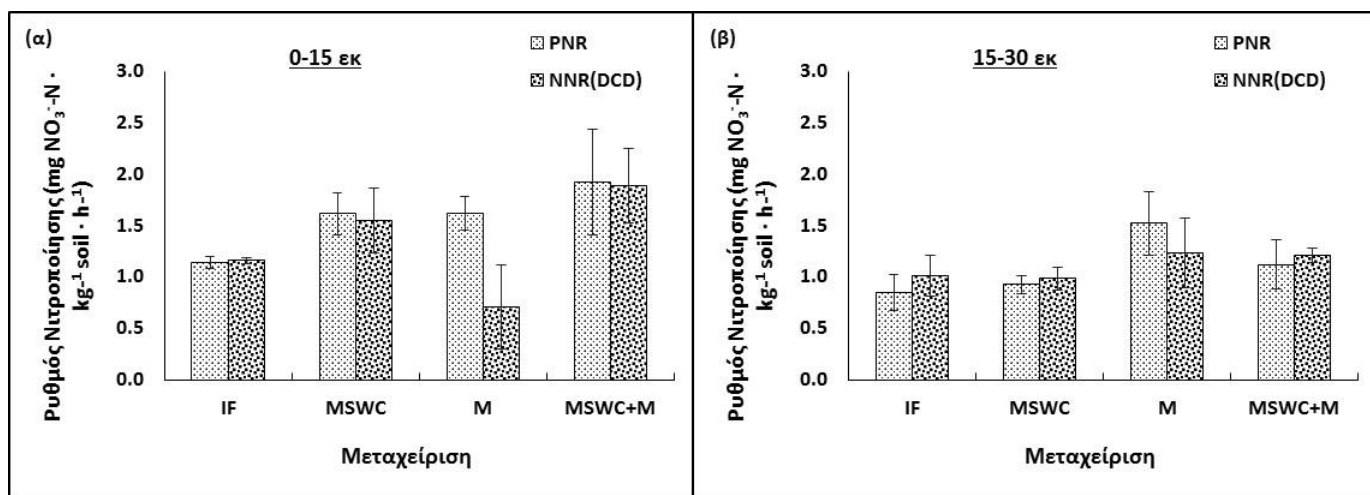
Αναλύοντας περαιτέρω τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο Σχήμα 4.20, παρατηρούμε ότι την περίοδο όπου υπήρχε έντονη μικροβιακή δραστηριότητα και αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου στο έδαφος, κυρίως λόγω αυξημένων θερμοκρασιών εδάφους (Ιούλιος 2012), ο PNR παρουσιάζει ένα μέγιστο σε όλες τις μεταχειρίσεις. Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών κατιόντων την περίοδο εκείνη ήταν κατά πολύ μικρότερες από τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ανιόντων, που σημαίνει ότι ο ρυθμός νιτροποίησης είναι ταχύς. Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι στην ίδια δειγματοληψία υπάρχει μία έντονη διακύμανση των τιμών PNR, η οποία αποτυπώνεται στο τυπικό σφάλμα των μετρήσεων. Στην επόμενη δειγματοληψία παρατηρείται μείωση του PNR σε όλες τις μεταχειρίσεις, που μπορεί να οφείλεται στη μικρότερη δυναμική ανοργανοποίησης του αζώτου, στη δέσμευση του ανόργανου αζώτου από τους *μο* του εδάφους ή/και στη μείωση του πληθυσμού των νιτροποιητικών βακτηρίων (*ammonia oxidising bacteria*, AOB).

Τα αποτελέσματα, επίσης, έδειξαν ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μεταχειρίσεις και στο βάθος εδάφους. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές του PNR στο βάθος 15-30 εκ. κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα με αυτές που μετρήθηκαν στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (Πίν. 4.10).

Ο Δυνητικός Ρυθμός Νιτροποίησης είναι μια μέθοδος που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του μεγέθους του πληθυσμού των αυτότροφων νιτροδοποιητικών οργανισμών βιομάζας (Li et al. 2018) και θεωρείται ένας ευαίσθητος δείκτης στις μεταβολές της διαχείρισης του εδάφους, παρέχοντας ταχείες, ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με τα ποσοστά νιτροποίησης στο πεδίο (Fortuna et al. 2003). Τα γεωργικά συστήματα που μειώνουν τους ρυθμούς νιτροποίησης και ελαχιστοποιούν την έκπλυση NO₃⁻ από το έδαφος, χωρίς να περιορίζονται οι αποδόσεις των καλλιεργειών, παρέχουν σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη (Fortuna et al. 2003). Ο Πραγματικός Ρυθμός Νιτροποίησης προσδιορίζεται από τον υπολογισμό του καθαρού ρυθμού νιτροποίησης σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό των καταναλώσεων με τη χρήση είτε ισότοπων (¹⁵N) είτε παρεμποδιστών νιτροποίησης (Nitrification Inhibitors), ανάλογα με το σκοπό του πειράματος. Αν ο σκοπός του πειράματος είναι η μέτρηση του πραγματικού ρυθμού νιτροποίησης στο πεδίο, τότε συνίσταται η εφαρμογή της μεθόδου των ισότοπων. Αν οι ερευνητές ενδιαφέρονται να μελετήσουν την επίδραση διαφόρων μεταχειρίσεων στους ρυθμούς νιτροποίησης, τότε ίσως ένα πείραμα επώασης στο εργαστήριο να είναι η καταλληλότερη εφαρμογή (Norton & Stark 2010). Η χρήση **αναστολέων νιτροποίησης** στο έδαφος χρησιμοποιείται συνήθως για τη βελτίωση της

αποτελεσματικότητας της χρήσης λιπασμάτων αζώτου και για τη μείωση της έκπλυσης νιτρικών αλάτων, καθώς και των εκπομπών του αερίου N_2O (Ruser & Schulz 2015). Ωστόσο, οι παρεμποδιστές αυτοί χρησιμοποιούνται και σε πειράματα υπολογισμού του ολικού ρυθμού νιτροποίησης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την προϋπόθεση να είναι αποτελεσματικοί στην πλήρη αναστολή της διαδικασίας της νιτροποίησης. Υπάρχουν 2 είδη παρεμποδιστών: αυτοί που μπλοκάρουν τη νιτροποίηση μειώνοντας τη δραστηριότητα των βακτηρίων *Nitrosomonas* στο έδαφος και αυτοί που αναστέλλουν τις καταναλώσεις νιτρικών (Wakelin et al. 2014; Ernfors et al. 2014; Norton & Stark 2010). Στον πειραματικό αγρό της τομάτας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις υπολογισμού του GNR με τη χρήση του παρεμποδιστή νιτροποίησης Δικυανοδιαμίδα (DCD), που είναι ένα προϊόν που έχει μελετηθεί εκτενέστερα τα τελευταία χρόνια, κυρίως για την επίδρασή του στις λειτουργίες των οικοσυστημάτων. Η αποτελεσματικότητα του DCD στο έδαφος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την υφή του εδάφους, το pH, την εδαφική οργανική ύλη, τον αερισμό του εδάφους, την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία και την ποσότητα DCD που εφαρμόζεται (McGeough et al. 2016).

Η επίδραση του DCD στη νιτροποίηση στα εδάφη των 4 μεταχειρίσεων του πειράματος αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.22. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το DCD μπορούσε να αναστείλει πλήρως τη νιτροποίηση στα εδάφη όλων των μεταχειρίσεων πλην της “Μ” μεταχείρισης, όπου η μείωση του ρυθμού νιτροποίησης ήταν της τάξεως του 40% στο επιφανειακό στρώμα εδάφους και 80 % στο υπέδαφος (15-30 εκ.). Σε παρόμοια ερευνητική εργασία (Zhu et al. 2016), η προσθήκη του DCD, σε συνδυασμό με κοπριά από χοίρους, οδήγησε σε αναστολή του πραγματικού ρυθμού νιτροποίησης (GNR) περίπου από 50 έως 66%. Σε άλλες ερευνητικές εργασίες η μείωση του GNR ήταν 38-63 % (Lan et al. 2013), 57% (Harty et al. 2017) και 79–90% (Ernfors et al. 2014). Στα αποτελέσματα του πειραματικού αγρού της τομάτας, ο υπολογισμός της διαφοράς των καθαρών ποσοστών νιτροποίησης μεταξύ των δειγμάτων που δέχθηκαν επίδραση αμμωνιακού υποστρώματος (PNR) και εκείνων που δέχθηκαν επιπλέον την επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης, δεν δύναται να αντιπροσωπεύσει με ασφάλεια τον πραγματικό ρυθμό νιτροποίησης γιατί φάνηκε ότι στη μεταχείριση της κοπριάς δεν παρεμποδίστηκε πλήρως η νιτροποίηση. Εξ άλλου, δεν έχει προσδιοριστεί αν το DCD επηρεάζει τους ρυθμούς ανοργανοποίησης και ακινητοποίησης του αζώτου, όπως διαπιστώθηκε στις εργασίες των McGeough et al. (2016) και Ernfors et al. (2014). **Για την ασφαλή εκτίμηση του GNR απαιτείται η χρήση ισοτόπων και μαθηματικά μοντέλα.**



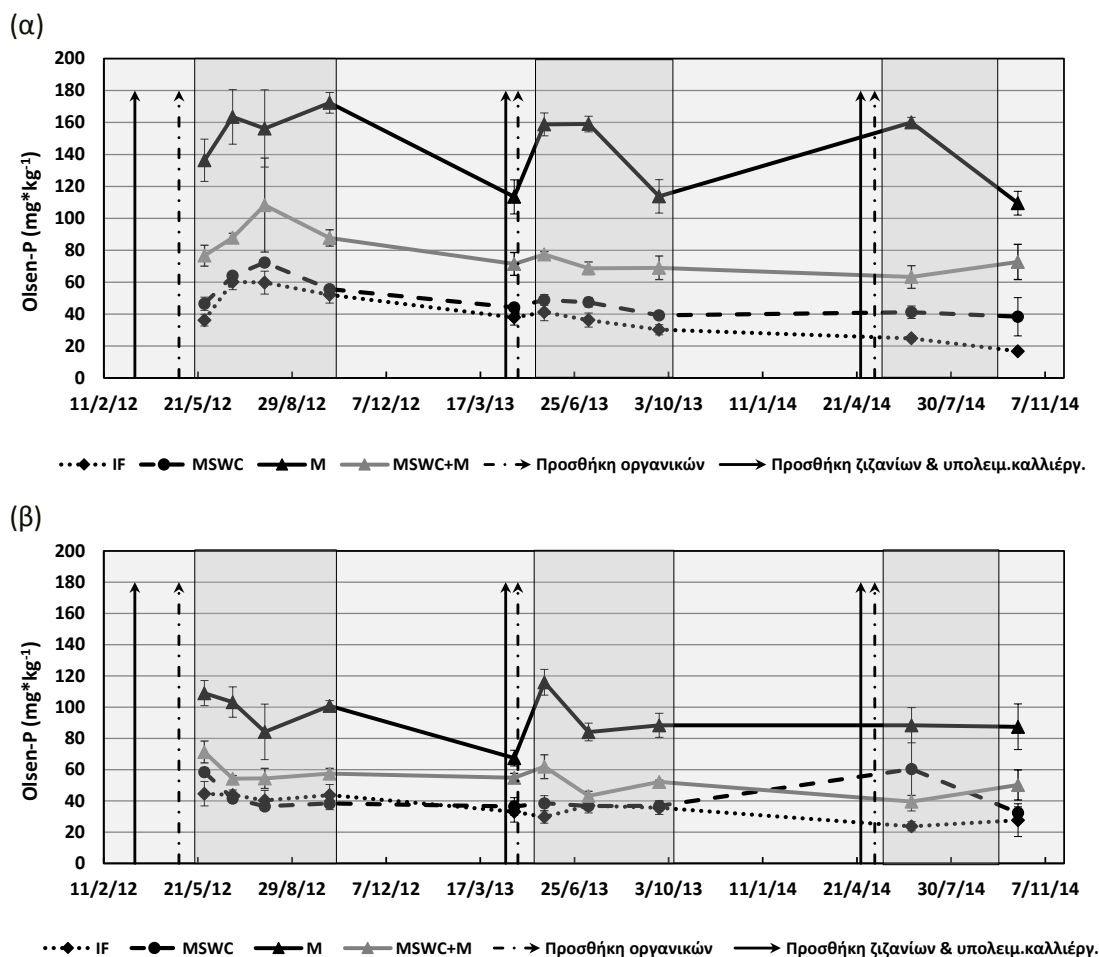
Σχήμα 4.22. Η επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης δικυανοδιαμιδίου στο Καθαρό (Δυνητικό) Ρυθμό Νιτροποίησης, NNR(DCD), αντιπαραβαλλόμενη με τον Δυνητικό Ρυθμό Νιτροποίησης, PNR, στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. “IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

4.6.6 Διαθέσιμος Εδαφικός Φώσφορος (Olsen-P)

Τα οργανικά υλικά που εφαρμόστηκαν στα εδάφη του πειράματος επηρέασαν τη δυναμική του διαθέσιμου εδαφικού φωσφόρου (Olsen-P). Το Σχήμα 4.23 δείχνει την τάση του Olsen-P στο έδαφος κατά τη διάρκεια της 2^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} καλλιεργητικής περιόδου για τα επιφανειακά και υποκείμενα στρώματα εδάφους όλων των μεταχειρίσεων. Τα ευρήματα των μετρήσεων έδειξαν ότι υπήρχε σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η εφαρμογή κοπριάς αύξησε σημαντικά το διαθέσιμο κλάσμα του P και η αύξηση αυτή είναι πιο έντονη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, μια επίδραση που αποδίδεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε αφομοιώσιμο φώσφορο που εμφανίζει η ζωική κοπριά. Η συγκέντρωση του Olsen-P της “M” μεταχείρισης αυξήθηκε απότομα ακριβώς αμέσως μετά την ενσωμάτωση της κοπριάς στο έδαφος και η μεταβολή αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στις 2 πρώτες δειγματοληψίες της 3^{ης} πειραματικής χρονιάς (Σχ. 4.23). Οι συγκεντρώσεις του Olsen-P παραμένουν για το μεγαλύτερο διάστημα ανάπτυξης των φυτών της “M” μεταχείρισης σε πολύ υψηλά επίπεδα (περίπου 160 mg·kg⁻¹ εδάφους) μέχρι το τέλος της 2^{ης} περιόδου (2012) ή εμφανίζονται κατά 40 mg·kg⁻¹ εδάφους μειωμένες στο τέλος του 3^{ου} και 4^{ου} καλλιεργητικού κύκλου. Η δυναμική του Olsen-P είναι μεγάλη και στο αμέσως επόμενο εδαφικό επίπεδο (15-30 εκ.) με τη διαφορά ότι τα υποκείμενα στρώματα εδάφους είχαν μικρότερα ποσοστά διαθέσιμου φωσφόρου (80-110 mg·kg⁻¹ εδάφους) και ότι εμφανίζεται μία σχετικά απότομη μείωση των τιμών αμέσως μετά την ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου ανάπτυξης των φυτών.

Η μεταχείριση του εδάφους όπου εφαρμόστηκε μίγμα κόμποστ και κοπριάς σε αναλογία 70:30 (“MSWC+M”) παρουσιάζει με τη σειρά της αυξημένες συγκεντρώσεις Olsen-P στα πρώτα 15 εκατοστά του εδάφους (63-108 mg·kg⁻¹ εδάφους), αλλά σε μικρότερο βαθμό από τη μεταχείριση που ενσωματώθηκε στο έδαφος αποκλειστικά το υλικό της κοπριάς αιγοπροβάτων. Στα επόμενα 15 εκατοστά, η περιεκτικότητα του εδάφους σε Olsen-P κυμάνθηκε μεταξύ 40 και 70 mg·kg⁻¹ εδάφους. Επίσης, η εφαρμογή κόμποστ ΑΣΑ μέχρι και την τρίτη πειραματική χρονιά είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ισοδύναμης συγκέντρωσης Olsen-P σε σχέση με την Ανόργανη Λίπανση. Την τελευταία, όμως, χρονιά οι τιμές του Olsen-P στο βάθος 0-15 εκ. ήταν σημαντικά σταθερά υψηλότερες από τον μάρτυρα. Παρόμοια

συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στο βάθος 15-30 εκ. Επίσης, την 2^η καλλιεργητική περίοδο οι τιμές του αφομοιώσιμου φωσφόρου εμφανίζουν διαφορετική τάση από τις αντίστοιχες τιμές του επιφανειακού στρώματος, καθώς βαίνουν από την αρχή της σεζόν μειούμενες προς μια σταθερή τιμή (περίπου 38 mg·kg⁻¹ εδάφους).



Σχήμα 4.23. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην εξέλιξη του διαθέσιμου Φωσφόρου (Olsen-P) στο: (α) επιφανειακό (0-15 εκ.) και (β) υποκείμενο (15-30 εκ.) στρώμα εδάφους. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας, τα βέλη με τη συνεχιζόμενη γραμμή την προσθήκη υπολειμματικής καλλιέργειας και ριζοζιζανίων και τα βέλη με τη διακεκομμένη γραμμή την προσθήκη κόμποστ ή/και κοπριάς. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Τα αποτελέσματα της επίδρασης της προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ στο έδαφος του πειραματικού αγρού συμφωνούν με τα πορίσματα άλλων εργασιών, όπου διαπιστώθηκε ότι το κόμποστ ΑΣΑ έχει μία δυναμική να εφοδιάζει επαρκώς τα φυτά με φώσφορο. Μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαθεσιμότητα του P αυξανόταν με την αύξηση των δόσεων εφαρμογής (Mkhabela & Warman 2005; Papafilippaki et al. 2015; Hargreaves et al. 2008). Φυσικά η ποιότητα του κόμποστ παίζει πρωτεύοντα ρόλο στη διαθεσιμότητα του φωσφόρου. Ωστόσο, η εφαρμογή του ίδιου υλικού σε εδάφη με διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μπορεί

να οδηγήσει σε παρόμοιες τιμές Olsen-P και διαφορετικές αποδόσεις των καλλιεργειών. Για παράδειγμα σε ένα πείραμα πεδίου (Johnston et al. 2013) που πραγματοποιήθηκε σε εδάφη της ίδιας μηχανικής σύστασης, αλλά διαφορετικής περιεκτικότητας σε οργανική ουσία, το έδαφος με μικρή SOM απαιτούσε 2-3,5 φορές περισσότερο Olsen P για να παράγει την ίδια απόδοση με εκείνη του εδάφους που είχε περισσότερη οργανική ύλη. Αυτό αποδόθηκε στο γεγονός ότι η οργανική ύλη δρα ευεργετικά ως προς τη δομή του εδάφους, με έμμεσο αποτέλεσμα την ευκολότερη λήψη από τις ρίζες των διαθέσιμων θρεπτικών. Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση των καλλιεργειών και η αποδοτική χρήση των λιπασμάτων, θα πρέπει παράλληλα με τον υπολογισμό του Olsen-P, να εκτιμάται η κρίσιμη τιμή διαθέσιμου φωσφόρου πάνω από την οποία πετυχαίνουμε τη βέλτιστη παραγωγή. Η τιμή αυτή μπορεί να προσδιοριστεί με δύο τρόπους: (i) χρησιμοποιώντας συσχέτιση μεταξύ της απόδοσης της καλλιέργειας και του προστιθέμενου φωσφορικού λιπάσματος ή (ii) χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ της απόδοσης της καλλιέργειας και του διαθέσιμου φωσφόρου στο έδαφος (Johnston et al. 2014). Στην εργασία των Roulton et al. (2013) η τιμή αυτή προσδιορίστηκε περίπου στα 20 mg Olsen-P kg⁻¹ εδάφους. Η κρίσιμη τιμή διαθέσιμου φωσφόρου εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του εδαφικού διαλύματος να ρυθμίζει τη συγκέντρωση του φωσφόρου (phosphorus buffer capacity, PBC). Η ρυθμιστική ικανότητα είναι η ικανότητα του διαλύματος του εδάφους να ισορροπεί σε μία μεταβολή της συγκέντρωσής του σε P, καθώς το P αφαιρείται μέσω της πρόσληψής του από το φυτό ή προστίθεται με την εφαρμογή ανόργανων λιπασμάτων ή οργανικών υλικών (Holford 1997). Επομένως η PBC είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη στην εκτίμηση του ποσού P που πρέπει να προστεθεί στο έδαφος για να φθάσουμε στο επιθυμητό κρίσιμο επίπεδο (Johnston et al. 2014).

Στον πειραματικό αγρό της τομάτας και συγκεκριμένα στη μεταχείριση όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο κοπριά, οι τιμές του διαθέσιμου φωσφόρου στο έδαφος εμφανίζονται ανησυχητικά υψηλές, με αποτέλεσμα να εγκυμονούν κίνδυνοι μεταφοράς P στους υπόγειους υδροφορείς (Vanden Nest et al. 2016). Η PCB δεν υπολογίστηκε στο συγκεκριμένο πείραμα, ωστόσο το γεγονός ότι οι αποδόσεις των φυτών της μεταχείρισης αυτής ήταν παρόμοιες με αυτές της “MSWC+M”, συνιστά την εν μέρει αντικατάσταση της κοπριάς από κόμποστ ΑΣΑ ως μία χρήσιμη πρακτική για τη διατήρηση της παραγωγής και τη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που έχει η εφαρμογή ζωικής κοπριάς.

4.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗ ΘΡΕΨΗ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

4.7.1 Παραγωγή Βιομάζας και Απόδοση Καλλιέργειας

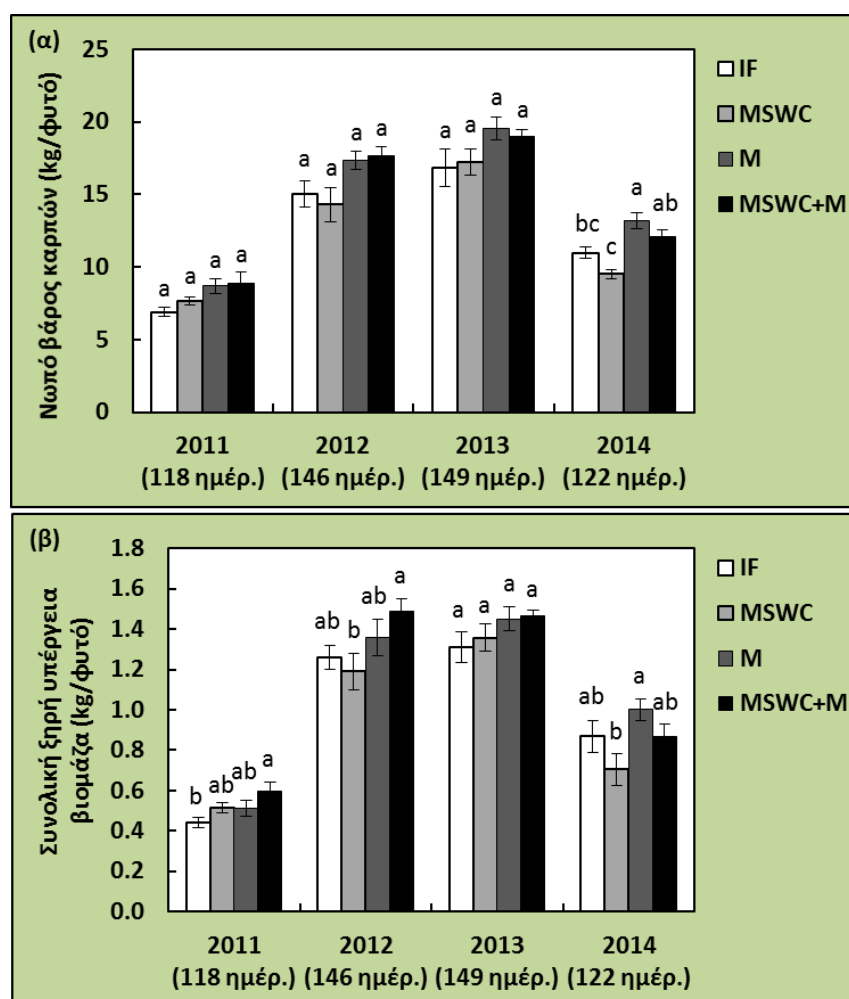
Η συνολική ετήσια παραγωγή καρπού ανά φυτό για την κάθε μεταχείριση, εκφρασμένη σε κιλά νωπού βάρους ανά φυτό, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.25 απεικονίζεται η συνολική ετήσια παραγωγή στελεχών, φύλλων και καρπών ανά φυτό για την κάθε μεταχείριση, εκφρασμένη σε γραμμάρια ξηρού βάρους ανά φυτό. Η παραγωγή βιομάζας ήταν χαμηλότερη την πρώτη καλλιεργητική περίοδο (2011) λόγω του γεγονότος ότι δεν υπήρχαν οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών. Εξ άλλου, την πρώτη καλλιεργητική περίοδο χρησιμοποιήθηκε διαφορετική ποικιλία τομάτας (όψιμη ποικιλία), η καλλιεργητική περίοδος ξεκίνησε τον Αύγουστο και επίσης ο υπολογισμός του νωπού βάρους των καρπών πραγματοποιήθηκε μέσω μίας μόνο συγκομιδής. Στο 1^ο έτος, λοιπόν, η παραγωγή κυμάνθηκε μεταξύ 6,9 και 8,9 kg τομάτας ανά φυτό. Την επόμενη χρονιά (2012), η παραγωγή της τομάτας ανά μεταχείριση είχε ως εξής: Η παραγωγή της συμβατικής λίπανσης ήταν 15 Kg τομάτας ανά φυτό, με κόμποστ 14,3 Kg τομάτας ανά φυτό, με κοπριά 17,4 Kg τομάτας ανά φυτό και με τον συνδυασμό 70/30, 17,7 Kg τομάτας ανά φυτό. Αντίστοιχα, το έτος 2013 χαρακτηρίζεται ως το πιο παραγωγικό έτος όπου η απόδοση ήταν “IF”: 16,8 Kg τομάτας ανά φυτό, “MSWC”: 17,2 Kg τομάτας ανά φυτό, “M”: 19,6 Kg τομάτας ανά φυτό και “MSWC+M”: 16 Kg τομάτας ανά φυτό. Τέλος, στο 4^ο έτος του πειράματος, η καλλιεργητική περίοδος διεκόπη λόγω ασθένειας των φυτών, όπου η απόδοση της παραγωγής κυμάνθηκε από 9,5 έως 13,2 Kg τομάτας ανά φυτό.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, που παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 4.24α, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η μεταχείριση είχε σημαντική επίδραση στην απόδοση της παραγωγής καρπού μόνο το τελευταίο πειραματικό έτος, παρόλο που τα προηγούμενα έτη οι οργανικές μεταχειρίσεις “M” και “MSWC+M” παρήγαγαν σταθερά υψηλότερες αποδόσεις από τη συμβατική λίπανση και το κόμποστ (Σχ. 4.24). Συγκεκριμένα, η “M” μεταχείριση είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η παραγωγή κατά 16-26% σε σχέση με την ανόργανη λίπανση και κατά 14-38% σε σχέση με το κόμποστ για όλα τα έτη των παρατηρήσεων. Αντίστοιχα, η εναλλακτική λίπανση με μίγμα κόμποστ και κοπριά (70:30) είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η παραγωγή κατά 10-29% σε σχέση με την “IF” μεταχείριση και κατά 10-27% σε σχέση με την “MSWC”. Επίσης, η προσθήκη 50 t/ha κόμποστ ΑΣΑ στο έδαφος οδήγησε σε παρόμοιες αποδόσεις με την εφαρμογή συμβατικής λίπανσης και πολύ υψηλές αποδόσεις το 3^ο έτος συγκομιδής, που αποδίδεται στην τριετή συσσώρευση ανόργανου αζώτου στο έδαφος (Πίν. 4.11).

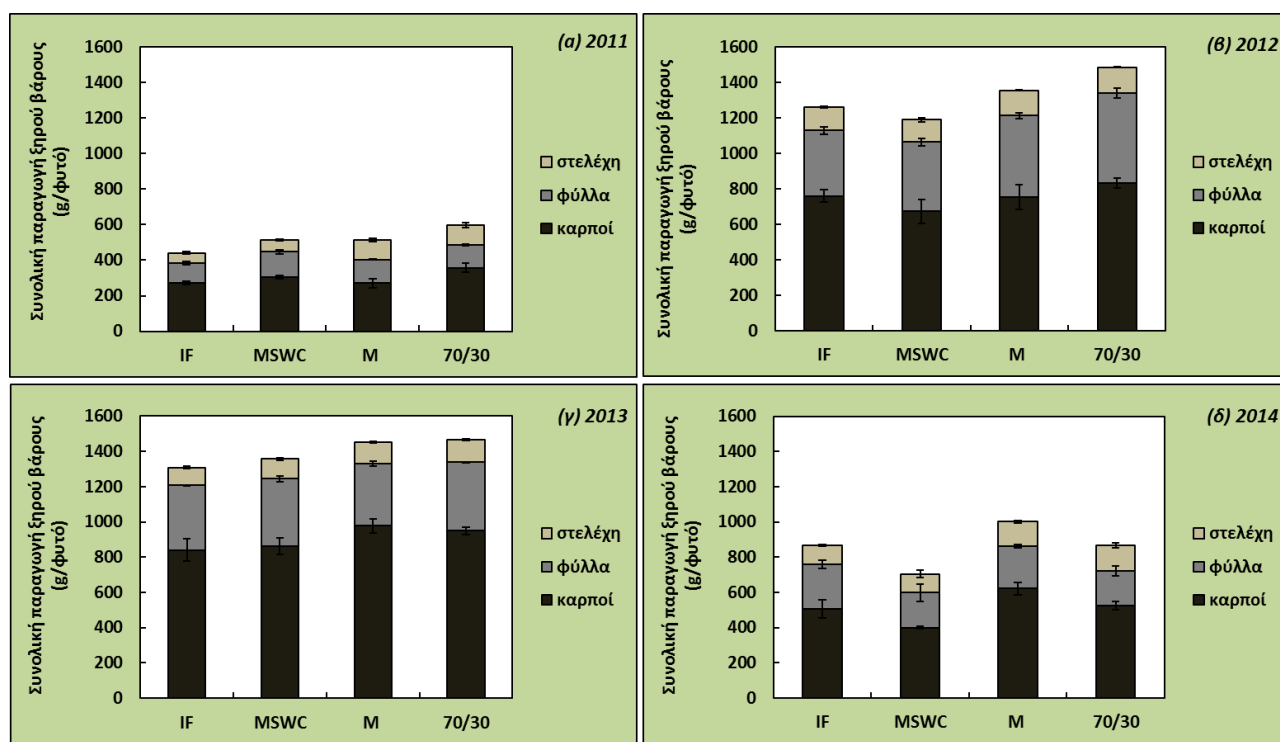
Η ξηρή βιομάζα ακολούθησε την τάση της συνολικής ετήσιας παραγωγής καρπού, με τη διαφορά ότι η μεταχείριση επηρέασε σημαντικά ($p < 0,05$ κατά Tukey) την παραγωγή βιομάζας στις 3 από τις 4 καλλιεργητικές περιόδους (2011, 2012 και 2014) (Σχ. 4.24β). Η διαφοροποίηση στις αποδόσεις των φυτών που καλλιεργήθηκαν σε υπόστρωμα εδάφους που προστέθηκε κοπριά με ή χωρίς κόμποστ, οφείλεται στις υψηλές διαθέσιμες συγκεντρώσεις ανόργανου αζώτου στο έδαφος και στην αυξημένη περιεκτικότητά του σε φώσφορο. Πράγματι, οι συγκεντρώσεις (μέσοι όροι) ανόργανου αζώτου στο έδαφος κυμάνθηκαν μεταξύ 52 και 160 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ εδάφους για τη “M” μεταχείριση και 44-105 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ για τη “MSWC+M” μεταχείριση για τα έτη 2012, 2013 και 2014, τιμές που βρίσκονται εντός των βέλτιστων επιπέδων ανόργανου N (49-79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Sonneveld & Voogt 2009) για τη μέγιστη παραγωγή τομάτας θερμοκηπίου. Επίσης, η υψηλή παρουσία φωσφόρου στο έδαφος που εμφανίζουν οι μεταχειρίσεις “M” και “MSWC+M” ενισχύει τα βλαστικά και αναπαραγωγικά χαρακτηριστικά των φυτών τομάτας, συμπεριλαμβανομένης την ανάπτυξη

του ριζικού συστήματος, τη φυλλική επιφάνεια, τις ημέρες μέχρι την πρώτη άνθηση, την καρπόδεση και την ωρίμανση των καρπών (Rigane & Medhioub 2011).

Η κατανομή της παραγόμενης βιομάζας μεταξύ των διαφόρων οργάνων του υπέργειου τμήματος του φυτού ήταν κατά αύξουσα σειρά: στελέχη-φύλλα-καρποί, με τους καρπούς να αντιπροσωπεύουν περίπου το 60% της συνολικής παραγόμενης υπέργειας βιομάζας (Σχ. 4.25), τα φύλλα το 28% και τα στελέχη το υπόλοιπο 12%. Σημειώνεται, επίσης, ότι τα μέσα ποσοστά της περιεκτικότητας σε νερό των καρπών, των φύλλων και των στελεχών σε όλες τις μεταχειρίσεις και τα έτη πειραματισμού ήταν περίπου 96%, 87% και 89% , αντίστοιχα.



Σχήμα 4.24. Η επίδραση των μεταχειρίσεων (“IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30) στην: (α) συνολική παραγωγή καρπού (νωπό βάρος) ανά φυτό και (β) συνολική παραγωγή υπέργειας βιομάζας (ξηρό βάρος) ανά φυτό, για τα έτη 2011, 2012, 2013 και 2014. Η διάρκεια της κάθε καλλιεργητικής περιόδου ήταν 118, 146, 149 και 122 ημέρες, αντίστοιχα. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα. Οι μπάρες με διαφορετικά γράμματα (εντός της ίδιας καλλιεργητικής περιόδου) υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p < 0,05$.



Σχήμα 4.25. Συνολική παραγωγή στελεχών, φύλλων και καρπών (ξηρό βάρος) ανά φυτό για τα έτη: (α) 2011, (β) 2012, (γ) 2013 και (δ) 2014. “IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Παρόλο που υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία σχετικά με την εφαρμογή κόμποστ ΑΣΑ ή/και ζωική κοπριά σε εδάφη με διαφορετικές καλλιέργειες, είναι πολύ λίγες οι δημοσιεύσεις που αφορούν πραγματικές εντατικές συνθήκες καλλιέργειας τομάτας. Τις περισσότερες φορές οι εργασίες αυτές αφορούσαν φυτά που αναπτύχθηκαν σε δοχεία ή καλλιέργειες θερμοκηπίου και όχι υπαίθριες καλλιέργειες. Σε μία από αυτές τις εργασίες (Rigane & Medhioub 2011), όπου χρησιμοποιήθηκαν ως συστήματα λίπανσης διάφορα κομποστοποιημένα προϊόντα, ζωική κοπριά και μίγματα κόμποστ και κοπριάς (70:30), αναφέρθηκε ότι τα τεμάχια τομάτας που είχαν υποστεί επεξεργασία με κοπριά και μίγμα κόμποστ και κοπριάς απέδωσαν σημαντικά υψηλότερο αριθμό καρπών από τα φυτά των μεταχειρίσεων που χρησιμοποιήθηκε μόνο κόμποστ. Το παραπάνω αποτέλεσμα αποδόθηκε στην υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο που περιέχονται στα προϊόντα ζωικής κοπριάς, τα οποία εμπλουτίζουν το έδαφος με φώσφορο. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν και οι Demir et al. (2010), όπου η λίπανση φυτών τομάτας με κοπριά πουλερικών βελτίωσε την ανάπτυξη των βλαστών τομάτας και την απόδοση της παραγωγής. Σε άλλη εργασία, οι Madrid et al. (1998) μετά μία ετήσια εφαρμογή στο έδαφος $21 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ κόμποστ ΑΣΑ και ανόργανη λίπανση ($120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ and $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$), αναφέρουν ότι το μέσο βάρος και η απόδοση των καρπών αυξήθηκε ελαφρά στη μεταχείριση που εφαρμόστηκε κόμποστ σε σχέση με τον μάρτυρα της ανόργανης λίπανσης. Αντίθετα με την παραπάνω εργασία, οι Giannakis et al. (2014) αναφέρουν βραδύτερη ανάπτυξη σε φυτά τομάτας που δέχτηκαν μεταχείριση με κόμποστ ΑΣΑ σε σύγκριση με φυτά που δέχτηκαν ανόργανο λίπασμα. Τα δοχεία που τροποποιήθηκαν με 50 και $100 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ κόμποστ παρήγαγαν 48 και 35% λιγότερη βιομάζα, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα φυτά που δεν υπέστησαν επεξεργασία με συμβατικά λιπάσματα.

4.7.2 Συγκέντρωση των Θρεπτικών Στοιχείων στα Φύλλα, στα Στελέχη και στους

Καρπούς του Φυτού

Στους Πίνακες 4.15 έως 4.17 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των μακρο- και μικρο-θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς των φύλλων, των στελεχών και των καρπών που συλλέχθηκαν στις 4 καλλιεργητικές περιόδους (2011-2014).

Οι συγκεντρώσεις ολικού N στα ώριμα φύλλα κυμάνθηκαν από 2,49 έως 3,65% (ξ.β.) την 1η καλλιεργητική περίοδο, από 2,43 έως 4,05% την 2η περίοδο, μεταξύ 2,66 και 3,93% την 3η περίοδο και από 2,12 έως 2,74% κατά τη διάρκεια της τελευταίας συγκομιδής το 4ο έτος. Γενικά, παρατηρήθηκε ότι τα φυτά που δέχθηκαν την οργανική λίπανση “M” εμφάνισαν υψηλότερες συγκεντρώσεις N στους φυτικούς ιστούς τα 2 πρώτα έτη και παρόμοιες συγκεντρώσεις με τα φυτά της συμβατικής λίπανσης τα επόμενα 2 έτη. Η επίδραση της κοπριάς ήταν πιο εμφανής ($p < 0.05$) στα ποσοστά N που περιείχαν τα στελέχη των φυτών τα 3 πρώτα χρόνια. Επίσης, η περιεκτικότητα του N στα φύλλα της εναλλακτικής λίπανσης “MSWC+M” κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με την “M” μεταχείριση, γεγονός που επιβεβαιώνει την λιπαντική αξία του μίγματος αυτού. Επίσης, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων στις συγκεντρώσεις ολικού N στους καρπούς των φυτών σε όλα τα έτη με εξαίρεση το 2013, όπου τα φυτά που λιπάνθηκαν με συμβατικό λίπασμα εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερα ποσοστά N στους καρπούς τους σε σχέση με τα φυτά της οργανικής λίπανσης.

Σε ό,τι αφορά στο περιεχόμενο σε φώσφορο (P^{3+}) των φυτικών ιστών, υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για τα έτη 2012 και 2013, καθώς και για τα φύλλα το τελευταίο έτος. Οι συγκεντρώσεις P^{3+} στα ώριμα φύλλα κυμαίνονται από 0,34 έως 0,57% (ξ.β.) την 2^η καλλιεργητική περίοδο, από 0,36 έως 0,63% την 3^η περίοδο και από 0,41 έως 0,46% κατά τη διάρκεια της τελευταίας συγκομιδής το 4^ο έτος. Οι τιμές αυτές θεωρούνται εντός των φυσιολογικών ορίων επάρκειας των φυτών σε φώσφορο (Sonneveld & Voogt 2009, Campbell 2000, Σαρρή Π.) και παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί σε αντίστοιχες εργασίες (Demir et al. 2010; Rigane & Medhioub 2011). Η λίπανση δεν επηρέασε σημαντικά τη συγκέντρωση του P^{3+} στα φυτικά μέρη την 2^η καλλιεργητική περίοδο, παρόλο που διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση Olsen-P του εδάφους και στις τέσσερις δειγματοληψίες. Ωστόσο, την περίοδο της τελευταίας δειγματοληψίας της επόμενης καλλιεργητικής περιόδου (2013), η περιεκτικότητα σε P^{3+} στα φύλλα και στα στελέχη ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στα τεμάχια που υφίσταται επεξεργασία με κοπριά από ό, τι στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Η παραπάνω παρατήρηση δεν διαπιστώθηκε στα αποτελέσματα των αναλύσεων σε P στα δείγματα των φύλλων της τελευταίας συγκομιδής του έτους 2014. Σημαντική αύξηση του περιεχομένου σε P των φυτικών ιστών των φύλλων σε μία καλλιέργεια τομάτας όπου προστέθηκε στο έδαφος κοπριά πουλερικών, παρατηρήθηκε και από τους Demir et al. (2010), με την επίδραση της κοπριάς να είναι πιο έντονη με την εφαρμογή μεγαλύτερων δόσεων του οργανικού υλικού. Αντίστοιχα, στην εργασία των Rigane & Medhioub (2011), όπου σε μία καλλιέργεια τομάτας προστέθηκαν διάφορα μίγματα κόμποστ και κοπριάς, η μεταχείριση του μάρτυρα της κοπριάς εμφάνισε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις φωσφόρου στα φυτικά μέρη (0,8% ξ.β.).

Οι συγκεντρώσεις K^+ στα ώριμα φύλλα κυμάνθηκαν κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ετών πειραματισμού από 1,47 έως 6,08% (ξ.β.), στα στελέχη μεταξύ 2,93 και 6,77% (ξ.β.) και στους καρπούς από 3,82 έως 7,95%. Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μεγάλη διακύμανση των τιμών, που παρατηρείται κυρίως ανάμεσα στην 1^η και 2^η διετία πειραματισμού και μπορεί να οφείλεται στα διαφορετικά ποσά νερού που προστέθηκαν στο έδαφος την περίοδο 2011-2012 (μ.ο. 1010 χιλ. νερού) και 2013-2014 (μ.ο. 1888 χιλ. νερού).

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 1.1.6, τα ιόντα K μεταφέρονται στις ρίζες των φυτών κυρίως μέσω του μηχανισμού της διάχυσης, ο οποίος ευνοείται σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας, λόγω αυξημένου ποσοστού οξυγόνου στους εδαφικούς πόρους. Τα υψηλά ποσοστά καλίου που παρατηρούνται την 2^η καλλιεργητική περίοδο δείχνουν μία σημαντική περίσσεια K⁺. Στη βιβλιογραφία, ενώ τα επίπεδα επάρκειας σε συγκεντρώσεις K⁺ στα φύλλα τομάτας έχουν αναφερθεί από 3 έως 5% (Sonneveld & Voogt 2009, Campbell 2000), σε πειραματικές καλλιέργειες τομάτας όπου ενσωματώθηκαν στα εδάφη οργανικά λιπάσματα, παρουσιάζονται επίσης μεγάλες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις του καλίου, από 0,78-1,76% (ξ.β.) στην εργασία των Rigane & Medhioub (2011) έως 4-4,8 % (ξ.β.) στην εργασία των Demir et al. (2010). Στον πειραματικό αγρό της τομάτας, η μεταχείριση επέδρασε σημαντικά στις συγκεντρώσεις K⁺ στα ώριμα φύλλα κατά τη διάρκεια της καρπόδεσης του 2^{ου} καλλιεργητικού κύκλου, με την εφαρμογή κοπριάς να αυξάνει σημαντικά τα ποσοστά στους φυτικούς ιστούς. Σημαντική αύξηση K⁺ λόγω κοπριάς παρατηρείται, επίσης, και στα στελέχη των φυτών τα 2 τελευταία έτη. Ωστόσο, την ίδια περίοδο (2013 και 2014) το περιεχόμενο σε K⁺ των φυτικών ιστών των φύλλων ήταν μεγαλύτερο στα φυτά που εφαρμόστηκε κόμποστ ΑΣΑ από τα φυτά που δέχθηκαν εφαρμογή κοπριάς. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων στις συγκεντρώσεις K⁺ στους καρπούς των φυτών.

Τα επίπεδα του ασβεστίου στα ώριμα φύλλα κυμάνθηκαν μεταξύ 3,3 και 8,0 % (ξ.β.), στα στελέχη μεταξύ 1,70 και 4,14% και στους καρπούς από 0,10 έως 0,54%. Οι παραπάνω συγκεντρώσεις Ca²⁺ στα φύλλα των φυτών τομάτας δείχνουν μία περίσσεια αποθηκευμένου ασβεστίου, συγκρινόμενες με τα όρια επάρκειας που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Sonneveld & Voogt 2009, Campbell 2000) (1-3,2 %ξ.β.), ωστόσο παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί στις εργασίες των Demir et al. (2010) (4,4-5,0 %ξ.β.) και Rigane & Medhioub (2011) (3,6-5,1 %ξ.β.). Γενικά, στο συγκεκριμένο πείραμα δεν παρατηρήθηκε σημαντική επίδραση των μεταχειρίσεων στις συγκεντρώσεις Ca²⁺ στους φυτικούς ιστούς των φυτών.

Η περιεκτικότητα των φύλλων σε Mg²⁺ κυμάνθηκε σε όλες τις περιόδους από 0,3 έως 1,1% (ξ.β.), τιμές συγκρίσιμες με παρόμοιες ερευνητικές εργασίες (Demir et al. 2010; Rigane & Medhioub 2011) και εντός των βέλτιστων ορίων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Campbell 2000) (0,3-0,8 % ξ.β.). Το πρώτο έτος διαπιστώθηκε ότι τα φυτά που δέχθηκαν κοπριά (‘‘Μ’’ μεταχείριση) έδειξαν σημαντικά υψηλότερο περιεχόμενο σε Mg²⁺ κατά την τελευταία δειγματοληψία στα φύλλα και στους καρπούς. Το ίδιο παρατηρήθηκε για τα φύλλα και στη δεύτερη δειγματοληψία της επόμενης χρονιάς. Αντίθετα, τα επόμενα 2 έτη (2013-2014) τα φυτά που λιπάνθηκαν με ΝΡΚ λίπασμα έδειξαν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε Mg²⁺ στα φύλλα τους σε σχέση με τα φυτά των υπόλοιπων μεταχειρίσεων. Σημειώνεται, επίσης, ότι στα στελέχη και στους καρπούς δεν φάνηκε κάποια σημαντική επίδραση της μεταχείρισης για όλα τα έτη, εκτός από τους καρπούς της όψιμης ποικιλίας το 2011.

Η περιεκτικότητα των φύλλων σε Na⁺ κυμάνθηκε σε όλες τις περιόδους από 0,004 έως 0.016% (ξ.β.) και αντίστοιχες τιμές εμφάνισαν τα στελέχη των φυτών, ενώ οι καρποί είχαν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις κατιόντων νατρίου. Σχετικά με τα μικρο-θρεπτικά (Zn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺, Mn²⁺, B⁺) στοιχεία, οι συγκεντρώσεις τους βρέθηκαν εντός των φυσιολογικών ορίων που αναφέρονται από τον Campbell (2000) για ώριμα φύλλα τομάτας (Zn: 18-75, Fe: 45-300, Cu: 5-30, Pb: 5-10, Mn: 30-300, B: 30-75 ppm). Σε γενικές γραμμές, η προσθήκη κόμποστ ΑΣΑ στο έδαφος οδήγησε σε υψηλότερες συγκεντρώσεις Zn²⁺ και Cu²⁺ σε όλα τα μέρη του φυτού από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επίσης, στο πρώτο έτος πειραματισμού, η ‘‘Μ’’ μεταχείριση εμπλούτισε σημαντικά το περιεχόμενο των βρώσιμων καρπών σε Fe²⁺, Mn²⁺ και B⁺, ενώ τα επόμενα έτη, ο τύπος λίπανσης δεν επηρέασε σημαντικά τα παραπάνω ιχνοστοιχεία, με εξαίρεση το 2013, όπου τα φυτά που δέχθηκαν συμβατική λίπανση είχαν υψηλότερες

συγκεντρώσεις Mn^{2+} στους καρπούς διαφέροντας σημαντικά ($p<0.01$) από τα φυτά των οργανικών μεταχειρίσεων.

Σχετικά με την περιεκτικότητα βαρέων μετάλλων στους φυτικούς ιστούς και στους καρπούς, οι συγκεντρώσεις των στοιχείων Li, Al, Si, Ni, As, V, Cr, Se, Hg και U παρέμειναν κάτω από τα όρια ανίχνευσης. Το Cd ανιχνεύθηκε μόνο στα φύλλα στα πρώτα στάδια ανάπτυξης του φυτού, με συγκεντρώσεις λίγο πάνω από τα όρια ανίχνευσης. Τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη παραγωγή και το γεγονός ότι οι τιμές των θρεπτικών διατηρήθηκαν εντός των βέλτιστων ορίων για την ανάπτυξη των φυτών, καταδεικνύουν ότι το κόμποστ ΑΣΑ, που παρήχθη στο εργοστάσιο κομποστοποίησης της ΔΕΔΙΣΑ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε γεωργικά εδάφη, και η χρήση του σε συνδυασμό με χωνεμένη κοπριά από αιγοπρόβατα μπορεί να εμπλουτίσει το έδαφος με τις απαραίτητες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων για την ανάπτυξη της καλλιέργειας *Solanum Lycopersicum*.

Πίνακας 4.15. Επίδραση της μεταχείρισης στην περιεκτικότητα του ολικού N (% ξ.β.), K⁺ (% ξ.β.) και P³⁺ (% ξ.β.) στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού *Solanum Lycopersicum*.

Έτος	Μεταχείριση	TN					P ³⁺					K ⁺				
		6-8 εβδομ.	14-16 εβδομ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδομ.	14-16 εβδομ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδομ.	14-16 εβδομ.	Καταστροφική Δειγματοληψία		
		Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ
2011	IF	3.40	2.84	2.28	1.15b	2.12						4.05	3.10	3.05	4.21	5.86
	MSWC	3.31	3.24	2.49	1.19b	2.37						4.34	3.31	3.34	4.38	6.15
	M	3.50	3.27	2.87	1.48a	3.06						4.06	3.67	4.03	4.18	7.95
	MSWC+M	3.65	3.17	2.67	1.31ab	2.85						4.16	3.58	3.52	4.56	6.85
	Σημαντικότητα	ns	ns	ns	*	ns						ns	ns	ns	ns	ns
2012	IF	2.60	3.37	3.42b	1.12ab	3.15	0.40	0.50	0.50	0.39	0.73	4.40ab	4.71b	5.25	6.30	6.54
	MSWC	2.43	3.58	3.55b	1.00b	2.97	0.34	0.52	0.47	0.26	0.67	4.16b	5.28ab	5.59	6.15	7.07
	M	2.74	3.87	4.04a	1.29a	3.32	0.48	0.57	0.50	0.41	0.77	5.13a	6.08a	5.55	6.39	7.15
	MSWC+M	2.71	3.44	4.05a	1.17ab	2.59	0.38	0.53	0.50	0.38	0.66	4.69ab	5.18ab	5.39	6.49	6.49
	Σημαντικότητα	ns	ns	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns
2013	IF		3.93a	2.66	1.24a	3.89a		0.42	0.43ab	0.27b	0.64		2.36	1.95ab	4.36c	5.23
	MSWC		3.32b	2.78	1.16ab	3.24b		0.36	0.37b	0.24b	0.73		2.19	2.39a	5.61b	5.69
	M		3.60ab	2.71	1.27a	3.25b		0.47	0.63a	0.49a	0.75		2.16	1.90b	6.77a	4.30
	MSWC+M		3.30b	2.85	1.06b	2.84b		0.42	0.49ab	0.33b	0.64		2.22	1.89b	5.89ab	4.16
	Σημαντικότητα		**	ns	*	***		ns	*	***	ns		ns	*	***	ns
2014	IF			2.74	1.11	3.59			0.43					1.47	2.93b	3.82
	MSWC			2.40	1.09	3.52			0.42					2.63	4.22ab	4.20
	M			2.12	1.35	3.34			0.46					1.93	5.06a	3.90
	MSWC+M			2.36	1.14	2.71			0.41					2.83	5.51a	3.83
	Σημαντικότητα			ns	ns	ns			ns					ns	**	ns

ns: όχι στατιστικά σημαντικό, *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001, εντός της ίδιας συγκομιδής αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για p<0,05, "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, Φ: Φύλλα, Σ: Στελέχη, Κ: Καρποί.

Πίνακας 4.16. Επίδραση της μεταχείρισης στην περιεκτικότητα του Ca²⁺ (% ξ.β.), Mg²⁺ (% ξ.β.), Na⁺ (ppm) και Zn²⁺ (ppm) στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού *Solanum Lycopersicum*.

Έτος	Μεταχείριση	Ca ²⁺					Mg ²⁺					Na ⁺					Zn ²⁺				
		6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία		
		Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ
2011	IF	6.5	7.2	7.6	3.6	0.36	0.68	0.47	0.54ab	0.31	0.20b	81	105	143b	90b	29b	33	59	40b	63	51
	MSWC	6.3	6.5	6.7	3.2	0.32	0.70	0.47	0.65a	0.27	0.19b	143	129	166ab	135a	44ab	54	72	72ab	97	36
	M	6.4	6.1	7.3	3.2	0.42	0.76	0.46	0.65a	0.24	0.33a	89	118	179a	98b	59a	50	65	78ab	59	55
	MSWC+M	6.2	6.8	7.1	3.5	0.54	0.73	0.48	0.47b	0.26	0.21b	243	158	171a	126a	45ab	48	74	91a	93	36
	Σημαντικ.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	**	***	*	ns	ns	*	ns	ns
2012	IF	8.0	3.4	5.8	4.21a	0.17	1.02	0.48b	0.65	0.98	0.12	80	79	196a	132	26	12c	29ab	20	92b	25
	MSWC	7.8	3.3	5.5	4.14a	0.16	0.99	0.45b	0.54	0.97	0.14	113	82	133b	166	40	52a	27ab	23	253a	39
	M	7.4	4.0	5.2	3.18b	0.17	1.10	0.69a	0.73	0.81	0.16	114	96	126ab	131	61	21bc	21b	19	59b	33
	MSWC+M	7.6	4.1	4.8	3.76ab	0.17	1.01	0.61ab	0.46	0.92	0.09	141	88	106b	158	45	33b	40a	26	182a	23
	Σημαντικ.	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	***	*	ns	***	ns
2013	IF		3.8	5.6	3.9	0.21		0.38	0.49a	0.81	0.16		<DL	<DL	1057a	<DL		14	19	73	25
	MSWC		3.3	5.1	3.5	0.19		0.32	0.36ab	0.66	0.16		<DL	<DL	779ab	<DL		12	31	168	26
	M		3.4	5.1	3.7	0.14		0.36	0.37ab	0.71	0.12		<DL	<DL	288b	<DL		10	30	121	47
	MSWC+M		3.4	5.0	3.6	0.14		0.33	0.29b	0.63	0.12		<DL	<DL	366b	<DL		12	23	132	36
	Σημαντικ.		ns	ns	ns	ns		ns	*	ns	ns				**			ns	ns	ns	ns
2014	IF			7.2	2.1	0.18			0.70	0.49	0.07			169a	243a	610a			35	66b	38ab
	MSWC			7.5	1.7	0.13			0.64	0.41	0.12			103ab	183ab	397ab			59	147a	53a
	M			6.7	2.4	0.10			0.47	0.46	0.07			39b	64b	194ab			41	42b	14b
	MSWC+M			6.4	2.0	0.10			0.49	0.40	0.08			48b	70b	86b			57	82b	59a
	Σημαντικ.			ns	ns	ns			ns	ns	ns			*	*	*			ns	**	*

ns: όχι στατιστικά σημαντικό, *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001, εντός της ίδιας συγκομιδής αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για p<0,05, "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, Φ: Φύλλα, Σ: Στελέχη, Κ: Καρποί.

Πίνακας 4.17. Επίδραση της μεταχείρισης στην περιεκτικότητα του Fe²⁺ (ppm), Cu²⁺ (ppm), Mn²⁺ (ppm) και B⁺ (ppm) στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού Solanum Lycopersicum.

Έτος	Μεταχείριση	Fe ²⁺					Cu ²⁺					Mn ²⁺					B ⁺				
		6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία			6-8 εβδ.	14-16 εβδ.	Καταστροφική Δειγματοληψία		
		Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ	Φ	Φ	Φ	Σ	Κ
2011	IF	188	161	301	256	53b	6.5	7.2	7.6	3.6	0.4	68	515	432	43	17b	63	49	50	27	17b
	MSWC	226	153	302	320	51b	6.3	6.5	6.7	3.2	0.3	65	560	458	34	16b	62	45	49	23	15b
	M	162	131	303	294	102a	6.4	6.1	7.3	3.2	0.4	106	468	587	40	28a	69	45	50	25	25a
	MSWC+M	238	167	245	369	68ab	6.2	6.8	7.1	3.5	0.5	75	556	602	45	18b	67	45	50	23	16ab
	Σημαντικ.	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	**
2012	IF	64	48	30b	61	9.8	17	26	20	20.3a	10.1	63	42ab	61	18	12	68	52	62	27	5.8
	MSWC	70	55	44ab	58	10.7	21	26	23	21.6a	13.4	56	34b	57	16	13	69	52	66	23	8.0
	M	75	63	43ab	35	10.7	16	20	19	9.6b	8.9	59	51a	61	14	16	59	58	58	21	11.0
	MSWC+M	78	67	63a	66	6.2	19	24	26	24.3a	10.8	59	45ab	55	15	10	72	56	63	20	10.9
	Σημαντικ.	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2013	IF		115	328	66	70		21.0ab	15.3b	19.5	17.8		50	71ab	19ab	26a		16	24	8.0	1.3
	MSWC		119	303	54	45		26.8a	29.4a	23.7	17.1		40	64ab	21a	21ab		16	25	7.4	1.6
	M		144	362	52	35		20.8b	16.0b	19.7	13.3		54	75a	17ab	18b		14	21	7.1	<DL
	MSWC+M		129	378	60	47		22.8b	18.0b	21.2	10.8		45	60b	14b	16b		14	22	6.3	<DL
	Σημαντικ.		ns	ns	ns	ns		***	***	ns	ns		ns	*	**	**		ns	ns	ns	ns
2014	IF			263ab	150a	71			8.8	11.0	16.8ab			74	8	10			71	11	2.0
	MSWC			370a	84b	78			15.3	11.9	23.3a			56	12	13			93	10	1.4
	M			236b	77b	35			<DL	4.4	8.8b			51	14	11			77	15	1.9
	MSWC+M			340ab	77b	46			8.7	8.0	15.8ab			49	11	12			73	13	1.1
	Σημαντικ.			*	**	ns			ns	ns	*			ns	ns	ns			ns	ns	ns

ns: όχι στατιστικά σημαντικό, *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001, εντός της ίδιας συγκομιδής αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για p<0,05, "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30, Φ: Φύλλα, Σ: Στελέχη, Κ: Καρποί.

4.7.3 Συσσώρευση και Ποσοστά Πρόσληψης των Θρεπτικών Στοιχείων N, P και K στο Υπέργειο Μέρος του Φυτού

Στον Πίνακα 4.18 παρουσιάζονται οι ποσότητες N, P και K που συσσωρεύτηκαν σε κάθε φυτικό μέρος της τομάτας (φύλλα, στελέχη, καρποί), με εξαίρεση τις ρίζες, αλλά και συνολικά σε όλο το υπέργειο τμήμα της τομάτας. Παράλληλα, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό εφαρμοζόμενο φορτίο των θρεπτικών στοιχείων (Πίν. 4.9), προσδιορίστηκαν τα ποσοστά πρόσληψης των N, P, K.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η συσσώρευση N στα φύλλα τα 3 πρώτα έτη και στα στελέχη τα 2 πρώτα έτη, παρουσίασε μεταβλητότητα μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων (Σχ. 4.22). Συνολικά, στα 4 έτη πειραματισμού, η ποσότητα N που συσσωρεύτηκε κατά μέσο όρο στο υπέργειο τμήμα της τομάτας για κάθε μεταχείριση ήταν κατά αύξουσα σειρά “M”: $1,63 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, “MSWC+M”: $1,49 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, “IF”: $1,42 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ και “MSWC”: $1,33 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Αντίστοιχα, η συνολική κατά μέσο όρο ποσότητα K που συσσωρεύτηκε στο υπέργειο τμήμα της τομάτας κάθε μεταχείρισης ήταν κατά αύξουσα σειρά: “MSWC+M”: $2,66 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, “M”: $2,60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, “MSWC”: $2,30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ και “IF”: $2,26 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Αναφορικά με τη συσσώρευση φωσφόρου στα φυτικά μέρη της τομάτας, οι μεταχειρίσεις όπου έγινε εφαρμογή κοπριάς (“M” και “MSWC+M”) παρουσίασαν τη μεγαλύτερη ποσότητα N σε όλα τα μέρη της τομάτας συγκριτικά με τις υπόλοιπες 2 μεταχειρίσεις, κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Σημαντική διαφοροποίηση διαπιστώθηκε, επίσης, της συσσώρευσης των θρεπτικών στοιχείων N, P και K μεταξύ των φυτικών μερών της τομάτας. Σε όλες τις περιπτώσεις, η κατανομή των τριών θρεπτικών στοιχείων στο φυτό, δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος των στοιχείων αποθηκεύεται στους καρπούς (49-75%N, 64-79%P, 48-79%K) και ακολουθούν τα φύλλα (18-47%N, 18-30%P, 12-30%K). Η τομάτα είναι μια καλλιέργεια δυνητικά υψηλής απόδοσης, με δείκτη συγκομιδής περίπου 57-65%, όπου κατά τη διάρκεια της καρποφορίας, η ανάπτυξη καρπών των αντιπροσωπεύει το 75-90% του νωπού βάρους των φυτών και ως εκ τούτου οι καρποί είναι οι κύριες δεξαμενές για αφομοίωση. Κατά μέσο όρο, σε όλες τις μεταχειρίσεις στα 3 τελευταία έτη πειραματισμού, που εφαρμόστηκε η ίδια ποικιλία τομάτας, το 66% περίπου του N και του K και το 71% του P αποθηκεύονται στους καρπούς.

Κατά τη σύγκριση των μεταχειρίσεων για τα έτη 2012 και 2013 που υπήρχαν οι άριστες συνθήκες ανάπτυξης των φυτών, όσον αφορά στην ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών του εδάφους από τα φυτά, η ανόργανη λίπανση επέδειξε την καλύτερη απόδοση, όπου τα θρεπτικά συστατικά των φυτών αναλογούσαν έως και 80%, 76% και 100% του εφαρμοζόμενου N, P, και K, αντίστοιχα, μειώνοντας, με αυτόν τον τρόπο, την πιθανότητα έκπλυσης του διαλυμένου N, και των σχετικών συνεπειών αυτού, στα υπόγεια ύδατα. Αντίστοιχα, τα ποσοστά πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων N/P/K από τα φυτά που δέχθηκαν οργανική λίπανση (κόμποστ, κοπριά, μίγμα), κυμάνθηκαν από 32 έως 43% για το N, 26-73% για το P και 46-99% για το K.

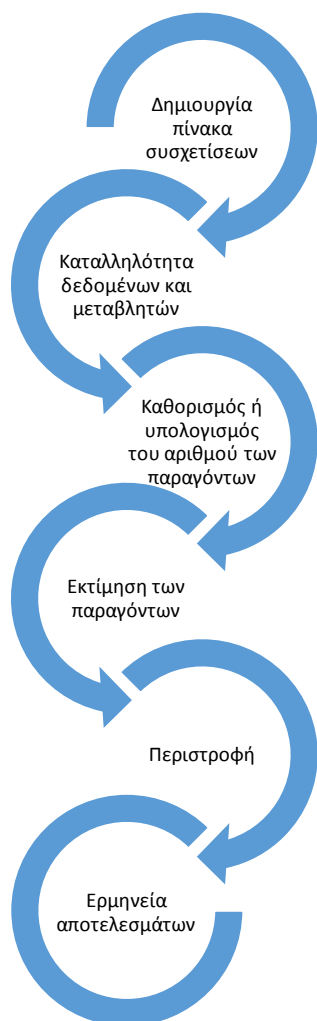
Πίνακας 4.18. Συσσωρευση (kg·ha⁻¹) και ποσοστά πρόσληψης (%) των θρεπτικών στοιχείων N , P και K στα φυτικά μέρη του υπέργειου τμήματος του φυτού *Solanum Lycopersicum*.

	Πηγή	N				P				K			
		IF	MSWC	M	MSW C+M	IF	MSWC	M	MSWC +M	IF	MSW C	M	MSW C+M
2011	Φύλλα	39b*	54ab	58a	53ab					42	60	67	57
	Στελέχη	8b***	10b	21a	18a					30c**	36bc	57ab	62a
	Καρποί	72	90	103	129					200	234	265	307
	Άθροισμα	119	154	183	200					272b*	331ab	390ab	426a
	Προστέθηκαν	237	806	583	739					47	542	304	471
	Ποσοστά πρόσληψης	50	19	31	27					573	61	128	91
2012	Φύλλα	157b**	174b	232a	256a	23	23	29	32	242b***	272b	318a	341a
	Στελέχη	18ab**	16b	23a	21a	6	4	7	7	103	97	115	119
	Καρποί	301	247	312	268	69	56	72	68	624	590	673	672
	Άθροισμα	477	436	567	545	99	83	108	107	968	959	1105	1132
	Προστέθηκαν	595	1251	1318	1295	130	121	416	226	510	1123	1116	1163
	Ποσοστά πρόσληψης	80	35	43	42	76	68	26	47	190	85	99	97
2013	Φύλλα	122ab*	133ab	119b	138a	20	18	28	24	89	115	84	92
	Στελέχη	16	16	19	17	3.5b**	3.4b	7a	5ab	56ab**	78ab	102a	94a
	Καρποί	360	348	396	337	67	79	92	76	551	328	527	494
	Άθροισμα	498	497	534	492	90b*	100ab	127a	105ab	696	685	713	680
	Προστέθηκαν^L	818	1484	1584	1541	131	138	417	220	728	1381	1395	1471
	Ποσοστά πρόσληψης	61	33	34	32	69	73	31	48	96	50	51	46
2014	Φύλλα	86	57	64	53	1.4	1.0	1.4	0.9	47	57	58	72
	Στελέχη	15	14	23	20					39b**	55ab	87a	100a
	Καρποί	222	176	262	178					238	210	251	251
	Άθροισμα	323	247	349	252					324	322	396	423
	Προστέθηκαν^{LL}	782	1448	1488	1484					570	1220	1192	1244
	Ποσοστά πρόσληψης	41	17	23	17					57	26	33	34

^LΧρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του 2012 για τις ρίζες των φυτών που προστέθηκαν στο έδαφος, ^{LL}Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του 2012 για τα υπολείμματα των καλλιεργειών και τις ρίζες των φυτών που προστέθηκαν στο έδαφος, *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001, εντός της ίδιας γραμμής και του ίδιου θρεπτικού στοιχείου αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey (HSD) για p<0,05, “IF”: Ανόργανη Λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ, “M”: Κοπριά, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.

4.8 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ - ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο Σχήμα 4.26 αποτυπώνονται τα βήματα που εφαρμόστηκαν κατά την παραγοντική ανάλυση. Αρχικά υπολογίστηκαν οι αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των εδαφικών παραμέτρων και εξετάστηκε αν υπάρχουν σημαντικές συσχετίσεις. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η καταλληλότητα των δεδομένων και των μεταβλητών που αναλύθηκαν και ακολούθησε η επιλογή του αριθμού κύριων συνιστωσών (παραγόντων) προς εξαγωγή, που θεωρείται ένα πολύ σημαντικό βήμα στην παραγοντική ανάλυση και το οποίο επηρεάζει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Κατόπιν, έγινε η εξαγωγή των κύριων συνιστωσών, επιλέχθηκε η μέθοδος περιστροφής και ερμηνεύτηκαν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.26. Βήματα παραγοντικής ανάλυσης.

4.8.1 Εδαφικές παράμετροι

Για τη συσχέτιση των κύριων εδαφικών παραμέτρων και την παραγοντική ανάλυση που ακολούθησε δεν χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του 1^{ου} πειραματικού έτους που χαρακτηρίστηκε ως προπαρασκευαστικό έτος, μέχρι το εδαφικό οικοσύστημα να έρθει σε νέα ισορροπία. Οι εδαφικοί παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Ec), ο οργανικός άνθρακας (TOC), το ολικό άζωτο (TN), τα ανόργανα ιόντα αζώτου (NH_4^+N και NO_3^-N) και ο αφομοιώσιμος φώσφορος (OlsenP). Χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των παραμέτρων για κάθε μεταχείριση και δειγματοληψία, για τα έτη 2012-14

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

($N_{\text{παραμέτρου}}=72$). Οι συσχετίσεις μεταξύ όλων των ζευγών μεταβλητών της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.19.

Πίνακας 4.19. Συντελεστές συσχέτισης των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κύριων συνιστωσών.

	pH	Ec ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NH_4^+N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NO_3^-N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	OlsenP ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
pH	1	0.424***	0.254*	0.518***	-0.037	0.016	-0.149
Ec ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		1	0.470***	0.522***	0.438***	0.555***	0.305**
TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			1	0.732***	0.181	0.198	0.397**
TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)				1	0.309**	0.187	0.201
NH_4^+N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)					1	0.486***	0.457***
NO_3^-N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)						1	0.390***
OlsenP ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)							1

* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.19 παρατηρούμε ότι υπάρχουν σημαντικές αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των εδαφικών παραμέτρων με τους περισσότερους συντελεστές συσχέτισης να είναι μεγαλύτεροι του 0,2.

Κατά τον έλεγχο της καταλληλότητας εφαρμογής της παραγοντικής ανάλυσης βρέθηκε ο δείκτης των Kaiser Meyer Olkin (KMO) ίσος με 0,618 ($>0,5$), η ορίζουσα του πίνακα συσχέτισης ίση με 0,05 ($>0,00001$) και όλες οι τιμές MSA $\geq 0,5$. Επίσης, ο δείκτης σφαιρικότητας (Bartlett's test of sphericity) βρέθηκε στατιστικά σημαντικός ($p=0,000$), ενώ οι τιμές των μεταβλητών του πίνακα των αποτελεσμάτων της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities) ήταν $>0,5$ (Πίν. 4.20). Στη συνέχεια επιλέχθηκαν 2 παράγοντες προς εξαγωγή εφαρμόζοντας το κριτήριο του Kaiser, σύμφωνα με το οποίο επιλέγονται οι παράγοντες που έχουν ιδιοτιμή μεγαλύτερη του 1 (Πίν. 4.21). Μετά την εξαγωγή των κύριων συνιστωσών (παραγόντων), για να γίνουν τα αποτελέσματα πιο ερμηνεύσιμα, επιλέχθηκε η ορθογώνια στρέψη (orthogonal rotation) και συγκεκριμένα η τεχνική Varimax. Η τεχνική αυτή ανταποκρίνεται καλύτερα σε μικρό αριθμό παραγόντων.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα της παραγοντικής ανάλυσης, διαπιστώνουμε ότι ο πρώτος και ο δεύτερος παράγοντας εξηγούν το 66,21% της συνολικής διακύμανσης, εκ των οποίων ο Παράγοντας I συμβάλλει με 43,78% και ο Παράγοντας II επιπλέον 22,43%, ενώ μετά την ορθογώνια στρέψη των παραγόντων ο Παράγοντας I συμβάλλει με 33,84% και ο Παράγοντας II με 32,37% (Πίν. 4.21). Όλες οι μεταβλητές που αξιολογήθηκαν με την παραγοντική ανάλυση έδειξαν θετική συσχέτιση με τον Παράγοντα I (Σχ. 4.27α). Μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών, **οι εδαφικοί παράμετροι pH, Ec, TOC και TN είχαν σημαντική συμβολή (>50%) στον Παράγοντα I, ενώ οι παράμετροι NH_4^+N , NO_3^-N και OlsenP είχαν σημαντική συμβολή στον Παράγοντα II** (Πίν. 4.22 και Σχ. 4.27α).

Πίνακας 4.20. Αποτελέσματα της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities).

	Αρχικά	Εξαγωγή
pH	1.000	0.705
Ec ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1.000	0.686
TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.610
TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.805
NH_4^+N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.629
NO_3^-N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.600
OlsenP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.600

Πίνακας 4.21. Ποσοστά διακύμανσης συνιστωσών.

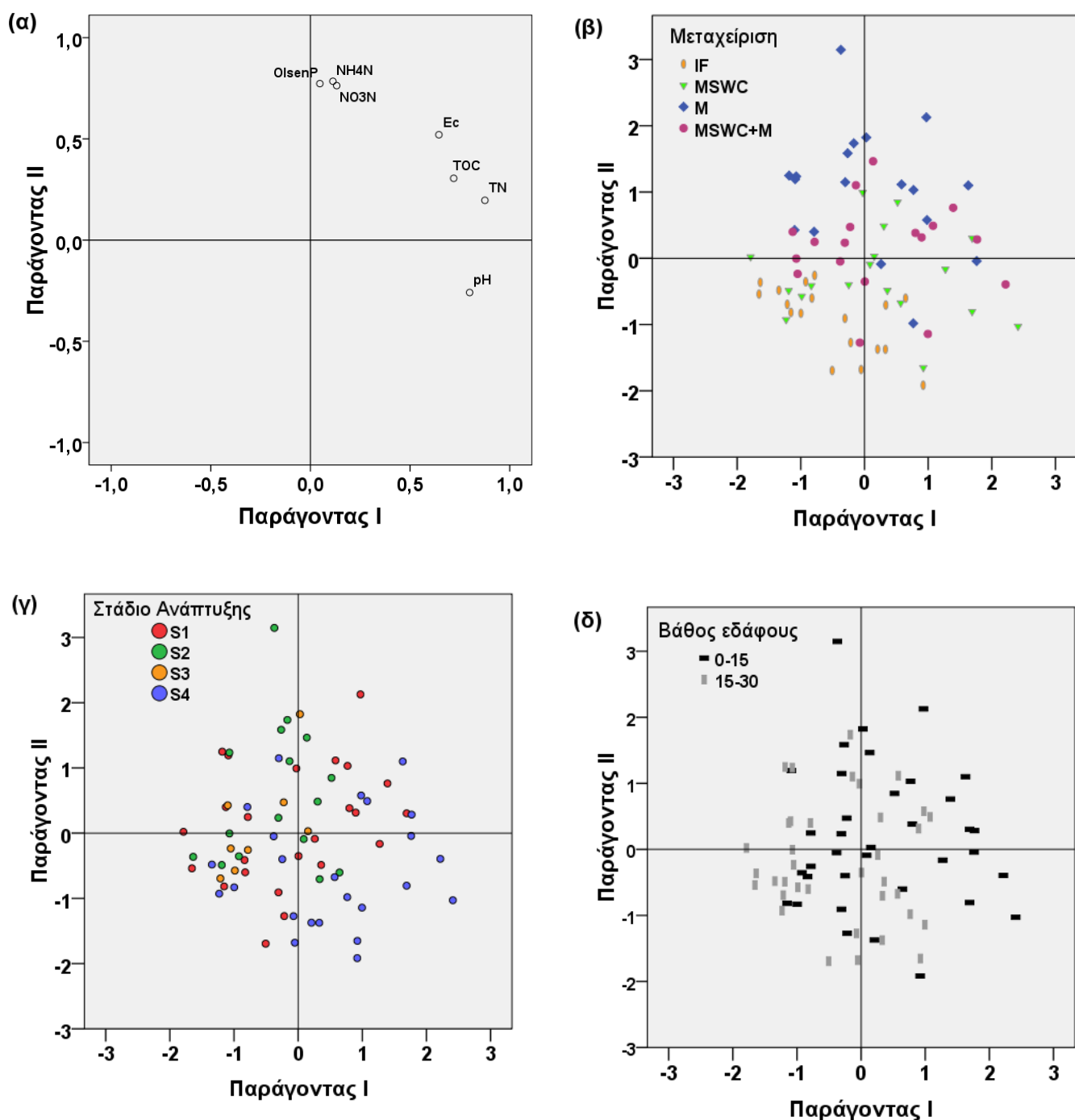
Συνιστώσες	Αρχικές ιδιοτιμές			Φορτίσεις (Loadings)			Άθροισμα τετραγωνισμένων περιστρεφόμενων φορτίσεων		
	Συνολ.	% της Διακύμανσης	Άθροιστι κά %	Συνολ.	% της Διακύμανσης	Άθροιστι κά %	Συνολ.	% της Διακύμανσης	Άθροιστι κά %
1	3.065	43.779	43.779	3.065	43.779	43.779	2.369	33.840	33.840
2	1.570	22.429	66.208	1.570	22.429	66.208	2.266	32.369	66.208
3	.914	13.061	79.270						
4	.553	7.898	87.168						
5	.444	6.348	93.516						
6	.300	4.284	97.800						
7	.154	2.200	100.000						

Πίνακας 4.22. Τελικές παραγοντικές επιβαρύνσεις των εδαφικών παραμέτρων στις κύριες συνιστώσες.

	Κύρια Συνιστώσα	
	1	2
pH	0.80	
Ec ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0.64	0.52
TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.72	
TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.88	
NH_4^+N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		0.78
NO_3^-N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		0.76
OlsenP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		0.77

Παρακάτω δίνονται το διάγραμμα περιστρεφόμενης διάταξης των μεταβλητών χρησιμοποιώντας τις δύο κύριες συνιστώσες (Σχ. 4.27α) και τα διαγράμματα τελικής βαθμολόγησης που δείχνουν τη θέση των μεταχειρίσεων που εφαρμόστηκαν στον πειραματικό αγρό (Σχ. 4.27β), των σταδίων ανάπτυξης του φυτού (Σχ. 4.27γ) και των εδαφικών στρώσεων (Σχ. 4.27δ) στον ορθογωνικό χώρο, που ορίζονται από τους πρώτους δύο παράγοντες.

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”



Σχήμα 4.27. Διάγραμμα φόρτισης των παραγόντων μετά την ορθογωνική περιστροφή μέγιστης διακύμανσης, (α), και διαγράμματα παραγοντικής βαθμολόγησης που δείχνουν τη θέση των μεταχειρίσεων, (β), των σταδίων ανάπτυξης του φυτού, (γ), και των εδαφικών στρώσεων, (δ), ως προς τις 2 κύριες συνιστώσες (Παράγοντας I και II). “IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30. S1: Στάδιο Βλαστητικής ανάπτυξης, S2: Στάδιο Άνθησης και καρπόδεσης, S3: Στάδιο Ωρίμανσης καρπών, S4: Στάδιο Συγκομιδής.

Από το Σχήμα 4.27β διαπιστώνουμε ότι οι δύο πρώτοι παράγοντες (Παράγοντας I και II) διακρίνουν σαφώς τα δείγματα εδάφους των μεταχειρίσεων “M” και “MSWC+M” από τα

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

εδάφη των μεταχειρίσεων “MSWC” και “IF”. Τα περισσότερα δείγματα “M” και “MSWC+M” βρίσκονται στο πάνω άκρο της γραφικής παράστασης, υποδεικνύοντας θετική συσχέτιση με τον Παράγοντα II. Το αντίθετο ισχύει για την πλειονότητα των δειγμάτων εδάφους των μεταχειρίσεων “MSWC” και “IF”. Εξετάζοντας, επίσης, το διάγραμμα που δείχνει τις θέσεις των σταδίων ανάπτυξης του φυτού στον ορθογωνικό χώρο που ορίζονται από τις δύο κύριες συνιστώσες (Σχ. 4.27γ), παρατηρούμε ότι υπάρχει μία σαφής διάκριση του τελευταίου σταδίου από τα υπόλοιπα, που στην πλειονότητα των περιπτώσεων τοποθετείται στο δεξιό κάτω άκρο του διαγράμματος. Ως εκ τούτου, η προσαρμοστικότητα των μεταβλητών του εδάφους επηρεάζεται παράλληλα και από το στάδιο ανάπτυξης των καλλιεργειών, υποδηλώνοντας τη σημασία της μελέτης των ιδιοτήτων των γεωργικών εδαφών εντός καλλιεργητικού κύκλου. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η ανάλυση κύριων συνιστωσών των 7 χημικών παραμέτρων του εδάφους δεν διακρίνει τα δείγματα εδάφους ανάμεσα στα βάθη 0-15 και 15-30 cm (Σχ. 4.27δ).

4.8.2 Παράμετροι φυτού

Η παραγοντική ανάλυση για τις παραμέτρους του φυτού πραγματοποιήθηκε για τα έτη 2012-14 και περιορίστηκε στα αποτελέσματα της φυλλοδιαγνωστικής και της παραγωγής βιομάζας ($N_{\text{θρεπτικών στοιχείων}}=24$ και $N_{\text{παραγωγής βιομάζας}}=12$). Οι τιμές των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στα στελέχη και στους καρπούς των φυτών αφαιρέθηκαν από την ανάλυση, γιατί παρήγαγαν ένα σύνολο δεδομένων που δεν ήταν κατάλληλο για την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης. Για τους ίδιους λόγους αφαιρέθηκαν από την ανάλυση οι συγκεντρώσεις Νατρίου, Μαγγανίου και Χαλκού που περιείχαν τα φύλλα των φυτών.

Πίνακας 4.23. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων της θρεπτικής κατάστασης και της απόδοσης του φυτού που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κύριων συνιστωσών. Η παραγωγή βιομάζας (στελέχη, φύλλα, καρποί) αναφέρεται σε ξηρό βάρος.

	TN (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	B (ppm)	Στελέχη (kg·φυτό ⁻¹)	Φύλλα (kg·φυτό ⁻¹)	Καρποί (kg·φυτό ⁻¹)
TN (%)	1	0.40*	0.49**	-0.71***	-0.26	-0.57**	-0.61**	-0.29	0.34	0.65***	0.25
P (%)		1	0.31	-0.37*	-0.20	-0.15	-0.06	-0.06	0.19	0.25	0.35*
K (%)			1	0.00	0.51**	-0.06	-0.78***	0.46*	0.42*	0.44*	0.03
Ca (%)				1	0.74***	0.49**	0.19	0.68***	-0.13	-0.35*	-0.35*
Mg (%)					1	0.18	-0.40*	0.63***	0.00	-0.06	-0.25
Zn (ppm)						1	0.39*	0.64***	-0.04	-0.58	-0.51**
Fe (ppm)							1	-0.16	-0.42*	-0.45**	-0.02
B (ppm)								1	0.19	-0.34*	-0.64***
Στελέχη (kg·φυτό ⁻¹)									1	0.31	0.07
Φύλλα (kg·φυτό ⁻¹)										1	0.73**
Καρποί (kg·φυτό ⁻¹)											1

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

Στον Πίνακα 4.23 παρουσιάζονται οι αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων του φυτού που αναλύθηκαν, απ' όπου μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το ολικό άζωτο (TN) συσχετίζεται σημαντικά με τις περισσότερες παραμέτρους, παρουσιάζοντας θετική συσχέτιση με τον φώσφορο (P), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca) και την παραγωγή φύλλων και αρνητική συσχέτιση με τον ψευδάργυρο (Zn) και το σίδηρο (Fe). Ο φώσφορος παρουσιάζει επιπρόσθετα σημαντική συσχέτιση με την απόδοση των φυτών σε καρπούς, καθώς και αρνητική σημαντική συσχέτιση με την περιεκτικότητα των φύλλων σε ασβέστιο. Το ασβέστιο με τη σειρά του παρουσιάζει σημαντική θετική συσχέτιση με τα στοιχεία Mg, Zn και B, ωστόσο παρατηρείται μία αρνητική συσχέτιση με τα στοιχεία TN ($p<0,001$) και P ($p<0,05$), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς και με την παραγωγή φύλλων και καρπών ($p<0,05$). Ένα σημαντικό μακροθρεπτικό στοιχείο, το κάλιο, παρουσιάζει επιπρόσθετα σημαντική θετική συσχέτιση με το μαγνήσιο και την παραγωγή βλαστών και φύλλων και σημαντική αρνητική συσχέτιση με το σίδηρο.

Πίνακας 4.24. Τεστ KMO και Bartlett's.

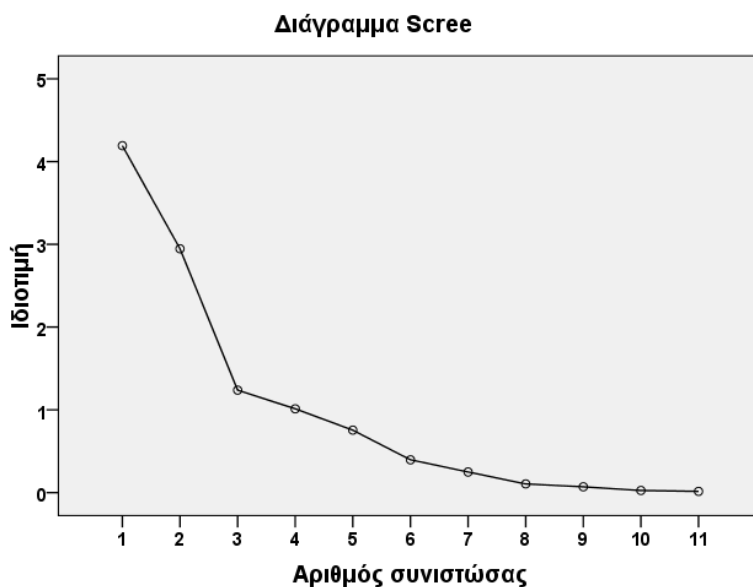
Μέτρηση επέρκειας δείγματος Kaiser-Meyer-Olkin	0.505
Τεστ Σφαιρικότητας	Approx. Chi-Square
Bartlett's	df
	Sig.
	55
	0.009

Πίνακας 4.25. Αποτελέσματα της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities) του φυτού.

	Αρχικά	Εξαγωγή
TN (%)	1.000	0.782
P (%)	1.000	0.223
K (%)	1.000	0.896
Ca (%)	1.000	0.728
Mg (%)	1.000	0.701
Zn (ppm)	1.000	0.591
Fe (ppm)	1.000	0.788
B (ppm)	1.000	0.881
Στελέχη ($\text{kg}\cdot\text{φυτό}^{-1}$)	1.000	0.336
Φύλλα ($\text{kg}\cdot\text{φυτό}^{-1}$)	1.000	0.696
Καρποί ($\text{kg}\cdot\text{φυτό}^{-1}$)	1.000	0.514

Κατά τον έλεγχο της καταλληλότητας εφαρμογής της παραγοντικής ανάλυσης βρέθηκε ο δείκτης των Kaiser Meyer Olkin (KMO) ίσος με 0,505 ($>0,5$), ο δείκτης σφαιρικότητας (Bartlett's test of sphericity) ίσος με 0,009 ($p<0,05$) (Πίν. 4.24), ενώ οι τιμές των μεταβλητών του πίνακα των αποτελεσμάτων της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities) ήταν $>0,5$, με εξαίρεση τις μεταβλητές P και Στελέχη (Πίν. 4.25).

Για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού των εξαγόμενων παραγόντων χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα "Scree" των ιδιοτιμών (Eigenvalues) (Σχ. 4.28), που αποτελεί το γράφημα των ιδιοτιμών του πίνακα συσχέτισης σε φθίνουσα σειρά, σύμφωνα με το οποίο επιλέγονται 2 κύριες συνιστώσες που ανταποκρίνονται καλύτερα στη διακύμανση των αποτελεσμάτων (Πίν. 4.26).



Σχήμα 4.28. Διάγραμμα Scree των ιδιοτιμών.

Μετά την εξαγωγή των κύριων συνιστωσών (παραγόντων), για να γίνουν τα αποτελέσματα πιο ερμηνεύσιμα, επιλέχθηκε η ορθογώνια στρέψη (orthogonal rotation) και συγκεκριμένα η τεχνική Varimax. Ο Πίνακας 4.26 περιέχει τα ποσοστά διακύμανσης των κύριων συνιστωσών πριν και μετά την περιστροφή και ο Πίνακας 4.27 περιέχει τις επιβαρύνσεις των παραγόντων μετά την περιστροφή. Από τους πίνακες αυτούς μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι οι φυτικοί παράμετροι B, Ca, Zn, Mg, TN, παραγωγή φύλλων και παραγωγή καρπών είχαν σημαντική συμβολή (>50%) στον Παράγοντα I, ο οποίος εξηγεί το 35,71% της διακύμανσης μετά την περιστροφή, ενώ οι μεταβλητές K, Fe και παραγωγή στελεχών είχαν σημαντική συμβολή στον Παράγοντα II, ο οποίος εξηγεί το 29,18% της διακύμανσης μετά την περιστροφή.

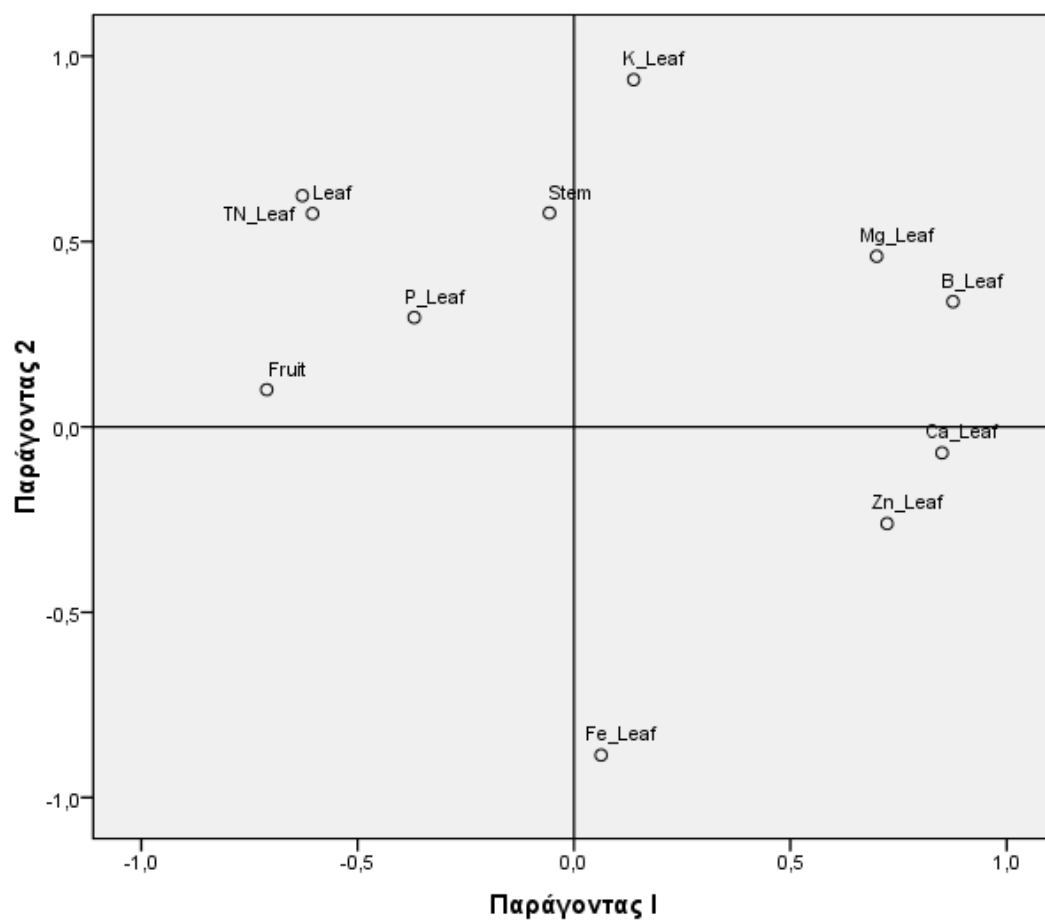
Στο διάγραμμα φόρτισης των παραγόντων μετά την περιστροφή (Σχ. 4.29), τα μακροθρεπτικά στοιχεία, TN και P, βρίσκονται στο ίδιο τεταρτημόριο του διαγράμματος με την παραγωγή βιομάζας (καρποί, στελέχη, φύλλα), παρουσιάζοντας αρνητική συσχέτιση με τον Παράγοντα I και θετική συσχέτιση με τον Παράγοντα II. Επίσης, στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται μία ομαδοποίηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε Mg, B, Ca και Zn, με τα 2 πρώτα στοιχεία να σχετίζονται θετικά με τον Παράγοντα II και τα 2 επόμενα να έχουν αρνητική συσχέτιση.

Πίνακας 4.26. Ποσοστά διακύμανσης κύριων συνιστωσών παραμέτρων φυτού.

Συνιστώ- σες	Αρχικές ιδιοτιμές			Φορτίσεις (Loadings)			Άθροισμα τετραγωνισμένων περιστρεφόμενων φορτίσεων		
	Συνολικά	% της Διακύμα νσης	Αθροισ τικά %	Συνολικά	% της Διακύμα νσης	Αθροισ τικά %	Συνολικά	% της Διακύμα νσης	Αθροισ τικά %
1	4.19	38.10	38.10	4.19	38.10	38.10	3.93	35.71	35.71
2	2.95	26.78	64.89	2.95	26.78	64.89	3.21	29.18	64.89
3	1.24	11.25	76.14						
4	1.01	9.20	85.34						
5	0.75	6.86	92.20						
6	0.40	3.60	95.80						
7	0.25	2.26	98.06						
8	0.10	0.95	99.01						
9	0.07	0.63	99.64						
10	0.02	0.23	99.87						
11	0.01	0.13	100.00						

Πίνακας 4.27. Τελικές παραγοντικές επιβαρύνσεις των εδαφικών παραμέτρων στις κύριες συνιστώσες.

	Κύρια Συνιστώσα	
	1	2
B (ppm)	0.88	0.34
Ca (%)	0.85	
Zn (ppm)	0.72	
Καρποί (kg·φυτό ⁻¹)	-0.71	
Mg (%)	0.70	0.46
TN (%)	-0.63	0.62
Φύλλα (kg·φυτό ⁻¹)	-0.60	0.58
P (%)	-0.37	
K (%)		0.94
Fe (ppm)		-0.89
Στελέχη (kg·φυτό ⁻¹)		0.58



Σχήμα 4.29. Διάγραμμα κύριων συνιστωσών (παραγόντων) στον ορθογωνικό χώρο.

4.9 ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αγροτική πρακτική της προσθήκης οργανικών υποστρωμάτων οδήγησε σε διατήρηση και βελτίωση των χημικών χαρακτηριστικών του εδάφους και αύξηση των αποδόσεων. Συγκεκριμένα, η ετήσια εφαρμογή κόμποστ από οικιακά απόβλητα ή/και χωνεμένη κοπριά από αιγοπρόβατα, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση στο έδαφος των ζιζανίων του αγρού και των υπολειμμάτων της καλλιέργειας την περίοδο 2011-2014, είχε ως αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις και τα αποθέματα του οργανικού άνθρακα και του ολικού αζώτου να αυξάνονται σταδιακά με την πάροδο των ετών. Ως αποτέλεσμα, ο C που δεσμεύθηκε συνολικά στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 cm) αντιστοιχούσε από 40% έως 53% των αρχικών αποθεμάτων του. Αναφορικά με την εφαρμογή συμβατικού λιπάσματος και την παράλληλη ενσωμάτωση στο έδαφος ζιζανίων και υπολειμμάτων καλλιέργειας, η πρακτική αυτή οδήγησε τουλάχιστον στη διατήρηση των αποθεμάτων του εδάφους σε C στα αρχικά του επίπεδα.

Εξετάζοντας την εξέλιξη των λεγόμενων “ενεργών δεξαμενών οργανικής ύλης” κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών, όπως είναι οι δείκτες ποιότητας εδάφους: ESOC, ECON, PSOC, PSON, PMN, Suva280, POM-C και POM-N, διαπιστώνουμε ότι όλες οι παραπάνω εδαφικές παράμετροι, πλην του PMN, εμφανίζουν έντονη μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και σημαντική διακύμανση με το βάθος. Επίσης, δεν υπάρχει κάποια σημαντική επίδραση των μεταχειρίσεων στις τιμές αυτές, με εξαίρεση την Suva280. Η οργανική ύλη που εκχυλίστηκε από το έδαφος των οργανικών μεταχειρίσεων παρουσίασε υψηλότερα ποσοστά αρωματικών ουσιών σε σύγκριση με τη μεταχείριση που εφαρμόστηκε συμβατική ανόργανη λίπανση. Επίσης, με την πάροδο του χρόνου τα ποσοστά POM-C αυξάνονται σταθερά μόνο στη μεταχείριση όπου εφαρμόστηκε κόμποστ (“MSWC”).

Η εφαρμογή, λοιπόν, οργανικής λίπανσης στον αγρό αύξησε την οργανική ουσία του εδάφους, εμπλουτίζοντάς το με τις απαραίτητες ποσότητες διαθέσιμου αζώτου και φωσφόρου για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Το παραπάνω αποτυπώνεται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων TN, POM-N, NH_4^+N , NO_3^-N και OlsenP που εμφανίζουν τα εδάφη των οργανικών μεταχειρίσεων, σε σύγκριση με τη συμβατική λίπανση. Οι ενώσεις του N και του P στο έδαφος εμφανίζουν σημαντικές αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ τους και παρουσιάζουν σημαντική συμβολή στον Παράγοντα II, κατά την ανάλυση των κύριων συνιστωσών των εδαφικών παραμέτρων. Οι συγκεντρώσεις των παραπάνω θρεπτικών μεταβάλλονται ανάλογα με τα στάδια ανάπτυξης των φυτών, όπου γίνονται μέγιστες κατά το τρίτο κυρίως στάδιο ανάπτυξης, που συμπίπτει με τις μέγιστες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Το παραπάνω πόρισμα ενισχύεται και από το γεγονός ότι στα μέσα του καλοκαιριού εμφανίζονται και οι υψηλότεροι ρυθμοί δυνητικής νιτροποίησης. Επίσης, παρατηρείται και μία σαφής διάκριση του τελευταίου σταδίου από τα υπόλοιπα. Ως εκ τούτου, η προσαρμοστικότητα των μεταβλητών του εδάφους επηρεάζεται, παράλληλα με τον τύπο λίπανσης, και από το στάδιο ανάπτυξης των καλλιεργειών, υποδηλώνοντας τη σημασία της μελέτης των ιδιοτήτων των γεωργικών εδαφών εντός καλλιεργητικού κύκλου. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η ανάλυση κύριων συνιστωσών των 7 χημικών παραμέτρων του εδάφους δεν διακρίνει τα δείγματα εδάφους ανάμεσα στα βάθη 0-15 και 15-30 cm.

Το μέσο ποσοστό του αζώτου που μετατρέπεται σε διαθέσιμες για το φυτό (ή ανόργανες) μορφές, υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού και χρόνου βρέθηκε ότι είναι 35%, ενώ το κλάσμα που δεν υφίσταται ανοργανοποίηση είναι 65%. Επίσης, στις περισσότερες δειγματοληψίες το 90% περίπου του ανόργανου N προήλθε από τα νιτρικά ιόντα, υποδηλώνοντας ότι ο ρυθμός νιτροποίησης είναι υψηλός και το μεγαλύτερο μέρος των αμμωνιακών ιόντων μετατρέπονται ταχύτατα σε νιτρικά. Στο τέλος κάθε

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

καλλιεργητικής περιόδου οι ποσότητες των νιτρικών ιόντων έχουν κατά το μεγαλύτερο μέρος τους εξαντληθεί. Το ίδιο παρατηρείται και για τις ποσότητες των φωσφορικών ιόντων στις “IF” και “MSWC” μεταχειρίσεις, ωστόσο στις υπόλοιπες 2 μεταχειρίσεις οι συγκεντρώσεις του εδαφικού Olsen-P παραμένουν σε υψηλά έως πολύ υψηλά επίπεδα, μέχρι το τέλος. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του P που εμφανίζουν τα εδάφη της “M” μεταχείρισης αυξάνει τις πιθανότητες μεταφοράς P στους υπόγειους υδροφορείς. Το ίδιο ισχύει και για το άζωτο, όπου παρατηρήθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις του ESN στο στρώμα εδάφους 30-50 εκ. της “M” μεταχείρισης.

Ο υπολογισμός της διαφοράς των καθαρών ποσοστών νιτροποίησης μεταξύ των δειγμάτων που δέχθηκαν επίδραση αμμωνιακού υποστρώματος (PNR) και εκείνων που δέχθηκαν επιπλέον την επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης, δεν δύναται να αντιπροσωπεύσει με ασφάλεια τον πραγματικό ρυθμό νιτροποίησης γιατί φάνηκε ότι στη μεταχείριση της κοπριάς δεν παρεμποδίστηκε πλήρως η νιτροποίηση.

Η αύξηση των συγκεντρώσεων νιτρικών και φωσφορικών αλάτων στο έδαφος, σε συνδυασμό με τον εμπλουτισμό του εδάφους με κατιόντα λόγω εφαρμογής οργανικής ουσίας, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, όπου διαπιστώθηκε σημαντική διαφοροποίηση στην τιμή της E_c μεταξύ ανόργανης (“IF”) και οργανικής (“MSWC”, “M”, “MSWC+M”) λίπανσης στο σύνολο των δειγματοληψιών. Αναφορικά με τις τιμές του εδαφικού pH, μόνο το τελευταίο έτος οι χειρισμοί της προσθήκης οργανικών στο έδαφος παρουσίασαν υψηλότερες τιμές pH (0-30 εκ.) σε σύγκριση με τη “IF” μεταχείριση.

Συγκρίνοντας συνολικά τα αποτελέσματα της χημικής κατάστασης των εδαφών όλων των μεταχειρίσεων στα 4 έτη πειραματισμού, διαπιστώνουμε ότι τα εδάφη των “M” και “MSWC+M” μεταχειρίσεων παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές στους δείκτες που εξετάστηκαν, όπως επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση των κύριων συνιστωσών. Η εφαρμογή κοπριάς αύξησε σε πολύ μεγάλο βαθμό το διαθέσιμο κλάσμα του N και του P. Παρατηρούμε, επίσης, ότι με την πάροδο των ετών εμφανίζεται μία τάση αυξανόμενης συσσώρευσης θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος της “MSWC” μεταχείρισης. Η συσσώρευση οργανικής ουσίας στο έδαφος όπου εφαρμόστηκε κόμποστ, οδήγησε σε σταδιακή απελευθέρωση διαθέσιμου αζώτου με το πέρασμα των ετών. Το ίδιο παρατηρείται και για τις τιμές του Olsen-P, όπου το τελευταίο έτος ήταν σημαντικά υψηλότερες από τον μάρτυρα. Το παραπάνω οφείλεται στο γεγονός ότι το κόμποστ είναι ένα χαρακτηριστικό υλικό βραδείας βιολογικής αποδόμησης και απελευθέρωσης ανόργανων συστατικών.

Διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων παρατηρείται και στις αποδόσεις των φυτών. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα εδάφους που προστέθηκε κοπριά με ή χωρίς κόμποστ, εμφάνισαν τη μεγαλύτερη παραγωγή βρώσιμων καρπών και υπέργειας βιομάζας και αυτό οφείλεται στις υψηλότερες διαθέσιμες συγκεντρώσεις εδαφικού ανόργανου αζώτου και φωσφόρου που εμφανίζουν οι μεταχειρίσεις αυτές, σε σύγκριση με τις εφαρμογές “IF” και “MSWC”. Η κατανομή της παραγόμενης βιομάζας μεταξύ των διαφόρων οργάνων του υπέργειου τμήματος του φυτού ήταν κατά αύξουσα σειρά: στελέχη-φύλλα-καρποί, με τους καρπούς να αντιπροσωπεύουν περίπου το 60% της συνολικής παραγόμενης υπέργειας βιομάζας. Κατά μέσο όρο, σε όλες τις μεταχειρίσεις στα 3 τελευταία έτη πειραματισμού, που εφαρμόστηκε η ίδια ποικιλία τομάτας, το 66% περίπου του N και του K και το 71% του P αποθηκεύονται στους καρπούς.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα υπό το πρίσμα της προστασίας του περιβάλλοντος, διαπιστώνουμε ότι η ετήσια εφαρμογή 50 t·ha⁻¹ χωνεμένης κοπριάς (ξ.β.) στο αργιλοπηλώδες έδαφος του πειραματικού αγρού, δύναται να επιβαρύνει τους υπόγειους υδροφορείς με N

Επίδραση οργανικής λίπανσης στις ιδιότητες του εδάφους και στην ανάπτυξη και θρέψη του φυτού “*Solanum Lycopersicum*”

και P. Τα ποσοστά πρόσληψης του αζώτου και του φωσφόρου από τα φυτά που δέχθηκαν κοπριά ήταν λιγότερο από το 50% του εφαρμοζόμενου N και P και σε συνδυασμό με τις αυξημένες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στο υποκείμενο στρώμα εδάφους που παρατηρήθηκαν, αποτελούν ενδείξεις μεταφοράς τους προς τον υπόγειο υδροφόρα.

Σχετικά με την περιεκτικότητα βαρέων μετάλλων στους φυτικούς ιστούς και στους καρπούς, οι συγκεντρώσεις των στοιχείων Li, Al, Si, Ni, As, V, Cr, Se, Hg και U παρέμειναν κάτω από τα όρια ανίχνευσης. Τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη παραγωγή και το γεγονός ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στους ιστούς διατηρήθηκαν εντός των βέλτιστων ορίων για την ανάπτυξη των φυτών, καταδεικνύουν ότι το κόμποστ ΑΣΑ, που παρήχθη στο εργοστάσιο κομποστοποίησης της ΔΕΔΙΣΑ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στα γεωργικά εδάφη και η χρήση του σε συνδυασμό με χωνεμένη κοπριά από αιγοπρόβατα, μπορεί να εμπλουτίσει το έδαφος με τις απαραίτητες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων και το ωφέλιμο μικροβιακό φορτίο, για την ανάπτυξη της καλλιέργειας *Solanum Lycopersicum*. Ως αποτέλεσμα η παραγωγή βιομάζας και η απόδοση της καλλιέργειας στη μεταχείριση του μίγματος να μην έχει στατιστική διαφορά με τα αποτελέσματα του χειρισμού της κοπριάς.

- Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσος Α. (2000) 'Η οργανική ουσία του εδάφους. Το πρόβλημα των ελληνικών εδαφών', ΕΚΔΟΣΕΙΣ: Σταμούλη Α.Ε.
- Σαρρής, Π. Φ. «Η Φυσιολογία των Χημικών Στοιχείων στο Φυτό», Βιβλιογραφική έρευνα, www.agrool.gr.
- Accoe, F., Boeckx, P., Busschaert, J., Hofman, G. and Van Cleemput, O. (2004) 'Gross N transformation rates and net N mineralisation rates related to the C and N contents of soil organic matter fractions in grassland soils of different age', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Achiba, W. Ben, Gabteni, N., Lakhdar, A., Laing, G. Du, Verloo, M., Jedidi, N. and Gallali, T. (2009) 'Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Allison, F. E. (1973) 'Soil organic matter and its role in crop production', *Soil organic matter and its role in crop production*.
- Ayers, R. S. and Westcot, D. W. (1985) 'Water Quality for Agriculture', *FAO of the UNITED NATIONS, Rome, Italy*.
- Baldi, E., Toselli, M., Marcolini, G., Quartieri, M., Cirillo, E., Innocenti, A. and Marangoni, B. (2010) 'Compost can successfully replace mineral fertilizers in the nutrient management of commercial peach orchard', *Soil Use and Management*.
- Bastida, F., Kandeler, E., Hernández, T. and García, C. (2008) 'Long-term effect of municipal solid waste amendment on microbial abundance and humus-associated enzyme activities under semiarid conditions', *Microbial Ecology*.
- Burton, J., Chen, C., Xu, Z. and Ghadiri, H. (2007) 'Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Calleja-Cervantes, M. E., Fernández-González, A. J., Irigoyen, I., Fernández-López, M., Aparicio-Tejo, P. M. and Menéndez, S. (2015) 'Thirteen years of continued application of composted organic wastes in a vineyard modify soil quality characteristics', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Cambardella, C. A. and Elliott, E. T. (1992) 'Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence', *Soil Science Society of America Journal*.
- Campbell, C. and Curtin, D. (2007) 'Mineralizable Nitrogen', in *Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition*.
- Campbell, C. A. (1978) 'Soil Organic Carbon, Nitrogen and Fertility', in *Soil Organic Matter*.
- Christou, M., Avramides, E. J. and Jones, D. L. (2006) 'Dissolved organic nitrogen dynamics in a Mediterranean vineyard soil', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Clivot, H., Mary, B., Valé, M., Cohan, J. P., Champolivier, L., Piraux, F., Laurent, F. and Justes, E. (2017) 'Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Demir, K., Sahin, O., Kadioglu, Y. K., Pilbeam, D. J. and Gunes, A. (2010) 'Essential and non-essential element composition of tomato plants fertilized with poultry manure',

- Diacono, M. and Montemurro, F. (2010) 'Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review', *Agronomy for Sustainable Development*, *Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. Agronomy for Sustainable Development, 30(2), 401–422.*
- Ernfors, M., Brennan, F. P., Richards, K. G., McGeough, K. L., Griffiths, B. S., Laughlin, R. J., Watson, C. J., Philippot, L., Grant, J., Minet, E. P., Moynihan, E. and Müller, C. (2014) 'The nitrification inhibitor dicyandiamide increases mineralization-immobilization turnover in slurry-amended grassland soil', in *Journal of Agricultural Science*.
- Evanylo, G., Sherony, C., Spargo, J., Starner, D., Brosius, M. and Haering, K. (2008) 'Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Farrell, M., Hill, P. W., Farrar, J., Bardgett, R. D. and Jones, D. L. (2011) 'Seasonal variation in soluble soil carbon and nitrogen across a grassland productivity gradient', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Filep, T. and Rékási, M. (2011) 'Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary', *Geoderma*.
- Fortuna, A., Harwood, R. R., Robertson, G. P., Fisk, J. W. and Paul, E. A. (2003) 'Seasonal changes in nitrification potential associated with application of N fertilizer and compost in maize systems of southwest Michigan', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Fox, P. M., Nico, P. S., Tfaily, M. M., Heckman, K. and Davis, J. A. (2017) 'Characterization of natural organic matter in low-carbon sediments: Extraction and analytical approaches', *Organic Geochemistry*.
- Fronning, B. E., Thelen, K. D. and Min, D. H. (2008) 'Use of manure, compost, and cover crops to supplant crop residue carbon in corn stover removed cropping systems', *Agronomy Journal*.
- Giannakis, G. V., Kourgialas, N. N., Paranychanakis, N. V., Nikolaidis, N. P. and Kalogerakis, N. (2014) 'Effects of Municipal Solid Waste Compost on Soil Properties and Vegetables Growth', *Compost Science & Utilization*, 22(3).
- Gregory, P. J. (2006) 'Roots, rhizosphere and soil: The route to a better understanding of soil science?', in *European Journal of Soil Science*.
- Hargreaves, J. C., Adl, M. S. and Warman, P. R. (2008) 'A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(1), pp. 1–14.
- Hart, Stephen C, Stark, J.M., Davidson, E.A., Firestone, M. K. (1994) 'Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification', *Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*.
- Harty, M. A., McGeough, K. L., Carolan, R., Müller, C., Laughlin, R. J., Lanigan, G. J., Richards, K. G. and Watson, C. J. (2017) 'Gross nitrogen transformations in grassland soil react differently to urea stabilisers under laboratory and field conditions', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Haynes, R. J. (2005) 'Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of

- Holford, I. C. R. (1997) 'Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants', *Australian Journal of Soil Research*.
- Höll, B. S., Fiedler, S., Jungkunst, H. F., Kalbitz, K., Freibauer, A., Drösler, M. and Stahr, K. (2009) 'Characteristics of dissolved organic matter following 20 years of peatland restoration', *Science of the Total Environment*.
- Johnston, A. E., Poulton, P. R., Fixen, P. E. and Curtin, D. (2014) 'Phosphorus. Its Efficient Use in Agriculture.', *Advances in Agronomy*.
- Johnston, A. E., Poulton, P. R. and White, R. P. (2013) 'Plant-available soil phosphorus. Part II: The response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam', *Soil Use and Management*.
- Kalbitz, K., Schmerwitz, J., Schwesig, D. and Matzner, E. (2003a) 'Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties', in *Geoderma*.
- Kalbitz, K., Schwesig, D., Schmerwitz, J., Kaiser, K., Haumaier, L., Glaser, B., Ellerbrock, R. and Leinweber, P. (2003b) 'Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Khalili, B. and Nourbakhsh, F. (2012) 'Vertical distribution of soluble organic nitrogen, nitrogen mineralization, nitrification, and amidohydrolase activities in a manure-treated soil', *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.
- Kukal, S. S., Rehana-Rasool and Benbi, D. K. (2009) 'Soil organic carbon sequestration in relation to organic and inorganic fertilization in rice-wheat and maize-wheat systems', *Soil and Tillage Research*.
- Lan, T., Han, Y., Roelcke, M., Nieder, R. and Cai, Z. (2013) 'Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on gross N transformation rates and mitigating N₂O emission in paddy soils', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Li, Y., Chapman, S. J., Nicol, G. W. and Yao, H. (2018) 'Nitrification and nitrifiers in acidic soils', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Liang, B., Yang, X., He, X. and Zhou, J. (2011) 'Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth', *Biology and Fertility of Soils*.
- Madrid, F., Trasierra, M. J., López, R., Murillo, J. M. and Cabrera, F. (1998) 'Solid waste compost utilization in greenhouse-cultivated tomato', in *Acta Horticulturae*.
- Mallory, E. B. and Griffin, T. S. (2007) 'Impacts of Soil Amendment History on Nitrogen Availability from Manure and Fertilizer', *Soil Science Society of America Journal*.
- Mandal, A., Patra, A. K., Singh, D., Swarup, A. and Ebhin Masto, R. (2007) 'Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages', *Bioresource Technology*.
- McGeough, K. L., Watson, C. J., Müller, C., Laughlin, R. J. and Chadwick, D. R. (2016) 'Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils', *Soil Biology and Biochemistry*.
- McGill, W. B., Cannon, K. R., Robertson, J. A. and Cook, F. D. (1986) 'Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic in breton after 50 years of cropping to two rotations', *Canadian Journal of Soil Science*.

- Mkhabela, M. S. and Warman, P. R. (2005) 'The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia', *Agriculture, Ecosystems and Environment*. doi: 10.1016/j.agee.2004.07.014.
- Moldes, A., Cendón, Y. and Barral, M. T. (2007) 'Evaluation of municipal solid waste compost as a plant growing media component, by applying mixture design', *Bioresource Technology*.
- Murphy, D. V., Stockdale, E. A., Poulton, P. R., Willison, T. W. and Goulding, K. W. T. (2007) 'Seasonal dynamics of carbon and nitrogen pools and fluxes under continuous arable and ley-arable rotations in a temperate environment', *European Journal of Soil Science*.
- Murphy, D. V., Macdonald, A. J., Stockdale, E. A., Goulding, K. W. T., Fortune, S., Gaunt, J. L., Poulton, P. R., Wakefield, J. A., Webster, C. P. and Wilmer, W. S. (2000) 'Soluble organic nitrogen in agricultural soils', *Biology and Fertility of Soils*.
- Nardi, S., Morari, F., Berti, A., Tosoni, M. and Giardini, L. (2004) 'Soil organic matter properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilisers', *European Journal of Agronomy*.
- Vanden Nest, T., Ruysschaert, G., Vandecasteele, B., Houot, S., Baken, S., Smolders, E., Cougnon, M., Reheul, D. and Merckx, R. (2016) 'The long term use of farmyard manure and compost: Effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Norton, J. M. and Stark, J. M. (2010) 'Regulation and measurement of nitrification in terrestrial systems', *Methods in Enzymology*.
- Ostrowska, A. and Porębska, G. (2015) 'Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils', *Ecological Indicators*.
- Papafilippaki, A., Paranychianakis, N. and Nikolaidis, N. P. (2015) 'Effects of soil type and municipal solid waste compost as soil amendment on *Cichorium spinosum* (spiny chicory) growth', *Scientia Horticulturae*.
- Paranychianakis, N. V., Tsiknia, M., Giannakis, G., Nikolaidis, N. P. and Kalogerakis, N. (2013) 'Nitrogen cycling and relationships between ammonia oxidizers and denitrifiers in a clay-loam soil', *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J. and Cantero-Martínez, C. (2014) 'Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices', *Soil and Tillage Research*.
- Poulton, P. R., Johnston, A. E. and White, R. P. (2013) 'Plant-available soil phosphorus. Part I: The response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam', *Soil Use and Management*.
- Radin, A. M. and Warman, P. R. (2011) 'Effect of municipal solidwaste compost and compost tea as fertility amendments on growth and tissue element concentration in container-grown tomato', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*.
- Rigane, M. K. and Medhioub, K. (2011) 'Assessment of properties of Tunisian agricultural waste composts: Application as components in reconstituted anthropic soils and their effects on tomato yield and quality', *Resources, Conservation and Recycling*.
- Ros, M., Pascual, J. A., Garcia, C., Hernandez, M. T. and Insam, H. (2006) 'Hydrolase activities, microbial biomass and bacterial community in a soil after long-term amendment with

different composts', *Soil Biology and Biochemistry*.

- Ruser, R. and Schulz, R. (2015) 'The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide release from agricultural soils-a review', *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.
- Smemo, K. A., Zak, D. R., Pregitzer, K. S. and Burton, A. J. (2007) 'Characteristics of DOC exported from northern hardwood forests receiving chronic experimental NO₃-deposition', *Ecosystems*.
- Sodhi, G. P. S., Beri, V. and Benbi, D. K. (2009) 'Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system', *Soil and Tillage Research*.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. (2009) *Plant nutrition of greenhouse crops*.
- Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P., Venieri, D., Psillakis, E. and Kalogerakis, N. (2011) 'Dissolved organic nitrogen as an indicator of livestock impacts on soil biochemical quality', *Applied Geochemistry*.
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., De MacÊdo, J. L. V., Blum, W. E. H. and Zech, W. (2007) 'Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil', *Plant and Soil*.
- Strack, M., Zuback, Y., McCarter, C. and Price, J. (2015) 'Changes in dissolved organic carbon quality in soils and discharge 10 years after peatland restoration', *Journal of Hydrology*.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. and Befort, B. L. (2011) 'Global food demand and the sustainable intensification of agriculture.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.
- Tsiknia, M., Tzanakakis, V. A. and Paranychianakis, N. V. (2013) 'Insights on the role of vegetation on nitrogen cycling in effluent irrigated lands', *Applied Soil Ecology*.
- Tu, C., Ristaino, J. B. and Hu, S. (2006) 'Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Tzanakakis, V. A. and Paranychianakis, N. V. (2017) 'Divergent response of ammonia oxidizers to various amino acids', *Applied Soil Ecology*.
- Wakelin, S., Williams, E., O'Sullivan, C. A., Cameron, K. C., Di, H. J., Cave, V. and O'Callaghan, M. (2014) 'Predicting the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide in pastoral soils', *Plant and Soil*.
- Weishaar, J. L., Aiken, G. R., Bergamaschi, B. A., Fram, M. S., Fujii, R. and Mopper, K. (2003) 'Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon', *Environmental Science and Technology*.
- Zhang, M., Heaney, D., Henriquez, B., Solberg, E. and Bittner, E. (2006) 'A four-year study on influence of biosolids/msw cocompost application in less productive soils in alberta: Nutrient dynamics', *Compost Science and Utilization*.
- Zhou, X., Wu, H., Koetz, E., Xu, Z. and Chen, C. (2012) 'Soil labile carbon and nitrogen pools and microbial metabolic diversity under winter crops in an arid environment', *Applied Soil Ecology*.
- Zhu, K., Bruun, S. and Jensen, L. S. (2016) 'Nitrogen transformations in and N₂O emissions

from soil amended with manure solids and nitrification inhibitor', *European Journal of Soil Science*.

5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στις επιδράσεις του νερού (water stable aggregates, WSA) αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό της δομής και της ποιότητας των εδαφών. Ένα καλά δομημένο έδαφος συμβάλλει στη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για την ανάπτυξη των οικοσυστημάτων. Η δομή του εδάφους, όμως, μπορεί να βελτιωθεί ή να υποβαθμιστεί ανάλογα με τις αγροτικές μεταχειρίσεις. Η προσθήκη κόμποστ ΑΣΑ και κοπριάς στο έδαφος είναι μία πανάρχαια πρακτική εμπλουτισμού του εδάφους με οργανική ύλη και βελτίωσης της δομής του. Αν και έχουν αναφερθεί πολλές εργασίες σχετικά με την επίδραση κόμποστ και ζωικής κοπριάς στη δομή του εδάφους, ελάχιστες αναφορές υπάρχουν για την επίδραση των οργανικών αυτών προϊόντων στο σχηματισμό και τη διάσπαση των συσσωματωμάτων, καθώς και στην κατανομή των διαφόρων κλασμάτων της οργανικής ύλης στα συσσωματώματα του εδάφους, κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων. Στο συγκεκριμένο πείραμα εξετάστηκε συνολικά η επίδραση που έχουν οι πρακτικές αγροτικής διαχείρισης τόσο στη βραχυχρόνια, όσο και στη μακροχρόνια μεταβολή της σταθερότητας των συσσωματωμάτων του εδάφους και της συσσώρευσης της Οργανικής Ύλης στα συσσωματώματα. Παράλληλα, εξετάστηκαν οι κύριες ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζουν ή συσχετίζονται άμεσα με τη δημιουργία σταθερής δομής και μέσω πραγματοποίησης παραγοντικής ανάλυσης, μελετήθηκε η σχέση μεταξύ των φυσικοχημικών παραμέτρων του εδάφους και της απόδοσης της καλλιέργειας.

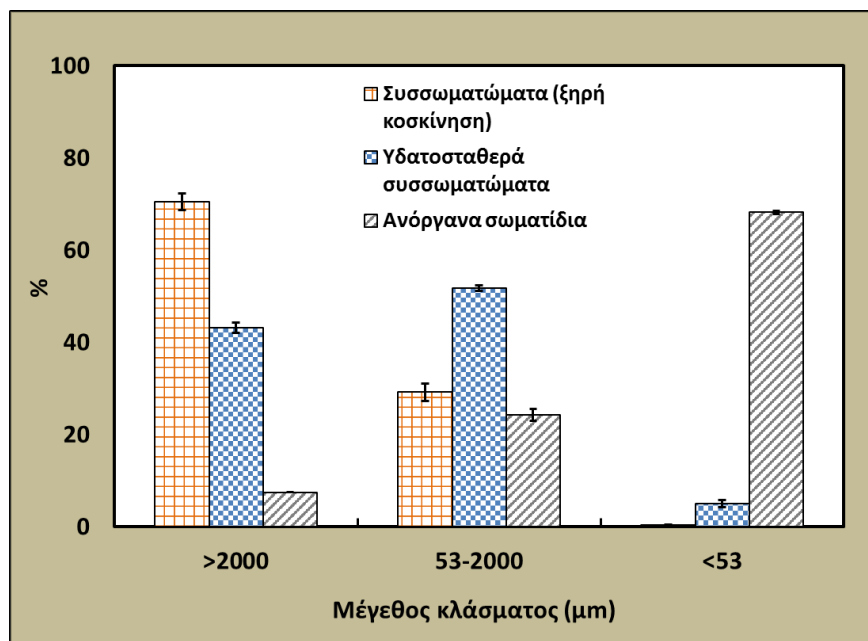
Οι αγροτικές πρακτικές που μελετήθηκαν ήταν η αλλαγή χρήσης του πειραματικού εδάφους από ακαλλιέργητη έκταση σε γη εντατικής καλλιέργειας, η ετήσια εφαρμογή ανόργανης λίπανσης, κόμποστ ΑΣΑ, χωνεμένης κοπριάς αιγοπροβάτων και η ενσωμάτωση στο έδαφος των υπολειμμάτων της καλλιέργειας και των ζιζανίων του αγρού. Η εφαρμογή των οργανικών υποστρωμάτων ενίσχυσε τη φυσική δομή και τη συσσώρευση ΟΥ στο έδαφος σε μηνιαία και σε ετήσια κλίμακα. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις των παραπάνω εδαφικών δεικτών παρατηρήθηκαν στο έδαφος που εφαρμόστηκε κόμποστ ΑΣΑ. Το κόμποστ ΑΣΑ είχε ευεργετικά αποτελέσματα στη σταθεροποίηση της δομής του εδάφους και της ενίσχυσης της αντοχής του στη διάβρωση από το νερό και αυτό οφείλεται κυρίως στις σημαντικές ποσότητες σωματιδιακής οργανικής ύλης που προστίθενται στο έδαφος από την ενσωμάτωση του υλικού αυτού. Ωστόσο, η χρήση μίγματος κόμποστ και κοπριάς συνδυάζει τη θετική επίδραση του κόμποστ στη δομή του εδάφους, με τα θρεπτικά στοιχεία που προσφέρει η κοπριά για την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών.

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1.1 Κατανομή σωματιδίων και συσσωματωμάτων στο αρχικό έδαφος

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η κατανομή των σωματιδίων και των συσσωματωμάτων του αρχικού εδάφους στα 3 κλάσματα (<53) μm , (53-2000) μm και (>2000) μm . Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 3.1), το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε έναν αγρό που δεν έχει υποστεί κανένα είδος ανθρώπινης παρέμβασης και αγροτικής διαχείρισης τα τελευταία 25 έτη και το αρχικό έδαφος χαρακτηρίζεται ως ιλυώδες-πηλώδες, με το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων να είναι μεγέθους αργίλου-ιλύος (<53 μm). Αναφορικά με την κατανομή των συσσωματωμάτων που παρουσιάζουν σταθερότητα στις επιδράσεις της διαβροχής, περίπου το 52% των συσσωματωμάτων αυτών είναι μεγέθους μεταξύ 53 και 2000 μm και το 43% είναι μεγέθους >2000 μm . Επίσης, το κλάσμα >2000 μm συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό των συσσωματωμάτων που προσδιορίστηκαν μέσω ξηρής κοσκίνησης (περίπου 70%).

Το αρχικό έδαφος, λοιπόν, εμφανίζει υψηλά ποσοστά μεγάλων συσσωματωμάτων, υποδηλώνοντας αυξημένο πορώδες και καλή κυκλοφορία του νερού και των θρεπτικών συστατικών του εδάφους και ταυτόχρονα παρουσιάζει υψηλά ποσοστά υδατοσταθερών συσσωματωμάτων, με έμμεση συνέπεια την προστασία του οργανικού άνθρακα από τους μικροοργανισμούς του εδάφους και τη συσσώρευσή του στο έδαφος. Η αλλαγή χρήσης γης και η μετατροπή του ακαλλιέργητου αγρού σε ένα αγρόκτημα εντατικής καλλιέργειας, όπως είναι ο πειραματικός αγρός της τομάτας, θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε υποβαθμισμένη δομή. Ο μόνος τρόπος για να επανέλθει η προγενέστερη κατάσταση είναι η υιοθέτηση μεθόδων εμπλουτισμού του εδάφους με οργανική ουσία.



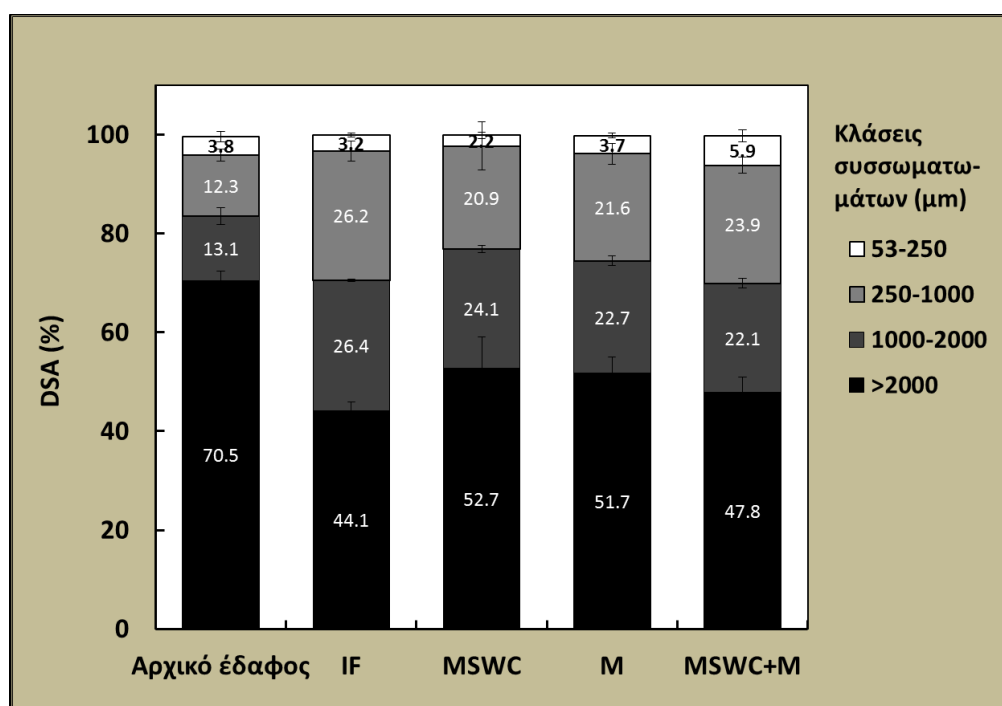
Σχήμα 5.1. Κατανομή σωματιδίων και συσσωματωμάτων στο αρχικό έδαφος. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

5.1.2 Σπάσιμο συσσωματωμάτων λόγω μηχανικής κατεργασίας του εδάφους

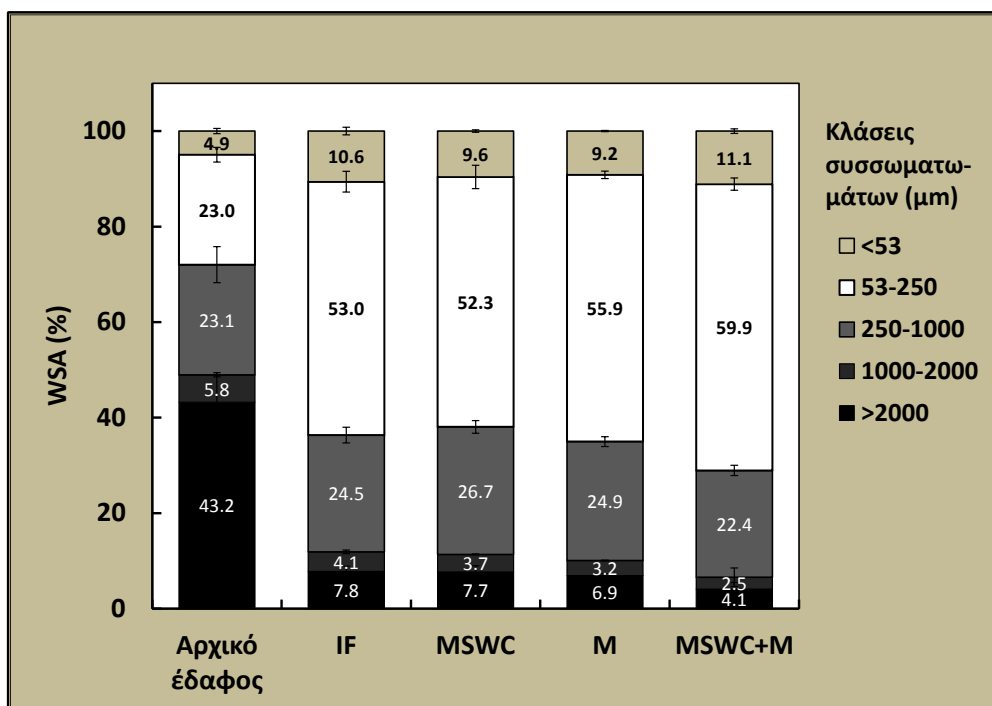
Α. Βαθιά άροση

Μία σημαντική παράμετρος που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στην αποτίμηση της εξέλιξης της δομής του εδάφους είναι η μηχανική κατεργασία του εδάφους (άροση), που εφαρμόζεται συνήθως για την προετοιμασία του εδάφους να δεχθεί την καλλιέργεια και τα οργανικά υποστρώματα. Η επίδρασή της άροσης στα εδαφικά οικοσυστήματα είναι πολλαπλή, συμπεριλαμβανομένων τη μείωση του OC και του N, την υποβάθμιση της δομής του εδάφους, καθώς και τη μεταβολή της μικροβιακής κοινότητας, που συνεπάγεται πολλές φορές και τη μείωση του ωφέλιμου μικροβιακού φορτίου (Karami et al. 2012). Φυσικά, η επίδραση της άροσης εξαρτάται από την ένταση της κατεργασίας και από το βάθος της άροσης.

Η αλλαγή χρήσης της γης του πειραματικού εδάφους από την 35ετή παύση καλλιέργειας σε καλλιεργήσιμη γη, οδήγησε σε μείωση των DSA και WSA (Σχ. 5.2 και 5.3). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.3, τον Ιούνιο του 2011 έγινε άροση του αγρού σε βάθος 60 cm με καλλιεργητή βαρέως τύπου και μετά από ένα μήνα εκτελέστηκε νέα άροση του αγρού. Η αυξημένη μηχανική δύναμη που εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας οδήγησε στο σπάσιμο των μακροσυσσωματωμάτων και κυρίως του κλάσματος μεγέθους >2000 μm . Η επίδραση της μηχανικής κατεργασίας ήταν πιο έντονη στα αποτελέσματα της υγρής κοσκίνησης, όπου το κλάσμα **WSA**_{>2000} μειώθηκε κατά 82% τουλάχιστον, ενώ το αντίστοιχο κλάσμα **DSA**_{>2000} μειώθηκε κατά 30% περίπου κατά μ.ο. στις μεταχειρίσεις. Η κατανομή των WSA μετά το συμβάν της άροσης έδειξε, επίσης, ότι το κλάσμα μεγέθους (53-250) μm (μικροσυσσωματώματα) ήταν σημαντικά υψηλότερο σε όλες τις μεταχειρίσεις από τα υπόλοιπα κλάσματα. Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, ότι ο WSA αποτελεί έναν ευαίσθητο δείκτη της ποιότητας του εδάφους, που επηρεάζεται έντονα από τις διάφορες αγροτικές διαχειρίσεις (Six et al. 2000).



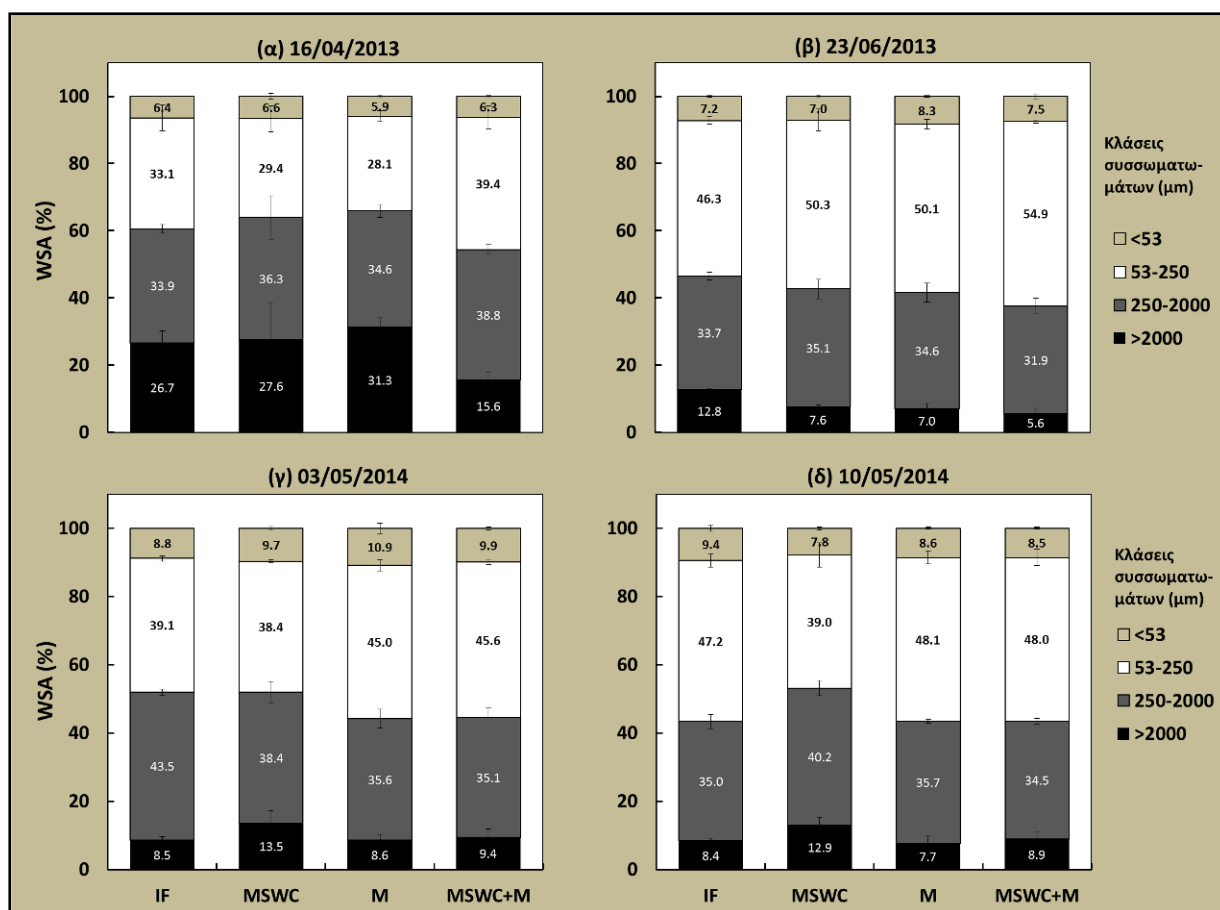
Σχήμα 5.2. Κατανομή των συσσωματωμάτων που προσδιορίστηκαν με ξηρή κοσκίνηση (DSA) στο αρχικό έδαφος και στα εδάφη των μεταχειρίσεων μετά την έναρξη του πειράματος. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.



Σχήμα 5.3. Κατανομή υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) στο αρχικό έδαφος και στα εδάφη των μεταχειρίσεων αμέσως την έναρξη του πειράματος. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Β. Ελαφριά άροση

Για την ενσωμάτωση των οργανικών υποστρωμάτων πραγματοποιήθηκαν 2 αρόσεις του εδάφους της κάθε μεταχείρισης (βάθος 6 cm), η πρώτη για την προετοιμασία του εδάφους και η δεύτερη κατά τη διάρκεια της ενσωμάτωσης. Για λόγους συγκρισιμότητας, διενεργήθηκαν αρόσεις και στη μεταχείριση της ανόργανης λίπανσης. Η κατανομή των WSA κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής επηρεάστηκε σε λιγότερο βαθμό από ότι με τη βαθιά άροση, που είχε πραγματοποιηθεί πριν την έναρξη του πειράματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι την 3^η καλλιεργητική περίοδο και στο διάστημα από 16-04-13 έως 23-06-13, όπου πραγματοποιήθηκε 2 φορές μηχανική κατεργασία των εδαφών, ένα μέρος των μακροσυσσωματωμάτων διασπάστηκε μηχανικά, απελευθερώνοντας μικρο-WSA και WSA μεγέθους ιλύος-πηλού (Σχ. 5.4α και 5.4β). Η επίδραση της άροσης φαίνεται να είναι πιο έντονη στις οργανικές μεταχειρίσεις και αυτό ίσως να οφείλεται ότι στις μεταχειρίσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη ενέργεια κατά τη διαδικασία της άροσης για την ενσωμάτωση των οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος. Ωστόσο, το επόμενο έτος, η ελαφριά άροση των εδαφών των μεταχειρίσεων που έλαβε μέρος στις 10/05/14 δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των WSA (Σχ. 5.4γ και 5.4δ).



Σχήμα 5.4. Κατανομή υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) στα εδάφη των μεταχειρίσεων πριν (Διαγραμ. α & γ) και μετά (Διαγραμ. β & δ) την υποβολή τους σε μηχανική κατεργασία, προκειμένου να ενσωματωθούν τα οργανικά λιπάσματα. Για λόγους συγκρισιμότητας, πραγματοποιήθηκε άροση και στη μεταχείριση της ανόργανης λίπανσης. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

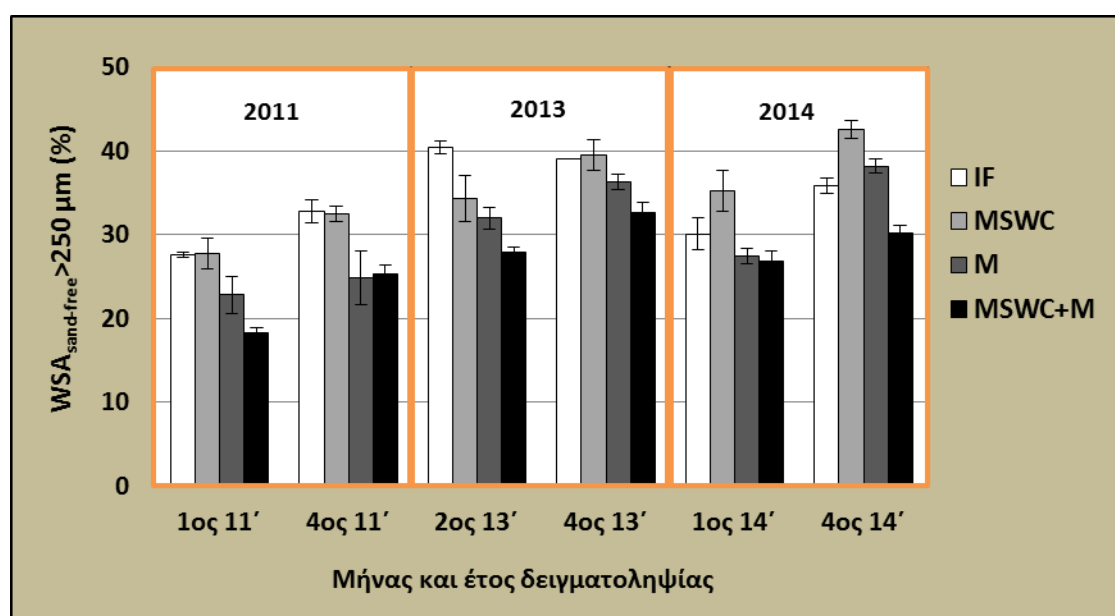
5.1.3 Δημιουργία συσσωματωμάτων εντός καλλιεργητικής περιόδου

Πολλές μελέτες σχετικά με την προσθήκη κόμποστ και ζωικής κοπριάς στο έδαφος εστιάζουν στην κατάσταση των συσσωματωμάτων σε δεδομένη χρονική στιγμή, συνήθως μετά τη συγκομιδή και όχι κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου καλλιεργητικού έτους. Με άλλα λόγια, λίγοι ερευνητές εξέτασαν τους ρυθμούς σχηματισμού και διάσπασης των συσσωματωμάτων καθ' όλη τη διάρκεια ενός έτους (Karami et al. 2012; Adesodun et al. 2005; Plaza-Bonilla et al. 2013). Στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε μία καταγραφή της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στις επιδράσεις της διαβροχής στην αρχή και στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου, πλην της 2^{ης} χρονιάς, όπου ελήφθησαν δείγματα για τον υπολογισμό των συσσωματωμάτων μόνο στο τέλος της περιόδου.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή του ποσοστού των υδατοσταθερών μακροσυσσωματωμάτων που είναι απαλλαγμένα από άμμο ($WSA_{sand-free} > 250 \mu m$) στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 εκ.), κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων 2011, 2013 και 2014. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση της σταθερότητας των μακροσυσσωματωμάτων. Αυτό οφείλεται στη δράση των μικροοργανισμών και των ριζών των φυτών που αναπτύχθηκαν σε όλη την επιφάνεια του

εδάφους. Οι μικροοργανισμοί και οι ρίζες εκκρίνουν διάφορες ουσίες που βοηθούν στη συσσωμάτωση των κόκκων του εδάφους.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης WSA, συνάγεται επίσης το συμπέρασμα ότι η “MSWC+M” μεταχείριση εμφανίζει σημαντικά ($p<0.05$) μικρότερα ποσοστά μακροσυσσωματωμάτων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις στο ξεκίνημα, αλλά και στη συνέχεια του πειράματος (1ος 11’). Η παραλλακτικότητα αυτή μπορεί να οφείλεται σε κάποια εγγενή χαρακτηριστικά του εδάφους της “MSWC+M” μεταχείρισης που επηρεάζουν τη δομή του εδάφους. Τέτοια χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να είναι μικρότερες συγκεντρώσεις σε Fe^{3+} , που έχει συσχετιστεί θετικά με τη δημιουργία WSA κλασμάτων (Regelink et al. 2015) ή μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε Na^+ , στοιχείο που συμβάλλει στο φαινόμενο της διασποράς της αργίλου. Παρόμοια συμπεριφορά αλλά σε μικρότερο βαθμό παρουσιάζει και η “M” μεταχείριση. Οι μεταχειρίσεις “IF” και “MSWC” φαίνεται να έχουν στην αρχή του πειράματος την ίδια δομή εδάφους.



Σχήμα 5.5. Ποσοστιαία αναλογία των υδατοσταθερών μακροσυσσωματωμάτων μετά από διόρθωση του ποσοστού σε άμμο ($WSA_{sand-free} > 250 \mu m$), στα επιφανειακά εδάφη (0-15 εκ.) των μεταχειρίσεων στην αρχή και στο τέλος των καλλιεργητικών περιόδων 2011, 2013 και 2014. “IF”: Ανόργανη Λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

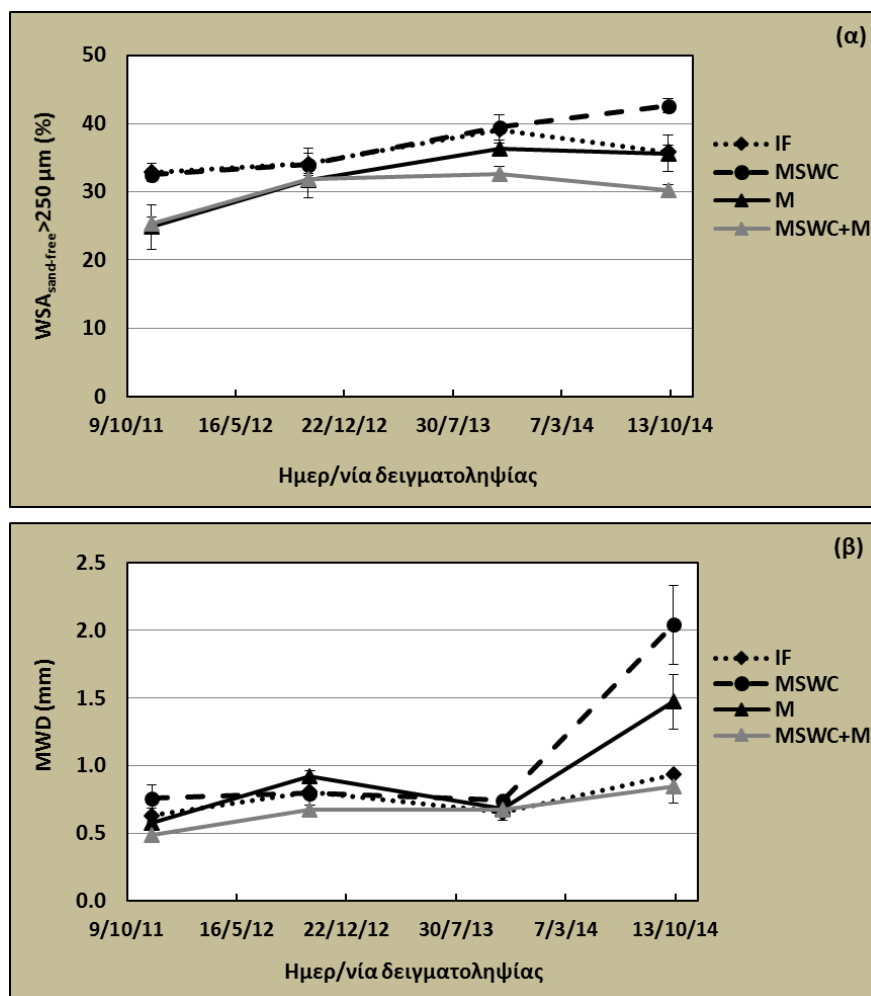
Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τους ρυθμούς σχηματισμού των μακροσυσσωματωμάτων στις τρεις από τις τέσσερις περιόδους ανάπτυξης των καλλιεργειών, όπου και υπήρχαν μετρήσεις στην αρχή και στη λήξη της καλλιεργητικής περιόδου. Σε σύγκριση με την ανόργανη λίπανση, οι οργανικές μεταχειρίσεις εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς σχηματισμού. Συγκρίνοντας τις οργανικές μεταχειρίσεις μεταξύ τους, διαπιστώνουμε ότι η “MSWC” μεταχείριση οδήγησε σε υψηλότερους κατά μέσο όρο, αλλά όχι στατιστικά σημαντικά, ρυθμούς σχηματισμού μακροσυσσωματωμάτων ($1,31 mo^{-1}$). Η εφαρμογή λοιπόν οργανικών υποστρωμάτων, όπως κόμποστ και κοπριά, ενίσχυσε τη φυσική δομή του εδάφους παρέχοντας περισσότερα υδατοσταθερά συσσωματώματα σε λίγους μήνες.

**Πίνακας 5.1. Ρυθμοί σχηματισμού μακρο-συσσωματωμάτων (mo^{-1}).
"IF": Ανόργανη Λίπανση, *"MSWC"*: Κόμποστ, *"M"*: Κοπριά, *"MSWC+M"*:
 Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30.**

	<i>IF</i>	<i>MSWC</i>	<i>M</i>	<i>MSWC+M</i>
1η καλλιεργητική περίοδος	1.32	1.17	0.51	1.76
3η καλλιεργητική περίοδος	-0.32	1.29	1.08	1.19
4η καλλιεργητική περίοδος	1.15	1.48	2.15	0.69
M.O.	0.71	1.31	1.25	1.21

5.1.4 Μακροχρόνια επίδραση μεταχείρισης στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων

Στο συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκε η προσθήκη ζωικών αποβλήτων και κόμποστ από οργανικά οικιακά απόβλητα, υλικά τα οποία είναι πλούσια σε χουμικές ουσίες και το όφελος που θα προκύψει από την εφαρμογή τους στο έδαφος σε ετήσια βάση αναμένεται να είναι μακροχρόνιο. Στα τρία πρώτα έτη του πειράματος, η σταθερότητα του εδάφους στη διαβροχή, που εκφράζεται με τον δείκτη MWD (μέση σταθμισμένη διάμετρος των υδατοσταθερών κλασμάτων), έδειχνε να μην μεταβάλλεται σημαντικά με την πάροδο των ετών, ούτε και να επηρεάζεται από τις μεταχειρίσεις (Σχ. 5.6β). Η παραπάνω τάση του δείκτη MWD έρχεται σε αντίθεση με τα ποσοστά των υδατοσταθερών μακροσυσσωματωμάτων, απαλλαγμένα από άμμο ($WSA_{\text{sand-free}} > 250 \mu\text{m}$), που αυξανόντουσαν με τα έτη και παρουσίαζαν διαφορετικές τιμές ανάλογα με τη μεταχείριση που εφαρμόστηκε (Σχ. 5.6α). Ωστόσο, κατά τη λήξη του 4ετούς πειράματος, τόσο η MWD όσο και τα ($WSA_{\text{sand-free}} > 250 \mu\text{m}$) είχαν αυξηθεί σημαντικά μόνο στις οργανικές μεταχειρίσεις. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις των παραπάνω εδαφικών δεικτών παρατηρήθηκαν στη *"MSWC"* μεταχείριση, όπου η αύξηση της MWD έφτασε το 196% και η αύξηση των ($WSA_{\text{sand-free}} > 250 \mu\text{m}$) ήταν 56%, σε σχέση με τις αρχικές τιμές στο ξεκίνημα του πειράματος. Η αύξηση του MWD ήταν σχετικά ελαφρώς χαμηλότερη για τη *"M"* μεταχείριση (132%), ενώ παρατηρήθηκε μία αύξηση της τάξης του 77% στη *"MSWC+M"* μεταχείριση και 36% για την *"IF"*. Γενικά, η αύξηση της μέσης σταθμισμένης διαμέτρου των υδατοσταθερών κλασμάτων στις οργανικές μεταχειρίσεις ήταν από 2 έως 3,5 φορές μεγαλύτερη, από ό, τι στη συμβατική λίπανση.



Σχήμα 5.6. (α) Ποσοστό υδατοσταθερών μακροσυσσωματωμάτων, μετά από διόρθωση του ποσοστού σε άμμο ($WSA_{sand-free} > 250 \mu m$), και (β) Μέση σταθμισμένη διάμετρος των υδατοσταθερών κλασμάτων (MWD), στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τα τυπικά σφάλματα.

Μετά την πάροδο, λοιπόν, 4 ετών ετήσιας εφαρμογής οργανικών προϊόντων στον πειραματικό αγρό της τομάτας, επετεύχθη μία σημαντική επαναφορά της ποιότητας της δομής του εδάφους στην προγενέστερη κατάσταση, που αντιπροσώπευε έναν ακαλλιέργητο για δεκαετίες αγρό. Σε σύγκριση με το αρχικό έδαφος, τα ποσοστά των ($WSA_{sand-free} > 250 \mu m$) στις "MSWC", "M" και "MSWC+M" μεταχειρίσεις ήταν κατά 10, 25 και 35%, αντίστοιχα, λιγότερα. Το παραπάνω καταδεικνύει το ευεργετικό αποτέλεσμα της προσθήκης οργανικών ουσιών στη σταθεροποίηση της δομής του εδάφους και της ενίσχυσης της αντοχής του στη διάβρωση από το νερό σε γεωργικές εκτάσεις εντατικής καλλιέργειας. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί σε πολλές μελέτες (Elliott 1986, Kotronakis et al., 2011, Apostolakis et al. 2017, Yaméogo, et al., 2018, Karami et al. 2012, Udom et al. 2016; Annabi et al. 2011; Celik et al. 2004, Sodhi et al. 2009), όπου η εφαρμογή προϊόντων κόμποστ και κοπριά οδήγησε σε αύξηση του ποσοστού των μακροσυσσωματωμάτων και της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στις επιδράσεις του νερού. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι κάθε οργανικό υλικό επιδρά με διαφορετικό τρόπο στην ποιότητα του εδάφους. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση των οργανικών ουσιών που προστίθενται στο έδαφος, τη δόση εφαρμογής των λιπασμάτων αυτών, τη

μηχανική και χημική σύσταση του εδάφους, αβιοτικούς παράγοντες, κ.α. Για παράδειγμα, στη μελέτη των Spaccini et al. (2002), η εφαρμογή υπολειμμάτων καλλιέργειας και κοπριάς δεν μπόρεσε να επαναφέρει τη φυσική κατάσταση ενός γεωργικού εδάφους στην προγενέστερή του κατάσταση (δασικό έδαφος). Εξάλλου, ο σκοπός μίας αειφορικής γεωργικής εφαρμογής δεν είναι η επίτευξη ενός μοναδικού μετρήσιμου στόχου για την ποιότητα του εδάφους, μέσω π.χ. ενός φυσικού, χημικού ή βιολογικού δείκτη, αλλά η βελτιστοποίηση της παραγωγής με την παράλληλη ανάπτυξη όλων των οικοσυστημικών υπηρεσιών που μπορεί να προσφέρει το έδαφος. Επειδή, όμως, υπάρχουν και κάποιοι θεμελιώδεις νόμοι που διέπουν τις λειτουργίες των οικοσυστημάτων, οι μελέτες πεδίου θα πρέπει να εκκινούν με βάσει αυτούς τους νόμους, να εμβαθύνουν και να τους αναπτύσσουν σε όλα το φάσμα της ΚΖ της Γης. Ένας από τους πιο σημαντικούς κανόνες λειτουργίας των εδαφικών οικοσυστημάτων που αναγνωρίζεται στην ευρύτερη επιστημονική κοινότητα είναι ότι **η συσσωμάτωση του εδάφους και η συσσώρευση οργανικού άνθρακα είναι δύο εγγενώς συνδεδεμένα φαινόμενα**. Η οργανική ύλη (ΟΥ) θεωρείται ως ένα από τα κυρίαρχα συστατικά συσσωμάτωσης, και αντίστροφα, η συσσωμάτωση του εδάφους συμβάλλει στη σταθεροποίηση της ΟΥ μέσω της φυσικής προστασίας στα συσσωματώματα (Barreto et al. 2009). Στο επόμενο κεφάλαιο, έχοντας ως βάση τον παραπάνω κανόνα, θα επιχειρηθεί να αναλυθεί πως κατανέμεται ο ΟC και το N στα συσσωματώματα του εδάφους και ποιες μορφές οργανικής ύλης επηρεάζουν τη συσσωμάτωση.

5.1.5 Κατανομή C και N στα συσσωματώματα

5.1.5.1 Περιεκτικότητα μακρο- και μικρο- συσσωματωμάτων σε OC και N

Τα αποτελέσματα της κατανομής του οργανικού άνθρακα (Organic Carbon, OC) μεταξύ των κλασμάτων WSA έδειξαν ότι ο OC αυξάνεται με την αύξηση της κλάσης μεγέθους του συσσωματώματος εδάφους σε όλες τις μεταχειρίσεις, όπου απορροφούνται κατά προτίμηση στο κλάσμα των μακροσυσσωματωμάτων (Πίν. 5.2). Επίσης, παρατηρείται ότι η ποσότητα του OC που βρίσκεται στο κλάσμα των μακροσυσσωματωμάτων στις οργανικές μεταχειρίσεις αυξάνεται με την πάροδο των ετών. Κατά τη λήξη του 4ετούς πειράματος, το απόθεμα OC στα μακροσυσσωματώματα ήταν υψηλότερο για τη “MSWC” μεταχείριση ($61,8 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$), ακολουθούμενο από τη “M” ($57,2 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$) και τη “MSWC+M” μεταχείριση ($52,4 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$), παρουσιάζοντας διπλάσια (κατά μέσο όρο) αύξηση από τις αρχικές τιμές. Αξιοσημείωτη αύξηση του OC στο κλάσμα $>250 \mu\text{m}$ παρατηρήθηκε στη δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στις 16/04/13, που καταδεικνύει και την εποχική διακύμανση της συγκέντρωσης και κατανομής του άνθρακα στα συσσωματώματα. Όπως και κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, έτσι και στην περίπτωση της ανοιξιάτικης βλάστησης, οι ρίζες από τα φυτά που αναπτύχθηκαν ήταν ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που συντέλεσαν στη συσσώρευση OC στα μακροσυσσωματώματα, γιατί λειτουργούν ως συστατικά αρχικής συσσωμάτωσης, με έμμεση συνέπεια τη δέσμευση και προστασία του OC στα συσσωματώματα (Jastrow 1996).

Όσον αφορά στην κατανομή του N μεταξύ των κλασμάτων των συσσωματωμάτων, τα μακροσυσσωματώματα παρουσίαζαν μεγαλύτερη συγκέντρωση N, συγκρινόμενα με τα μικροσυσσωματώματα, σε όλες τις μεταχειρίσεις και τα έτη, με εξαίρεση τις αρχικές συνθήκες, όταν και παρατηρήθηκε η αντίθετη τάση. Επίσης, η εξέλιξη της κατανομής του N στα συσσωματώματα, ακολούθησε παρόμοια πορεία με την αντίστοιχη του OC στα συσσωματώματα.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι ο λόγος C/N ήταν υψηλότερος στα μακροσυσσωματώματα, σε σύγκριση με τα μικροσυσσωματώματα, σε όλες τις μεταχειρίσεις και στις περισσότερες δειγματοληψίες, υποδηλώνοντας υψηλότερη περιεκτικότητα φρέσκου και ασταθούς C στα μακροσυσσωματώματα, καθώς και πιθανώς διαφορετική σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας. Σύμφωνα με τους Kushwaha et al. (2001), οι μύκητες, που έχουν σημαντικά υψηλότερη αναλογία C προς N σε σχέση με τα βακτήρια, είναι τα επικρατέστερα είδη στα μακροσυσσωματώματα, ενώ τα βακτήρια κυριαρχούν στα μικροσυσσωματώματα.

Ανάλογα αποτελέσματα έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, όπου οι Aoyama et al. (1999) ανέφεραν ότι η εφαρμογή κοπριάς συνέβαλε στη συσσώρευση και προστασία του C και του N στα μακροσυσσωματώματα του εδάφους, ενώ τα συνθετικά λιπάσματα οδήγησαν σε αύξηση μόνο του N του αντίστοιχου κλάσματος. Παρόμοια συμπεριφορά έχει διαπιστωθεί και σε άλλες μελέτες εφαρμογής οργανικών υποστρωμάτων στο έδαφος (Sui et al. 2012; Udom et al. 2016; Kushwaha et al. 2001, Sodhi et al. 2009), ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που τα αποτελέσματα δεν δίνουν συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Για παράδειγμα σε ένα πείραμα εφαρμογής διαφόρων οργανικών προϊόντων σε 5 διαφορετικές τοποθεσίες (Spaccini et al. 2002), η κατανομή του C και του N, καθώς και η αναλογία C:N στα WSA κλάσματα, ήταν διαφορετικά μεταξύ των πειραμάτων που διεξήχθησαν στις 5 τοποθεσίες.

Πίνακας 5.2. Κατανομή OC και N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ολικού εδάφους) και λόγος C:N στα 3 κλάσματα συσσωματωμάτων ($>250\ \mu\text{m}$, $53\text{-}250\ \mu\text{m}$, $<53\ \mu\text{m}$), σε διάφορες ημερομηνίες. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": μίγμα κόμποστ και κοπριά. Εντός της ίδιας δειγματοληψίας, αριθμοί με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά σύμφωνα με το κριτήριο Tukey για $p<0,05$.

Μεταχείριση		Μέγεθος συσσωματωμάτων								
		$>250\ \mu\text{m}$			$53\text{-}250\ \mu\text{m}$			$<53\ \mu\text{m}$		
		OC	N	C:N	OC	N	C:N	OC	N	C:N
10/08/11	IF	15.5a	0.9a	16.8a	10.1a	1.1b	9.1a	2.06ab	0.17a	9.9a
	MSWC	17.0a	1.1a	15.8a	10.5a	1.3ab	8.4ab	1.83ab	0.19a	10.0a
	M	16.2a	0.9a	17.4a	10.8a	1.3ab	8.3ab	1.79b	0.21a	10.5a
	MSWC+M	14.4a	0.8a	19.2a	10.6a	1.6a	6.5b	2.21a	0.23a	9.6a
28/11/11	IF	16.3a	1.7a	9.8a	7.2a	1.2a	6.0a	1.7a	0.16b	10.5a
	MSWC	19.6a	1.7a	11.1a	8.3a	1.3a	6.6a	1.6a	0.2ab	9.5a
	M	17.0a	1.5a	11.5a	9.1a	1.4a	6.6a	1.9a	0.2ab	9.9a
	MSWC+M	13.9a	1.4a	9.9a	9.2a	1.4a	6.6a	1.9a	0.21a	9.0a
10/10/12	IF	14.3a	1.3a	11.2a	8.2a	0.6b	14.4a	1.3a	0.12a	11.7a
	MSWC	18.9a	1.6a	11.9a	10.1a	0.8ab	13.3a	1.6a	0.14a	11.6a
	M	18.6a	1.5a	12.2a	10.0	0.8a	11.9a	1.4a	0.13a	10.6a
	MSWC+M	18.5a	1.6a	11.4a	9.9a	0.9a	10.8a	1.6a	0.15a	10.8a
16/04/13	IF	19.7a	2.1a	9.5b	7.5a	0.8ab	9.0a	1.6a	0.19a	8.5a
	MSWC	26.7a	3.0a	8.6c	7.2a	0.8ab	8.7a	1.8a	0.22a	8.1a
	M	25.6a	2.9a	10.0a	6.4a	0.7b	9.2a	1.7a	0.20a	8.3a
	MSWC+M	25.3a	2.4a	9.6ab	8.8a	1.0a	8.6a	1.7a	0.21a	7.9a
23/06/13	IF	13.9a	1.4c	10.1b	11.9a	1.4a	8.3a	1.9a	0.22a	8.4a
	MSWC	21.3a	1.9a	13.3a	18.7a	2.2a	9.5a	2.1a	0.30a	7.1a
	M	23.0a	1.7b	13.6a	13.8a	1.7a	8.1a	2.3a	0.29a	7.9a
	MSWC+M	20.2a	1.5c	13.3a	15.7a	2.2a	7.2a	2.1a	0.28a	7.5a
01/11/13	IF	16.3a	1.4a	11.3a	8.7a	0.9b	10.1ab	3.5a	0.36a	9.9a
	MSWC	25.0a	1.9a	12.4a	10.6a	1.1ab	9.5b	4.1a	0.40a	9.2a
	M	25.1a	1.8a	14.2a	13.3a	1.2ab	11.2a	3.8a	0.44a	9.6a
	MSWC+M	22.3a	1.9a	11.9a	13.7a	1.5a	9.8ab	3.3a	0.36a	9.1a
03/05/14	IF	15.9a	1.7c	9.5a	8.9b	1.0b	9.0a	2.2a	0.21a	10.2a
	MSWC	26.8a	2.5a	12.3a	11.1ab	1.2ab	9.2a	3.0a	0.31a	9.7a
	M	25.1a	1.9b	13.2a	15.4a	1.5a	9.9a	2.8a	0.25a	11.0a
	MSWC+M	21.7a	2.0b	10.7a	14.6a	1.4ab	9.5a	3.2a	0.31a	10.1a
10/05/14	IF	15.5b	1.5b	10.6a	10.6a	1.1b	9.7a	2.2a	0.24a	9.6a
	MSWC	25.7a	2.3a	11.2a	10.3a	1.1b	9.4a	2.3a	0.23a	9.6a
	M	20.9ab	1.8ab	11.9a	12.5a	1.2ab	10.2a	2.4a	0.24a	10.2a
	MSWC+M	21.9ab	1.9ab	11.5a	14.3a	1.5a	9.6a	2.5a	0.25a	9.9a
09/10/14	IF	14.7b	1.4b	10.5a	8.4a	0.9b	9.5a	2.1b	0.23a	9.3a
	MSWC	29.6a	2.4a	12.4a	8.0a	0.9b	9.3a	2.3ab	0.25a	9.4a
	M	29.9a	2.1ab	12.8a	9.0a	0.8b	8.8a	2.4ab	0.25a	10.0a
	MSWC+M	25.1ab	2.1ab	10.7a	11.3a	1.3a	8.6a	2.8a	0.28a	10.0a

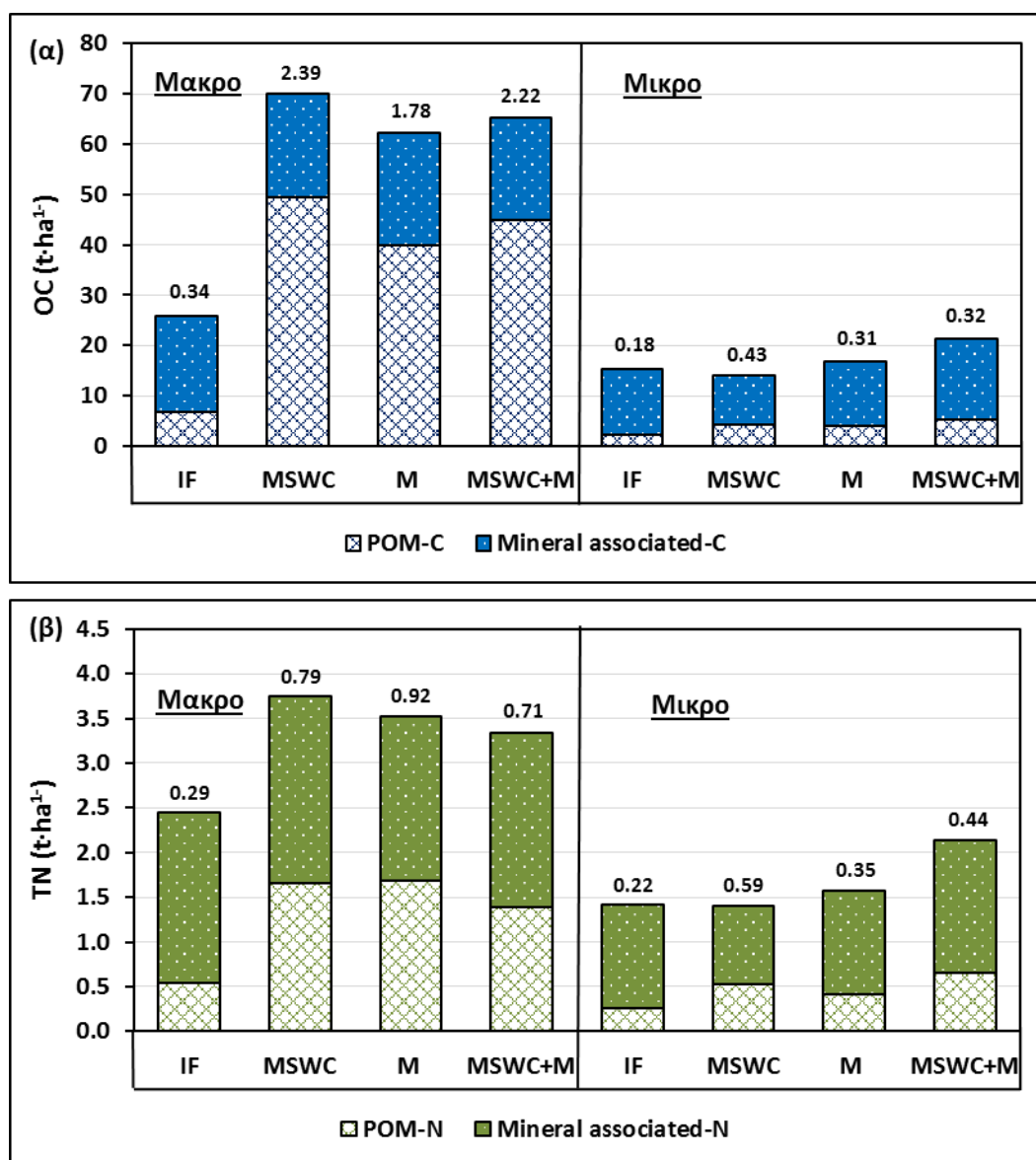
5.1.5.2 Κατανομή σωματιδιακής οργανικής ύλης στα συσσωματώματα

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα αποθέματα (σε $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) του σωματιδιακού και του απορροφούμενου στα ανόργανα σωματίδια του εδάφους, οργανικού άνθρακα (POM-C, Mineral associated-C) και αζώτου (POM-N, Mineral associated-N), στα κλάσματα των μακρο- και μικρο-συσσωματωμάτων, στο τέλος της 4ης καλλιεργητικής περιόδου. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκαν οι ποσότητες των συγκεκριμένων δεξαμενών C και N, εκφρασμένες σε $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ολικού εδάφους, του κάθε κλάσματος, πολλαπλασιαζόμενες με το βάθος (0,15 m) και το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους ($1,38 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Οι ποσότητες ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ολικού εδάφους) των “POM-C”, “POM-N”, “Mineral associated-C” και “Mineral associated-N” σε κάθε ένα από τα 2 κλάσματα (Macro και Micro), προσδιορίστηκαν πολλαπλασιάζοντας το περιεχόμενο του κάθε κλάσματος σε “POM-C”, “POM-N”, “Mineral associated-C” ή “Mineral associated-N” ($\text{g (C ή N)} \cdot \text{kg}^{-1}$ εδάφους WSA), με την ποσότητα του ολικού εδάφους που αντιστοιχεί στο κάθε κλάσμα ($\text{g εδάφους WSA} \cdot \text{g}^{-1}$ ολικού εδάφους).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, μετά την πάροδο τεσσάρων ετών από την έναρξη του πειράματος, οι οργανικές μεταχειρίσεις επηρέασαν περισσότερο τα αποθέματα του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα και αζώτου, σε σχέση με εκείνα του απορροφούμενου στα ανόργανα σωματίδια C και N. Η επίδραση αυτή ήταν έντονη κυρίως στο κλάσμα των μακροσυσσωματωμάτων. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η σημαντική αύξηση των ποσοτήτων C και N που παρατηρήθηκε στα μακροσυσσωματώματα των οργανικών μεταχειρίσεων από την έναρξη του πειράματος (Πίν. 5.2) αποδίδεται στη σωματιδιακή οργανική ύλη. Τα οργανικά πρόσθετα περιέχουν σημαντικές ποσότητες σωματιδιακής οργανικής ύλης που προστίθενται στο έδαφος και λειτουργούν ως υπόστρωμα μικροβιακής δραστηριότητας και παραγωγής ουσιών που προάγουν τη συσσωμάτωση. Έτσι εξηγείται και η σημαντική αύξηση της μέσης σταθμισμένης διαμέτρου των υδατοσταθερών κλασμάτων στις οργανικές μεταχειρίσεις που διαπιστώθηκε στο τέλος του πειράματος (Σχ. 5.6).

Παρουσιάστηκε, λοιπόν, μία σημαντική διαφοροποίηση των μεταχειρίσεων στα αποτελέσματα με τα αποθέματα του “POM-C” στα μακροσυσσωματώματα, με τις οργανικές μεταχειρίσεις να περιέχουν έως και 7,5 φορές περισσότερο “POM-C” από ότι η ανόργανη μεταχείριση. Παρόμοια συμπεράσματα παρουσίασαν και οι Aoyama et al. (1999), οι οποίοι εφαρμόζοντας ανόργανη λίπανση, ζωική κοπριά και μίγμα κοπριάς και ανόργανης λίπανσης σε έναν καλλιεργούμενο αγρό, διαπίστωσαν ότι η αύξηση της οργανικής ύλης λόγω ενσωμάτωσης κοπριάς στο έδαφος αποδόθηκε κυρίως στο κλάσμα των μακροσυσσωματωμάτων και κατανεμήθηκε ομοιόμορφα στις παραπάνω δεξαμενές C. Οι Aoyama et al. (1999) διαπίστωσαν ότι η οργανική ύλη που προέρχεται από το κόμποστ ή την κοπριά, πρώτα εισέρχεται στο έδαφος ως σωματιδιακή ύλη και κατόπιν, κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης, δεσμεύεται από τα ανόργανα σωματίδια του εδάφους μέσα στα συσσωματώματα.

Από το Σχήμα 5.7 παρατηρούμε, επίσης, ότι τα αποθέματα σωματιδιακού C και N σε κάθε κλάσμα ήταν συνήθως μικρότερα από τα αποθέματα του απορροφούμενου από τα σωματίδια του εδάφους C και N, εκτός από την περίπτωση του POM-C στα μακροσυσσωματώματα. Στην τελευταία περίπτωση, η αναλογία “POM-C” / “Mineral associated-C” ήταν 0,34 στα εδάφη που εφαρμόστηκε ανόργανη λίπανση και μεταξύ 1,78 και 2,39 στα εδάφη που δέχθηκαν οργανικά προϊόντα. Γενικά, σε όλες τις περιπτώσεις ο λόγος “POM-C” / “Mineral associated-C” ήταν μεγαλύτερος στις οργανικές μεταχειρίσεις από ότι στη “IF” μεταχείριση, υποδηλώνοντας εμπλουτισμό των WSA κλασμάτων με σωματιδιακό φορτίο.



Σχήμα 5.7. Αποθέματα (σε $t \cdot ha^{-1}$) σωματιδιακού και απορροφούμενου στα ανόργανα σωματίδια του εδάφους, οργανικού άνθρακα (POM-C, Mineral associated-C) και αζώτου (POM-N, Mineral associated-N), στα κλάσματα των μακρο- και μικρο- συσσωματωμάτων, στο τέλος της 4ης καλλιεργητικής περιόδου. "IF": Ανόργανη Λίπανση, "MSWC": Κόμποστ ΑΣΑ, "M": Κοπριά, "MSWC+M": Μίγμα κόμποστ και κοπριά με αναλογία 70:30. Οι τιμές πάνω από τις μπάρες αντιστοιχούν στην αναλογία σωματιδιακού C ή N προς απορροφούμενο στα ανόργανα σωματίδια C ή N.

5.1.6 Συσχετίσεις - Παραγοντική Ανάλυση

Τα ποσοστά των υδατοσταθερών μακρο- και μικρο- συσσωματωμάτων που είναι απαλλαγμένα από άμμο ($WSA_{\text{sand-free}} > 250$ και $53 < WSA_{\text{sand-free}} < 250$) και η μέση σταθμισμένη διάμετρος των υδατοσταθερών κλασμάτων (MWD), που υπολογίστηκαν στο τέλος κάθε καλλιεργητικής περιόδου, συσχετίστηκαν με τις αντίστοιχες παραμέτρους των κλασμάτων της εδαφικής οργανικής ύλης (Πίν. 5.3). Η MWD βρέθηκε να είναι ο καλύτερος δείκτης ποιότητας εδάφους και ο πιο στενά συνδεδεμένος με τις εδαφικές παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, η MWD συσχετίζεται σημαντικά με τα ποσοστά των μακρο- και μικρο- συσσωματωμάτων, τον οργανικό άνθρακα και το ολικό άζωτο στα μακροσυσσωματώματα (TOC_{macro} και TN_{macro}), τον σωματιδιακό οργανικό άνθρακα (POM-C) και τον ολικό εδαφικό οργανικό άνθρακα και το ολικό άζωτο (TOC και TN). Σημαντικές αλληλοσυσχετίσεις παρουσιάζουν μεταξύ τους και η ομάδα των παραμέτρων: POM-C, TOC_{macro} , TN_{macro} , TOC και TN .

Πίνακας 5.3. Συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων των δεικτών σταθερότητας των συσσωματωμάτων και των διαφόρων κλασμάτων της εδαφικής οργανικής ύλης.

	$WSA_{\text{sf}} > 250$	$53 < WSA_{\text{sf}} < 250$	MWD	TOC_{macro}	TOC_{micro}	TN_{macro}	TN_{micro}	POM-C	POM-N	TOC	TN
$WSA_{\text{sf}} > 0.25$	1	-0,80***	0,63**	0,56*	-0.08	0,52*	-0,54*	0.43	-0.23	0.28	0.48
$53 < WSA_{\text{sf}} < 0.25$		1	-0,81***	-0,71**	0.03	-0,70**	0.34	-0,642*	0.14	-0,62*	-0,80***
MWD			1	0,62*	-0.26	0,77***	-0.45	0,75**	0.09	0,54*	0,62*
TOC_{macro}				1	0.38	0,86***	0.05	0,92***	0.52	0,80***	0,84***
TOC_{micro}					1	0.07	0.43	0.29	0.39	0,54*	0.44
TN_{macro}						1	0.05	0,91***	0.40	0,65**	0,76***
TN_{micro}							1	-0.17	0.45	0.08	0.11
POM-C								1	0,61*	0,81**	0,85**
POM-N									1	0.38	0.25
TOC										1	0,87***
TN											1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, WSA_{sf} : υδατοσταθερά μακροσυσσωματωμάτων απαλλαγμένα από άμμο, $53 < WSA_{\text{sf}} < 250$: υδατοσταθερά μικροσυσσωματωμάτων απαλλαγμένα από άμμο, MWD: μέση σταθμισμένη διάμετρος των υδατοσταθερών κλασμάτων, TOC_{macro} : οργανικός άνθρακας στα μακροσυσσωματώματα, TOC_{micro} : οργανικός άνθρακας στα μικροσυσσωματώματα, TN_{macro} : ολικό άζωτο στα μακροσυσσωματώματα, TN_{micro} : ολικό άζωτο στα μικροσυσσωματώματα, POM-C: σωματιδιακός οργανικός άνθρακας, POM-N: σωματιδιακό οργανικό άζωτο, TOC : εδαφικός οργανικός άνθρακας, TN : ολικό άζωτο.

Για την Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA) των πιο σημαντικών εδαφικών και φυτικών παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα της τελευταίας δειγματοληψίας κάθε έτους πλην του 2011. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν οι εξής: TOC , TN , TOC_{macro} , TN_{macro} , MWD, το άζωτο των νιτρικών ιόντων (NO_3^-N), ο αφομοιώσιμος φώσφορος (OlsenP) και το νωπό βάρος της παραγωγής καρπών ανά φυτό. Κριτήριο για την επιλογή των παραμέτρων που συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση ήταν η χρησιμοποίηση αντιπροσωπευτικών δεικτών που εκφράζουν την ποιότητα της δομής του εδάφους, την οργανική ύλη, τα διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών, τη θρέψη και την απόδοση της καλλιέργειας. Απαραίτητη, όμως, προϋπόθεση για την τελική επιλογή ήταν η καταλληλότητα των δεδομένων για την πραγματοποίηση της PCA. Για τον έλεγχο της καταλληλότητας των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η ορίζουσα (determinant) του πίνακα συνάφειας (πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,00001) και το κριτήριο των Kaiser Meyer Olkin (KMO), που κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 1 ($0 \leq KMO \leq 1$), με αποδεκτή τιμή $KMO > 0,5$. Επίσης, για τον έλεγχο της συνάφειας μεταξύ των

μεταβλητών εξετάστηκε αν ο δείκτης σφαιρικότητας (Bartlett's test of sphericity) είναι στατιστικά σημαντικός ($p < 0,05$).

Οι συσχετίσεις μεταξύ όλων των ζευγών μεταβλητών της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Όπως προαναφέρθηκε, η MWD συσχετίζεται σημαντικά με τα περισσότερα κλάσματα της οργανικής ύλης, ωστόσο, όμως, παρουσιάζει σημαντική αρνητική συσχέτιση με την απόδοση των φυτών κι αυτό οφείλεται κυρίως στη συμπεριφορά της "MSWC" μεταχείρισης, όπου εμφανίζει ταυτόχρονα την καλύτερη εδαφική δομή και τη μικρότερη παραγωγή καρπών. Επίσης, από τον Πίνακα 5.4 παρατηρούμε ότι η περιεκτικότητα του εδάφους σε νιτρικά συμβάλλει σημαντικά στην απόδοση της καλλιέργειας τομάτας.

Πίνακας 5.4. Συντελεστές συσχέτισης των εδαφικών και φυτικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κύριων συνιστωσών.^a

	TOC	TN	TOC macro	TN macro	NO ₃ -N	OlsenP	MWD	Παραγωγή καρπών
TOC	1	0.83***	0.77**	0.66*	0.51*	0.45	0.45	-0.14
TN		1	0.83***	0.83***	0.24	-0.03	0.54*	-0.35
TOC macro			1	0.87***	0.35	0.14	0.54*	-0.14
TN macro				1	0.1	-0.03	0.76**	-0.39
NO ₃ -N					1	0.81*	-0.23	0.64*
OlsenP						1	-0.05	0.44
MWD							1	-0.72**
Παραγωγή καρπών								1

^aΟρίζουσα = 1.51E-005, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Κατά τον έλεγχο της καταλληλότητας εφαρμογής της παραγοντικής ανάλυσης βρέθηκε ο δείκτης των Kaiser Meyer Olkin (KMO) ίσος με 0,554 ($> 0,5$) (Πίν. 5.5), η ορίζουσα του πίνακα συσχέτισης ίση με 0,000015 ($> 0,00001$) (Πίν. 5.4) και όλες οι τιμές των μεταβλητών του πίνακα των αποτελεσμάτων της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities) $> 0,5$ (Πίν. 5.6). Επίσης, ο δείκτης σφαιρικότητας (Bartlett's test of sphericity) βρέθηκε στατιστικά σημαντικός ($p = 0,000$) (Πίν. 5.5).

Πίνακας 5.5. Τεστ KMO and Bartlett's.

Μέτρηση επάρκειας δείγματος Kaiser-Meyer-Olkin	0.554
Τεστ Σφαιρικότητας	Approx. Chi-Square
Bartlett's	df
	Sig.

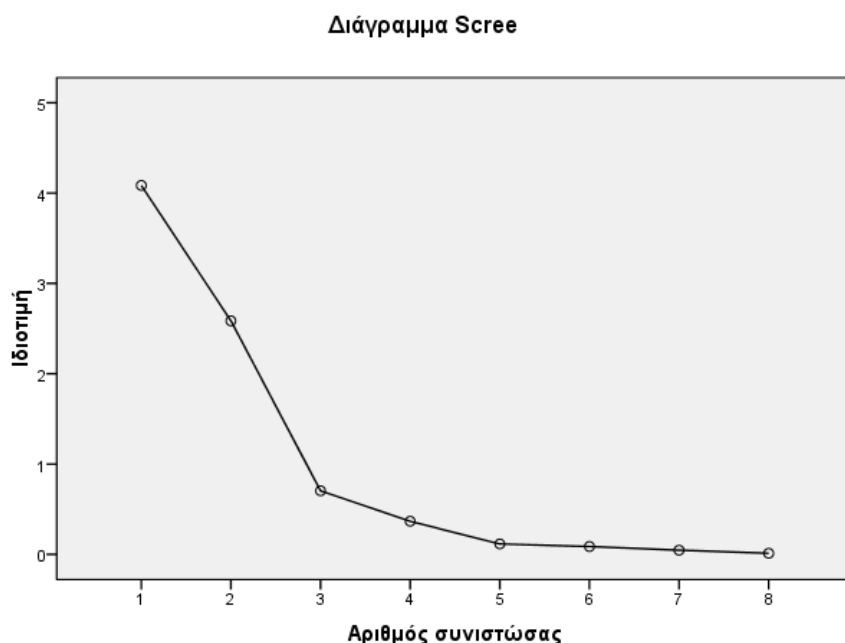
Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα της κοινότητας διακύμανσης των παραγόντων (Communalities).

	Αρχικά	Εξαγωγή
TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.869
TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.846
TOC macro ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ bulk soil)	1.000	0.845
TN macro ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ bulk soil)	1.000	0.886
$\text{NO}_3^- \text{N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.954
OlsenP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.000	0.711
MWD (mm)	1.000	0.754
Παραγωγή καρπών ($\text{kg}\cdot\text{φυτό}^{-1}$)	1.000	0.803

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν 2 παράγοντες προς εξαγωγή εφαρμόζοντας το κριτήριο του Kaiser, σύμφωνα με το οποίο επιλέγονται οι παράγοντες που έχουν ιδιοτιμή μεγαλύτερη του 1 (Πίν. 5.7, Σχ. 5.8).

Πίνακας 5.7. Ποσοστά διακύμανσης κύριων συνιστωσών εδαφικών και φυτικών παραμέτρων.

Συνιστώ- σες	Αρχικές ιδιοτιμές			Φορτίσεις (Loadings)			Άθροισμα τετραγωνισμένων περιστρεφόμενων φορτίσεων		
	Συνολικά	% της Διακύμα νσης	Αθροιστ. %	Συνολικά	% της Διακύμ ανσης	Αθροισ τ. %	Συνολικά	% της Διακύμα νσης	Αθροιστ. %
1	4.08	51.06	51.06	4.08	51.06	51.06	4.08	51.04	51.04
2	2.58	32.31	83.37	2.58	32.31	83.37	2.59	32.32	83.37
3	0.70	8.79	92.16						
4	0.37	4.58	96.74						
5	0.12	1.44	98.19						
6	0.09	1.08	99.27						
7	0.05	0.58	99.85						
8	0.01	0.15	100.00						

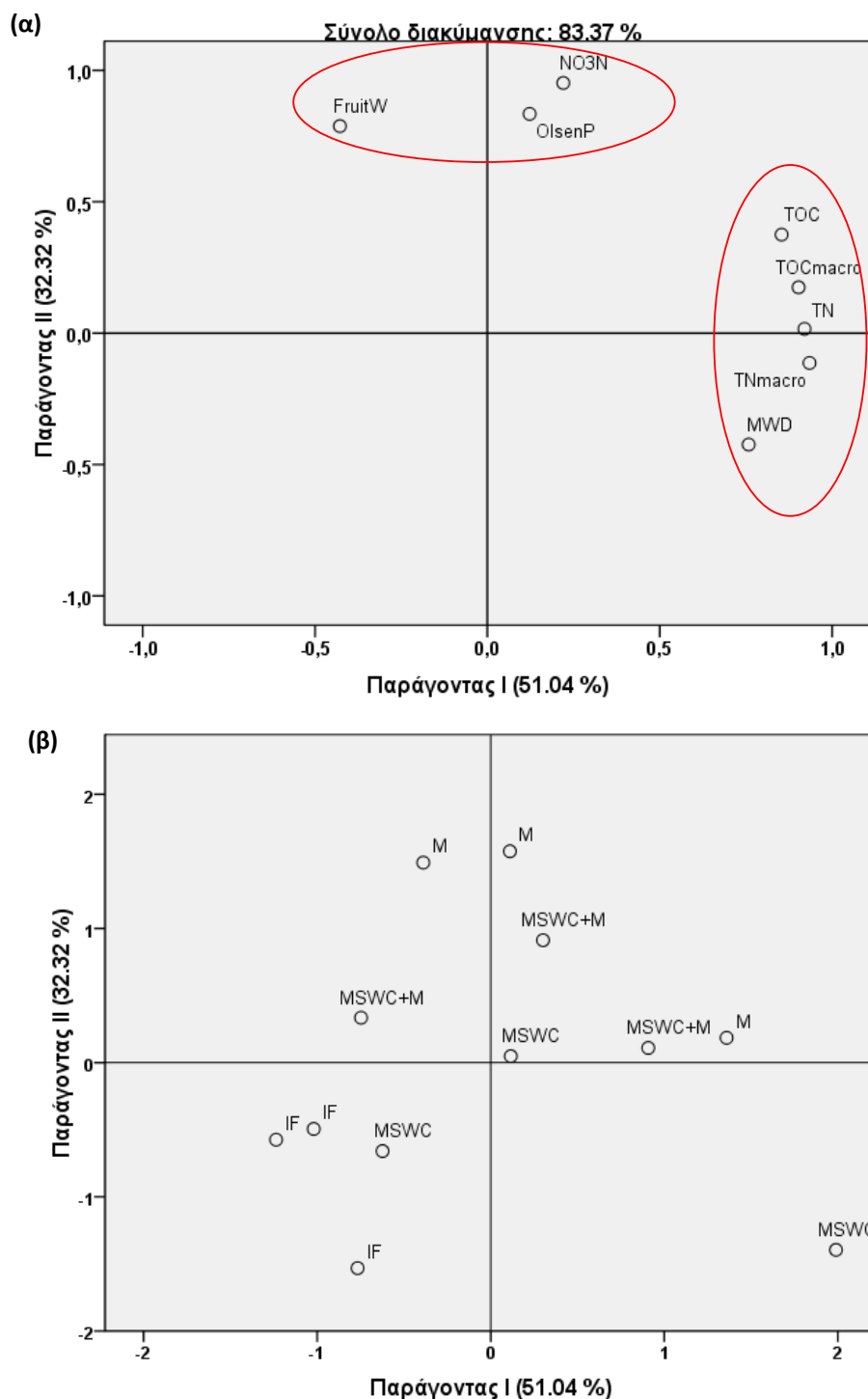


Σχήμα 5.8. Διάγραμμα ιδιοτιμών κύριων συνιστωσών σε φθίνουσα σειρά (Scree Plot).

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τελικών συντελεστών συσχέτισης των μεταβλητών με τους αντίστοιχους παράγοντες (τελικές επιβαρύνσεις) και στο Σχήμα 5.9 το διάγραμμα φόρτισης των παραγόντων μετά την ορθογωνική περιστροφή μέγιστης διακύμανσης (Σχ. 5.9α) και το διάγραμμα παραγοντικής βαθμολόγησης που δείχνει τη θέση των μεταχειρίσεων ως προς τις 2 κύριες συνιστώσες (Σχ. 5.9β). Ο πρώτος παράγοντας (Παράγοντας I) εξηγεί το 51,04% της συνολικής διακύμανσης, ενώ ο δεύτερος το 32,32% (Πίν. 5.7 και Σχ. 5.9α). Όλες οι μεταβλητές πλην της παραγωγής καρπών έδειξαν θετική συσχέτιση με τον Παράγοντα I (Σχ. 5.9α). Μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών, οι εδαφικοί παράμετροι TOC, TN, TOC_{macro}, TN_{macro} και MWD είχαν σημαντική συμβολή (>50%) στον Παράγοντα I, ενώ οι παράμετροι NO₃⁻N, OlsenP και παραγωγή καρπών είχαν σημαντική συμβολή στον Παράγοντα II (Πίν. 5.8 και Σχ. 5.9α). Το κοινό χαρακτηριστικό της ομάδας μεταβλητών του Παράγοντα I είναι η αλληλεξαρτημένη σχέση μεταξύ της συσσώματωσης του εδάφους και της συσσώρευσης οργανικής ύλης, ενώ το κοινό χαρακτηριστικό της ομάδας μεταβλητών του Παράγοντα II είναι η σχέση μεταξύ των διαθέσιμων θρεπτικών του εδάφους με την παραγωγή.

Πίνακας 5.8. Τελικές παραγοντικές επιβαρύνσεις των εδαφικών και φυτικών παραμέτρων στις κύριες συνιστώσες.

	Κύρια Συνιστώσα	
	1	2
TN macro	0.934	
TN	0.920	
TOC macro	0.903	
TOC	0.854	
MWD	0.758	
NO ₃ ⁻ N		0.952
OlsenP		0.834
Παραγωγή καρπών		0.788



Σχήμα 5.9. (α) Διάγραμμα φόρτισης των παραγόντων μετά την ορθογωνική περιστροφή μέγιστης διακύμανσης και (β) Διάγραμμα παραγοντικής βαθμολόγησης που δείχνει τη θέση των μεταχειρίσεων ως προς τις 2 κύριες συνιστώσες (Παράγοντες I και II). “IF”: Ανόργανη λίπανση, “MSWC”: Κόμποστ ΑΣΑ, “M”: Κοπριά από αιγοπρόβατα, “MSWC+M”: Μίγμα κόμποστ και κοπριά σε αναλογία 70:30.

Από το Σχήμα 5.9β διαπιστώνουμε, επίσης, ότι όπως και στην περίπτωση της παραγοντικής ανάλυσης των εδαφικών παραμέτρων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.8, έτσι και στην παρούσα ανάλυση **οι δύο πρώτοι παράγοντες (Παράγοντας I και II) διακρίνουν σαφώς τα**

δείγματα εδάφους των μεταχειρίσεων “M” και “MSWC+M” από τα εδάφη των μεταχειρίσεων “MSWC” και “IF”. Τα περισσότερα δείγματα “M” και “MSWC+M” βρίσκονται στο πάνω άκρο της γραφικής παράστασης, υποδεικνύοντας θετική συσχέτιση με τον Παράγοντα II. Το αντίθετο ισχύει για την πλειονότητα των δειγμάτων εδάφους των μεταχειρίσεων “MSWC” και “IF”. Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, ότι τα εδάφη που δέχθηκαν κοπριά ή μίγμα κόμποστ και κοπριά εμφανίζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, τόσο όσον αφορά στις φυσικές και χημικές παραμέτρους που εξετάστηκαν, όσο και στις αποδόσεις των καλλιεργειών.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αλλαγή χρήσης της γης του πειραματικού εδάφους από την 35ετή παύση καλλιέργειας σε καλλιεργήσιμη γη, οδήγησε σε αρχική μείωση των DSA και WSA. Μετά την πάροδο, ωστόσο, 4 ετών ετήσιας εφαρμογής οργανικών προϊόντων, όπως κόμποστ ΑΣΑ και κοπριά αιγοπροβάτων, στον πειραματικό αγρό της τομάτας, επετεύχθη μία σημαντική επαναφορά της ποιότητας της δομής του εδάφους στην προγενέστερη κατάσταση.

Η εφαρμογή των οργανικών υποστρωμάτων ενίσχυσε τη φυσική δομή του εδάφους τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια κλίμακα. Ο ρυθμός σχηματισμού μακροσυσσωματωμάτων (απαλλαγμένα από άμμο) κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων (5-6 μήνες) ήταν κατά μ.ο. 1.26 % ανά μήνα στις οργανικές μεταχειρίσεις, ενώ στην ανόργανη μεταχείριση ήταν σημαντικά μικρότερος. Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στη διαβροχή αυξανόταν και κατά τη διάρκεια της ανοιξιάτικης βλάστησης, λόγω της επίδρασης των ζιζανίων που αναπτύχθηκαν στον αγρό. Κατά τη λήξη του 4ετούς πειράματος, τόσο η “MWD” όσο και τα “WSA_{sand-free}>250 μm” είχαν αυξηθεί σημαντικά μόνο στις οργανικές μεταχειρίσεις. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις των παραπάνω εδαφικών δεικτών παρατηρήθηκαν στο έδαφος που εφαρμόστηκε κόμποστ ΑΣΑ. Γενικά, η αύξηση της μέσης σταθμισμένης διαμέτρου των υδατοσταθερών κλασμάτων στις οργανικές μεταχειρίσεις ήταν από 2 έως 3,5 φορές μεγαλύτερη, από ό, τι στη συμβατική λίπανση. Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν το ευεργετικό αποτέλεσμα της προσθήκης οργανικών ουσιών στη σταθεροποίηση της δομής του εδάφους και της ενίσχυσης της αντοχής του στη διάβρωση από το νερό σε γεωργικές εκτάσεις εντατικής καλλιέργειας.

Η MWD βρέθηκε να είναι ο καλύτερος δείκτης ποιότητας εδάφους και ο πιο στενά συνδεδεμένος με τα περισσότερα κλάσματα της εδαφικής ΟΥ, όπως TOC_{macro}, TN_{macro}, POM-C, TOC και TN. Ο OC που βρίσκεται στο κλάσμα των μακροσυσσωματωμάτων στις οργανικές μεταχειρίσεις αυξήθηκε με την πάροδο των ετών και η αύξηση αυτή αποδίδεται στη σωματιδιακή οργανική ύλη. Τα οργανικά πρόσθετα περιέχουν σημαντικές ποσότητες σωματιδιακής οργανικής ύλης που προστίθενται στο έδαφος και λειτουργούν ως υπόστρωμα μικροβιακής δραστηριότητας και παραγωγής ουσιών που προάγουν τη συσσωμάτωση, ενώ η συσσωμάτωση του εδάφους συμβάλλει στη σταθεροποίηση της ΟΥ μέσω της φυσικής προστασίας στα συσσωματώματα.

Η συσσωμάτωση του εδάφους, η σταθεροποίηση της ΟΥ και η παραγωγή της καλλιέργειας επηρεάστηκαν σημαντικά από το είδος της μεταχείρισης που εφαρμόστηκε. Τα εδάφη που δέχθηκαν κοπριά ή μίγμα κόμποστ και κοπριά εμφανίζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, τόσο όσον αφορά στις φυσικές και χημικές παραμέτρους που εξετάστηκαν, όσο και στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Συγκρίσιμα αποτελέσματα παρουσιάζουν και τα εδάφη που εφαρμόστηκε ανόργανη λίπανση και κόμποστ. Γενικά, το κόμποστ ΑΣΑ είχε σημαντική επίδραση στη συσσωμάτωση και στον εμπλουτισμό του εδάφους με εδαφική οργανική ύλη, ωστόσο η ενσωμάτωση του στο έδαφος δεν οδήγησε στην πλήρη κάλυψη της καλλιέργειας με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία N και P. Η χρήση μίγματος κόμποστ και κοπριάς συνδυάζει τη θετική επίδραση του κόμποστ στη δομή του εδάφους, με το ωφέλιμο μικροβιακό φορτίο και τα θρεπτικά συστατικά που προσφέρει η κοπριά για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

- Adesodun, J. K., Mbagwu, J. S. C. and Oti, N. (2005) 'Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates of an organic waste amended Ultisol in southern Nigeria', *Bioresource Technology*.
- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M. and Houot, S. (2011) 'Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Aoyama, M., Angers, D. A., N'Dayegamiye, A. and Bissonnette, N. (1999) 'Protected organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications', *Canadian Journal of Soil Science*.
- Apostolakis, A., Panakoulia, S., Nikolaidis, N. P. and Paranychanakis, N. V. (2017) 'Shifts in soil structure and soil organic matter in a chronosequence of set-aside fields', *Soil and Tillage Research*.
- Barreto, R. C., Madari, B. E., Maddock, J. E. L., Machado, P. L. O. A., Torres, E., Franchini, J. and Costa, A. R. (2009) 'The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Celik, I., Ortas, I. and Kilic, S. (2004) 'Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil', *Soil and Tillage Research*.
- Elliott, E. (1986) 'Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils', *Soil Science Society of America Journal*, 50(S-3), pp. 627–633.
- Jastrow, J. D. (1996) 'Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter', *Soil Biology and Biochemistry*.
- Karami, A., Homaei, M., Afzalnia, S., Ruhipour, H. and Basirat, S. (2012) 'Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties', *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Kotronakis, M., Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Rowe, E. C., Valstar, J., Paranychanakis, N. V. and Banwart, S. A. (2017) 'Modeling the Impact of Carbon Amendments on Soil Ecosystem Functions Using the 1D-ICZ Model', *Advances in Agronomy*.
- Kushwaha, C. P., Tripathi, S. K. and Singh, K. P. (2001) 'Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem', *Applied Soil Ecology*.
- Plaza-Bonilla, D., Alvaro-Fuentes, J. and Cantero-Martinez, C. (2013) 'Soil Aggregate Stability as Affected by Fertilization Type under Semiarid No-Tillage Conditions', *Soil Science Society of America Journal*.
- Regelink, I. C., Stoof, C. R., Rousseva, S., Weng, L., Lair, G. J., Kram, P., Nikolaidis, N. P., Kercheva, M., Banwart, S. and Comans, R. N. J. (2015) 'Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties', *Geoderma*. Elsevier, 247–248, pp. 24–37.
- Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T. and Combrink, C. (2000) 'Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon', *Soil Science Society of America Journal*.

- Sodhi, G. P. S., Beri, V. and Benbi, D. K. (2009) 'Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system', *Soil and Tillage Research*.
- Spaccini, R., Mbagwu, J. S. C., Zena Teshale, a., Igwe, C. a. and Piccolo, a. (2002) 'Influence of the addition of organic residues on carbohydrate content and structural stability of some highland soils in Ethiopia', *Soil Use and Management*.
- Sui, Y., Jiao, X., Liu, X., Zhang, X. and Ding, G. (2012) 'Water-stable aggregates and their organic carbon distribution after five years of chemical fertilizer and manure treatments on eroded farmland of Chinese Mollisols', *Canadian Journal of Soil Science*.
- Udom, B. E., Nuga, B. O. and Adesodun, J. K. (2016) 'Water-stable aggregates and aggregate-associated organic carbon and nitrogen after three annual applications of poultry manure and spent mushroom wastes', *Applied Soil Ecology*.
- Yaméogo, J., Panakoulia, S., Kotronakis, M., Somdaa, I., Nikolaidis, N., Lykkec, A.M., Axelsenc, J., (2018) 'Simulation of the long-term impact of soil restoration techniques on carbon content and structure of water stable aggregates in West Africa', *Soil & Tillage Research*, Revised.

6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΤΙΣ

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέσα στις επόμενες 4 δεκαετίες, η ανθρωπότητα θα χρειαστεί να διπλασιάσει την παραγωγή τροφίμων και ενέργειας και να αυξήσει την παροχή καθαρού νερού κατά ποσοστό άνω του 50%, περιοριζόμενη ταυτόχρονα από την κλιματική αλλαγή και προσαρμοζόμενη σε αυτήν. Κεντρικό στοιχείο στη στρατηγική αντιμετώπισης αυτών των σημαντικών περιβαλλοντικών προκλήσεων είναι η διατήρηση του μείζονος ρόλου, τον οποίο διαδραματίζουν οι απαραίτητες εδαφικές λειτουργίες, αλλά και οι υπηρεσίες, οι οποίες παρέχονται από τα σχετικά οικοσυστήματα. Πολλές εδαφικές λειτουργίες επηρεάζονται από τη δομή του εδάφους, όσον αφορά τη συσσωμάτωση και το πορώδες των σωματιδίων. Ο αντικειμενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση της δομής του εδάφους και της δυναμικής της βιομάζας, καθώς και της πρόσληψης των θρεπτικών συστατικών και των αποδόσεων μίας καλλιέργειας τομάτας, χρησιμοποιώντας το Μονοδιάστατο Ολοκληρωμένο Μοντέλο Κρίσιμης Ζώνης Εδάφους (1D-Integrated Critical Zone, 1D-ICZ), το οποίο αποτελεί τη μηχανιστική μαθηματική περιγραφή των εδαφικών διεργασιών και λειτουργιών. Το μοντέλο 1D-ICZ προσομοιώνει τις σημαντικότερες εδαφικές λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της υδατικής ροής και αποθήκευσης, της παραγωγής βιομάζας, της δέσμευσης του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών, της μετακίνησης των ρυπαντών και της υποστήριξης των βιολογικών διεργασιών. Συνοπτικά, το 1D-ICZ διαθέτει τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης των απαραίτητων λειτουργιών των εδαφικών οικοσυστημάτων.

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε από δεδομένα που προήλθαν από το πείραμα αγρού με καλλιέργεια τομάτας, χρησιμοποιώντας διάφορες μεταχειρίσεις: ανόργανα λιπάσματα του εμπορίου, κόμποστ ΑΣΑ, ζωική κοπριά και εδαφοβελτιωτικό μίγμα 30% κοπριάς – 70% κόμποστ ΑΣΑ. Κατά τη διάρκεια των τεσσάρων καλλιεργητικών περιόδων συλλέχθηκαν αναλυτικά δεδομένα σχετικά με τη χημεία του εδάφους και του εδαφικού διαλύματος, το σχηματισμό συσσωματωμάτων και την απόδοση της καλλιέργειας. Το μοντέλο ήταν σε θέση να απεικονίσει την παραγωγή βιομάζας, τη διαχρονική δυναμική σχηματισμού σταθερών συσσωματωμάτων στη διέλευση νερού και τη δυναμική της δέσμευσης άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών στα διάφορα κλάσματα συσσωματωμάτων, καθώς επίσης και τη μεταβλητότητα της διήθησης και μετακίνησης νερού, σε διαφορετικές μεταχειρίσεις εδαφοβελτιωτικού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν την αξία της εφαρμογής εργαλείων υπολογιστικής προσομοίωσης, όπως το 1D-ICZ μοντέλο, για τον έλεγχο των επιλογών προς επίτευξη βελτιωμένων μέτρων διαχείρισης εδάφους και την υποστήριξη βιώσιμων αγροτικών πρακτικών.

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 1D-ICZ

6.1.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο 1D-ICZ (Giannakis et al. 2017) συσχετίζει τη δημιουργία και καταστροφή της δομής του εδάφους με τη δυναμική των θρεπτικών συστατικών, την ανάπτυξη των φυτών και την υδρολογία του εδάφους. Αποτελείται από τέσσερα κύρια υπομοντέλα: i) ροής και μεταφοράς (HYDRUS-1D) (Šimůnek et al. 2009), ii) βιοανάδευσης (bioturbation): χημικής ισορροπίας και κινητικής της διάλυσης των ορυκτών (SAFE) (Wallman et al. 2005a), iii) δυναμικής των C/N/P/Ca/Mg και σχηματισμού συσσωματωμάτων, CAST (Stamati et al. 2013) και iv) δυναμικής της βιομάζας (PROSUM). Στο μοντέλο CAST, τα κλάσματα C του μοντέλου RothC [Αποικοδομήσιμου Φυτικού Υλικού (DPM-Decomposable Plant Material), Ανθεκτικού Φυτικού Υλικού (RPM-Resistant Plant Material), Μικροβιακής Βιομάζας (BIO) και Χουμοποιημένης Οργανικής Ύλης (HUM) έχουν προσαρμοστεί και επεκταθεί μέσω πρόσθετων κλασμάτων οργανισμών (πανίδας), για να εκφράσουν τη βιομάζα της πανίδας του εδάφους, η οποία διατηρείται στη μικροβιακή βιομάζα. Προσομοιώνονται τρεις τύποι υδατοσταθερών συσσωματωμάτων : AC1 (μικρά υδατοσταθερά συσσωματώματα, <53 μm) αποτελούμενα από BIO και HUM, AC2 (υδατοσταθερά μικροσυσσωματώματα, 53-250 μm) αποτελούμενα από BIO, HUM, και ομάδες λεπτών DPM (DPMf), και RPM (RPMf), και συσσωματώματα τύπου AC3 (υδατοσταθερά μακροσυσσωματώματα, >250 μm) αποτελούμενα από BIO, HUM, DPMf, RPMf, και τα μεγαλύτερα κλάσματα που υπάρχουν στις ομάδες DPM (DPMc) και RPM (RPMc). Ο C σε κάθε τύπο συσσωματώματος αποικοδομείται με βάση την κινητική πρώτης τάξης, με τον κάθε τύπο συσσωματώματος να έχει τη δική του χαρακτηριστική σταθερά ταχύτητα σχηματισμού. Ο οργανικός C ανοργανοποιείται και παράγεται CO₂, BIO (ζωντανή βιομάζα) και HUM (χουμοποιημένο οργανικό υλικό).

Η τιμή της σταθεράς (k) του ρυθμού αποικοδόμησης για κάθε συγκέντρωση τροποποιείται από το γινόμενο τριών παραγόντων διόρθωσης (a, b, c, με τιμές της τάξης 0-1,0) των σημαντικών παραγόντων που καθορίζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα: θερμοκρασία, έλλειμμα νερού και χλωρή επικάλυψη εδάφους, όπως στο μοντέλο RothC. Το μοντέλο 1D-ICZ εφαρμόζει μία παραλλαγή του μοντέλου CAST, το οποίο χρησιμοποιεί την εδαφική θερμοκρασία του κάθε στρώματος, ενώ το έλλειμμα νερού υπολογίζεται ως διαθέσιμη εδαφική υγρασία, μείον την υδατοχωρητικότητα του κάθε στρώματος, και η εδαφική κάλυψη παρέχεται από τη PROSUM, ως συνάρτηση της φυτικής βιομάζας. Η υπορουτίνα των μεταβολών της βιομάζας (PROSUM) υπολογίζει την καθαρή πρωτογενή παραγωγή (NPP-Net Primary Production) ως συνάρτηση του δυναμικού παραγωγής, πρωτογενών περιορισμών, περιορισμών των θρεπτικών συστατικών και παραγόντων μείωσης της φυσιολογικής ανάπτυξης. Κατά τη διάρκεια του “litterfall” και του “harvest” (συγκομιδή), το PROSUM μεταφέρει C και θρεπτικά συστατικά από τα φύλλα, τον κορμό και τη ρίζα των φυτών προς την εισερχόμενη βιομάζα του μοντέλου CAST.

Το μοντέλο ποσοτικοποιεί τις μεταβολές της δέσμευσης C, N και P στα εδάφη σε σχέση με την εδαφική δομή και την προστασία της οργανικής ύλης που υπάρχει μέσα στα συσσωματώματα, τα υπέργεια και υπόγεια αποθέματα C, τη βιοποικιλότητα (highly simplified functional Biodiversity), την παραγωγικότητα της βιομάζας, τους μύκητες των μυκόρριζων (mycorrhizal fungi), τη συνδυασμένη δραστηριότητα των αποικοδομητών βακτηρίων και μυκήτων, τους καταναλωτές μικροβιακής βιομάζας (BIO consumers), καθώς επίσης και την κάθετη μεταφορά του νερού και των συστατικών του εδάφους, μέσω χημικών αντιδράσεων στο εδαφικό προφίλ.

6.1.2 Στρατηγική προσομοίωσης και αρχικοποίηση μοντέλου (Model Setup)

Για την αρχικοποίηση του μοντέλου 1D-ICZ χρησιμοποιήθηκαν οι διεργασίες που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της 4ετούς πειραματικής περιόδου (Πίνακας 6.1). Αυτές περιλάμβαναν εφαρμογές λιπάσματος και οργανικών υποστρωμάτων, άροσης, μεταφύτευση σπορόφυτων τομάτας, ενσωμάτωση ζιζανίων και συγκομιδή καρπών τομάτας. Επίσης, απεικονίζονται οι περίοδοι καλλιέργειας τομάτας και αγρανάπαυσης. Τόσο οι τοματιές, όσο και τα ζιζάνια που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της περιόδου αγρανάπαυσης του χειμώνα και της άνοιξης, ταξινομήθηκαν, για λόγους προσομοίωσης, ως μυκορριζικά ποώδη φυτά (mycorrhizal herbaceous plants). Εφαρμόστηκε άροση πριν τη μεταφύτευση των σπορόφυτων (μήνες 8, 17, 29, και 41) για την ενσωμάτωση των οργανικών στο έδαφος και την προετοιμασία του για φύτευση.

Πίνακας 6.1. Προσομοίωση πειραματικού αγρού

Έτος	2011 (1 ^η περίοδος)												2012 (2 ^η περίοδος)												2013 (3 ^η περίοδος)												2014 (4 ^η περίοδος)													
Μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ιν	Ιλ	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ιν	Ιλ	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ιν	Ιλ	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ιν	Ιλ	Α	Σ	Ο	Ν	Δ		
Α/Α Μήνα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
Είδος Φυτού	W	W	W	W	W	W	W	T	T	T	T	W	W	W	W	W	T	T	T	T	T	W	W	W	W	W	W	W	T	T	T	T	T	W	W	W	W	W	W	W	W	T	T	T	T	T	W	W	W	
Προσθήκη νερού	R	R	R	R	R	R	R	I	R/I	R/I	R	R	R	R	R	R	I	I	I	I	R/I	R/I	R	R	R	R	R	R	R	I	I	I	I	R/I	R	R	R	R	R	R	R	R	I	I	I	I	R/I	R	R	R
Άροση								x									x											x												x										
Λίπανση*								x	x	x							x	x	x	x	x							x	x	x	x	x							x	x	x	x								
Προσθήκη Οργανικής Ουσίας**								x									x											x												x										
Ενσωμάτωση ζιζανίων							x									x											x												x											
Συγκομιδή											x									x	x	x									x	x	x								x	x								
Αφαίρεση φυτικών μερών της τομάτας											x											x											x									x								

W: Ζιζάνια; T: Τομάτα; R: Βρόχινο νερό I: Νερό άρδευσης ; R/I: Βρόχινο-Αρδευτικό νερό

*μόνο στη "IF" μεταχείριση

**στις "MSWC", "M" και "MSWC+M" μεταχειρίσεις

6.1.2.1 Αρχικοποίηση μεταφοράς θερμότητας, και διαλυμένων ουσιών (HYDRUS-1D)

Το υπομοντέλο HYDRUS-1D του μοντέλου 1D-ICZ χρησιμοποιεί πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της κάθετης τομής του εδάφους για την προσομοίωση της ροής νερού και θερμότητας, καθώς και της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών. Το βάθος του προφίλ του εδάφους ορίστηκε στο 1 m, περιλαμβάνοντας τρεις διαφορετικούς εδαφικούς ορίζοντες, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ιδιότητες μεταφοράς υδάτων και θερμότητας (Πίν. 6.2). Η υδατική ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις του μοντέλου van Genuchten-Mualem (van Genuchten 1980). Οι υδραυλικές ιδιότητες του ακόρεστου εδάφους του επιφανειακού στρώματος προήλθαν από τους Carsel & Parrish (1988) και οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν προσεγγιστικές χαρακτηριστικές τιμές για έδαφος ιλυώδους-αργιλώδους υφής. Για την προσαρμογή των υδραυλικών παραμέτρων των κατώτερων εδαφικών στρωμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της υδατικής περιεκτικότητας του εδάφους του πειραματικού αγρού.

Οι οριακές συνθήκες της επιφάνειας του εδάφους (ανώτερες οριακές συνθήκες), οι οποίες αφορούν την επιφάνεια αλληλεπίδρασης εδάφους-αέρα, ορίστηκαν έτσι ώστε να συμπεριλάβουν ένα επιφανειακό στρώμα, το οποίο επιτρέπει τη συγκέντρωση νερού στην επιφάνεια. Το ύψος του επιφανειακού υδατικού στρώματος αυξάνεται εξαιτίας των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και μειώνεται εξαιτίας της διήθησης και της εξάτμισης. Ο ορισμός των ανώτερων οριακών συνθηκών περιλαμβάνει τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους, η οποία θεωρήθηκε ίδια με την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, τον δυνητικό ρυθμό εξάτμισης (m/d) και τον ρυθμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων/άρδευσης (m/d). Το Σχήμα 5.1 παρουσιάζει την κατανομή της θερμοκρασίας, την εξάτμιση και των υδατικών εισροών στο ανώτερο όριο (upper boundary) κατά τη διάρκεια των 4 ετών της προσομοίωσης. Το κατώτερο όριο (lower boundary) ορίστηκε σαν οριακές συνθήκες ελεύθερης αποστράγγισης.

Η μεταφορά θερμότητας στην κάθετη τομή του εδάφους περιγράφεται από την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (Chung & Horton 1987), Εξ. 1:

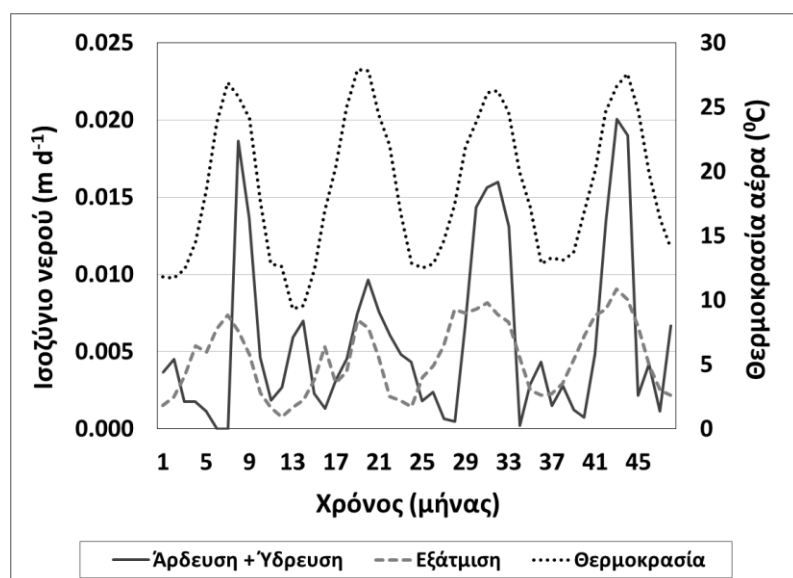
$$\lambda(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0.5} \text{ (Εξ. 1)}$$

όπου $\lambda(\theta)$ είναι ο συντελεστής φαινομενικής θερμικής αγωγιμότητας και οι παράμετροι b_1 , b_2 , b_3 επιλέχθηκαν με χαρακτηριστικές τιμές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν έδαφος αργιλώδους υφής (Chung & Horton, 1987). Η ίδια εδαφική υφή χρησιμοποιήθηκε για την αρχικοποίηση των υπολοίπων παραμέτρων της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης. Σύμφωνα με τα δεδομένα που μετρήθηκαν, τα ογκομετρικά κλάσματα της στερεάς φάσης και η περιεκτικότητα οργανικής ύλης ορίστηκαν σε 0,44 και 0,0425, αντίστοιχα, για το πρώτο εδαφικό στρώμα, 0,45 και 0,03 για το δεύτερο, και 0,50 και 0,01 για το τρίτο (Πίν. 6.2). Τα δεδομένα του αγρού χρησιμοποιήθηκαν για την αρχικοποίηση των χαρακτηριστικών του εδαφικού διαλύματος. Ωστόσο, η εγκατάσταση των λυσίμετρων αναρρόφησης έγινε μόνο μετά τον πρώτο χρόνο, οπότε, για την προσομοίωση του 2011, χρησιμοποιήθηκαν για αρχικοποίηση οι τιμές που μετρήθηκαν από τον Δεκέμβριο του 2012. Αυτό έγινε με βάση την υπόθεση ότι τον Δεκέμβριο, η υδατική χημεία του πορώδους είχε φτάσει σε ισορροπία και τα δεδομένα θα μπορούσαν τουλάχιστον να χρησιμοποιηθούν για την αρχικοποίηση του κατά προσέγγιση μεγέθους των συγκεντρώσεων των διαλυμάτων. Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τις αρχικές τιμές των χημικών ειδών που υπάρχουν στο εδαφικό διάλυμα.

Η ιοντική σύνθεση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και του αρδευτικού νερού φαίνεται στον Πίνακα 4.5. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν. Το αρδευτικό νερό αντλήθηκε από τον υπόγειο υδροφόρα και η χημεία ήταν στην ουσία σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ η συγκέντρωση των χημικών ειδών των όμβριων υδάτων παρουσίαζε διακυμάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τέλος, το 80% του νερού που εισάγεται στο σύστημα μέσω των κατακρημνίσεων και της άρδευσης θεωρήθηκε διαθέσιμο για την προσρόφησή του από το φυτό.

Πίνακας 6.2. Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση της μεταφοράς νερού και θερμότητας

		Παραμετροποίηση μεταφοράς νερού							Παραμετροποίηση μεταφοράς θερμότητας							
Βάθος εδαφικού προφίλ (cm)	Εδαφ. Ορίζον- τας	Υγρα- σία	θ_r	θ_s	α	n	K_s	I	Στερεά φάση	OM	b_1	b_2	b_3	c_n	c_o	c_w
0-10	1	0.2	0.067	0.45	2	1.41	0.108	0.5	0.55	0.042	1.57×10^{14}	2.53×10^{14}	9.89×10^{15}	1.43×10^{16}	1.87×10^{16}	3.12×10^{16}
10-20																
20-30																
30-40	2	0.3	0.0731	0.4732	1.15	1.43	0.075	0.5	0.5268	0.03	1.57×10^{14}	2.53×10^{14}	9.89×10^{14}	1.43×10^{16}	1.87×10^{16}	3.12×10^{16}
40-50																
50-60																
60-70	3	0.4	0.0731	0.4732	1.15	1.43	0.09	0.5	0.5268	0.01	1.57×10^{14}	2.53×10^{14}	9.89×10^{14}	1.43×10^{16}	1.87×10^{16}	3.12×10^{16}
70-80																
80-90																
90-100																
Υγρασία: αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (m/m), θ_r : υπολειπόμενο ποσοστό υγρασίας (m/m) , θ_s : υγρασία κορεσμού (m/m) , α : σταθερά της καμπύλης συγκράτησης νερού (m ⁻¹), n : σταθερά της καμπύλης συγκράτησης νερού (-), K_s : υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό (m d ⁻¹), I : συντελεστής στρέβλωσης (συστροφή-tortuosity) της συνάρτησης της αγωγιμότητας (-)									Στερεά φάση: κλάσμα όγκου στερεάς φάσης, OM: κλάσμα όγκου οργανικής ύλης (OY), $b_{1,2,3}$: συντελεστές της συνάρτησης της θερμικής αγωγιμότητας (Wm ⁻³ K ⁻¹) , c_n : ογκομετρική θερμοχωρητικότητα της στερεάς φάσης (Jm ⁻³ K ⁻¹), c_o : ογκομετρική θερμοχωρητικότητα της OY (Jm ⁻³ K ⁻¹), c_w : ογκομετρική θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης (Jm ⁻³ K ⁻¹)							



Σχήμα 6.1. Οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του εδάφους.

Πίνακας 6.3. Αρχικές συγκεντρώσεις στο εδαφικό διάλυμα.

Είδη	Συγκέντρωση [mol L ⁻¹]	Είδη	Συγκέντρωση [mol L ⁻¹]
Ca ²⁺	3.92E-03	Al(OH) ₄ ⁻	2.53E-10
Mg ²⁺	7.90E-04	AlSO ₄ ⁺	8.96E-19
Na ⁺	9.65E-05	Al(SO ₄) ₂ ⁻	6.09E-20
K ⁺	7.60E-06	H ₂ A ⁺	6.29E-14
H ⁺	1.41E-08	H ₂ SiO ₄ ²⁻	4.80E-17
Al ³⁺	1.00E-18	H ₃ A ²⁺	1.77E-19
CO ₂ (l)	5.16E-06	H ₃ SiO ₄ ⁻	2.46E-12
SO ₄ ²⁻	8.75E-04	HA	1.41E-10
HCO ₃ ⁻	1.84E-04	CO ₃ ²⁻	7.32E-07
OH ⁻	7.09E-07	H ₄ SiO ₄	1.00E-10
F ⁻	1.00E-10	LMWN	1.00E-10
A ⁻	1.00E-10	NO ₃ ⁻	1.26E-04
AlA ²⁺	4.88E-22	NH ₃	6.61E-07
AlF ²⁺	1.05E-21	NH ₄ ⁺	1.66E-05
AlF ₂ ⁺	5.75E-26	X-Ca,	1.00E-10
AlF ₃	1.07E-31	X-Mg,	1.00E-10
AlF ₄ ⁻	5.37E-39	X-K,	1.00E-10
AlF ₅ ²⁻	8.32E-48	X-Na,	1.00E-10
AlH ₃ SiO ₄ ²⁺	1.16E-21	X-Al	1.00E-10
AlHA ³⁺	8.46E-18	SO-H	1.00E-10
AlOH ²⁺	7.26E-16	SO	2.18E-04
Al(OH) ₂ ⁺	3.73E-13	SO-H ₂	1.00E-10
Al(OH) ₃	2.25E-10	SO-H ₂ SO ₄	3.31E-32

6.1.2.2 Αρχικοποίηση μεταβολών βιομάζας (PROSUM)

Το μοντέλο 1D-ICZ διαχειρίζεται την ανάπτυξη της βλάστησης χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα PROSUM (Giannakis et al. 2017). Η εν λόγω υπορουτίνα προσομοιώνει την ανάπτυξη του φυτού, την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και τη φυλλοστρωμνή, με βάση τυπικές παραμέτρους, όπως οι χρονομεταβλητές παράμετροι που ορίζονται από τον χρήστη και οι οποίες προσδιορίζουν τη μέση ημερήσια ροή της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR-Photosynthetically Active Radiation), τη συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού CO₂ και γεγονότα, όπως η άρρωση, η συγκομιδή και φυλλοστρωμνή, καθώς και τις δυναμικές εισροές από άλλα υπομοντέλα, π.χ. η διαθεσιμότητα ύδατος και θρεπτικών συστατικών. Θεωρήθηκε ότι η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού CO₂ ήταν 395 μL L⁻¹. Για τον υπολογισμό της ροής της PAR θεωρήθηκε ότι η PAR αποτελεί περίπου το 47% της ηλιακής ακτινοβολίας (Blackburn & Proctor 1983).

Τόσο η τομάτα, όσο τα είδη ζιζανίων, ορίστηκαν ως μυκορριζικά ποώδη φυτά. Ωστόσο, η κατανομή του C που αποθηκεύεται στα διάφορα τμήματα των φυτών (ρίζες, μυκόρριζες, φύλλα-βλαστοί-καρποί, ξυλώδη βιομάζα) προσαρμόστηκε έτσι, ώστε να γίνει διάκριση μεταξύ των δύο τύπων φυτών (Charin et al. 2012). Η τομάτα είναι γνωστό ότι διαθέτει σχετικά υψηλή αναλογία υπέργειας βιομάζας/ρίζας και έτσι η κατανομή του C στον ιστό του φύλλου-βλαστού-καρπού της τομάτας ήταν υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη των ζιζανίων (Πίν. 6.4).

Κατά την περίοδο της συγκομιδής (harvest) τα υλικά μεταφέρθηκαν στο υπομοντέλο CAST εφαρμόζοντας από τον χρήστη του μοντέλου συγκεκριμένα ποσοστά για κάθε μήνα ξεχωριστά, έτσι ώστε να προσεγγιστούν με το βέλτιστο τρόπο τα πειραματικά δεδομένα. Τις χρονικές στιγμές όπου εφαρμόστηκε άρρωση, το μοντέλο προσαρμόστηκε έτσι ώστε να μεταφέρει όλη την υπέργεια βιομάζα και το μεγαλύτερο μέρος της ριζικής και μυκορριζικής βιομάζας στην εισερχόμενη οργανική ουσία του CAST. Στο συγκεκριμένο πείραμα, η συγκομιδή των καρπών έλαβε χώρα τους μήνες Νοέμβριος του 2011, Οκτώβριος του 2012, Οκτώβριος του 2013 και Σεπτέμβριος του 2014 για τις τομάτες και Ιούλιο του 2011, Απρίλιο του 2012, Απρίλιο του 2013 και Απρίλιο του 2014 για τα ζιζάνια. Οι μετρήσεις αγρού έδειξαν ότι το 40% του υπέργειου ιστού της τομάτας (μετά τη συγκομιδή των καρπών) επιστράφηκε στο έδαφος μέσω της άρωσης.

Ο ρυθμός της Καθαρής Πρωτογενούς Παραγωγής (NPP) στην υπορουτίνα προσομοίωσης των μεταβολών της βιομάζας υπολογίζεται ως συνάρτηση του δυναμικού παραγωγής, των πρωτογενών περιορισμών (νερού, θερμοκρασίας, φωτός, και CO₂), των περιορισμών των θρεπτικών συστατικών και των μειώσεων που αποδίδονται σε ζιζάνια, ασθένειες, ή τη βόσκηση, καθώς και σε άλλες πρακτικές διαχείρισης. Η μέγιστη τιμή της NPP ορίστηκε στα 26 mol C m⁻²mol⁻¹. Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τιμή υπέργειας καθαρής πρωτογενούς παραγωγής (ANPP-Above Ground Net Primary Production), η οποία παρατηρήθηκε κατά την τρίτη καλλιεργητική περίοδο στον χειρισμό με κοπριά (M-Manure), μετά την προσθήκη και της τιμής της υπόγειας καθαρής παραγωγής. Καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για την υπόγεια καθαρή παραγωγή, έγινε η υπόθεση ότι το ποσοστό της ANPP ανερχόταν στο 50%. Επιπρόσθετα, θεωρήθηκε ότι δεν υπήρχε απώλεια βιομάζας από τα φυτοφάγα ζώα (κατοικίδια ζώα και άγρια σπονδυλωτά και ασπόνδυλα). Οι Rabbinge et al. (1989) ανέφεραν ότι, ο υπολογισμός της Μέγιστης NPP για λιπαινόμενες και αρδευόμενες αροτραίες καλλιέργειες κυμαίνεται μεταξύ 150-350 kg συνολικής ξηράς μάζας ha⁻¹d⁻¹, ή 18-42 Mol συνολικού C m⁻²mol⁻¹. Χρησιμοποιώντας την υπόθεση της υπόγειας βιομάζας του 50%, η μέγιστη NPP της τοματιάς ήταν 216 kg (ξ.β.) ha⁻¹d⁻¹ ή 26 mol C m⁻²mol⁻¹. Η αποδοτικότητα της χρήσης νερού ορίστηκε στα 625 Mol C m⁻³ νερού, βασιζόμενοι στις συνήθεις τιμές που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία για τη τομάτα. Οι τιμές για τις παραμέτρους που θεωρούνται σταθερές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.4. Ποσοστιαία κατανομή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγής για την ανάπτυξη του μυκορριζικού ποώδη φυτού, την ανάπτυξη της ρίζας, τα εκκρίματα των ριζών και τις μεταφορές από τις ρίζες προς τις μυκόρριζες.

	Τομάτα	Ζιζάνια
Photosynthate Allocation to Leaf*	0.59	0.5
Photosynthate Allocation to Root Growth	0.2	0.26
Photosynthate Allocation to Mycorrhizae	0.1	0.12
Photosynthate Allocation to Root Exudates	0.1	0.11

*"Leaf": χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει όλα τα μη ξυλώδη υλικά και αντιπροσωπεύει τα πώδη στελέχη, τα φύλλα και τους καρπούς.

Πίνακας 6.5. Σταθερές παράμετροι του PROSUM

Παράμετρος	Μονάδες	Περιγραφή	Τιμή
SpecificRootLength_mpMC	m / Mol root C	Μήκος ρίζας ανά μάζα C ρίζας	50
SpecificMycorLength_mpMC	m Mol ⁻¹ C	Μήκος Υφής ανά μάζα C Μυκόρριζας	1400000
TempRisePos	°C	Χαμηλή θερμοκρασία κατά την οποία η παραγωγικότητα περιορίζεται έως 50%	5.5
TempRiseWidth	°C	Σταδιακή αύξηση της παραγωγικότητας με θερμότερη θερμοκρασία	4.13
TempFallPos	°C	Υψηλή θερμοκρασία κατά την οποία η παραγωγικότητα περιορίζεται έως 50%	35.25
TempFallWidth	°C	Σταδιακή μείωση της παραγωγικότητας με υψηλή θερμοκρασία	4.45
PARexponent	-	Απότομη καμπύλη κορεσμού που περιγράφει τον περιορισμό της παραγωγικότητας λόγω φωτός	-0.00180303
WaterUE_MCpm3	Mol C m ⁻³ water	Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού	625
CO2Factor	-	Μέγεθος της επίδρασης του CO2 στην παραγωγικότητα	0.424
CO2Exponent	-	Κλίση της επίδρασης του CO2 στην παραγωγικότητα	0.0269
ThresholdPlantCForCover_Mpm2	Mol C m ⁻²	Φυτική ολική βιομάζα κατά την οποία το έδαφος θεωρείται ότι προστατεύεται από τη διάβρωση	4.2
RootDepthBeta	-	Σταδιακή μείωση της πυκνότητας του μήκους της ρίζας με το βάθος του εδάφους	2.98E-07
InitLeafC_Mpm2	Mol C m ⁻²	Αρχικά αποθέματα υπέργειας φυτικής βιομάζας (δεν περιλαμβάνει τους ξυλώδεις ιστούς)	10
InitWoodC_Mpm2	Mol C m ⁻²	Αρχικά αποθέματα ξυλώδεις βιομάζας	0
InitRootC_Mpm2	Mol C m ⁻²	Αρχικά αποθέματα ριζικής βιομάζας	8
InitMycorC_Mpm2	Mol C m ⁻²	Αρχικά αποθέματα Μυκόρριζας	4

6.1.2.3 Αρχικοποίηση Οργανικού Άνθρακα, συσσωμάτωσης και δομής του εδάφους

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την αρχικοποίηση της υπορουτίνας αυτής περιλαμβάνουν το κλάσμα της μάζας των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) για κάθε μία από τις 3 ταξινομήσεις μεγέθους (ιλύος-πηλού-AC1, μικροσυσσωματωμάτων-AC2 και μακροσυσσωματωμάτων-AC3), καθώς και την περιεκτικότητα C και ιλύος-πηλού για κάθε κλάσμα. Ο λόγος DPM (Αποικοδομήσιμο Φυτικό Υλικό) προς RPM (Ανθεκτικό Φυτικό Υλικό) της φυλλοστρωμνής ορίστηκε στο 1,8, υποδηλώνοντας εύκολα βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό στη σύνθεση της Οργανικής Ύλης (Organic Matter, OM). Το προφίλ του εδάφους διακριτοποιήθηκε σε τρία στρώματα: βάθους 0-20, 20-40 και >40 cm, σύμφωνα με την τυπική διακριτοποίηση του μοντέλου 1D-ICZ. Ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει τα αποθέματα του Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) εντός των WSA σε κάθε στρώμα του εδάφους και ο Πίνακας 6.7 παρουσιάζει την αρχική κλασματοποίηση των συσσωματωμάτων και την περιεκτικότητα ιλύος και άμμου κάθε συσσωματώματος.

Πίνακας 6.6. Κατανομή αρχικών δεξαμενών OC στους 3 τύπους WSA για κάθε εδαφικό ορίζοντα.

	AC3										AC2				AC1	
	AC3		AC1 within AC3				AC2 within AC3									
Βάθος εδάφους (cm)	RPM _c	DPM _c	RPM _f	DPM _f	BIO	HUM	RPM _f	DPM _f	BIO	HUM	RPM _f	DPM _f	BIO	HUM	BIO	HUM
0-20	10.46	1.85	0	0	0.62	11.7	1.54	1.54	0.15	2.92	3	3	0.7	13.3	0.2	5.21
20-40	9.68	1.71	0	0	0.57	10.82	1.42	1.42	0.14	2.7	2.78	2.78	0.7	12.3	0.2	4.82
> 40	6.61	1.17	0	0	0.39	7.39	0.97	0.97	0.1	1.85	1.9	1.9	0.4	8.42	0.1	3.29

Όλες οι τιμές είναι $tC\ ha^{-1}$, RPM: ανθεκτικό φυτικό υλικό, DPM: αποικοδομήσιμο φυτικό υλικό, HUM: χουμοποιημένη οργανική ύλη, BIO: μικροβιακή βιομάζα, επίπεδο κατατεμαχισμού του φυτικού υλικού: c: χοντρό, f: λεπτό, AC1: WSA μεγέθους ιλύος-πηλού, AC2: μικρο-WSA, AC3: μακρο-WSA.

Πίνακας 6.7. Αρχική κατανομή των σωματιδίων-συσσωματωμάτων μεγέθους αργίλου-ιλύος (< 53μm) και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2 and AC3 κλάσματα των συσσωματωμάτων σε κάθε ένα από τα 3 προφίλ εδάφους (< 20 cm, 20 - 40 cm, > 40 cm).

Βάθος εδάφους	Εκατοστιαία (%) κατανομή της μάζας των σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου στους 3 τύπους των συσσωματωμάτων				Κλάσμα ποσοστού μάζας σωματιδίων μεγέθους άμμου στους 3 τύπους των συσσωματωμάτων	
	AC1	AC2	AC1 μέσα στο AC3	AC2 μέσα στο AC3	Κλάσμα άμμου μέσα στο AC2	Κλάσμα άμμου μέσα στο AC3
< 20 cm	14.87	49.18	28.77	7.19	0.63	0.37
20 - 40 cm	14.87	49.18	28.77	7.19	0.63	0.37
> 40 cm	14.87	49.18	28.77	7.19	0.63	0.37

6.1.2.4 Στρατηγική βαθμονόμησης του μοντέλου

Η βαθμονόμηση του μοντέλου διενεργήθηκε χρησιμοποιώντας επαναληπτική μεθοδολογία, μέσω της βαθμονόμησης πρώτα των μεταβολών της βιομάζας, στη συνέχεια της περιεκτικότητας της μάζας του εδάφους σε C και N, καθώς επίσης και της εδαφικής δομής, ακολουθούμενης από τις συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών στο έδαφος. Στο πρώτο στάδιο, έπρεπε να προσαρμοστούν οι περιορισμοί της φυτικής ανάπτυξης (η διαθεσιμότητα ύδατος και θρεπτικών συστατικών). Οι λόγοι των εισροών C προς N, P, K, Ca, και Mg στο έδαφος από την ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης προσαρμόστηκαν, έτσι ώστε να παρέχουν, συμπληρωματικά με την εισροή μέσω άρδευσης και όμβριων υδάτων, τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη του φυτού. Επίσης, οι παράμετροι που καθορίζουν τους κύκλους του N και του P ρυθμίστηκαν σωστά, συνεισφέροντας στην παροχή θρεπτικών συστατικών.

Οι παράμετροι αυτοί συμπεριλάμβαναν τα ποσοστά ανοργανοποίησης του P, καθώς και τα ποσοστά αποικοδόμησης του οργανικού N σε διαλυτές μορφές οργανικού και ανόργανου N, όπως το ποσοστό μετασχηματισμού του αδιάλυτου οργανικού N σε Διαλυτό Οργανικό Άζωτο (DON-Dissolved Organic Nitrogen), το ποσοστό μετασχηματισμού του DON σε Άζωτο Χαμηλού Μοριακού Βάρους (LMWN-Low Molecular Weight Nitrogen), το ποσοστό ανοργανοποίησης του LMWN σε αμμώνιο και τα ποσοστά νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Η μετατροπή από αδιάλυτο οργανικό άζωτο σε DON είναι το βραδύτερο στάδιο της ανοργανοποίησης του N (Chapin III κ. ά., 2011) και υπολογίζεται μέσω του χειρισμού των παρακάτω συντελεστών της υπορουτίνας CAST ($k_{\text{partition_AC1}}$, $k_{\text{partition_AC1withinAC2}}$, $k_{\text{partition_AC1withinAC2}}$, $k_{\text{partition_AC1withinAC3}}$, και $k_{\text{partition_AC1withinAC2inAC3}}$). Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα (DOC) και των λόγων άνθρακα προς άζωτο (C:N) στις ομάδες BIO και HUM. Οι λόγοι C:N σε αυτά τα κλάσματα ορίστηκαν σε 10:1 με βάση τα δεδομένα από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία (Chapin et al. 2012) και τις μετρήσεις του πειραματικού αγρού.

Μετά τον υπολογισμό της ανάπτυξης του φυτού, έπεται ο υπολογισμός του δυναμικού προσρόφησης των θρεπτικών συστατικών. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα ορισμού μέγιστης προσρόφησης θρεπτικών συστατικών ανά παραγόμενη βιομάζα ανά φυτό. Οι τιμές αυτές, οι οποίες ορίζονται από την παράμετρο “κατώτερο όριο του λόγου C/στοιχείου (N, P, K, Mg, Ca)”, ορίστηκαν σε αυξημένα επίπεδα, προκειμένου να αντικατοπτρίσουν τις ποσότητες θρεπτικών συστατικών, οι οποίες συσσωρεύονται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του φυτού. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στα φυτά τομάτας, όπου η βιομάζα των καρπών αναλογεί σε ένα υψηλό ποσοστό της συνολικής παραγωγής υπέργειας βιομάζας. Δεδομένης της βαθμονομημένης βιομάζας του φυτού και κατά συνέπεια της αντίστοιχης φυλλοστρωμνής, θα μπορούσε να ακολουθήσει η βαθμονόμηση των συνολικών αποθεμάτων SOC και του C στα κλάσματα WSA. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να γίνει μία προσαρμογή της σύνθεσης της εισροής C. Η βαθμονόμηση της κατανομής του OC εντός των κλασμάτων WSA επιτεύχθηκε μέσω των ρυθμιστικών παραγόντων του σχηματισμού και της καταστροφής των μακροσυσσωματωμάτων. Αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με τα συστατικά των μακροσυσσωματωμάτων (DPMc, RPMc, AC1, AC2) και την αναλογική τους συνεισφορά στη συνολική μάζα των μακροσυσσωματωμάτων, το ρυθμό σχηματισμού AC3, καθώς επίσης και τον ρυθμό καταστροφής, αλλά και τον ρυθμό αποικοδόμησης του άνθρακα εντός του κλάσματος AC3 WSA (DPMεντόςAC3). Μετά τη βαθμονόμηση της περιεκτικότητας άνθρακα εντός των κλάσεων των WSA, οι μεταβολές των υδατοσταθερών κλασμάτων (WSA) κατά τη διάρκεια της 4ετούς προσομοίωσης θα μπορούσαν να συμπληρωθούν, αντιστοιχώντας τις σταθερές των ρυθμών μεταφοράς μάζας ιλύος-πηλού μεταξύ των επιμέρους κλασμάτων WSA. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε N και η κατανομή εντός των κλασμάτων WSA προσδιορίστηκαν μέσω της προσαρμογής των λόγων C:N στις επιμέρους δεξαμενές C (DPM, RPM, BIO, HUM, κτλ.). Με την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων βαθμονόμησης, τα

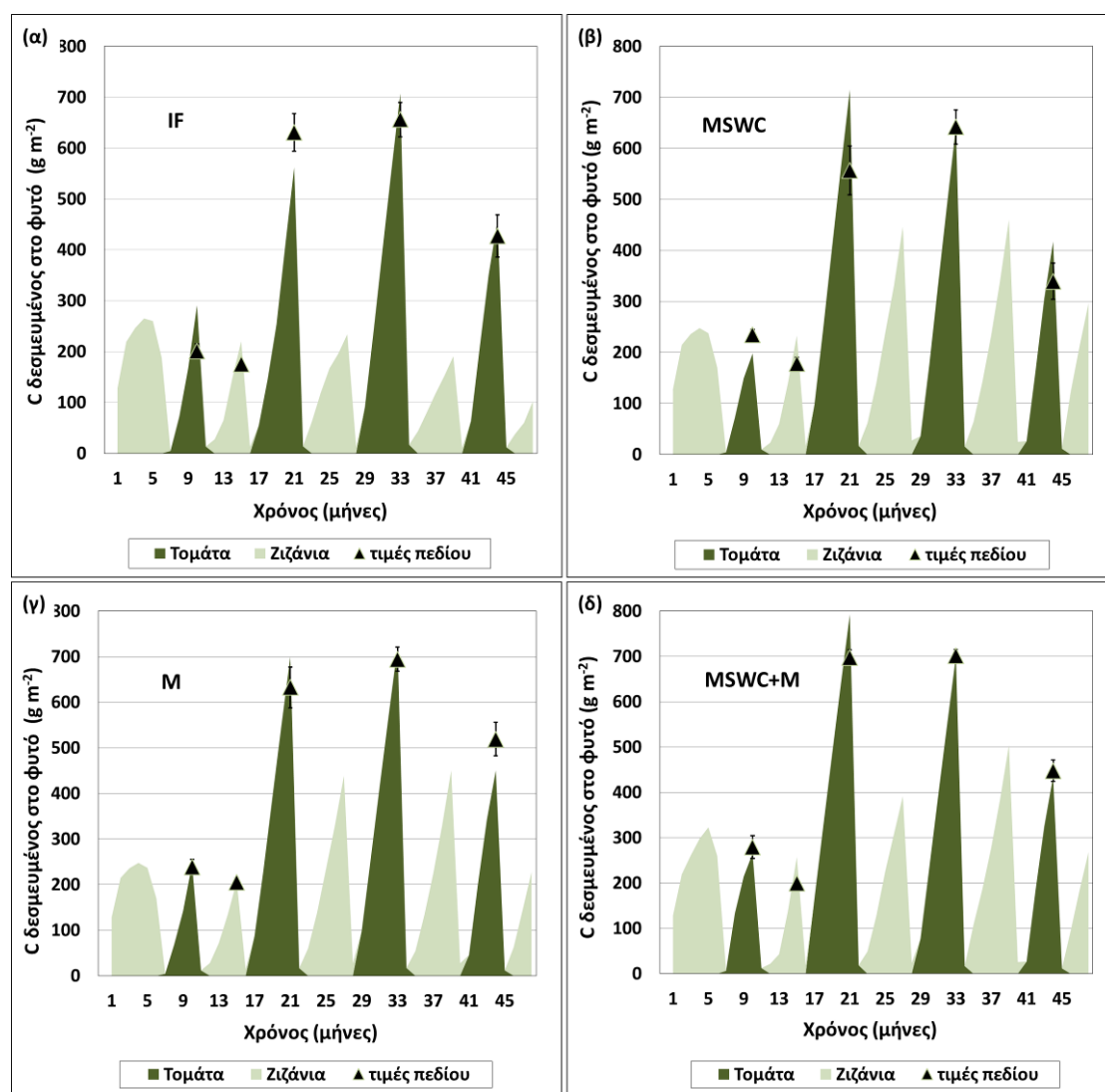
θρεπτικά συστατικά που προσομοιώνονται μέσω της υπορουτίνας CAST γίνονται διαθέσιμα για την υπορουτίνα του PROSUM, επιτρέποντας τον υπολογισμό της παραγόμενης βιομάζας, ο οποίος, με τη σειρά του, επηρεάζει την ενσωμάτωση του οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Η διαδικασία βαθμονόμησης συνεχίστηκε, έως ότου οι υπολογιζόμενες μεταβλητές κατάστασης προσομοίωσαν την καλύτερη δυνατή προσαρμογή καθ' όλο το εύρος των μεταβλητών, με τα πειραματικά δεδομένα.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε επαναληπτικά, προκειμένου να επιτευχθεί μία αποδεκτή προσαρμογή με τις παρατηρήσεις του αγρού. Χρησιμοποιήθηκε η ρίζα μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) και οι συντελεστές διακύμανσης (CVs) για τον έλεγχο καλής προσαρμογής, όσον αφορά την παραγωγή του φυτού και την προσρόφηση N, P, και K από αυτό, την κατανομή μάζας των WSA κατά ταξινόμηση μεγέθους, τα ποσοστά δέσμευσης C και N, καθώς επίσης και τις ποσότητες C και N που συσσωρεύονται σε κάθε κλάσμα WSA. Ο CV υπολογίζεται ως ο λόγος της RMSE προς τη μέση τιμή των παρατηρούμενων τιμών και εκφράζεται ως ποσοστό.

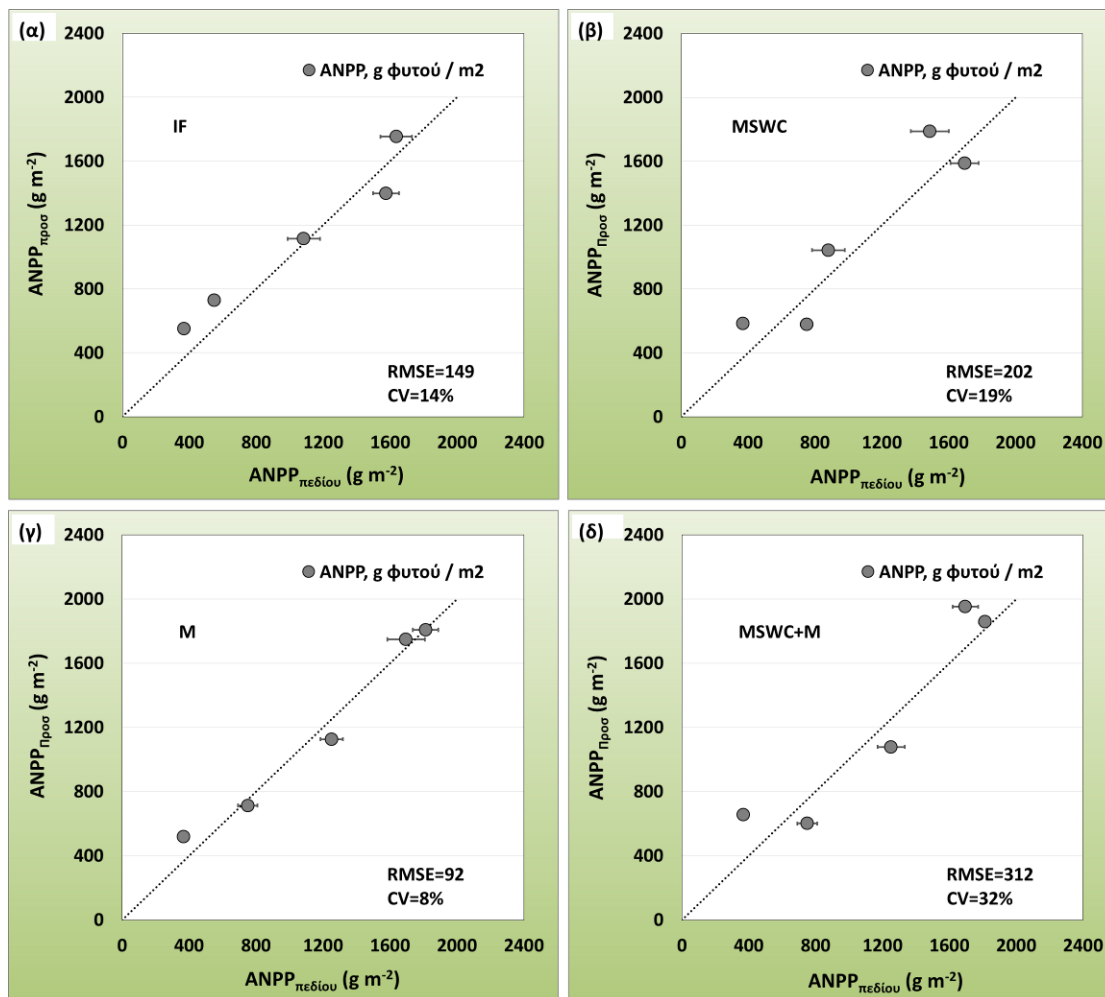
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.2.1 Φυτική Ανάπτυξη και Υπέργεια Καθαρή Πρωτογενής Παραγωγή

Η προσομοίωση της παραγωγής C φυτικής βιομάζας, για το πείραμα διάρκειας 4 ετών, παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.2 και 6.3. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται έναντι των παρατηρούμενων τιμών περιεκτικότητας C στους ιστούς της τομάτας και των ζιζανίων (Σχ. 6.2) και της παραγωγής υπέργεια φυτικής βιομάζας (Σχ. 6.3). Η διαθεσιμότητα των δεδομένων σχετικά με το περιεχόμενο των ζιζανίων σε άνθρακα περιορίζεται μόνο σε δεδομένα του δεύτερου έτους.



Σχήμα 6.2. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του C που συσσωρεύονται στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (τομάτα και ζιζάνια), για κάθε μεταχείριση, κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.



Σχήμα 6.3. Σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών υπέργειας καθαρής πρωτογενούς παραγωγής (ANPP-Above Ground Net Primary Production, g φυτικής βιομάζας m⁻²). (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Παρουσιάζονται η ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (CV).

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.9.1, η παραγωγή βιομάζας φυτικού ιστού τομάτας ήταν μικρότερη την πρώτη καλλιεργητική περίοδο (2011) και αυτό αποδόθηκε στο βραχύτερο καλλιεργητικό διάστημα (Αύγουστο ως Νοέμβριο), καθώς επίσης και στις κακές συνθήκες αυτής της περιόδου για βέλτιστη καλλιέργεια τομάτας. Οι δύο επόμενοι καλλιεργητικοί κύκλοι (2012 και 2013) παρουσίασαν την υψηλότερη παραγωγή φυτικής βιομάζας, ενώ στον τελευταίο, η παραγωγή μειώθηκε, και αυτό αποδόθηκε στην πρώιμη και αιφνίδια κατάρρευση του φυτού, εξαιτίας της εκδήλωσης μικροβιακού παθογόνου. Ως αποτέλεσμα, η καλλιεργητική περίοδος ήταν βραχύτερη κατά 26 ημέρες, κατά μέσο όρο.

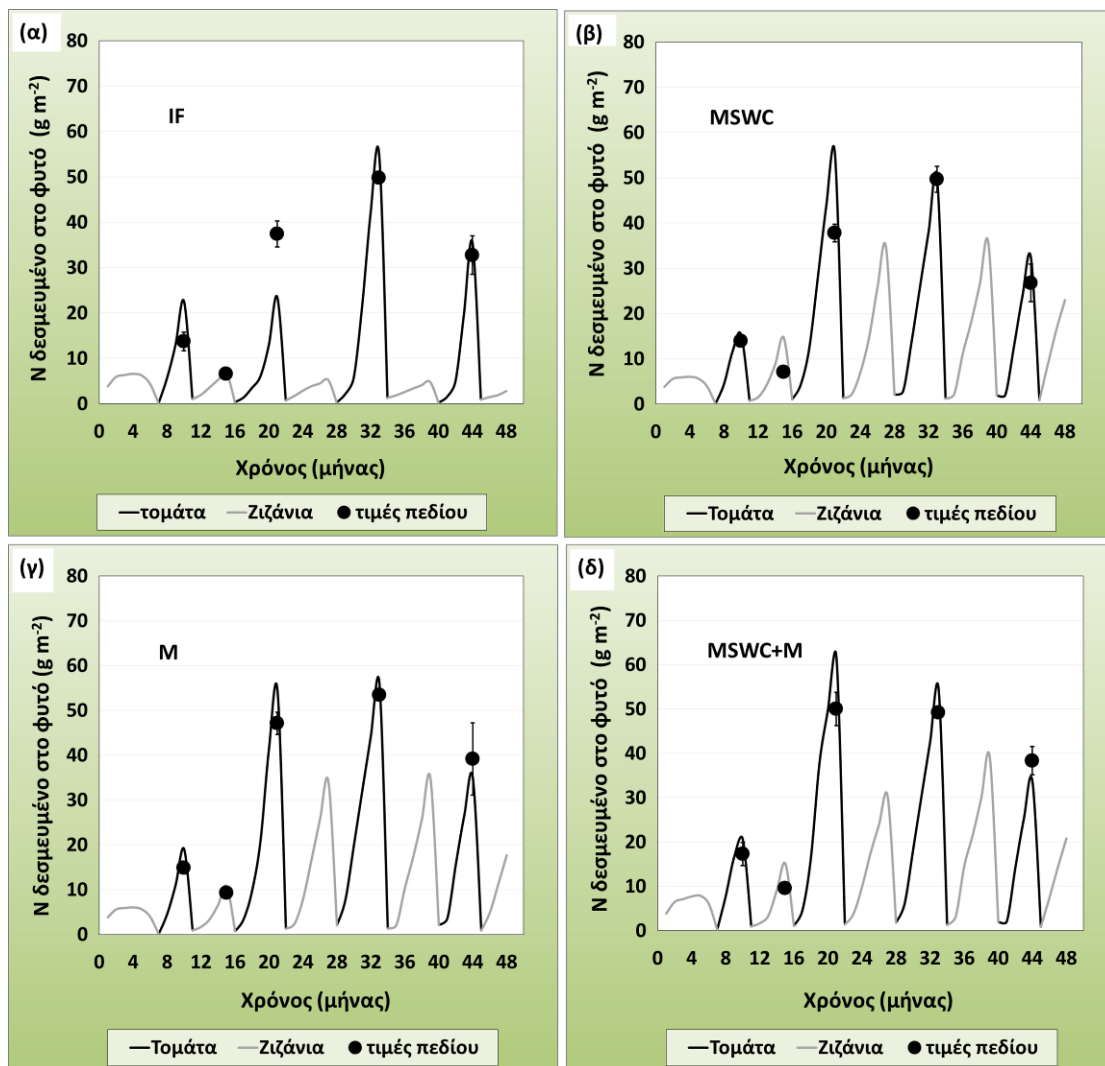
Η παραγωγή φυτικής βιομάζας παρουσίασε μεταβλητότητα μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων (Σχ. 4.25). Το πιο παραγωγικό έτος ήταν το 2013, για όλες τις μεταχειρίσεις, ενώ η υψηλότερη παραγωγή βιομάζας μεταξύ αυτών παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις "M" και "MSWC+M". Τα φυτά στα οποία χορηγήθηκαν 50 t/ha MSWC συσώρευσαν λιγότερη ποσότητα C στην υπέργεια βιομάζα (Σχ. 6.2β), από τα φυτά στα οποία χορηγήθηκε κοπριά

(“M”) (Σχ. 6.2γ), ή μίγμα κόμποστ-κοπριάς (“MSWC+M”) (Σχ. 6.2δ). Επίσης, τα φυτά που δέχθηκαν κόμποστ εμφάνισαν παρόμοιες ποσότητες C με εκείνες της μεταχείρισης “IF” (Σχ. 6.2α), υποδηλώνοντας έτσι, ότι το συγκεκριμένο υλικό έχει τη δυνατότητα να παρέχει στα φυτά επαρκείς ποσότητες θρεπτικών συστατικών για την υποστήριξη της φυτικής παραγωγής.

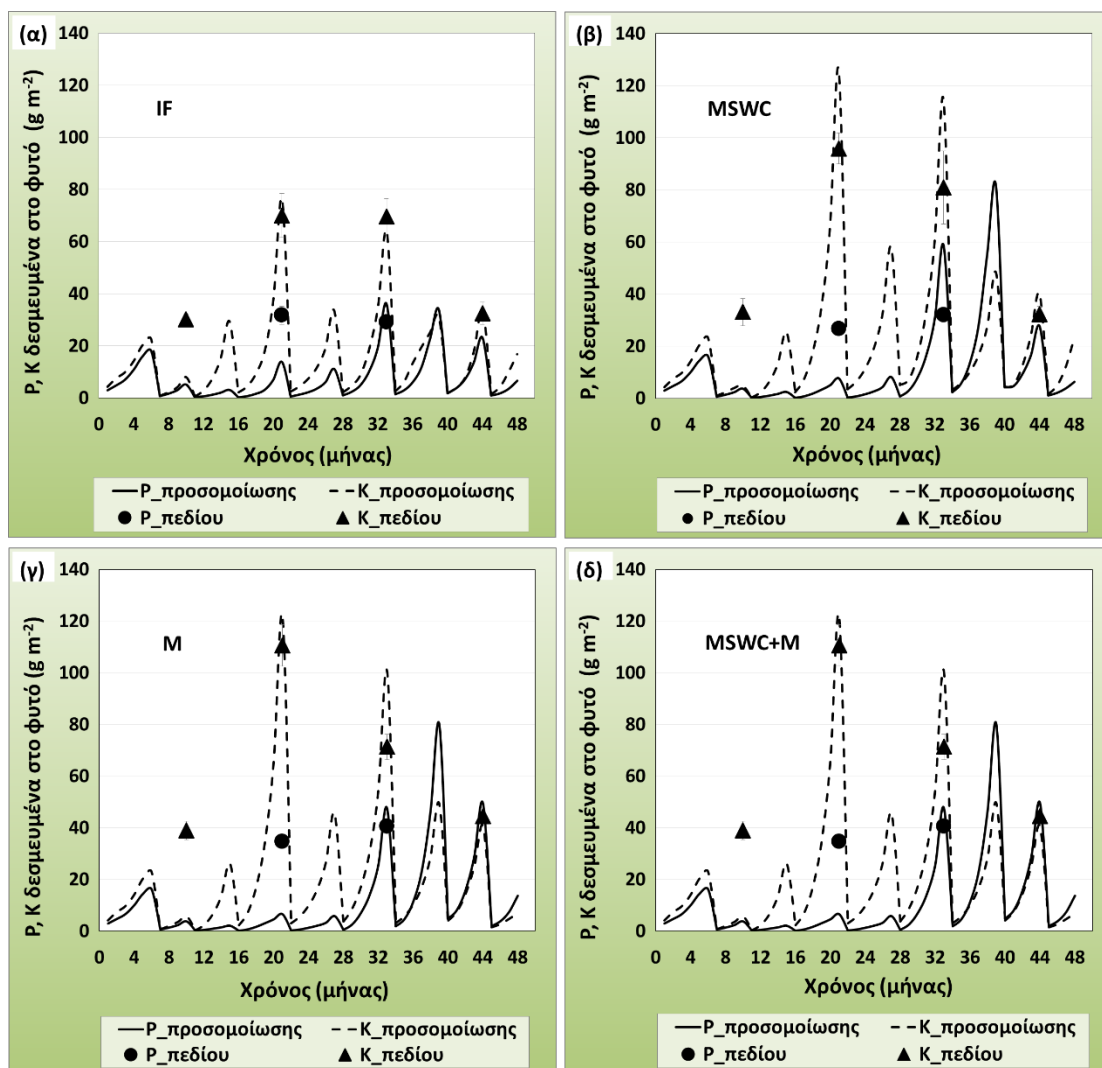
Γενικά, το μοντέλο 1D-ICZ παρείχε πολύ ικανοποιητικές προβλέψεις για την παραγωγή C φυτικής βιομάζας (Σχ. 6.3) και την υπέργεια καθαρή πρωτογενή παραγωγή, η οποία σχετίζεται με την παραγωγή φυτικής βιομάζας (Σχ. 6.3). Η καλή προσαρμογή, όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη RMSE και τον συντελεστή διακύμανσης CV (Σχ. 6.3), κυμάνθηκε μεταξύ 92 – 312 g m⁻² και 8% με 32%, αντίστοιχα.

Το Σχήμα 6.4 παρουσιάζει την προσομοίωση της πρόσληψης N, έναντι της μετρούμενης πρόσληψης N στους ιστούς της τομάτας και των ζιζανίων. Τα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά πρόσληψης από τα φυτά (P, K) προσομοιώθηκαν επίσης, και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5. Η υψηλότερη συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών στις τομάτες έλαβε χώρα στην δεύτερη και τρίτη καλλιεργητική περίοδο, ακολουθώντας την τάση που παρατηρήθηκε για την παραγωγή βιομάζας. Η RMSE για την υπέργεια προσρόφηση N, P, και K από τα φυτά κυμάνθηκε από 5 g N m⁻² ως 8 g N m⁻², από 12 g P m⁻² ως 27 g P m⁻², και από 12 g K m⁻² ως 45 g K m⁻², αντίστοιχα. Ο CV για τη συγκέντρωση N, P, και K στα φυτά κυμάνθηκε από 15-33%, 44-80%, και 23-66%, αντίστοιχα.

Γενικά, το μοντέλο 1D-ICZ ήταν σε θέση να ακολουθήσει τις διαχρονικές τάσεις και να προσομοιώσει τη συγκέντρωση του N, τόσο στις τομάτες, όσο και στα ζιζάνια, σε ικανοποιητικό βαθμό σε σύγκριση με τα δεδομένα αγρού. Το μοντέλο υπολόγισε ελλιπώς την περιεκτικότητα K του πρώτου έτους, λόγω των περιορισμών διαθεσιμότητας ύδατος και προσομοίωσε με επιτυχία την περιεκτικότητα K για τα επόμενα 3 έτη. Ομοίως, το μοντέλο υποεκτίμησε τις περιεκτικότητες P των φυτών και των ζιζανίων κατά το δεύτερο έτος, αλλά παρείχε ικανοποιητικές προβλέψεις για τα επόμενα έτη.



Σχήμα 6.4. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του N που συσσωρεύονται στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (τομάτα και ζιζάνια), για κάθε μεταχείριση, κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.

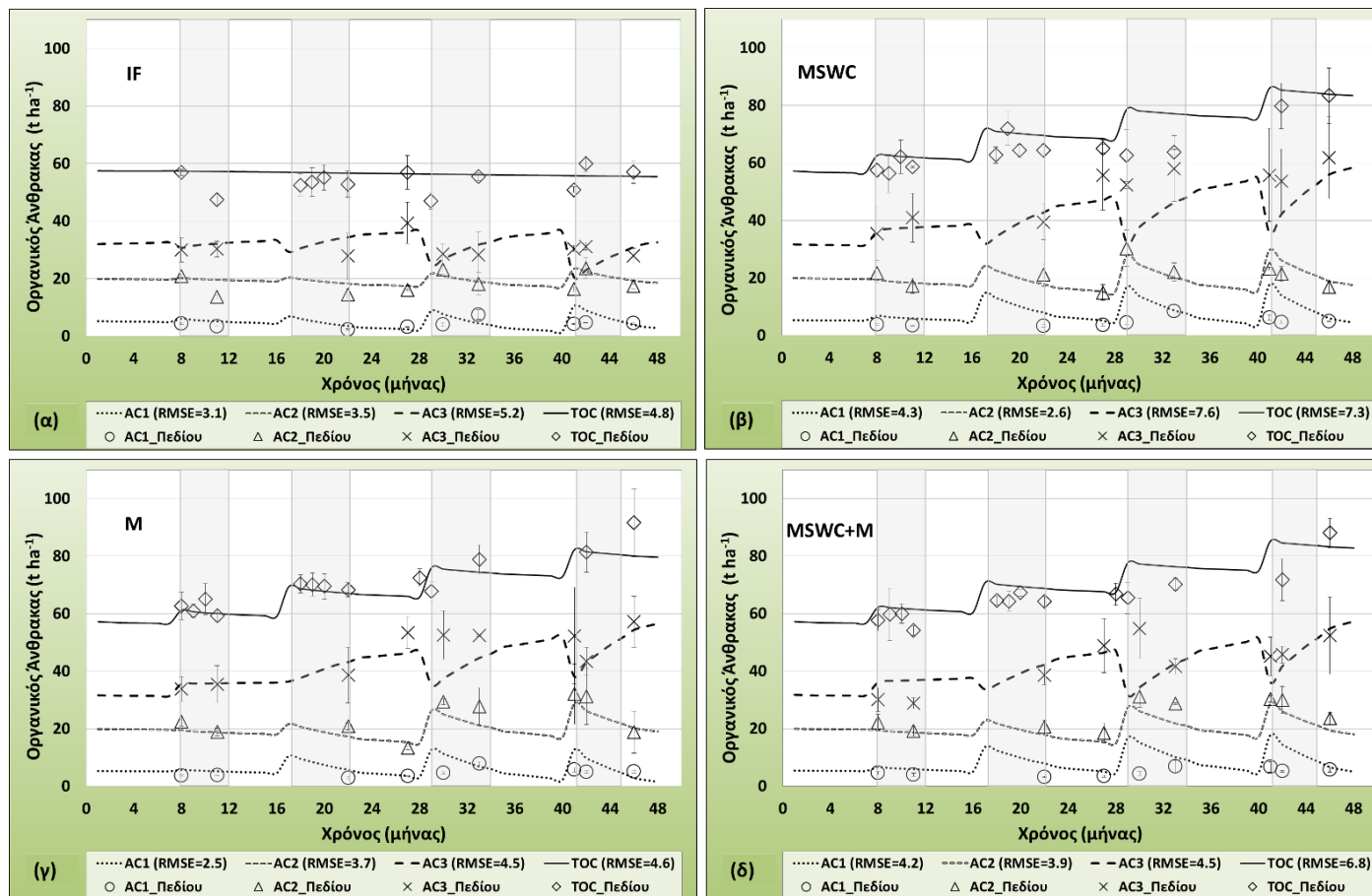


Σχήμα 6.5. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του P και του K που συσσωρεύονται στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (τομάτα και ζιζάνια), για κάθε μεταχείριση, κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.

6.2.2 Οργανικός άνθρακας του εδάφους και SOC που σχετίζεται με τα συσσωματώματα

Η εφαρμογή οργανικών εδαφοβελτιωτικών στο έδαφος ενίσχυσε τη δέσμευση C στο έδαφος. Μετά το πέρας των τεσσάρων ετών, ο C που δεσμεύθηκε ήταν $30,4 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ για τη “MSWC+M” μεταχείριση, $28,9 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ για τη “M” και $26,0 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ για τη “MSWC”. Αναφορικά με τη “IF” μεταχείριση, δεν διαπιστώθηκε δέσμευση του TOC στο έδαφος, παρά το γεγονός ότι τα υπολείμματα τομάτας και τα ζιζάνια ενσωματώνονταν κάθε χρόνο στο έδαφος. Η φυτική βιομάζα που ενσωματώθηκε στο έδαφος μέσω υπολειμμάτων υπολογίστηκε στο 40% της ετήσιας παραγωγής βιομάζας.

Το μοντέλο προσομοίωσε με επιτυχία την εξέλιξη των αποθεμάτων οργανικού άνθρακα (Organic Carbon, OC) σε όλη τη μάζα του εδάφους (TOC) και σε κάθε κλάσμα συσσωματώματος ξεχωριστά (AC1, AC2, AC3), κατά τη διάρκεια της 4ετούς περιόδου (Σχ. 6.6). Η RMSE των αποθεμάτων OC σε όλα τα κλάσματα WSA και τα εφαρμοζόμενα λιπάσματα, κυμάνθηκε μεταξύ $2,5$ και $7,6 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως αποδεκτή διακύμανση. Η προσομοιωμένη συνολική δέσμευση OC κατά τη λήξη του πειράματος ήταν μικρότερη κατά $2 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ στη “IF” μεταχείριση, $4,6 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ στη “MSWC”, $9,9 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ στη “M” και $9,4 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ στη “MSWC+M”, σε σύγκριση με τα δεδομένα που παρατηρήθηκαν στο πεδίο, εμπίπτοντας όμως εντός της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων (Σχ. 6.6), που σημαίνει αποδεκτή βαθμονόμηση. Στην προσομοίωση της “IF” μεταχείρισης, στην οποία η μόνη πηγή άνθρακα που προστέθηκε στο έδαφος ήταν τα φυτικά υπολείμματα, η δέσμευση του OC συμφωνούσε με τις παρατηρήσεις του αγρού. Η αύξηση των αποθεμάτων OC στις άλλες 3 μεταχειρίσεις προσομοιώθηκε επίσης με επιτυχία (Σχ. 6.6).

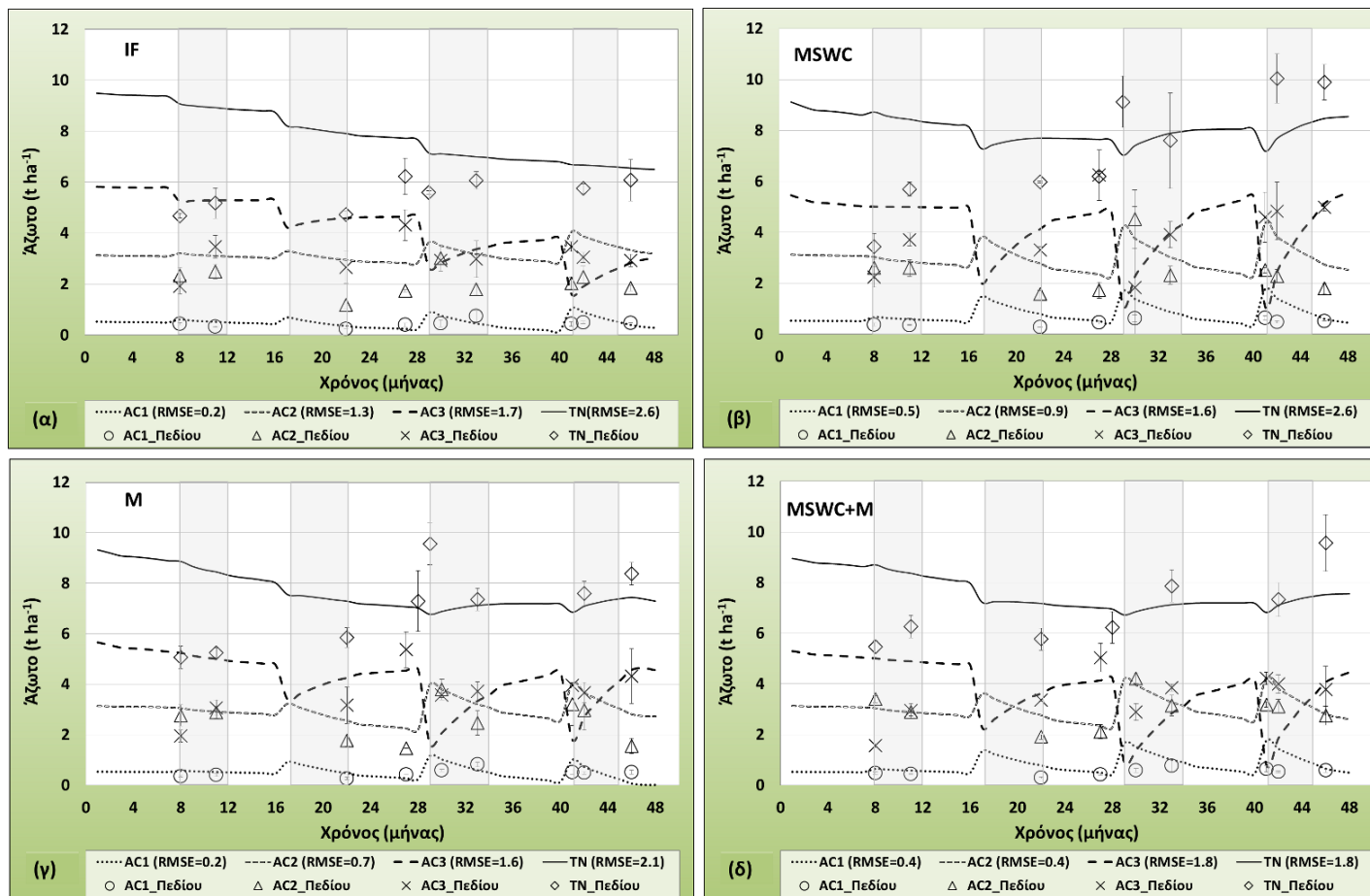


Σχήμα 6.6. Προσομοίωση αποθεμάτων Οργανικού Άνθρακα στο κυρίως χώμα (TOC) και σε κάθε κλάσμα συσσωματώματος (AC1, AC2, AC3), για κάθε μεταχείριση κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η γραμμές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.

6.2.3 Απόθεμα αζώτου στο έδαφος

Η 48-μηνιαία προσομοίωση της εξέλιξης των αποθεμάτων αζώτου συνολικά στο έδαφος, αλλά και στα επιμέρους κλάσματα WSA, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7.

Το μοντέλο προέβλεψε τα αποθέματα N για όλα τα κλάσματα συσσωματωμάτων με ικανοποιητικό τρόπο. Η RMSE κυμάνθηκε από 0,2 ως 1,8 tN·ha⁻¹ σε όλες τις μεταχειρίσεις, το οποίο σημαίνει αποδεκτή βαθμονόμηση. Ωστόσο, από το προσομοιωμένο συνολικό N προέκυψαν σημαντικές αποκλίσεις, ιδιαίτερα κατά τα πρώτα δύο έτη όλων των μεταχειρίσεων. Παρά τις διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων δεδομένων κατά τα πρώτα δύο έτη, τα τελευταία δύο έτη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν πολύ κοντά στα δεδομένα αγρού.



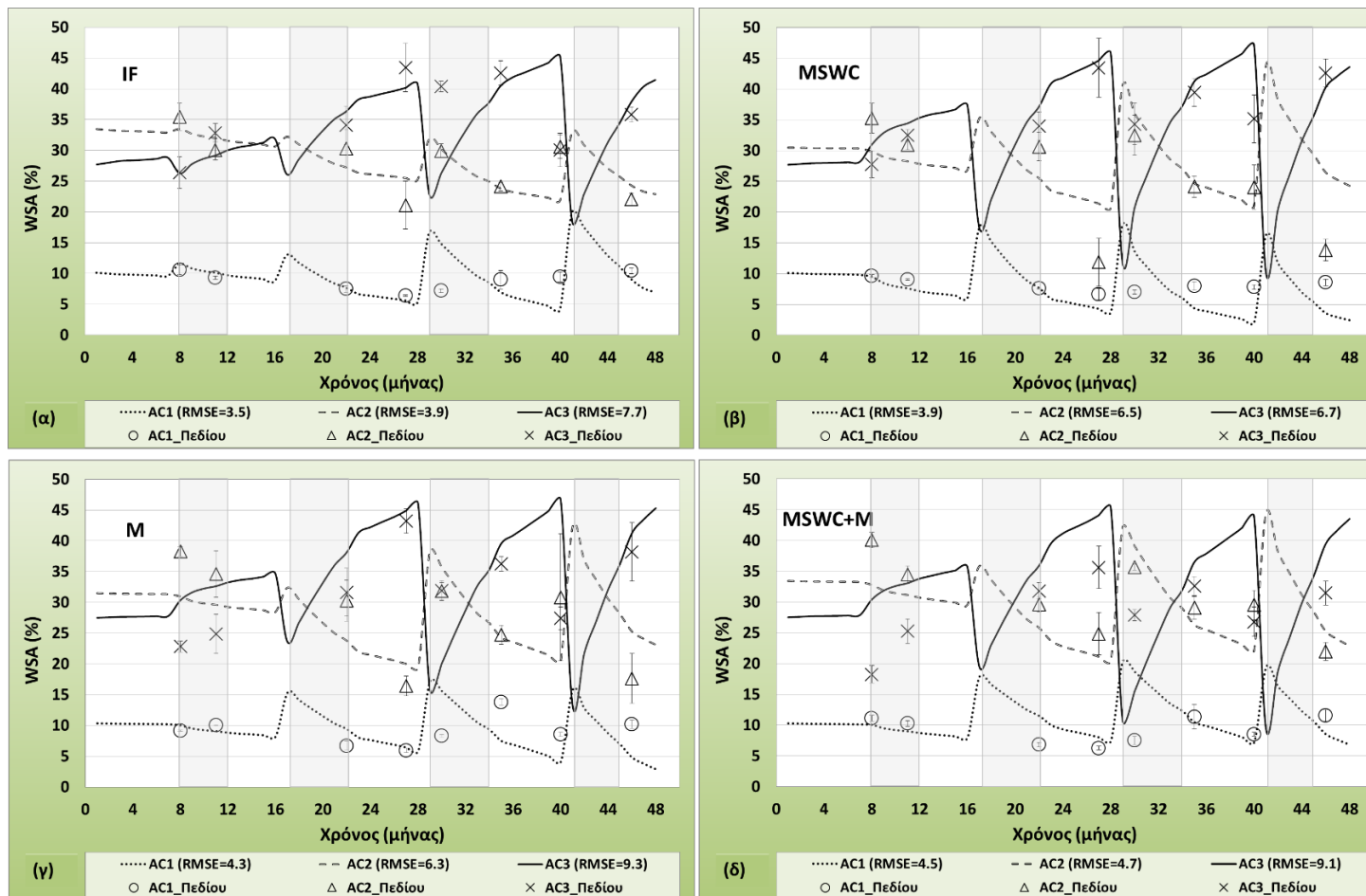
Σχήμα 6.7. Προσομοίωση αποθεμάτων Αζώτου στο κυρίως χώμα (TN) και σε κάθε κλάσμα συσσωματώματος (AC1, AC2, AC3), για κάθε μεταχείριση κατά τη διάρκεια της τετραετούς περιόδου. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η γραμμές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης ("IF"), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς ("M") και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M"). Η ημέρα προσομοίωσης 0 αναφέρεται στην 1η Ιανουαρίου 2011.

6.2.4 Σταθερότητα συσσωματωμάτων εδάφους στη διαβροχή

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, καθώς και τα παρατηρούμενα δεδομένα για την κατανομή των WSA, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8.

Η κατανομή των WSA κατά τη διάρκεια του πειράματος επηρεάστηκε σε έντονο βαθμό από την άροση. Τα AC3 καταστράφηκαν μηχανικά, απελευθερώνοντας μικρο-WSA (AC2) και WSA μεγέθους ιλύος-πηλού. Το μοντέλο προσομοίωσε μία σημαντική πτώση του κλάσματος AC3 μετά την άροση, η οποία ήταν λιγότερη έκδηλη στα δεδομένα αγρού. Ωστόσο, το μοντέλο ήταν σε θέση να προσομοιώσει τον σταδιακό επανασχηματισμό των AC3, μετά την ενσωμάτωση των οργανικών εδαφοβελτιωτικών (υπολειμμάτων τομάτας, ζιζάνια, κόμποστ και κοπριά) μέσω της άροσης, με αποδεκτές τιμές RMSE (3,9 ως 9,1%). Η δυνατότητα του μοντέλου 1D-ICZ να προσομοιώσει τις μεταβολές της κατανομής των WSA μεταξύ των κλάσεων μεγέθους, εξαρτάται από τους τροποποιητικούς παράγοντες των σταθερών πρώτης τάξης του ρυθμού σχηματισμού των μακροσυσσωματωμάτων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση του μοντέλου 1D-ICZ.

Γενικά, το μοντέλο 1D-ICZ ήταν σε θέση να απεικονίσει τη δυναμική των WSA σε χρονική βάση μικρότερη του έτους, καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης, αποτελώντας έτσι πολύτιμο εργαλείο για την προσομοίωση γεωργικών διαδικασιών και πρακτικών διαχείρισης, καθώς επίσης και για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των φυσικών διεργασιών.



Σχήμα 6.8. Προσομοίωση κατανομής WSA για κάθε μεταχείριση κατά την 4-ετή περίοδο. Οι γκριζες περιοχές απεικονίζουν τις περιόδους του κύκλου ανάπτυξης της τομάτας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις τιμές πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η γραμμές τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. (α) μεταχείριση ανόργανης λίπανσης (“IF”), (β) μεταχείριση προσθήκης κόμποστ ΑΣΑ (“MSWC”), (γ) μεταχείριση προσθήκης κοπριάς (“M”) και (δ) μεταχείριση με μείγμα κόμποστ και κοπριάς (“MSWC+M”).

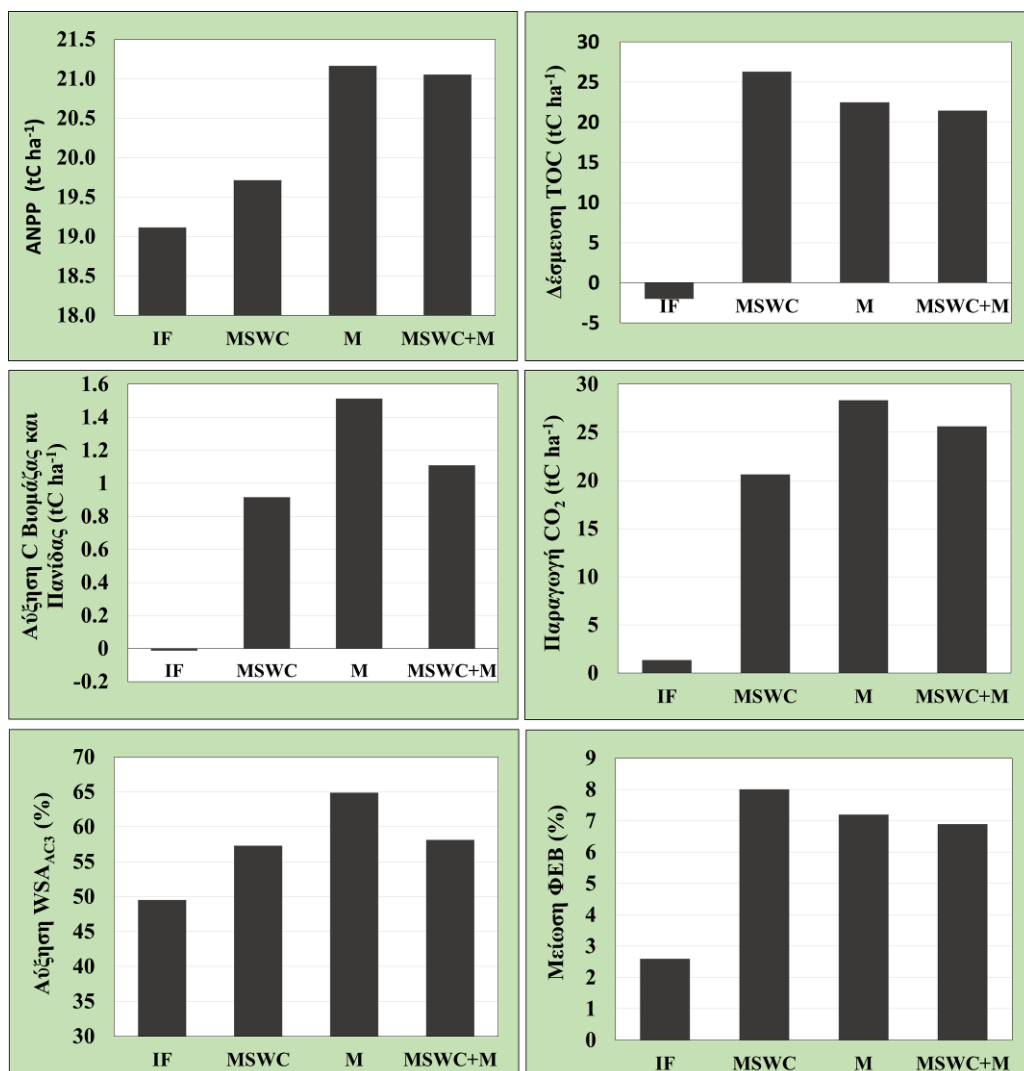
6.2.5 Προς την ανάπτυξη ενός «Δείκτη Εδαφικής Αειφορίας»

Η έννοια της αειφορικής χρήσης του εδάφους προϋποθέτει την υιοθέτηση πρακτικών διαχείρισης, οι οποίες βελτιώνουν/διατηρούν τις εδαφικές λειτουργίες (Victoria et al. 2012). Οι πρακτικές αυτές θα πρέπει να στοχεύουν σε λειτουργίες όπως η παραγωγή βιομάζας, η δέσμευση άνθρακα, η διατήρηση της μικροβιακής βιομάζας του εδάφους και η λειτουργική βιοποικιλότητα, καθώς και η διήθηση και η μεταφορά των υδάτων και των διαλυμένων ουσιών, τα οποία μπορεί να ποσοτικοποιηθούν μέσω μίας σειράς παραμέτρων μοντελοποίησης, αποθεμάτων μάζας και ροών. Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει τους προσομοιωμένους ρυθμούς των ροών C (συμπεριλαμβανομένων των υπολειμμάτων καλλιεργειών, ζιζάνια και οργανοβελτιωτικά, της δέσμευσης OC, της αύξησης του άνθρακα της βιομάζας και της πανίδας, της παραγωγής CO₂ και της μεταφοράς OC στα υπόγεια ύδατα, τους δείκτες ποιότητας της δομής του εδάφους (% αύξηση των WSA, % μείωση του Φαινόμενου Ειδικού Βάρους) και τις ροές των θρεπτικών συστατικών (NO₃, PO₄, K) προς τα υπόγεια ύδατα. Μία σύνοψη αυτών των δεδομένων για την 4ετή προσομοιωμένη περίοδο απεικονίζεται επίσης στο Σχήμα 6.9.

Η ετήσια ποσότητα C που προστέθηκε στο έδαφος μέσω των τριών χορηγήσεων εδαφοβελτιωτικού ("MSWC", "M", και "MSWC+M") ήταν σχεδόν η ίδια και περιλάμβανε 50 tC·ha⁻¹ του σχετικού εδαφοβελτιωτικού και ο υπόλοιπος C που ενσωματώθηκε στο έδαφος αποτελούνταν από υπολείμματα τομάτας και ζιζάνια. Η ποσότητα OC που δεσμεύτηκε στα εδάφη των μεταχειρίσεων των εδαφοβελτιωτικών κυμαινόταν μεταξύ 26,3 tC·ha⁻¹ για τη "MSWC" μεταχείριση και 21,4 tC·ha⁻¹ για τη "MSWC+M" μεταχείριση, οι οποίες αναλογούν σε ποσοστά δέσμευσης 42% και 33%, αντίστοιχα. Όσον αφορά στη "IF" μεταχείριση, προστέθηκε C μέσω υπολειμμάτων τομάτας και ζιζανίων (12,4 tC·ha⁻¹) και στο τέλος του πειράματος ο OC μειώθηκε κατά 2 tC·ha⁻¹. Η παραγωγή CO₂ κυμαινόταν μεταξύ 20,6 tC·ha⁻¹ για τη "MSWC" και 25,6 tC·ha⁻¹ για τη "MSWC+M", έως 28,3 tC·ha⁻¹ για τη "M" μεταχείριση, αντίστοιχα. Για τη "IF" μεταχείριση η παραγωγή CO₂ αντιστοιχούσε σε 1,4 tC·ha⁻¹. Τα οργανικά υποστρώματα του εδάφους ενεργοποίησαν τους μικροοργανισμούς με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής CO₂, η οποία κυμάνθηκε μεταξύ του 33% και 44% της συνολικής εισαγωγής C. Η μεταβλητότητα της αύξησης άνθρακα του BIO-FAU ήταν μικρή και κυμαινόταν από 0,9 ως 1,5 tC·ha⁻¹ κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ετών της πειραματικής περιόδου. Ομοίως, το ποσοστό μετακίνησης προς τα υπόγεια ύδατα κυμαινόταν μεταξύ 1,6 και 8,76 tC·ha⁻¹ για τις διάφορες μεταχειρίσεις.

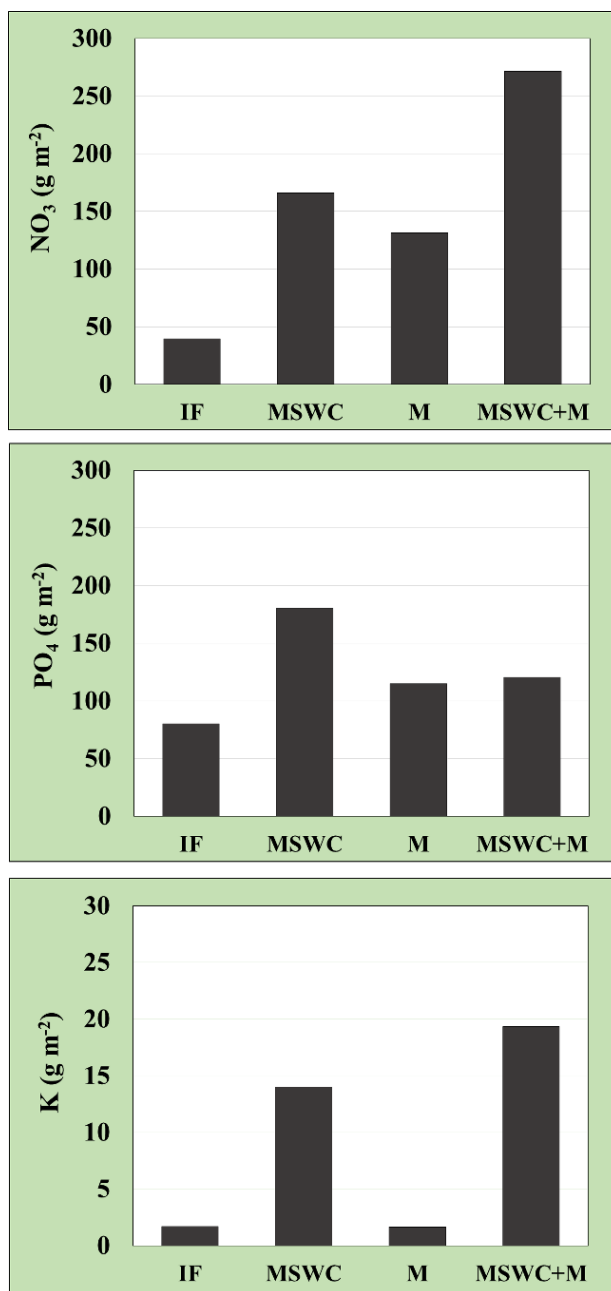
Πίνακας 6.8. Προσομοιωμένες ροές μάζας (σχετιζόμενες με τον C και τα στραγγίσματα) και δείκτες ποιότητας εδαφικής δομής στα 4 έτη προσομοίωσης.

Παράμετρος	Μονάδες	4-έτη			
		IF	MSWC	M	MSWC+M
Αποτελέσματα ροών C					
Δέσμευση OC	tC/ha	-2.0	26.3	22.5	21.4
Αύξηση C του κλάσματος BIO-FAU	tC/ha	0.0	0.9	1.5	1.1
CO ₂ παραγωγή	tC/ha	1.4	20.6	28.3	25.6
Εδαφική δομή					
Αύξηση WSA _{sand-corrected} (AC3)	%	49.5	57.3	64.9	58.1
Μείωση Φαινόμενου Ειδικού Βάρους	%	2.6	8.0	7.2	6.9
Στραγγίσματα (άθροισμα 4 ετών)		.			
NO ₃	t NO ₃ /ha	0.4	1.7	1.3	2.7
PO ₄	t PO ₄ /ha	0.8	1.8	1.2	1.2
K	t K/ha	0.0	0.1	0.0	0.2



Σχήμα 6.9. Δείκτες βιωσιμότητας (σύνολο για τους τέσσερις καλλιεργητικούς κύκλους) της μεταχείρισης της ανόργανης λίπανσης ("IF"), του κόμποστ ΑΣΑ ("MSWC"), της κοπριάς ("M") και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς ("MSWC+M").

Το μοντέλο 1D-ICZ ήταν επίσης σε θέση να προσομοιώσει τις δυναμικές αλλαγές της δομής του εδάφους, όπως απεικονίζονται στις μεταβολές του φαινόμενου ειδικού βάρους (ΦΕΒ), αλλά και των WSA. Η “MSWC” μεταχείριση παρουσίασε την υψηλότερη μείωση του φαινόμενου ειδικού βάρους και τη χαμηλότερη αύξηση των «WSA», ενώ η “M” μεταχείριση είχε την υψηλότερη αύξηση των WSA και μία ενδιάμεση μεταβολή του ΦΕΒ. Τέλος, το μίγμα (“MSWC+M”) εμφάνισε τη μικρότερη μείωση του ΦΕΒ και μία ενδιάμεση αύξηση των WSA. Οι ποσότητες των N, P και K που απομακρύνθηκαν από το έδαφος, διαμέσου του εδαφικού διαλύματος, προς τον υπόγειο υδροφόρα, παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 6.8, εμφανίζοντας μικρή, αλλά σημαντική μεταβλητότητα μεταξύ των μεταχειρίσεων.



Σχήμα 6.10. Ποσότητες NO₃⁻, PO₄⁻ και K που μετακινήθηκαν προς τα υπόγεια νερά (σύννοψη για τους τέσσερις καλλιεργητικούς κύκλους) της μεταχείρισης της ανόργανης λίπανσης (“IF”), του κόμποστ ΑΣΑ (“MSWC”), της κοπριάς (“M”) και του μίγματος κόμποστ και κοπριάς (“MSWC+M”).

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης υποδεικνύουν ότι το μοντέλο 1D-ICZ θα μπορούσε να ποσοτικοποιήσει πλήρως τις επιπτώσεις της προσθήκης άνθρακα στο έδαφος, μέσω της επιτυχούς προσομοίωσης των μεταβολών της παραγωγής βιομάζας και της δέσμευσης άνθρακα. Η ποσότητα C της βακτηριακής βιομάζας και της βιομάζας της πανίδας αυξάνονται με την προσθήκη άνθρακα, όπως επίσης αυξάνονται τα υδατοσταθερά μακροσυσσωματώματα, τα οποία θεωρούνται δείκτης της ποιότητας της δομής του εδάφους. Αφ' ετέρου, η προσθήκη οργανικού άνθρακα αυξάνει τη μεταφορά των νιτρικών και φωσφορικών αλάτων και του καλίου στα υπόγεια ύδατα, συμβάλλοντας σε φαινόμενα ευτροφισμού των επιφανειακών υδάτων. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των οφελών που προκύπτουν από τη βελτίωση του εδάφους μέσω της προσθήκης άνθρακα, σε σύγκριση με τη ανόργανη λίπανση. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης έδειξαν ότι, υπάρχουν αντισταθμιστικά οφέλη, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαχείριση των εδαφικών λειτουργιών. Παρ' ότι τα εδαφοβελτιωτικά βελτιώνουν σημαντικά το μεγαλύτερο μέρος των εδαφικών λειτουργιών, συμβάλλουν επίσης δυσμενώς στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων από τα θρεπτικά συστατικά. Αυτό υποδηλώνει ότι η ποσότητα του εδαφοβελτιωτικού άνθρακα στο έδαφος θα πρέπει να μελετηθεί, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα οφέλη και οι επιπτώσεις που έχει στις εδαφικές λειτουργίες και τις ροές των στοιχείων, αντίστοιχα. Έχει δειχθεί ότι το μοντέλο 1D-ICZ είναι σε θέση να προσομοιώσει τη δυναμική των εδαφικών λειτουργιών και να προβλέψει τις μεταβολές που οφείλονται στη διαχείριση της γης. Η ποσοτικοποίηση των εδαφικών λειτουργιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη δεικτών αειφορίας του εδάφους, προς αξιολόγηση των αντισταθμιστικών οφελών μεταξύ διαφορετικών αγρο-οικολογικών πρακτικών και πρακτικών διαχείρισης αγροτικής γης.

6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη παρουσίασε την επαλήθευση του μοντέλου 1D-ICZ, χρησιμοποιώντας δεδομένα αγρού από ένα πείραμα σε έναν αγρό, όπου χρησιμοποιήθηκαν εδαφοβελτιωτικά άνθρακα σε καλλιέργεια τομάτας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, λήφθηκαν από τη μελέτη του πειραματικού αγρού, η οποία διεξήχθη εντός των ορίων του Παρατηρητηρίου Κρίσιμης Ζώνης (ΚΖ) της Λεκάνης του Ποταμού Κοιλιάρη (ΛΠΚ), προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα διαφορετικών οργανικών εδαφοβελτιωτικών στις μεταβολές της δομής και των (βιο)χημικών ιδιοτήτων του εδάφους, οι οποίες σχετίζονται με την εδαφική γονιμότητα, όπως επίσης και στις μεταβολές της απόδοσης της καλλιέργειας τομάτας και της ποιότητας των καρπών.

Η προσομοίωση των δεδομένων αγρού για όλες τις μεταχειρίσεις στέφθηκε από μεγάλη επιτυχία. Το μοντέλο ήταν σε θέση να αναπαραστήσει την παραγωγή βιομάζας, τη διαχρονική δυναμική του σχηματισμού υδατοσταθερών συσσωματωμάτων και τη δυναμική της δέσμευσης του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών στα διαφορετικά μεγέθη WSA, καθώς επίσης και τη μεταβλητότητα της διήθησης και της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς των ουσιών στο εδαφικό διάλυμα, στις διάφορες μεταχειρίσεις. Τα δεδομένα επεξεργασίας, τα οποία προήλθαν από τις βαθμονομημένες προσομοιώσεις, επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση δεικτών βασικών εδαφικών λειτουργιών. Οι δείκτες αυτοί περιλαμβάνουν την παραγωγή βιομάζας, την αποθήκευση άνθρακα από το έδαφος και η μείωση των Εκπομπών Αερίου του Θερμοκηπίου (GHG), τη δέσμευση θρεπτικών συστατικών για τη θρέψη των φυτών και τη μεταφορά νερού και θρεπτικών συστατικών στα υπόγεια ύδατα ως παράγοντες ρύπανσης. Το σχετικό μέγεθος αυτών των δεικτών επιτρέπει μία πιο διαφανή και συνολική αξιολόγηση του αποτελέσματος των γεωργικών πρακτικών σε όλο το φάσμα των εδαφικών λειτουργιών. Η μελέτη παρουσιάζει τον προσδιορισμό αυτών των δεικτών, μέσω της σύγκρισης μεταξύ της εφαρμογής ανόργανων λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών ως οργανικά λιπάσματα, προκειμένου να βελτιωθούν οι αποδόσεις της καλλιέργειας τομάτας. Η εφαρμογή του μοντέλου σε διαφορετικά εδάφη θα ελέγξει περαιτέρω την εφαρμοσιμότητα του μοντέλου σε διάφορες κλιματικές και λιθολογικές συνθήκες και εντός ενός ευρύτερου φάσματος γεωργικών συστημάτων και πρακτικών.

- Blackburn, W. J. and Proctor, J. T. A. (1983) 'Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance', *Solar Energy*.
- Carsel, R. F. and Parrish, R. S. (1988) 'Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics', *Water Resources Research*, 24(5), pp. 755–769.
- Chapin, F. S., Matson, P. A. . P. A., Vitousek, P. M. . P. M., Stuart Chapin F., Iii., Matson, P. A. . P. A. and Vitousek, P. M. . P. M. (2012) *Principles of terrestrial ecosystem ecology, Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*.
- Chung, S. and Horton, R. (1987) 'Soil heat and water flow with a partial surface mulch', *Water Resources Research*, 23(12), pp. 2175–2186.
- van Genuchten, M. T. (1980) 'A Closed-form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils', *Soil Science Society of America Journal*, pp. 892–898.
- Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Valstar, J., Rowe, E. C., Moirgiorgou, K., Kotronakis, M., Paranychianakis, N. V., Rousseva, S., Stamati, F. E. and Banwart, S. A. (2017) 'Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ): A Tool for Dynamic Simulation of Soil Functions and Soil Structure', in *Advances in Agronomy*.
- Šimůnek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M. T. (2009) 'The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 4.08. HYDRUS Softw. Ser. 3.', *Dep. of Environ. Sci., Univ. of Calif., Riverside.*, (January), p. 332.
- Stamati, F. E., Nikolaidis, Nikolaos P., Banwart, S. and Blum, W. E. H. (2013) 'A coupled carbon, aggregation, and structure turnover (CAST) model for topsoils', *Geoderma*, 211–212(1), pp. 51–64.
- Victoria, R., Banwart, S., Black, H., Ingram, J., Joosten, H., Milne, E., Noellemeyer, E. and Baskin, Y. (2012) 'The Benefits of Soil Carbon: Managing soils for multiple economic, societal and environmental benefits', *UNEP Year Book: Emerging Issues in our Global Environment 2012*.
- Wallman, P., Svensson, M. G. E., Sverdrup, H. and Belyazid, S. (2005) 'ForSAFE—an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments', *Forest Ecology and Management*, 207(1), pp. 19–36.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την παρούσα διατριβή, η οποία πραγματεύεται τον ρόλο της οργανικής ουσίας στη μακροπρόθεσμη διατήρηση και ενίσχυση των λειτουργιών ενός εδάφους που υπόκειται σε εντατική γεωργική εκμετάλλευση, συνάγονται τα εξής:

- ✓ Η αγροτική πρακτική της εφαρμογής οργανικών εδαφοβελτιωτικών (κόμποστ, κοπριά, υπολείμματα καλλιέργειας και αυτοφυή βλάστηση) αύξησε την οργανική ουσία του εδάφους, εμπλουτίζοντάς το με τις απαραίτητες ποσότητες διαθέσιμου αζώτου και φωσφόρου για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.
- ✓ Ο C που δεσμεύθηκε συνολικά στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (0-15 cm) στις οργανικές μεταχειρίσεις αντιστοιχούσε από 40% έως 53% των αρχικών αποθεμάτων του.
- ✓ Τα εδάφη όπου έγινε εφαρμογή κοπριάς ή μίγματος κόμποστ και κοπριάς παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές στους δείκτες που εξετάστηκαν. Η εφαρμογή κοπριάς αύξησε σε πολύ μεγάλο βαθμό το διαθέσιμο κλάσμα του N και του P.
- ✓ Η συσσώρευση οργανικής ουσίας στο έδαφος όπου εφαρμόστηκε κόμποστ ΑΣΑ, οδήγησε σε σταδιακή απελευθέρωση διαθέσιμου αζώτου και φωσφόρου με το πέρασμα των ετών.
- ✓ Η εφαρμογή των οργανικών υποστρωμάτων ενίσχυσε τη φυσική δομή του εδάφους τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια κλίμακα. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις των παραπάνω εδαφικών δεικτών παρατηρήθηκαν στο έδαφος που εφαρμόστηκε κόμποστ ΑΣΑ.
- ✓ Η αλλαγή χρήσης της γης του πειραματικού εδάφους από την 35ετή παύση καλλιέργειας σε καλλιεργήσιμη γη, οδήγησε σε αρχική μείωση της σταθερότητας των συσσωματωμάτων στη διαβροχή. Μετά την πάροδο, ωστόσο, 4 ετών ετήσιας εφαρμογής οργανικών προϊόντων, επετεύχθη μία σημαντική επαναφορά της ποιότητας της δομής του εδάφους στην προγενέστερη κατάσταση.
- ✓ Διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων παρατηρείται και στις αποδόσεις των φυτών. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα εδάφους που προστέθηκε κοπριά με ή χωρίς κόμποστ, εμφάνισαν τη μεγαλύτερη παραγωγή καρπών και υπέργειας βιομάζας.
- ✓ Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του διαθέσιμου P που εμφανίζουν τα εδάφη της “Μ” μεταχείρισης αυξάνει τις πιθανότητες μεταφοράς P στους υπόγειους υδροφορείς.
- ✓ Εξετάζοντας τα αποτελέσματα υπό το πρίσμα της προστασίας του περιβάλλοντος, διαπιστώνουμε ότι η ετήσια εφαρμογή $50 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ χωνεμένης κοπριάς (ξ.β.) στο αργιλοπηλώδες έδαφος του πειραματικού αγρού, δύναται να επιβαρύνει τους υπόγειους υδροφορείς με N και P. Τα ποσοστά πρόσληψης του αζώτου και του φωσφόρου από τα φυτά που δέχθηκαν κοπριά ήταν λιγότερο από το 50% του εφαρμοζόμενου N και P και σε συνδυασμό με τις αυξημένες συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στο υποκείμενο στρώμα εδάφους που παρατηρήθηκαν, αποτελούν ενδείξεις μεταφοράς τους προς τον υπόγειο υδροφόρα.

- ✓ Η προσαρμοστικότητα των μεταβλητών του εδάφους επηρεάζεται, παράλληλα με τον τύπο λίπανσης, και από το στάδιο ανάπτυξης των καλλιεργειών, υποδηλώνοντας τη σημασία της μελέτης των ιδιοτήτων των γεωργικών εδαφών εντός καλλιεργητικού κύκλου.
- ✓ Ο υπολογισμός της διαφοράς των καθαρών ποσοστών νιτροποίησης μεταξύ των δειγμάτων που δέχθηκαν επίδραση αμμωνιακού υποστρώματος (PNR) και εκείνων που δέχθηκαν επιπλέον την επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης, δεν δύναται να αντιπροσωπεύσει με ασφάλεια τον πραγματικό ρυθμό νιτροποίησης.
- ✓ Τα εδάφη που δέχθηκαν κοπριά ή μίγμα κόμποστ και κοπριά εμφανίζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, τόσο όσον αφορά στις φυσικές και χημικές παραμέτρους που εξετάστηκαν, όσο και στις αποδόσεις των καλλιεργειών.
- ✓ Γενικά, το κόμποστ ΑΣΑ είχε σημαντική επίδραση στη συσσωμάτωση και στον εμπλουτισμό του εδάφους με εδαφική οργανική ύλη. Η χρήση μίγματος κόμποστ και κοπριάς συνδυάζει τη θετική επίδραση του κόμποστ στη δομή του εδάφους, με το ωφέλιμο μικροβιακό φορτίο και τα θρεπτικά συστατικά που προσφέρει η κοπριά για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.
- ✓ Η προσομοίωση των δεδομένων αγρού για όλες τις μεταχειρίσεις στέφθηκε από μεγάλη επιτυχία. Το μοντέλο ήταν σε θέση να αναπαραστήσει την παραγωγή βιομάζας, τη διαχρονική δυναμική του σχηματισμού υδατοσταθερών συσσωματωμάτων και τη δυναμική της δέσμευσης του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών στα διαφορετικά μεγέθη WSA, καθώς επίσης και τη μεταβλητότητα της διήθησης και της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς των ουσιών στο εδαφικό διάλυμα, στις διάφορες μεταχειρίσεις.
- ✓ Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης έδειξαν ότι, υπάρχουν αντισταθμιστικά οφέλη, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαχείριση των εδαφικών λειτουργιών. Παρ' ότι τα εδαφοβελτιωτικά βελτιώνουν σημαντικά το μεγαλύτερο μέρος των εδαφικών λειτουργιών, μπορεί να συμβάλλουν δυσμενώς στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων από τα θρεπτικά συστατικά.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ο καινοτόμος χαρακτήρας της εν λόγω διατριβής, όσον αφορά στη συνεισφορά της στην επιστήμη και ειδικότερα στην αιφορική χρήση του εδάφους, ο οποίος συνίσταται στα παρακάτω:

- ✓ Ολιστική ερευνητική προσέγγιση για την κατανόηση των οικολογικών υπηρεσιών που παρέχει το έδαφος σε πραγματικές συνθήκες, μετά την εφαρμογή οργανικών προϊόντων, όπως κόμποστ ΑΣΑ, κοπριά, υπολείμματα καλλιέργειας και ζιζάνια. Στη διατριβή αυτή έγινε επιβεβαίωση της υπόθεσης ότι, η αναπλήρωση της εδαφικής οργανικής ύλης, ως γεωργική πρακτική, μπορεί να βελτιώσει την εδαφική γονιμότητα.
- ✓ Βραχυχρόνια και μακροχρόνια μελέτη των μετασχηματισμών των ιδιοτήτων του εδάφους και της ανάπτυξης του φυτικού είδους *Solanum Lycopersicum*. Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν ελάχιστες αναφορές σε εφαρμογή οργανικών προϊόντων σε καλλιέργεια υπαίθριας τομάτας και σε καμία από αυτές δεν εξετάστηκε η μετεξέλιξη της σταθερότητας των συσσωματωμάτων του εδάφους και

των χημικών και βιοχημικών παραμέτρων του εδάφους κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των φυτών.

- ✓ Χρησιμοποιήθηκε το Μονοδιάστατο Ολοκληρωμένο Μοντέλο Κρίσιμης Ζώνης Εδάφους (1D-Integrated Critical Zone, 1D-ICZ) (Giannakis et al. 2017) για την προσομοίωση της επίδρασης ετήσιας εφαρμογής οργανικών προϊόντων στην παραγωγή βιομάζας, στη δυναμική της δέσμευσης άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, στην απορρόφηση των θρεπτικών από τα φυτά ή στη μεταφορά τους στους κατώτερα στρώματα του εδάφους διαμέσου του νερού, στην ποσότητα C της βακτηριακής βιομάζας και της βιομάζας της πανίδας, καθώς επίσης και στη διαχρονική δυναμική σχηματισμού σταθερών συσσωματωμάτων στη διέλευση νερού. Η δυναμική σχηματισμού σταθερών συσσωματωμάτων αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την ακριβή πρόβλεψη των επιπτώσεων της προσθήκης άνθρακα και των διαφόρων πρακτικών διαχείρισης στις λειτουργίες του εδάφους.

Κάποιες μελλοντικές προτάσεις που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, εξελίσσοντας την παρούσα διδακτορική διατριβή είναι οι εξής:

- ✓ Προκειμένου να μελετηθεί επαρκέστερα η ροή του νερού και η μεταφορά θρεπτικών στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους και επειδή η εφαρμογή λυσίμετρων αναρρόφησης σε κεραμικά δισκία δεν στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία, θα μπορούσε σε αντίστοιχο πείραμα να χρησιμοποιηθούν λυσίμετρα πεδίου.
- ✓ Ενδείκνυται η εφαρμογή μεθόδων ισοτόπων προκειμένου να συσχετιστούν καλύτερα τα διάφορα κλάσματα οργανικής ουσίας με τα συσσωματώματα του εδάφους. Επίσης, για την καλύτερη κατανόηση πως η εδαφική μήτρα επηρεάζει τις δυναμικές της SOM μπορεί να χρησιμοποιηθούν και φασματοσκοπικές ή/και τομογραφικές τεχνικές (spectroscopic and tomography based techniques).
- ✓ Η ποσοτικοποίηση των εδαφικών λειτουργιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη δεικτών αειφορίας του εδάφους, προς αξιολόγηση των αντισταθμιστικών οφελών μεταξύ διαφορετικών αγρο-οικολογικών πρακτικών και πρακτικών διαχείρισης αγροτικής γης.
- ✓ Οι παραπάνω αναφερόμενοι δείκτες θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε μεθοδολογίες αποτίμησης του κύκλου ζωής προϊόντων και υπηρεσιών (Life Cycle Analysis, LCA) όπως π.χ. για την επιλογή της καλύτερης μεθόδου διαχείρισης αποβλήτων σε σχέση με όλες τις δυνατές εναλλακτικές λύσεις. Οι συνηθέστερες κατηγορίες επιπτώσεων που συναντώνται στις μεθοδολογίες ανάλυσης κύκλου ζωής (ΑΚΖ) είναι επιδράσεις στην κλιματική αλλαγή, στη στιβάδα του στρατοσφαιρικού όζοντος, στην εξάντληση αβιοτικών πόρων, στην ανάπτυξη του φαινομένου του ευτροφισμού και της οξίνισης, κλπ. Οι δείκτες χαρακτηρισμού σε μία ΑΚΖ που αφορούν τα χερσαία οικοσυστήματα περιορίζονται στην εδαφική τοξικότητα (terrestrial toxicity), που αναφέρεται σε εκπομπές τοξικών ουσιών στα εδαφικά οικοσυστήματα (π.χ. μέθοδος CML 2 baseline 2000), στην αλλαγή χρήσης των εδαφών, που αφορούν τη μετατροπή ή την κατάληψη της γης για την κατασκευή ενός κτηρίου, αποθήκης, κ.α. και στην ανάπτυξη οικοτοξικότητας, που αναφέρεται στη ζημιά στην ποιότητα του οικοσυστήματος. Οι επιπτώσεις μίας δραστηριότητας αναφορικά με τη γονιμότητα των εδαφών είναι υπό διερεύνηση και το μοντέλο 1D-

ICZ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσο μοντέλο για μία ολοκληρωμένη ΑΚΖ.

- ✓ Η ολοκληρωμένη προσέγγιση της ΑΚΖ για υπηρεσίες, όπως είναι η διαχείριση του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων μέσω της εφαρμογής τους σε γεωργικά εδάφη, θα μπορούσε να συμπληρωθεί με μία ανάλυση κόστους οφέλους (cost benefit analysis, CBA). Κατά την ανάλυση αυτή θα μπορούσαν να καθορισθούν κάποιοι συντελεστές βαρύτητας για τις κατηγορίες των επιπτώσεων της ΑΚΖ, που θα βασίζονται στους περιβαλλοντικούς φόρους και τα πρόστιμα που επιβάλλει η ελληνική και η ευρωπαϊκή νομοθεσία. Για παράδειγμα, η χρησιμοποίηση των οργανικών στερεών αστικών αποβλήτων στα εδάφη θα έχει ως έμμεσο αποτέλεσμα τη μικρότερη οικονομική επιβάρυνση των ΧΥΤΑ. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να διαμορφωθεί ένα μεθοδολογικό εργαλείο για την ορθότερη αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων που αφορούν τη δημιουργία οργανικών προϊόντων κατάλληλα για την αειφόρο γεωργία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ

Πίνακας S1. Σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενων (obs) και προσομοιωμένων (sim) τιμών των pH, Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα (DOC), Ολικού Αζώτου (TN), Νιτρικού Αζώτου (N-NO₃⁻), Φωσφόρου φωσφορικών ιόντων (P-PO₄⁻³), Θεικών Ιόντων (SO₄⁻²) και όξινου ανθρακικού ιόντος (HCO₃⁻).

		Μονάδες	IF		MSWC		M		MSWC+M	
		Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	
2012										
pH		-	5.8-7.5	-	5.7-7.5	-	5.8-7.5	-	5.6-7.5	
DOC	mg L ⁻¹	7.5-50	9.5-276	7.7-47	12.5-239	26.4-53	12.3-178	17.9-47	13.8-404	
TN	mg L ⁻¹	1.1-69	0.9-86	1.0-51	0.8-24	1.3-41	0.6-18	1.2-47	0.8-40	
N-NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	5.7-26	0.1-117	5.0-25	0.1-119	29.3-122	0.3-111	7.0-10	0.1-117	
P-PO ₄ ⁻³	mg L ⁻¹	-	0.2-66	-	2.6-21	-	2.0-16	-	3.4-51	
SO ₄ ⁻²	mg L ⁻¹	77-90	31-457	61-111	52-581	151-408	46-534	111-137	50-752	
HCO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	141-379	57-5090	116-245	68-5056	171-655	76-5187	311-333	49-5197	
2013										
pH		8.1	6.1-8.1	7.6-8.0	6.1-8.2	7.1-8.1	6.1-8.2	7.6-8.1	6.1-8.2	
DOC	mg L ⁻¹	10.1-12	4.0-138	11.1-28	5.5-202	3.7-21	5.9-222	27-35	5.6-241	
TN	mg L ⁻¹	6.7-24	0.4-32	5.3-54	0.1-41	6.3-36	0.1-40	5.0-37	0.1-72	
N-NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	4.5-14	0.2-26	0.7-42	8.8-29	8.4-28	4.2-24	0.5-25	14.4-77	
P-PO ₄ ⁻³	mg L ⁻¹	0.4	2.4-21	0.2-0.5	2.1-120	0.2-1.8	1.3-99	0.3-0.6	0.02-43	
SO ₄ ⁻²	mg L ⁻¹	61-63	91-152	81-147	92-314	64-82	91-274	77-123	91-259	
HCO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	308-417	337-1623	121-420	262-2347	250-531	274-3337	145-482	324-2127	
2014										
pH		-	5.9-6.6	7.2	6.4-7.3	7.4	6.2-7.1	7.4	6.5-7.6	
DOC	mg L ⁻¹	-	27-221	21.7	47-469	10.8	48-443	22.8	63-582	
TN	mg L ⁻¹	-	2.7-33	16.2	0.9-47	13.3	0.8--44	21.7	1.2-58	
N-NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	-	0.01-25	11.7	35-60	8.7	18-43	19.8	52-212	
P-PO ₄ ⁻³	mg L ⁻¹	-	0.01-0.3	0.1	0.07-27	0.2	0.05-42	0.2	0.1-6.4	
SO ₄ ⁻²	mg L ⁻¹	-	115-261	68	123-467	56	121-428	67	128-426	
HCO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	-	47-294	209	110-471	150	95-402	385	191-826	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΩΝ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΑΝ ΣΤΟΝ ΑΓΡΟ

Urtica cfr. *dioica* (fam. ASTERACEAE)



Picris (*Helminthotheca*) *echioides* (fam. ASTERACEAE)



Malva sylvestris (fam. MALVACEAE)



Sonchus oleraceus (fam. ASTERACEAE)



Mercurialis annua (fam. EUPHORBIACEAE) & *Sonchus oleraceus* (fam. ASTERACEAE)



Senecio vulgaris (fam. ASTERACEAE)



Hypochoeris sp. or *Crepis* sp. (fam. ASTERACEAE)



Malva sylvestris (fam. Malvaceae)



Urtica sp. (fam. URTICACEAE)



Mercurialis annua (fam. EUPHORBIACEAE) & *Lactuca* cfr. *virosa* (fam. ASTERACEAE)



Mercurialis annua



Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής έχουν δημοσιευθεί τα παρακάτω:

Συμμετοχές σε συνέδρια

1. M. Kotronakis, N. Kourgialas, F. Stamati, N. Paranychianakis, N. Nikolaidis, N. Kalogerakis, "Evolution of soil carbon and aggregate formation after addition of compost amendments", 5th Bioremediation, July 4-7, 2011 in Chania, Crete, Greece.
2. Stamati, F.E., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychianakis, N., Kalogerakis, N., Nikolaidis N. Modeling carbon sequestration potential in Cretan soils. 5th Bioremediation Conference, July 4-7, 2011 in Chania, Crete, Greece.
3. M. Kotronakis, N. Paranychianakis, and N. Nikolaidis. "Impact of organic amendments on soil structure and fertility". Eurosoil2012 July 2-4, Bari, Italy, 2012.
4. Vavlas N.C., Nikolaidis N.P., Paranychianakis N. and Kotronakis M., "Modeling of soil structure and soil carbon sequestration in intensively cultivated fields using organic amendments", Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment, Skiathos Island, Greece, pp. 377-384, 2014.
5. Nikolaidis N. P., Valstar J., Rowe E. C., Moirogiorgou K., Kotronakis M., Giannakis G., Panakoulia S., Paranychianakis N. and Stamati F.E., " Modeling Soil Functions and Ecosystem Services with the Integrated Critical Zone Model", Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment, Skiathos Island, Greece, pp. 1344-1349, 2014.

Δημοσιεύσεις

6. M. Kotronakis, G.V. Giannakis, N.P. Nikolaidis, E.C. Rowe, J. Valstar, N.V. Paranychianakis, S.A. Banwart, "Modeling the Impact of Carbon Amendments on Soil Ecosystem Functions Using the 1D-ICZ Model", Advances in Agronomy, 2017
7. G.V. Giannakis, N.P. Nikolaidis, J. Valstar, E.C. Rowe, K. Moirogiorgou, M. Kotronakis, N.V. Paranychianakis, S. Rousseva, F.E. Stamati, S.A. Banwart, "Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ)_ A Tool for Dynamic Simulation of Soil Functions and Soil Structure", Advances in Agronomy, 2017